

**SEP**

I.Q./063/98

# INSTITUTO TECNOLÓGICO de celaya

Asunto: Aprobación de Impresión  
de Tesis de Maestría

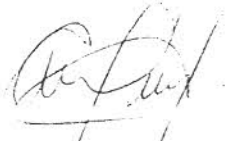
7 de mayo de 1998.

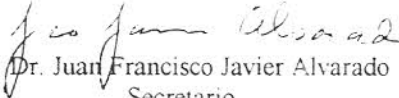
Dr. Rafael Chávez Contreras  
Jefe del Depto. de Ingeniería Química.  
Presente

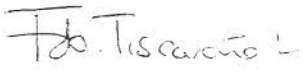
De acuerdo con la convocatoria hecha por esa Jefatura a su digno cargo con el fin de determinar la aprobación de impresión del Proyecto de Tesis de Maestría, titulado: "**REDISEÑO DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR**" presentado por el (la) **Ing. LETICIA LIMON NAVARRO**, comunico a usted que esta Comisión Revisora de tesis ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

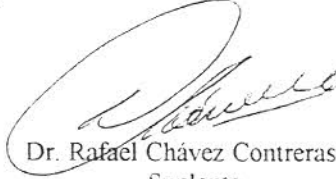
Lo anterior, para los efectos consiguientes.

Atentamente

  
Dr. Arturo Jiménez Gutiérrez  
Presidente

  
Dr. Juan Francisco Javier Alvarado  
Secretario

  
Dr. Fernando Tiscareño Lechuga  
Vocal

  
Dr. Rafael Chávez Contreras  
Suplente

\*llc



## DEDICATORIAS

Desde lo más profundo de mi corazón, con todo mi amor:

A mis padres: Ma. Amparo Navarro González y Juan Antonio Limón Rubalcava.

A mis hermanos: Blanca Evelia, Juan Antonio, Efren, Nancy Viridiana y Juan Pablo siempre estarán conmigo.

A mi sobrina: Ana Sarai.

A todos mis tíos: Chela, Ofelia, Miguel, Cande, Josefina, Juan, Carlos, Raquel, Clava, Guadalupe y a todos mis primos.

A mis abuelos: Juan Antonio, Josefina, San Juana y mi tía Elena.

A las familias Chávez, especialmente a la Sra Juana, Gallardo G., Sánchez C., a la Sra. Hortencia y el Sr. Emilio.

A mis amigos: Cesar, Pedro, Juan Ramón, Las Chonitas, Juan Luis Sánchez, Alejandra V, Alejandra G, Manuel y Lupita, Alejandro y Graciela, muy especialmente para ustedes Julio, Mauricio y Jose Luis por los momentos que disfrutaron conmigo y con Ernesto y por su ayuda incondicional. A Raquel, Claudia, Sandra Citlaly, Moni, Jose Juan, Juan Pablo, Norma, Lolis, Juan Barajas y Alejandro Estrada, gracias por sus consejos y paciencia.

A mis compañeros de generación y de toda la maestría: Angel, Vladimir, Martin, Adrian, Sandra Culebro, Argentina, Raúl, Arturo, Alejandro, Gerardo, Jacinto, Alberto, Cristobal, Marisol, Paco, Toño, Silvia, Valentin, Eriberto, Lalo, Salomon, Zoila, especialmente a Lidia, Rocio y Blanca.

A mis profesores por su ejemplo: Salvador Hernández, Agustín Uribe y Juan Carlos Baltazar.

A ti Ernesto por estar a mi lado en momentos difíciles, por aceptarme como soy y sobre todo por el amor que me has dado a lo largo de todo este tiempo. Te quiero mucho.

Un amigo fiel es un apoyo seguro,  
el que lo encuentra encuentra un tesoro.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por iluminar mi sendero y permitirme llegar a esta etapa de mi vida.

A mi asesor: Dr Arturo Jiménez por su invaluable apoyo en la realización de este proyecto y por toda la confianza que deposito en mí, gracias Dr.

A los miembros del comité revisor: Dr Fco Javier Alvarado, Dr. Fernando Tiscareño Lechuga y Dr. Rafael Chávez, por sus valiosos y acertados comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al MC. Medardo Serna por su apoyo técnico principalmente con el programa TARGETVISION.

A los doctores Ramiro Rico, Guillermo González, Alejandro Gómez, Pedro Quintana, Alberto Ochoa, Javier Alvarado, Fernando Tiscareño y a la Dra. Cristina Coronado, por compartir conmigo sus conocimientos.

A la Ing Leticia Villagómez por su amabilidad y ayuda, gracias Lety.

Al departamento de Ingeniería Química por el apoyo brindado. A las secretarias Lorena, Julia Gloria y especialmente a Erendira.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Dirección General de Institutos Tecnológicos (DGIT) por su apoyo económico para llevar a cabo este trabajo.

Uno sabe siempre lo que debe hacer,  
lo difícil es hacerlo.

# CONTENIDO

|  | Pag. |
|--|------|
| RESUMEN  | i    |
| NOMENCLATURA   | ii   |
| LISTA DE TABLAS  | iii  |
| LISTA DE FIGURAS   | vi   |
| <br>   |      |
| <b>Capítulo 1</b>  |      |
| REVISION BIBLIOGRAFICA   |      |
| 1.1    Introducción  | 1    |
| 1.2    Método del punto de pliegue   | 3    |
| 1.3    Método para el rediseño de redes de intercambio de calor  | 6    |
| 1.4    Algoritmos para la predicción del área mínima de transferencia  | 9    |
| <br>   |      |
| <b>Capítulo 2</b>  |      |
| INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCION DE LOS COEFICIENTES DE<br>TRANSFERENCIA CALOR SOBRE LA PREDICCION DE AREAS MINIMAS |      |
| 2.1    Caso de estudio   | 19   |
| 2.2    Metodología   | 20   |
| 2.3    Discusión de resultados   | 24   |
| 2.4    Conclusiones  | 25   |
| <br>   |      |
| <b>Capítulo 3</b>  |      |
| REAJUSTE DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR CON<br>COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR CONSTANTES               |      |
| 3.1    Definición de la red para el Caso 3.1   | 26   |
| 3.2    Determinación de área y servicios mínimos   | 27   |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.3 | Localización de la red existente                                  | 28 |
| 3.4 | Determinación de objetivos económico-energéticos para el Caso 3.1 | 29 |
| 3.5 | Diseño revisado de la red   | 33 |
|     | 3.5.1 Eficiencia  | 36 |
|     | 3.5.2 Inversión adicional   | 36 |
| 3.6 | Discusión de resultados   | 38 |
| 3.7 | Conclusiones  | 39 |

## Capítulo 4

### DETERMINACION DE OBJETIVOS ECONOMICO-ENERGETICOS PARA EL REDISEÑO DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.1 | Definición del problema de rediseño                            | 40 |
| 4.2 | Determinación del área mínima y servicios mínimos del Caso 4.1 | 42 |
| 4.3 | Eficiencia, inversión y ahorro potencial                       | 43 |
| 4.4 | Determinación de objetivos                                     | 45 |
| 4.5 | Tiempo mínimo de recuperación                                  | 49 |
|     | 4.5.1 Análisis gráfico   | 49 |
|     | 4.5.2 Análisis matemático                                      | 50 |
| 4.6 | Conclusiones   | 54 |

## Capítulo 5

### REDISEÑO DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR CON COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR VARIABLES

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5.1 | Temperatura del punto de pliegue                | 55 |
| 5.2 | Diseño revisado de la red                       | 57 |
| 5.3 | Eficiencia, inversión y tiempo de recuperación  | 61 |
| 5.4 | Comprobación de objetivos económico-energéticos | 63 |
| 5.5 | Conclusiones                                    | 65 |

## Capítulo 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

|     |                 |    |
|-----|-----------------|----|
| 6.1 | Conclusiones    | 79 |
| 6.2 | Recomendaciones | 80 |

|                     |    |
|---------------------|----|
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> | 81 |
|---------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| <b>APENDICE A</b> | 84 |
|-------------------|----|

|                   |    |
|-------------------|----|
| <b>APENDICE B</b> | 96 |
|-------------------|----|

|                   |     |
|-------------------|-----|
| <b>APENDICE C</b> | 102 |
|-------------------|-----|

|                   |     |
|-------------------|-----|
| <b>APENDICE D</b> | 122 |
|-------------------|-----|

# REDISEÑO DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR

Por: Leticia Limón Navarro

## RESUMEN

La metodología del punto de pliegue puede aplicarse tanto para el diseño como para el rediseño de redes de intercambio de calor. El objetivo del diseño es obtener la red más económica respecto al costo total anual, mientras que el rediseño pretende utilizar más eficientemente la red existente, generando un nuevo sistema que permita el máximo ahorro posible de energéticos con un mínimo de inversión. La metodología presentada por Tjoe y Linnhoff (1986) considera que la relación entre el área mínima y el área existente (eficiencia de la red) permanece constante y establece el  $\Delta T_{min}$  de rediseño fijando el monto de la inversión o el tiempo de recuperación.

En el presente trabajo se realizó el análisis de varias redes de intercambio de calor existentes tomando como base la metodología de Tjoe y Linnhoff. El análisis consistió en el establecimiento de objetivos a nivel de predicción y la realización del diseño revisado de las redes para corroborar los objetivos propuestos.

La etapa de determinación de objetivos económico-energéticos juega un papel muy importante en el rediseño de redes, ya que en esta etapa se establece la diferencia mínima de temperatura a la cual se llevará a cabo el rediseño de la red. Los resultados del análisis de las redes permitieron visualizar una forma diferente de establecer los objetivos económico-energéticos a la sugerida por la metodología de Tjoe y Linnhoff antes de realizar el rediseño. Se encontró que el tiempo de recuperación como parámetro de compromiso entre la inversión adicional y el ahorro potencial puede presentar un punto mínimo. Este tiempo mínimo de recuperación definiría el mejor compromiso que puede existir entre el costo capital (inversión adicional) y el costo de operación (ahorro potencial). Semejante al diseño de redes donde se establece el  $\Delta T_{min}$  de diseño correspondiente al menor costo total anual, para el rediseño la existencia del tiempo mínimo de recuperación podría permitir establecer como el  $\Delta T_{min}$  de rediseño el  $\Delta T_{min}$  correspondiente a este punto mínimo.

Dirigida por: Dr. Arturo Jiménez Gutiérrez

## Nomenclatura

|                    |   |
|--------------------|---|
| $A_{min}$          | área mínima de transferencia  |
| a,b,c              | parámetros para la estimación del costo de equipo (intercambiadores).                                 |
| d, e               | parámetros para la estimación del costo de servicios.   |
| C                  | constante   |
| $C_c$              | costo de los servicios de enfriamiento  |
| $C_h$              | costo de los servicios de calentamiento   |
| $C_{p_H}$          | flujo de la capacidad calorífica de las corrientes calientes  |
| $C_{p_C}$          | flujo de la capacidad calorífica de las corrientes frías  |
| $h_i$              | coeficiente de transferencia de calor de película   |
| k, z               | parámetros de la diferencia de temperatura de contribución de la corriente j                          |
| NH                 | número de corrientes calientes  |
| NC                 | número de corrientes frías  |
| $q_{k,j}$          | carga térmica de la corriente k en el intervalo j   |
| $Q_h$              | servicios de calentamiento de la red existente  |
| $Q_c$              | servicios de enfriamiento de la red existente   |
| $Q_{hmin}$         | servicios mínimos de calentamiento  |
| $Q_{cmin}$         | servicios mínimos de enfriamiento   |
| $Q_k$              | carga térmica del intervalo k   |
| $S_i$              | número de corriente en el i-esimo intervalo   |
| $T_{cc}$           | temperatura corregida   |
| $T_{cc_h}$         | temperatura corregida de una corriente caliente   |
| $T_{cc_c}$         | temperatura corregida de una corriente fría   |
| $T_{pliegue}$      | temperatura del punto de pliegue global   |
| $T_{pliegue_i}$    | temperatura en el punto de pliegue de la corriente i  |
| U                  | coeficiente global de transferencia   |
| $\alpha$           | relación entre el área existente y el área mínima   |
| $\Delta H$         | cambio de entalpia  |
| $\Delta T$         | diferencia de temperatura   |
| $\Delta T_j$       | diferencia de temperatura de contribución de la corriente j   |
| $\Delta T_{min}$   | diferencia mínima de temperatura que debe existir en un intercambio                                   |
| $\Delta T_{min_i}$ | diferencia mínima de temperatura para la corriente i  |
| $\Delta T_{ML}$    | diferencia de temperatura media logarítmica   |
| $\Delta T_s$       | diferencia de temperatura de contribución de las corrientes del concepto del punto de pliegue diverso |



## Lista de Tablas

| <b>Tabla</b> |  | <b>Página</b> |
|--------------|--|---------------|
| 2.1          | Datos generales para todos los casos de estudio.   | 20            |
| 2.2          | Distribución de los coeficientes de transferencia de película para los casos de estudio, $h_j$ .   | 20            |
| 2.3          | Áreas mínimas balanceadas y proceso-proceso calculadas a partir de la fórmula Bath y servicios mínimos de calentamiento y enfriamiento para el Caso 2.2        | 21            |
| 2.4          | Valores de $k$ para los diferentes valores de $z$ correspondientes a los $\Delta T_{\min}$ globales para el Caso 2.2.  | 22            |
| 2.5          | Áreas mínimas balanceadas y proceso-proceso del Caso 2.2.  | 22            |
| 2.6          | Porcentaje de desviación en la predicción del área mínima por las fórmulas Bath diversa y Bath diversa modificada respecto a la fórmula Bath para el Caso 2.2. | 23            |
| 3.1          | Datos generales de la red de intercambio de calor existente para el Caso 3.1.  | 26            |
| 3.2          | Datos de los intercambiadores de la red existente (Caso 3.1), área de transferencia, carga térmica, temperaturas de entrada y salida                           | 27            |
| 3.3          | Requerimientos mínimos de servicios y área de transferencia balanceada y de proceso-proceso para la red del Caso 3.1.  | 28            |
| 3.4          | Inversión adicional y ahorro potencial para el rediseño de la red (Caso 3.1) a diferentes valores de $\Delta T_{\min}$ .                                       | 31            |
| 3.5          | Área de transferencia de los intercambiadores del rediseño de la red, Caso 3.1.  | 35            |
| 3.6          | Resultados del área adicional y de rediseño proceso-proceso para los diferentes $\Delta T_{\min}$ para el Caso 3.1.  | 36            |
| 3.7          | Resultados de la relación entre área mínima y área de reajuste para los diferentes $\Delta T_{\min}$ del Caso 3.1.   | 37            |
| 3.8          | Resultados de la inversión adicional proceso-proceso del rediseño a diferentes $\Delta T_{\min}$ para el Caso 3.1.   | 37            |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.1 | Datos de los intercambiadores de la red existente (Caso 4.1.) área de transferencia, carga térmica, temperaturas de entrada y salida de las corrientes | 41 |
| 4.2 | Requerimientos mínimos energéticos y valores de $k$ para $z = 1$ del Caso 4.1.   | 43 |
| 4.3 | Area mínima de transferencia proceso-proceso y balanceada predicha por la fórmula Bath diversa modificada (propuesta por Serna) para el Caso 4.1.      | 43 |
| 4.4 | Area de reajuste proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.1.                 | 44 |
| 4.5 | Area adicional proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.1.                   | 45 |
| 4.6 | Tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso y balanceada del Caso 4.1.  | 47 |
| 4.7 | Valores de la ordenada al origen $c$ y de la pendiente $d$ de la Ecuación 4.6 para el Caso 4.1.  | 51 |
| 4.8 | Evaluación de la primera derivada del tiempo de recuperación con respecto al $\Delta T$ para el Caso 4.1.  | 52 |
| 5.1 | Temperaturas del punto de pliegue para cada corriente correspondientes a los diferentes $\Delta T_{\min}$ globales del Caso 4.1.                       | 56 |
| 5.2 | Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a un $\Delta T_{\min}$ global de $20^{\circ}\text{C}$ para el Caso 4.1.        | 60 |
| 5.3 | Area de rediseño y adicional proceso-proceso e incluyendo servicios auxiliares a diferentes valores de $\Delta T_{\min}$ globales para el Caso 4.1.    | 61 |
| 5.4 | Eficiencia de la red rediseñada respecto al área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada para el Caso 4.1.                              | 62 |
| 5.5 | Ahorro potencial, inversión adicional y tiempo de recuperación después del rediseño para el Caso 4.1.  | 63 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.6  | Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 35°C para el Caso 4.1. | 73 |
| 5.7  | Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 30°C para el Caso 4.1. | 74 |
| 5.8  | Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 25°C para el Caso 4.1. | 75 |
| 5.9  | Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 15°C para el Caso 4.1. | 76 |
| 5.10 | Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 10°C para el Caso 4.1. | 77 |
| 5.11 | Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 5°C para el Caso 4.1.  | 78 |

## Lista de Figuras

| <b>Figura</b>  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| 1.1 Diseño <i>espagueti</i> de un intervalo de entalpia de las curvas compuestas balanceadas.  | 11            |
| 1.2 Intercambio vertical y cruzado entre corrientes de proceso con coeficientes de transferencia de calor de película diferentes.  | 12            |
| 1.3 Efecto de las $\Delta T$ s de contribución sobre las temperaturas en el borde del intervalo de entalpia.   | 13            |
| 3.1 Diagrama de rejilla de la red existente para el Caso 3.1.  | 27            |
| 3.2 Dependencia del área de transferencia mínima y de rediseño balanceada respecto a los servicios mínimos para el Caso 3.1.   | 30            |
| 3.3 Dependencia del área de transferencia mínima y de rediseño proceso-proceso respecto a los servicios mínimos para el Caso 3.1.  | 30            |
| 3.4 Ahorro potencial en función de la inversión adicional balanceada considerando $\alpha$ constante para el Caso 3.1.   | 32            |
| 3.5 Ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso considerando $\alpha$ constante para el Caso 3.1.  | 32            |
| 3.6 Diagrama de rejilla considerando el punto de pliegue para el Caso 3.1.   | 33            |
| 3.7 Diagrama de rejilla de la red existente desatada para el Caso 3.1.   | 34            |
| 3.8 Diagrama de rejilla del reajuste por arriba del punto de pliegue para el Caso 3.1.   | 34            |
| 3.8 Diagrama de rejilla del reajuste de la red por debajo del punto de pliegue para el Caso 3.1.   | 35            |
| 3.10 Diagrama de rejilla del rediseño final de la red a un $\Delta T_{\min}$ de 20 °C para el Caso 3.1.  | 35            |
| 3.11 Comparación de la eficiencia de la red obtenida del rediseño respecto a la eficiencia de la red existente correspondiente al área proceso-proceso para el Caso 3.1. | 37            |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.12 | Comparación del ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso obtenido del rediseño respecto al predicho considerando que la eficiencia es constante para el Caso 3.1. | 38 |
| 4.1  | Diagrama de rejilla de la red existente del Caso 4.1.  | 41 |
| 4.2  | Ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso para el Caso 4.1.  | 46 |
| 4.3  | Tendencia esperada del tiempo de recuperación en función del $\Delta T_{min}$ (Tjoe y Linnhoff).   | 47 |
| 4.4  | Ahorro potencial e inversión adicional de equipo proceso-proceso en función $\Delta T_{min}$ para el Caso 4.1.   | 48 |
| 4.5  | Ahorro potencial e inversión adicional de equipo incluyendo servicios auxiliares en función $\Delta T_{min}$ para el Caso 4.1.   | 48 |
| 4.6  | Logaritmo natural de la inversión en función del $\Delta T_{min}$ para el Caso 4.1.  | 50 |
| 4.7  | Tiempo de recuperación de la inversión del equipo proceso-proceso en función del $\Delta T_{min}$ para el Caso 4.1.  | 53 |
| 4.8  | Tiempo de recuperación de la inversión incluyendo el equipo de servicios auxiliares en función del $\Delta T_{min}$ para el Caso 4.1.  | 53 |
| 5.1  | Diagrama de rejilla de la red existente respecto a las temperaturas del punto de pliegue correspondientes al $\Delta T_{min}$ global de 20°C para el Caso 4.1.                                 | 57 |
| 5.2  | Diagrama de rejilla del rediseño de la red por arriba del punto de pliegue para un $\Delta T_{min}$ global de 20 °C del Caso 4.1.  | 58 |
| 5.3  | Diagrama de rejilla del rediseño de la red por abajo del punto de pliegue de para un $\Delta T_{min}$ de 20 °C global del Caso 4.1.  | 58 |
| 5.4  | Diagrama de rejilla del rediseño final de la red correspondiente a un $\Delta T_{min}$ global de 20 °C del Caso 4.1.   | 59 |
| 5.5  | Comparación de la eficiencia del rediseño de la red respecto a la de la red existente para el Caso 4.1, correspondiente al área proceso-proceso.   | 66 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.6  | Comparación de la eficiencia del rediseño de la red respecto a la de la red existente para el Caso 4.1, correspondiente al área balanceada.                              | 66 |
| 5.7  | Comparación del ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.1.                       | 67 |
| 5.8  | Comparación del ahorro potencial en función de la inversión adicional balanceada obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.1.                            | 67 |
| 5.9  | Comparación del ahorro potencial e inversión adicional proceso-proceso en función del $\Delta T_{min}$ obtenidos del rediseño respecto a los predichos para el Caso 4.1. | 68 |
| 5.10 | Comparación del ahorro potencial e inversión adicional balanceada en función del $\Delta T_{min}$ obtenidos del rediseño respecto a los predichos para el Caso 4.1.      | 68 |
| 5.11 | Comparación del tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso en función del $\Delta T_{min}$ obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.1.      | 69 |
| 5.12 | Comparación del tiempo de recuperación de la inversión balanceada en función del $\Delta T_{min}$ obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.1.           | 69 |
| 5.13 | Diagrama de rejilla del diseño revisado final de la red a 35 °C para el Caso 4.1.  | 70 |
| 5.14 | Diagrama de rejilla del diseño revisado final de la red a 30 °C para el Caso 4.1.  | 70 |
| 5.15 | Diagrama de rejilla del diseño revisado final de la red a 25 °C para el Caso 4.1.  | 71 |
| 5.16 | Diagrama de rejilla del diseño revisado final de la red a 15 °C para el Caso 4.1.  | 71 |
| 5.17 | Diagrama de rejilla del diseño revisado final de la red a 10 °C para el Caso 4.1.  | 72 |
| 5.18 | Diagrama de rejilla del diseño revisado final de la red a 5 °C para el Caso 4.1.   | 72 |

# Capítulo 1

## REVISION BIBLIOGRAFICA

### 1.1 Introducción

El incremento en el costo de los hidrocarburos y su naturaleza no renovable ha impulsado la investigación dentro del campo de la integración de energía a partir de los años setentas. El problema de integración de energía está constituido por un grupo de corrientes calientes y frías de proceso, que requieren ser enfriadas y calentadas respectivamente. El objetivo que persigue la integración de energía es minimizar el costo de operación y de capital del proceso, aprovechando la energía disponible del grupo de corrientes.

A finales de los años setentas, el descubrimiento del punto de pliegue como el cuello de botella para el ahorro de energía incrementó el esfuerzo, tanto académico como industrial, en el desarrollo y aplicación de métodos sistemáticos para la síntesis de redes de intercambio de calor. La idea fundamental del método del punto de pliegue es agregar calor por encima y removerlo por debajo del punto de pliegue (Linnhoff y Flower, 1978 y Linnhoff y col., 1979).

La aplicación original de la metodología del punto de pliegue se enfocó al diseño de redes de intercambio de calor. Sin embargo, posteriormente comenzó a tomar interés el uso de este método para realizar modificaciones a redes existentes. Por lo tanto, se pueden distinguir dos categorías en la aplicación de la metodología del punto de pliegue, diseño y rediseño. El principal objetivo del rediseño de redes es reducir el consumo de servicios auxiliares utilizando lo más eficientemente posible el área existente. El presente trabajo está orientado en la dirección del rediseño de redes de intercambio de calor.

La predicción del área mínima de transferencia juega un papel muy importante en la etapa de pre-optimización para el diseño de redes de intercambio de calor, ya que en base a esta área se predice el costo capital de la red antes de diseño. En la etapa de pre-optimización se establece el  $\Delta T_{min}$  de diseño correspondiente al mejor compromiso entre el costo de operación y de capital, es decir, al menor costo total anual. La etapa de determinación de

objetivos en el rediseño de redes es el equivalente a la etapa de pre-optimización en el diseño, sólo que el  $\Delta T_{\min}$  de rediseño se establece en base al compromiso entre la inversión adicional y el ahorro potencial.

Los estudios enfocados al desarrollo de fórmulas para predecir el área mínima global de transferencia de calor de la red han constituido una importante línea de investigación dentro del área de integración de energía. Varios investigadores han resaltado la influencia que tienen los coeficientes de transferencia de calor sobre la determinación del área mínima. Esto ha llevado al desarrollo de varias fórmulas que permiten predecir el área mínima, tales como la fórmula Bath (Townsend y Linnhoff, 1984), la Bath diversa (Rev y Fonyo, 1991) y la Bath diversa modificada (Serna, 1998).

El objetivo general de este trabajo consiste en realizar un estudio detallado del rediseño de redes de intercambio de calor, tomando como base la metodología propuesta por Tjoie y Linnhoff. El estudio incluye analizar el efecto del  $\Delta T_{\min}$  sobre rediseño, encontrar las tendencias de los resultados económicos que permitan establecer mejores reglas para la determinación de objetivos económico-energéticos y corroborar los objetivos con los resultados obtenidos al llevar a cabo el rediseño.

El método del punto de pliegue, la metodología de rediseño de redes de Tjoie y Linnhoff y las fórmulas más utilizadas para la predicción del área mínima se describen en secciones posteriores de este capítulo.

En el Capítulo 2 se realiza un estudio acerca de la influencia de la diferencia del orden de magnitud y la distribución de los coeficientes de transferencia de calor en los resultados de tres métodos disponibles para la predicción del área mínima. Se determina el área mínima de transferencia para diferentes valores de  $\Delta T_{\min}$  y diferentes casos de estudio, utilizando las fórmulas Bath, Bath diversa y Bath diversa modificada. Los resultados de este estudio permitirán escoger la fórmula más adecuada para la predicción del área mínima de transferencia de la red, en función de los valores de los coeficientes de transferencia de calor de las corrientes.

En los Capítulos 3, 4 y 5 se desarrolla la parte central de este trabajo. En el Capítulo 3 se presenta el rediseño de redes de intercambio de calor existentes cuyas corrientes poseen



coeficientes de transferencia de calor constantes. El rediseño de las redes corroborará los objetivos económico-energéticos predichos al considerar que la eficiencia de la red permanece constante. A diferencia de las redes de intercambio de calor estudiadas en el Capítulo 3, las corrientes que forma las redes de intercambio de calor existentes, presentadas como caso de estudio en los Capítulos 4 y 5, poseen coeficientes de transferencia de calor variables, lo cual refleja situaciones más apegadas a la realidad. En el Capítulo 4 se analiza detalladamente la etapa de determinación de objetivos económico-energéticos para el rediseño, mientras que en el Capítulo 5 se lleva a cabo el rediseño con la finalidad de corroborar los objetivos establecidos en el capítulo anterior. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones generales del trabajo se presentan en el Capítulo 6.

## 1.2 Método del punto de pliegue

El problema de síntesis de redes de intercambio de calor fue inicialmente transformado a un modelo matemático para después resolverlo por métodos numéricos. Se han propuesto una serie de métodos sistemáticos para resolver el problema de integración (Gundersen y Naess, 1990). Hohmann en 1971 desarrolló el primer camino riguroso para establecer el objetivo de servicios mínimos antes de llevar a cabo el diseño de la red. Además, estableció el número mínimo de intercambiadores en una red como el número de corrientes menos uno. Una parte importante del trabajo de Hohmann es la demostración del rango de factibilidad en el que se puede establecer una red de intercambio de calor. Por estas mismas fechas se establecieron dos reglas heurísticas para la selección de los posibles intercambios, es decir, para diseñar la red (Rudd y col., 1973):

- 1.- No especificar un intercambiador si no existe entre las corrientes cuando menos una diferencia de temperatura definida como  $\Delta T_{\min}$ .
- 2.- El primer intercambio debe darse entre las corrientes más calientes a enfriarse y la parte más caliente de cualquier corriente fría a calentarse.

Siguiendo estas reglas heurísticas y con la ayuda de los diagramas de contenido de calor (Itoh y col., 1986) se presenta una manera muy clara de entender la lógica de la solución

del problema de integración de energía. El diagrama se genera al trazar el  $C_p$  de la corriente contra el  $\Delta T$ , de tal forma que el área de cada bloque representa la cantidad de energía disponible para transferir. El método del punto de pliegue es un procedimiento sistemático, basado en principios termodinámicos, que permite atacar el problema de integración de energía identificando el mayor grado de recuperación como una función de la diferencia de temperatura mínima entre las corrientes que intercambian calor. Esta metodología trata de minimizar los requerimientos energéticos, área de transferencia y número de unidades acercándose al sistema de mínimo costo total, de tal forma que el  $\Delta T_{\min}$  de diseño debe proporcionar el mejor compromiso entre los costos de servicios y el costo del equipo. El procedimiento de diseño no es riguroso, sino que permite hacer elecciones según el criterio del diseñador, ya que una vez diseñada la red se plantean criterios heurísticos con la finalidad de encontrar la red que cumpla con los objetivos de costo de operación y capital mínimos.

La metodología del punto de pliegue (Linnhoff y Tuner, 1981) consiste básicamente en las siguientes etapas:

1. Establecer las características del problema: a) la temperatura de las corrientes frías y calientes, b) las capacidades caloríficas de las corrientes y c) el  $\Delta T_{\min}$  de transferencia.
2. Ajustar las temperaturas de las corrientes calientes restando a cada una de ellas el  $\Delta T_{\min}$  especificado.
3. Realizar los balances de energía en cada uno de los intervalos de temperatura.
4. Formar la cascada de calor desde la mínima hasta la máxima temperatura. Desde la temperatura más caliente, la más fría y el  $\Delta T_{\min}$ , se divide el rango de temperaturas. Se analizan las subcorrientes, de manera que sea factible la transferencia de calor entre las subcorrientes de más alta temperatura y la de la mínima temperatura.
5. Suponer como primera aproximación que el flujo de calor fuente en el extremo es cero; se evalúan los flujos de calor desde el nivel inicial a  $T_i$  a un  $T_{i+1}$ . En caso de obtenerse valores negativos se estaría violando la segunda ley de la termodinámica, por lo cual se agrega calor de una fuente externa igual al valor más altamente negativo.
6. Localizar el punto de pliegue. El punto donde el flujo de calor en la cascada es cero proporciona el punto crítico de transferencia de calor, conocido como punto de pliegue. El

punto de pliegue divide al problema en dos regiones: una donde únicamente se requiere calentamiento y otra donde se requiere enfriamiento. A partir de la localización del punto de pliegue surgen tres criterios:

- No debe existir transferencia de calor que cruce el punto de pliegue.
- Por arriba del punto de pliegue existe únicamente suministro de calor.
- Por debajo del punto de pliegue existe únicamente eliminación de calor, es decir, enfriamiento.

La violación a cualquiera de estos principios trae como consecuencia el aumento de los requerimientos energéticos.

7. Diseñar cada una de las regiones por separado. El diseño de los dos problemas por separado comienza desde el punto de pliegue hacia los extremos identificando los principales intercambios entre las corrientes. Los criterios de factibilidad permiten identificar los principales intercambios, así como también la necesidad de división de corrientes. Lirnhoff y Hindmarsh (1983) presentaron tres criterios de factibilidad.

- El primero está relacionado con el número de corrientes calientes y frías en las dos zonas: Para la zona por arriba del punto de pliegue tiene que cumplirse que  $N_H \leq N_C$ , y por debajo del punto de pliegue debe cumplirse que  $N_H \geq N_C$ . Si no se cumple este criterio se requerirá que las corrientes calientes o frías se dividan según sea el caso.
- El segundo criterio está relacionado con la temperatura, para asegurar que no existan violaciones de la diferencia mínima de temperatura en un intercambio debe cumplirse con:  
Por arriba del punto de pliegue:  $C_{p_H} \leq C_{p_C}$   
Por debajo del punto de pliegue:  $C_{p_H} \geq C_{p_C}$
- El tercer criterio establece que para completar el diseño debe cumplirse que la diferencia de  $C_p$  entre las corrientes que intercambian calor sea menor que la diferencia global de la suma de  $C_p$  de las corrientes calientes y frías en ambas partes del punto de pliegue.

$$\text{Por arriba del punto de pliegue: } (C_{p_C} - C_{p_H}) \leq \sum_i^{nc} C_{p_C} - \sum_i^{nh} C_{p_H}$$

$$\text{Por debajo del punto de pliegue: } (C_{p_H} - C_{p_C}) \leq \sum_i^{nh} C_{p_H} - \sum_i^{nc} C_{p_C}$$

8. Retomar el problema y determinar el costo total de la red para asegurarse de tener la red con el costo mínimo, una vez establecida la cascada de intercambio de calor.

La variación del  $\Delta T_{min}$  causa una variación del área de transferencia, los requerimientos energéticos, y por lo tanto, de la estructura de la red. Así pues, es claro que el área global de transferencia, los requerimientos energéticos y el costo total anual son funciones del  $\Delta T_{min}$ . A medida que el  $\Delta T_{min}$  disminuye el área mínima de transferencia aumenta y los requerimientos energéticos disminuyen. Por lo tanto, debe encontrarse el valor del  $\Delta T_{min}$  que proporcione el mejor compromiso entre los objetivos que se plantean: minimizar el área global de transferencia, los requerimientos energéticos y el número de unidades.

El método del punto de pliegue ha sido aplicado para la integración de energía en varios procesos industriales logrando reducir su costo total anual, por ejemplo el proceso de anhídrido acético (Linnhoff y Polley 1988), diseño y reajuste de la red en el proceso de etileno (Linnhoff y Witlell, 1986) y pirólisis de gas (Barton 1989). La metodología del punto de pliegue también permite identificar cambios de proceso potencialmente importantes para disminuir el consumo de energía; Linnhoff y Smith (1988) presentan una aplicación a procesos donde existen evaporadores de múltiple efecto. El análisis de un proceso por esta metodología permite otros beneficios tales como remover los cuellos de botella e incrementar la operabilidad del proceso.

Existen procesos industriales donde es factible la integración de la energía utilizando bombas de calor. El objetivo del uso de bombas de calor en el método del pliegue es reducir los requerimientos energéticos primarios, servicios de enfriamiento y calentamiento (Farhanieh y Sunden, 1989, Townsend y Linnhoff, 1983 a y b ). Otra de las aplicaciones del principio del punto de pliegue se presenta en la integración en columnas de destilación y procesos globales (Linnhoff y col., 1983).

### **1.3 Método para el rediseño de redes de intercambio de calor**

El objetivo del diseño de una red de intercambio es obtener la red más económica con respecto al costo total anual. Durante el diseño se evalúa la recuperación energética contra el

costo capital. Cuando se habla de rediseño o reajuste se pretende reducir el consumo de energía del sistema existente, incrementando su eficiencia y añadiendo el mínimo equipo necesario. El reajuste podría plantearse de manera que se obtuviera una red óptima, lo cual llevaría a una estructura de la red completamente diferente. Por lo tanto, se requeriría la instalación de intercambiadores de calor de dimensiones diferentes y como consecuencia aumentaría significativamente el costo de la inversión. El reajuste pretende utilizar más eficientemente la red existente, generando un nuevo sistema que permita el máximo ahorro posible en servicios con un mínimo de inversión, cumpliendo con restricciones impuestas tales como inversión disponible, tiempo de recuperación de la inversión y operabilidad de la red.

Las decisiones requeridas en el rediseño de redes incluyen modificaciones apropiadas en la estructura de las redes, cambios en el número, tipo y área de transferencia de los intercambiadores, reasignaciones de las corrientes que intercambian calor y modificaciones en la instalación de las tuberías. El número de opciones que se presentan, los requerimientos de automatización, la complejidad y reducción del tiempo en la toma de decisiones hacen palpable la necesidad de una metodología apropiada para tratar este tipo de problemas. Los métodos actualmente utilizados para el rediseño de redes siguen dos escuelas principalmente; la primera está basada en principios termodinámicos y la segunda en algoritmos matemáticos.

En la industria los métodos matemáticos de programación son menos aceptados que los métodos termodinámicos, debido a la complejidad de los modelos matemáticos utilizados en la solución del problema (Asante y Zhu, 1996). Además las no linealidades y la naturaleza del problema de optimización involucrado no garantizan la calidad del diseño final. No obstante, estos métodos proveen una alternativa para el rediseño de redes, en forma de modelos matemáticos que pueden ser optimizados.

Los métodos termodinámicos utilizan los principios de la tecnología del punto de pliegue (Linnhoff y Flower, 1978) para determinar objetivos económico-energéticos y posteriormente aplican reglas simples que permitan proponer un diseño final que cumpla con dichos objetivos. La metodología de rediseño propuesta por Tjoe y Linnhoff (1986), basada en el concepto del punto de pliegue, aplica el concepto de eficiencia de la red respecto al área de transferencia y predice el compromiso entre los costos capitales (inversión adicional) y

energéticos (ahorro potencial), considerando que la eficiencia del rediseño de la red permanece constante e igual a la eficiencia de la red existente. La metodología se puede dividir en dos etapas: la primera consiste en la definición de la red de intercambio de calor existente y el establecimiento de objetivos económico-energéticos para definir un valor de  $\Delta T_{\min}$  apropiado para el rediseño; la segunda etapa involucra el diseño revisado de la red, el cual consiste en la identificación y eliminación de los intercambiadores que cruzan el punto de pliegue, la colocación de nuevos intercambiadores, el reuso de los intercambiadores existentes eliminados y finalmente la evolución de posibles cambios que permitan llegar a los objetivos económico-energéticos planteados. En seguida se describen más detalladamente estas etapas.

La localización de la red y la determinación de objetivos consisten básicamente en los siguientes pasos:

1. Análisis de la red existente

- Trazar el diagrama de rejilla o malla para la red existente.
- Calcular el área total existente.
- Determinar el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento.

2. Obtención de los objetivos energéticos y del área para redes de máxima recuperación de energía para diferentes valores de  $\Delta T_{\min}$ .

- Determinar los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento.
- Predecir el área mínima, utilizando la fórmula adecuada.
- Establecer el número mínimo número de unidades.
- Calcular los costos anualizados de capital y energía para cada  $\Delta T_{\min}$ , en base a las anteriores determinaciones.

3. Generación de objetivos para realizar la modificación, el rediseño.

- Se genera la curva de área mínima de transferencia respecto a los servicios mínimos.
- Se localiza el área mínima correspondiente al consumo energético actual.
- Se evalúa el factor de eficiencia de la red existente " $\alpha$ ", definido como la relación entre el área mínima correspondiente a los requerimientos energéticos actuales y el área existente.
- Se obtiene el área de rediseño considerando la eficiencia constante, a partir de la siguiente expresión,

$$A_{\text{EXISTENTE}} = A_{\text{MINIMA}} / \alpha$$

para diferentes valores de  $\Delta T_{\text{min}}$ .

- Se determina el ahorro potencial y la inversión adicional para cada valor de  $\Delta T_{\text{min}}$ .
- Se genera una gráfica de ahorro potencial contra inversión.

Considerando el tiempo de recuperación de la inversión y el monto de la inversión adicional disponible, se establecen los objetivos de área, servicios y  $\Delta T_{\text{min}}$ . Una vez establecidos los objetivos se procede al diseño revisado de la red existente, el cual consiste en los siguientes pasos:

1. Se traza el diagrama de rejilla para el sistema existente incluyendo la posición del punto de pliegue para el  $\Delta T_{\text{min}}$  de diseño. Se identifican los intercambios que cruzan el punto de pliegue.
2. Se eliminan los intercambiadores que cruzan el punto de pliegue.
3. Se reacomodan los intercambiadores descartados, de la manera más conveniente y se agregan los intercambiadores que sean necesarios.
4. Se utiliza la optimización evolutiva con lazos y rutas de calor, para que la red propuesta guarde la estructura de la red existente lo más posible.
5. Se calculan los costos de la red evolucionada y se obtienen las conclusiones del diseño de reajuste de la red existente con los objetivos propuestos.

#### **1.4 Algoritmos para la predicción del área mínima de transferencia.**

Algunos de los factores más importantes que acotan el diseño de una red de intercambio incluyen el consumo energético, el área mínima, el número mínimo de unidades y el costo total anual. Cuando se hable de área mínima de transferencia hay que distinguir entre los procedimientos que involucran la obtención de redes con área de transferencia mínima y los algoritmos para predecir el área mínima antes del diseño.

Varios investigadores han desarrollado fórmulas para la predicción del área mínima. El modelo de Hohmann (Zhu y col., 1995), Ecuación 1.1, supone intercambios verticales a contracorriente y coeficientes globales de transferencia constantes para todos los intercambios.

Sin embargo, la aplicación de este modelo está limitada al caso en que se tiene un coeficiente global de transferencia de calor,

$$A_{min} = \frac{1}{U} \sum_j \left( \frac{\Delta H}{\Delta T} \right)_j \quad (1.1)$$

donde  $\Delta H$  es cambio de entalpia y el  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura correspondientes al intervalo  $i$ . Si el coeficiente de transferencia de calor individual es diferente para cada intervalo de intercambio de calor el coeficiente global por unidad de transferencia queda definido por la Ecuación 1.2.

$$\frac{1}{U_{i,j}} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_j} \quad (1.2)$$

#### 1.4.1 Fórmula Bath

Townsend y Linnhoff (1984) introducen un nuevo algoritmo para el cálculo del área mínima. El nuevo algoritmo, conocido como fórmula Bath, involucra los coeficientes individuales de transferencia de las corrientes, Ecuación 1.3,

$$A_{min} = \sum_j^{\text{Intervalo}} \frac{1}{\Delta TML_j} \sum_k \frac{q_{k,j}}{h_k} \quad (1.3)$$

donde  $q_{k,j}$  es el flujo de calor de la corriente  $k$  en el intervalo  $j$ ,  $h_k$  es el coeficiente de transferencia de calor de la corriente  $k$  y el  $\Delta TML_j$  es la diferencia de temperatura media logarítmica del intervalo  $j$ .

El desarrollo de la fórmula Bath se basa en el diseño *espagueti*, Figura 1.1, el cual consiste en dividir la curva compuesta en intervalos de entalpia, que están definidos por cada uno de los cambios de pendiente en cualquiera de las curvas compuestas. Los intercambios de calor se dan de manera vertical, de tal forma que todas las corrientes calientes intercambian calor con todas las frías, es decir, cada corriente caliente se divide en un número de ramas igual al de corrientes frías y viceversa. Por lo tanto, el área mínima de la red involucra un gran número de divisiones e intercambiadores.

La fórmula Bath es exacta para el caso en que los coeficientes individuales de película



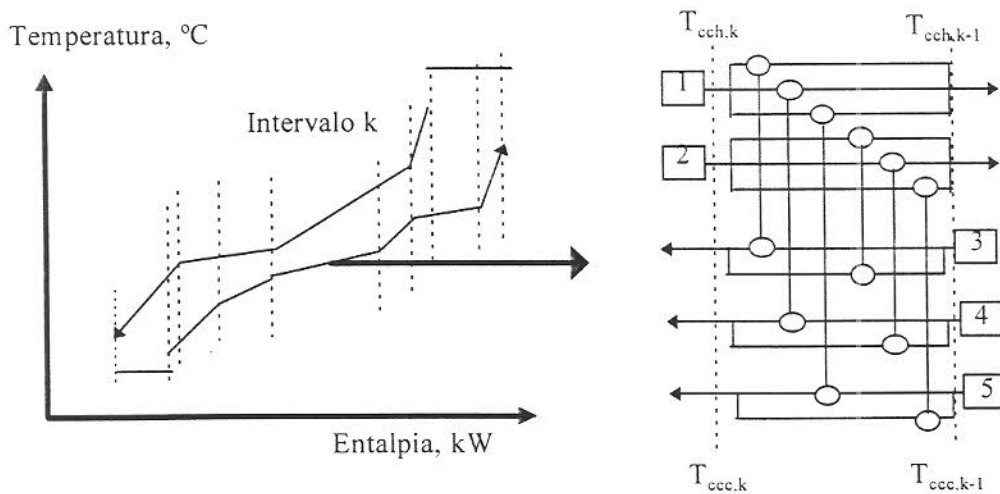


Figura 1.1 Diseño *espagueti* de un intervalo de entalpia de las curvas compuestas balanceadas.

son iguales y se consideren intercambios estrictamente verticales; sin embargo, puede dar buenas aproximaciones en otras situaciones no muy alejadas de esta idealidad. Por otro lado, es muy común encontrar corrientes de proceso cuyos coeficientes de película difieren en uno, dos o más órdenes de magnitud. Para estas situaciones el modelo de intercambio vertical no necesariamente predice el área mínima de transferencia. Linnhoff y Ahmad (1990) esquematizan esta situación como se muestra en la Figura 1.2, donde se observa la diferencia entre el área de transferencia para un intercambio vertical y un intercambio cruzado. El hecho de que exista una diferencia significativa entre los coeficientes de película provoca que el intercambio cruzado requiera una menor área de transferencia que un intercambio vertical. Este resultado se puede explicar en base a la ecuación de diseño de un intercambiador de calor, la cual involucra al coeficiente global de transferencia, Ecuación 1.2, y la diferencia de temperatura media logarítmica. El coeficiente global de transferencia será menor que el coeficiente individual de película más pequeño de las corrientes involucradas. Por otro lado, al establecer un intercambio cruzado la diferencia de temperaturas entre las corrientes que intercambian calor será mayor y esto traerá como consecuencia una reducción del área de transferencia. Por lo tanto, la aplicación de la fórmula Bath para la predicción del área mínima de transferencia en el caso en que exista una diferencia significativa entre los coeficientes de película puede provocar resultados erróneos en la etapa de pre-optimización.

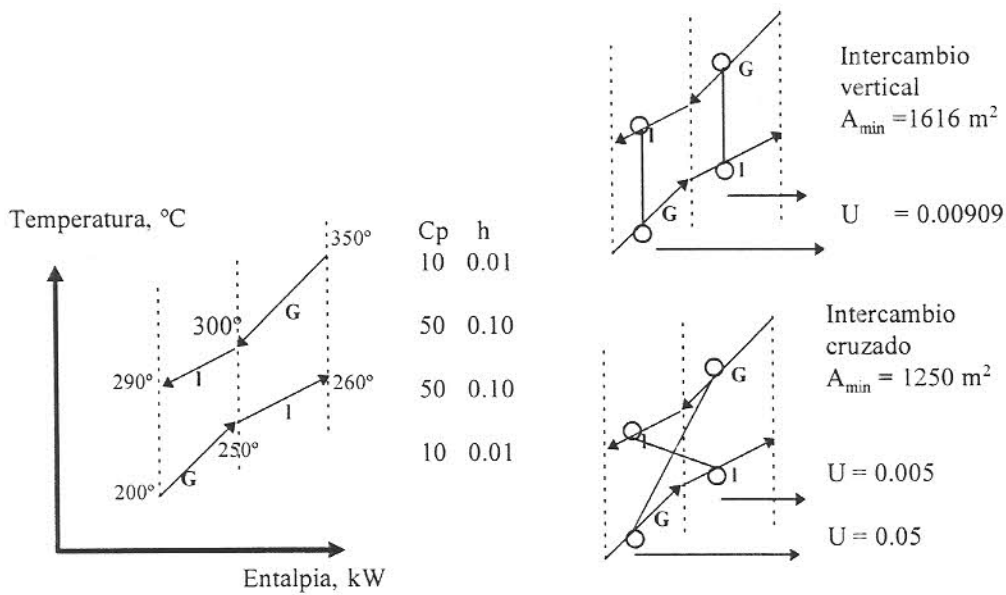


Figura 1.2 Intercambio vertical y cruzado entre corrientes de proceso con coeficientes de transferencia de calor de película diferentes

### 1.4.2 Fórmula Bath Diversa

Se han desarrollado varios algoritmos con el propósito de eliminar las limitantes que presenta la fórmula Bath. Nishimura (1980) presentó un método riguroso para el cálculo del área mínima para redes con coeficientes de transferencia variables. Sin embargo, el resultado de Nishimura queda restringido al caso en que se tiene una sola corriente caliente y varias corrientes frías y viceversa. Nishimura demostró que el  $\Delta T_{min}$  óptimo está dado, en términos del coeficiente individual de transferencia de la corriente  $i$ , como:

$$\Delta T_{min\ i} = \frac{C}{\sqrt{h_i}} \quad (1.4)$$

Ahmad y col. (1990) extrapolaron el concepto de  $\Delta T_{min}$  de la corriente  $i$  al concepto de  $\Delta T$  de contribución para cada corriente, para cuando se tiene un problema de integración formado por varias corrientes calientes y frías:

$$\Delta T_j = \frac{C}{\sqrt{h_j}} \quad j = 1, \dots, S_i \quad (1.5)$$

La Ecuación 1.5 puede ser aplicada en cada uno de los bordes de los intervalos de entalpias de las curvas compuestas balanceadas. Sin embargo, la constante  $C$  no está correctamente definida a menos que las  $\Delta T$  de contribución satisfagan el balance interno de entalpia. Por lo tanto, la determinación de los  $\Delta T$ s de contribución se obtienen resolviendo simultáneamente las ecuaciones 1.5 y 1.6:

$$\sum_{j=1}^{S_i} C_{p_j} (\Delta T_j - \Delta T_k) = 0 \quad (1.6)$$

donde  $S_i$  es el número de corrientes en el intervalo de entalpia  $i$ ,  $C_{p_j}$  es el flujo de la capacidad calorífica de la corriente  $j$  y  $k$  es la corriente responsable del  $i$ -ésimo borde.

El valor de la constante  $C$  se ajusta hasta que los niveles energéticos calculados con las  $\Delta T$ s de contribución correspondan a los establecidos para un  $\Delta T_{\min}$  global dado. La temperatura a la cual cada corriente  $j$  cruza el borde del intervalo  $i$  está dada por la siguiente expresión:

$$T_j = T_k \mp \Delta T_k \pm \Delta T_j \quad (1.7)$$

donde  $T_k$  es la temperatura a la que la corriente  $k$ , responsable del intervalo, cruza el  $i$ -ésimo borde de intervalo. Se usa  $-\Delta T_k$  si  $k$  es una corriente caliente o  $+\Delta T_k$  si  $k$  es una corriente fría.

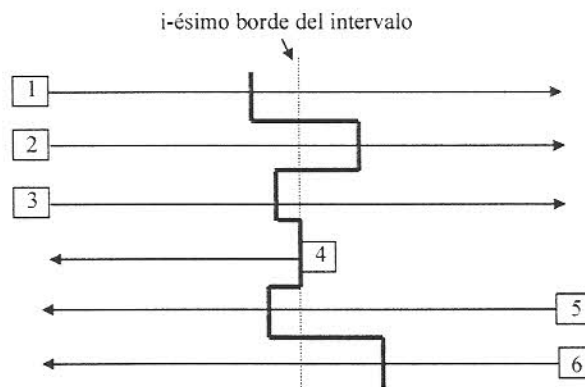


Figura. 1.3 Efecto de las  $\Delta T$ s de contribución sobre las temperaturas en el borde del intervalo de entalpia

La Figura 1.3 muestra cómo la aplicación de los  $\Delta T$ s de contribución provoca que las corrientes con diferentes coeficientes de transferencia crucen el intervalo de entalpia a diferentes temperaturas. Estos desplazamientos producen gradientes de temperatura mayores entre corrientes con coeficientes de película significativamente diferentes.

Rev y Fonyo (1991) argumentan que la extrapolación de Nishimura para problemas de varias corrientes calientes y frías es cuestionable, y que la determinación de los  $\Delta T$ 's de contribución a partir de la Ecuación 1.6 es ambigua. Para eliminar la ambigüedad en las  $\Delta T$ 's de contribución y preservar el concepto de un  $\Delta T$  de contribución para cada corriente, Rev y Fonyo (1991) proponen una nueva definición de  $\Delta T$  de contribución para la corriente  $i$ :

$$\Delta T_i = \frac{k}{h^z} \quad z \in [0.5, 1.0] \quad (1.8)$$

El concepto de  $\Delta T$ 's de contribución está basado en el concepto del flujo mínimo de calor presentado y aplicado industrialmente por Fraser (1989). El objetivo que persigue Fraser en su trabajo es eliminar la necesidad de una optimización multivariable, siendo el flujo mínimo de calor la variable global. El flujo mínimo de calor está relacionado con el parámetro  $k$  mediante  $k = 2Q_{min}$ , para  $z = 1$ . Sin embargo, un solo valor de flujo mínimo de calor no es una restricción útil para todas las corrientes. Por lo tanto, para incrementar el espacio de búsqueda,  $k$  y  $z$  son consideradas como variables, cuyos valores óptimos se determinan en la etapa de pre-optimización en forma tal que la combinación de los valores de  $k$  y  $z$  satisfagan los principios termodinámicos.

Al introducir el concepto de  $\Delta T$ 's de contribución se obtiene una temperatura del punto de pliegue diferente para cada corriente. En este caso no tiene sentido hablar de un  $\Delta T_{min}$  global sino de  $\Delta T$  mínimos entre pares de corrientes, los cuales estarán definidos en función de la Ecuación 1.8. La cascada de calor diversa definida por Rev y Fonyo (1991) se obtiene de la siguiente manera:

- 1.- Se calculan las  $\Delta T_i$ 's de contribución a partir de la Ecuación 1.8 para un valor de  $k$  y  $z$  dados.
- 2.- Se corrigen las temperaturas iniciales y finales de las corrientes calientes y frías:

$$T_{cc_i}^* = T_i \mp \Delta T_i \quad (1.9)$$

donde se usa  $-\Delta T_i$  para las corrientes calientes y  $+\Delta T_i$  para las corrientes frías.

- 3.- Se establece la cascada de calor y se determina la temperatura del punto de pliegue diverso.
- 4.- Se determina la temperatura original del punto de pliegue para cada corriente:

$$T_{\text{pliegue}_i} = T_{\text{pliegue}} \pm \Delta T_i \quad (1.10)$$

donde se usa  $+\Delta T_i$  para las corrientes calientes y  $-\Delta T_i$  para las corrientes frías. Asimismo se pueden obtener las curvas compuestas en términos de las temperaturas reales, ya que en cada intervalo de entalpía cada corriente tiene un desplazamiento dependiente de la  $\Delta T_i$  de contribución.

Rev y Fonyo proponen una ecuación muy parecida a la fórmula Bath, Ecuación 1.3, para el cálculo del área mínima, correspondiente al intercambio entre las curvas compuestas balanceadas, en la etapa de pre-optimización. Para el intervalo de entalpía  $i$ , la diferencia media logarítmica de temperaturas se calcula en función de las diferencias de temperatura en los bordes del intervalo de entalpía como:

$$\Delta TML_k = \frac{\Delta T_{m,k} - \Delta T_{m,k-1}}{\ln \left( \frac{\Delta T_{m,k}}{\Delta T_{m,k-1}} \right)} \quad (1.11)$$

donde  $\Delta T_{m,k}$  y  $\Delta T_{m,k-1}$  están definidas por las Ecuaciones 12 a y b:

$$\Delta T_m = \Delta T_{st,k} + \frac{1}{Q_k} \sum_j q_{j,k} \Delta T_j \quad (1.12 a)$$

$$\Delta T_{m,k-1} = \Delta T_{st,k-1} + \frac{1}{Q_k} \sum_j q_{j,k} \Delta T_j \quad (1.12 b)$$

donde  $\Delta T_{sf,k}$  y  $\Delta T_{sf,k-1}$  son las diferencias de temperatura corregidas entre las curvas compuestas caliente y fría, en el borde del intervalo de entalpía  $k$

$$T_{sf,k} = T_{cch,k}^* - T_{ccc,k}^* \quad (1.13 a)$$

$$T_{sf,k-1} = T_{cch,k-1}^* - T_{ccc,k-1}^* \quad (1.13 b)$$

A su vez,  $T_{cch}^*$  y  $T_{ccc}^*$  son las temperaturas corregidas de las curvas compuestas caliente y fría respectivamente

Para el caso en que la diferencia entre los coeficientes de transferencia sea significativa se observa si las curvas compuestas poseen sólo un punto de pliegue o si existen varias regiones estrechas. Si es el primer caso se usa una contribución de  $\Delta T$  en el intervalo del punto de pliegue, y si es el segundo caso se usan las  $\Delta T$  contribuciones en intervalos pequeños

de entalpia con pequeñas diferencia de temperatura. Ahmad y col. (1990) sugieren que:

1. A valores pequeños de  $\Delta T_{min}$  cualquier reducción del área mínima de transferencia debida el intercambio cruzado tendrá un notable efecto, ya que en esta zona el área de transferencia aumenta drásticamente. Por lo tanto existe un gran incentivo de establecer un intercambio cruzado a valores pequeños de  $\Delta T_{min}$ . Sin embargo, la región entre las curvas compuesta es muy estrecha, lo cual limita el establecimiento de un intercambio cruzado.
2. Para valores grandes de  $\Delta T_{min}$  la separación entre las curvas compuestas permite más fácilmente un intercambio cruzado. Las fuerzas motrices son ahora más grandes, lo que implica que un intercambio cruzado produce un menor efecto en la reducción del área mínima de transferencia. En otras palabras a valores grandes de  $\Delta T_{min}$  existe un menor incentivo para el establecimiento de un intercambio cruzado.
3. Los dos anteriores argumentos también son válidos en las regiones de las curvas compuestas donde se presentan pequeñas y grandes diferencias de temperatura,  $\Delta T$ .
4. Por otra parte, cuando los coeficientes de transferencia difieren en menos de un orden de magnitud, el área mínima de transferencia es muy cercana a la predicha por la fórmula Bath y es conveniente aplicar el concepto del punto de pliegue diverso para el caso en que existe una diferencia entre los coeficientes de más de un orden de magnitud.

### 1.4.3 Fórmula Bath Diversa Modificada

Serna (1998) demuestra que la fórmula Bath diversa propuesta por Rev y Tonyo (1991), la cual considera coeficientes de transferencia de calor variables, es estrictamente válida sólo para el caso en que se tiene un sistema de una corriente caliente y una corriente fría. Por lo tanto dicha ecuación permitiría obtener el área mínima de transferencia de manera aproximada para los casos típicos de varias corrientes calientes y frías con coeficientes de transferencia de calor variables.

Serna analiza la fórmula Bath diversa y propone la Ecuación 1.14 que elimina las limitantes que presentan la fórmula Bath y Bath diversa,

$$A_{MIN} = \sum_{k=1}^{N_i} \left[ \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_f} \left( \frac{Q_{i,j}}{\Delta TML_{i,j}} \right) \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_j} \right) \right]_{-k} \quad (1.14)$$

donde  $N_i$  es el número de intervalos de entalpia de las curvas compuestas. El intervalo  $k$  contiene  $N_c$  corrientes calientes,  $N_f$  corrientes frías y  $N_c$  por  $N_f$  intercambiadores de calor para el diseño *espagueti*.

Para los intercambiadores del intervalo de entalpia  $k$ , el cálculo del  $\Delta TML_{i,j}$  es directo a partir de la siguiente ecuación,

$$\Delta TML_{i,j} = \frac{\Delta T_{i,j}^k - \Delta T_{i,j}^{k-1}}{\ln \frac{\Delta T_{i,j}^k}{\Delta T_{i,j}^{k-1}}} \quad (1.15)$$

donde  $\Delta T_{i,j}^k$  y  $\Delta T_{i,j}^{k-1}$  son los gradientes de temperatura reales entre los extremos caliente y frío (Ecuaciones 1.16 a y 1.16 b) respectivamente del encuentro térmico entre el par de corrientes opuestas  $i,j$  en el intervalo  $k$ .

$$\Delta T_{i,j}^k = (T_{cch,k}^* + \Delta T_i) - (T_{ccc,k}^* + \Delta T_j) \quad (1.16 a)$$

$$\Delta T_{i,j}^{k-1} = (T_{cch,k-1}^* + \Delta T_i) - (T_{ccc,k-1}^* + \Delta T_j) \quad (1.16 b)$$

donde  $\Delta T_i$  y  $\Delta T_j$  son las  $\Delta T$ 's de contribución entre el par de corrientes  $i,j$ .

El cálculo de las cargas térmica  $Q_{i,j}$  del encuentro entre el par de corrientes opuestas  $i,j$  del diseño *espagueti* del intervalo de entalpia  $k$  correspondiente está dado por:

$$Q_{i,j} = C_{p_{i,j}}(T_{cch,k}^* - T_{cch,k}^*) = C_{p_{j,i}}(T_{ccc,k}^* - T_{ccc,k}^*) \quad (1.17)$$

donde  $C_{p_{i,j}}$  ( $C_{p_{j,i}}$ ) es el flujo de la capacidad calorífica del ramal de la corriente caliente  $i$  (fría  $j$ ) intercambiando calor con el ramal de la corriente fría  $j$  (caliente  $i$ ) en el intervalo  $k$ . El flujo de la capacidad calorífica se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$C_{p_{i,j}} = \frac{C_{p_i} C_{p_j}}{\sum_j C_{p_j}} \quad \text{y} \quad C_{p_{j,i}} = \frac{C_{p_i} C_{p_j}}{\sum_i C_{p_i}} \quad (1.18 \text{ y } 1.19)$$

Serna presenta algunos casos de estudio, obteniendo que el algoritmo propuesto predice áreas mínimas menores que el algoritmo de Rev y Fonyo, y por supuesto que la fórmula Bath, para redes de intercambio de calor con coeficiente de transferencia de calor diferentes, lo que

---

trae como consecuencia una mejor estimación del costo capital, un aspecto importante para la etapa de pre-optimización. Por otro lado, es posible determinar los valores óptimos globales de  $z$  y  $k$  correspondientes al costo total mínimo anual, dado que para cada valor de  $z$  se obtiene la curva del costo total anual como una función del parámetro  $k$ .



## Capítulo 2

# INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR SOBRE LA PREDICCIÓN DE AREAS MINIMAS

El hecho de que los coeficientes de transferencia sean diferentes tiene un efecto sobre la determinación del área mínima de transferencia, ya que en ocasiones un intercambio de calor cruzado conduce a menores áreas de transferencia que un intercambio vertical (Lirnhoff y Ahmad, 1990; Rev y Fonyo, 1991). Las preguntas que surgen son ¿qué tan diferentes deben ser los coeficientes de transferencia de calor de película para tener un efecto significativo en la determinación del área mínima? ¿Los algoritmos existentes permiten obtener una buena predicción?. Con el objeto de tratar de responder estas preguntas surge la idea de analizar la influencia de la distribución de los coeficientes de transferencia de película sobre la predicción del área mínima, comparando los resultados obtenidos por las diferentes fórmulas desarrolladas: a) La fórmula Bath, b) La fórmula Bath diversa y c) La fórmula Bath diversa modificada.

Las fórmulas Bath y Bath diversa están dadas por la Ecuación 1.3, pero la definición de la diferencia media logarítmica para la Bath diversa se obtiene a partir de la Ecuación 1.8. La tercera fórmula utilizada, la cual es una modificación de la fórmula Bath diversa, está dada por la Ecuación 1.14.

### 2.1 Caso de Estudio

Para realizar el análisis se toma el caso de estudio presentado por Ahmad y Lirnhoff (1990). La Tabla 2.1 presenta los datos del flujo de la capacidad calorífica y las temperaturas de entrada y salida de cada corriente. Se toma como base el caso original y se define la

distribución de los valores de los coeficientes de transferencia de película individuales para cada uno de los casos (Tabla 2.2). La mayor diferencia entre los coeficientes de transferencia es de un orden de magnitud (Casos 2.1 al 2.5) y de un factor de 50 (Casos 2.6 al 2.9). En la siguiente sección se presenta la metodología utilizada para obtener el área mínima de transferencia predicha por los tres algoritmos para cada uno de los casos presentados en la Tabla 2.2.

Tabla.2.1 Datos generales para todos los caso de estudio.

| <i>Corriente</i> | <i>T inicial</i><br>(°C) | <i>T final</i><br>(°C) | <i>C<sub>pj</sub></i><br>(kW/°C) |
|------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------------|
| <b>H1</b>        | 159                      | 77                     | 22.85                            |
| <b>H2</b>        | 267                      | 80                     | 2.04                             |
| <b>H3</b>        | 343                      | 90                     | 5.38                             |
| <b>C1</b>        | 26                       | 127                    | 9.33                             |
| <b>C2</b>        | 118                      | 265                    | 19.61                            |

Tabla. 2.2 Distribución de los coeficientes de transferencia de película para los casos de estudio,  $h_j$ .

| <i>Corriente</i> | <i>h<sub>j</sub></i> , (kW/°C m <sup>2</sup> ) |            |            |            |            |            |            |            |            |
|------------------|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                  | <i>Caso</i>                                    |            |            |            |            |            |            |            |            |
|                  | <i>2.1</i>                                     | <i>2.2</i> | <i>2.3</i> | <i>2.4</i> | <i>2.5</i> | <i>2.6</i> | <i>2.7</i> | <i>2.8</i> | <i>2.9</i> |
| <b>H1</b>        | 0.10   | 0.10       | 0.10       | 0.10       | 0.10       | 0.50       | 0.50       | 0.50       | 0.50       |
| <b>H2</b>        | 0.10   | 0.01       | 0.10       | 0.05       | 0.050      | 0.50       | 0.01       | 0.25       | 0.75       |
| <b>H3</b>        | 0.10   | 0.10       | 0.05       | 0.01       | 0.025      | 0.50       | 0.50       | 0.01       | 0.50       |
| <b>C1</b>        | 0.01   | 0.10       | 0.01       | 0.10       | 0.075      | 0.01       | 0.50       | 0.50       | 0.25       |
| <b>C2</b>        | 0.01   | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.010      | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.010      |

## 2.2 Metodología

Para ilustrar la metodología se describe sólo el Caso 2.2 presentado en la Tabla 2.2, y en el Apéndice A se presenta el resumen de los resultados de los demás casos de estudio. La metodología se describe en los siguientes pasos:

1. Se debe tener bien definido el sistema de integración de energía, temperaturas de entrada y salida, flujo de la capacidad calorífica y coeficientes de transferencia de calor de película de cada corriente, Tablas 2.1 y 2.2.

2. Se establecen diferentes valores de  $\Delta T_{min}$  globales, (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 °C) para los cuales se determinan los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento.
3. Se determina el área mínima de transferencia proceso-proceso y balanceada aplicando la fórmula Bath. El área proceso-proceso corresponde al área de transferencia sin considerar los servicios auxiliares y el área balanceada incluye el área de servicios tanto de calentamiento como de enfriamiento. La Tabla 2.3 presenta los resultados de servicios mínimos y área mínima predicha por la fórmula Bath.

Tabla. 2.3 Áreas mínimas balanceadas y proceso-proceso calculadas a partir de la fórmula Bath y servicios mínimos de calentamiento y enfriamiento para la red del Caso 2.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $Q_{cmin}$<br>(kW) | $Q_{hmin}$<br>(kW) | $A_{min}$<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | $A_{min}$<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--|---|
| 5                        | 7578               | 9665               | 17105  | 13823   |
| 10                       | 8558               | 10645              | 12837  | 9298  |
| 15                       | 9539               | 11626              | 10750  | 6967  |
| 20                       | 10519              | 12606              | 9500   | 5484  |
| 25                       | 11500              | 13587              | 8678   | 4439  |
| 30                       | 12480              | 14567              | 8109   | 3656  |
| 35                       | 13741              | 15828              | 7616   | 2901  |
| 40                       | 15188              | 17275              | 7266   | 2266  |

4. - Se asigna al parámetro  $z$  de la Ecuación 1.8 los valores de 1.0, 0.7 y 0.5, y se determinan los valores de  $k$  para cada valor de  $z$  que cumpla con los mismo requerimientos mínimos energéticos correspondientes a los diferentes  $\Delta T_{min}$  globales. La Tabla. 2.4 reporta la combinación de los valores de  $z$  y  $k$  correspondientes a los servicios mínimo mostrados en la Tabla. 2.3.
5. Se calcula el área mínima utilizando las fórmulas Bath diversa (Ecuación 1.3) y Bath diversa modificada (Ecuación 1.14) para cada combinación de los parámetros  $k$  y  $z$ . La Tabla. 2.5 muestra los resultados de las áreas mínimas de transferencia de las curvas balanceadas y sin balancear (proceso-proceso) para  $z$  igual a 1, 0.7 y 0.5.

Tabla. 2.4 Valores de  $k$  para los diferentes valores de  $z$  correspondientes a los  $\Delta T_{min}$  globales para el Caso 2.2.

| $\Delta T_{min}$ ( $^{\circ}C$ ) | $z = 1$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
|----------------------------------|---------|-----------|-----------|
| 5                                | 0.04189 | 0.15517   | 0.36040   |
| 10                               | 0.08378 | 0.31034   | 0.72079   |
| 15                               | 0.12567 | 0.46551   | 1.08119   |
| 20                               | 0.16756 | 0.62069   | 1.44159   |
| 25                               | 0.20945 | 0.77586   | 1.80198   |
| 30                               | 0.25134 | 0.93103   | 2.16238   |
| 35                               | 0.30518 | 1.13050   | 2.62566   |
| 40                               | 0.36700 | 1.35449   | 3.21871   |

Tabla.2.5 Areas mínimas balanceadas y proceso-proceso del Caso 2.2.

| $\Delta T_{min}$<br>( $^{\circ}C$ ) | <i>Bath diversa</i>                           |  | <i>Bath diversa modificada</i>                |  |
|-------------------------------------|---|--|---|--|
|                                     | <i>Amin</i><br><i>Balanceada</i><br>( $m^2$ ) | <i>Amin</i><br><i>Proceso-Proceso</i><br>( $m^2$ ) | <i>Amin</i><br><i>Balanceada</i><br>( $m^2$ ) | <i>Amin</i><br><i>Proceso-Proceso</i><br>( $m^2$ ) |
| <b><math>z = 1.0</math></b>         |   |  |   |  |
| 5                                   | 17030   | 13718  | 16830   | 13550  |
| 10                                  | 12781   | 9208   | 12608   | 9097   |
| 15                                  | 10699   | 6894   | 10534   | 6815   |
| 20                                  | 9457  | 5434   | 9284  | 5368   |
| 25                                  | 8636  | 4411   | 8456  | 4354   |
| 30                                  | 8604  | 3649   | 7877  | 3599   |
| 35                                  | 7556  | 2914   | 7377  | 2869   |
| <b><math>z = 0.7</math></b>         |   |  |   |  |
| 5                                   | 17032   | 13726  | 16838   | 13558  |
| 10                                  | 12791   | 9211   | 12613   | 9086   |
| 15                                  | 10698   | 6890   | 10540   | 6805   |
| 20                                  | 9457  | 5429   | 9293  | 5357   |
| 25                                  | 8637  | 4403   | 8467  | 4340   |
| 30                                  | 8066  | 3638   | 7891  | 3583   |
| 35                                  | 7559  | 2898   | 7377  | 2850   |
| <b><math>z = 0.5</math></b>         |   |  |   |  |
| 5                                   | 17035   | 13733  | 16856   | 13576  |
| 10                                  | 12798   | 9225   | 12629   | 9096   |
| 15                                  | 10711   | 6899   | 10555   | 6804   |
| 20                                  | 9457  | 5423   | 9310  | 5352   |
| 25                                  | 8639  | 4395   | 8487  | 4333   |
| 30                                  | 8069  | 3628   | 7912  | 3573   |
| 35                                  | 7564  | 2884   | 7402  | 2836   |

6. Se define un porcentaje de desviación del área predicha por las fórmulas Bath diversa y diversa modificada con respecto a la predicha por la fórmula Bath. El porcentaje de desviación está dado por la Ecuación 2.7, cuyos valores se presentan en la Tabla 2.6.

$$\% \text{ de desviación} = \frac{(A_{\min} - A_{\min \text{ Bath}})}{A_{\min \text{ Bath}}} \times 100 \quad (2.7)$$

donde el  $A_{\min}$  es el área predicha por la fórmula Bath diversa ó la Bath diversa modificada.

7. Se realiza la comparación entre las áreas predichas por los diferentes algoritmos, utilizando el porcentaje de desviación obtenido anteriormente.

Tabla 2.6 Porcentaje de desviación en la predicción del área mínima por las fórmulas Bath diversa y Bath diversa modificada respecto a la fórmula Bath para el Caso 2.2.

| <i>% de desviación del área Balanceada</i>      |           |           |           |                                |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|--------------------------------|-----------|-----------|
| <i>Bath diversa</i>                             |           |           |           | <i>Bath diversa modificada</i> |           |           |
| $\Delta T \text{ min}$<br>(°C)                  | $z = 1.0$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$                      | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5   | -0.44     | -0.43     | -0.41     | -1.61                          | -1.56     | -1.45     |
| 10  | -0.44     | -0.36     | -0.30     | -1.79                          | -1.75     | -1.62     |
| 15  | -0.47     | -0.48     | -0.36     | -2.01                          | -1.95     | -1.81     |
| 20  | -0.45     | -0.45     | -0.44     | -2.27                          | -2.18     | -2.00     |
| 25  | -0.48     | -0.47     | -0.45     | -2.56                          | -2.43     | -2.20     |
| 30  | -0.55     | -0.53     | -0.49     | -2.85                          | -2.69     | -2.42     |
| 35  | -0.78     | -0.75     | -0.68     | -3.13                          | -3.13     | -2.81     |
| <i>% de desviación del área Proceso-Proceso</i> |           |           |           |                                |           |           |
| <i>Bath diversa</i>                             |           |           |           | <i>Bath diversa modificada</i> |           |           |
| $\Delta T \text{ min}$<br>(°C)                  | $z = 1.0$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$                      | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5   | -0.76     | -0.70     | -0.65     | -1.98                          | -1.92     | -1.79     |
| 10  | -0.97     | -0.94     | -0.79     | -2.17                          | -2.28     | -2.17     |
| 15  | -1.05     | -1.11     | -0.97     | -2.18                          | -2.32     | -2.34     |
| 20  | -0.90     | -1.00     | -1.10     | -2.10                          | -2.3      | -2.41     |
| 25  | -0.63     | -0.81     | -0.98     | -1.91                          | -2.21     | -2.39     |
| 30  | -0.19     | -0.50     | -0.77     | -1.57                          | -2.00     | -2.29     |
| 35  | 0.45      | -0.09     | -0.58     | -1.10                          | -1.76     | -2.25     |

### **2.3 Discusión de resultados**

Rev y Fonyo (1991) presentaron el concepto del punto de pliegue diverso y propusieron un algoritmo para la determinación del área mínima de transferencia, presentando un caso de estudio donde se observa que existe una diferencia significativa entre el área predicha con la fórmula la Bath y la Bath diversa. Sin embargo, el caso que se presentó en ese trabajo parece ser tal que la red de intercambio se redujera a tener de una sola corriente caliente y una corriente fría, lo cual concuerda con el resultado obtenido por Serna (1998) al demostrar que la fórmula Bath diversa es estrictamente válida para el caso en que existe sólo una corriente caliente y una corriente fría.

Los resultados de este análisis muestran que definitivamente cuando se tienen coeficiente de transferencia con variaciones significativas de uno o más ordenes de magnitud, la determinación del área mínima de transferencia a través de intercambios verticales conduce a áreas mayores que un intercambio cruzado. Sin embargo, la diferencia en orden de magnitud no es el único factor que influye sobre las desviaciones que se obtienen en la predicción del área mínima. Se observa que la distribución de los coeficientes de transferencia tiene un efecto significativo en la predicción del área mínima, ya que las mayores desviaciones se presentan en los casos donde existe una mayor distribución de los coeficientes.

La fórmula Bath diversa modificada predice en general una menor área mínima que la predicha por la Bath diversa y la Bath. Para los Casos 2.1 y 2.6 la distribución de los coeficientes de transferencia conduce a que todas las diferencias de temperatura entre pares de corrientes sean iguales. En estos casos no existe una diferencia significativa en la predicción del área mínima a partir de las diferentes fórmulas, pues se tiene que las  $\Delta T$ s de contribución se generan un  $\Delta T_{min}$  global. En algunos casos la fórmula Bath diversa modificada predice áreas menores en más del 10% respecto a las predichas por la fórmula Bath. Los Casos 2.4 y 2.8 presentan porcentajes de desviación hasta del 13 y 16 % respectivamente. Para el Caso 2.4 la mayor diferencia entre los coeficientes de transferencia es de un orden de magnitud y para el Caso 2.8 de un factor de 50. Esto puede ser la causa de que el intercambio vertical requiera una mayor área de transferencia que un intercambio cruzado. Los Casos 2.2 y 2.3 al igual que el Caso 2.4 los coeficientes de transferencia poseen la misma diferencia en orden de magnitud,

pero no la misma distribución. Los resultados de los Casos 2.2 y 2.3 muestran que el área predicha para un intercambio vertical no es muy diferente a la predicha por uno cruzado, por lo tanto el factor que influye para favorecer un intercambio cruzado en el Caso 2.4 es la distribución de los coeficientes de película de transferencia de calor. Por otro lado, las mayores desviaciones en la predicción del área mínima para un caso se presentan a valores grandes de  $\Delta T_{min}$ .

## **2.4 Conclusiones**

El efecto combinado entre la diferencia del orden de magnitud y la distribución de los coeficientes de transferencia puede o no favorecer el intercambio de calor cruzado.

La fórmula Bath predice una área mínima significativamente superior a la predicha por las otras dos fórmulas (la Bath diversa y la Bath diversa modificada) entre mayor sea el orden de magnitud de diferencia entre los coeficientes de transferencia y se tengan una mayor distribución de los mismos.

En general la fórmula Bath diversa modificada, propuesta por Serna (1998), predice la menor área mínima de transferencia cuando los coeficientes de transferencia de calor son diferentes.

A pesar de que Ahmad y col. (1990) sugieren que no existe un gran incentivo para establecer un intercambio cruzado a valores grandes de  $\Delta T_{min}$ , los resultados de este estudio muestran que las mayores reducciones en área mínima de transferencia se encuentran a valores grandes de  $\Delta T_{min}$ .

## Capítulo 3

# REAJUSTE DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR CON COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR CONSTANTES

Se realiza el análisis de dos redes de intercambio de calor existentes utilizando la metodología de Tjoe y Linnhoff (1986) descrita en el Capítulo 1. El análisis de las redes consiste en efectuar el diseño revisado de la red y comparar los resultados obtenidos con los predichos al utilizar la relación entre el área mínima y el área existente constante. Para ilustrar cada uno de los pasos de la metodología sólo se presenta en el este capítulo uno de los dos casos de estudio, el cual está formado por dos corrientes calientes y dos frías con coeficientes de transferencia de calor constantes y cuyos datos generales están dados en la Tabla 3.1. Los datos y resultados del segundo caso de estudio se presentan resumidos en el Apéndice B.

Tabla 3.1 Datos generales de la red de intercambio de calor existente para el Caso 3.1.

| <i>Corriente</i> | <i>Tentrada</i><br>(°C) | <i>Tsalida</i><br>(°C) | <i>C<sub>p</sub><sub>i</sub></i><br>(kW/°C) | <i>h<sub>i</sub></i><br>(kW/°C m <sup>2</sup> ) |
|------------------|-------------------------|------------------------|---|---|
| <b>h1</b>        | 175                     | 45                     | 10  | 0.2   |
| <b>h2</b>        | 125                     | 65                     | 40  | 0.2   |
| <b>c1</b>        | 20                      | 155                    | 20  | 0.2   |
| <b>c2</b>        | 40                      | 112                    | 15  | 0.2   |

### 3.1 Definición de la red para el Caso 3.1

La Figura 3.1 muestra el diagrama de rejilla de la red existente analizada, la cual está constituida por dos intercambiadores proceso-proceso, un calentador y un enfriador. Los intercambiadores entre las corrientes del proceso están representados por círculos unidos con una línea e identificados por un número. Los calentadores y enfriadores son círculos



designados con una letra mayúscula H y C, respectivamente. Las temperaturas de entrada y salida de las corrientes que intercambian calor, la carga térmica y el área de transferencia actual de cada uno de los intercambiadores están dadas en la Tabla 3.2.

El área de transferencia de calor proceso-proceso de la red existente es de  $615.2 \text{ m}^2$  y de  $1099.4 \text{ m}^2$  incluyendo el área de servicios. El consumo de servicios de calentamiento es de  $1320 \text{ kW}$  y de enfriamiento de  $1400 \text{ kW}$ .

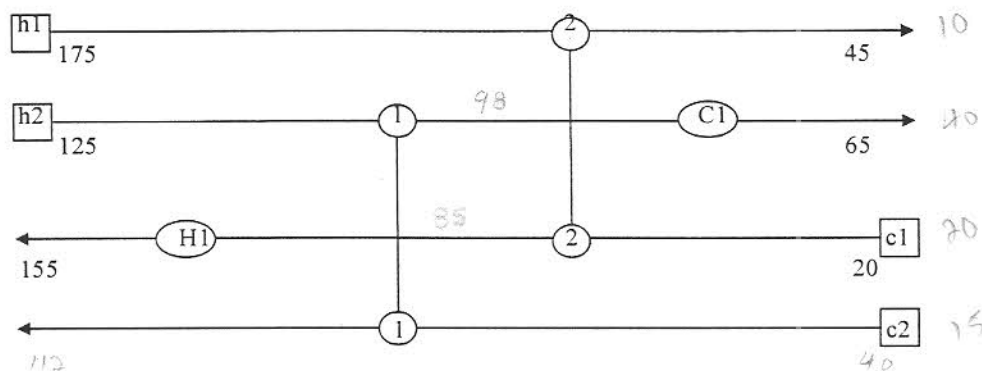


Figura 3.1 Diagrama de rejilla de la red existente para el Caso 3.1.

Tabla 3.2 Datos de los intercambiadores de la red existente (Caso 3.1), área de transferencia, carga térmica, temperaturas de entrada y salida de las corrientes.

|           | <i>Corrientes</i> | <i>T entrada</i><br>(°C) | <i>T salida</i><br>(°C) | <i>Carga</i><br><i>Térmica</i><br>(kW) | <i>Area,</i><br>(m <sup>2</sup> ) |
|-----------|-------------------|--------------------------|-------------------------|--|-----------------------------------|
| <b>H1</b> | c1                | 85.0                     | 155.0                   | 1400                                   | 267                               |
| <b>1</b>  | h2                | 125.0                    | 98.0                    |  |                                   |
|           | c2                | 20.0                     | 85.0                    | 1080                                   | 359                               |
| <b>2</b>  | h1                | 175.0                    | 45.0                    |  |                                   |
|           | c1                | 20.0                     | 85.0                    | 1300                                   | 256                               |
| <b>C1</b> | h2                | 98.0                     | 65.0                    | 1320                                   | 217                               |

### 3.2 Determinación de área y servicios mínimos

Hasta este momento ha quedado bien definida la red existente, es decir, se tiene bien identificados los servicios auxiliares y el área de transferencia de la red actual. El siguiente paso es determinar los servicios y área de transferencia mínimos para redes de máxima

paso es determinar los servicios y área de transferencia mínimos para redes de máxima recuperación de energía a diferentes valores de  $\Delta T_{min}$ . Los requerimientos energéticos mínimos se obtienen a partir de la cascada de calor, mientras que el área mínima de transferencia se predice utilizando la fórmula Bath, Ecuación 1.3, la cual involucra los coeficientes individuales de transferencia de calor.

La Tabla 3.3 presenta resultados de los requerimientos energéticos y área mínima de transferencia proceso-proceso y balanceada a diferentes valores de  $\Delta T_{min}$  para sistemas de máxima recuperación energética.

Tabla 3.3 Requerimientos mínimos de servicios y área de transferencia balanceada y de proceso-proceso para la red del Caso 3.1.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $Q_c min$<br>(kW) | $Q_h min$<br>(kW) | $A min$<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | $A_{min}$<br>Proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|-------------------|-------------------|--|---|
| 5                        | 120               | 200               | 2157                                       | 2025  |
| 10                       | 220               | 300               | 1779                                       | 1599  |
| 15                       | 350               | 430               | 1518                                       | 1282  |
| 20                       | 525               | 605               | 1313                                       | 1009  |
| 25                       | 700               | 780               | 1185                                       | 820   |
| 30                       | 875               | 955               | 1099                                       | 680   |
| 35                       | 1050              | 1130              | 1040                                       | 570   |
| 40                       | 1225              | 1305              | 999  | 480   |
| 42                       | 1310              | 1400              | 982  | 450   |

### 3.3 Localización de la red existente

La relación entre el área mínima y el área existente se define como una medida de la eficiencia de la red en cuanto aprovechamiento del área existente, la cual está dada por la Ecuación 3.1.

$$\alpha = \frac{A_{min}}{A_{existente}} \quad (3.1)$$

De acuerdo con los objetivos energéticos y de área para una red de máxima recuperación energética, la red existente requeriría un área mínima de transferencia proceso-

proceso de 449.68 m<sup>2</sup> y de 982.15 m<sup>2</sup> incluyendo el área de servicios. Por lo tanto se definen dos eficiencias, una respecto al área proceso-proceso y otra incluyendo el área de servicios, que para este caso de estudio (Caso 3.1) están dadas por las Ecuaciones 3.2 y 3.3, respectivamente.

$$\alpha_{\text{PROCESO-PROCESO}} = \frac{A_{\text{min}}_{\text{PROCESO-PROCESO}}}{A_{\text{existente}}_{\text{PROCESO-PROCESO}}} = \frac{449.68}{615.2} = 0.7309 \quad (3.2)$$

$$\alpha_{\text{BALANCEADA}} = \frac{A_{\text{min}}_{\text{BALANCEADA}}}{A_{\text{existente}}_{\text{BALANCEADA}}} = \frac{982.15}{1099.4} = 0.8934 \quad (3.3)$$

Si se considera que las eficiencias permanecen constantes para cada valor de  $\Delta T_{\text{min}}$  y conociendo las áreas mínimas de transferencia correspondientes es posible predecir el área de rediseño requerida para cada  $\Delta T_{\text{min}}$ , a partir de la Ecuación 3.1. Las Figuras 3.2 y 3.3 muestran la localización de la red existente de acuerdo a los servicios energéticos que consume antes del rediseño. Las mismas figuras muestran la curva del área de rediseño considerando las relaciones de  $\alpha$  constantes para todo  $\Delta T_{\text{min}}$ . El área adicional requerida por el diseño revisado de la red estará dada por la diferencia entre el área de rediseño predicha considerando la eficiencia constante y el área existente.

### 3.4 Determinación de objetivos económico-energéticos para el Caso 3.1

El ahorro potencial que se obtendrá si se realiza el diseño revisado de la red a los diferentes valores de  $\Delta T_{\text{min}}$  está dado por la diferencia entre el costo de los servicios auxiliares actuales y el costo de los servicios requeridos por la red después del rediseño. El costo de los servicios está dado por la siguiente expresión,

$$\text{Costo de servicios} = d(\text{servicio de calentamiento}) + e(\text{servicio de enfriamiento}) \quad (3.4)$$

donde  $d$  y  $e$  toman los valores de 110 y 10 (\$/kW año), respectivamente (Ahmad y col., 1990 y Zhu y col., 1995).

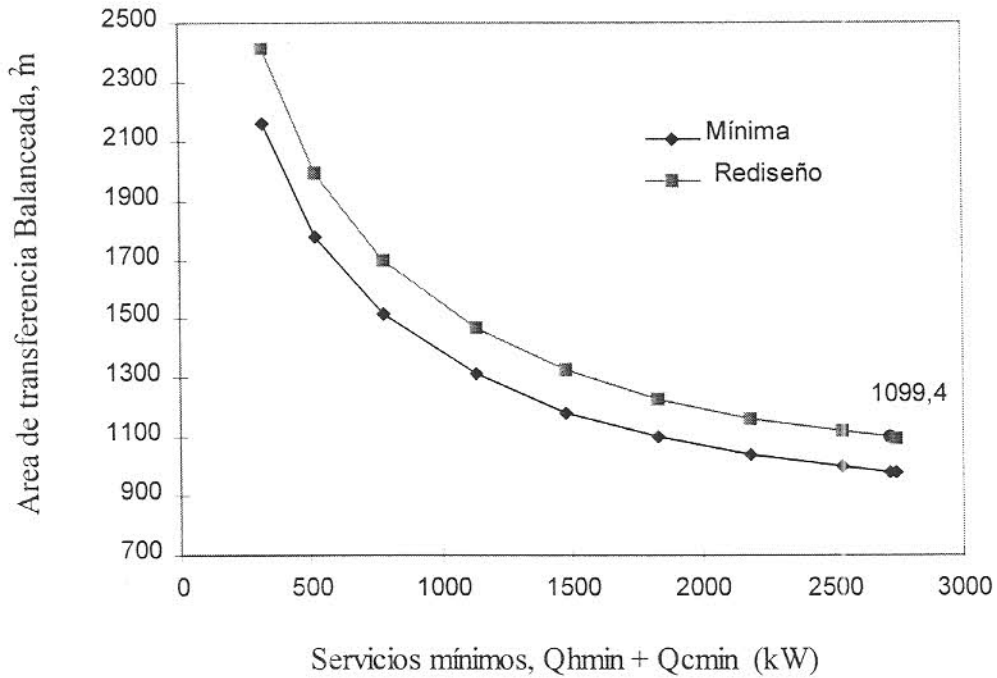


Figura 3.2 Dependencia del área de transferencia mínima y de rediseño balanceada respecto a los servicios mínimos para el Caso 3.1.

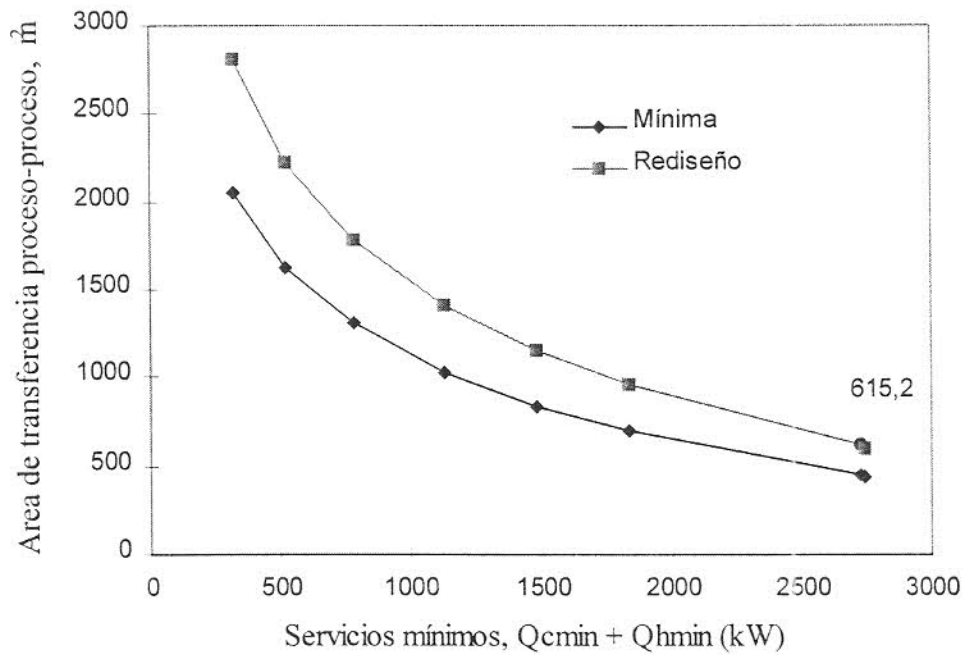


Figura 3.3 Dependencia del área de transferencia mínima y de rediseño proceso-proceso respecto a los servicios mínimos para el Caso 3.1.

Por otro lado la inversión adicional necesaria para realizar el rediseño se define como el costo capital en función del área adicional requerida, utilizando el modelo no-lineal propuesto por Ahmad y col. para la determinación de costos de equipo, Ecuación 3.5.

$$\text{Costo de los intercambiadores instalados} = c_1 + c_2 A_{\min}^{c_3} \quad (3.5)$$

La inversión adicional quedará definida por la siguiente expresión

$$\text{Inversión adicional} = a \text{Área}^b + c \quad (3.6)$$

donde  $a = 750$ ,  $b = 0.83$  y  $c = 30800$  (Ahmad y col., 1990 y Zhu y col., 1995).

La Figura 3.4 muestra el ahorro potencial contra la inversión adicional; los valores numéricos que se obtienen al aplicar las Ecuaciones 3.4 y 3.6 se presentan en la Tabla 3.4. Cabe recordar que cada punto de las curvas mostradas en la Figura 3.4 está relacionado con un  $\Delta T_{\min}$  y que para cada valor de esta diferencia mínima de temperatura quedan definidos los servicios y área de transferencia mínimos, por lo tanto cualquier variación del  $\Delta T_{\min}$  implica un cambio en la estructura del rediseño de la red. Bajo esta situación es muy importante tener en mente la elección adecuada del  $\Delta T_{\min}$  de rediseño, la cual queda sujeta a la inversión adicional disponible y al tiempo de recuperación de la inversión establecida por el rediseñador, tal como lo sugieren Tjoe y Linnhoff.

Tabla 3.4 Inversión adicional y ahorro potencial para el rediseño de la red (Caso 3.1) a diferentes valores de  $\Delta T_{\min}$ .

| $\Delta T_{\min}$<br>(°C) | <i>Inversión Adicional</i><br><i>proceso-proceso</i><br>(miles \$) | <i>Ahorro Potencial</i><br>(miles \$/año) |
|---------------------------|--|---|
| 5                         | 475.1  | 144.0                                     |
| 10                        | 373.8  | 132.0                                     |
| 15                        | 294.5  | 116.4                                     |
| 20                        | 221.9  | 95.4                                      |
| 25                        | 168.3  | 74.4                                      |
| 30                        | 125.3  | 53.4                                      |
| 35                        | 825.6  | 32.4                                      |

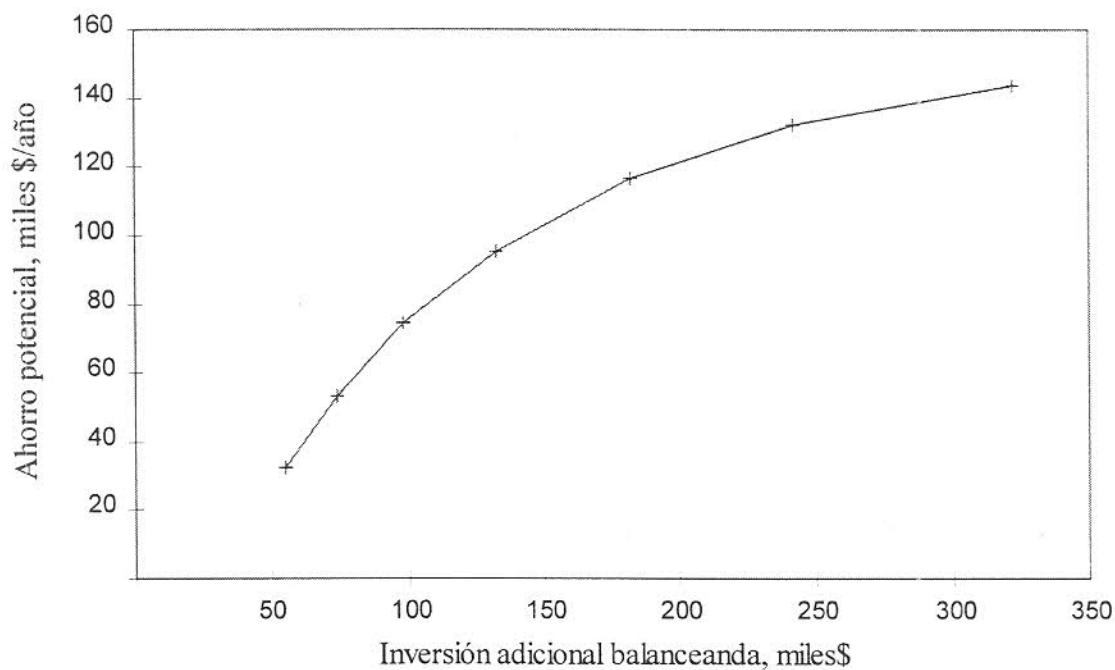


Figura 3.4 Ahorro potencial en función de la inversión adicional balanceada considerando  $\alpha$  constante para el Caso 3.1.

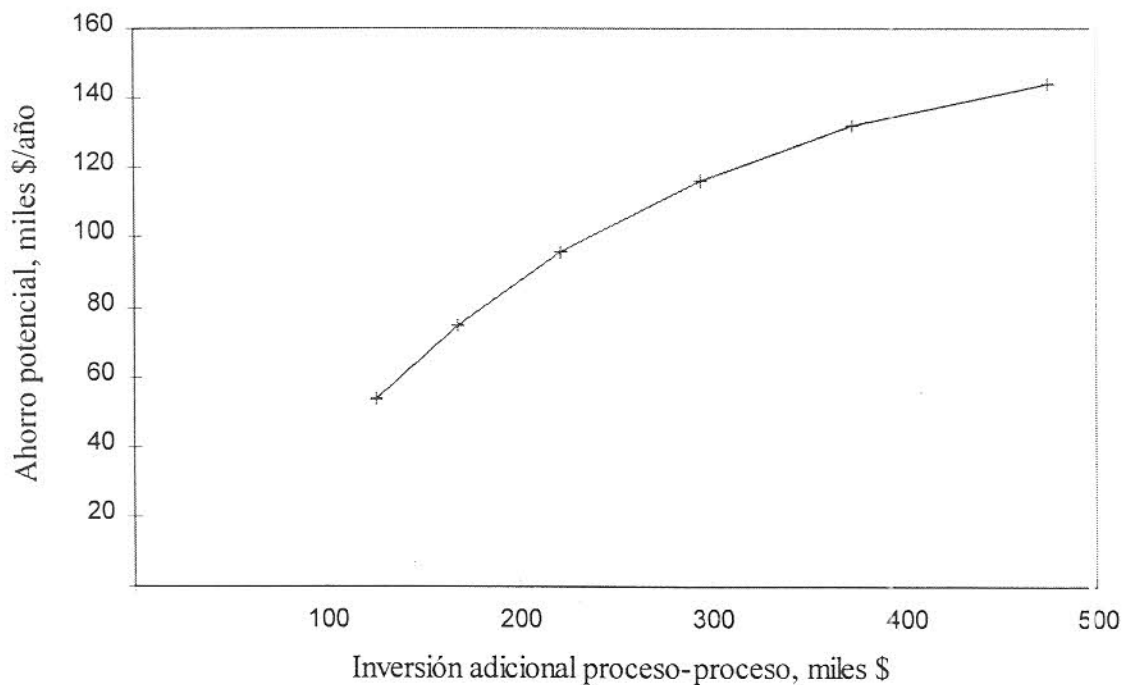


Figura 3.5 Ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso considerando  $\alpha$  constante para el Caso 3.1.

### 3.5 Diseño revisado de la red

Hasta este momento se tienen datos de ahorro potencial e inversión adicional del rediseño a diferentes valores de  $\Delta T_{\min}$  a nivel de predicción, considerando que la eficiencia inicial de la red permanece constante con respecto al  $\Delta T_{\min}$ . En esta sección se pretende corroborar dichas predicciones realizando el rediseño a diferentes  $\Delta T_{\min}$ , utilizando la metodología presentada por Tjoe y Linnhoff. Para ilustrar la técnica de reajuste se presenta la descripción del diseño revisado de la red a un  $\Delta T_{\min}$  igual a  $20^\circ\text{C}$ .

El primer paso para el rediseño es establecer la diferencia mínima de temperatura entre las corrientes a la que se efectuará el diseño y después determinar las temperaturas del punto de pliegue para las corrientes calientes y las frías correspondientes al  $\Delta T_{\min}$ , las cuales resultan ser  $125$  y  $105^\circ\text{C}$ , respectivamente. Enseguida se traza el diagrama de rejilla colocando los intercambiadores existentes en base a dichas temperaturas tal como lo presenta la Figura 3.6, donde puede apreciarse que los intercambiadores 1, 2 y H1 transfieren calor a través del punto de pliegue, por lo que hay que reacomodar dichos intercambiadores de tal forma que no se violen los principios de la tecnología del punto de pliegue, es decir, no debe existir transferencia de calor a través del punto de pliegue, ni calentamiento por debajo del punto de pliegue.

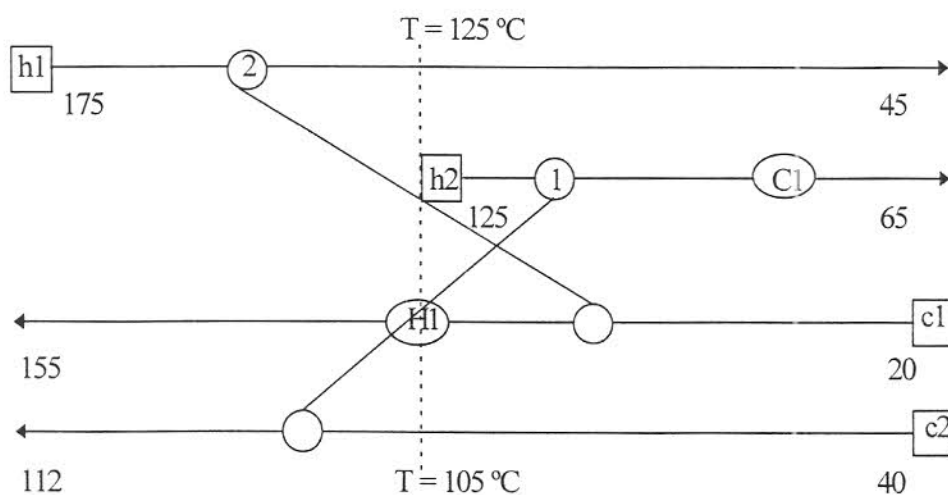


Figura 3.6 Diagrama de rejilla considerando el punto de pliegue para el Caso 3.1.

La Figura 3.7 presenta el diagrama de rejilla de la red desatando los intercambiadores que transfieren calor a través del punto de pliegue. Se generan dos subsistemas a rediseñar, uno por arriba y otro por debajo del punto de pliegue. Las Figuras 3.8 y 3.9 presentan el rediseño de la red por arriba y por debajo, respectivamente. Si se une el rediseño por arriba y por debajo del punto de pliegue se tendrá la red reajustada de manera completa tal como se presenta en la Figura 3.10. En el intercambiador 1 antes del rediseño intercambiaban calor las corrientes h2 y c2; después del rediseño intercambian calor las corrientes h2 y c1 en otro intervalo de temperatura. Las corrientes involucradas en el intercambiador 2 después del rediseño son la h1 y c2. Además el rediseño requiere otros dos intercambiadores A y B, un enfriador y un calentador. La Tabla 3.5 muestra los valores de las áreas de los intercambiadores una vez rediseñada la red, así como el área existente y el área adicional.

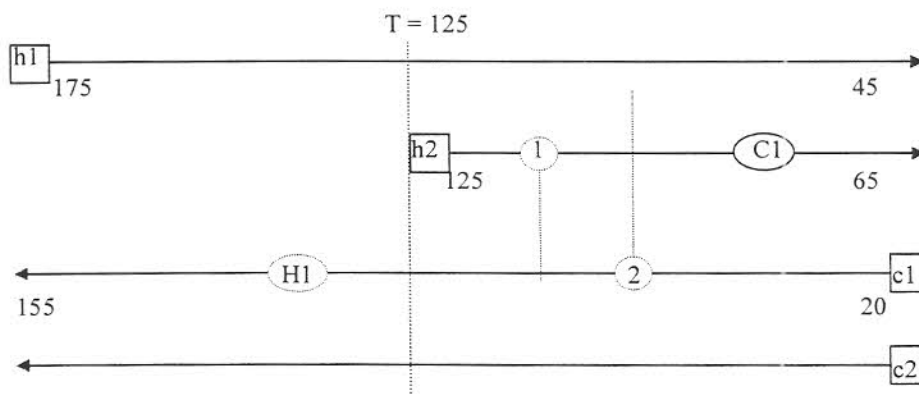


Figura 3.7 Diagrama de rejilla de la red existente desatada, Caso 3.1.

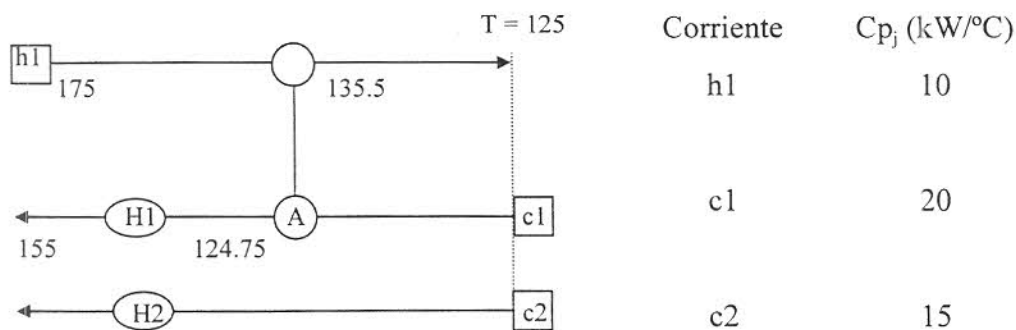


Figura 3.8 Diagrama de rejilla del reajuste por arriba del punto de pliegue para el Caso 3.1.



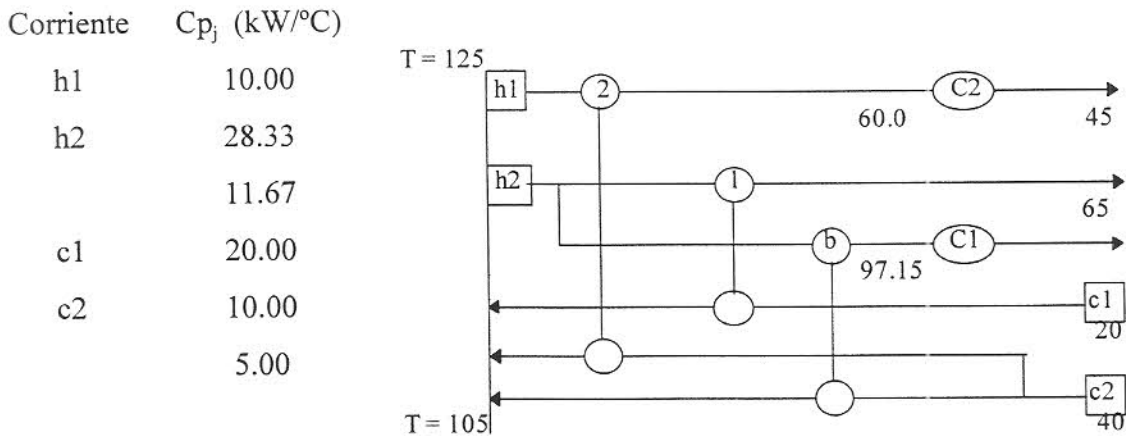


Figura 3.9 Diagrama de rejilla del reajuste de la red por debajo del punto de pliegue para el Caso 3.1.

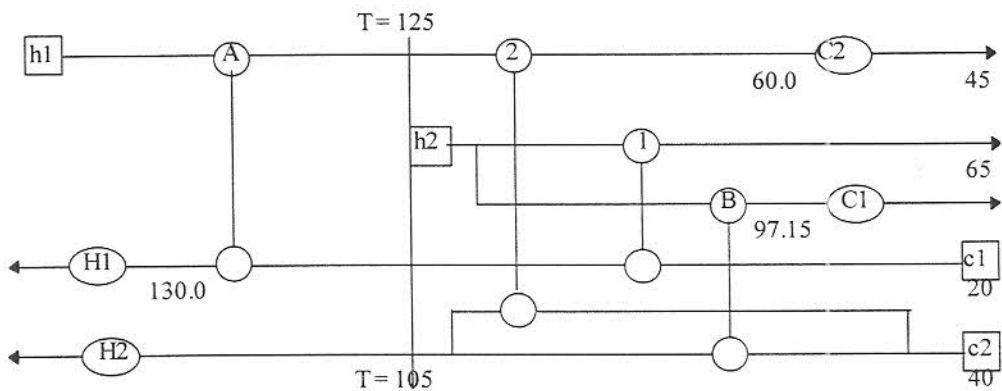


Figura 3.10 Diagrama de rejilla del rediseño final de la red a un  $\Delta T_{min}$  de 20 °C para el Caso 3.1.

Tabla 3.5 Area de transferencia de los intercambiadores del rediseño de la red, Caso 3.1

|           | <i>Area existente</i><br>(m <sup>2</sup> ) | <i>Area de rediseño</i><br>(m <sup>2</sup> ) | <i>Area adicional</i><br>(m <sup>2</sup> ) |
|-----------|--|--|--|
| <b>1</b>  | 359  | 551  | 192  |
| <b>2</b>  | 256  | 325  | 69   |
| <b>a</b>  |  | 139  | 139  |
| <b>b</b>  |  | 92   | 92   |
| <b>H1</b> | 267  | 162  |  |
| <b>H2</b> |  | 15   | 15   |
| <b>C1</b> | 217  | 62   |  |
| <b>C2</b> |  | 46   | 46   |

### 3.5.1 Eficiencia

La eficiencia de la red se determina considerando sólo el área de transferencia proceso-proceso, ya que los calentadores y enfriadores después del rediseño siempre tendrán una área menor que los calentadores y enfriadores existentes debido a que el consumo de servicios es siempre menor para el rediseño. Bajo estas condiciones el reajuste a 20°C de la red requiere 492 m<sup>2</sup> de área adicional proceso-proceso. El área proceso-proceso total del rediseño a 20 °C es de 1107 m<sup>2</sup> y la mínima de 1009 m<sup>2</sup>. Por lo tanto, la relación de área mínima a área de rediseño (Ecuación 3.1) es igual a 0.912.

$$\alpha_{\text{PROCESO-PROCESO DEL REDISEÑO}}|_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{A_{\text{min}}_{\text{PROCESO-PROCESO}}}{A_{\text{rediseño}}_{\text{PROCESO-PROCESO}}} = \frac{1008.957}{1106.913} = 0.912 \quad (3.7)$$

### 3.5.2 Inversión adicional

La inversión adicional requerida para el rediseño a 20°C está dada en función del área adicional considerando únicamente el costo de equipo; sustituyendo el valor del área adicional en la Ecuación 3.6, el monto de la inversión es de

$$\text{Costo capital} = \text{Inversión adicional}|_{20^{\circ}\text{C}} = a 492^b + c = \$ 159,400 \quad (3.8)$$

donde  $a = 750$ ,  $b = 0.83$  y  $c = 30800$ .

Como se mencionó anteriormente, se realizó el diseño revisado de la red a diferentes  $\Delta T_{\text{min}}$ , y el resumen de resultados se muestra en las Tablas 3.6, 3.7 y 3.8 y en las Figuras 3.11 y 3.12.

Tabla 3.6 Resultados del área adicional y de rediseño proceso-proceso a los diferentes  $\Delta T_{\text{min}}$  para el Caso 3.1.

| $\Delta T_{\text{min}} (^{\circ}\text{C})$ | Área adicional (m <sup>2</sup> ) | Área total de reajuste (m <sup>2</sup> ) |
|--|----------------------------------|--|
| 5  | 1568                             | 2183                                     |
| 10   | 1082                             | 1696                                     |
| 15   | 758                              | 1373                                     |
| 20   | 492                              | 1107                                     |
| 25   | 312                              | 928                                      |
| 30   | 221                              | 836                                      |

Tabla 3.7 Resultados de la relación entre área mínima y área de reajuste para los diferentes  $\Delta T_{min}$  del Caso 3.1.

| $\Delta T_{min}$ (°C) | $\alpha$ de rediseño | $\alpha$ constante |
|-----------------------|----------------------|--------------------|
| 5                     | 0.940                | 0.731              |
| 10                    | 0.956                | 0.731              |
| 15                    | 0.949                | 0.731              |
| 20                    | 0.930                | 0.731              |
| 25                    | 0.905                | 0.731              |
| 30                    | 0.834                | 0.731              |

Tabla 3.8 Resultados de la inversión adicional proceso-proceso del rediseño a diferentes  $\Delta T_{min}$  para el Caso 3.1.

| $\Delta T_{min}$ (°C) | Ahorro Potencial (miles \$/ año) | Inversión adicional $\alpha$ constante (miles \$) | Inversión adicional $\alpha$ rediseño (miles \$) |
|-----------------------|----------------------------------|---|--|
| 5                     | 144.0                            | 475.1   | 367.4  |
| 10                    | 132.0                            | 373.8   | 278.1  |
| 15                    | 116.4                            | 294.5   | 215.0  |
| 20                    | 95.4                             | 221.9   | 159.4  |
| 25                    | 74.4                             | 168.3   | 119.0  |
| 30                    | 53.4                             | 125.3   | 970.3  |

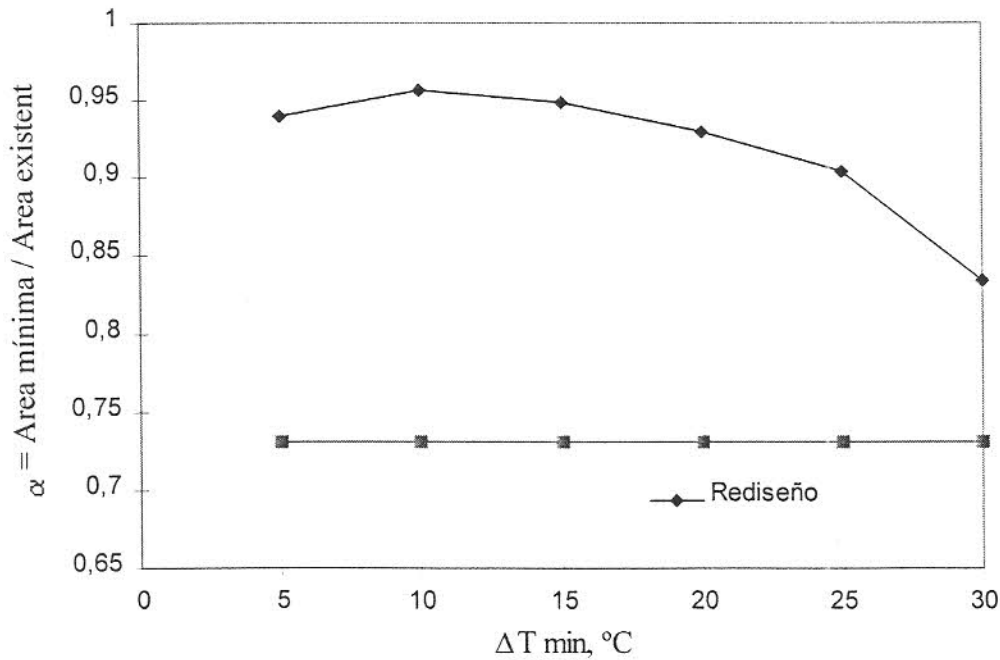


Figura 3.11 Comparación de la eficiencia de la red obtenida del rediseño respecto a la eficiencia de la red existente correspondiente al área proceso-proceso para el Caso 3.1.

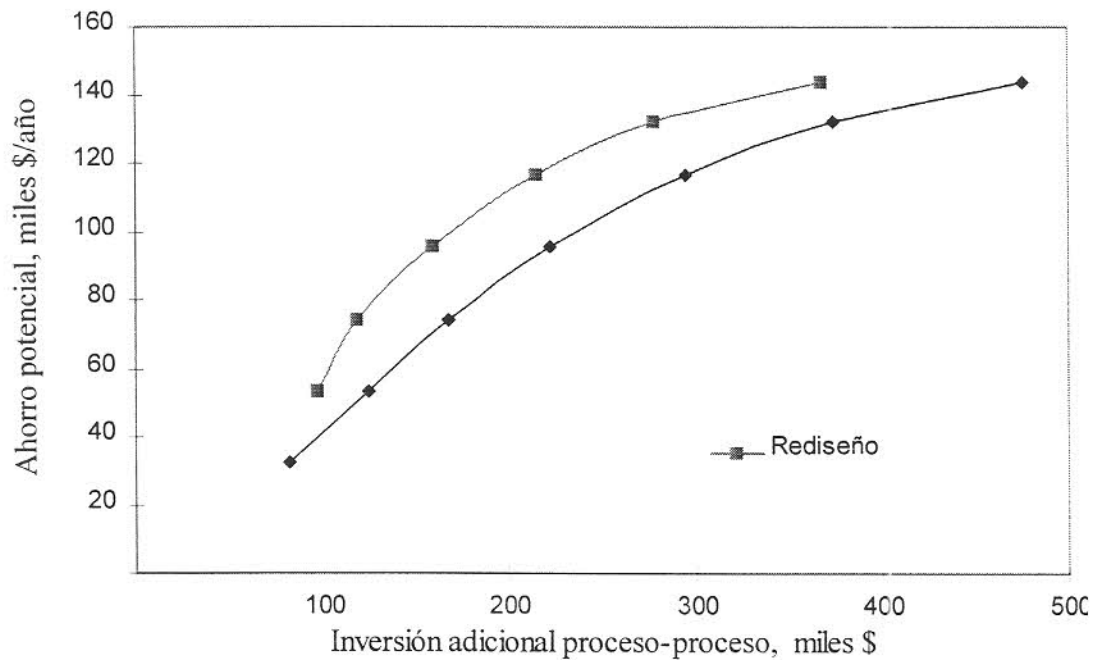


Figura 3.12 Comparación del ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso obtenido del rediseño respecto al predicho considerando que la eficiencia es constante para el Caso 3.1.

### 3.6 Discusión de resultados

El área necesaria al realizar el diseño revisado de la red no concuerda con el área predicha considerando que la eficiencia inicial de la red permanece constante para todo valor de  $\Delta T_{\min}$ . Al determinar la eficiencia del diseño revisado de la red se obtiene que existe una zona de  $\Delta T_{\min}$  en donde el área de rediseño se acerca más al área mínima para problemas de máxima recuperación energética, es decir, la eficiencia de la red tiende a la unidad, tal como se muestra en las Figuras 3.11 (Caso 3.1) y B.5 (Caso 3.2). Además se observa que a valores de  $\Delta T_{\min}$  pequeños y muy cercanos al  $\Delta T_{\min}$  inicial la eficiencia de la red disminuye y la máxima eficiencia de rediseño que se obtiene es de 0.956 para un  $\Delta T_{\min}$  de 10 °C.

La Figura 3.12 compara la inversión adicional predicha con la del rediseño. Se puede observar claramente que para un mismo  $\Delta T_{\min}$  (ahorro potencial) la inversión adicional predicha es mayor que la requerida por el diseño revisado de la red, tal como era de esperarse

ya que la eficiencia del rediseño es mayor que la eficiencia inicial de la red, por lo tanto el área adicional necesaria para el rediseño es menor y como consecuencia la inversión adicional

La metodología presentada por Tjoe y Linnhoff sugiere establecer el  $\Delta T_{min}$  del diseño revisado de la red en base a la inversión disponible y al tiempo de recuperación de acuerdo con el rediseñador, pues al definir el monto de la inversión o el tiempo de recuperación queda definido el  $\Delta T_{min}$  de rediseño. Sin embargo, si se establece el monto de la inversión o el tiempo de recuperación utilizando los resultados económicos obtenidos al considerar  $\alpha$  constante el valor del  $\Delta T_{min}$  predicho será mayor que el  $\Delta T_{min}$  correspondiente al diseño revisado de la red y como consecuencia la estructura de la red será diferente.

### **3.7 Conclusiones**

Los casos de estudio mostraron que la relación entre el área de transferencia mínima y de rediseño (eficiencia de la red,  $\alpha$ ) no es constante, sino que presenta una dependencia del  $\Delta T_{min}$  de rediseño, mostrando una máxima aproximación a la unidad.

Si la eficiencia del rediseño resulta ser mayor que la eficiencia de la red existente, el  $\Delta T_{min}$  establecido para el rediseño, considerando que la eficiencia es constante, será mayor que el  $\Delta T_{min}$  obtenido del rediseño y viceversa. En cualquiera de los casos el establecimiento del  $\Delta T_{min}$  conducirá a una estructura de rediseño diferente.

## Capítulo 4

# DETERMINACION DE OBJETIVOS ECONOMICO-ENERGETICOS PARA EL REDISEÑO DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR

En el presente capítulo se analiza la primera etapa de la metodología propuesta por Tjoe y Linnhoff para realizar el diseño revisado de redes de intercambio de calor existentes, la cual está descrita en el Capítulo 1. La primera etapa comprende la definición del problema y el establecimiento de objetivos económico-energéticos para realizar el reajuste de la red. El análisis se efectúa tomando varios casos de estudio de redes de intercambio de calor existentes. Sin embargo, por simplicidad sólo se describe uno de ellos de manera detallada y los otros se presentan en el Apéndice C.

### 4.1 Definición del problema de rediseño

La definición del problema consiste en el conocimiento de la estructura de la red actual, de las corrientes que intercambian calor, así como de las temperaturas de entrada y salida de las corrientes, del área de transferencia de los equipos y del consumo de servicios auxiliares (calentamiento y enfriamiento). La Figura 4.1 muestra el diagrama de rejilla de la red de intercambio de calor existente a analizar (Caso 4.1) y la Tabla 4.1 presenta los datos generales de la red, temperaturas de entrada y salida de las corrientes que intercambian calor, carga térmica y área de transferencia de cada uno de los equipos que integran la red actual.

El consumo actual de servicios de enfriamiento es de 23495 kW y de calentamiento es de 27100 kW. El área total de transferencia de calor de los intercambiadores proceso-proceso es de 4015 m<sup>2</sup> y de 6339 m<sup>2</sup> incluyendo el área de servicios, con lo cual queda completamente definida la red de intercambio de calor. El siguiente paso es el establecimiento de los objetivos económico-energéticos, lo cual comienza con la determinación de la eficiencia de la red actual.

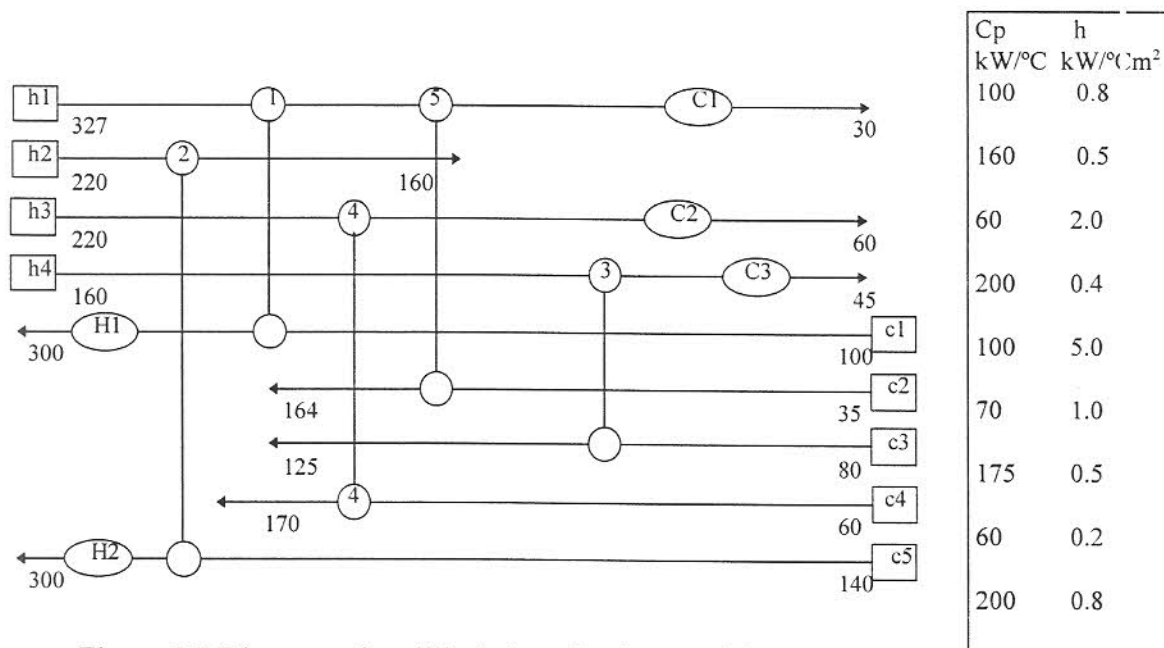


Figura 4.1 Diagrama de rejilla de la red existente del Caso 4.1

Tabla 4.1 Datos de los intercambiadores de la red existente (Caso 4.1), área de transferencia, carga térmica, temperaturas de entrada y salida de las corrientes.

|    | Corrientes | T entrada,<br>(°C) | T salida,<br>(°C) | Carga<br>térmica (kW) | Area<br>(m <sup>2</sup> ) |
|----|------------|--------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1  | h1         | 327                | 174               | 15300                 | 300                       |
|    | c1         | 100                | 253               |                       |                           |
| 2  | h2         | 220                | 160               | 9600                  | 1222                      |
|    | c4         | 140                | 188               |                       |                           |
| 3  | h4         | 160                | 121               | 7880                  | 939                       |
|    | c3         | 80                 | 125               |                       |                           |
| 4  | h3         | 220                | 110               | 6600                  | 726                       |
|    | c4         | 60                 | 170               |                       |                           |
| 5  | h1         | 174                | 84                | 9030                  | 828                       |
|    | c2         | 35                 | 164               |                       |                           |
| C1 | h1         | 84                 | 30                | 5370                  | 575                       |
|    | w          | 15                 | 30                |                       |                           |
| C2 | h3         | 110                | 60                | 3000                  | 123                       |
|    | w          | 15                 | 30                |                       |                           |
| C3 | h4         | 121                | 45                | 15125                 | 1241                      |
|    | w          | 15                 | 30                |                       |                           |
| H1 | c1         | 253                | 300               | 4700                  | 46                        |
|    | St         | 400                | 400               |                       |                           |
| H2 | c4         | 188                | 300               | 22400                 | 338                       |
|    | St         | 400                | 400               |                       |                           |

La eficiencia de la red está definida como la relación entre el área mínima de transferencia correspondiente al consumo de servicios actuales de la red y el área existente de la red actual, Ecuación 3.1, por lo cual es necesario obtener el área mínima correspondiente a los requerimientos energéticos actuales.

#### **4.2 Determinación del área mínima y servicios mínimos del Caso 4.1**

Los coeficientes de transferencia de calor de las corrientes que integran la red son diferentes por lo menos en un orden de magnitud, lo cual puede provocar que el intercambio cruzado requiera una menor área de transferencia que un intercambio vertical. La aplicación de la fórmula Bath para la predicción del área mínima puede resultar insatisfactoria, de acuerdo con los resultados obtenidos del análisis presentado en el Capítulo 2. Para evitar el inconveniente que presenta la fórmula Bath se puede utilizar el concepto del punto de pliegue diverso de Rev y Fonyo, el cual involucra la definición de diferencias de temperaturas de contribución como función del coeficiente de transferencia y de los parámetros  $k$  y  $z$  (Ecuación 1.8). Además, cuando los valores de los coeficientes de transferencia difieran por lo menos en un orden de magnitud la fórmula Bath diversa modificada predice una área mínima menor:

Al introducir el concepto del punto de pliegue diverso de Rev y Fonyo es necesario determinar el valor de los parámetros  $k$  y  $z$  de las  $\Delta T$ s de contribución para cada corriente correspondientes al consumo de servicios mínimo dado para un  $\Delta T_{\min}$  global, es decir, los valores de  $z$  y  $k$  deben cumplir con las restricciones termodinámicas del sistema. La Tabla 4.2 presenta los valores de los requerimientos mínimos energéticos y del parámetro  $k$  correspondientes a cada valor de  $\Delta T_{\min}$  global, considerando  $z$  igual a la unidad. El consumo mínimo de servicios correspondiente a un  $\Delta T_{\min}$  global se obtiene del balance de energía a partir de la cascada de calor.

La Tabla 4.3 presenta los valores del área mínima de transferencia proceso-proceso y balanceada predicha por la fórmula Bath diversa modificada, propuesta por Serna. El consumo de servicios actuales corresponde a un  $\Delta T_{\min}$  global igual a  $37.5^{\circ}\text{C}$ , el valor del parámetro  $k$  es 10.038, el área mínima de transferencia proceso-proceso es de  $3267\text{ m}^2$  y balanceada de  $5587\text{ m}^2$  utilizando el algoritmo de Serna.



Tabla 4.2 Requerimientos mínimos energéticos y valores de k para  $z = 1$  del Caso 4.1.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $Q_{cmin}$<br>(kW) | $Q_{hmin}$<br>(kW) | $z = 1$<br>k |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| 5                        | 12575              | 16180              | 1.49068      |
| 10                       | 14375              | 17980              | 2.98137      |
| 15                       | 16175              | 19780              | 4.47205      |
| 20                       | 17975              | 21580              | 5.79005      |
| 25                       | 19575              | 23180              | 6.94444      |
| 30                       | 21175              | 24780              | 8.09884      |
| 35                       | 22775              | 26380              | 9.42308      |
| 37.5                     | 23495              | 27100              | 10.0385      |
| 40                       | 24375              | 27980              | 10.7906      |

Tabla 4.3 Area mínima de transferencia proceso-proceso y balanceada predicha por la fórmula Bath diversa modificada (propuesta por Serna) para el Caso 4.1.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area mínima<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) | Area mínima<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 17300   | 18932  |
| 10                       | 10697   | 12460  |
| 15                       | 7689  | 9574   |
| 20                       | 5913  | 7914   |
| 25                       | 4857  | 6956   |
| 30                       | 4083  | 6274   |
| 35                       | 3493  | 5773   |
| 37.5                     | 3267  | 5587   |
| 40                       | 3013  | 5385   |

### 4.3 Eficiencia, inversión y ahorro potencial

A partir de la definición de la eficiencia de la red, dada por la Ecuación 3.1, se determina la eficiencia del Caso 4.1 respecto del área proceso-proceso (Ecuación 4.1 a) y balanceada (Ecuación 4.1 b).

$$\alpha_{\text{PROCESO-PROCESO}} = \frac{A_{\text{min}}_{\text{PROCESO-PROCESO}}}{A_{\text{existente}}_{\text{PROCESO-PROCESO}}} = \frac{3267}{4015} = 0.814 \quad (4.1 \text{ a})$$

$$\alpha_{\text{BALANCEADA}} = \frac{A_{\text{min}}_{\text{BALANCEADA}}}{A_{\text{existente}}_{\text{BALANCEADA}}} = \frac{5587}{6339} = 0.881 \quad (4.1 \text{ b})$$

Si se considera que la relación entre el área mínima y el área existente permanece constante, se puede predecir el área requerida para llevar a cabo el diseño revisado de la red a partir de la Ecuación 4.2. La predicción del área mínima de transferencia de rediseño proceso-proceso ó balanceada se obtiene sustituyendo en la Ecuación 4.2 el área mínima y la eficiencia correspondiente al área involucrada (Ecuaciones 4.1 a y 4.1 b). La Tabla 4.4 presenta los valores calculados del área de transferencia predicha para el rediseño correspondiente a diferentes  $\Delta T_{\text{min}}$  globales.

$$A_{\text{rediseño}} = \frac{A_{\text{minima}}}{\alpha_{\text{Constante}}} \quad (4.2)$$

Tabla 4.4 Area de reajuste proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.1.

| $\Delta T_{\text{min}}$<br>(°C) | Area de reajuste<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Area de reajuste<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------|---|--|
| 5                               | 21852   | 21261  |
| 10                              | 14272   | 13146  |
| 15                              | 10899   | 9450   |
| 20                              | 8998  | 7267   |
| 25                              | 7902  | 5969   |
| 30                              | 7126  | 5018   |
| 35                              | 6551  | 4293   |
| 40                              | 6113  | 3703   |

Por otro lado, el monto de la inversión adicional necesario para realizar el rediseño estará dada por la Ecuación 4.2

$$\text{Inversión adicional} = 30800 + 750 * A_{\text{adicional}}^{0.83} \quad (4.2)$$

Donde el  $A_{\text{adicional}}$  es la diferencia entre el área de rediseño predicha (considerando que la

eficiencia es constante) y el área existente, por lo tanto el área adicional está dada en función del área mínima y de la eficiencia de la red por la Ecuación 4.3. La Tabla 4.5 presenta los valores del área adicional proceso-proceso y balanceada.

$$A_{\text{adicional}} = \frac{A_{\text{mínima}}}{\alpha} - E_{\text{existente}} \quad (4.3)$$

Tabla 4.5 Área adicional proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.1.

| $\Delta T_{\text{min}}$<br>(°C) | Área adicional<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Área adicional<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------|---|--|
| 5                               | 15140   | 17246  |
| 10                              | 7798  | 9131   |
| 15                              | 4524  | 5435   |
| 20                              | 2640  | 3252   |
| 25                              | 1553  | 1955   |
| 30                              | 779   | 1003   |
| 35                              | 211   | 278  |

El objetivo del diseño revisado de una red es ahorrar una mayor cantidad de energía utilizando lo más posible el área existente; el ahorro potencial en los costos de operación (Ecuación 4.4) está dado por la diferencia entre el costo de los servicios actuales y el costo de los servicios mínimos correspondientes al  $\Delta T_{\text{min}}$  del reajuste.

$$\text{Ahorro potencial} = 110 \cdot (Q_h - Q_{h\text{min}}) + 10 \cdot (Q_c - Q_{c\text{min}}) \quad (4.4)$$

donde  $Q_h$  y  $Q_c$  son los servicios actuales de calentamiento y enfriamiento respectivamente,  $Q_{h\text{min}}$  y  $Q_{c\text{min}}$  son los servicios mínimos de calentamiento y enfriamiento respectivamente del diseño revisado de la red a un  $\Delta T_{\text{min}}$  global.

#### 4.4 Determinación de objetivos

La metodología presentada por Tjoe y Linnhoff sugiere la preparación de gráficos de ahorro potencial contra inversión adicional, tal como muestra la Figura 4.2 para el Caso 4.1, presentado en este capítulo.

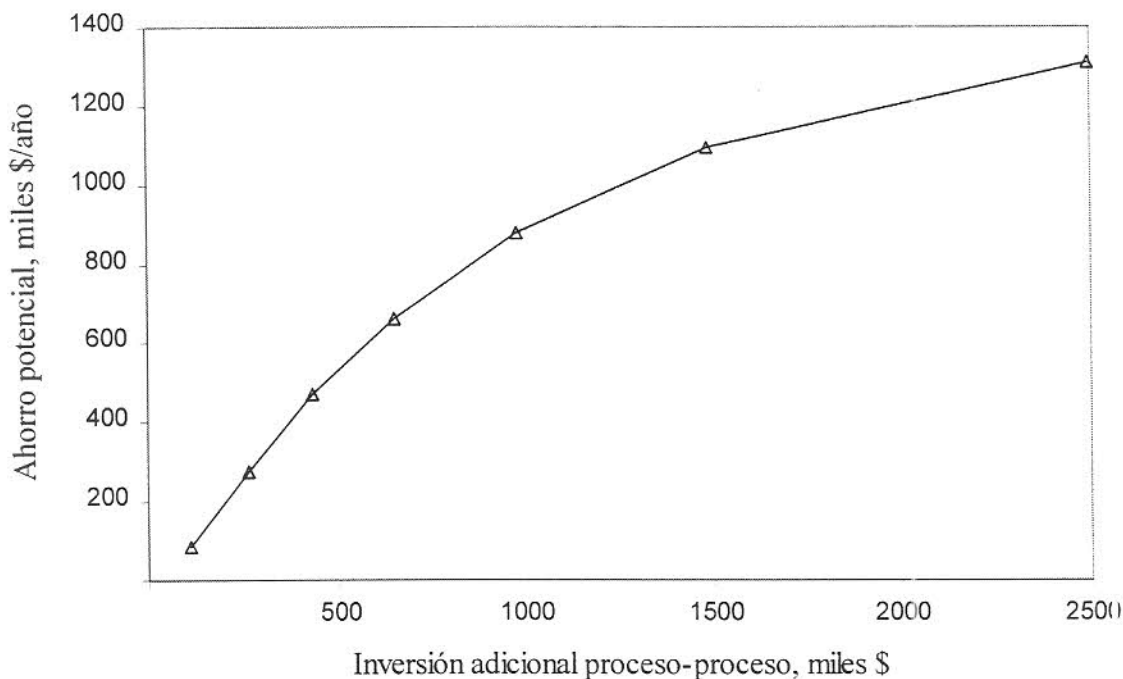


Figura 4.2 Ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso para el Caso 4.1

Al analizar la Figura 4.2 podemos observar que a  $\Delta T_{\min}$  pequeños los tiempos de recuperación son grandes y a  $\Delta T_{\min}$  grandes se tienen tiempos de recuperación cortos; por lo tanto la determinación de objetivos económico-energéticos queda definida por el diseñador al establecer el monto de la inversión o el tiempo de recuperación. La tendencia esperada del tiempo de recuperación con respecto al  $\Delta T_{\min}$  según este análisis está presentada en la Figura 4.3. Sin embargo, se ha encontrado en este proyecto que el tiempo de recuperación puede presentar un mínimo, una situación de notable interés en el rediseño de redes de intercambio de calor. A partir de la definición del tiempo de recuperación, dada por la Ecuación 4.5, conociendo el monto de la inversión adicional y el ahorro potencial del rediseño de la red para cada  $\Delta T_{\min}$  global se determina el tiempo de recuperación de la inversión correspondiente; los resultados de la determinación del tiempo de recuperación se presentan en la Tabla 4.6, donde a partir de los valores se observa claramente que existe un tiempo mínimo de recuperación, lo cual no se puede apreciar a partir de la Figura 4.2.

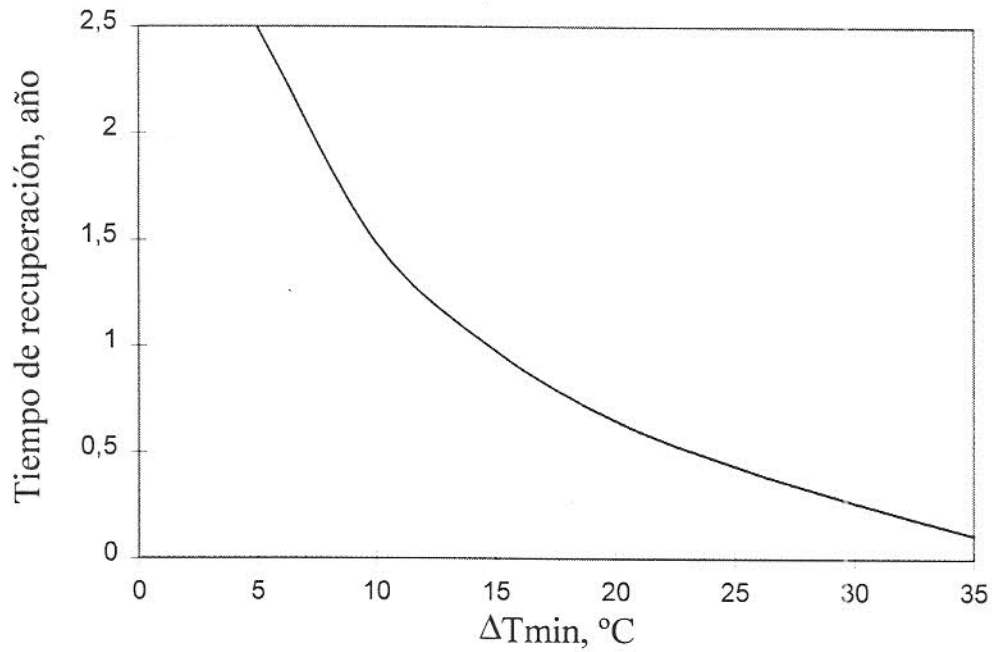


Figura 4.3 Tendencia esperada del tiempo de recuperación en función del  $\Delta T_{min}$  (Tjoe y Linnhoff).

Tabla 4.6 Tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso y balanceada del Caso 4.1.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Tiempo de recuperación (años) |                 |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|
|                          | Balanceada                    | Proceso-proceso |
| 5                        | 1.71                          | 1.90            |
| 10                       | 1.19                          | 1.36            |
| 15                       | 0.96                          | 1.11            |
| 20                       | 0.83                          | 0.98            |
| 25                       | 0.78                          | 0.92            |
| 30                       | 0.79                          | 0.95            |
| 35                       | 1.09                          | 1.28            |

$$t_{RECUPERACION} = \frac{Inversion}{Ahorro} \quad (4.5)$$

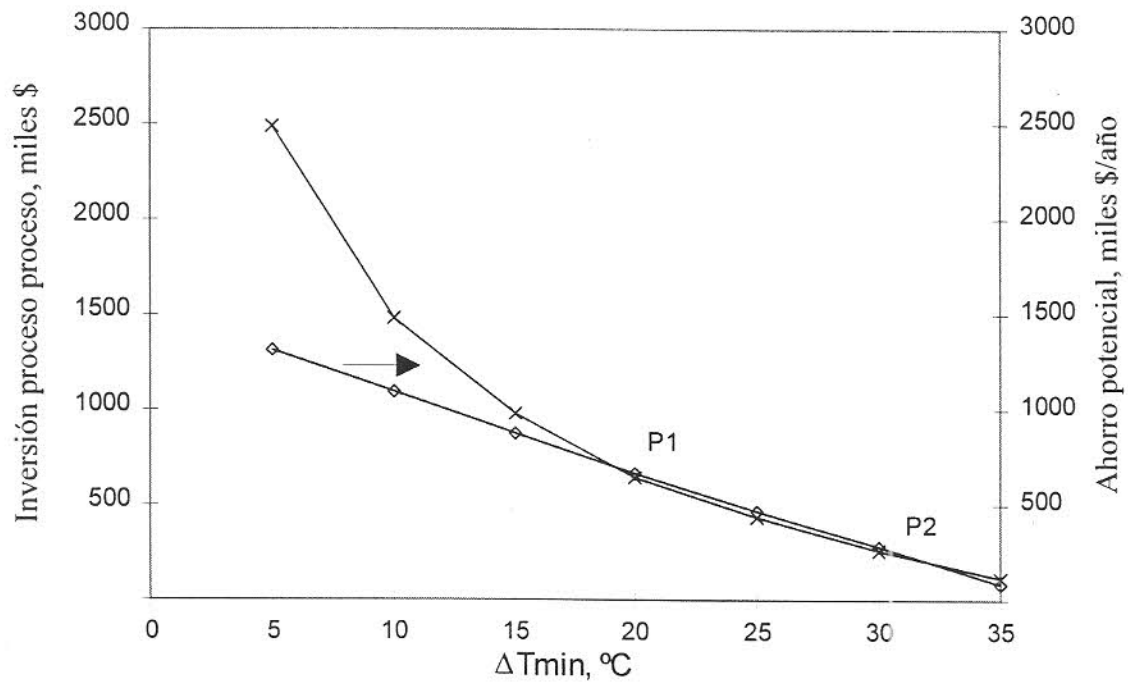


Figura 4.4. Ahorro potencial e inversión adicional de equipo proceso-proceso en función  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.1.

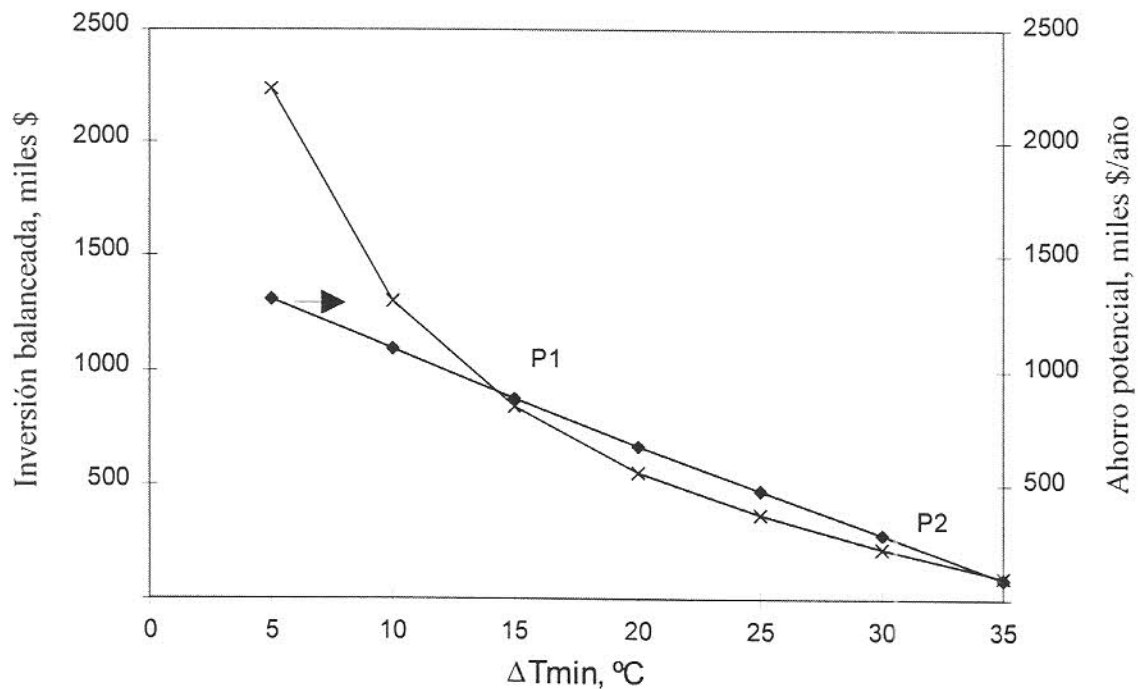


Figura 4.5. Ahorro potencial e inversión adicional de equipo incluyendo servicios auxiliares en función  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.1.

### 4.5.1 Análisis gráfico

Si en lugar de preparar un gráfico de ahorro potencial en función de la inversión se prepara un gráfico del ahorro potencial y de la inversión en función del  $\Delta T_{\min}$ , Figuras 4.4 y 4.5, es posible observar la existencia del punto mínimo en el tiempo de recuperación. La Figura 4.4 muestra la relación tanto del ahorro potencial como de la inversión adicional correspondiente al área proceso-proceso requerida y el  $\Delta T_{\min}$ . La Figura 4.5 es semejante a la Figura 4.4 sólo que ahora se presenta la inversión adicional incluyendo el área de servicios.

En las figuras se pueden identificar dos puntos P1 y P2 que corresponden a los puntos en los cuales el ahorro potencial y la inversión se cruzan. Una vez identificados estos puntos se presentan las siguientes características:

- \* A la izquierda del punto P1 el ahorro es menor que la inversión por lo tanto el tiempo de recuperación es mayor de la unidad.

- \* A la derecha del punto P2 el ahorro es menor que la inversión por lo tanto el tiempo de recuperación es mayor de la unidad.

- \* En los puntos P1 y P2 el ahorro y la inversión son iguales, lo que implica que el tiempo de recuperación es igual a la unidad.

- \* En el rango comprendido entre P1 y P2 el ahorro es mayor que la inversión, donde el tiempo de recuperación en esta zona es menor de la unidad.

A partir de estas observaciones es muy clara la existencia de un punto mínimo en el tiempo de recuperación en el rango donde el ahorro potencial es mayor que la inversión adicional, rango entre P1 y P2.

#### 4.5.2 Análisis matemático

El objetivo de este análisis es encontrar una expresión del tiempo de recuperación como una función del  $\Delta T_{\min}$  y determinar si dicha función tiene un punto mínimo. De la definición del tiempo de recuperación como inversión entre ahorro potencial es necesario encontrar las expresiones del ahorro potencial y de la inversión en función del  $\Delta T_{\min}$  para después relacionarlas y obtener así el  $t_{\text{RECUPERACION}} = f(\Delta T_{\min})$ .

Tal como se muestra en las figuras 4.4 y 4.5 el ahorro potencial presenta una tendencia lineal respecto al  $\Delta T_{\min}$ , la cual se puede representar por la ecuación de una línea recta

$$\text{Ahorro potencial} = a + b \cdot \Delta T \quad (4.6 \text{ a})$$

donde, a partir de una regresión lineal de los datos de ahorro potencial y  $\Delta T_{\min}$  se obtienen los valores de  $a$  y  $b$ ; para el caso de estudio resulta que  $a = 1498971$  y  $b = -404800$ . Por lo tanto, el ahorro potencial está dado por la Ecuación 4.6 b.

$$\text{Ahorro potencial} = 1498971 - 404800 \cdot \Delta T \quad (4.6 \text{ b})$$

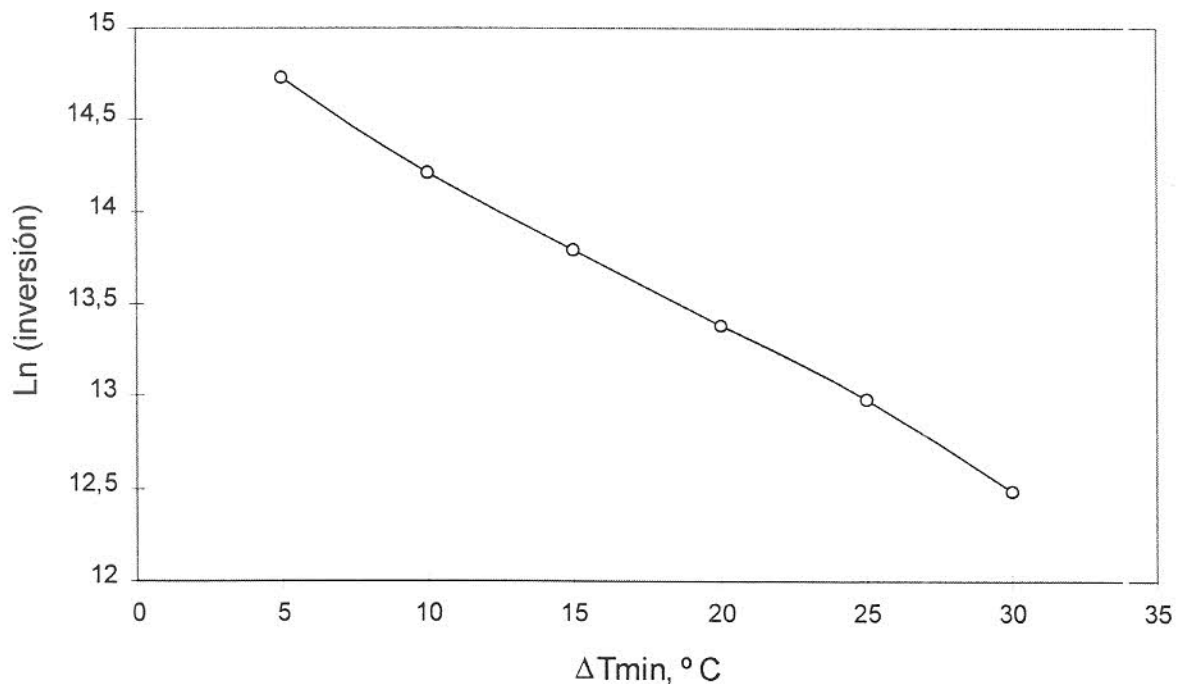


Figura 4.6 Logaritmo natural de la inversión en función del  $\Delta T_{\min}$  para el Caso 4.1.



Por otro lado el logaritmo natural de la inversión adicional presenta también una dependencia lineal con respecto al  $\Delta T_{min}$ , Figura 4.6. Por lo tanto, la inversión como función del  $\Delta T_{min}$  tiene la forma dadas por la Ecuación 4.7.

$$Inversion = e^{c+d \cdot \Delta T} \tag{4.7}$$

donde los valores de la ordenada al origen  $c$  y de la pendiente  $d$  fueron obtenidos a partir de la regresión lineal del logaritmo natural de la inversión y el  $\Delta T_{min}$ . La Tabla 4.7 muestra los diferentes valores de  $c$  y  $d$  para la inversión proceso-proceso y la inversión balanceada.

Tabla 4.7 Valores de la ordenada al origen  $c$  y de la pendiente  $d$  de la Ecuación 4.6 para el Caso 4.1.

| <i>Proceso-Proceso</i> |          | <i>Balanceada</i> |          |
|------------------------|----------|-------------------|----------|
| <i>c</i>               | <i>d</i> | <i>c</i>          | <i>d</i> |
| 15.27                  | -0.097   | 15.15             | -0.099   |

La expresión del tiempo de recuperación como una función del  $\Delta T_{min}$  se obtiene de la relación entre la Ecuación 4.7 (inversión) y la Ecuación 4.6 b (ahorro), por lo tanto el tiempo de recuperación está dado por la Ecuación 4.8.

$$t_{RECUPERACION} = \frac{Inversion}{Ahorro} = \frac{e^{c+d \cdot \Delta T}}{a + b \cdot \Delta T} \tag{4.8}$$

Para saber si esta función tiene un punto mínimo es necesario obtener la primera derivada respecto al  $\Delta T$ , igualarla a cero y encontrar el valor de  $\Delta T$  que satisface la igualdad. Después evaluar la segunda derivada en el  $\Delta T$  obtenido anteriormente y se tendrá un valor mínimo en este punto si el valor de la segunda derivada es positivo.

$$\frac{d t_{RECUPERACION}}{d \Delta T} = \frac{e^{c+d \cdot \Delta T} [d(a + b \cdot \Delta T) - b]}{(a + b \cdot \Delta T)^2} \tag{4.9}$$

$$\frac{d^2 t_{RECUPERACION}}{d\Delta T^2} = \frac{e^{c+d \cdot \Delta T}}{(a + b \cdot \Delta T)^3} \left\{ \left[ (a + b\Delta T)d - b \right]^2 + b^2 \right\} \Big|_{\Delta T=26.5} \quad (4.10)$$

El valor de  $\Delta T$  que satisface la Ecuación 4.9 es de 26.5 °C. Al sustituir este valor en la expresión de la segunda derivada, Ecuación 4.10, se obtiene que existe un punto mínimo en el tiempo de recuperación a un  $\Delta T$  igual a 26.5 °C, ya que el valor de la función es positivo. Por otro lado se evalúa la primera derivada a valores de  $\Delta T$  alrededor de 26.5°C y existe un cambio de signo de la función de negativo a positivo implica que tenemos un mínimo en la función. La Tabla 4.8 presenta los resultados de la evaluación de la primera derivada del  $t_{RECUPERACION}$  con respecto al  $\Delta T_{min}$  tanto para el caso en que se considera la inversión de equipo proceso-proceso como para cuando se incluye el equipo de los servicios.

Tabla 4.8 Evaluación de la primera derivada del tiempo de recuperación con respecto al  $\Delta T$  para el Caso 4.1

| $\Delta T$<br>(°C) | $dt/d \Delta T$<br><i>Proceso-Proceso</i> | $dt/d \Delta T$<br><i>Balanceda</i> |
|--------------------|---|-------------------------------------|
| 20                 | -0.033                                    | -0.030                              |
| 25                 | -0.009                                    | -0.009                              |
| 30                 | 0.043                                     | 0.034                               |

Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran el tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso y balanceada en función del  $\Delta T_{min}$ , respectivamente. Tal como se observa en las figuras el punto mínimo del tiempo de recuperación está alrededor de los 25 °C, tal como se encontró a partir de la expresión del  $t_{RECUPERACION} = f(\Delta T)$ .

Además del Caso 4.1 presentado en este capítulo, se llevó a cabo el estudio de tres redes de intercambio de calor, cuyos resultados se presentan resumidos en el Apéndice C. En todos los casos estudiados se encontró que existe un  $\Delta T_{min}$  para el cual el tiempo de recuperación presenta un mínimo.

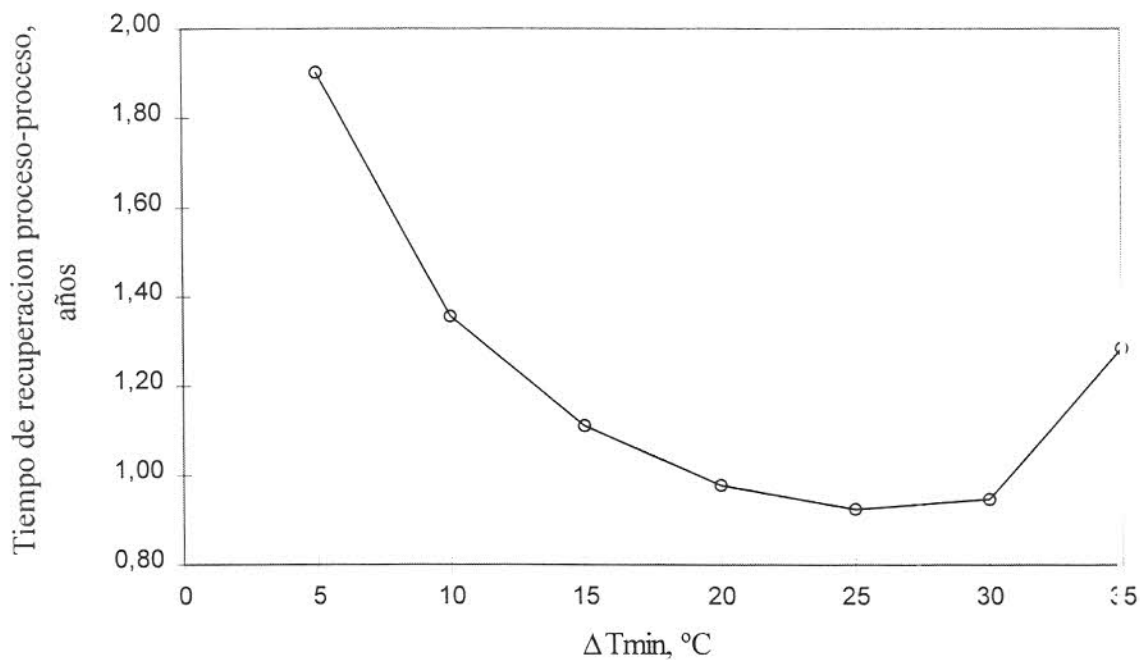


Figura 4.7 Tiempo de recuperación de la inversión del equipo proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.1.

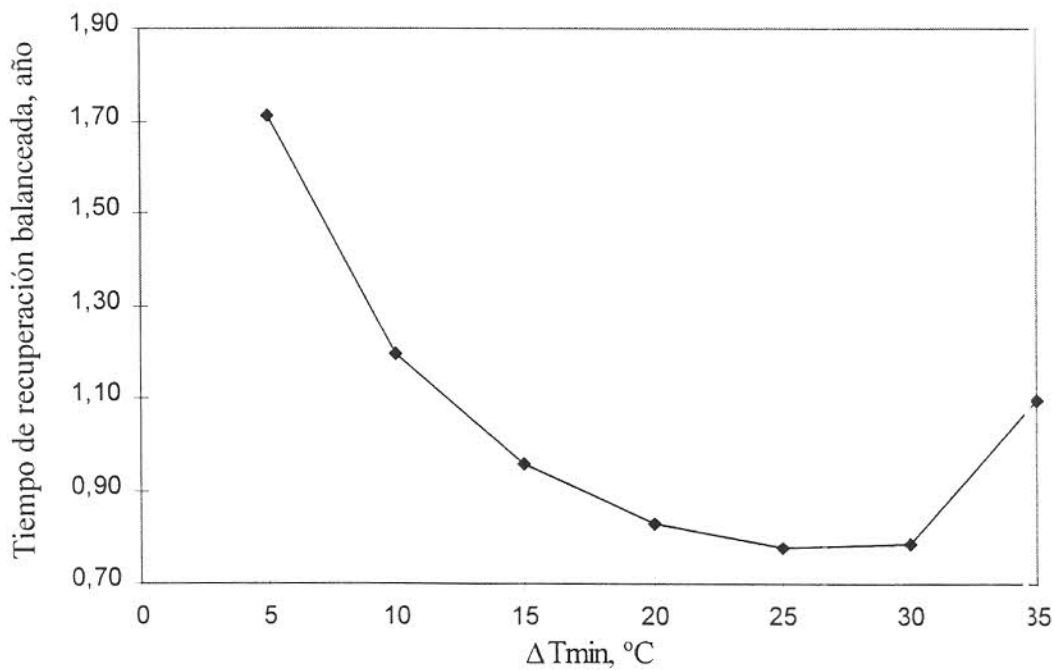


Figura 4.8 Tiempo de recuperación de la inversión incluyendo el equipo de servicios auxiliares en función del  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.1.

## **4.6 Conclusiones**

Para valores de  $\Delta T_{\min}$  pequeños y muy cercanos al  $\Delta T_{\min}$  inicial (correspondiente al consumo de servicios originales) el tiempo de recuperación aumenta, generándose en el rango de  $\Delta T_{\min}$  intermedio un tiempo de recuperación mínimo.

Antes de realizar el rediseño en la etapa de determinación de objetivos es posible predecir el  $\Delta T_{\min}$  correspondiente al tiempo mínimo de recuperación, el cual puede ser utilizado como objetivo económico-energético para problemas de rediseño de redes de intercambio de calor.

## Capítulo 5

# REDISEÑO DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR CON COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR VARIABLES

En este capítulo se presenta el rediseño de la red del Caso 4.1 a diferentes  $\Delta T_{\min}$  globales y se comparan los resultados obtenidos del rediseño con los predichos en la etapa de determinación de objetivos económico-energéticos, dados en el Capítulo 4. Cuando los coeficientes de transferencia de calor son muy diferentes no es estrictamente cierto que el intercambio de calor vertical requiera la menor área de transferencia, ya que se ha encontrado que para estos casos un intercambio cruzado conduce a un área menor, lo cual se ve reflejado en el diseño o rediseño de la red y como consecuencia en el costo de equipo (inversión). En base a los resultados del análisis presentado en el Capítulo 2, se utiliza el concepto del punto de pliegue diverso (Rev y Fonyo) para la determinación de las temperaturas del punto de pliegue para el caso de estudio. Además se utilizan los valores del área mínima de transferencia obtenidos en el Capítulo 4, los cuales fueron predichos por la fórmula Bath diversa modificada.

### 5.1 Temperatura del punto de pliegue

Al introducir el concepto del punto de pliegue diverso se tendrán diferencias mínimas de temperaturas entre pares de corrientes y como consecuencia no se tendrá una sola temperatura del punto de pliegue para las corrientes calientes y frías, sino que la temperatura del punto de pliegue para cada corriente dependerá de la  $\Delta T$  (Ecuación 5.1) de contribución de la misma. A su vez el  $\Delta T$  depende del coeficiente de transferencia de calor individual y de los parámetros  $k$  y  $z$ .

$$\Delta T_i = \frac{k}{h^z} \quad (5.1)$$

Para comenzar el diseño revisado de una red es necesario conocer las temperaturas del punto de pliegue individuales de las corrientes correspondientes al consumo de servicios mínimos de un  $\Delta T_{min}$  global. Los valores de las temperaturas se obtienen de la siguiente forma:

- 1.- Se establece un  $\Delta T_{min}$  global y el valor de  $z$  igual a la unidad.
- 2.- Se determina el valor del parámetro  $k$  que cumpla con los requerimientos mínimos correspondientes al  $\Delta T_{min}$  establecido, así como la temperatura del punto de pliegue.
- 3.- Se calculan las temperaturas del punto de pliegue individuales para cada corriente por medio de la Ecuación 5.2.

$$T_i = \text{pliegue} \pm \frac{k}{h^z} \quad (5.2)$$

donde se usa + para las corrientes calientes y - para las corrientes frías. Esta serie de operaciones se realiza para varios  $\Delta T_{min}$  globales, y las temperaturas del punto de pliegue que se obtienen para cada corriente se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Temperaturas del punto de pliegue para cada corriente correspondientes a los diferentes  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 4.1.

| Corriente | $\Delta T_{min}$ (°C) |        |        |        |        |        |
|-----------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | 30                    | 25     | 20     | 15     | 10     | 5      |
| <b>h1</b> | 111.74                | 110.07 | 108.40 | 151.18 | 147.45 | 143.73 |
| <b>h2</b> | 117.82                | 115.28 | 160.00 | 154.53 | 149.69 | 144.84 |
| <b>h3</b> | 105.67                | 104.86 | 104.05 | 147.83 | 145.22 | 142.61 |
| <b>h4</b> | 121.87                | 118.75 | 115.63 | 156.77 | 151.18 | 145.59 |
| <b>c1</b> | 100.00                | 100.00 | 100.00 | 144.7  | 143.13 | 141.57 |
| <b>c2</b> | 93.52                 | 94.44  | 95.37  | 141.12 | 140.75 | 140.37 |
| <b>c3</b> | 85.42                 | 87.50  | 89.58  | 125.00 | 137.76 | 138.88 |
| <b>c4</b> | 61.13                 | 66.67  | 72.21  | 123.23 | 128.82 | 134.41 |
| <b>c5</b> | 91.49                 | 92.71  | 140.0  | 140.00 | 140.00 | 140.00 |

## 5.2 Diseño revisado de la red

Para ilustrar la metodología de reajuste de redes de intercambio se presenta el rediseño del Caso 4.1, definido en el Capítulo 4, a un  $\Delta T_{\min}$  global de 20 °C. El rediseño inicia con la colocación de los intercambiadores existentes respecto a las temperaturas del punto de pliegue de las corrientes correspondientes al  $\Delta T_{\min}$  global.

La Figura 5.1 presenta el diagrama de rejilla de la red respecto al punto de pliegue para un  $\Delta T_{\min}$  global de 20 °C, donde se aprecia que tanto los intercambiadores 3, 4 y 5 como los enfriadores C2 y C3 transfieren calor a través del punto de pliegue, lo que ocasiona que la red tenga un consumo de servicios mayor que el mínimo correspondiente a un  $\Delta T_{\min}$  global de 20 °C. Una vez identificados los intercambiadores que transfieren calor a través del punto de pliegue, el diseño revisado de la red se realiza por arriba (Figura 5.2) y por debajo (Figura 5.3) del punto de pliegue, eliminando los intercambiadores que violan los principios fundamentales del método, añadiendo los intercambiadores requeridos para la integración de energía y reacomodando los intercambiadores eliminados.

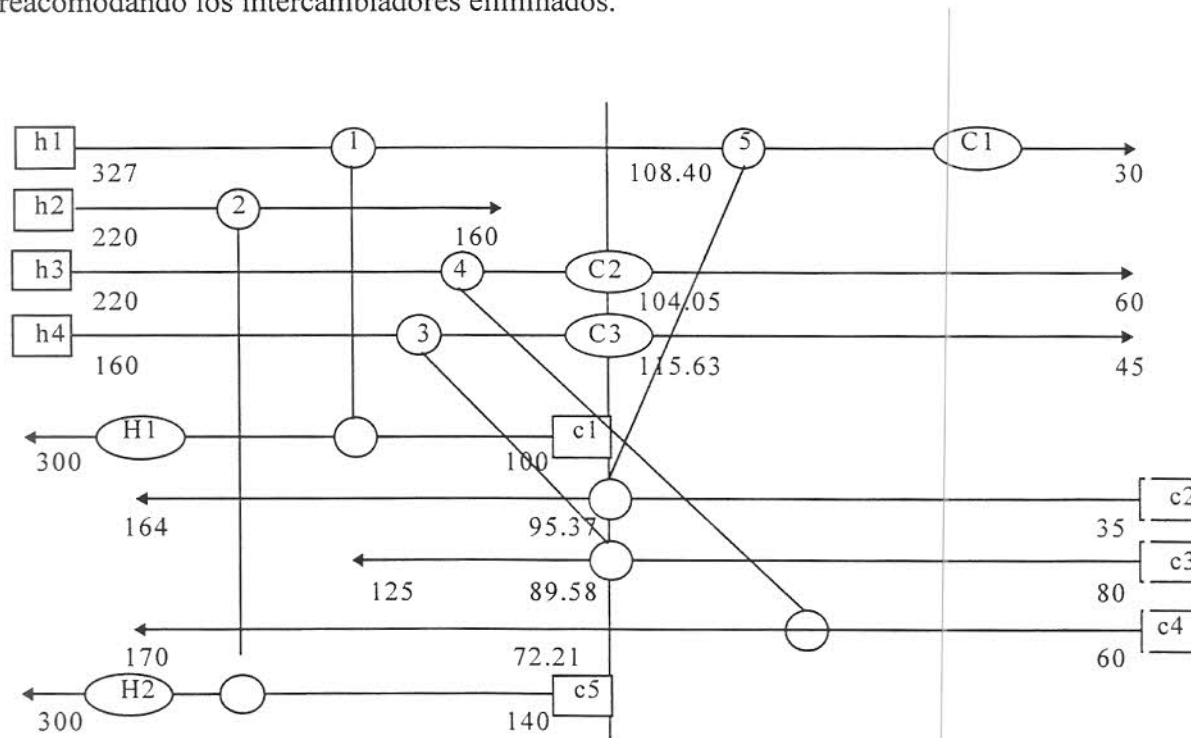


Figura 5.1 Diagrama de rejilla de la red existente respecto a las temperaturas del punto de pliegue correspondientes al  $\Delta T_{\min}$  global de 20°C para el Caso 4.1.

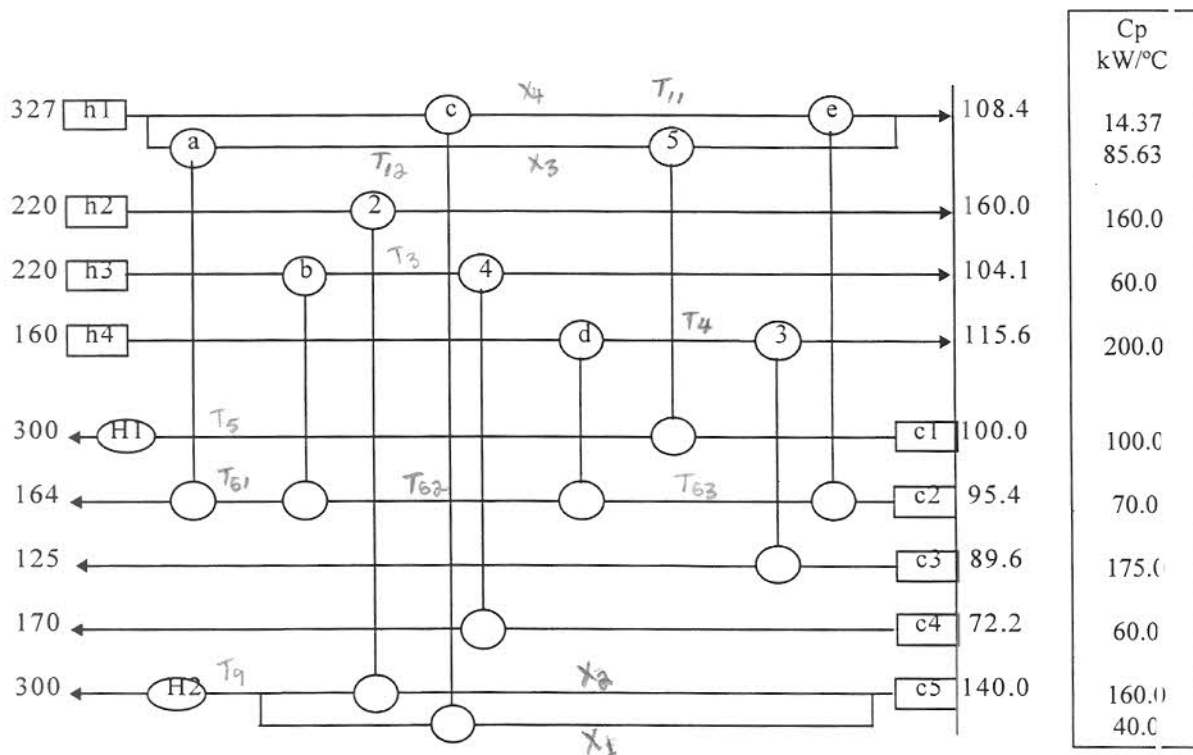


Figura 5.2 Diagrama de rejilla del rediseño de la red por arriba del punto de pliegue e para un  $\Delta T_{min}$  global de 20 °C del Caso 4.1.

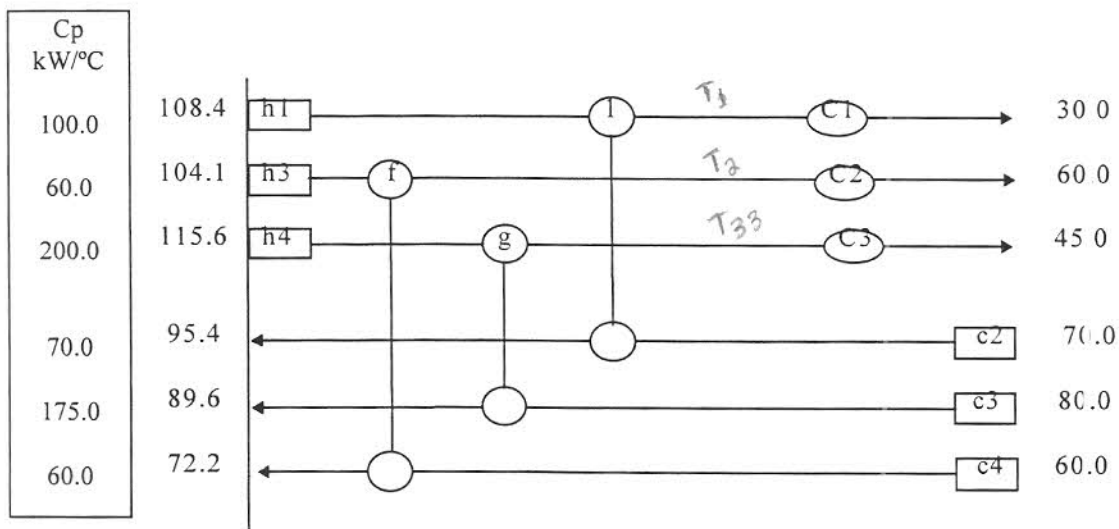


Figura 5.3 Diagrama de rejilla del rediseño de la red por abajo del punto de pliegue de para un  $\Delta T_{min}$  de 20 °C global del Caso 4.1.



La selección de las corrientes que intercambian calor en el rediseño se lleva a cabo tratando de conservar lo más posible la estructura de la red original, lo que implica un menor número de modificaciones y por lo tanto un rediseño más fácil. También es necesario tener en mente hacer un uso eficiente del área disponible en los intercambiadores existentes. Sin embargo, la estructura del diseño revisado de la red depende en gran parte de la  $\Delta T_{min}$ . Para algunos valores de  $\Delta T_{min}$  la realización del rediseño es más fácil y eficiente que para otros.

El rediseño final de la red para el  $\Delta T_{min}$  global de 20 °C se obtiene al unir los rediseños de la red por arriba y por debajo presentados en las Figuras 5.2 y 5.3, respectivamente; la Figura 5.4 presenta el diagrama de rejilla del rediseño final. Los intercambiadores 2, 3 y 4 intercambian calor entre las mismas corrientes del diseño original, sólo que los rangos de temperatura del intercambio varían. Sin embargo, en el intercambiador 1 del diseño original las corrientes involucradas eran la corriente caliente 1 y la fría 1, pero en el rediseño las corrientes involucradas son la corriente caliente 1 y la fría 2; la corriente caliente 1 y la corriente fría 2 originalmente estaban involucradas en el intercambiador 5, pero después del rediseño el intercambio se da entre la corriente caliente 1 y la fría 1.

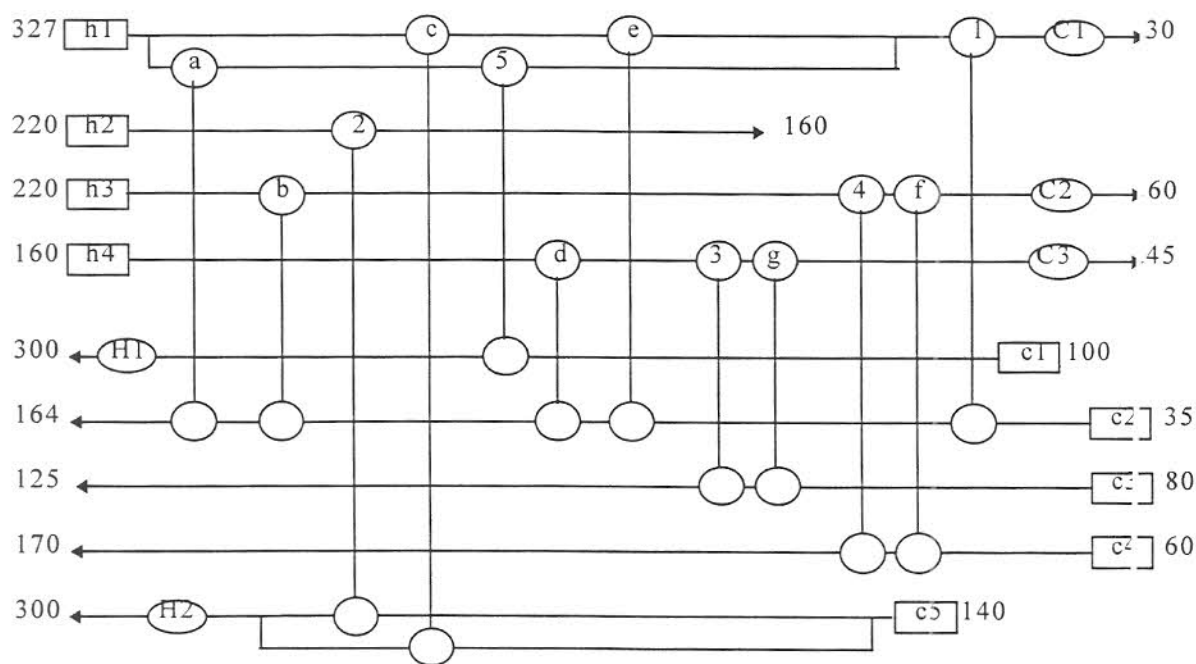


Figura 5.4 Diagrama de rejilla del rediseño final de la red correspondiente a un  $\Delta T_{min}$  global de 20 °C del Caso 4.1.

Tabla 5.2 Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a un  $\Delta T$  min global de 20 °C para el Caso 4.1.

|           | <i>Corrientes</i> | <i>T</i><br><i>entrada</i><br>(°C) | <i>T</i><br><i>salida</i><br>(°C) | <i>Carga</i><br><i>térmica</i><br>(kW) | <i>Area</i><br><i>Existente</i><br>(m <sup>2</sup> ) | <i>Area</i><br><i>Rediseño</i><br>(m <sup>2</sup> ) | <i>Area</i><br><i>Adicional</i><br>(m <sup>2</sup> ) |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|-----------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|--|---|--|-----------|----|-----|-----|-------|--------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|-------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|-------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|-------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|--|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|--|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|------|------|--|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|-----|-----|--|----|-----|-----|-----------|----|-----|-----|-------|-----|
| <b>1</b>  | h1                | 108                                | 66                                | 4222                                   | 299.8  | 456   | 156  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c2                | 35                                 | 95                                |  |  |   |  | <b>2</b>  | h2 | 220 | 160 | 9600  | 1222.0 | 1560 | 338 | c5 | 140 | 200 | <b>3</b>  | h4 | 147 | 116 | 6198  | 939.0 | 1174 | 235 | c3 | 90  | 125 | <b>4</b>  | h3 | 202 | 104 | 5867  | 726.0 | 1013 | 287 | c4 | 72  | 170 | <b>5</b>  | h1 | 324 | 108 | 18419 | 828.0 | 1334 | 506 | c1 | 100 | 284 | <b>a</b>  | h1 | 327 | 324 | 298   |      | 4    | 4   | c2 | 160 | 164 | <b>b</b>  | h3 | 220 | 202 | 1090  |      | 28   | 28  | c2 | 144 | 160 | <b>c</b>  | h1 | 327 | 160 | 2400  |      | 104  | 104 | c5 | 140 | 200 | <b>d</b>  | h4 | 160 | 147 | 2675  |      | 356  | 356 | c2 | 106 | 144 | <b>e</b>  | h1 | 160 | 108 | 742   |      | 58   | 58  | c2 | 95  | 106 | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |      | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |      | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575  | 489  |  | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123  | 90   |  | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |  | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46  | 18  |  | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338 |
| <b>2</b>  | h2                | 220                                | 160                               | 9600                                   | 1222.0   | 1560  | 338  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c5                | 140                                | 200                               |  |  |   |  | <b>3</b>  | h4 | 147 | 116 | 6198  | 939.0  | 1174 | 235 | c3 | 90  | 125 | <b>4</b>  | h3 | 202 | 104 | 5867  | 726.0 | 1013 | 287 | c4 | 72  | 170 | <b>5</b>  | h1 | 324 | 108 | 18419 | 828.0 | 1334 | 506 | c1 | 100 | 284 | <b>a</b>  | h1 | 327 | 324 | 298   |       | 4    | 4   | c2 | 160 | 164 | <b>b</b>  | h3 | 220 | 202 | 1090  |      | 28   | 28  | c2 | 144 | 160 | <b>c</b>  | h1 | 327 | 160 | 2400  |      | 104  | 104 | c5 | 140 | 200 | <b>d</b>  | h4 | 160 | 147 | 2675  |      | 356  | 356 | c2 | 106 | 144 | <b>e</b>  | h1 | 160 | 108 | 742   |      | 58   | 58  | c2 | 95  | 106 | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |      | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |      | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575  | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123  | 90   |  | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |  | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |  | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338 | 312 |  | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |     |
| <b>3</b>  | h4                | 147                                | 116                               | 6198                                   | 939.0  | 1174  | 235  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c3                | 90                                 | 125                               |  |  |   |  | <b>4</b>  | h3 | 202 | 104 | 5867  | 726.0  | 1013 | 287 | c4 | 72  | 170 | <b>5</b>  | h1 | 324 | 108 | 18419 | 828.0 | 1334 | 506 | c1 | 100 | 284 | <b>a</b>  | h1 | 327 | 324 | 298   |       | 4    | 4   | c2 | 160 | 164 | <b>b</b>  | h3 | 220 | 202 | 1090  |       | 28   | 28  | c2 | 144 | 160 | <b>c</b>  | h1 | 327 | 160 | 2400  |      | 104  | 104 | c5 | 140 | 200 | <b>d</b>  | h4 | 160 | 147 | 2675  |      | 356  | 356 | c2 | 106 | 144 | <b>e</b>  | h1 | 160 | 108 | 742   |      | 58   | 58  | c2 | 95  | 106 | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |      | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |      | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575  | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123  | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |  | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |  | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |  | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>4</b>  | h3                | 202                                | 104                               | 5867                                   | 726.0  | 1013  | 287  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c4                | 72                                 | 170                               |  |  |   |  | <b>5</b>  | h1 | 324 | 108 | 18419 | 828.0  | 1334 | 506 | c1 | 100 | 284 | <b>a</b>  | h1 | 327 | 324 | 298   |       | 4    | 4   | c2 | 160 | 164 | <b>b</b>  | h3 | 220 | 202 | 1090  |       | 28   | 28  | c2 | 144 | 160 | <b>c</b>  | h1 | 327 | 160 | 2400  |       | 104  | 104 | c5 | 140 | 200 | <b>d</b>  | h4 | 160 | 147 | 2675  |      | 356  | 356 | c2 | 106 | 144 | <b>e</b>  | h1 | 160 | 108 | 742   |      | 58   | 58  | c2 | 95  | 106 | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |      | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |      | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575  | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123  | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |  | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |  | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>5</b>  | h1                | 324                                | 108                               | 18419                                  | 828.0  | 1334  | 506  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c1                | 100                                | 284                               |  |  |   |  | <b>a</b>  | h1 | 327 | 324 | 298   |        | 4    | 4   | c2 | 160 | 164 | <b>b</b>  | h3 | 220 | 202 | 1090  |       | 28   | 28  | c2 | 144 | 160 | <b>c</b>  | h1 | 327 | 160 | 2400  |       | 104  | 104 | c5 | 140 | 200 | <b>d</b>  | h4 | 160 | 147 | 2675  |       | 356  | 356 | c2 | 106 | 144 | <b>e</b>  | h1 | 160 | 108 | 742   |      | 58   | 58  | c2 | 95  | 106 | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |      | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |      | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575  | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123  | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |  | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>a</b>  | h1                | 327                                | 324                               | 298                                    |  | 4   | 4  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c2                | 160                                | 164                               |  |  |   |  | <b>b</b>  | h3 | 220 | 202 | 1090  |        | 28   | 28  | c2 | 144 | 160 | <b>c</b>  | h1 | 327 | 160 | 2400  |       | 104  | 104 | c5 | 140 | 200 | <b>d</b>  | h4 | 160 | 147 | 2675  |       | 356  | 356 | c2 | 106 | 144 | <b>e</b>  | h1 | 160 | 108 | 742   |       | 58   | 58  | c2 | 95  | 106 | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |      | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |      | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575  | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123  | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>b</b>  | h3                | 220                                | 202                               | 1090                                   |  | 28  | 28   |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c2                | 144                                | 160                               |  |  |   |  | <b>c</b>  | h1 | 327 | 160 | 2400  |        | 104  | 104 | c5 | 140 | 200 | <b>d</b>  | h4 | 160 | 147 | 2675  |       | 356  | 356 | c2 | 106 | 144 | <b>e</b>  | h1 | 160 | 108 | 742   |       | 58   | 58  | c2 | 95  | 106 | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |       | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |      | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575  | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123  | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>c</b>  | h1                | 327                                | 160                               | 2400                                   |  | 104   | 104  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c5                | 140                                | 200                               |  |  |   |  | <b>d</b>  | h4 | 160 | 147 | 2675  |        | 356  | 356 | c2 | 106 | 144 | <b>e</b>  | h1 | 160 | 108 | 742   |       | 58   | 58  | c2 | 95  | 106 | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |       | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |       | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575  | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123  | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>d</b>  | h4                | 160                                | 147                               | 2675                                   |  | 356   | 356  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c2                | 106                                | 144                               |  |  |   |  | <b>e</b>  | h1 | 160 | 108 | 742   |        | 58   | 58  | c2 | 95  | 106 | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |       | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |       | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575   | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123  | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>e</b>  | h1                | 160                                | 108                               | 742                                    |  | 58  | 58   |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c2                | 95                                 | 106                               |  |  |   |  | <b>f</b>  | h3 | 104 | 92  | 732.6 |        | 127  | 127 | c4 | 60  | 72  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |       | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575   | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123   | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241 | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>f</b>  | h3                | 104                                | 92                                | 732.6                                  |  | 127   | 127  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c4                | 60                                 | 72                                |  |  |   |  | <b>g</b>  | h4 | 116 | 107 | 1677  |        | 283  | 283 | c3 | 80  | 90  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575   | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123   | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241  | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46   | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>g</b>  | h4                | 116                                | 107                               | 1677                                   |  | 283   | 283  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | c3                | 80                                 | 90                                |  |  |   |  | <b>C1</b> | h1 | 66  | 30  | 3620  | 575    | 489  |     | w  | 15  | 30  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123   | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241  | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46    | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338  | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>C1</b> | h1                | 66                                 | 30                                | 3620                                   | 575  | 489   |  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | w                 | 15                                 | 30                                |  |  |   |  | <b>C2</b> | h3 | 92  | 60  | 1908  | 123    | 90   |     | w  | 15  | 30  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241  | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46    | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338   | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>C2</b> | h3                | 92                                 | 60                                | 1908                                   | 123  | 90  |  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | w                 | 15                                 | 30                                |  |  |   |  | <b>C3</b> | h4 | 107 | 45  | 12450 | 1241   | 1122 |     | w  | 15  | 30  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46    | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338   | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>C3</b> | h4                | 107                                | 45                                | 12450                                  | 1241   | 1122  |  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | w                 | 15                                 | 30                                |  |  |   |  | <b>H1</b> | c1 | 284 | 300 | 1580  | 46     | 18   |     | St | 400 | 400 | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338   | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>H1</b> | c1                | 284                                | 300                               | 1580                                   | 46   | 18  |  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | St                | 400                                | 400                               |  |  |   |  | <b>H2</b> | c5 | 200 | 300 | 20000 | 338    | 312  |     | St | 400 | 400 |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
| <b>H2</b> | c5                | 200                                | 300                               | 20000                                  | 338  | 312   |  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |
|           | St                | 400                                | 400                               |  |  |   |  |           |    |     |     |       |        |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |       |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |           |    |     |     |       |     |

Los calentadores y enfriadores están en las mismas corrientes originales, y sólo cambian las temperaturas de entrada a cada uno de los equipos. Además, el diseño revisado de la red requiere de seis intercambiadores de calor adicionales. La Tabla 5.2 presenta más detalles acerca del diseño revisado de la red a 20 °C, datos de temperaturas de entrada y salida de cada corriente a los intercambiadores, cargas térmicas, áreas disponibles de los intercambiadores originales, áreas de rediseño y áreas adicionales requeridas por el rediseño.

### 5.3 Eficiencia, inversión y tiempo de recuperación.

El área del diseño revisado de la red a un  $\Delta T_{min}$  global de 20 °C es de 6495 m<sup>2</sup> para el intercambio proceso-proceso y de 8819 m<sup>2</sup> incluyendo el área de servicios. El área adicional requerida por el rediseño es de 2481 m<sup>2</sup> considerando el área proceso-proceso ó incluyendo el área de los servicios auxiliares. Los valores del área de rediseño y adicional a los diferentes  $\Delta T_{min}$  globales se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Área de rediseño y adicional proceso-proceso e incluyendo servicios auxiliares a diferentes valores de  $\Delta T_{min}$  globales para el Caso 4.1.

| $\Delta T_{min}$<br>°C | <i>Área Proceso-Proceso, m<sup>2</sup></i> |                  | <i>Área Balanceada, m<sup>2</sup></i> |                  |
|------------------------|--|------------------|---------------------------------------|------------------|
|                        | <i>Rediseño</i>                            | <i>Adicional</i> | <i>Rediseño</i>                       | <i>Adicional</i> |
| 5                      | 25394.7                                    | 21379.9          | 27921.2                               | 21582.4          |
| 10                     | 13704.9                                    | 9690.1           | 16549.2                               | 10210.4          |
| 15                     | 9085.1                                     | 5070.2           | 12013.6                               | 5674.8           |
| 20                     | 6495.3                                     | 2480.5           | 8819.3                                | 2480.5           |
| 25                     | 5567.7                                     | 1552.9           | 7891.7                                | 1552.9           |
| 30                     | 4742.6                                     | 727.8            | 7066.6                                | 727.8            |
| 35                     | 4442.5                                     | 427.7            | 6780.2                                | 441.4            |

Utilizando la fórmula Bath diversa modificada para la predicción del área mínima, cuyos valores se obtuvieron en el Capítulo 4, la eficiencia de la red considerando sólo el área de transferencia proceso-proceso es de

$$\alpha_{\text{Proceso-proceso}} \big|_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{5913.22}{6495.3} = 0.91 \quad \text{y} \quad \alpha_{\text{Constante}} = 0.814 \quad (5.3 \text{ a y b})$$

y la eficiencia incluyendo el área de servicios auxiliares es de

$$\alpha_{\text{Balanceada}} \big|_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{7913.82}{8819.3} = 0.897 \quad \text{y} \quad \alpha_{\text{Constante}} = 0.881 \quad (5.4 \text{ a y b})$$

La eficiencia de la red, ya sea proceso-proceso ó incluyendo los servicios auxiliares, obtenida del diseño revisado de la red a un  $\Delta T_{\text{min}}$  global de  $20^{\circ}\text{C}$  es mayor que la eficiencia constante de la red existente, cuyos valores están dados por las Ecuaciones 5.3 a y b, 5.4 a y b. La Tabla 5.4 presenta los valores de las eficiencias obtenidas al llevar a cabo el rediseño a diferentes  $\Delta T_{\text{min}}$  globales.

El monto de la inversión requerido por el rediseño al  $\Delta T_{\text{min}}$  global de  $20^{\circ}\text{C}$  en base al equipo adicional es de

$$\text{Inversión adicional} = 30800 + 750 \times (2481^{0.83}) = \$ 523,432 \quad (5.5)$$

y el ahorro potencial obtenido del reajuste a  $20^{\circ}\text{C}$  es de

$$\text{Ahorro potencial} = 110 \times (27100 - 21580) + 10 \times (23495 - 17945) = \$ 662,400 / \text{año} \quad (5.6)$$

Tabla 5.4 Eficiencia de la red rediseñada respecto al área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada para el Caso 4.1.

| $\Delta T_{\text{min}}$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | $\alpha_{\text{Proceso-proceso}}$<br>$\alpha_{\text{CONSTANTE}} = 0.814$ | $\alpha_{\text{Balanceada}}$<br>$\alpha_{\text{CONSTANTE}} = 0.881$ |
|---|--|---|
| 5   | 0.681  | 0.678   |
| 10  | 0.783  | 0.753   |
| 15  | 0.846  | 0.797   |
| 20  | 0.910  | 0.897   |
| 25  | 0.872  | 0.881   |
| 30  | 0.861  | 0.888   |
| 35  | 0.786  | 0.851   |

Por otro lado, el tiempo de recuperación de la inversión está dado por la relación entre la inversión adicional y el ahorro potencial, de manera que el tiempo de recuperación del rediseño a 20 °C está dado por la Ecuación 5.7. La Tabla 5.5 presenta los resultados de inversión, ahorro y tiempo de recuperación para el rediseño a diferentes valores de  $\Delta T_{min}$ .

$$\text{Tiempo de recuperacion} = \frac{523432}{662400} = 0.79 \quad (5.7)$$

Tabla 5.5 Ahorro potencial, inversión adicional y tiempo de recuperación después del rediseño para el Caso 4.1.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Inversión adicional (miles \$) |           | Ahorro potencial<br>(miles \$/año) | Tiempo de recuperación<br>(años) |           |
|--------------------------|--------------------------------|-----------|------------------------------------|----------------------------------|-----------|
|                          | Proceso                        | Balanceda |                                    | Proceso                          | Balanceda |
| 5                        | 2975                           | 2998      | 1310.4                             | 2.270                            | 2.288     |
| 10                       | 1557                           | 1625      | 1094.4                             | 1.423                            | 1.485     |
| 15                       | 923                            | 1010      | 878.4                              | 1.050                            | 1.150     |
| 20                       | 523                            | 523       | 662.4                              | 0.790                            | 0.790     |
| 25                       | 365                            | 365       | 470.4                              | 0.775                            | 0.775     |
| 30                       | 209                            | 209       | 278.4                              | 0.750                            | 0.750     |
| 35                       | 145                            | 148       | 86.4                               | 1.682                            | 1.717     |

#### 5.4 Comprobación de objetivos económico-energéticos

Las Figuras 5.5 a 5.12 comparan los resultados de eficiencia, inversión y tiempo de recuperación obtenidos al llevar a cabo el rediseño de la red y las predicciones hechas considerando que la eficiencia de la red permanece constante e igual a la eficiencia de la red existente.

Tal como se observa en las Figuras 5.5 y 5.6, la eficiencia de la red rediseñada no es constante. La dependencia del  $\Delta T_{min}$  no está bien definida, pero si podemos decir que a  $\Delta T_{min}$  pequeños o muy cercanos al  $\Delta T_{min}$  original la eficiencia del rediseño es menor que la eficiencia inicial, por lo tanto el reajuste a estos valores de  $\Delta T_{min}$  no es conveniente. Sin

embargo, para  $\Delta T_{\min}$  intermedios la eficiencia del rediseño es mayor que la inicial, lo que implica que en esta zona los reajustes son convenientes. Estos efectos se encuentran más marcados cuando se trata de la eficiencia respecto al área proceso-proceso, debido a que el área de servicios original siempre estará sobrada, pues el consumo de servicios es menor a cualquier valor de  $\Delta T_{\min}$  por debajo del valor inicial, lo que implica que se tendrá área de servicios sin reutilizar. El hecho de que el área del rediseño sea mayor o menor que la predicha considerando la eficiencia constante se verá reflejado tanto en la inversión como en el tiempo de recuperación, tal como se muestra en las Figuras 5.7 a 5.12.

De las Figuras 5.7 a 5.10 se observa que la inversión requerida por el rediseño para algunos valores de  $\Delta T_{\min}$  está por encima y en otros por debajo de los valores de la inversión predicha, pero a pesar de estas diferencias la inversión adicional del rediseño como función del  $\Delta T_{\min}$  presenta la misma tendencia que la predicción. Realizando un análisis gráfico semejante al del Capítulo 4 a partir de las Figuras 5.9 y 5.10 se puede concluir que existe un punto mínimo en el tiempo de recuperación; las Figuras 5.11 y 5.12 muestran el tiempo de recuperación en función del  $\Delta T_{\min}$  y se observa claramente dicho punto. El tiempo de recuperación predicho no concuerda numéricamente con el obtenido al llevar a cabo el rediseño, sin embargo presenta la misma tendencia, es decir, se presenta en ambas situaciones un valor mínimo. Además, el tiempo mínimo de recuperación del rediseño se presenta para un  $\Delta T_{\min}$  de 30°C y el predicho a un  $\Delta T_{\min}$  de 25 °C; sin embargo los valores del tiempo de recuperación a 25 °C y 30°C son muy parecidos tanto para del rediseño como para el predicho. Por lo tanto, el rango de  $\Delta T_{\min}$  conveniente para explorar los rediseños se encuentra entre 25 y 30 °C.

Como se mencionó al principio del capítulo la estructura de la red (topología de la red) está estrechamente relacionada con el  $\Delta T_{\min}$ , tal como se puede apreciar en las Figuras 5.4 y 5.13 a 5.18. Para  $\Delta T_{\min}$  pequeños, menores de 15 °C, la estructura de la red presenta un cambio muy notable con respecto a la estructura original de la red, lo cual se refleja en la eficiencia de la red y como consecuencia en la inversión y el tiempo de recuperación. A  $\Delta T_{\min}$  muy cercanos al  $\Delta T_{\min}$  correspondiente a los servicios originales la estructura de la red se conserva casi completamente. La pregunta que surge ahora es por qué entonces la

eficiencia de la red a estos  $\Delta T_{\min}$  es menor que la inicial. La respuesta a esta pregunta no está en los cambios de estructura sino en que el área de algunos intercambiadores existentes es mayor que la requerida al realizar el rediseño siguiendo los principios del punto de pliegue, lo cual conduce a no tener un reuso total del área existente y por lo tanto a una menor eficiencia de la red respecto del área.

Las Figuras 5.13 a la 5.18 presentan el diagrama de rejilla del diseño final revisado de la red a diferentes  $\Delta T_{\min}$ , y las Tablas 5.6 a la 5.11 muestran los detalles de temperaturas de entrada y salida de las corrientes a cada intercambiador, cargas térmicas, áreas de rediseño, existentes y adicionales correspondientes a los rediseños obtenidos.

## **5.5 Conclusiones**

Existe un valor de  $\Delta T_{\min}$  al cual el área de rediseño tiene una máxima aproximación al área mínima de transferencia.

La relación entre el área mínima y el área obtenida del rediseño no permanece constante y la dependencia que tiene respecto al  $\Delta T_{\min}$  presenta un valor máximo.

La tendencia del ahorro potencial y la inversión adicional respecto al  $\Delta T_{\min}$  es la misma que la predicha considerando la eficiencia de la red constante e igual al valor inicial.

Existe un tiempo mínimo de recuperación de la inversión adicional requerida para realizar el diseño revisado de la red.

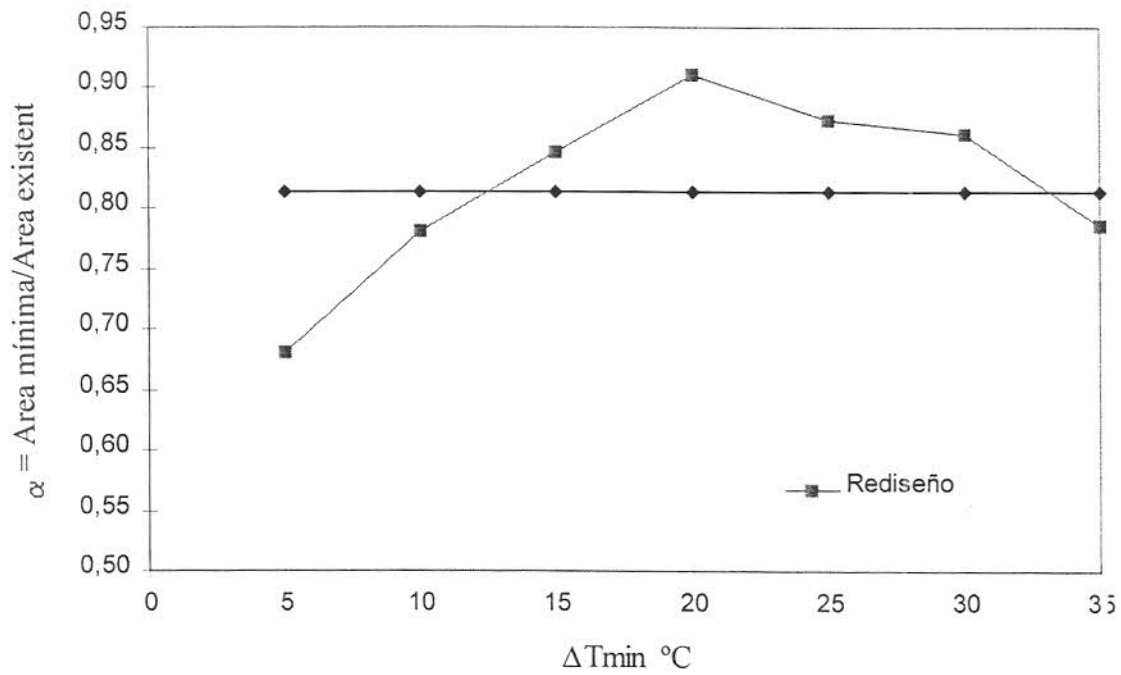


Figura 5.5 Comparación de la eficiencia del rediseño de la red respecto a la de la red existente para el Caso 4.1, correspondiente al área proceso-proceso.

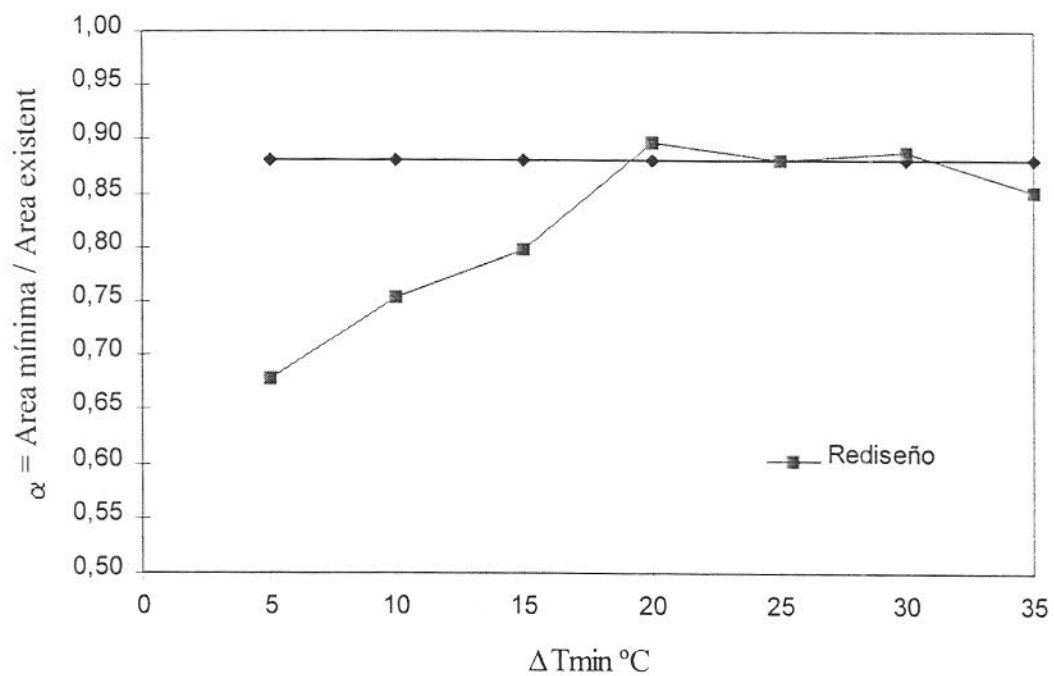


Figura 5.6 Comparación de la eficiencia del rediseño de la red respecto a la de la red existente para el Caso 4.1, correspondiente al área balanceada.



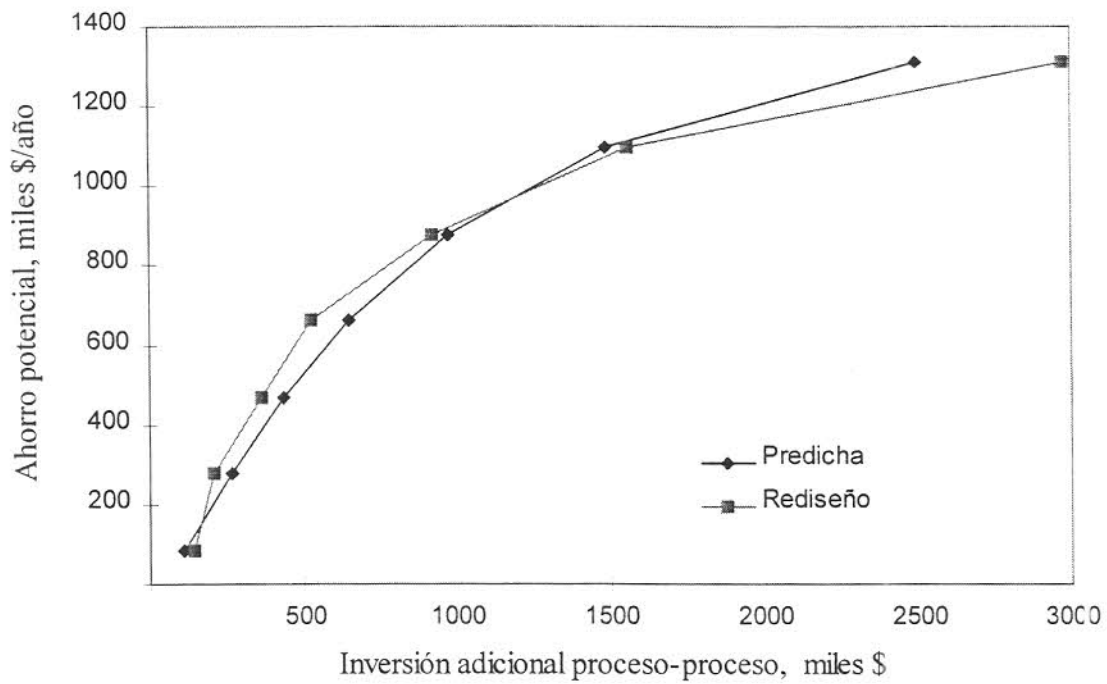


Figura 5.7 Comparación del ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.1.

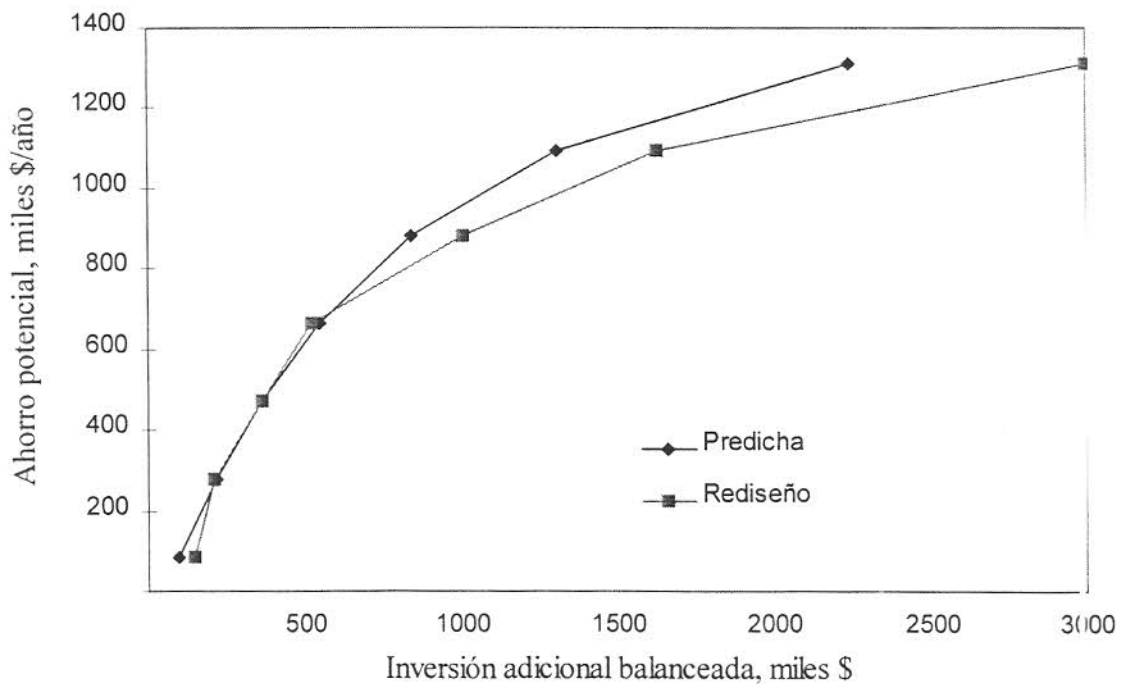


Figura 5.8 Comparación del ahorro potencial en función de la inversión adicional balanceada obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.1.

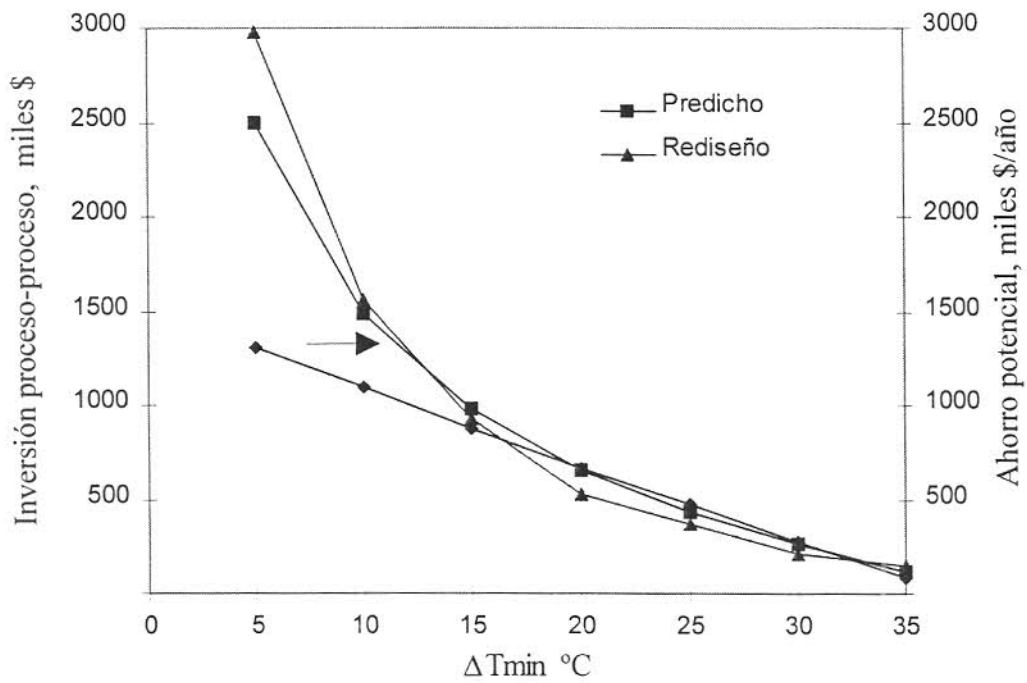


Figura 5.9 Comparación del ahorro potencial e inversión adicional proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  obtenidos del rediseño respecto a los predichos para el Caso 4.1.

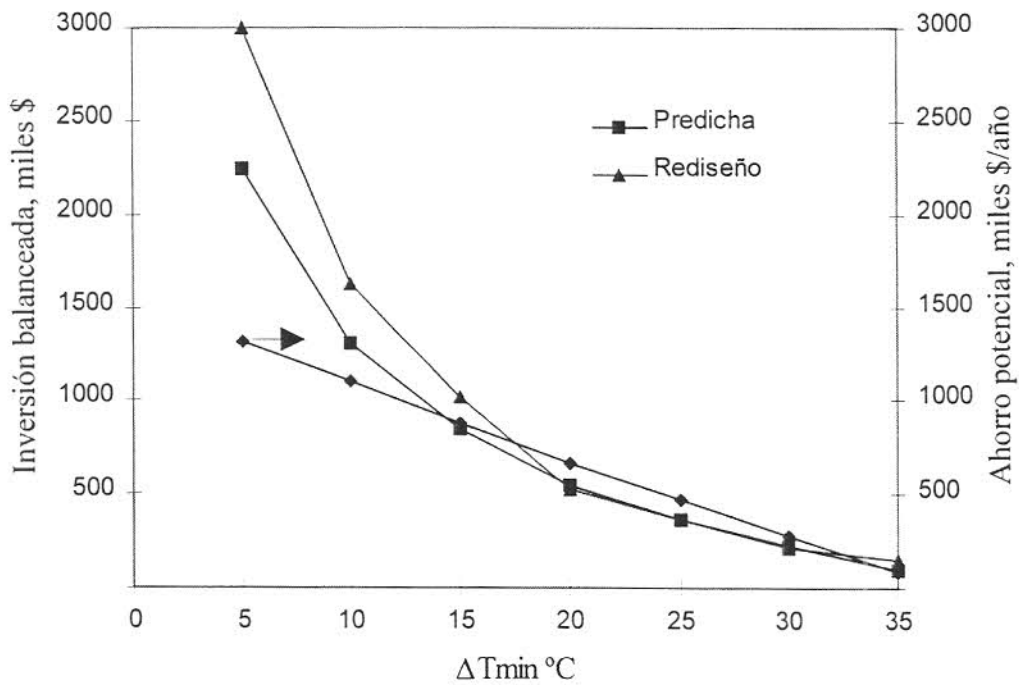


Figura 5.10 Comparación del ahorro potencial e inversión adicional balanceada en función del  $\Delta T_{min}$  obtenidos del rediseño respecto a los predichos para el Caso 4.1.

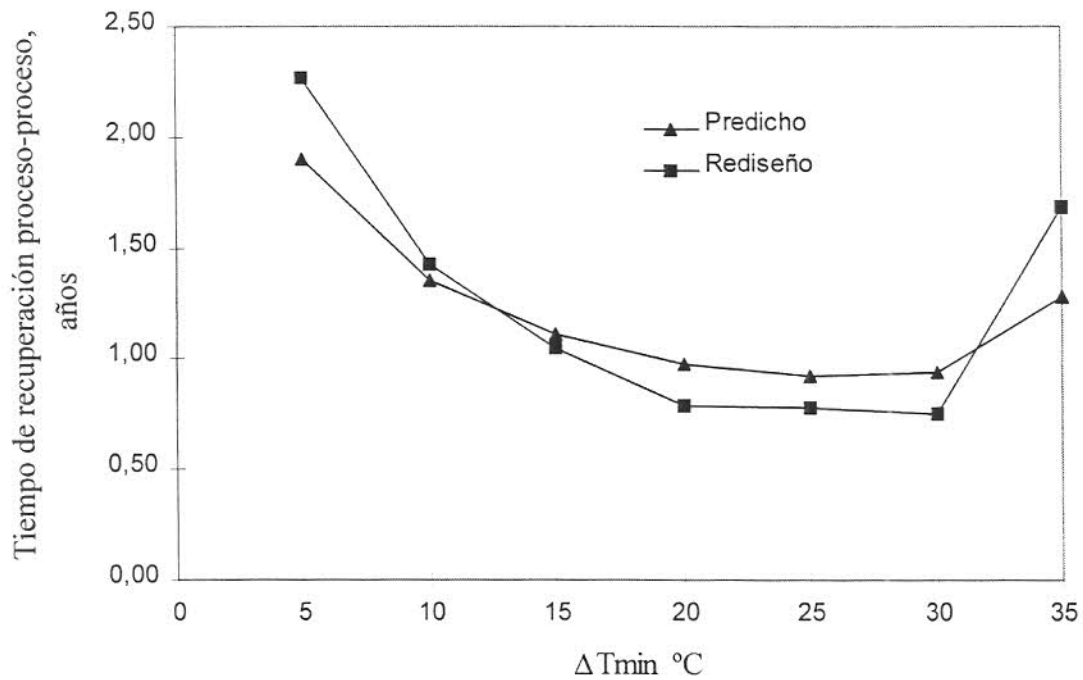


Figura 5.11 Comparación del tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.1.

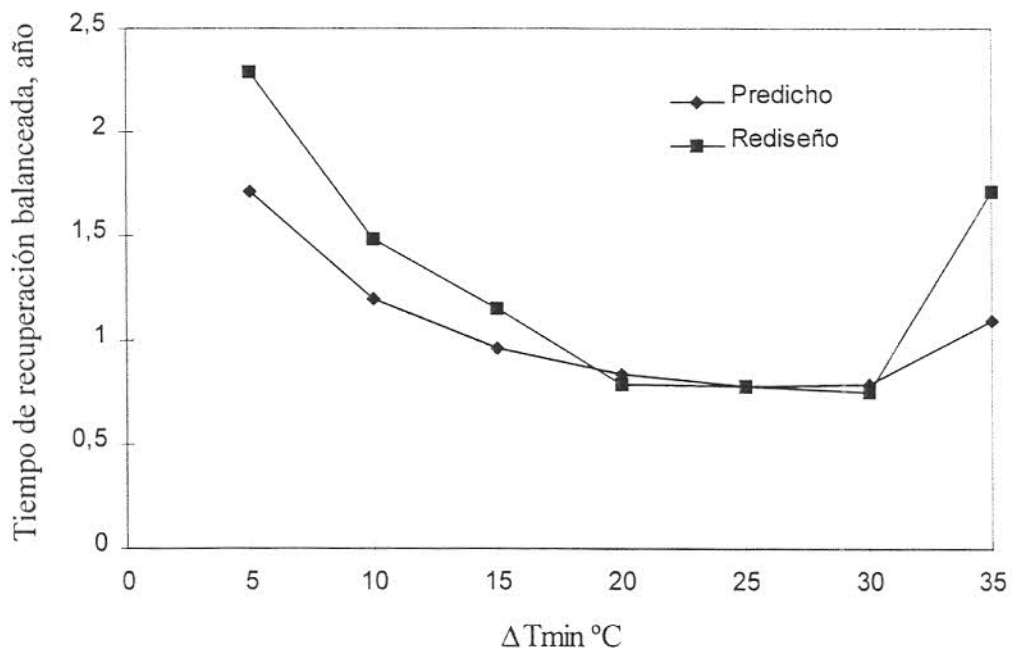


Figura 5.12 Comparación del tiempo de recuperación de la inversión balanceada en función del  $\Delta T_{min}$  obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.1.

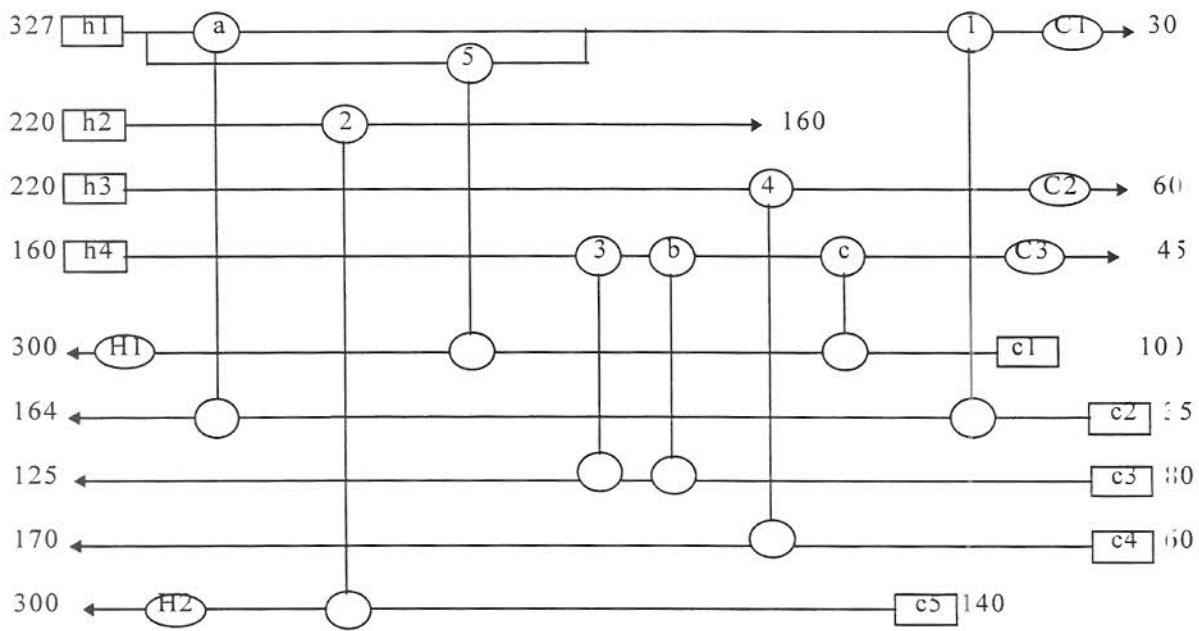


Figura 5.13 Diagrama de rejilla del diseño revisado de la red a 35 °C para el Caso 4.1.

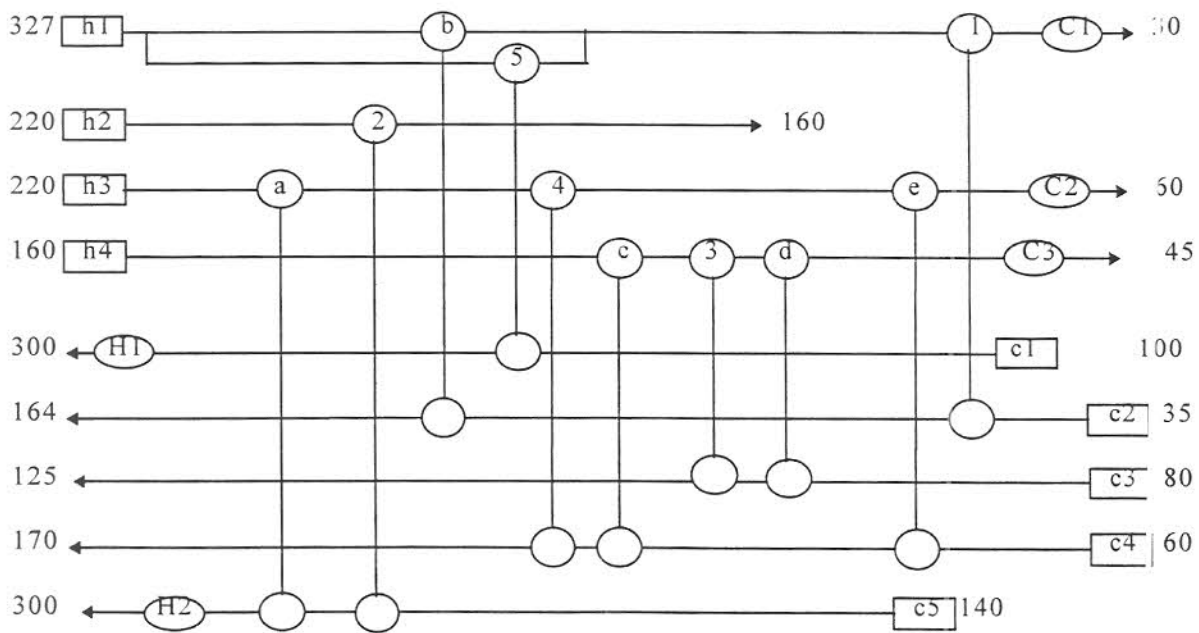


Figura 5.14 Diagrama de rejilla del diseño revisado de la red a 30°C para el Caso 4.1.

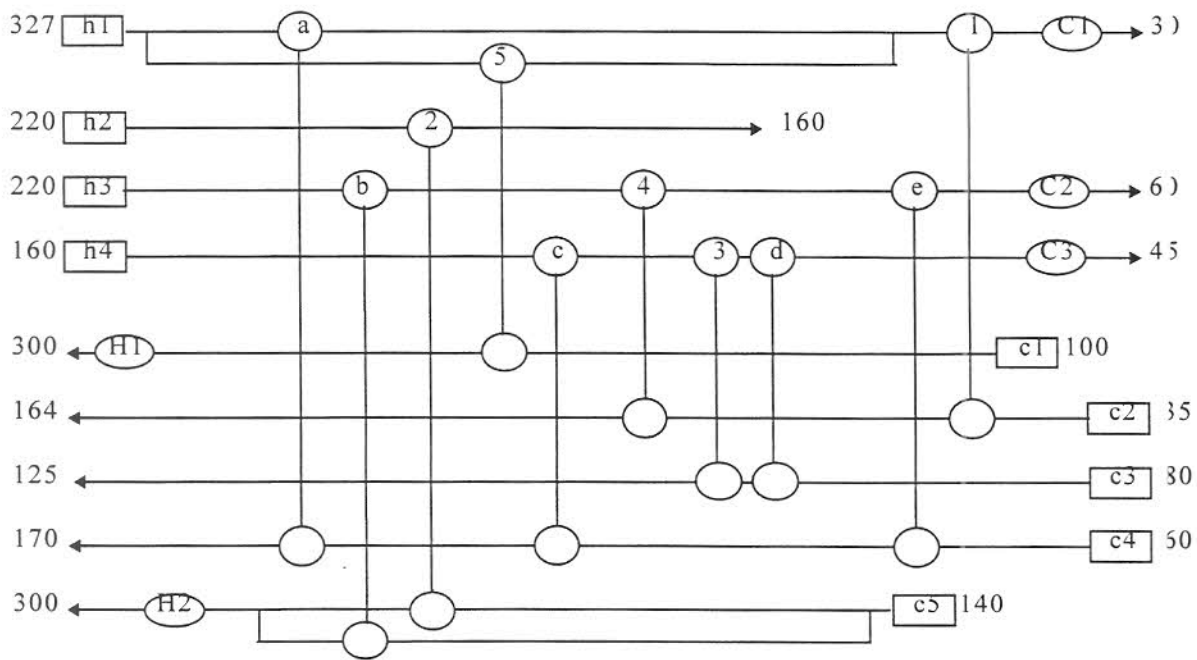


Figura 5.15 Diagrama de rejilla del diseño revisado de la red a 25°C para el Caso 4.1.

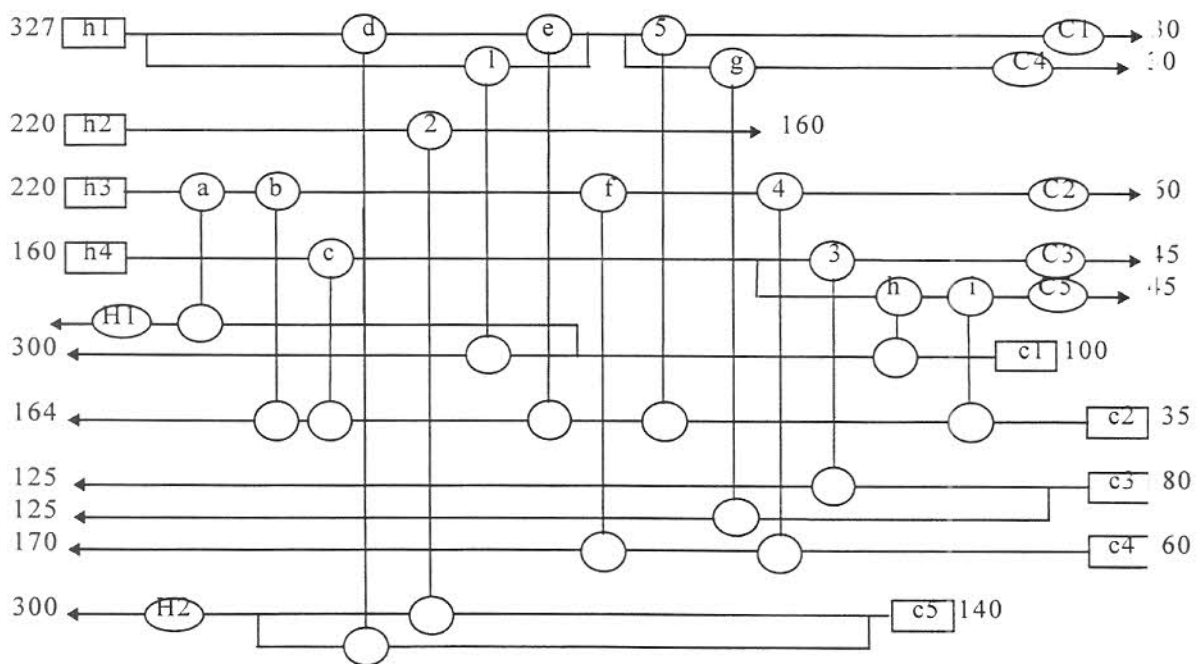


Figura 5.16 Diagrama de rejilla del diseño revisado de la red a 15°C para el Caso 4.1.

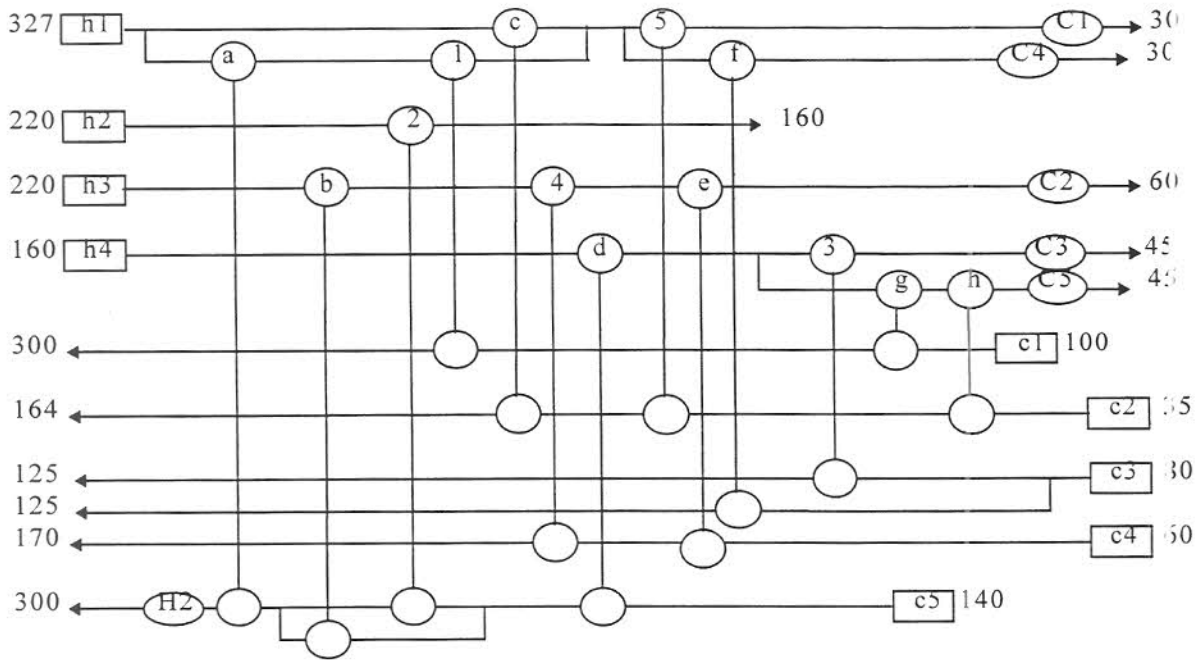


Figura 5.17 Diagrama de rejilla del diseño revisado de la red a 10°C para el Caso 4.1.

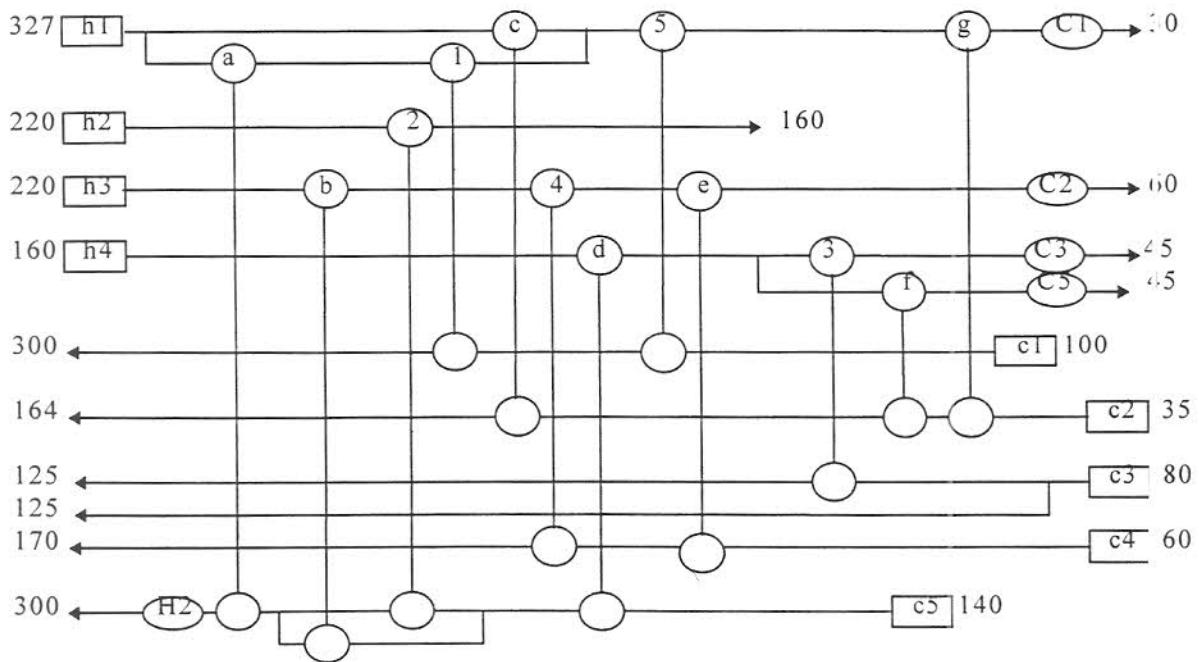


Figura 5.18 Diagrama de rejilla del diseño revisado de la red a 5°C para el Caso 4.1.

Tabla 5.6 Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 35 °C para el Caso 4.1.

|    | <i>Corrientes</i> | <i>T entrada (°C)</i> | <i>T salida (°C)</i> | <i>Carga térmica (kW)</i> | <i>Area Existente (m<sup>2</sup>)</i> | <i>Area Rediseño (m<sup>2</sup>)</i> | <i>Area Adicional (m<sup>2</sup>)</i> |
|----|-------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 1  | h1<br>c2          | 119<br>35             | 75<br>98             | 4388                      | 300                                   | 333                                  | 33                                    |
| 2  | h2<br>c5          | 220<br>140            | 160<br>188           | 9600                      | 1222                                  | 1222                                 |                                       |
| 3  | h4<br>c3          | 160<br>88             | 131<br>122           | 5866                      | 939                                   | 655                                  |                                       |
| 4  | h3<br>c4          | 220<br>60             | 112<br>168           | 6491                      | 726                                   | 689                                  |                                       |
| 5  | h1<br>c1          | 327<br>105            | 119<br>267           | 16170                     | 828                                   | 748                                  |                                       |
| a  | h1<br>c2          | 327<br>98             | 119<br>164           | 4642                      |                                       | 150                                  | 150                                   |
| b  | h3<br>c2          | 131<br>80             | 123<br>105           | 1447                      |                                       | 172                                  | 172                                   |
| c  | h4<br>c1          | 123<br>100            | 121<br>105           | 523                       |                                       | 73                                   | 73                                    |
| C1 | h1<br>w           | 75<br>15              | 30<br>30             | 4504                      | 575                                   | 536                                  |                                       |
| C2 | h3<br>w           | 112<br>15             | 60<br>30             | 3109                      | 123                                   | 127                                  |                                       |
| C3 | h4<br>w           | 121<br>15             | 45<br>30             | 15163                     | 1241                                  | 1243                                 | 2                                     |
| H1 | c1<br>St          | 267<br>400            | 300<br>400           | 3310                      | 46                                    | 36                                   |                                       |
| H2 | c5<br>St          | 188<br>400            | 300<br>400           | 22400                     | 338                                   | 338                                  |                                       |
| H3 | c3<br>St          | 122<br>400            | 125<br>400           | 560                       |                                       | 6                                    | 6                                     |
| H4 | c4<br>St          | 168<br>400            | 170<br>400           | 110                       |                                       | 3                                    | 3                                     |

Tabla 5.7 Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 30 °C para el Caso 4.1.

|    | <i>Corrientes</i> | <i>T entrada (°C)</i> | <i>T salida (°C)</i> | <i>Carga térmica (kW)</i> | <i>Area Existente (m<sup>2</sup>)</i> | <i>Area Rediseño (m<sup>2</sup>)</i> | <i>Area Adicional (m<sup>2</sup>)</i> |
|----|-------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 1  | h1<br>c2          | 112<br>35             | 71<br>94             | 4096                      | 300                                   | 354                                  | 54                                    |
| 2  | h2<br>c5          | 220<br>140            | 160<br>188           | 9600                      | 1222                                  | 1222                                 |                                       |
| 3  | h4<br>c3          | 157<br>85             | 122<br>125           | 6927                      | 939                                   | 919                                  |                                       |
| 4  | h3<br>c4          | 203<br>73             | 106<br>170           | 5825                      | 726                                   | 977                                  | 253                                   |
| 5  | h1<br>c1          | 327<br>100            | 112<br>266           | 16592                     | 828                                   | 804                                  |                                       |
| a  | h3<br>c5          | 220<br>188            | 203<br>193           | 1036                      |                                       | 90                                   | 90                                    |
| b  | h1<br>c2          | 327<br>94             | 112<br>164           | 4934                      |                                       | 168                                  | 168                                   |
| c  | h4<br>c4          | 160<br>61             | 157<br>73            | 700                       |                                       | 58                                   | 58                                    |
| d  | h4<br>c3          | 122<br>80             | 117<br>85            | 949                       |                                       | 116                                  | 116                                   |
| e  | h3<br>c4          | 106<br>60             | 104<br>61            | 76                        |                                       | 9                                    | 9                                     |
| C1 | h1<br>w           | 71<br>30              | 30<br>15             | 4048                      | 575                                   | 510                                  |                                       |
| C2 | h3<br>w           | 104<br>30             | 80<br>15             | 1465                      | 123                                   | 53                                   |                                       |
| C3 | h4<br>w           | 117<br>30             | 45<br>15             | 14426                     | 1241                                  | 1212                                 |                                       |
| H1 | c1<br>St          | 266<br>400            | 300<br>400           | 3408                      | 46                                    | 35                                   |                                       |
| H2 | c4<br>St          | 193<br>400            | 300<br>400           | 21368                     | 338                                   | 327                                  |                                       |



Tabla 5.8 Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 25 °C para el Caso 4.1.

|    | <i>Corrientes</i> | <i>T entrada (°C)</i> | <i>T salida (°C)</i> | <i>Carga térmica (kW)</i> | <i>Area Existente (m<sup>2</sup>)</i> | <i>Area Rediseño (m<sup>2</sup>)</i> | <i>Area Adicional (m<sup>2</sup>)</i> |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|----|-------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|--|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|--|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|--|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|-----|-----|--|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|-----|
| 1  | h1                | 110                   | 69                   | 4162                      | 300                                   | 400                                  | 100                                   |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c2                | 35                    | 94                   |                           |                                       |                                      |                                       | 2  | h2 | 220 | 160 | 9600  | 1222 | 1494 | 272 | c5 | 140 | 198 | 3  | h4 | 152 | 119 | 6563  | 939  | 1024 | 85  | c3 | 88  | 125 | 4  | h3 | 186 | 105 | 4892  | 726  | 471  |     | c2 | 94  | 164 | 5  | h1 | 327 | 110 | 17181 | 828  | 939  | 111 | c1 | 100 | 272 | a  | h1 | 327 | 110 | 4512  |      | 464  | 464 | c4 | 95  | 170 | b  | h3 | 220 | 186 | 2039  |      | 108  | 108 | c2 | 140 | 198 | c  | h4 | 160 | 152 | 1688  |      | 170  | 170 | c4 | 67  | 95  | d  | h4 | 119 | 112 | 1313  |      | 186  | 186 | c3 | 80  | 88  | e  | h3 | 105 | 98  | 400   |      | 58   | 58 | c4 | 60  | 67  | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |  | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |  | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |  | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46  | 30  |  | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338 |
| 2  | h2                | 220                   | 160                  | 9600                      | 1222                                  | 1494                                 | 272                                   |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c5                | 140                   | 198                  |                           |                                       |                                      |                                       | 3  | h4 | 152 | 119 | 6563  | 939  | 1024 | 85  | c3 | 88  | 125 | 4  | h3 | 186 | 105 | 4892  | 726  | 471  |     | c2 | 94  | 164 | 5  | h1 | 327 | 110 | 17181 | 828  | 939  | 111 | c1 | 100 | 272 | a  | h1 | 327 | 110 | 4512  |      | 464  | 464 | c4 | 95  | 170 | b  | h3 | 220 | 186 | 2039  |      | 108  | 108 | c2 | 140 | 198 | c  | h4 | 160 | 152 | 1688  |      | 170  | 170 | c4 | 67  | 95  | d  | h4 | 119 | 112 | 1313  |      | 186  | 186 | c3 | 80  | 88  | e  | h3 | 105 | 98  | 400   |      | 58   | 58  | c4 | 60  | 67  | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |    | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |  | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |  | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |  | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338 | 316 |  | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |     |
| 3  | h4                | 152                   | 119                  | 6563                      | 939                                   | 1024                                 | 85                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c3                | 88                    | 125                  |                           |                                       |                                      |                                       | 4  | h3 | 186 | 105 | 4892  | 726  | 471  |     | c2 | 94  | 164 | 5  | h1 | 327 | 110 | 17181 | 828  | 939  | 111 | c1 | 100 | 272 | a  | h1 | 327 | 110 | 4512  |      | 464  | 464 | c4 | 95  | 170 | b  | h3 | 220 | 186 | 2039  |      | 108  | 108 | c2 | 140 | 198 | c  | h4 | 160 | 152 | 1688  |      | 170  | 170 | c4 | 67  | 95  | d  | h4 | 119 | 112 | 1313  |      | 186  | 186 | c3 | 80  | 88  | e  | h3 | 105 | 98  | 400   |      | 58   | 58  | c4 | 60  | 67  | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |    | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |  | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |  | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |  | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| 4  | h3                | 186                   | 105                  | 4892                      | 726                                   | 471                                  |                                       |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c2                | 94                    | 164                  |                           |                                       |                                      |                                       | 5  | h1 | 327 | 110 | 17181 | 828  | 939  | 111 | c1 | 100 | 272 | a  | h1 | 327 | 110 | 4512  |      | 464  | 464 | c4 | 95  | 170 | b  | h3 | 220 | 186 | 2039  |      | 108  | 108 | c2 | 140 | 198 | c  | h4 | 160 | 152 | 1688  |      | 170  | 170 | c4 | 67  | 95  | d  | h4 | 119 | 112 | 1313  |      | 186  | 186 | c3 | 80  | 88  | e  | h3 | 105 | 98  | 400   |      | 58   | 58  | c4 | 60  | 67  | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |    | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |  | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |  | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| 5  | h1                | 327                   | 110                  | 17181                     | 828                                   | 939                                  | 111                                   |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c1                | 100                   | 272                  |                           |                                       |                                      |                                       | a  | h1 | 327 | 110 | 4512  |      | 464  | 464 | c4 | 95  | 170 | b  | h3 | 220 | 186 | 2039  |      | 108  | 108 | c2 | 140 | 198 | c  | h4 | 160 | 152 | 1688  |      | 170  | 170 | c4 | 67  | 95  | d  | h4 | 119 | 112 | 1313  |      | 186  | 186 | c3 | 80  | 88  | e  | h3 | 105 | 98  | 400   |      | 58   | 58  | c4 | 60  | 67  | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |     | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |    | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |  | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| a  | h1                | 327                   | 110                  | 4512                      |                                       | 464                                  | 464                                   |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c4                | 95                    | 170                  |                           |                                       |                                      |                                       | b  | h3 | 220 | 186 | 2039  |      | 108  | 108 | c2 | 140 | 198 | c  | h4 | 160 | 152 | 1688  |      | 170  | 170 | c4 | 67  | 95  | d  | h4 | 119 | 112 | 1313  |      | 186  | 186 | c3 | 80  | 88  | e  | h3 | 105 | 98  | 400   |      | 58   | 58  | c4 | 60  | 67  | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |     | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |    | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| b  | h3                | 220                   | 186                  | 2039                      |                                       | 108                                  | 108                                   |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c2                | 140                   | 198                  |                           |                                       |                                      |                                       | c  | h4 | 160 | 152 | 1688  |      | 170  | 170 | c4 | 67  | 95  | d  | h4 | 119 | 112 | 1313  |      | 186  | 186 | c3 | 80  | 88  | e  | h3 | 105 | 98  | 400   |      | 58   | 58  | c4 | 60  | 67  | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |     | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| c  | h4                | 160                   | 152                  | 1688                      |                                       | 170                                  | 170                                   |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c4                | 67                    | 95                   |                           |                                       |                                      |                                       | d  | h4 | 119 | 112 | 1313  |      | 186  | 186 | c3 | 80  | 88  | e  | h3 | 105 | 98  | 400   |      | 58   | 58  | c4 | 60  | 67  | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |     | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| d  | h4                | 119                   | 112                  | 1313                      |                                       | 186                                  | 186                                   |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c3                | 80                    | 88                   |                           |                                       |                                      |                                       | e  | h3 | 105 | 98  | 400   |      | 58   | 58  | c4 | 60  | 67  | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |     | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| e  | h3                | 105                   | 98                   | 400                       |                                       | 58                                   | 58                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c4                | 60                    | 67                   |                           |                                       |                                      |                                       | C1 | h1 | 69  | 30  | 3845  | 575  | 502  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |     | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| C1 | h1                | 69                    | 30                   | 3845                      | 575                                   | 502                                  |                                       |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | w                 | 30                    | 15                   |                           |                                       |                                      |                                       | C2 | h3 | 98  | 60  | 2291  | 123  | 103  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |     | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| C2 | h3                | 98                    | 60                   | 2291                      | 123                                   | 103                                  |                                       |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | w                 | 30                    | 15                   |                           |                                       |                                      |                                       | C3 | h4 | 112 | 45  | 13438 | 1241 | 1168 |     | w  | 30  | 15  | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| C3 | h4                | 112                   | 45                   | 13438                     | 1241                                  | 1168                                 |                                       |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | w                 | 30                    | 15                   |                           |                                       |                                      |                                       | H1 | c1 | 272 | 300 | 2819  | 46   | 30   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| H1 | c1                | 272                   | 300                  | 2819                      | 46                                    | 30                                   |                                       |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | St                | 400                   | 400                  |                           |                                       |                                      |                                       | H2 | c4 | 198 | 300 | 20360 | 338  | 316  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| H2 | c4                | 198                   | 300                  | 20360                     | 338                                   | 316                                  |                                       |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | St                | 400                   | 400                  |                           |                                       |                                      |                                       |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |    |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |



Tabla 5.9 Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 15 °C para el Caso 4.1.

|    | Corrientes | T<br>entrada<br>(°C) | T salida<br>(°C) | Carga<br>térmica<br>(kW) | Area<br>Existente<br>(m <sup>2</sup> ) | Area<br>Rediseño<br>(m <sup>2</sup> ) | Area<br>Adicional<br>(m <sup>2</sup> ) |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|----|------------|----------------------|------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|--|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|-----|-----|--|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-------|-----|
| 1  | h1         | 327                  | 151              | 14106                    | 300                                    | 1423                                  | 1123                                   |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c1         | 145                  | 300              |                          |  |                                       |  | 2  | h2 | 220 | 160 | 9600  | 1222 | 1794 | 572 | c5 | 140 | 205 | 3  | h4 | 157 | 95  | 5738  | 939  | 1153 | 214 | c3 | 80  | 125 | 4  | h3 | 148 | 85  | 3794  | 726  | 848 | 122 | c4 | 60  | 123 | 5  | h1 | 151 | 105 | 2878  | 828  | 918 | 90  | c2 | 100 | 141 | a  | h1 | 220 | 209 | 644   |      | 19  | 19  | c1 | 145 | 215 | b  | h3 | 209 | 195 | 880   |      | 30  | 30  | c2 | 151 | 164 | c  | h4 | 160 | 157 | 646   |      | 200 | 200 | c2 | 142 | 151 | d  | h1 | 327 | 155 | 3399  |      | 166 | 166 | c5 | 140 | 205 | e  | h1 | 155 | 151 | 76    |      | 15  | 15  | c2 | 141 | 142 | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628 | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346 | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |     | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |     | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46  | 7   |  | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338 |
| 2  | h2         | 220                  | 160              | 9600                     | 1222                                   | 1794                                  | 572                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c5         | 140                  | 205              |                          |  |                                       |  | 3  | h4 | 157 | 95  | 5738  | 939  | 1153 | 214 | c3 | 80  | 125 | 4  | h3 | 148 | 85  | 3794  | 726  | 848  | 122 | c4 | 60  | 123 | 5  | h1 | 151 | 105 | 2878  | 828  | 918 | 90  | c2 | 100 | 141 | a  | h1 | 220 | 209 | 644   |      | 19  | 19  | c1 | 145 | 215 | b  | h3 | 209 | 195 | 880   |      | 30  | 30  | c2 | 151 | 164 | c  | h4 | 160 | 157 | 646   |      | 200 | 200 | c2 | 142 | 151 | d  | h1 | 327 | 155 | 3399  |      | 166 | 166 | c5 | 140 | 205 | e  | h1 | 155 | 151 | 76    |      | 15  | 15  | c2 | 141 | 142 | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628 | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346 | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |     | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46  | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338 | 301 |  | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |     |
| 3  | h4         | 157                  | 95               | 5738                     | 939                                    | 1153                                  | 214                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c3         | 80                   | 125              |                          |  |                                       |  | 4  | h3 | 148 | 85  | 3794  | 726  | 848  | 122 | c4 | 60  | 123 | 5  | h1 | 151 | 105 | 2878  | 828  | 918  | 90  | c2 | 100 | 141 | a  | h1 | 220 | 209 | 644   |      | 19  | 19  | c1 | 145 | 215 | b  | h3 | 209 | 195 | 880   |      | 30  | 30  | c2 | 151 | 164 | c  | h4 | 160 | 157 | 646   |      | 200 | 200 | c2 | 142 | 151 | d  | h1 | 327 | 155 | 3399  |      | 166 | 166 | c5 | 140 | 205 | e  | h1 | 155 | 151 | 76    |      | 15  | 15  | c2 | 141 | 142 | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628 | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346 | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46  | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338 | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| 4  | h3         | 148                  | 85               | 3794                     | 726                                    | 848                                   | 122                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c4         | 60                   | 123              |                          |  |                                       |  | 5  | h1 | 151 | 105 | 2878  | 828  | 918  | 90  | c2 | 100 | 141 | a  | h1 | 220 | 209 | 644   |      | 19   | 19  | c1 | 145 | 215 | b  | h3 | 209 | 195 | 880   |      | 30  | 30  | c2 | 151 | 164 | c  | h4 | 160 | 157 | 646   |      | 200 | 200 | c2 | 142 | 151 | d  | h1 | 327 | 155 | 3399  |      | 166 | 166 | c5 | 140 | 205 | e  | h1 | 155 | 151 | 76    |      | 15  | 15  | c2 | 141 | 142 | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628 | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346 | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338 | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| 5  | h1         | 151                  | 105              | 2878                     | 828                                    | 918                                   | 90                                     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c2         | 100                  | 141              |                          |  |                                       |  | a  | h1 | 220 | 209 | 644   |      | 19   | 19  | c1 | 145 | 215 | b  | h3 | 209 | 195 | 880   |      | 30   | 30  | c2 | 151 | 164 | c  | h4 | 160 | 157 | 646   |      | 200 | 200 | c2 | 142 | 151 | d  | h1 | 327 | 155 | 3399  |      | 166 | 166 | c5 | 140 | 205 | e  | h1 | 155 | 151 | 76    |      | 15  | 15  | c2 | 141 | 142 | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628 | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346 | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| a  | h1         | 220                  | 209              | 644                      |  | 19                                    | 19                                     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c1         | 145                  | 215              |                          |  |                                       |  | b  | h3 | 209 | 195 | 880   |      | 30   | 30  | c2 | 151 | 164 | c  | h4 | 160 | 157 | 646   |      | 200  | 200 | c2 | 142 | 151 | d  | h1 | 327 | 155 | 3399  |      | 166 | 166 | c5 | 140 | 205 | e  | h1 | 155 | 151 | 76    |      | 15  | 15  | c2 | 141 | 142 | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628 | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346 | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| b  | h3         | 209                  | 195              | 880                      |  | 30                                    | 30                                     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c2         | 151                  | 164              |                          |  |                                       |  | c  | h4 | 160 | 157 | 646   |      | 200  | 200 | c2 | 142 | 151 | d  | h1 | 327 | 155 | 3399  |      | 166  | 166 | c5 | 140 | 205 | e  | h1 | 155 | 151 | 76    |      | 15  | 15  | c2 | 141 | 142 | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628 | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346 | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| c  | h4         | 160                  | 157              | 646                      |  | 200                                   | 200                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c2         | 142                  | 151              |                          |  |                                       |  | d  | h1 | 327 | 155 | 3399  |      | 166  | 166 | c5 | 140 | 205 | e  | h1 | 155 | 151 | 76    |      | 15   | 15  | c2 | 141 | 142 | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628 | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346 | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| d  | h1         | 327                  | 155              | 3399                     |  | 166                                   | 166                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c5         | 140                  | 205              |                          |  |                                       |  | e  | h1 | 155 | 151 | 76    |      | 15   | 15  | c2 | 141 | 142 | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628  | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346 | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| e  | h1         | 155                  | 151              | 76                       |  | 15                                    | 15                                     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c2         | 141                  | 142              |                          |  |                                       |  | f  | h3 | 195 | 148 | 2806  |      | 628  | 628 | c4 | 123 | 170 | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346  | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895 | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| f  | h3         | 195                  | 148              | 2806                     |  | 628                                   | 628                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c4         | 123                  | 170              |                          |  |                                       |  | g  | h1 | 151 | 95  | 2138  |      | 346  | 346 | c3 | 80  | 125 | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895  | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649 | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| g  | h1         | 151                  | 95               | 2138                     |  | 346                                   | 346                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c3         | 80                   | 125              |                          |  |                                       |  | h  | h4 | 157 | 115 | 4470  |      | 895  | 895 | c1 | 100 | 145 | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649  | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405 |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| h  | h4         | 157                  | 115              | 4470                     |  | 895                                   | 895                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c1         | 100                  | 145              |                          |  |                                       |  | i  | h4 | 115 | 73  | 4550  |      | 649  | 649 | c2 | 35  | 100 | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75  |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| i  | h4         | 115                  | 73               | 4550                     |  | 649                                   | 649                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | c2         | 35                   | 100              |                          |  |                                       |  | C1 | h1 | 105 | 30  | 4629  | 575  | 405  |     | w  | 30  | 15  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75   |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462 |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| C1 | h1         | 105                  | 30               | 4629                     | 575                                    | 405                                   |  |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | w          | 30                   | 15               |                          |  |                                       |  | C2 | h3 | 85  | 60  | 1476  | 123  | 75   |     | w  | 30  | 15  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462  |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236 | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| C2 | h3         | 85                   | 60               | 1476                     | 123                                    | 75                                    |  |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | w          | 30                   | 15               |                          |  |                                       |  | C3 | h4 | 95  | 45  | 4645  | 1241 | 462  |     | w  | 30  | 15  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236  | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369 | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| C3 | h4         | 95                   | 45               | 4645                     | 1241                                   | 462                                   |  |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | w          | 30                   | 15               |                          |  |                                       |  | C4 | h1 | 95  | 30  | 2473  |      | 236  | 236 | w  | 15  | 30  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369  | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7   |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| C4 | h1         | 95                   | 30               | 2473                     |  | 236                                   | 236                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | w          | 15                   | 30               |                          |  |                                       |  | C5 | h4 | 115 | 45  | 2941  |      | 369  | 369 | w  | 15  | 30  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7    |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301 |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| C5 | h4         | 115                  | 45               | 2941                     |  | 369                                   | 369                                    |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | w          | 15                   | 30               |                          |  |                                       |  | H1 | c1 | 215 | 300 | 780   | 46   | 7    |     | St | 400 | 400 | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| H1 | c1         | 215                  | 300              | 780                      | 46                                     | 7                                     |  |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | St         | 400                  | 400              |                          |  |                                       |  | H2 | c4 | 205 | 300 | 19000 | 338  | 301  |     | St | 400 | 400 |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
| H2 | c4         | 205                  | 300              | 19000                    | 338                                    | 301                                   |  |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |
|    | St         | 400                  | 400              |                          |  |                                       |  |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |      |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |      |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |     |    |     |     |    |    |     |     |       |     |     |  |    |     |     |    |    |     |     |       |     |

Tabla 5.10 Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 10 °C para el Caso 4.1.

|    | Corrientes | T<br>entrada<br>°C | T salida<br>°C | Carga<br>térmica<br>kW | Area<br>Existente<br>m <sup>2</sup> | Area<br>Rediseño<br>m <sup>2</sup> | Area<br>Adicional<br>m <sup>2</sup> |
|----|------------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | h1<br>c1   | 320<br>143         | 148<br>300     | 15687                  | 300                                 | 2225                               | 1925                                |
| 2  | h2<br>c5   | 220<br>149         | 160<br>207     | 9600                   | 1222                                | 2575                               | 1353                                |
| 3  | h4<br>c3   | 151<br>80          | 90<br>125      | 5828                   | 939                                 | 1539                               | 600                                 |
| 4  | h3<br>c4   | 186<br>129         | 145<br>170     | 2471                   | 726                                 | 829                                | 103                                 |
| 5  | h1<br>c2   | 148<br>100         | 103<br>141     | 2853                   | 828                                 | 1366                               | 538                                 |
| a  | h1<br>c5   | 327<br>207         | 320<br>210     | 640                    |                                     | 14                                 | 14                                  |
| b  | h3<br>c5   | 220<br>149         | 186<br>207     | 2016                   |                                     | 152                                | 152                                 |
| c  | h1<br>c2   | 327<br>141         | 148<br>164     | 1628                   |                                     | 75                                 | 75                                  |
| d  | h4<br>c5   | 160<br>140         | 151<br>149     | 1764                   |                                     | 592                                | 592                                 |
| e  | h3<br>c4   | 145<br>60          | 76<br>129      | 4129                   |                                     | 1763                               | 1763                                |
| f  | h1<br>c3   | 148<br>80          | 90<br>125      | 2047                   |                                     | 432                                | 432                                 |
| g  | h4<br>c1   | 151<br>100         | 110<br>143     | 4312                   |                                     | 1295                               | 1295                                |
| h  | h4<br>c2   | 110<br>35          | 67<br>100      | 849                    |                                     | 849                                | 849                                 |
| C1 | h1<br>w    | 103<br>15          | 30<br>30       | 4708                   | 575                                 | 417                                |                                     |
| C2 | h3<br>w    | 76<br>15           | 60<br>30       | 984                    | 123                                 | 86                                 |                                     |
| C3 | h4<br>w    | 90<br>15           | 45<br>30       | 4287                   | 1241                                | 446                                |                                     |
| C4 | h1<br>w    | 90<br>15           | 30<br>30       | 2138                   |                                     | 214                                | 214                                 |
| C5 | h4<br>w    | 67<br>15           | 45<br>30       | 2258                   |                                     | 306                                | 306                                 |
| H1 | c1<br>St   |                    |                |                        | 46                                  |                                    |                                     |
| H2 | c4<br>St   | 289<br>400         | 207<br>400     | 17980                  | 338                                 | 289                                |                                     |

Tabla 5.11 Datos de los intercambiadores que integran el diseño revisado de la red a 5°C para el Caso 4.1.

|    | <i>Corrientes</i> | <i>T</i><br><i>entrada</i><br>°C | <i>T salida</i><br>°C | <i>Carga</i><br><i>térmica</i><br><i>kW</i> | <i>Area</i><br><i>Existente</i><br><i>m</i> <sup>2</sup> | <i>Area</i><br><i>Rediseño</i><br><i>m</i> <sup>2</sup> | <i>Area</i><br><i>Adiciona</i><br><i>m</i> <sup>2</sup> |
|----|-------------------|----------------------------------|-----------------------|---|--|---|---|
| 1  | h1<br>c1          | 318<br>142                       | 144<br>300            | 15844                                       | 300  | 3086  | 2786  |
| 2  | h2<br>c5          | 220<br>154                       | 160<br>215            | 9600  | 1222   | 5870  | 4648  |
| 3  | h4<br>c3          | 146<br>80                        | 85<br>125             | 7875  | 939  | 3217  | 2278  |
| 4  | h3<br>c4          | 178<br>134                       | 143<br>170            | 2135  | 726  | 1432  | 706   |
| 5  | h1<br>c1          | 144<br>100                       | 102<br>142            | 4157  | 828  | 2784  | 1956  |
| a  | h1<br>c5          | 327<br>215                       | 318<br>219            | 830   |  | 20  | 20  |
| b  | h3<br>c5          | 220<br>154                       | 178<br>215            | 2508  |  | 363   | 363   |
| c  | h1<br>c2          | 327<br>140                       | 144<br>164            | 1654  |  | 91  | 91  |
| d  | h4<br>c5          | 160<br>140                       | 146<br>154            | 2882  |  | 1933  | 1933  |
| e  | h3<br>c4          | 143<br>60                        | 68<br>134             | 4465  |  | 2995  | 2995  |
| f  | h4<br>c2          | 146<br>100                       | 66<br>125             | 5559  |  | 3516  | 3516  |
| g  | h4<br>c3          | 102<br>35                        | 84<br>60              | 1775  |  | 88  | 88  |
| C1 | h1<br>w           | 84<br>15                         | 30<br>30              | 5370  | 575  | 575   |   |
| C2 | h3<br>w           | 68<br>15                         | 60<br>30              | 492   | 123  | 30  |   |
| C3 | h4<br>w           | 85<br>15                         | 45<br>30              | 5199  | 1241   | 567   |   |
| C4 | h4<br>w           | 66<br>15                         | 45<br>30              | 1485  |  | 203   | 203   |
| H1 | c1<br>St          |                                  |                       |   | 46   |   |   |
| H2 | c4<br>St          | 219<br>400                       | 300<br>400            | 16182                                       | 338  | 267   |   |

## Capítulo 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 1.1 Conclusiones

El método de rediseño presentado por Tjoe y Linnhoff (1986) presenta algunos inconvenientes en la etapa de determinación de objetivos económico-energéticos. La inversión y el tiempo de recuperación se determinan considerando que la eficiencia de la red permanece constante; y se sugiere establecer el  $\Delta T_{min}$  de reajuste fijando el monto de la inversión o el tiempo de recuperación. Sin embargo, de acuerdo con este trabajo se ha encontrado que en la mayoría de las redes analizadas la eficiencia del rediseño no es constante y presenta una tendencia hacia una máxima aproximación a la unidad. Se observa que si la eficiencia del rediseño es mayor que la eficiencia de la red existente la inversión adicional requerida por el rediseño es menor y viceversa. Esto trae como consecuencia que el  $\Delta T_{min}$  establecido como objetivo del rediseño no corresponderá al  $\Delta T_{min}$  del rediseño. Por lo tanto, una mala definición del  $\Delta T_{min}$  podría conducir a topologías de rediseño completamente diferentes a las esperadas.

El tiempo de recuperación permite establecer el compromiso entre la inversión adicional (costo capital) y el ahorro potencial (costo de operación). De acuerdo con esta investigación se determinó que puede existir un tiempo mínimo de recuperación, lo que significa que al  $\Delta T_{min}$  correspondiente a este punto existe el mejor compromiso económico-energético y por lo tanto sería el  $\Delta T_{min}$  recomendable para realizar el rediseño de la red. Además al realizar el rediseño de las redes se encontró que el rango de  $\Delta T_{min}$  donde se presenta el tiempo mínimo de recuperación se ve menos afectado por la funcionalidad de la eficiencia. Por lo tanto, al establecer el  $\Delta T_{min}$  de rediseño en este rango permitirá obtener un rediseño más cercano al esperado.

De los algoritmos existentes para la predicción del área mínima se encontró que la fórmula Bath diversa modificada (Serna, 1998) es el mejor algoritmo para la predicción del área mínima de transferencia en los problemas de integración cuyas corrientes posean coeficientes de transferencia de calor de película significativamente diferentes.

## 1.2 Recomendaciones

Aun cuando el mejor algoritmo para la predicción del área mínima de transferencia con que se contó hasta esos momentos fue la fórmula Bath diversa modificada (Serna, 1998), dicho algoritmo predice, para algunos casos y para ciertos valores de los parámetros  $k$  y  $z$ , una área mayor que la predicha por la fórmula Bath, por lo cual se recomienda estudiar con mayor detalle dichos casos con la finalidad de esclarecer su comportamiento.

Es importante buscar la manera de establecer la dependencia o funcionalidad de la eficiencia de la red con respecto al  $\Delta T_{\min}$  para establecer mejores predicciones de objetivos económico-energéticos, y con esto mejorar el método para el rediseño de redes de intercambio de calor existentes.

Es conveniente explorar otras ecuaciones para la determinación del costo capital (inversión) y del costo de operación (ahorro potencial) con la finalidad de corroborar o establecer las condiciones de la existencia del tiempo mínimo de recuperación.

## BIBLIOGRAFIA

Ahmad S., Linnhoff B. and Smith R., Cost optimum heat exchanger networks -2. Targets and design for detailed capital cost models, *Computers chem. Engng.*, Vol. **14**, No.7, pp. 751-767, 1990.

Asante N.D.K. and Zhu X.X., An automated approach for heat exchanger network retrofit featuring minimal topology modifications, *Computers chem. Engng.*, Vol. **20**, pp. S7-S12, 1996.

Barton J., Pinch technology improves olefin heat recovery, *Hydrocarbon Processing*, February, 1989.

Farhanieh B. and Sunden B., Analysis of an existing heat exchanger network and effects of heat pump installations, *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. **10**, No. 3, pp. 285-296, 1990.

Fraser D., The use of minimum flux instead of minimum approach temperature as a design specification for heat exchanger networks, *Chem. Engng. Sci.*, Vol. **44**, pp. 1121-1127, 1979.

Gundersen T. and Naess L., The synthesis of cost optimal heat exchanger networks: an industrial review of the state of the art, *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. **10**, No. 4, pp. 301-328, 1990.

Itoh J. Shiroko K. and Umeda T., Extensive Applications of the T-Q diagram to heat integrated system synthesis., *Computers chem. Engng.*, Vol. **10**, No. 1, pp. 59-66, 1986.

Linnhoff B. and Flower J.R., Synthesis of heat exchanger networks: systematic generation of energy optimal networks, *A.I.Ch.E.J.*, Vol. **24**, No. 4, pp. 633-642, 1978.



Linnhoff B. Mason D. and Wardle Y., Understanding heat exchanger networks, *Computers Chem. Engng.*, Vol. **3**, pp. 295-302, 1979.

Linnhoff B. and Turner J.A., Heat-recovery networks: new insights yield big savings, *Chemical Engineering*, November 2, pp. 56-60, 1981.

Linnhoff B. and Hindmarsh E., The pinch design method for heat exchanger networks, *Chem. Engng Sci*, Vol. **38**, No. 5, pp. 745-763, 1983.

Linnhoff B., Dunford H. and Smith R., Heat integration of distillation columns into overall processes, *Chem. Engng. Sci.*, Vol. **38**, pp. 1175-1188, 1983.

Linnhoff B. and Witherell W. D., Pinch technology guides retrofit, *Oil & Gas Journal*, April 7, 1986.

Linnhoff B. and Smith R., The pinch principle, *Mechanical Engineering*, February, pp. 70-73, 1988.

Linnhoff B. and Ahmad S., Cost optimum heat exchanger networks -1 Minimum energy and capital using simple models for capital cost, *Computers chem. Engng*, Vol. **14**, No.7, pp. 729-750, 1990.

Nishimura H., A theory for the optimum synthesis of heat exchange systems, *J. Optimization Theory Applic.*, Vol. **30**, pp. 423-450, 1980.

Rev E. and Fonyo Z., Diverse pinch concept for heat exchange networks synthesis: the case of different heat transfer conditions, *Chemical Engineering*, Vol. **46**, No. 7, pp. 1623-1634, 1991.

Rudd D., Powers G. and Siirola J., *Process Synthesis*, Prentice Hall, 1973.

Serna, M., Desarrollo de algoritmos rigurosos para la integración térmica de procesos, *Tesis doctoral en desarrollo*, 1998.

Tjoe T. N. and Linnhoff B., Using pinch technology for process retrofit, *Chemical Engineering*, April 28, pp. 47-60, 1986.

Townsend D.W. and Linnhoff B., Heat and power network in process design, Part I: Criteria for placement of heat engines and heat pumps in process networks, *A.I.Ch.E.J.*, Vol. **29**, No. 5, pp. 742-748, 1983 (a).

Townsend D.W. and Linnhoff B., Heat and power network in process design, Part II: Design procedure for equipment selection and process matching, *A.I.Ch.E.J.*, Vol. **29**, No. 5, pp. 748-771, 1983 (b).

Townsend D.W. and Linnhoff B., Surface area targets for heat exchanger networks, *ICnemE, 11th Annual Res. Meeting, Bath, U.K.*, 1984.

Zhu X. X., O'Neill B. K., Roach J. R. and Wood R. M., Area-targeting methods for the direct synthesis of heat exchanger networks with unequal film coefficients, *Computers chem. Engng*, Vol. **19**, No.2, pp. 223-239, 1995.

# **APENDICE      A**

## **RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO PRESENTADOS EN EL CAPITULO 2**

### A.1 Caso de estudio 2.1

Tabla A1.1 Area mínima balanceada y proceso-proceso calculada con la fórmula Bath para el Caso 2.1.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | <i>Amin</i><br><i>Balanceada</i><br>(m <sup>2</sup> ) | <i>Amin</i><br><i>Proceso-Proceso</i><br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 18237   | 14560  |
| 10                       | 14066   | 10155  |
| 15                       | 11962   | 7829   |
| 20                       | 10669   | 6323   |
| 25                       | 9797  | 5248   |
| 30                       | 9177  | 4433   |
| 35                       | 8613  | 3629   |
| 40                       | 8168  | 2922   |

Tabla. A1.2 Valores de k para los diferentes valores z correspondientes a los  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 2.1.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| 5                        | 0.04545 | 0.16594   | 0.37987   |
| 10                       | 0.09091 | 0.33189   | 0.75975   |
| 15                       | 0.13636 | 0.49783   | 1.13962   |
| 20                       | 0.18182 | 0.66377   | 1.51949   |
| 25                       | 0.22727 | 0.82972   | 1.89937   |
| 30                       | 0.27273 | 0.99566   | 2.27924   |
| 35                       | 0.31818 | 1.16160   | 2.65911   |
| 40                       | 0.36364 | 1.32755   | 3.03899   |

Tabla. A1.3 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa y la fórmula Bath para el Caso 2.1.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.30  | -0.30     | -0.30     | -0.37   | -0.37     | -0.37     |
| 10                       | -0.11  | -0.11     | -0.11     | -0.15   | -0.15     | -0.15     |
| 15                       | -0.06  | -0.06     | -0.06     | -0.08   | -0.08     | -0.08     |
| 20                       | -0.04  | -0.04     | -0.04     | -0.05   | -0.05     | -0.05     |
| 25                       | -0.02  | -0.02     | -0.02     | -0.04   | -0.04     | -0.04     |
| 30                       | -0.02  | -0.02     | -0.02     | -0.03   | -0.03     | -0.03     |
| 35                       | -0.01  | -0.01     | -0.01     | -0.01   | -0.01     | -0.01     |
| 40                       | -0.01  | -0.01     | -0.01     | -0.01   | 0.00      | 0.00      |

Tabla. A1.3 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada y la fórmula Bath para el Caso 2.1.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.30  | -0.30     |           | -0.37   | -0.37     |           |
| 10                       | -0.11  | -0.11     |           | -0.15   | -0.15     |           |
| 15                       | -0.06  | -0.06     |           | -0.08   | -0.08     |           |
| 20                       | -0.04  | -0.04     |           | -0.05   | -0.05     |           |
| 25                       | -0.02  | -0.02     |           | -0.04   | -0.04     |           |
| 30                       | -0.02  | -0.02     |           | -0.03   | -0.03     |           |
| 35                       | -0.01  | -0.01     |           | -0.01   | -0.01     |           |
| 40                       | -0.01  | -0.01     |           | -0.01   | 0.00      |           |

### A.2 Caso de estudio 2.3

Tabla A2.1 Área mínima balanceada y proceso-proceso calculada con la fórmula Bath para el Caso 2.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $A_{min}$<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | $A_{min}$<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|--|---|
| 5                        | 18720  | 15018   |
| 10                       | 14437  | 10500   |
| 15                       | 12275  | 8113  |
| 20                       | 10943  | 6567  |
| 25                       | 10044  | 5463  |
| 30                       | 9404   | 4625  |
| 35                       | 8821   | 3800  |
| 40                       | 8359   | 3074  |

Tabla. A2.2 Valores de k para los diferentes valores z correspondientes a los  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 2.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| 5                        | 0.04435 | 0.16135   | 0.36978   |
| 10                       | 0.08870 | 0.32269   | 0.73856   |
| 15                       | 0.13305 | 0.48404   | 1.10933   |
| 20                       | 0.17739 | 0.64538   | 1.47911   |
| 25                       | 0.22174 | 0.80673   | 1.84889   |
| 30                       | 0.26609 | 0.96807   | 2.21867   |
| 35                       | 0.31289 | 1.13960   | 2.61081   |
| 40                       | 0.35759 | 1.3024    | 2.98379   |

Tabla. A2.3 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa y la fórmula Bath para el Caso 2.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.30  | -0.30     | -0.30     | -0.40   | -0.40     | -0.40     |
| 10                       | -0.12  | -0.12     | -0.12     | -0.22   | -0.23     | -0.23     |
| 15                       | -0.07  | -0.06     | -0.06     | -0.22   | -0.24     | -0.23     |
| 20                       | -0.04  | -0.04     | -0.04     | -0.28   | -0.31     | -0.30     |
| 25                       | -0.03  | -0.03     | -0.03     | -0.39   | -0.43     | -0.42     |
| 30                       | -0.03  | -0.03     | -0.03     | -0.53   | -0.59     | -0.57     |
| 35                       | -0.03  | -0.02     | -0.02     | -0.75   | -0.84     | -0.81     |
| 40                       | -0.03  | -0.02     | -0.02     | -1.06   | -1.20     | -1.16     |

Tabla. A2.4 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada y la fórmula Bath para el Caso 2.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.32  | -0.32     | -0.32     | -0.42   | -0.42     | -0.42     |
| 10                       | -0.14  | -0.13     | -0.13     | -0.25   | -0.25     | -0.25     |
| 15                       | -0.08  | -0.08     | -0.08     | -0.25   | -0.26     | -0.25     |
| 20                       | -0.06  | -0.06     | -0.06     | -0.30   | -0.33     | -0.32     |
| 25                       | -0.05  | -0.05     | -0.05     | -0.41   | -0.44     | -0.43     |
| 30                       | -0.05  | -0.04     | -0.04     | -0.55   | -0.61     | -0.59     |
| 35                       | -0.04  | -0.04     | -0.04     | -0.76   | -0.85     | -0.82     |
| 40                       | -0.04  | -0.04     | -0.04     | -1.08   | -1.22     | -1.17     |

### A.3 Caso de estudio 2.4

Tabla A3.1 Área mínima balanceada y proceso-proceso calculada con la fórmula Bath para el Caso 2.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | <i>Amin</i><br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | <i>Amin</i><br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|--|---|
| 5                        | 20136  | 16732   |
| 10                       | 15203  | 11529   |
| 15                       | 12761  | 8832  |
| 20                       | 11281  | 7107  |
| 25                       | 10294  | 5886  |
| 30                       | 9600   | 4968  |
| 35                       | 8986   | 4079  |
| 40                       | 8535   | 3329  |

Tabla. A3.2 Valores de  $k$  para los diferentes valores  $z$  correspondientes a los  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 2.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| 5                        | 0.03684 | 0.13899   | 0.3295    |
| 10                       | 0.07367 | 0.27799   | 0.6590    |
| 15                       | 0.11051 | 0.41698   | 0.9885    |
| 20                       | 0.14735 | 0.55598   | 1.3180    |
| 25                       | 0.18418 | 0.69497   | 1.6475    |
| 30                       | 0.22102 | 0.83397   | 1.9770    |
| 35                       | 0.26838 | 1.01264   | 2.4006    |
| 40                       | 0.32274 | 1.21776   | 2.8868    |

Tabla. A3.3 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa y la fórmula Bath para el Caso 2.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.77  | -0.76     | -0.73     | -1.32   | -1.24     | -1.15     |
| 10                       | -0.84  | -0.79     | -0.72     | -2.20   | -1.98     | -1.70     |
| 15                       | -1.03  | -0.99     | -0.86     | -3.42   | -3.10     | -2.65     |
| 20                       | -1.06  | -1.10     | -1.06     | -4.40   | -4.28     | -3.81     |
| 25                       | -1.10  | -1.13     | -1.14     | -5.44   | -5.22     | -4.96     |
| 30                       | -1.14  | -1.20     | -1.19     | -6.60   | -6.34     | -5.95     |
| 35                       | -1.27  | -1.37     | -1.38     | -8.50   | -8.17     | -7.67     |
| 40                       | -1.59  | -1.75     | -1.81     | -11.48  | -11.12    | -10.52    |

Tabla. A3.4 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada y la fórmula Bath para el Caso 2.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -2.12  | -2.08     | -1.96     | -2.75   | -2.67     | -2.49     |
| 10                       | -2.40  | -2.36     | -2.20     | -3.68   | -3.57     | -3.28     |
| 15                       | -2.72  | -2.67     | -2.49     | -4.78   | -4.61     | -4.24     |
| 20                       | -3.03  | -2.98     | -2.77     | -5.84   | -5.79     | -5.30     |
| 25                       | -3.31  | -3.25     | -3.04     | -6.95   | -6.84     | -6.51     |
| 30                       | -3.57  | -3.51     | -3.27     | -8.20   | -8.03     | -7.59     |
| 35                       | -3.93  | -3.90     | -3.66     | -10.23  | -9.97     | -9.40     |
| 40                       | -4.44  | -4.47     | -4.26     | -13.42  | -13.08    | -12.35    |

## A.4 Caso de estudio 2.5

Tabla A4.1 Área mínima balanceada y proceso-proceso calculada con la fórmula Bath para el Caso 2.5.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $A_{min}$<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | $A_{min}$<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|--|---|
| 5                        | 17337  | 14063   |
| 10                       | 13059  | 9529  |
| 15                       | 10963  | 7189  |
| 20                       | 9705   | 5698  |
| 25                       | 8876   | 4647  |
| 30                       | 8301   | 3859  |
| 35                       | 7801   | 3097  |
| 40                       | 7444   | 2456  |

Tabla. A4.2 Valores de k para los diferentes valores z correspondientes a los  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 2.5.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| 5                        | 0.04192 | 0.15286   | 0.35296   |
| 10                       | 0.08384 | 0.30572   | 0.70591   |
| 15                       | 0.12576 | 0.45858   | 1.05887   |
| 20                       | 0.16769 | 0.61143   | 1.41182   |
| 25                       | 0.20961 | 0.76429   | 1.76478   |
| 30                       | 0.25153 | 0.91715   | 2.11773   |
| 35                       | 0.30542 | 1.11365   | 2.57144   |
| 40                       | 0.36728 | 1.33923   | 3.09233   |

Tabla. A4.3 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa y la fórmula Bath para el Caso 2.5.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.46  | -0.43     | -0.42     | -0.79   | -0.72     | -0.67     |
| 10                       | -0.47  | -0.38     | -0.31     | -1.20   | -1.05     | -0.86     |
| 15                       | -0.58  | -0.54     | -0.40     | -1.68   | -1.63     | -1.38     |
| 20                       | -0.63  | -0.59     | -0.55     | -2.09   | -2.07     | -1.98     |
| 25                       | -0.73  | -0.66     | -0.61     | -2.57   | -2.58     | -2.46     |
| 30                       | -0.87  | -0.78     | -0.69     | -3.10   | -3.18     | -3.04     |
| 35                       | -1.13  | -1.03     | -0.93     | -3.86   | -4.20     | -4.18     |
| 40                       | -1.64  | -1.52     | -1.41     | -5.35   | -6.04     | -6.25     |



Tabla. A4.4 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada y la fórmula Bath para el Caso 2.5.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.98  | -0.91     | -0.84     | -1.25   | -1.17     | -1.09     |
| 10                       | -1.10  | -1.01     | -0.91     | -1.56   | -1.50     | -1.36     |
| 15                       | -1.33  | -1.21     | -1.08     | -1.89   | -1.87     | -1.80     |
| 20                       | -1.62  | -1.44     | -1.28     | -2.30   | -2.30     | -2.22     |
| 25                       | -1.94  | -1.72     | -1.49     | -2.80   | -2.81     | -2.71     |
| 30                       | -2.27  | -2.01     | -1.73     | -3.34   | -3.43     | -3.30     |
| 35                       | -2.75  | -2.46     | -2.15     | -4.16   | -4.49     | -4.46     |
| 40                       | -3.43  | -3.14     | -2.80     | -5.75   | -6.42     | -6.58     |

### A.5 Caso de estudio 2.6

Tabla A5.1 Area mínima balanceada y proceso-proceso calculada con la fórmula Bath para el Caso 2.6.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $A_{min}$<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | $A_{min}$<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|--|---|
| 5                        | 16911  | 13501   |
| 10                       | 13043  | 9417  |
| 15                       | 11092  | 7260  |
| 20                       | 9893   | 5863  |
| 25                       | 9084   | 4866  |
| 30                       | 8510   | 4110  |
| 35                       | 7987   | 3365  |
| 40                       | 7574   | 2709  |

Tabla. A5.2 Valores de k para los diferentes valores z correspondientes a los  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 2.6.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| 5                        | 0.04902 | 0.18696   | 0.43805   |
| 10                       | 0.09804 | 0.37392   | 0.87610   |
| 15                       | 0.14706 | 0.56089   | 1.31415   |
| 20                       | 0.19608 | 0.74785   | 1.75220   |
| 25                       | 0.24510 | 0.93481   | 2.19025   |
| 30                       | 0.29412 | 1.12177   | 2.62830   |
| 35                       | 0.34314 | 1.30874   | 3.06635   |
| 40                       | 0.39216 | 1.49570   | 3.50440   |

Tabla. A5.3 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa y la fórmula Bath para el Caso 2.6.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.30  | -0.30     | -0.30     | -0.38   | -0.38     | -0.38     |
| 10                       | -0.11  | -0.11     | -0.11     | -0.15   | -0.15     | -0.15     |
| 15                       | -0.06  | -0.06     | -0.06     | -0.09   | -0.09     | -0.09     |
| 20                       | -0.04  | -0.04     | -0.04     | -0.05   | -0.05     | -0.05     |
| 25                       | -0.02  | -0.02     | -0.02     | -0.04   | -0.04     | -0.04     |
| 30                       | -0.02  | -0.02     | -0.02     | -0.03   | -0.03     | -0.03     |
| 35                       | -0.01  | -0.01     | -0.01     | -0.01   | -0.01     | -0.01     |
| 40                       | -0.01  | -0.01     | -0.01     | -0.01   | -0.01     | -0.01     |

Tabla. A5.4 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada y la fórmula Bath para el Caso 2.6.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.30  | -0.30     | -0.30     | -0.38   | -0.38     | -0.38     |
| 10                       | -0.11  | -0.11     | -0.11     | -0.15   | -0.15     | -0.15     |
| 15                       | -0.06  | -0.06     | -0.06     | -0.09   | -0.09     | -0.09     |
| 20                       | -0.04  | -0.04     | -0.04     | -0.05   | -0.05     | -0.05     |
| 25                       | -0.02  | -0.02     | -0.02     | -0.04   | -0.04     | -0.04     |
| 30                       | -0.02  | -0.02     | -0.02     | -0.03   | -0.03     | -0.03     |
| 35                       | -0.01  | -0.01     | -0.01     | -0.01   | -0.01     | -0.01     |
| 40                       | -0.01  | -0.01     | -0.01     | -0.01   | -0.01     | -0.01     |

### A.6 Caso de estudio 2.7

Tabla A6.1 Área mínima balanceada y proceso-proceso calculada con la fórmula Bath para el Caso 2.7.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | <i>Amin</i><br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | <i>Amin</i><br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|--|---|
| 5                        | 15678  | 12699   |
| 10                       | 11705  | 8484  |
| 15                       | 9772   | 6321  |
| 20                       | 8620   | 4949  |
| 25                       | 7866   | 3985  |
| 30                       | 7346   | 3265  |
| 35                       | 6901   | 2572  |
| 40                       | 6592   | 1995  |

Tabla. A6.2 Valores de  $k$  para los diferentes valores  $z$  correspondientes a los  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 2.7.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| 5                        | 0.04457 | 0.17131   | 0.40626   |
| 10                       | 0.08913 | 0.34261   | 0.81252   |
| 15                       | 0.13370 | 0.51392   | 1.21878   |
| 20                       | 0.17826 | 0.68523   | 1.62504   |
| 25                       | 0.22283 | 0.85653   | 2.03130   |
| 30                       | 0.26739 | 1.02784   | 2.43756   |
| 35                       | 0.32468 | 1.24805   | 2.95980   |
| 40                       | 0.39045 | 1.50086   | 3.55935   |

Tabla. A6.3 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa y la fórmula Bath para el Caso 2.7.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.52  | -0.50     | -0.48     | -0.83   | -0.79     | -0.74     |
| 10                       | -0.66  | -0.59     | -0.49     | -1.13   | -1.04     | -0.92     |
| 15                       | -0.60  | -0.61     | -0.61     | -1.03   | -1.06     | -1.11     |
| 20                       | -0.59  | -0.59     | -0.59     | -0.82   | -0.88     | -0.96     |
| 25                       | -0.66  | -0.65     | -0.63     | -0.51   | -0.60     | -0.73     |
| 30                       | -0.78  | -0.75     | -0.72     | -0.04   | -0.15     | -0.39     |
| 35                       | -1.13  | -1.10     | -1.04     | 0.54  | 0.30      | -0.06     |
| 40                       | -1.86  | -1.82     | -1.73     | 0.76  | 0.32      | -0.31     |

Tabla. A6.4 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada y la fórmula Bath para el Caso 2.7.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -2.09  | -2.06     | -1.99     | -2.44   | -2.42     | -2.35     |
| 10                       | -2.40  | -2.38     | -2.31     | -2.59   | -2.65     | -2.67     |
| 15                       | -2.74  | -2.71     | -2.62     | -2.59   | -2.68     | -2.77     |
| 20                       | -3.16  | -3.10     | -2.97     | -2.50   | -2.63     | -2.77     |
| 25                       | -3.63  | -3.54     | -3.35     | -2.32   | -2.49     | -2.69     |
| 30                       | -4.13  | -3.99     | -3.76     | -2.01   | -2.21     | -2.52     |
| 35                       | -4.91  | -4.74     | -4.43     | -1.74   | -2.05     | -2.46     |
| 40                       | -6.05  | -5.85     | -5.46     | -2.06   | -2.50     | -3.11     |

|    | (m <sup>2</sup> ) | (m <sup>2</sup> ) |
|----|-------------------|-------------------|
| 5  | 18833             | 15732             |
| 10 | 14172             | 10816             |
| 15 | 11873             | 8275              |
| 20 | 10483             | 6653              |
| 25 | 9558              | 5507              |
| 30 | 8910              | 4647              |
| 35 | 8338              | 3816              |
| 40 | 7924              | 3119              |

Tabla. A7.2 Valores de k para los diferentes valores z correspondientes a los  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 2.8.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| 5                        | 0.03873 | 0.15017   | 0.36152   |
| 10                       | 0.07746 | 0.30035   | 0.72303   |
| 15                       | 0.11619 | 0.45052   | 1.08455   |
| 20                       | 0.15493 | 0.60070   | 1.44606   |
| 25                       | 0.19366 | 0.75087   | 1.80758   |
| 30                       | 0.23239 | 0.90105   | 2.16909   |
| 35                       | 0.28218 | 1.09409   | 2.63381   |
| 40                       | 0.33933 | 1.31572   | 3.16733   |

Tabla. A7.3 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa y la fórmula Bath para el Caso 2.8.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.90  | -0.89     | -0.88     | -1.50   | -1.47     | -1.40     |
| 10                       | -1.10  | -1.06     | -0.99     | -2.63   | -2.50     | -2.28     |
| 15                       | -1.28  | -1.29     | -1.28     | -3.97   | -3.89     | -3.64     |
| 20                       | -1.31  | -1.33     | -1.34     | -4.98   | -4.36     | -4.78     |
| 25                       | -1.37  | -1.40     | -1.42     | -6.16   | -6.07     | -5.88     |
| 30                       | -1.42  | -1.47     | -1.51     | -7.51   | -7.39     | -7.15     |
| 35                       | -1.59  | -1.66     | -1.73     | -9.71   | -9.57     | -9.28     |
| 40                       | -1.98  | -2.10     | -2.23     | -13.25  | -13.11    | -12.76    |

Tabla. A7.4 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada y la fórmula Bath para el Caso 2.8.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -2.75  | -2.74     | -2.68     | -3.46   | -3.43     | -3.34     |
| 10                       | -3.22  | -3.22     | -3.14     | -4.63   | -4.59     | -4.45     |
| 15                       | -3.68  | -3.67     | -3.58     | -5.94   | -5.92     | -5.71     |
| 20                       | -4.11  | -4.09     | -3.99     | -7.08   | -7.08     | -6.99     |
| 25                       | -4.53  | -4.50     | -4.38     | -8.39   | -8.37     | -8.23     |
| 30                       | -4.92  | -4.89     | -4.76     | -9.88   | -9.84     | -9.63     |
| 35                       | -5.47  | -5.45     | -5.31     | -12.33  | -12.24    | -11.94    |
| 40                       | -6.23  | -6.23     | -6.11     | -16.25  | -16.11    | -15.68    |

### A.8 Caso de estudio 2.9

Tabla A8.1 Area mínima balanceada y proceso-proceso calculada con la fórmula Bath para el Caso 2.9.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $A_{min}$<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | $A_{min}$<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|--|---|
| 5                        | 14351  | 11457   |
| 10                       | 10743  | 7615  |
| 15                       | 8997   | 5647  |
| 20                       | 7964   | 4401  |
| 25                       | 7293   | 3527  |
| 30                       | 6834   | 2874  |
| 35                       | 6445   | 2247  |
| 40                       | 6182   | 1724  |

Tabla. A8.2 Valores de k para los diferentes valores z correspondientes a los  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 2.9.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$ | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| 5                        | 0.04872 | 0.18478   | 0.43112   |
| 10                       | 0.09745 | 0.36956   | 0.86224   |
| 15                       | 0.14617 | 0.55434   | 1.29336   |
| 20                       | 0.19490 | 0.73911   | 1.72448   |
| 25                       | 0.24362 | 0.92389   | 2.15560   |
| 30                       | 0.29235 | 1.10867   | 2.58672   |
| 35                       | 0.35498 | 1.34620   | 3.14091   |
| 40                       | 0.46719 | 1.75558   | 4.06892   |

Tabla. A8.3 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Eath diversa y la fórmula Bath para el Caso 2.9.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -0.49  | -0.45     | -0.40     | -0.70   | -0.64     | -0.57     |
| 10                       | -0.69  | -0.54     | -0.39     | -1.12   | -0.93     | -0.73     |
| 15                       | -0.67  | -0.64     | -0.62     | -1.07   | -1.11     | -1.13     |
| 20                       | -0.75  | -0.70     | -0.65     | -1.04   | -1.10     | -1.16     |
| 25                       | -0.92  | -0.85     | -0.75     | -0.98   | -1.10     | -1.21     |
| 30                       | -1.17  | -1.06     | -0.91     | -0.88   | -1.09     | -1.26     |
| 35                       | -1.67  | -1.52     | -1.31     | -0.94   | -1.32     | -1.65     |
| 40                       | -2.56  | -2.35     | -2.06     | -1.06   | -1.94     | -2.66     |

Tabla. A8.4 Porcentaje de desviación entre el área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada y la fórmula Bath para el Caso 2.9.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | % de desviación respecto del área balanceada |           |           | % de desviación respecto del área proceso-proceso |           |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
|                          | $z = 1.0$                                    | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ | $z = 1.0$   | $z = 0.7$ | $z = 0.5$ |
| 5                        | -1.03  | -0.96     | -0.85     | -1.12   | -1.06     | -0.96     |
| 10                       | -1.26  | -1.17     | -1.03     | -1.12   | -1.12     | -1.07     |
| 15                       | -1.61  | -1.47     | -1.29     | -1.07   | -1.10     | -1.12     |
| 20                       | -2.08  | -1.87     | -1.61     | -1.04   | -1.10     | -1.15     |
| 25                       | -2.62  | -2.34     | -1.99     | -0.98   | -1.10     | -1.20     |
| 30                       | -3.19  | -2.86     | -2.42     | -0.88   | -1.09     | -1.26     |
| 35                       | -4.06  | -3.66     | -3.04     | -0.94   | -1.32     | -1.65     |
| 40                       | -5.37  | -4.92     | -4.26     | -1.06   | -1.95     | -2.66     |

## **APENDICE B**

### **RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL REDISEÑO DEL CASO DE ESTUDIO 3.2**

### B.1 Caso de estudio 3.2

#### B.1.1 Definición de la red de intercambio de calor existente

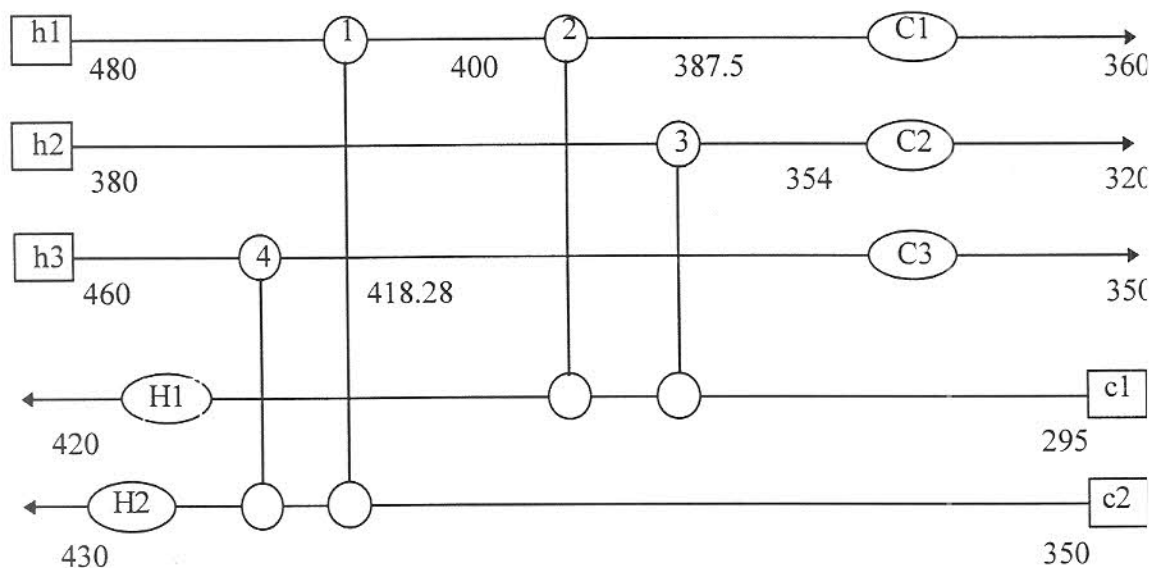


Figura B.1 Diagrama de rejilla de la red existente, Caso 3.2.

Tabla B.1 Datos de los intercambiadores existentes de la red para el Caso 3.2.

| <i>Intercambiador</i> | <i>Corrientes</i> | <i>T entrada (°C)</i> | <i>T salida (°C)</i> | <i>Carga térmica (kW)</i> | <i>Area de transferencia (m<sup>2</sup>)</i> |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--|
| <b>1</b>              | h1<br>c2          | 480<br>350            | 400<br>383           | 4150.0                    | 195  |
| <b>2</b>              | h1<br>c1          | 400<br>340            | 388<br>365           | 650.0                     | 53   |
| <b>3</b>              | h2<br>c1          | 380<br>295            | 354<br>340           | 1170.0                    | 80   |
| <b>4</b>              | h3<br>c2          | 460<br>383            | 418<br>396           | 1543.6                    | 107  |
| <b>C1</b>             | h1                | 387                   | 360                  | 1430.0                    | 14   |
| <b>C2</b>             | h2                | 354                   | 320                  | 1530.0                    | 17   |
| <b>C3</b>             | h3                | 418                   | 350                  | 2526.4                    | 24   |
| <b>H1</b>             | c1                | 365                   | 420                  | 1430.0                    | 33   |
| <b>H2</b>             | c2                | 396                   | 430                  | 4306.3                    | 114  |



Tabla B.2 Datos generales de las corrientes que integran la red existente, Caso 3.2.

| <i>Corriente</i> | <i>T entrada</i><br>(°C) | <i>T salida</i><br>(°C) | <i>Cp<sub>i</sub></i><br>(kW/°C) | <i>h<sub>i</sub></i><br>(kW/°C m <sup>2</sup> ) |
|------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|---|
| <b>h1</b>        | 480                      | 360                     | 52                               | 0.6   |
| <b>h2</b>        | 380                      | 320                     | 45                               | 0.6   |
| <b>h3</b>        | 460                      | 350                     | 37                               | 0.6   |
| <b>c1</b>        | 295                      | 420                     | 26                               | 0.6   |
| <b>c2</b>        | 350                      | 430                     | 125                              | 0.6   |

Tabla B.3 Requerimientos de servicios y área mínimos a diferentes valores de ΔT<sub>min</sub> para el Caso 3.2.

| <i>ΔT<sub>min</sub></i><br>(°C) | <i>Q<sub>c min</sub></i><br>(kW) | <i>Q<sub>h min</sub></i><br>(kW) | <i>A min</i><br><i>Balanceada</i><br>(m <sup>2</sup> ) | <i>A<sub>min</sub></i><br><i>Proceso-proceso</i><br>(m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|---|
| <b>5</b>                        | 330                              | 570                              | 2757   | 2736  |
| <b>10</b>                       | 740                              | 980                              | 2054   | 2017  |
| <b>15</b>                       | 1410                             | 1650                             | 1484   | 1421  |
| <b>20</b>                       | 2080                             | 2320                             | 1166   | 1078  |
| <b>25</b>                       | 2750                             | 2990                             | 961  | 849   |
| <b>30</b>                       | 3420                             | 3660                             | 818  | 682   |
| <b>35</b>                       | 3865                             | 4105                             | 745  | 594   |
| <b>40</b>                       | 4310                             | 4550                             | 686  | 520   |
| <b>53.5</b>                     | 5486.4                           | 5736.3                           | 575  | 371   |

### B.1.2 Eficiencia inicial de la red

$$\alpha_{\text{PROCESO-PROCESO}} = \frac{A_{\text{min}}_{\text{PROCESO-PROCESO}}}{A_{\text{existente}}_{\text{PROCESO-PROCESO}}} = \frac{371}{435} = 0.853$$

Tabla B.4 Resultados del área de rediseño y adicional predicha considerando la eficiencia constante para el Caso 3.2.

| <i>ΔT<sub>min</sub></i><br>(°C) | <i>Área de rediseño</i><br>(m <sup>2</sup> ) | <i>Área adicional</i><br>(m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------|--|--|
| <b>5</b>                        | 3209   | 2774                                       |
| <b>10</b>                       | 2365   | 1930                                       |
| <b>15</b>                       | 1667   | 1232                                       |
| <b>20</b>                       | 1264   | 830  |
| <b>25</b>                       | 995  | 561  |
| <b>30</b>                       | 800  | 365  |
| <b>35</b>                       | 697  | 262  |
| <b>40</b>                       | 610  | 176  |

### B.1.3 Resultados del diseño revisado de la red

Tabla B.5 Resultados del área de rediseño y adicional proceso-proceso para los diferentes  $\Delta T_{min}$  del Caso 3.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Área adicional<br>(m <sup>2</sup> ) | Área de rediseño<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 5                        | 2799                                | 3234                                  |
| 10                       | 1911                                | 2346                                  |
| 15                       | 1169                                | 1604                                  |
| 20                       | 766                                 | 1200                                  |
| 25                       | 509                                 | 944                                   |
| 30                       | 303                                 | 737                                   |
| 35                       | 223                                 | 658                                   |
| 40                       | 158                                 | 593                                   |

Tabla B.6 Resultados de la relación entre área mínima y área de reajuste para los diferentes  $\Delta T_{min}$  del Caso 3.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $\alpha$ del rediseño | $\alpha$ constante |
|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| 5                        | 0.8462                | 0,8528             |
| 10                       | 0.8597                | 0,8528             |
| 15                       | 0.8860                | 0,8528             |
| 20                       | 0.8981                | 0,8528             |
| 25                       | 0.8993                | 0,8528             |
| 30                       | 0.9248                | 0,8528             |
| 35                       | 0.9030                | 0,8528             |
| 40                       | 0.8780                | 0,8528             |

Tabla B.7 Resultados de la inversión adicional del rediseño y ahorro potencial a diferentes  $\Delta T_{min}$  del Caso 3.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Ahorro Potencial<br>(miles \$/ año) | Inversión adicional<br>$\alpha$ constante<br>(miles \$) | Inversión adicional<br>$\alpha$ rediseño<br>(miles \$) |
|--------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 5                        | 599                                 | 571   | 575  |
| 10                       | 550                                 | 431   | 428  |
| 15                       | 469                                 | 306   | 295  |
| 20                       | 389                                 | 229   | 217  |
| 25                       | 309                                 | 174   | 163  |
| 30                       | 228                                 | 131   | 117  |
| 35                       | 175                                 | 107   | 97   |
| 40                       | 121                                 | 85  | 81   |

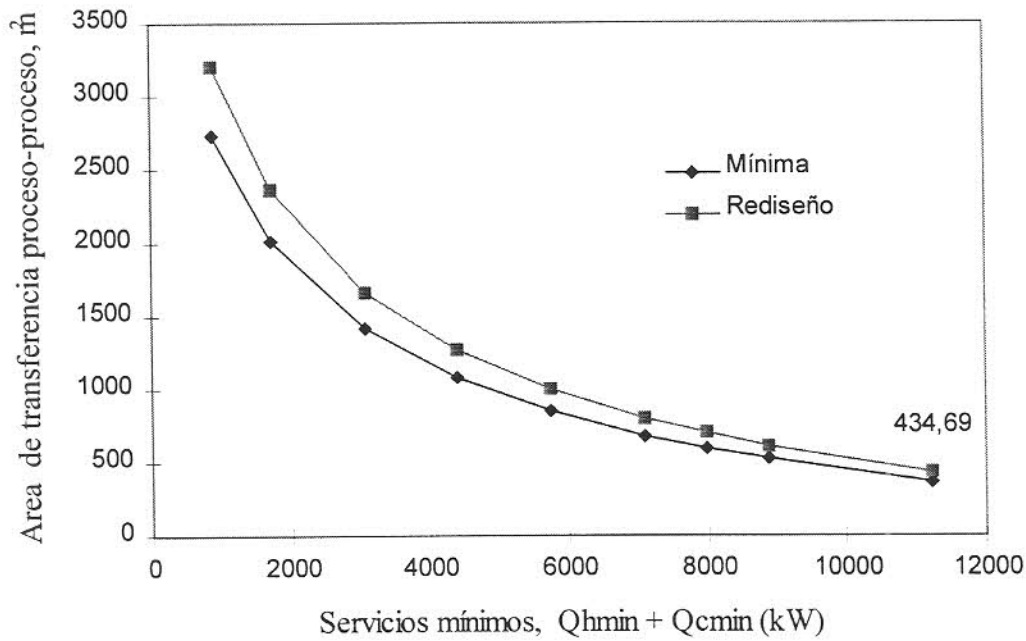


Figura B.2 Dependencia del área de transferencia mínima y de rediseño proceso-proceso respecto a los servicios mínimos para el Caso 3.2.

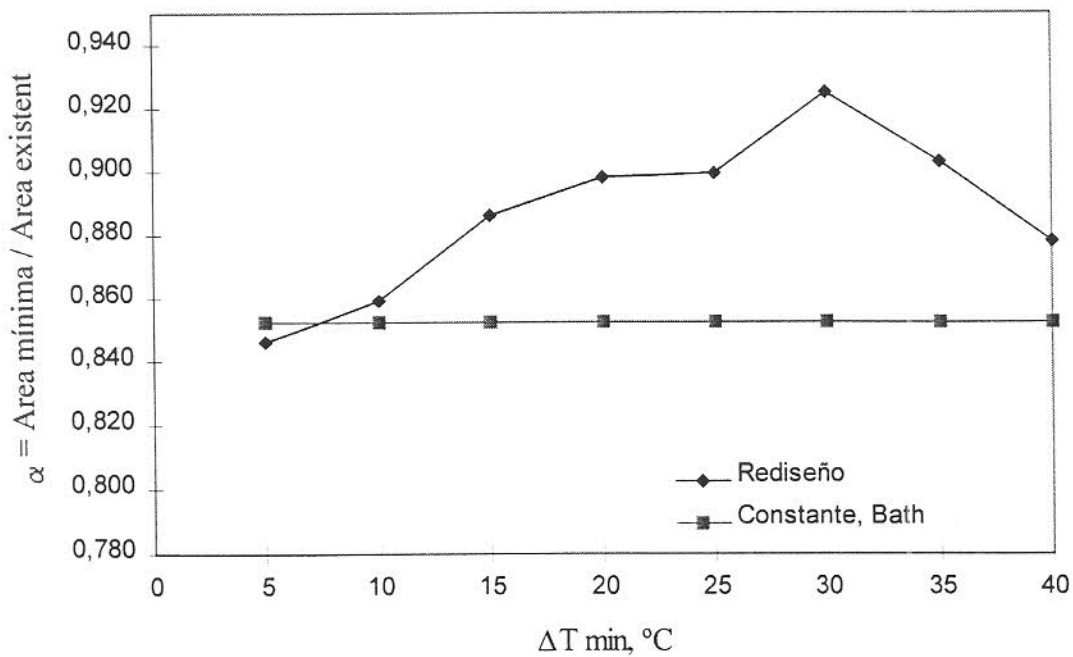


Figura B.3 Relación entre el área mínima y el área existente proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  para el Caso 3.2.

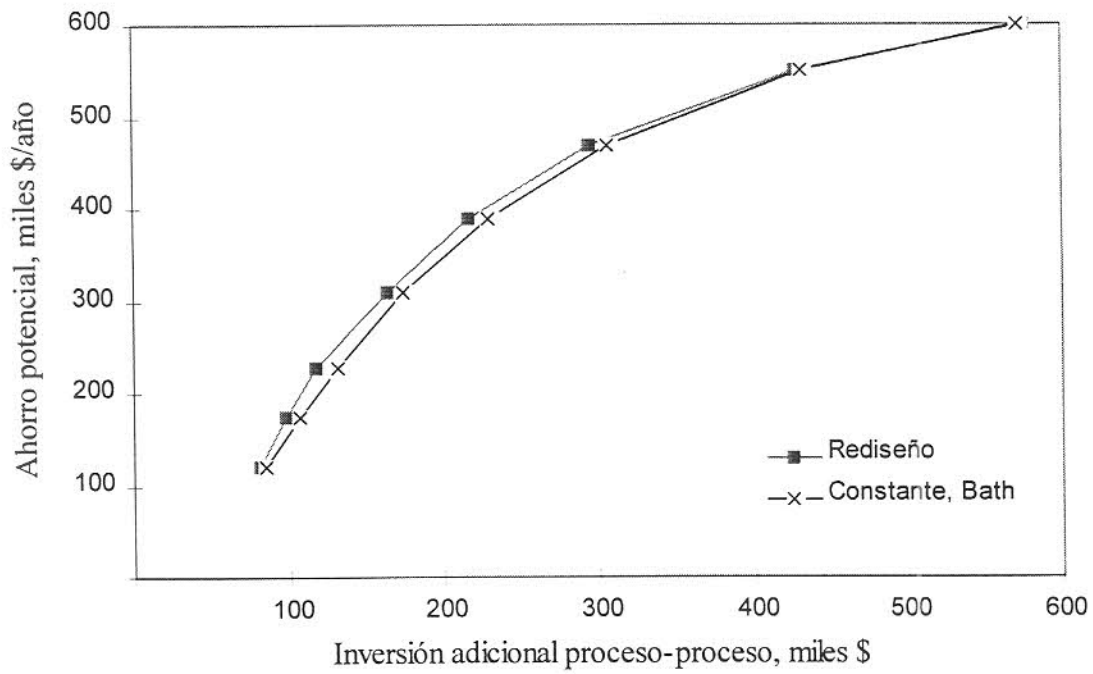


Figura B.4 Ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso considerando  $\alpha$  constante y de la inversión resultante del rediseño para el Caso 3.2.

## **APENDICE C**

**RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE  
OBJETIVOS ECONOMICO ENERGETICOS DE TRES REDES DE  
INTERCAMBIO DE CALOR EXISTENTES CON COEFICIENTES  
VARIABLES**

**C.1 Caso de estudio 4.2**

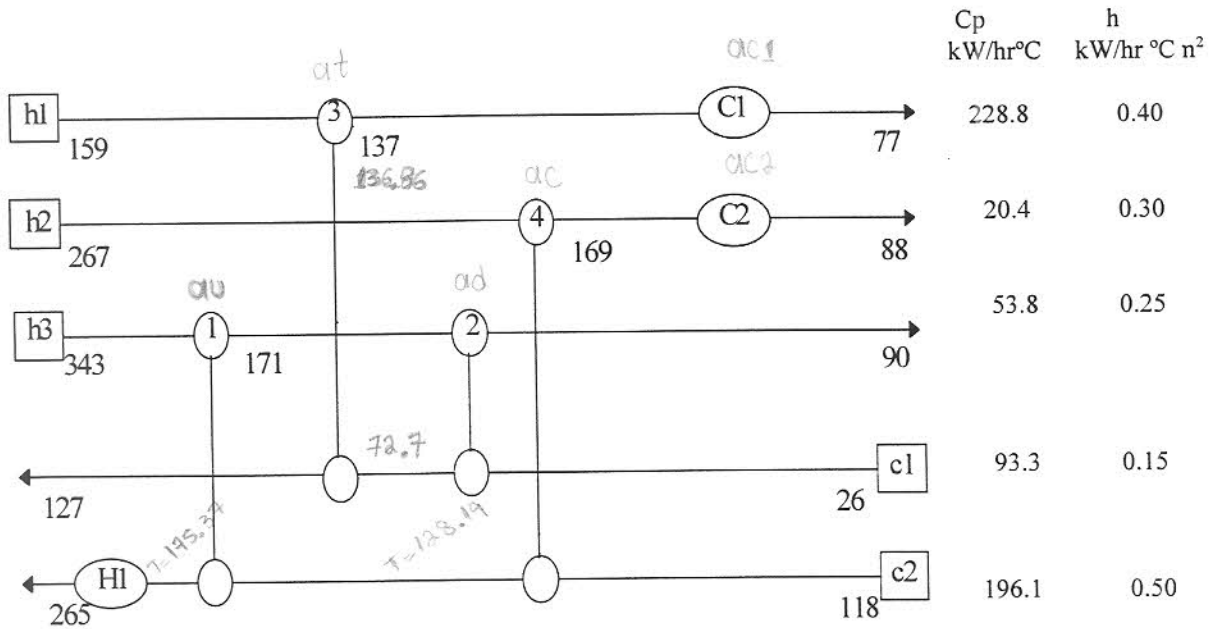


Figura C2.1 Diagrama de rejilla de la red existente, Caso 4.2.

Tabla C2.1 Datos de los intercambiadores de la red existente (Caso 4.2), área de transferencia, carga térmica, temperaturas de entrada y salida de las corrientes.

| Intercambiador | Corrientes | T entrada (°C) | T salida (°C) | Carga térmica (kW) | Area (m <sup>2</sup> ) |
|----------------|------------|----------------|---------------|--------------------|------------------------|
| 1              | h3         | 343            | 171           | 9254               | 605                    |
|                | c2         | 128            | 175           |                    |                        |
| 2              | h3         | 171            | 90            | 4358               | 583                    |
|                | c1         | 26             | 73            |                    |                        |
| 3              | h1         | 159            | 137           | 5027               | 998                    |
|                | c1         | 73             | 127           |                    |                        |
| 4              | h2         | 267            | 169           | 1999               | 122                    |
|                | c2         | 118            | 128           |                    |                        |
| C1             | h1         | 137            | 77            | 13701              | 505                    |
|                | w          | 20             | 25            |                    |                        |
| C2             | h2         | 169            | 88            | 1816               | 73                     |
|                | w          | 20             | 25            |                    |                        |
| H2             | c2         | 175            | 265           | 17649              | 401                    |
|                | St         | 400            | 400           |                    |                        |

## Consumo de servicios actuales

|                 |          |
|-----------------|----------|
| Calentamiento = | 17649 kW |
| Enfriamiento =  | 15526 kW |

## Area de transferencia existente

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| Proceso-proceso = | 2308 m <sup>2</sup> |
| Balanceada =      | 3286 m <sup>2</sup> |

Tabla C2.2 Requerimientos energéticos mínimos y valores de k para z = 1 del Caso 4.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$<br>k | $Q_{cmin}$<br>(kW) | $Q_{h min}$<br>(kW) |
|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|
| 5                        | 1.0004       | 7578               | 9665                |
| 10                       | 2.0007       | 8558               | 10646               |
| 15                       | 3.0011       | 9539               | 11626               |
| 20                       | 3.7635       | 10519              | 12606               |
| 25                       | 4.2978       | 11500              | 13587               |
| 30                       | 4.8320       | 12480              | 14567               |
| 35                       | 5.5187       | 13741              | 15828               |
| 40                       | 6.3071       | 15188              | 17275               |
| 42                       | 6.5156       | 15526              | 17649               |

Tabla C2.3 Area mínima de transferencia proceso-proceso y balanceada predicha por la fórmula Bath diversa modificada (propuesta por Serna) para el Caso 4.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area mínima<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) | Area mínima<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 8134  | 8734   |
| 10                       | 6001  | 6661   |
| 15                       | 4845  | 5564   |
| 20                       | 4073  | 4849   |
| 25                       | 3493  | 4324   |
| 30                       | 3034  | 3917   |
| 35                       | 2562  | 3511   |
| 40                       | 2133  | 3154   |
| 42                       | 2035  | 3074   |

Tabla C2.4 Eficiencia inicial de la red respecto al área proceso-proceso y balanceada del Caso 4.2.

|                 | $\alpha$ |
|-----------------|----------|
| Proceso-proceso | 0.882    |
| Balanceada      | 0.936    |

Tabla C2.5 Area de reajuste proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area de reajuste<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Area de reajuste<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 9336  | 9223   |
| 10                       | 7120  | 6804   |
| 15                       | 5947  | 5493   |
| 20                       | 5182  | 4618   |
| 25                       | 4621  | 3961   |
| 30                       | 4187  | 3440   |
| 35                       | 3752  | 2905   |
| 40                       | 3371  | 2419   |

Tabla C2.6 Area adicional proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area adicional<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Area adicional<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 6050  | 6916   |
| 10                       | 3834  | 4496   |
| 15                       | 2661  | 3186   |
| 20                       | 1896  | 2310   |
| 25                       | 1335  | 1653   |
| 30                       | 901   | 1133   |
| 35                       | 466   | 598  |
| 40                       | 85  | 111  |

Tabla C2.7 Ahorro potencial e Inversión adicional para el área proceso-proceso y balanceada del Caso 4.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Ahorro Potencial<br>(miles \$) | Inversión adicional (miles \$) |            |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|
|                          |                                | proceso-proceso                | balanceada |
| 5                        | 958                            | 1185                           | 1063       |
| 10                       | 840                            | 838                            | 738        |
| 15                       | 722                            | 637                            | 553        |
| 20                       | 605                            | 495                            | 425        |
| 25                       | 487                            | 383                            | 325        |
| 30                       | 369                            | 288                            | 243        |
| 35                       | 218                            | 182                            | 154        |
| 40                       | 45                             | 68                             | 61         |



| $\Delta T$ | $\frac{dt}{d\Delta T}$ | $\frac{dt}{d\Delta T}$ |
|------------|------------------------|------------------------|
| 25         | 0.67                   | 0.79                   |
| 30         | 0.66                   | 0.78                   |
| 35         | 0.71                   | 0.83                   |
| 40         | 1.36                   | 1.53                   |

$$\text{Ahorro} = a + b \cdot \Delta T \quad a = 1084983 \quad y \quad b = -24250.96$$

$$\text{Inversion} = e^{c+d \cdot \Delta T}$$

Tabla C2.9 Valores de la ordenada al origen  $c$  y de la pendiente  $d$  para el Caso 4.2.

| Proceso-Proceso |         | Balanceada |         |
|-----------------|---------|------------|---------|
| $c$             | $d$     | $c$        | $d$     |
| 14.27           | -0.0590 | 14.17      | -0.0611 |

$$\frac{dt_{\text{RECUPERACION}}}{d\Delta T} = \frac{e^{c+d \cdot \Delta T} [d(a + b \cdot \Delta T) - b]}{(a + b \cdot \Delta T)^2} = 0 \quad \text{en} \quad \Delta T \approx 28^\circ C$$

Tabla C2.10 Evaluación de la primera derivada del tiempo de recuperación con respecto al  $\Delta T$  para el Caso 4.2.

| $\Delta T$<br>(°C) | $\frac{dt}{d\Delta T}$<br>Proceso-Proceso | $\frac{dt}{d\Delta T}$<br>Balanceada |
|--------------------|---|--------------------------------------|
| 25                 | -0.006                                    | -0.007                               |
| 30                 | 0.007                                     | 0.004                                |

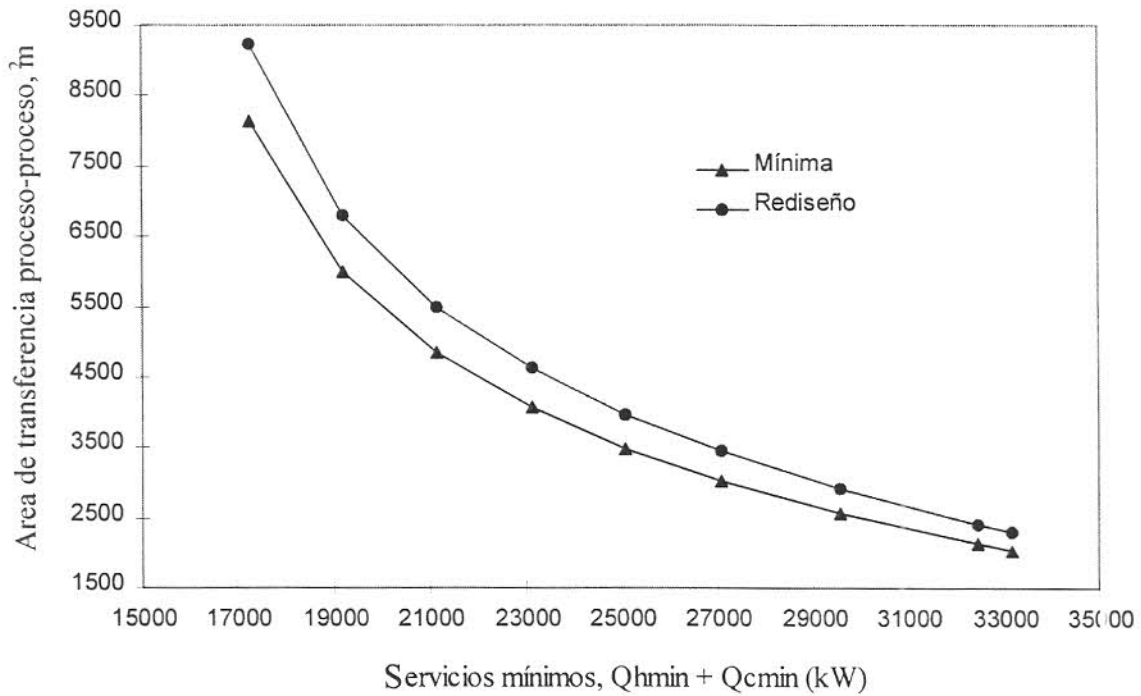


Figura C2.2 Area mínima y de rediseño proceso-proceso considerando la eficiencia constante para el Caso 4.2.

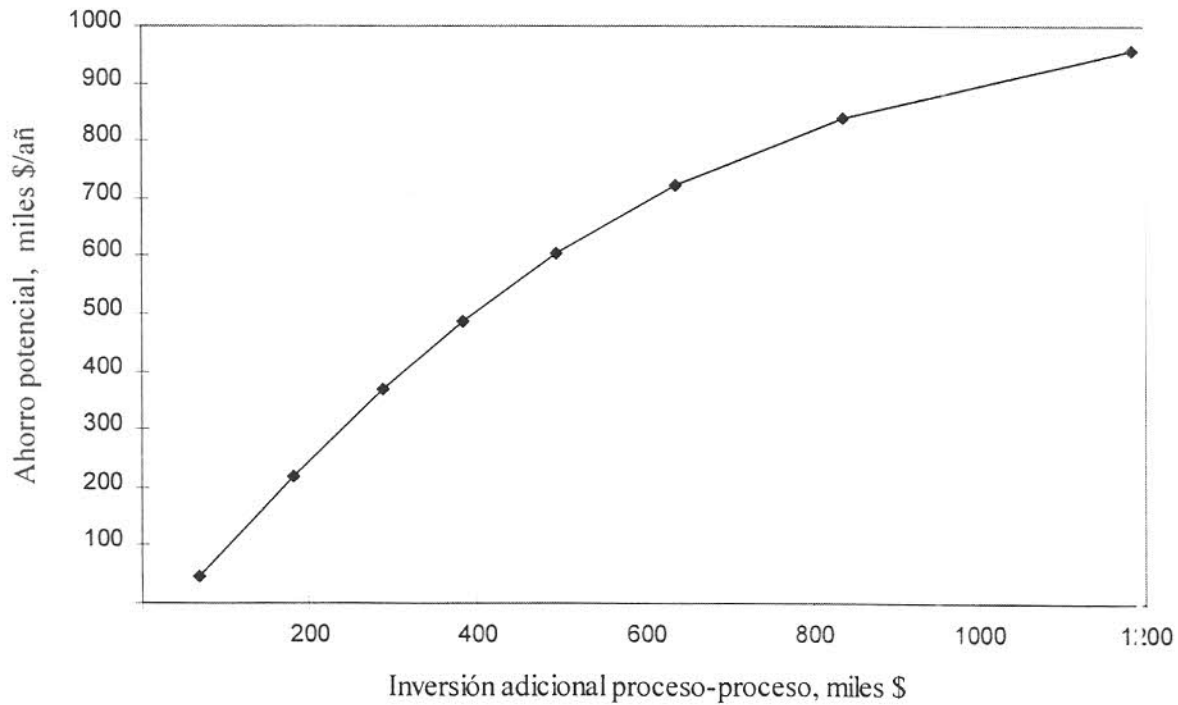


Figura C2.3 Ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso para el Caso 4.2.

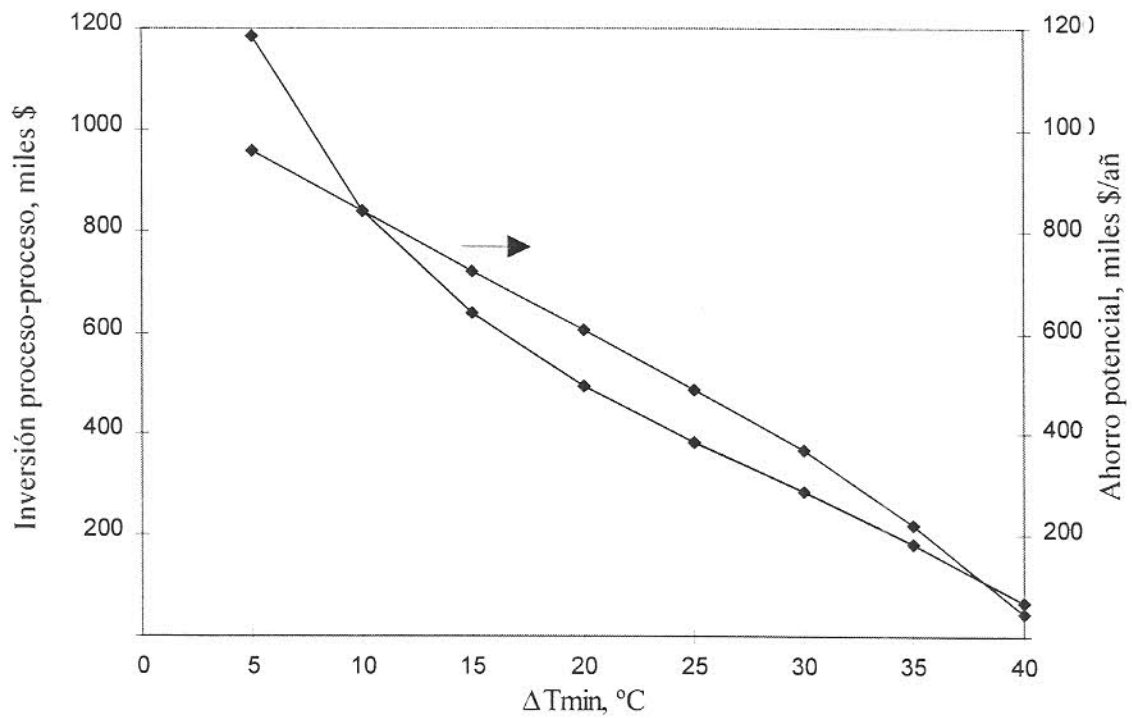


Figura C2.4 Ahorro potencial e inversión adicional de equipo proceso-proceso en función  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.2.

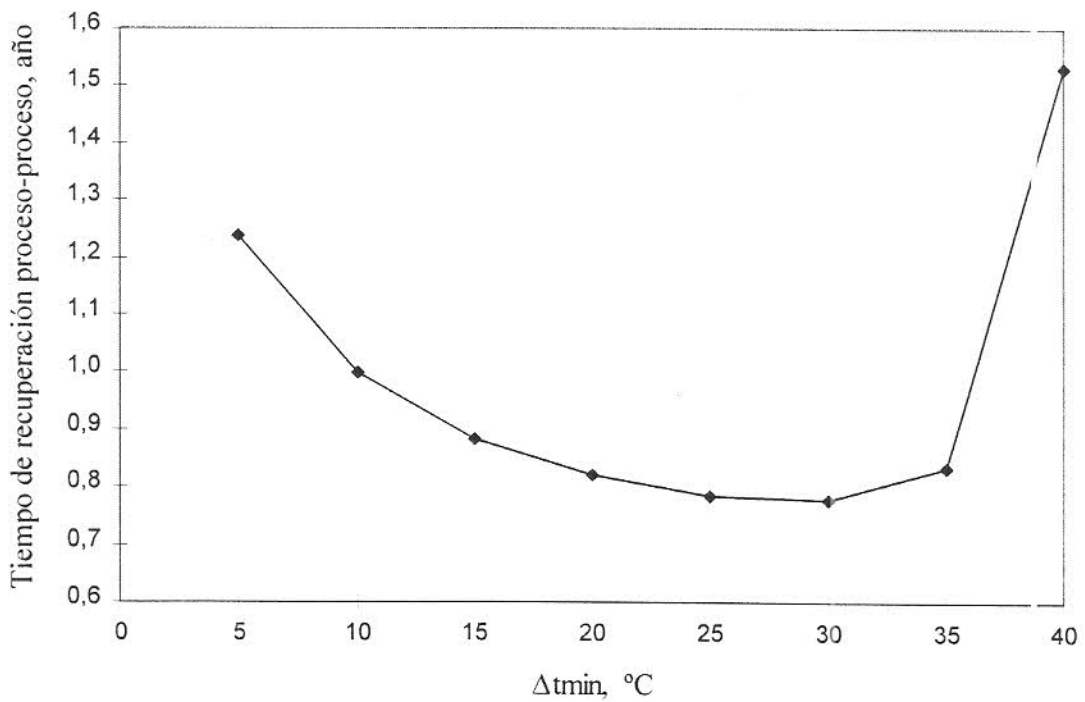


Figura C2.5 Tiempo de recuperación de la inversión del equipo proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.2.

## C.2 Caso de estudio 4.3

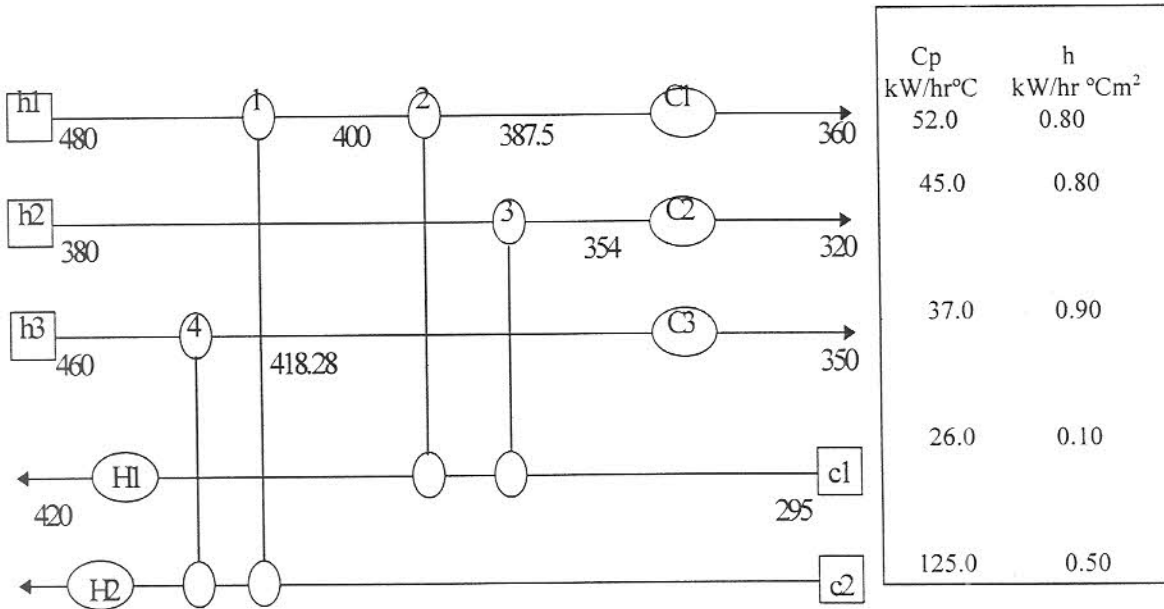


Figura C3.1 Diagrama de rejilla de la red existente, caso de estudio 4.3.

Tabla C3.1 Datos de los intercambiadores de la red existente (Caso 4.3), área de transferencia, carga térmica, temperaturas de entrada y salida de las corrientes.

| Intercambiador | Corrientes | T entrada (°C) | T salida (°C) | Carga térmica (kW) | Area (m <sup>2</sup> ) |
|----------------|------------|----------------|---------------|--------------------|------------------------|
| 1              | h1         | 480.0          | 400.0         | 4160               | 191                    |
|                | c2         | 350.0          | 383.3         |                    |                        |
| 2              | h1         | 400.0          | 387.5         | 650                | 179                    |
|                | c1         | 340.0          | 365.0         |                    |                        |
| 3              | h2         | 380.0          | 354.0         | 1170               | 269                    |
|                | c1         | 295.0          | 340.0         |                    |                        |
| 4              | h3         | 460.0          | 418.3         | 1453               | 100                    |
|                | c2         | 383.3          | 395.6         |                    |                        |
| C1             | h1         | 387.5          | 360.0         | 1430               | 16                     |
|                | w          | 25.0           | 45.0          |                    |                        |
| C2             | h2         | 354.0          | 320.0         | 1530               | 19                     |
|                | w          | 25.0           | 45.0          |                    |                        |
| C3             | h3         | 418.3          | 350.0         | 2527               | 27                     |
|                | w          | 25.0           | 45.0          |                    |                        |
| H1             | c1         | 365.0          | 420.0         | 1430               | 108                    |
|                | St         | 540.0          | 540.0         |                    |                        |
| H2             | c2         | 395.6          | 430.0         | 4306               | 102                    |
|                | St         | 540.0          | 540.0         |                    |                        |

## Consumo de servicios actuales

|                 |         |
|-----------------|---------|
| Calentamiento = | 5736 kW |
| Enfriamiento =  | 5487 kW |

## Area de transferencia existente

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| Proceso-proceso = | 739 m <sup>2</sup>  |
| Balanceada =      | 1010 m <sup>2</sup> |

Tabla C3.2 Requerimientos energéticos mínimos y valores de k para z = 1 del Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$<br>k | $Q_{cmin}$<br>(kW) | $Q_{h min}$<br>(kW) |
|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|
| 5                        | 0.8735       | 330                | 570                 |
| 10                       | 1.7471       | 740                | 980                 |
| 15                       | 3.1487       | 1410               | 1650                |
| 20                       | 4.1983       | 2080               | 2320                |
| 25                       | 5.2478       | 2750               | 2990                |
| 30                       | 6.2974       | 3420               | 3660                |
| 35                       | 7.0268       | 3865               | 4105                |
| 40                       | 8.0028       | 4310               | 4550                |
| 53.3                     | 11.6728      | 5487.0             | 5736.3              |

Tabla C3.3 Area mínima de transferencia proceso-proceso y balanceada predicha por la fórmula Bath diversa modificada (propuesta por Serna) para el Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area mínima<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) | Area mínima<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 4021  | 4043   |
| 10                       | 2914  | 2965   |
| 15                       | 2053  | 2150   |
| 20                       | 1555  | 1690   |
| 25                       | 1221  | 1393   |
| 30                       | 978   | 1185   |
| 35                       | 849   | 1080   |
| 40                       | 739   | 993  |
| 53.3                     | 498   | 817  |

Tabla C3.4 Eficiencia inicial de la red respecto al área proceso-proceso y balanceada del Caso 4.3.

|                 | $\alpha$ |
|-----------------|----------|
| Proceso-proceso | 0.674    |
| Balanceada      | 0.809    |

Tabla C3.5 Area de reajuste proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area de reajuste<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Area de reajuste<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 4997  | 5965   |
| 10                       | 3665  | 4323   |
| 15                       | 2657  | 3046   |
| 20                       | 2089  | 2307   |
| 25                       | 1722  | 1811   |
| 30                       | 1465  | 1450   |
| 35                       | 1335  | 1259   |
| 40                       | 1228  | 1096   |

Tabla C3.6 Area adicional proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area adicional<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Area adicional<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 3988  | 5227   |
| 10                       | 2656  | 3585   |
| 15                       | 1648  | 2308   |
| 20                       | 1080  | 1568   |
| 25                       | 713   | 1073   |
| 30                       | 456   | 712  |
| 35                       | 325   | 521  |
| 40                       | 218   | 357  |

Tabla C3.7 Ahorro potencial e Inversión adicional para el área proceso-proceso y balanceada del Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Ahorro Potencial<br>(miles \$) | Inversión adicional (miles \$) |            |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|
|                          |                                | proceso-proceso                | balanceada |
| 5                        | 620                            | 945                            | 761        |
| 10                       | 571                            | 700                            | 552        |
| 15                       | 490                            | 495                            | 382        |
| 20                       | 410                            | 367                            | 278        |
| 25                       | 329                            | 277                            | 206        |
| 30                       | 249                            | 206                            | 152        |
| 35                       | 196                            | 166                            | 122        |
| 40                       | 142                            | 129                            | 96         |

Tabla C3.8 Tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso y balanceada del Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Tiempo de recuperación (años) |                 |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|
|                          | Balanceada                    | Proceso-proceso |
| 5                        | 1.23                          | 1.53            |
| 10                       | 0.97                          | 1.23            |
| 15                       | 0.79                          | 1.01            |
| 20                       | 0.68                          | 0.90            |
| 25                       | 0.63                          | 0.84            |
| 30                       | 0.61                          | 0.83            |
| 35                       | 0.62                          | 0.85            |
| 40                       | 0.68                          | 0.91            |

$$Ahorro = a + b \cdot \Delta T \quad a = 698494 \quad y \quad b = -14339$$

$$Inversion = e^{c+d \cdot \Delta T}$$

Tabla C3.9 Valores de la ordenada al origen  $c$  y de la pendiente  $d$  para el Caso 4.3.

| Proceso-Proceso |        | Balanceada |        |
|-----------------|--------|------------|--------|
| $c$             | $d$    | $c$        | $d$    |
| 13.99           | -0.057 | 13.78      | -0.060 |

$$\frac{dt_{RECUPERACION}}{d\Delta T} = \frac{e^{c+d \cdot \Delta T} [d(a + b \cdot \Delta T) - b]}{(a + b \cdot \Delta T)^2} = 0 \quad \text{en} \quad \Delta T \approx 31.5^\circ C$$

Tabla C3.10 Evaluación de la primera derivada del tiempo de recuperación con respecto al  $\Delta T$  para el Caso 4.3.

| $\Delta T$<br>(°C) | $dt/d \Delta T$<br>Proceso-Proceso | $dt/d \Delta T$<br>Balanceada |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 30                 | -0.003                             | -0.004                        |
| 35                 | 0.013                              | 0.008                         |

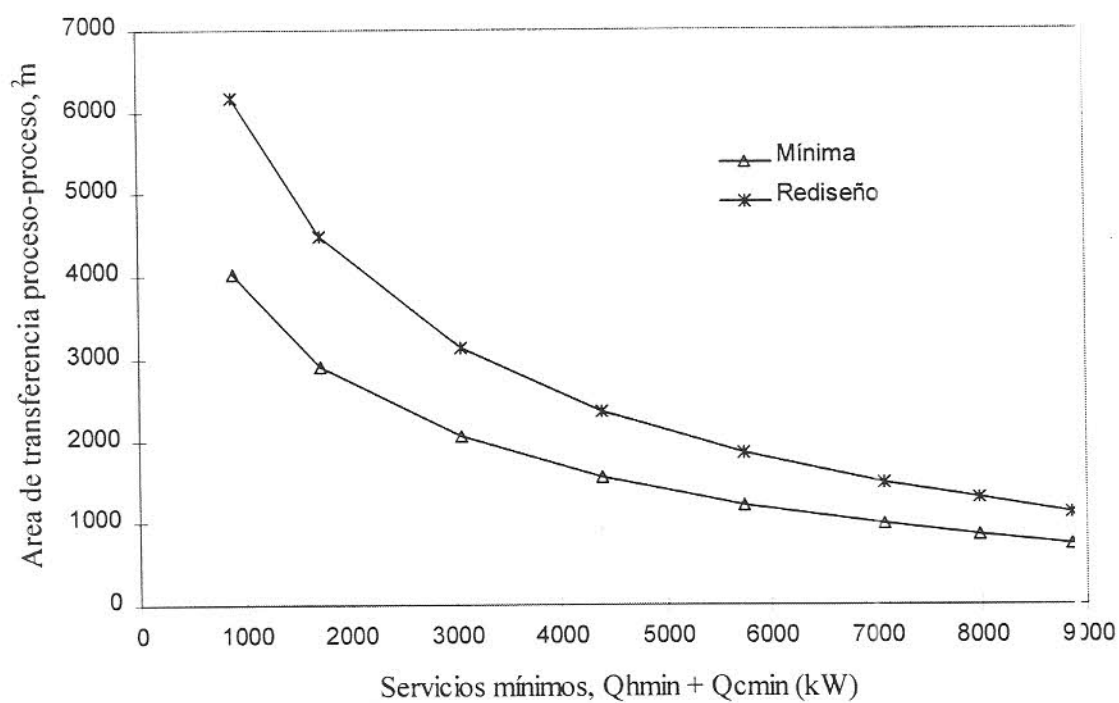


Figura C3.2 Area mínima y de rediseño proceso-proceso considerando la eficiencia constante para el Caso 4.3.

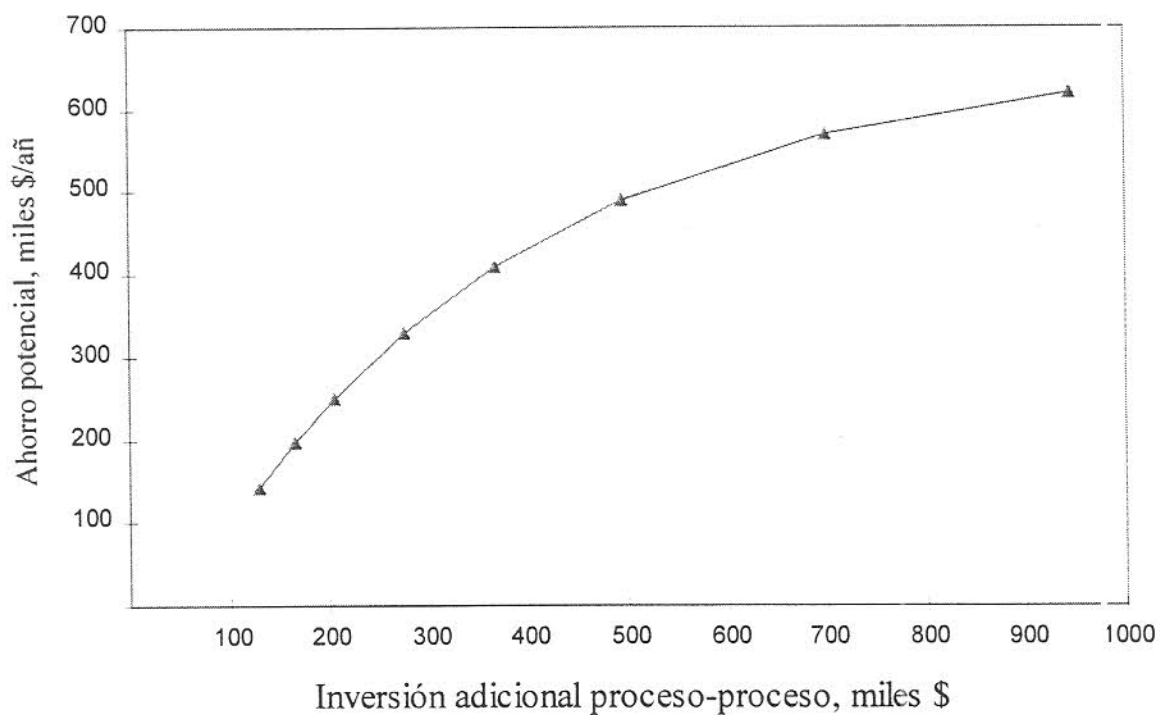


Figura C3.3 Ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso para el Caso 4.3.



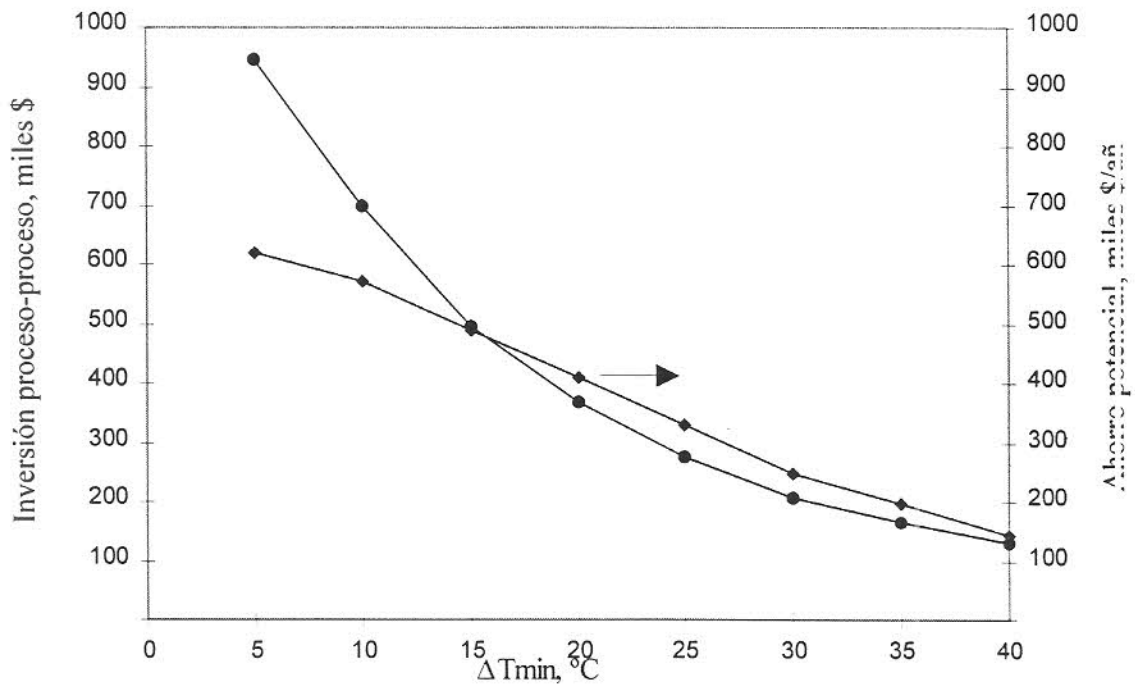


Figura C3.4 Ahorro potencial e inversión adicional de equipo proceso-proceso en función  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.3.

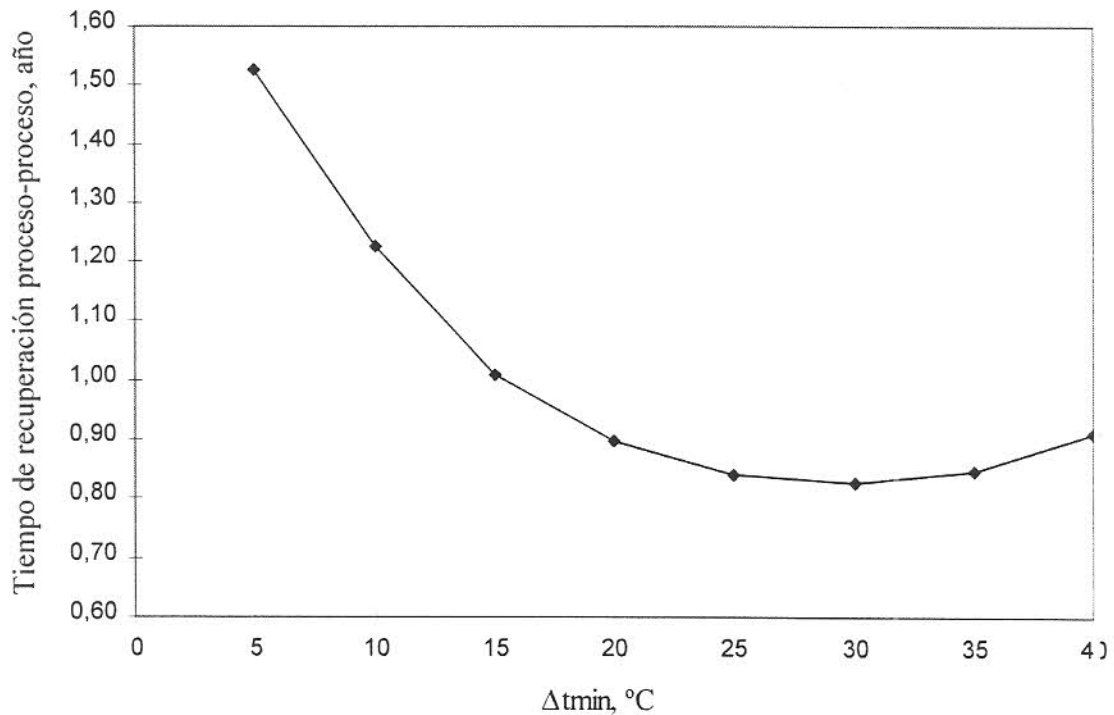


Figura C3.5 Tiempo de recuperación de la inversión del equipo proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.3.

**C.3 Caso de estudio 4.4**

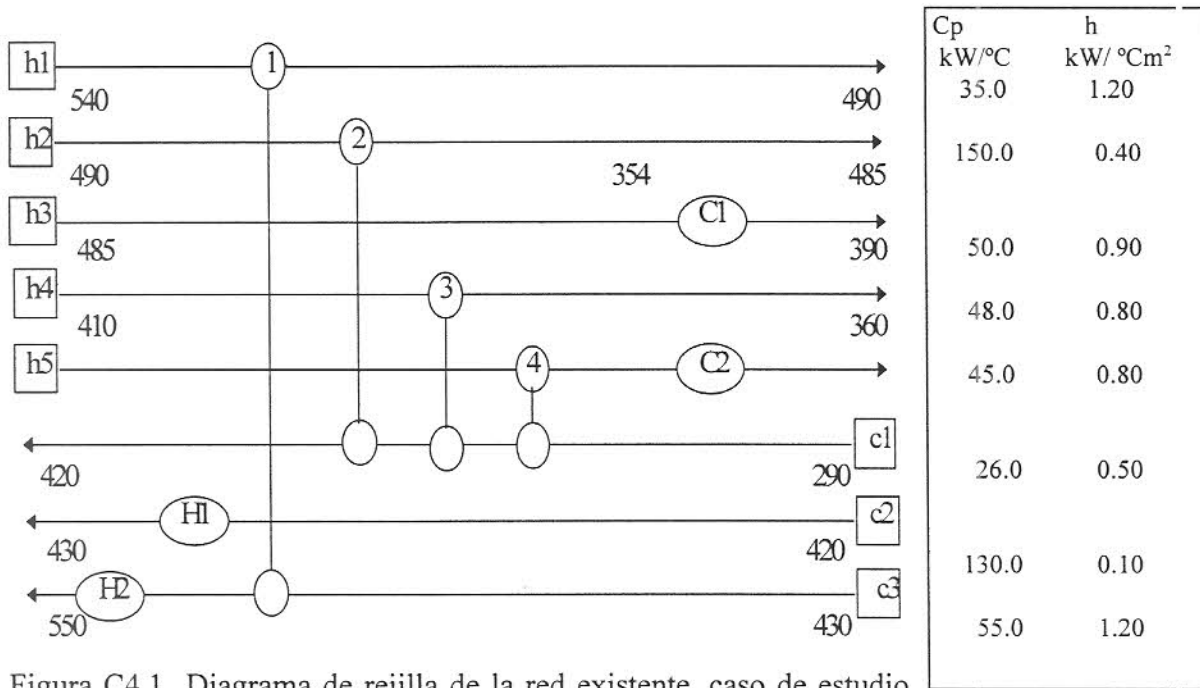


Figura C4.1 Diagrama de rejilla de la red existente, caso de estudio 4.4.

Tabla C4.1 Datos de los intercambiadores de la red existente (Caso 4.4), área de transferencia, carga térmica, temperaturas de entrada y salida de las corrientes.

| <i>Intercambiador</i> | <i>Corrientes</i> | <i>T entrada</i><br>°C | <i>Tsalida</i><br>°C | <i>Carga térmica</i><br>kW | <i>Area</i><br>m <sup>2</sup> |
|-----------------------|-------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1                     | h1                | 540.0                  | 490.0                | 1750                       | 43                            |
|                       | c3                | 430.0                  | 550.0                |                            |                               |
| 2                     | h2                | 490.0                  | 485.0                | 750                        | 42                            |
|                       | c1                | 391.1                  | 420.0                |                            |                               |
| 3                     | h4                | 410.0                  | 360.0                | 2400                       | 217                           |
|                       | c1                | 298.8                  | 391.1                |                            |                               |
| 4                     | h5                | 360.0                  | 354.9                | 230                        | 12                            |
|                       | c1                | 290.0                  | 298.8                |                            |                               |
| C1                    | h3                | 485.0                  | 390.0                | 4750                       | 68                            |
|                       | w                 | 300.0                  | 320.0                |                            |                               |
| C2                    | h5                | 354.9                  | 320.0                | 1570                       | 113                           |
|                       | w                 | 300.0                  | 320.0                |                            |                               |
| H1                    | c2                | 420.0                  | 430.0                | 1300                       | 68                            |
|                       | st                | 620.0                  | 620.0                |                            |                               |
| H2                    | c3                | 462.0                  | 550.0                | 4850                       | 49                            |
|                       | St                | 620.0                  | 620.0                |                            |                               |

## Apéndice C

## Consumo de servicios actuales

|                 |         |
|-----------------|---------|
| Calentamiento = | 6150 kW |
| Enfriamiento =  | 6320 kW |

## Area de transferencia existente

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Proceso-proceso = | 313 m <sup>2</sup> |
| Balanceada =      | 610 m <sup>2</sup> |

Tabla C4.2 Requerimientos energéticos mínimos y valores de k para z = 1 del Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$<br>k | $Q_{cmin}$<br>(kW) | $Q_{h min}$<br>(kW) |
|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|
| 5                        | 0.4500       | 2570               | 2400                |
| 10                       | 0.9000       | 2820               | 2650                |
| 15                       | 2.5714       | 3070               | 2900                |
| 20                       | 5.1429       | 3320               | 3150                |
| 25                       | 5.4058       | 3570               | 3400                |
| 30                       | 5.5495       | 3820               | 3650                |
| 35                       | 7.0244       | 4070               | 3900                |
| 40                       | 9.0244       | 4320               | 4150                |
| 45                       | 11.4146      | 4570               | 4400                |
| 50                       | 13.6098      | 4820               | 4650                |
| 55                       | 15.6785      | 5070               | 4900                |
| 60                       | 16.7613      | 5320               | 5150                |
| 65                       | 18.5017      | 5670               | 5500                |
| 70                       | 23.5976      | 6320               | 6150                |

Tabla C4.3 Area mínima de transferencia proceso-proceso y balanceada predicha por la fórmula Bath diversa modificada (propuesta por Serna) para el Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area mínima<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) | Area mínima<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 2071  | 2246   |
| 10                       | 1420  | 1602   |
| 15                       | 1092  | 1283   |
| 20                       | 880   | 1082   |
| 25                       | 732   | 942  |
| 30                       | 634   | 851  |
| 35                       | 518   | 770  |
| 40                       | 404   | 693  |
| 45                       | 347   | 639  |
| 50                       | 302   | 598  |
| 55                       | 265   | 565  |
| 60                       | 234   | 539  |
| 65                       | 200   | 511  |
| 70                       | 154   | 475  |

Tabla C4.4 Eficiencia inicial de la red respecto al área proceso-proceso y balanceada del Caso 4.4.

|                 | $\alpha$ |
|-----------------|----------|
| Proceso-proceso | 0.492    |
| Balanceada      | 0.777    |

Tabla C4.5 Área de reajuste proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Área de reajuste<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Área de reajuste<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 2889  | 4207   |
| 10                       | 2061  | 2885   |
| 15                       | 1650  | 2218   |
| 20                       | 1392  | 1787   |
| 25                       | 1212  | 1487   |
| 30                       | 1094  | 1289   |
| 35                       | 991   | 1051   |
| 40                       | 891   | 820  |
| 45                       | 822   | 704  |
| 50                       | 769   | 613  |
| 55                       | 727   | 539  |
| 60                       | 694   | 476  |
| 65                       | 657   | 407  |
| 70                       | 611   | 313  |

Tabla C4.6 Área adicional proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Área adicional<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Área adicional<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 2279  | 3894   |
| 10                       | 1451  | 2572   |
| 15                       | 1040  | 1905   |
| 20                       | 782   | 1474   |
| 25                       | 601   | 1174   |
| 30                       | 484   | 976  |
| 35                       | 381   | 738  |
| 40                       | 281   | 507  |
| 45                       | 212   | 391  |
| 50                       | 159   | 300  |
| 55                       | 117   | 226  |
| 60                       | 83  | 163  |
| 65                       | 47  | 94   |

Tabla C4.7 Ahorro potencial e Inversión adicional para el área proceso-proceso y balanceada del Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Ahorro Potencial<br>(miles \$) | Inversión adicional (miles \$) |            |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|
|                          |                                | proceso-proceso                | balanceada |
| 5                        | 450                            | 747                            | 490        |
| 10                       | 420                            | 539                            | 346        |
| 15                       | 390                            | 426                            | 270        |
| 20                       | 360                            | 351                            | 220        |
| 25                       | 330                            | 296                            | 183        |
| 30                       | 300                            | 258                            | 158        |
| 35                       | 270                            | 211                            | 135        |
| 40                       | 240                            | 163                            | 112        |
| 45                       | 210                            | 137                            | 95         |
| 50                       | 180                            | 116                            | 81         |
| 55                       | 150                            | 98                             | 70         |
| 60                       | 120                            | 82                             | 60         |
| 65                       | 78                             | 63                             | 49         |

Tabla C4.8 Tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso y balanceada del Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Tiempo de recuperación (años) |                 |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|
|                          | Balanceada                    | Proceso-proceso |
| 5                        | 1.09                          | 1.66            |
| 10                       | 0.83                          | 1.28            |
| 15                       | 0.69                          | 1.09            |
| 20                       | 0.61                          | 0.97            |
| 25                       | 0.55                          | 0.90            |
| 30                       | 0.53                          | 0.86            |
| 35                       | 0.50                          | 0.78            |
| 40                       | 0.47                          | 0.68            |
| 45                       | 0.45                          | 0.65            |
| 50                       | 0.45                          | 0.65            |
| 55                       | 0.47                          | 0.66            |
| 60                       | 0.50                          | 0.69            |
| 65                       | 0.63                          | 0.81            |

$$Ahorro = a + b \cdot \Delta T \quad a = 481846 \quad y \quad b = -6079$$

$$Inversion = e^{c+d \cdot \Delta T}$$

Tabla C4.9 Valores de la ordenada al origen  $c$  y de la pendiente  $d$  para el Caso 4.2.

| Proceso-Proceso |        | Balanceada |        |
|-----------------|--------|------------|--------|
| $c$             | $d$    | $c$        | $d$    |
| 13.60           | -0.039 | 13.09      | -0.036 |

$$\frac{dt_{\text{RECUPERACION}}}{d\Delta T} = \frac{e^{c+d\cdot\Delta T} [d(a+b\cdot\Delta T)-b]}{(a+b\cdot\Delta T)^2} = 0 \quad \text{en } \Delta T \approx 53^\circ C$$

Tabla C4.10 Evaluación de la primera derivada del tiempo de recuperación con respecto al  $\Delta T$  para el Caso 4.2.

| $\Delta T$<br>(°C) | $dt/d \Delta T$<br><i>Proceso-Proceso</i> | $dt/d \Delta T$<br><i>Balanceada</i> |
|--------------------|---|--------------------------------------|
| 50                 | -0.003                                    | -0.003                               |
| 55                 | 0.001                                     | 0.001                                |

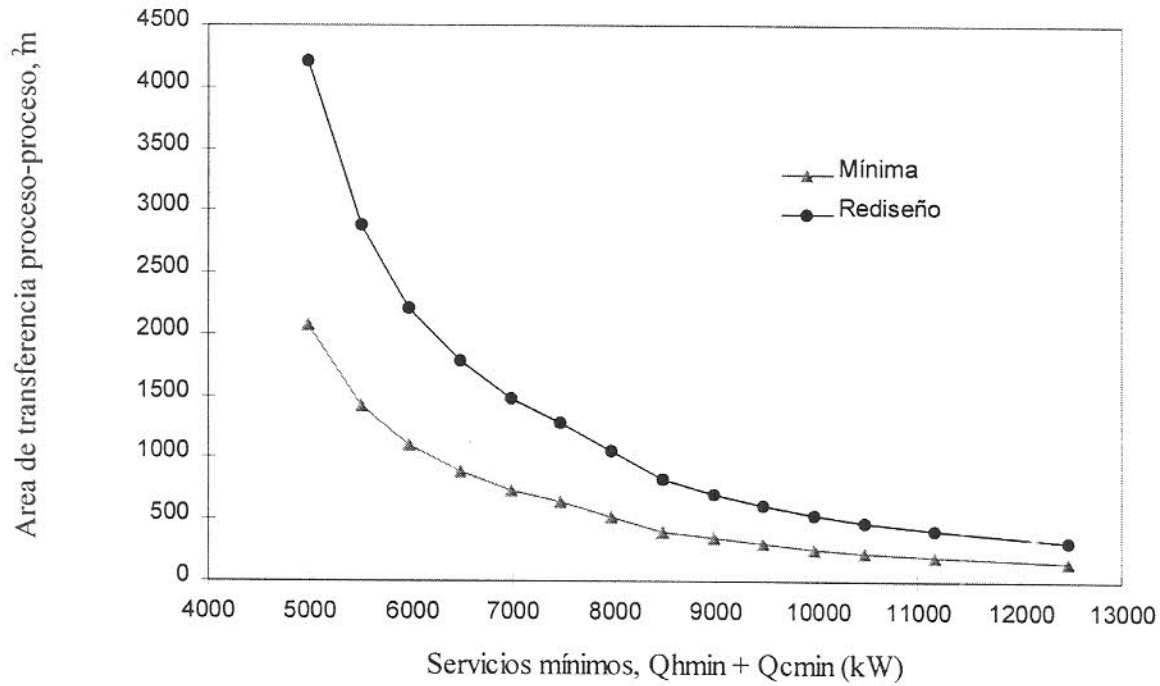


Figura C4.2 Área mínima y de rediseño proceso-proceso considerando la eficiencia constante para el Caso 4.4.

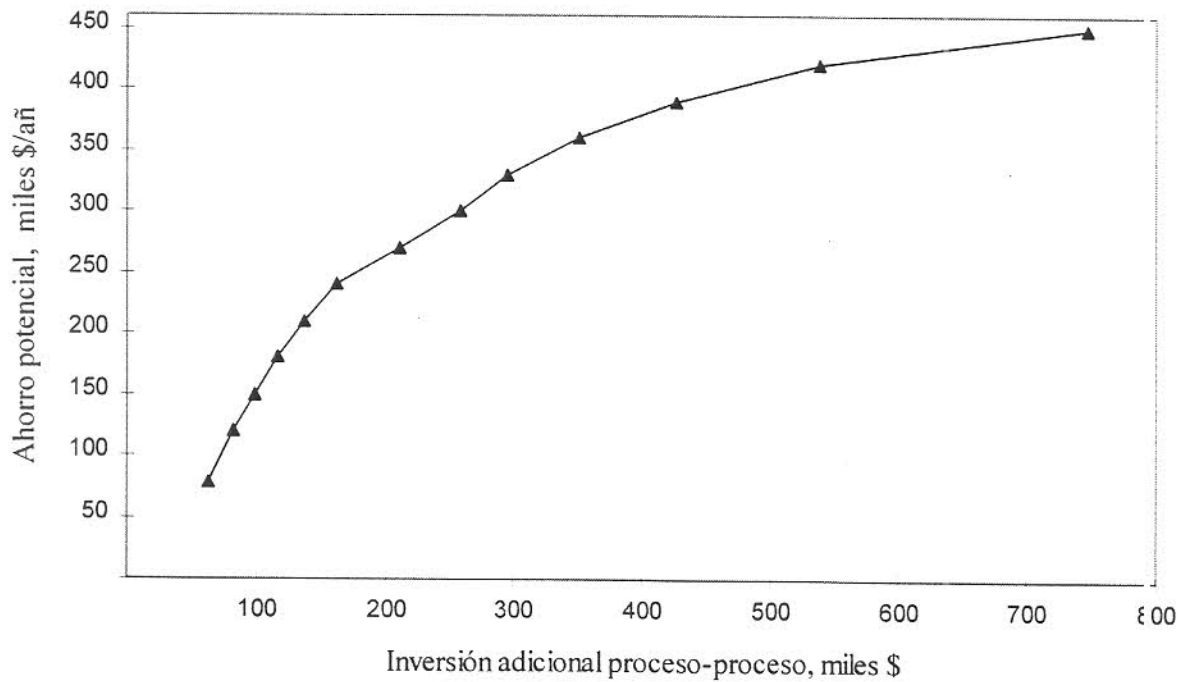


Figura C4.3 Ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso para el Caso 4.4.

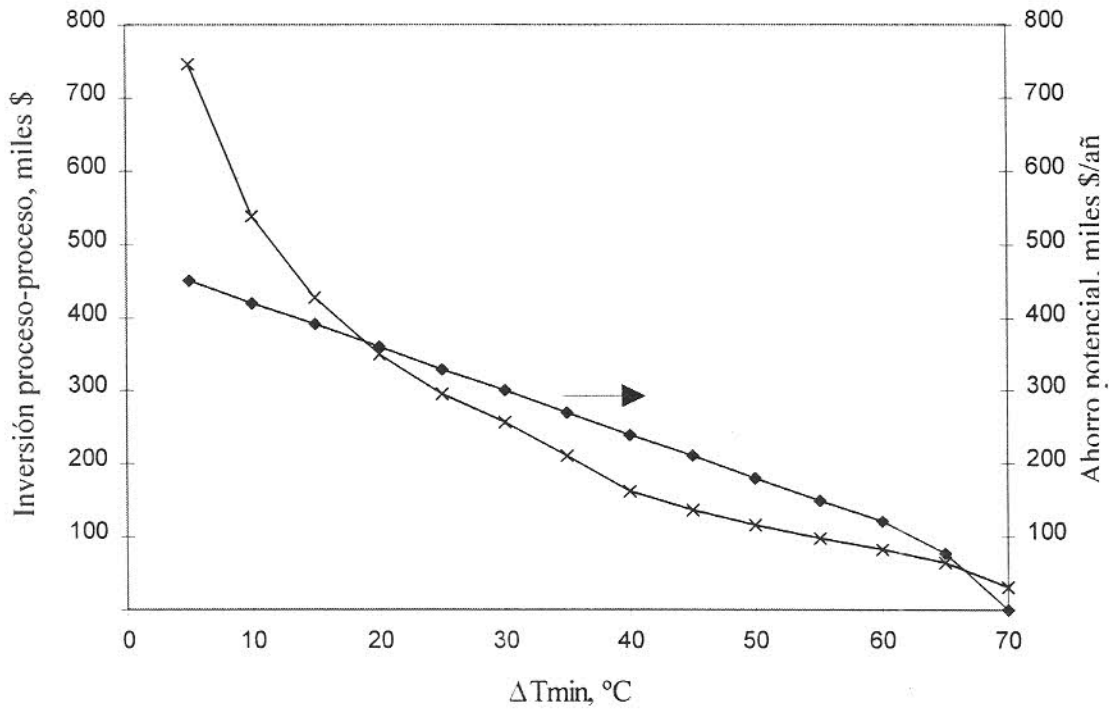


Figura C4.4 Ahorro potencial e inversión adicional de equipo proceso-proceso en función  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.4.

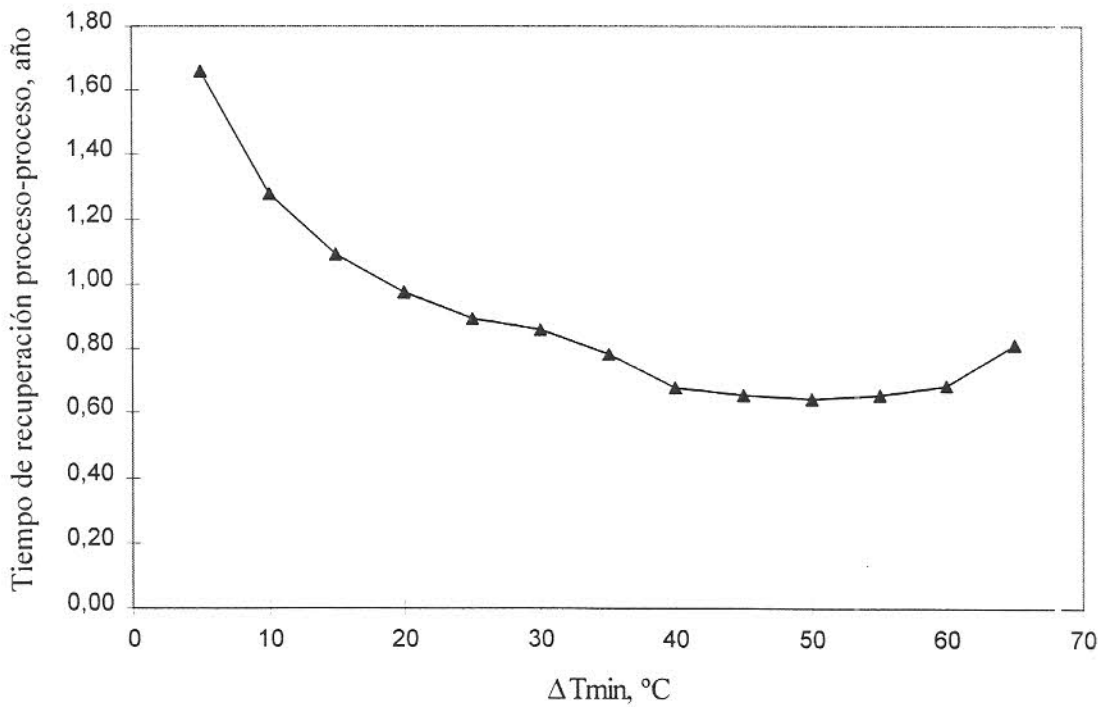


Figura C4.5 Tiempo de recuperación de la inversión del equipo proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.4.



**C.3 Caso de estudio 4.4**

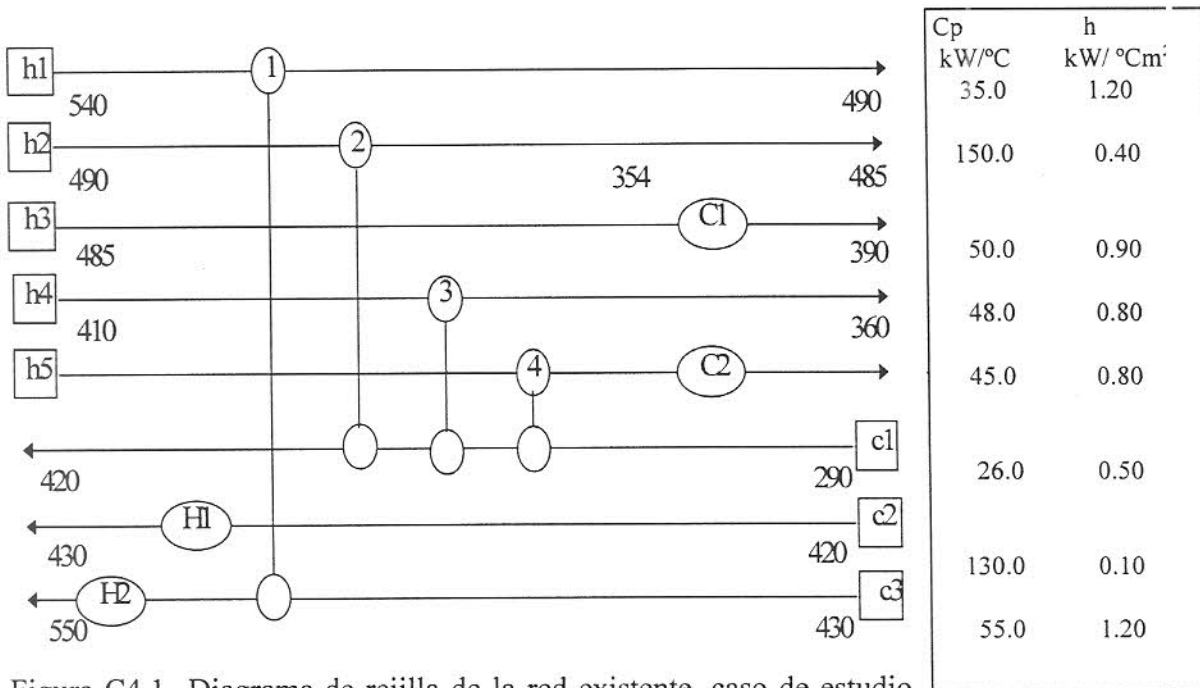


Figura C4.1 Diagrama de rejilla de la red existente, caso de estudio 4.4.

Tabla C4.1 Datos de los intercambiadores de la red existente (Caso 4.4), área de transferencia, carga térmica, temperaturas de entrada y salida de las corrientes.

| Intercambiador | Corrientes | T entrada °C | Tsalida °C | Carga térmica kW | Area m <sup>2</sup> |
|----------------|------------|--------------|------------|------------------|---------------------|
| 1              | h1         | 540.0        | 490.0      | 1750             | 43                  |
|                | c3         | 430.0        | 550.0      |                  |                     |
| 2              | h2         | 490.0        | 485.0      | 750              | 42                  |
|                | c1         | 391.1        | 420.0      |                  |                     |
| 3              | h4         | 410.0        | 360.0      | 2400             | 217                 |
|                | c1         | 298.8        | 391.1      |                  |                     |
| 4              | h5         | 360.0        | 354.9      | 230              | 12                  |
|                | c1         | 290.0        | 298.8      |                  |                     |
| C1             | h3         | 485.0        | 390.0      | 4750             | 68                  |
|                | w          | 300.0        | 320.0      |                  |                     |
| C2             | h5         | 354.9        | 320.0      | 1570             | 113                 |
|                | w          | 300.0        | 320.0      |                  |                     |
| H1             | c2         | 420.0        | 430.0      | 1300             | 68                  |
|                | st         | 620.0        | 620.0      |                  |                     |
| H2             | c3         | 462.0        | 550.0      | 4850             | 49                  |
|                | St         | 620.0        | 620.0      |                  |                     |

## Consumo de servicios actuales

|                 |         |
|-----------------|---------|
| Calentamiento = | 6150 kW |
| Enfriamiento =  | 6320 kW |

## Area de transferencia existente

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Proceso-proceso = | 313 m <sup>2</sup> |
| Balanceada =      | 610 m <sup>2</sup> |

Tabla C4.2 Requerimientos energéticos mínimos y valores de k para z = 1 del Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $z = 1$<br>k | $Q_{cmin}$<br>(kW) | $Q_{h min}$<br>(kW) |
|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|
| 5                        | 0.4500       | 2570               | 2400                |
| 10                       | 0.9000       | 2820               | 2650                |
| 15                       | 2.5714       | 3070               | 2900                |
| 20                       | 5.1429       | 3320               | 3150                |
| 25                       | 5.4058       | 3570               | 3400                |
| 30                       | 5.5495       | 3820               | 3650                |
| 35                       | 7.0244       | 4070               | 3900                |
| 40                       | 9.0244       | 4320               | 4150                |
| 45                       | 11.4146      | 4570               | 4400                |
| 50                       | 13.6098      | 4820               | 4650                |
| 55                       | 15.6785      | 5070               | 4900                |
| 60                       | 16.7613      | 5320               | 5150                |
| 65                       | 18.5017      | 5670               | 5500                |
| 70                       | 23.5976      | 6320               | 6150                |

Tabla C4.3 Area mínima de transferencia proceso-proceso y balanceada predicha por la fórmula Bath diversa modificada (propuesta por Serna) para el Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area mínima<br>Proceso-Proceso<br>(m <sup>2</sup> ) | Area mínima<br>Balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 2071  | 2246   |
| 10                       | 1420  | 1602   |
| 15                       | 1092  | 1283   |
| 20                       | 880   | 1082   |
| 25                       | 732   | 942  |
| 30                       | 634   | 851  |
| 35                       | 518   | 770  |
| 40                       | 404   | 693  |
| 45                       | 347   | 639  |
| 50                       | 302   | 598  |
| 55                       | 265   | 565  |
| 60                       | 234   | 539  |
| 65                       | 200   | 511  |
| 70                       | 154   | 475  |

Tabla C4.4 Eficiencia inicial de la red respecto al área proceso-proceso y balanceada del Caso 4.4.

|                 | $\alpha$ |
|-----------------|----------|
| Proceso-proceso | 0.492    |
| Balanceada      | 0.777    |

Tabla C4.5 Área de reajuste proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Área de reajuste<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Área de reajuste<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 2889  | 4207   |
| 10                       | 2061  | 2885   |
| 15                       | 1650  | 2218   |
| 20                       | 1392  | 1787   |
| 25                       | 1212  | 1487   |
| 30                       | 1094  | 1289   |
| 35                       | 991   | 1051   |
| 40                       | 891   | 820  |
| 45                       | 822   | 704  |
| 50                       | 769   | 613  |
| 55                       | 727   | 539  |
| 60                       | 694   | 476  |
| 65                       | 657   | 407  |
| 70                       | 611   | 313  |

Tabla C4.6 Área adicional proceso-proceso y balanceada predicha manteniendo la correspondiente eficiencia de la red constante para el Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Área adicional<br>balanceada<br>(m <sup>2</sup> ) | Área adicional<br>proceso-proceso<br>(m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 2279  | 3894   |
| 10                       | 1451  | 2572   |
| 15                       | 1040  | 1905   |
| 20                       | 782   | 1474   |
| 25                       | 601   | 1174   |
| 30                       | 484   | 976  |
| 35                       | 381   | 738  |
| 40                       | 281   | 507  |
| 45                       | 212   | 391  |
| 50                       | 159   | 300  |
| 55                       | 117   | 226  |
| 60                       | 83  | 163  |
| 65                       | 47  | 94   |

Tabla C4.7 Ahorro potencial e Inversión adicional para el área proceso-proceso y balanceada del Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Ahorro Potencial<br>(miles \$) | Inversión adicional (miles \$) |            |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|
|                          |                                | proceso-proceso                | balanceada |
| 5                        | 450                            | 747                            | 490        |
| 10                       | 420                            | 539                            | 346        |
| 15                       | 390                            | 426                            | 270        |
| 20                       | 360                            | 351                            | 220        |
| 25                       | 330                            | 296                            | 183        |
| 30                       | 300                            | 258                            | 158        |
| 35                       | 270                            | 211                            | 135        |
| 40                       | 240                            | 163                            | 112        |
| 45                       | 210                            | 137                            | 95         |
| 50                       | 180                            | 116                            | 81         |
| 55                       | 150                            | 98                             | 70         |
| 60                       | 120                            | 82                             | 60         |
| 65                       | 78                             | 63                             | 49         |

Tabla C4.8 Tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso y balanceada del Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Tiempo de recuperación (años) |                 |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|
|                          | Balanceada                    | Proceso-proceso |
| 5                        | 1.09                          | 1.66            |
| 10                       | 0.83                          | 1.28            |
| 15                       | 0.69                          | 1.09            |
| 20                       | 0.61                          | 0.97            |
| 25                       | 0.55                          | 0.90            |
| 30                       | 0.53                          | 0.86            |
| 35                       | 0.50                          | 0.78            |
| 40                       | 0.47                          | 0.68            |
| 45                       | 0.45                          | 0.65            |
| 50                       | 0.45                          | 0.65            |
| 55                       | 0.47                          | 0.66            |
| 60                       | 0.50                          | 0.69            |
| 65                       | 0.63                          | 0.81            |

$$Ahorro = a + b \cdot \Delta T \quad a = 481846 \quad y \quad b = -6079$$

$$Inversion = e^{c+d \cdot \Delta T}$$

Tabla C4.9 Valores de la ordenada al origen  $c$  y de la pendiente  $d$  para el Caso 4.2.

| Proceso-Proceso |        | Balanceada |        |
|-----------------|--------|------------|--------|
| $c$             | $d$    | $c$        | $d$    |
| 13.60           | -0.039 | 13.09      | -0.036 |

$$\frac{dt_{\text{RECUPERACION}}}{d\Delta T} = \frac{e^{c+d\cdot\Delta T} [d(a+b\cdot\Delta T) - b]}{(a+b\cdot\Delta T)^2} = 0 \quad \text{en } \Delta T \approx 53^\circ\text{C}$$

Tabla C4.10 Evaluación de la primera derivada del tiempo de recuperación con respecto a  $\Delta T$  para el Caso 4.2.

| $\Delta T$<br>(°C) | $dt/d \Delta T$<br><i>Proceso-Proceso</i> | $dt/d \Delta T$<br><i>Balanceda</i> |
|--------------------|---|-------------------------------------|
| 50                 | -0.003                                    | -0.003                              |
| 55                 | 0.001                                     | 0.001                               |

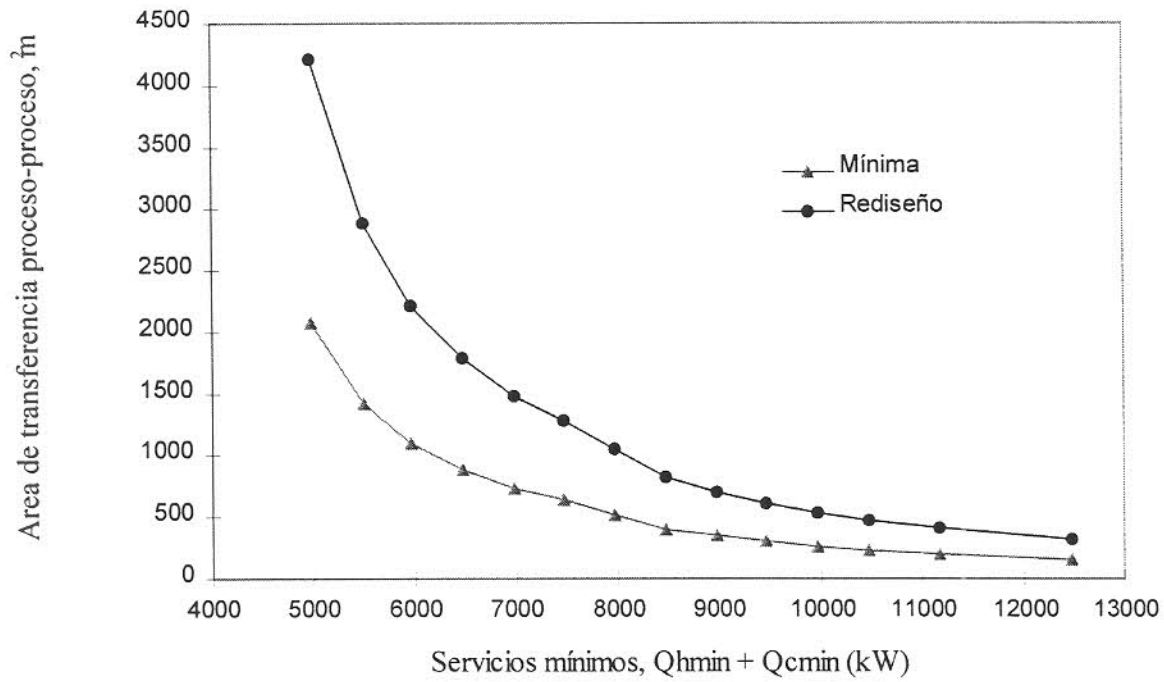


Figura C4.2 Área mínima y de rediseño proceso-proceso considerando la eficiencia constante para el Caso 4.4.

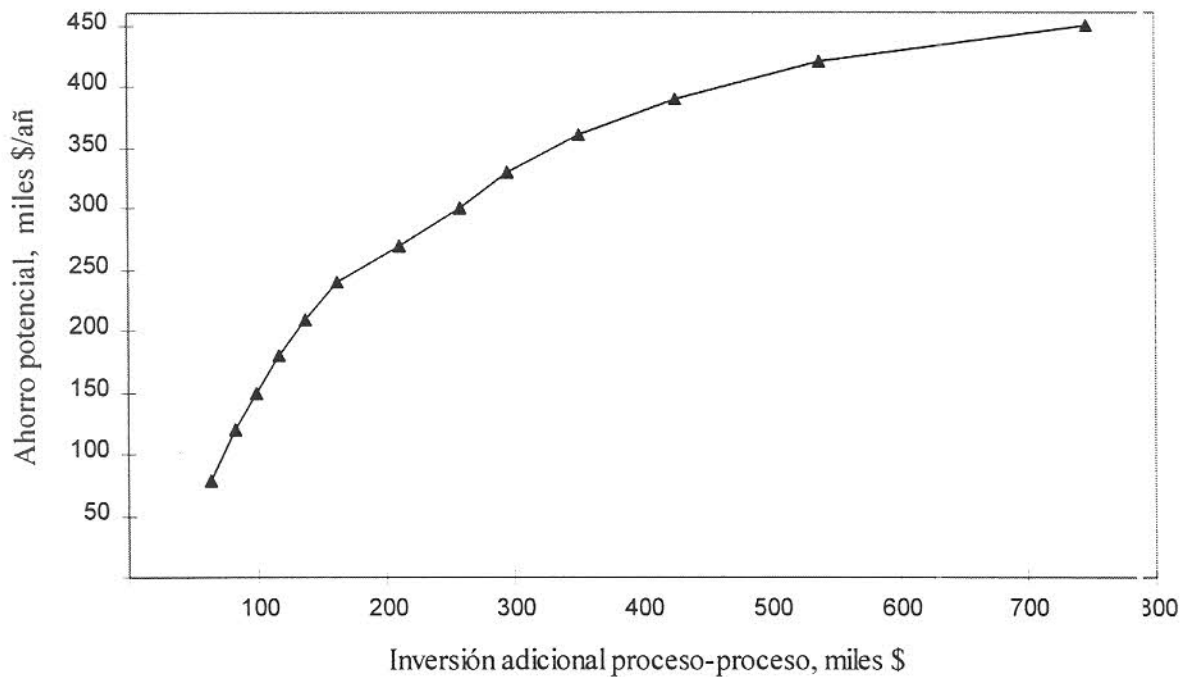


Figura C4.3 Ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso para el Caso 4.4.

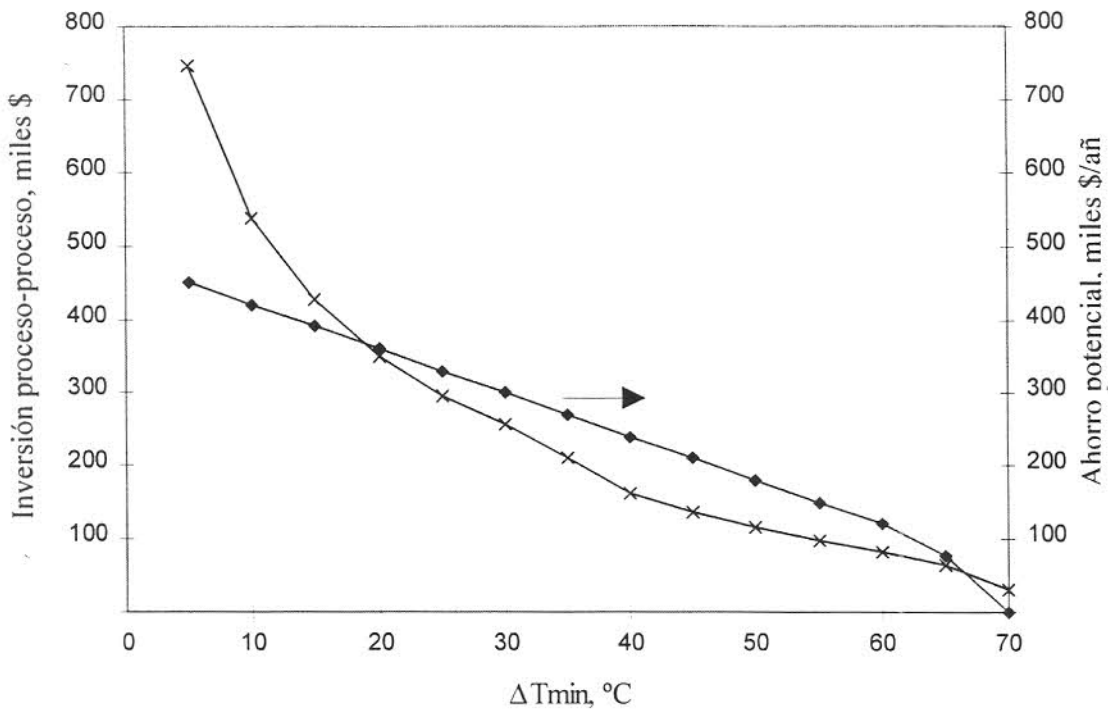


Figura C4.4 Ahorro potencial e inversión adicional de equipo proceso-proceso en función  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.4.

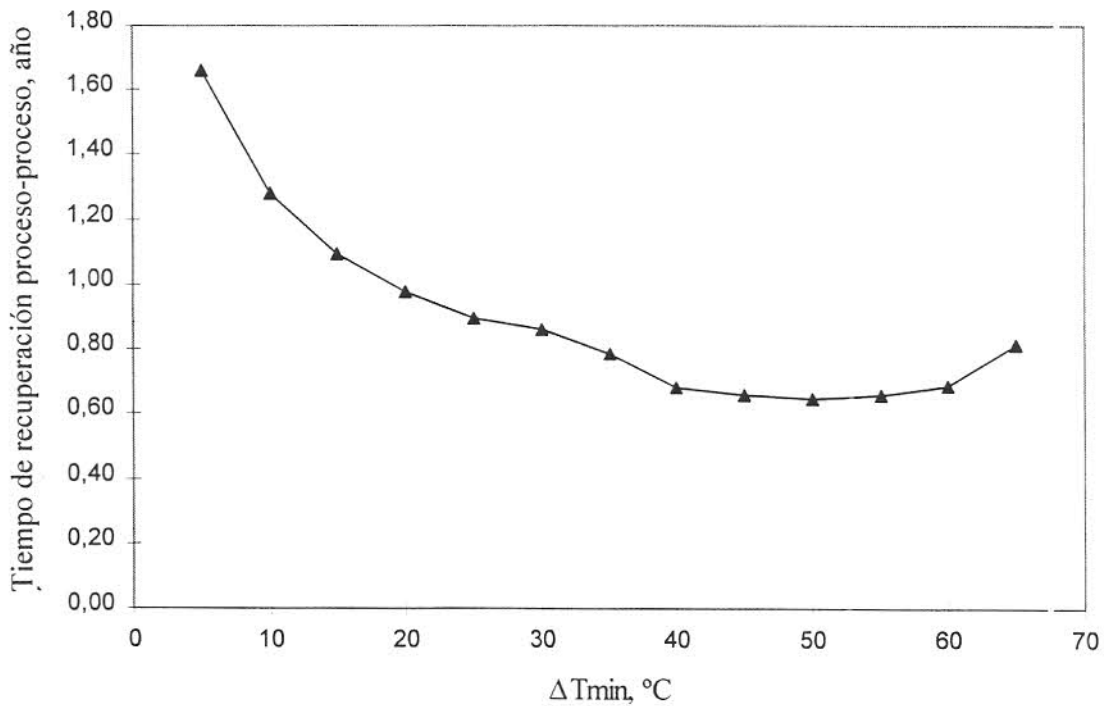


Figura C4.5 Tiempo de recuperación de la inversión del equipo proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  para el Caso 4.4.

## **APENDICE D**

**RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL REDISEÑO DE LAS TRES  
REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR, CASO 4.2 AL 4.4,  
PRESENTADAS EN EL APENDICE C**



|   |           |           |           |          |
|---|-----------|-----------|-----------|----------|
| <b>h1</b>                               | 159.0     | 159.0     | 159.0     | 159.0    |
| <b>h2</b>                               | 164.3     | 163.6     | 163.0     | 162.6    |
| <b>h3</b>                               | 168.5     | 167.3     | 166.3     | 165.5    |
| <b>c1</b>                               | 101.2     | 108.4     | 114.7     | 119.6    |
| <b>c2</b>                               | 130.6     | 134.2     | 137.3     | 139.7    |
| <b><math>\Delta T_{min}</math> (°C)</b> |           |           |           |          |
| <b>Corriente</b>                        | <b>20</b> | <b>15</b> | <b>10</b> | <b>5</b> |
| <b>h1</b>                               | 159.0     | 159.0     | 159.00    | 159.0    |
| <b>h2</b>                               | 162.1     | 161.5     | 160.67    | 159.8    |
| <b>h3</b>                               | 164.7     | 163.5     | 162.00    | 160.5    |
| <b>c1</b>                               | 124.5     | 131.5     | 140.66    | 149.8    |
| <b>c2</b>                               | 142.1     | 145.5     | 150.00    | 154.5    |

Tabla D2.2 Area de rediseño y adicional proceso-proceso e incluyendo servicios auxiliares a diferentes valores de  $\Delta T_{min}$  globales para el Caso 4.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | <i>Area Proceso-Proceso (m<sup>2</sup>)</i> |                  | <i>Area Balanceada (m<sup>2</sup>)</i> |                  |
|--------------------------|---|------------------|--|------------------|
|                          | <i>Rediseño</i>                             | <i>Adicional</i> | <i>Rediseño</i>                        | <i>Adicional</i> |
| <b>5</b>                 | 9301  | 6993             | 10377                                  | 7092             |
| <b>10</b>                | 6469  | 4162             | 7560                                   | 4274             |
| <b>15</b>                | 5119  | 2811             | 6233                                   | 2947             |
| <b>20</b>                | 4230  | 1922             | 5343                                   | 2057             |
| <b>25</b>                | 3371  | 1064             | 4495                                   | 1210             |
| <b>30</b>                | 3194  | 886              | 4320                                   | 1034             |

Tabla D2.3 Eficiencia de la red rediseñada respecto al área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada para el Caso 4.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $\alpha$ <i>Proceso-proceso</i><br>$\alpha_{CONSTANTE} = 0.882$ | $\alpha$ <i>Balanceada</i><br>$\alpha_{CONSTANTE} = 0.936$ |
|--------------------------|---|--|
| <b>5</b>                 | 0.875   | 0.842  |
| <b>10</b>                | 0.928   | 0.881  |
| <b>15</b>                | 0.947   | 0.893  |
| <b>20</b>                | 0.963   | 0.907  |
| <b>25</b>                | 1.036   | 0.962  |
| <b>30</b>                | 0.950   | 0.907  |

Tabla D2.4 Ahorro potencial, inversión adicional y tiempo de recuperación después del rediseño para el Caso 4.2.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Inversión adicional (miles \$) |           | Ahorro potencial<br>(miles \$/año) | Tiempo de recuperación (años) |           |
|--------------------------|--------------------------------|-----------|------------------------------------|-------------------------------|-----------|
|                          | Proceso                        | Balanceda |                                    | Proceso                       | Balanceda |
| 5                        | 1195.3                         | 1208.9    | 957.8                              | 1.248                         | 1.262     |
| 10                       | 787.7                          | 804.6     | 840.0                              | 0.938                         | 0.958     |
| 15                       | 577.3                          | 599.2     | 722.4                              | 0.799                         | 0.829     |
| 20                       | 429.5                          | 452.6     | 604.8                              | 0.710                         | 0.748     |
| 25                       | 274.7                          | 302.2     | 487.1                              | 0.564                         | 0.620     |
| 30                       | 240.5                          | 269.1     | 369.5                              | 0.651                         | 0.728     |

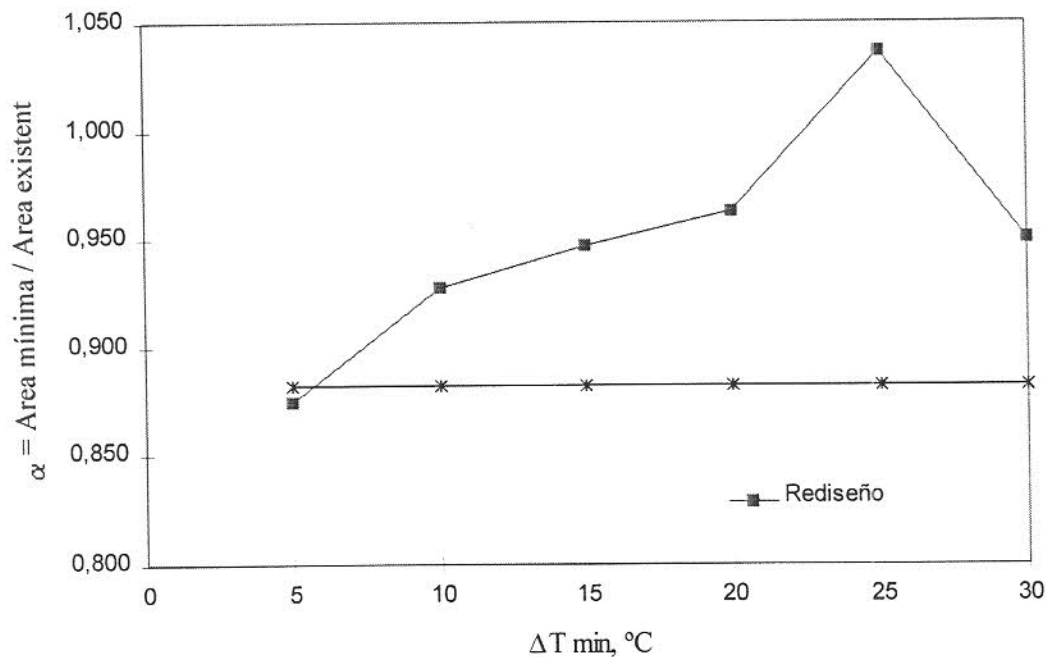


Figura D2.1 Comparación de la eficiencia del rediseño de la red respecto a la de la red existente para el Caso 4.2, correspondiente al área proceso-proceso.

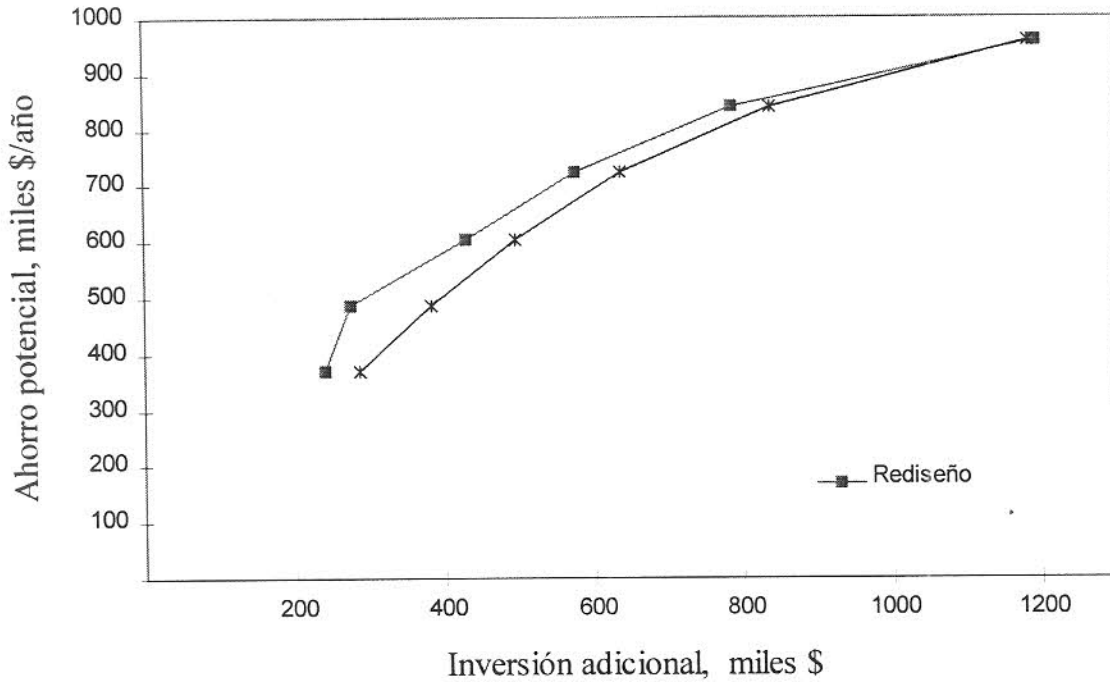


Figura D2.2 Comparación del ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.2.

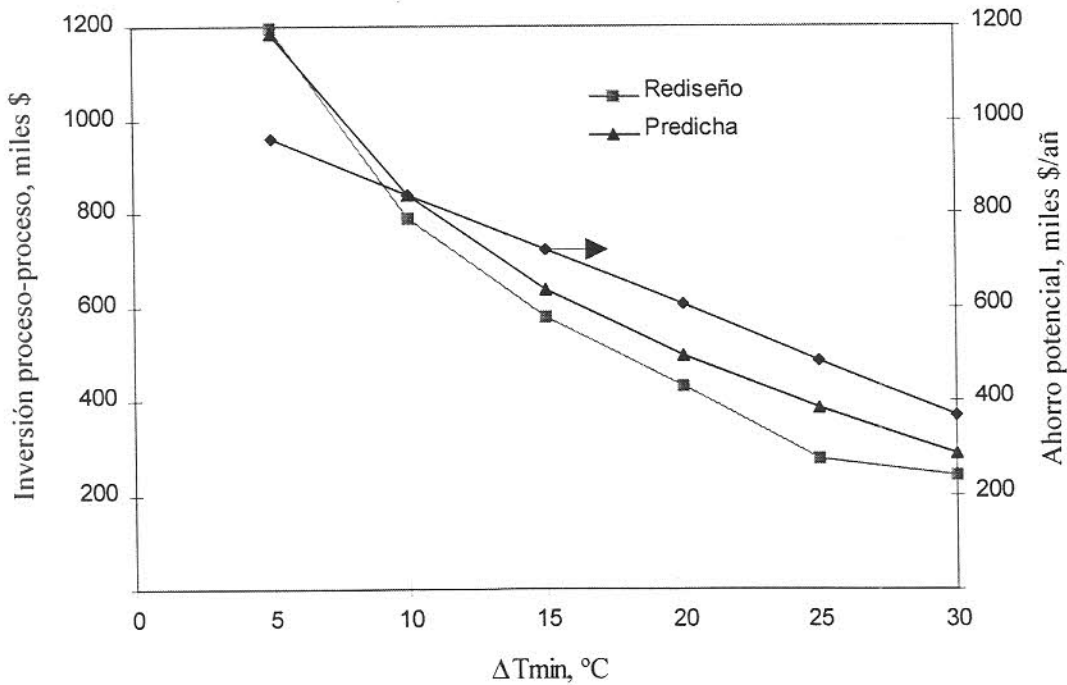


Figura D2.3 Comparación del ahorro potencial e inversión adicional proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  obtenidos del rediseño respecto a los predichos para el Caso 4.2.

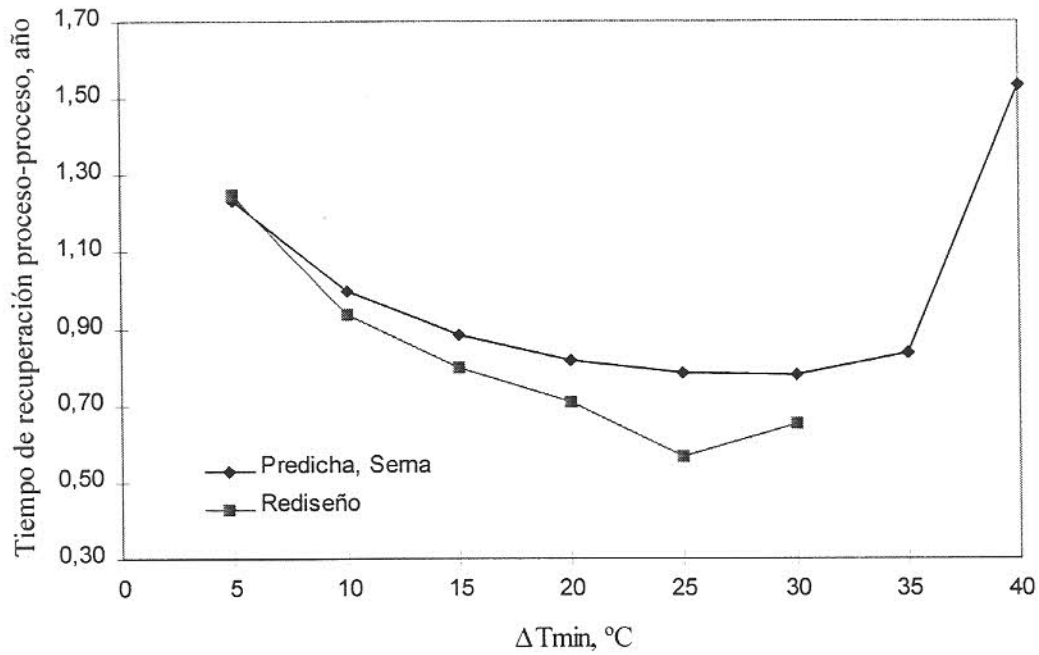


Figura D2.4 Comparación del tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.2.

### D.2 Caso de estudio 4.3

Tabla D3.1 Temperaturas del punto de pliegue para cada corriente correspondientes a los diferentes  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$ (°C) |       |       |       |       |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Corriente             | 40    | 35    | 30    | 25    |
| h1                    | 380.0 | 374.1 | 370.5 | 367.1 |
| h2                    | 380.0 | 374.1 | 370.5 | 367.1 |
| h3                    | 378.9 | 373.1 | 369.6 | 366.3 |
| c1                    | 290.0 | 295.0 | 299.6 | 308.0 |
| c2                    | 354.0 | 351.2 | 350.0 | 350.0 |
| $\Delta T_{min}$ (°C) |       |       |       |       |
| Corriente             | 20    | 15    | 10    | 5     |
| h1                    | 363.6 | 360.2 | 355.7 | 352.8 |
| h2                    | 363.6 | 360.2 | 355.7 | 352.8 |
| h3                    | 363.1 | 359.8 | 355.4 | 352.7 |
| c1                    | 316.4 | 324.8 | 336.0 | 343.0 |
| c2                    | 350.0 | 350.0 | 350.0 | 350.0 |

Tabla D3.2 Area de rediseño y adicional proceso-proceso e incluyendo servicios auxiliares a diferentes valores de  $\Delta T_{min}$  globales para el Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area Proceso-Proceso (m <sup>2</sup> ) |           | Area Balanceada (m <sup>2</sup> ) |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------------------------------|-----------|
|                          | Rediseño                               | Adicional | Rediseño                          | Adicional |
| 5                        | 4541                                   | 3803      | 4813                              | 3803      |
| 10                       | 3105                                   | 2367      | 3377                              | 2368      |
| 15                       | 2026                                   | 1288      | 2306                              | 1297      |
| 20                       | 1522                                   | 783       | 1825                              | 815       |
| 25                       | 1295                                   | 556       | 1621                              | 611       |
| 30                       | 1161                                   | 423       | 1510                              | 501       |
| 35                       | 1099                                   | 361       | 1423                              | 414       |

Tabla D3.3 Eficiencia de la red rediseñada respecto al área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada para el Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $\alpha$ Proceso-proceso<br>$\alpha_{CONSTANTE} = 0.882$ | $\alpha$ Balanceada<br>$\alpha_{CONSTANTE} = 0.936$ |
|--------------------------|--|---|
| 5                        | 0.885  | 0.840   |
| 10                       | 0.938  | 0.878   |
| 15                       | 1.013  | 0.932   |
| 20                       | 1.022  | 0.926   |
| 25                       | 0.943  | 0.860   |
| 30                       | 0.842  | 0.785   |
| 35                       | 0.772  | 0.759   |

Tabla D3.4 Ahorro potencial, inversión adicional y tiempo de recuperación después del rediseño para el Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Inversión adicional (miles \$) |            | Ahorro potencial<br>(miles \$/año) | Tiempo de recuperación (años) |            |
|--------------------------|--------------------------------|------------|------------------------------------|-------------------------------|------------|
|                          | Proceso                        | Balanceada |                                    | Proceso                       | Balanceada |
| 5                        | 733.1                          | 733.2      | 619.9                              | 1.183                         | 1.183      |
| 10                       | 504.7                          | 504.8      | 570.7                              | 0.884                         | 0.885      |
| 15                       | 316.7                          | 318.4      | 490.3                              | 0.646                         | 0.649      |
| 20                       | 220.0                          | 226.4      | 409.9                              | 0.537                         | 0.552      |
| 25                       | 173.2                          | 184.9      | 329.5                              | 0.526                         | 0.561      |
| 30                       | 144.2                          | 161.3      | 249.1                              | 0.579                         | 0.648      |
| 35                       | 130.2                          | 142.2      | 195.7                              | 0.666                         | 0.727      |

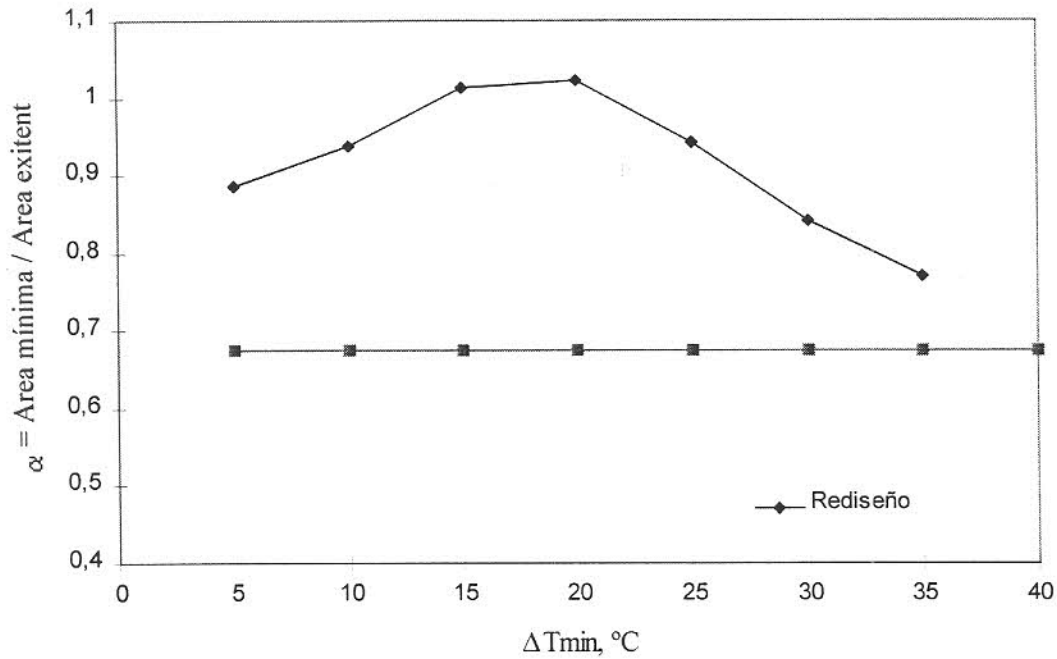


Figura D3.1 Comparación de la eficiencia del rediseño de la red respecto a la de la red existente para el Caso 4.3, correspondiente al área proceso-proceso.

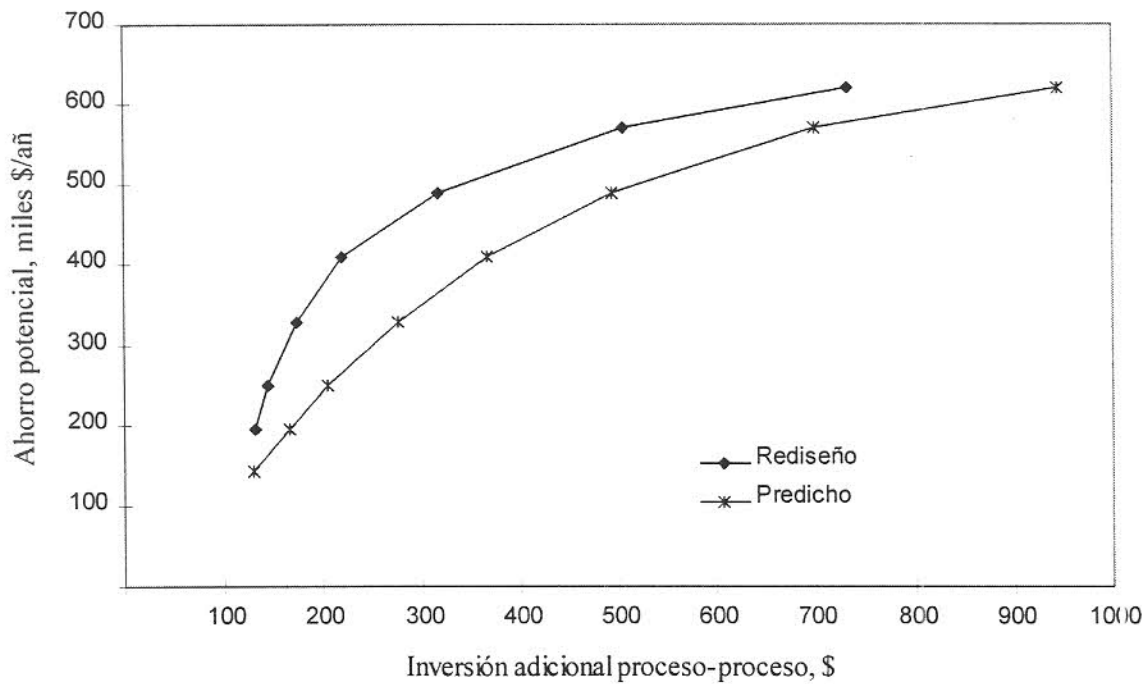


Figura D3.2 Comparación del ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.3.

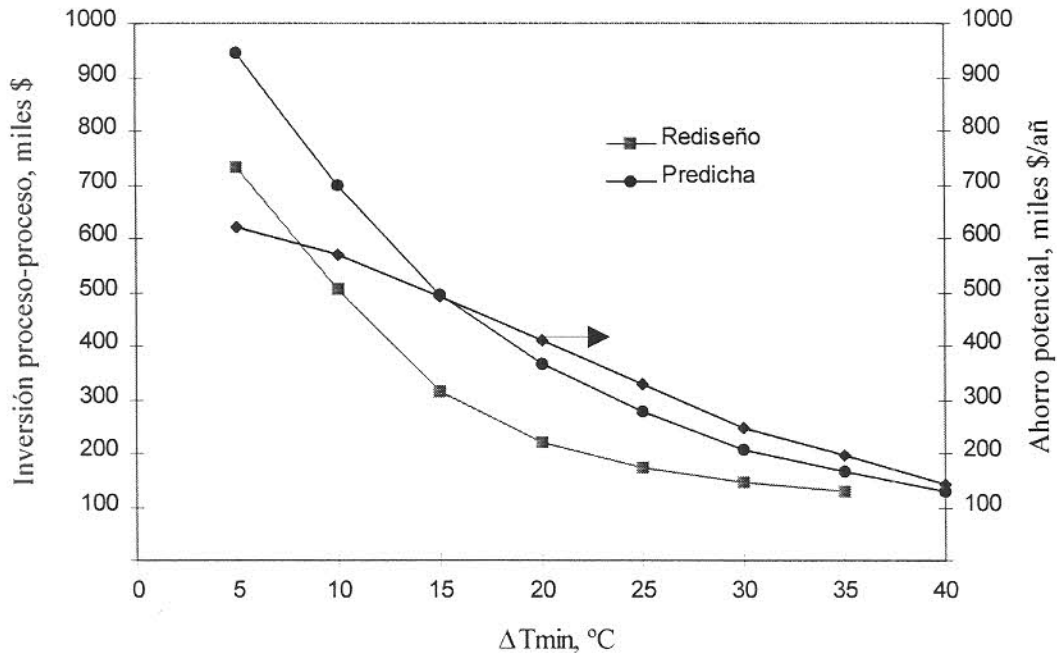


Figura D3.3 Comparación del ahorro potencial e inversión adicional proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  obtenidos del rediseño respecto a los predichos para el Caso 4.3.

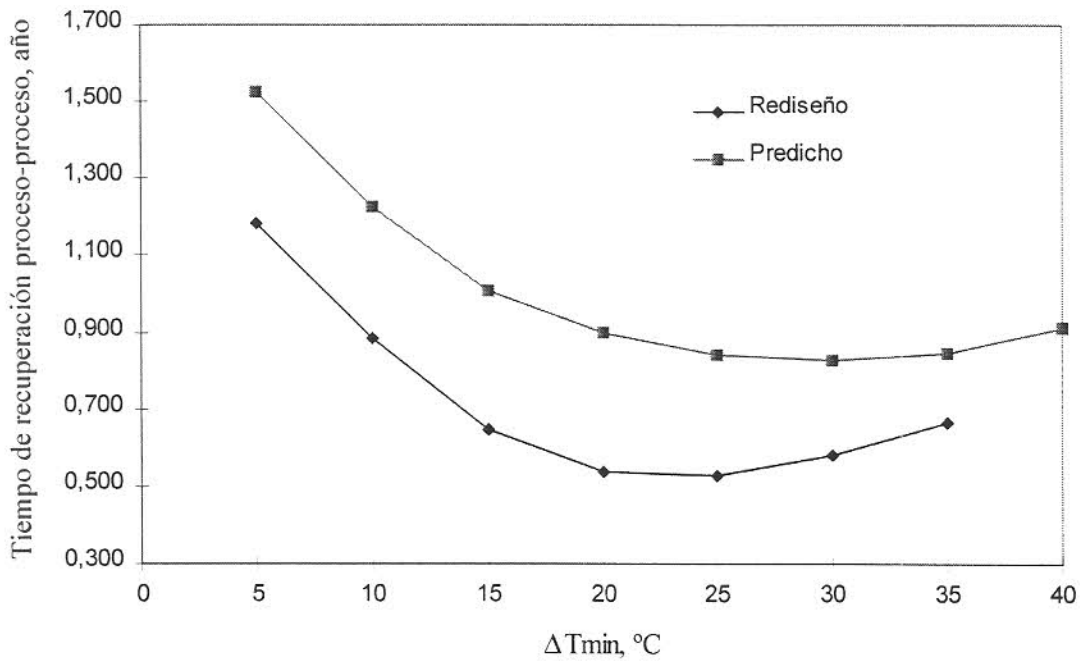


Figura D3.4 Comparación del tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.3.

### D.3 Caso de estudio 4.4

Tabla D4.1 Temperaturas del punto de pliegue para cada corriente correspondientes a los diferentes  $\Delta T_{min}$  globales del Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$ (°C) |       |       |       |       |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Corriente             | 40    | 35    | 30    | 25    |
| h1                    | 474.6 | 478.3 | 480.8 | 481.0 |
| h2                    | 490.0 | 490.0 | 490.0 | 490.0 |
| h3                    | 477.2 | 480.2 | 482.3 | 482.5 |
| h4                    | 478.5 | 481.2 | 483.1 | 483.2 |
| h5                    | 478.5 | 481.2 | 483.1 | 483.2 |
| c1                    | 448.5 | 458.4 | 465.0 | 465.7 |
| c2                    | 374.8 | 402.2 | 420.6 | 422.4 |
| c3                    | 459.3 | 466.6 | 471.5 | 472.0 |
| $\Delta T_{min}$ (°C) |       |       |       |       |
| Corriente             | 20    | 15    | 10    | 5     |
| h1                    | 438.6 | 434.3 | 429.8 | 424.9 |
| h2                    | 447.1 | 438.6 | 431.3 | 425.6 |
| h3                    | 440.0 | 435.0 | 430.0 | 425.0 |
| h4                    | 440.7 | 435.4 | 430.1 | 425.1 |
| h5                    | 440.7 | 435.4 | 430.1 | 425.1 |
| c1                    | 424.0 | 427.0 | 427.2 | 423.6 |
| c2                    | 382.9 | 406.4 | 420.0 | 420.0 |
| c3                    | 430.0 | 430.0 | 428.3 | 424.1 |

Tabla D4.2 Area de rediseño y adicional proceso-proceso e incluyendo servicios auxiliares a diferentes valores de  $\Delta T_{min}$  globales para el Caso 4.4.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | Area Proceso-Proceso (m <sup>2</sup> ) |           | Area Balanceada (m <sup>2</sup> ) |           |
|--------------------------|--|-----------|-----------------------------------|-----------|
|                          | Rediseño                               | Adicional | Rediseño                          | Adicional |
| 5                        | 2133                                   | 1820      | 2431                              | 1820      |
| 10                       | 1497                                   | 1185      | 1795                              | 1185      |
| 15                       | 1171                                   | 858       | 1468                              | 858       |
| 20                       | 980                                    | 667       | 1277                              | 667       |
| 25                       | 785                                    | 472       | 1083                              | 472       |
| 30                       | 613                                    | 300       | 911                               | 300       |
| 35                       | 541                                    | 228       | 839                               | 228       |



Tabla D4.3 Eficiencia de la red rediseñada respecto al área mínima predicha por la fórmula Bath diversa modificada para el Caso 4.2

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | $\alpha$ <i>Proceso-proceso</i><br>$\alpha_{CONSTANTE} = 0.882$ | $\alpha$ <i>Balanceada</i><br>$\alpha_{CONSTANTE} = 0.936$ |
|--------------------------|---|--|
| 5                        | 0.971   | 0.924  |
| 10                       | 0.949   | 0.893  |
| 15                       | 0.933   | 0.874  |
| 20                       | 0.898   | 0.847  |
| 25                       | 0.933   | 0.870  |
| 30                       | 1.035   | 0.934  |
| 35                       | 0.956   | 0.918  |

Tabla D4.4 Ahorro potencial, inversión adicional y tiempo de recuperación después del rediseño para el Caso 4.3.

| $\Delta T_{min}$<br>(°C) | <i>Inversión adicional (miles \$)</i> |                   | <i>Ahorro potencial</i><br>(miles \$/año) | <i>Tiempo de recuperación (años)</i> |                   |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------|---|--------------------------------------|-------------------|
|                          | <i>Proceso</i>                        | <i>Balanceada</i> |   | <i>Proceso</i>                       | <i>Balanceada</i> |
| 5                        | 411.8                                 | 411.8             | 450                                       | 0.915                                | 0.915             |
| 10                       | 297.5                                 | 297.5             | 420                                       | 0.708                                | 0.708             |
| 15                       | 234.9                                 | 234.9             | 390                                       | 0.602                                | 0.602             |
| 20                       | 196.4                                 | 196.4             | 360                                       | 0.546                                | 0.546             |
| 25                       | 155.1                                 | 155.1             | 330                                       | 0.470                                | 0.470             |
| 30                       | 116.2                                 | 116.2             | 300                                       | 0.387                                | 0.387             |
| 35                       | 98.8                                  | 98.8              | 270                                       | 0.366                                | 0.366             |

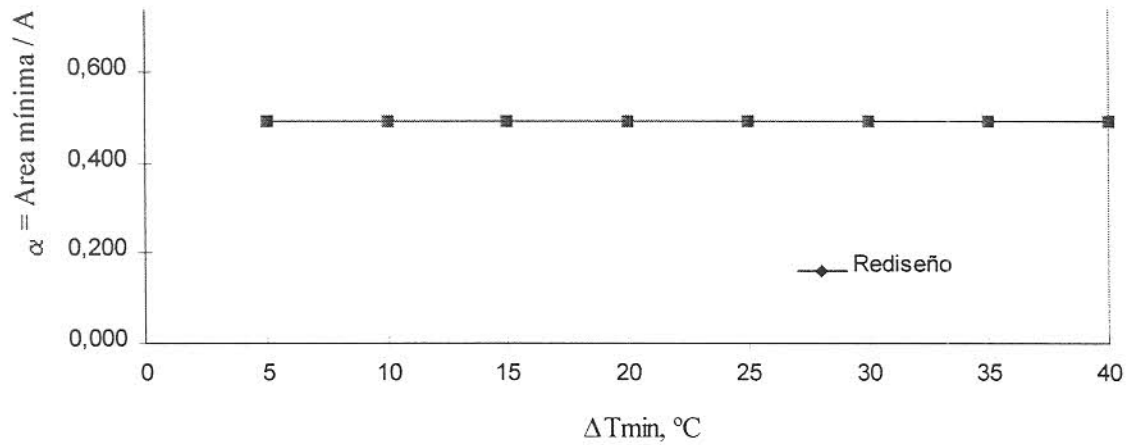


Figura D4.1 Comparación de la eficiencia del rediseño de la red respecto a la de la red existente para el Caso 4.4, correspondiente al área proceso-proceso.

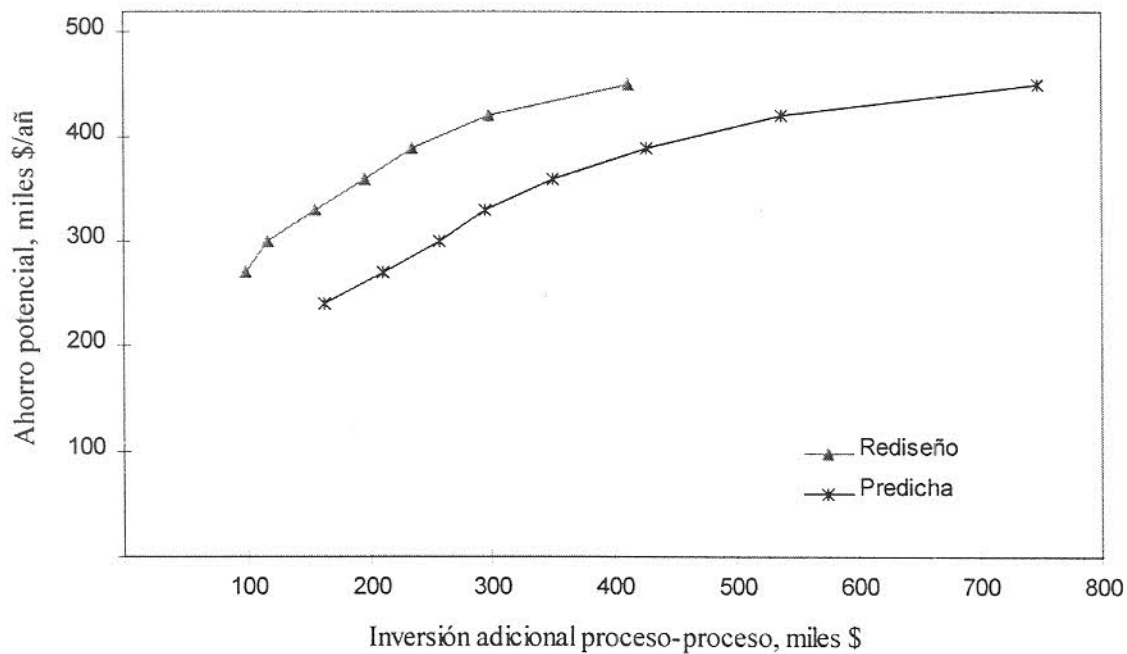


Figura D4.2 Comparación del ahorro potencial en función de la inversión adicional proceso-proceso obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.4.

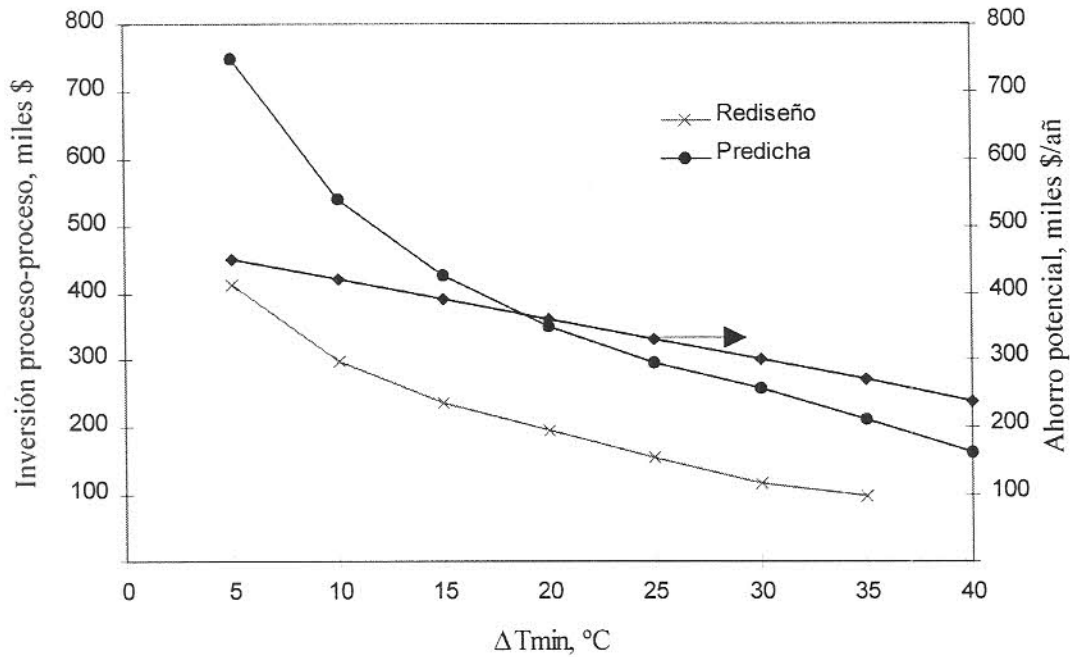


Figura D4.3 Comparación del ahorro potencial e inversión adicional proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  obtenidos del rediseño respecto a los predichos para el Caso 4.4.

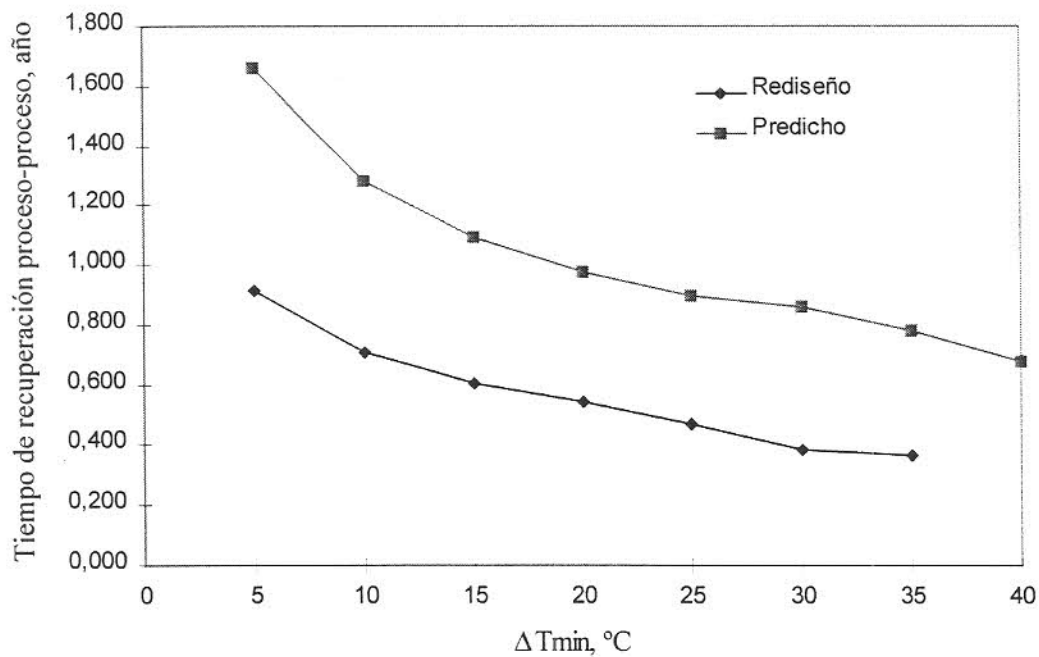


Figura D4.4 Comparación del tiempo de recuperación de la inversión proceso-proceso en función del  $\Delta T_{min}$  obtenido del rediseño respecto al predicho para el Caso 4.4.