



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA SÍNTESIS DE REDES DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

289199

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO
PRESENTADA POR:

FRANCISCO MEDRANO MEJÍA

ASESOR: Profr. Manuel Vázquez Islas



.MÉXICO, D.F.

2001





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

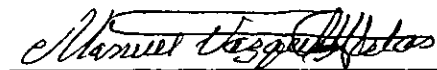
JURADO ASIGNADO SEGÚN EL TEMA:

PRESIDENTE: PROF. JORGE TRINIDAD MARTINEZ MONTES
VOCAL: PROF. CLAUDIO ARMANDO AGUILAR MARTINEZ
SECRETARIO: PROF. MANUEL VAZQUEZ ISLAS
1er. SUPLENTE: PROF. EMILIO ARTURO ZUMAYA PEREZ
2º. SUPLENTE: PROF. MARTIN RIVERA TOLEDO

Sitio donde se desarrolló el tema:

Universidad Nacional Autónoma de México

ASESOR DEL TEMA:



MC. Manuel Vazquez Islas

SUSTENTANTE:



Francisco Medrano Mejía

“Todo lo que hagan, háganlo de corazón, como si estuvieran sirviendo al Señor y no a los hombres, pues ya saben que, en recompensa, el Señor les dará parte en la herencia. Porque ustedes sirven a Cristo, que es su verdadero Señor.”

Colosenses 3:23-24

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, esperando que sea una manera de empezar a "abonarles" todo lo que ustedes me han dado, y deseando sinceramente que esto los honre.

A mi esposa, por todo el amor que he recibido de ella.

A mi hijo, por su sonrisa, y su manera de observar y descubrir el mundo que le rodea. Deseo poder sonreír y mirar las cosas como él.

A mis hermanos y a Baxter, por pertenecer a una membresía muy exclusiva: mi propia familia.

Al Dr. René Bañares, por su conocimiento y apoyo incondicional.

A todos mis amigos que se mostraron como tales, y me estuvieron molestando y presionando para que acabara la tesis.

A mis otros amigos que nunca me dieron carrilla con esto, -y que seguramente pensaron como yo que no era tan importante-, por que finalmente no dejan de ser mis amigos en todo el sentido de la palabra.

Y como finalmente la tesis es algo muy personal, quiero agradecer a:

Neal Perth, Greg Bisonnete, Rod Morgenstein, y a mis maestros, por la inspiración y las ideas para seguir tocando.

A los creadores en Sonic Foundry del Acid 2.0 . A la gente en Musician's Friend, Mars Music y las demás mega-tiendas de internet, por poner la música celestial al alcance de los mortales.

INDICE

OBJETIVO DE LA TESIS	1
CAPITULO 1. INTELIGENCIA ARTIFICIAL	
1.1 INTRODUCCIÓN A LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL	2
1.2 ELEMENTOS BÁSICOS DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL	3
1.3 LENGUAJES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y OTRAS HERRAMIENTAS	8
1.4 ELEMENTOS BÁSICOS DE LISP	8
1.5 COMPARACIÓN ENTRE LA PROGRAMACIÓN CONVENCIONAL E INTELIGENCIA ARTIFICIAL	9
CAPITULO 2. LA RECUPERACIÓN DE CALOR EN LOS PROCESOS QUÍMICOS	
2.1 FUNDAMENTOS DE SÍNTESIS DE PROCESOS	10
2.2 INTRODUCCIÓN A LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA	13
2.3 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	14
2.4 REPRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	14
2.5 DESARROLLOS FUTUROS	17
2.6 ENFOQUES EN LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA	18
2.7 ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA	20
2.8 ALGORITMOS DE SÍNTESIS DE REDES DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	20
2.9 DIFERENTES TIPOS DE OBJETIVOS EN LA SÍNTESIS	22
2.10 HEURÍSTICAS EN LA SÍNTESIS DE REDES DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	34
CAPITULO 3. FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS: MÉTODO DEL PUNTO DE PLIEGUE	
3.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODÓ DEL PUNTO DE PLIEGUE	43
3.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES	43
3.3 PROBLEMAS TIPO UMBRAL	46
3.4 MÉTODO DE DISEÑO DEL PUNTO DE PLIEGUE	48
3.5 FENÓMENOS DE PINCH OCULTO Y FALSO PINCH	49
3.6 PRINCIPIO DE RELAJAMIENTO DIRECTO DEL PINCH	50

CAPITULO 4. ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA

4.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA	51
4.2 LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE PLIEGUE	55
4.3 CLASIFICACIÓN DEL PROBLEMA	56
4.4 RELACIÓN ENTRE EL SELECTOR DE APAREAMIENTOS Y EL MÉTODO DE DISEÑO PINCH	56
4.5 REGLAS RELACIONADAS CON EL MDP	58
4.6 SELECTOR DE APAREAMIENTOS	60
4.7 EVALUACIÓN DE LOS PESOS DE LAS HEURÍSTICAS	60
4.8 TIPO DE APAREAMIENTO	61
4.9 CRITERIOS DE PARTICIÓN DE CORRIENTES	61
4.10 REPRESENTACIÓN DE HEURÍSTICAS DEL SELECTOR DE APAREAMIENTOS	62
4.11 OTRAS FUNCIONES DEL SISTEMA	63
4.12 LIMITACIONES	65
4.13 FLEXIBILIDAD DEL PROGRAMA	65
4.15 USO DEL SISTEMA	66

CAPITULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

5.1 PROBLEMAS ESTUDIADOS, Y DIAGRAMAS TEMPERATURA-ENTALPÍA	70
5.2 SELECCIÓN DE CORRIENTES Y TIPO DE APAREAMIENTO	76
5.3 HEURÍSTICAS COMBINADAS	109
5.4 ESTUDIO DE UN PROBLEMA CON PUNTO DE PLIEGUE	115
5.5 INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE DIVISIÓN DE FLUJO	119
5.6 SELECCIÓN DE APAREAMIENTOS EN EL PINCH	119
5.7 USO DE REGLAS DE DISTRIBUCIÓN DE CALOR	119
5.8 CONCLUSIONES	120

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

6.1 UTILIZACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL	121
6.2 ESTRUCTURA DEL SISTEMA	121
6.3 ESTRATEGIAS RECOMENDADAS	124
6.4 MEJORAS FUTURAS	126
6.5 CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS	128
6.6 SUMARIO	131

BIBLIOGRAFÍA	133
---------------------	------------

ANEXOS	140
---------------	------------

OBJETIVO

Esta tesis propone un sistema interactivo que asista al ingeniero de procesos en la síntesis de redes de intercambiadores de calor y que genere las ecuaciones correspondientes para simular las redes sintetizadas. Adicionalmente, se busca comparar la efectividad de las heurísticas, y sirva como guía en la resolución de problemas de síntesis. Considerando que los objetivos que se persiguen durante la síntesis pueden ser muy variados, el sistema debe tener la flexibilidad para interactuar con el usuario. El sistema se basa en el uso de reglas heurísticas implementadas en un lenguaje de procesamiento simbólico, LISP, que por sus características se considera el más adecuado para la resolución de los problemas de síntesis de procesos.

CAPITULO I

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

1.1 INTRODUCCIÓN A LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La inteligencia artificial es la herramienta utilizada para implementar el presente sistema interactivo. A continuación, se explican los fundamentos de esta herramienta.

La Inteligencia Artificial (IA) trata principalmente procesos simbólicos que involucran complejidad, incertidumbre y ambigüedad. En este tipo de problemas, a menudo no existe una solución algorítmica y es necesario llevar a cabo una búsqueda en el espacio de soluciones posibles. Esta búsqueda está guiada por heurísticas o reglas de dedo, que son parte medular de la IA, y limitan el número de soluciones posibles. Esto es especialmente importante cuando los problemas son muy complejos, y el número de soluciones posibles es muy grande.

Se ha observado que la capacidad para resolver problemas depende en gran medida del grado de conocimiento que se tenga, y a este respecto, otra característica de los programas de IA es el uso del "conocimiento específico al dominio", que consiste en el uso de información especializada sobre una materia.

Este conocimiento debe estar disponible durante la búsqueda, para usarse cuando se requiera. Es una práctica común en IA separar al conocimiento sobre la materia del mecanismo que controla la exploración. De esta manera, los cambios en el conocimiento solo afectan la Base de Conocimientos del programa, y se pueden actualizar fácilmente los programas.

1.2 ELEMENTOS BÁSICOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

1.2.1 Búsqueda heurística

Cuando se tienen problemas complejos y se está realizando una búsqueda en el espacio de soluciones, se encuentra que cada vez que se toma una decisión se abren nuevas posibilidades para futuras decisiones. El juego de ajedrez y muchos procesos en los que se tiene que hacer decisiones secuenciales, como en la síntesis de procesos, ilustran este tipo de problemas, que son muy complejos debido al gran número de posibilidades que se tienen para resolverlos.

Estos problemas pueden representarse como un árbol de posibilidades, con nodos conectados mediante líneas. Cada nodo representa el estado del problema en un punto dado, y cada línea, una transformación u operación, para llegar a un nuevo estado. En la parte superior del árbol, se tiene el estado inicial del problema, y se va ramificando gradualmente al ir tomando decisiones, que conducen hacia nuevos estados del problema.

En un principio, se usaban métodos "ciegos" en los cuales se buscaba sistemáticamente todas las posibilidades, asegurándose que no se pasaría dos veces por el mismo camino. Cuando se tratan problemas muy complejos, este tipo de exploración resulta muy ineficiente: es necesario el uso de reglas de dedo, reglas empíricas o heurísticas, para escoger la ramificación con mayor posibilidad de éxito y acotar así el número de soluciones exploradas. Estas reglas están basadas en la información de la estructura y naturaleza del problema, limitando de esta manera el sondeo.

1.2.2 Representación de Conocimiento

La representación es una serie de convenciones referente a la manera de describir una clase de objetos. Una descripción hace uso de convenciones de una representación para describir algunas cosas particulares (Winston, 1984).

El fin de la representación de conocimiento es organizar la información sobre el dominio o tema a tratar, de tal manera que el programa de IA puede acceder fácilmente la información para hacer decisiones, planear, reconocer objetos y situaciones, analizar, sacar conclusiones y otras funciones cognitivas.

Se ha visto que el usar la representación más adecuada para solucionar un problema es la parte más importante y complicada del mismo. Una buena representación debe tener las siguientes características:

- Hace explícitas las cosas relevantes.
- Deja expuestas las restricciones inherentes al problema.
- Representa toda la información necesaria.
- Es concisa.
- Es transparente.

Las representaciones están constituidas por una parte sintáctica y otra semántica. La sintaxis de una representación especifica los símbolos que se pueden usar y de qué manera se utilizan. La semántica de una representación especifica de que manera esta incorporado el significado en los símbolos y los arreglos de símbolos permitidos por la sintaxis (Winston, 1984 [1]).

1.2.2.1 Esquemas de Representación

Los esquemas de representación se pueden clasificar usualmente en declarativos y procedurales. Si el modelo describe el conocimiento del tipo "que es..", estamos hablando de un esquema declarativo. Estos esquemas incluyen las redes semánticas (o esquemas relacionales) y los esquemas lógicos. Si el conocimiento es del tipo "cómo hacerlo..", el esquema es del tipo procedural.

Entre los esquemas de representación de conocimiento se encuentran:

- a) Reglas de producción.
- b) Redes semánticas.
- c) Marcos de representación.

d) Representaciones procedurales.

e) Representaciones lógicas.

De éstos, los tres primeros tipos son los más difundidos en la IA.

1.2.2.2 Reglas de producción En éstas, el conocimiento está expresado mediante proposiciones lógicas que hacen una declaración de una área específica del dominio.

Las Reglas de Producción (RP) pueden interpretarse como:

SI: condiciones, hipótesis, antecedentes...

ENTONCES: acciones, conclusiones, consecuencias...

Debido a su modularidad, así como su fácil manejo para ampliarlas y modificarlas, las RP son el tipo más popular de representación de conocimiento, y son muy comunes en los sistemas expertos.

1.2.2.3 Redes semánticas En este tipo de enfoque, se describen las propiedades y relaciones de objetos, eventos, conceptos, etc, mediante nodos, flechas dirigidas y rótulos. Las redes semánticas describen objetos, hechos, conceptos, etc, y la relación que existe entre éstos.

El grafo dirigido (flecha dirigida) constituye la sintaxis de una red semántica. Sin embargo, una red de este tipo no es una red semántica si no existe la parte semántica que describa los objetos. La semántica puede estar dada por los nombres de los nodos y de las relaciones involucrados en la red semántica que permitan encontrar el significado de ésta.

1.2.2.4 Marcos de representación Un marco es una representación de un objeto que contiene atributos (*slots*, en inglés). Los atributos representan características del objeto y se llenan con valores característicos que hacen que el objeto sea único. En estos marcos, se puede hacer una representación natural del conocimiento descriptivo, y las relaciones implicadas.

Dentro de un atributo se puede agregar un código, permitiendo así lo que se conoce como agregación procedural.

En la manipulación de marcos, existen los llamados "*demons*" que son pequeños programas que actúan cuando reconocen una situación, sin ser llamados explícitamente. Estos se clasifican en tres tipos, según su función y generalmente se usa su nombre en inglés:

- a) Creación (*If-added*). Al modificar un marco, modifica también varias propiedades o atributos del marco.
- b) Acceso (*If-needed*). Si al acceder una propiedad del marco se encuentra con que no tiene un valor, se activa un mecanismo que buscará un valor, que puede ser por herencia de otros ancestros que tengan un valor del atributo en cuestión.
- c) Borrado (*If-removed*). Al borrar una propiedad de un marco, modifica otras propiedades de éste.

1.2.2.5 Representaciones procedurales

En las representaciones procedurales, el conocimiento está contenido en procedimientos o programas específicos; las representaciones procedurales más comunes son las subrutinas.

1.2.2.6 Representación lógica

Hace uso de la lógica de predicados de primer orden, para constituir bases de conocimiento (*Knowledge Bases* o KB, en inglés). Se pueden ver como un conjunto de fórmulas lógicas que dan una descripción parcial del mundo. Son fáciles de entender e incluyen reglas de inferencia que manipulan el conocimiento.

1.2.3 Tipos de control

Básicamente, se puede considerar que existen tres tipos de control en IA:

a) Control Centrado En Acción. Cuando los procedimientos del sistema saben que subprocedimientos específicos usar para llevar a cabo una acción particular sobre un tipo de objeto.

b) Control Centrado En Objetos. Se pueden definir los objetos como entidades que combinan las propiedades de los procedimientos y estructuras de datos, ya que pueden efectuar cálculos y manejar datos. El uso de objetos contrasta con el uso por separado de procedimientos y estructuras de datos en la programación convencional.

Toda la acción en la programación orientada a objetos se realiza mandando mensajes entre objetos. Así, al mandar mensajes, se efectúa una forma de llamado indirecto a un procedimiento; en vez de tomar un objeto y realizar una operación sobre éste, se manda un mensaje al objeto. Existe un selector en el mensaje que especifica el tipo de operación que debe realizarse, y el objeto responde al mensaje usando sus propios procedimientos (también conocidos como "métodos") para realizar operaciones.

Al manejarse los mensajes entre objetos, se permite la abstracción de datos. Es decir, no se está realizando ninguna suposición sobre la implementación y representación interna de los tipos de datos que se están

usando, permitiendo así que se cambie la implementación interna sin cambiar los programas de llamado.

c) Control Oportunístico. En este tipo de control, los procedimientos conocen su propósito y responden a un llamado; la información con el estado actual del problema es accesible a todos los procedimientos. Estos procedimientos pueden verse como un comité de extraños que son expertos en un área del conocimiento; no se conocen entre sí y participan cuando reconocen que pueden aportar algo.

1.3 LENGUAJES DE IA Y OTRAS HERRAMIENTAS.

Se han desarrollado una gran variedad de lenguajes simbólicos como LISP y PROLOG para aplicaciones de IA. En este trabajo, se usará LISP, ya que se considera uno de los lenguajes más "maduros". Utilizando el LISP se han desarrollado una gran cantidad de software para expresar conocimiento, formular sistemas expertos y otras herramientas de ayuda a la programación.

1.4 ELEMENTOS BÁSICOS DE LISP.

En LISP, todos los programas y datos están en forma de expresiones simbólicas (*S-expressions*, en inglés) que se guardan como listas. LISP maneja dos tipos básicos de objetos: átomos y listas. Los átomos son símbolos (constantes o variables) usados como identificadores para nombrar objetos. Una lista es una secuencia de cero o más elementos delimitados por paréntesis, donde cada elemento puede ser un átomo o una lista. Adicionalmente, es factible el manejo de funciones recursivas. LISP es un lenguaje muy poderoso y sintético.

1.5 COMPARACIÓN ENTRE LA PROGRAMACIÓN CONVENCIONAL Y LA IA

En las aplicaciones desarrolladas utilizando métodos de programación convencional, se realizan principalmente cálculos numéricos y el método de solución es algorítmico, con pasos de solución explícitos. La información y el control están integrados, es difícil modificar un programa de esta naturaleza .

CAPITULO II

LA RECUPERACIÓN DE CALOR EN LOS PROCESOS QUÍMICOS

2.1 FUNDAMENTOS DE SÍNTESIS DE PROCESOS

Otro de los elementos fundamentales del presente trabajo es la teoría de síntesis de procesos, y en especial, la parte correspondiente a redes de recuperación de calor. El presente capítulo trata estos conceptos.

Westerberg (1989) [2] define la actividad de la síntesis como "la generación automática de alternativas y la selección de las mejores con base en una información incompleta". En este proceso de generación de alternativas, para considerar la conveniencia de alguna de ellas se requiere información que aún no se encuentra disponible hasta que el diseño se ha finalizado y se ha determinado en detalle. Debido a que es virtualmente imposible llegar hasta un grado de detalle para todas las posibilidades que se puedan generar, estas decisiones se basan en información incompleta.

El problema consiste en seleccionar un sistema particular de entre el gran número de alternativas que se presentan y que además cumplan con el desempeño requerido.

2.1.1 Elementos de Síntesis de Procesos

En la síntesis, tres aspectos son de fundamental importancia: representación, evaluación y búsqueda (Westerberg, 1989 [2]).

a) Representación. El escoger la representación más adecuada del problema permite una visualización rápida de la solución o de las soluciones alternativas. Dado que siempre existen muchos conjuntos de soluciones al problema, es muy importante escoger las mejores por medio de una representación adecuada, que permita un procesamiento rápido de la información,

y sea fácil de entender.

Un ejemplo de representaciones aplicada al intercambio de calor entre corrientes, es la propuesta por Linnhoff y Hindmarsh (1982) [3], que facilita el entendimiento del problema de síntesis de redes de intercambiadores al aportar todos los datos relevantes de una manera rápida y práctica (calor disponible por intervalos de temperatura, la temperatura de punto de pliegue (*pinch point*, véase el Capítulo III) y la cantidad mínima de servicios necesaria). El punto 2.4 del presente capítulo trata más a fondo las representaciones para el problema de síntesis de redes de intercambiadores.

b) Evaluación de las posibilidades generadas. Ya que no se puede hacer una evaluación detallada de todas las soluciones generadas, es necesario hacer evaluaciones aproximadas o para descartar soluciones no óptimas y llevar a cabo una evaluación más minuciosa de otras soluciones que parezcan más prometedoras.

c) Búsqueda. Generalmente el diseño se hace por niveles de abstracción:

- Una decisión de alto nivel elimina muchas posibilidades de bajo nivel.
- Muchos métodos de búsqueda son algorítmicos, y al efectuar la exploración se pueden encontrar los diseños de costo mínimo, que cumplen con ciertas especificaciones.
- Otro enfoque es fijar objetivos para el diseño, y aceptar solo aquellas posibilidades que cumplan con estos objetivos.

La síntesis del sistema puede llevarse a cabo mediante la siguiente secuencia:

- 1.- Definir los objetivos del sistema.
- 2.- Definir un criterio para evaluar el sistema.
- 3.- Seleccionar una tecnología para lograr los objetivos.
- 4.- Descomponer el problema en una serie de tareas interconectadas.
- 5.- Realizar las tareas con la tecnología seleccionada.

Los primeros tres puntos se refieren a la "planeación del proceso" y los últimos, al "diseño del proceso" , según la clasificación de Ichikawa (1971) [4].

2.1.2 Síntesis de procesos en Ingeniería Química

Westerberg (1989) [2] señala que para la fase de diseño de un nuevo producto, se destina típicamente el 15-20% de los recursos asignados al desarrollo, pero esta fase inicial determina el 70-80% del costo total del bien. Por tanto, la fase de síntesis juega un papel primordial en la rentabilidad de un proyecto.

A partir de que se reconoció la importancia de la síntesis, ésta ha sido el tema de numerosas investigaciones. La síntesis de procesos, como una rama de la Ingeniería Química, data de fines de los años 60. Rudd y sus estudiantes trabajaron en un programa conocido como AIDES, que podía sintetizar una estructura preliminar del diagrama de flujo, haciendo uso de una información limitada. En este programa se dividió la síntesis global en tareas más pequeñas, como la síntesis de la ruta de reacción, o la síntesis de secuencias de separación.

En lo referente a la síntesis de redes de intercambiadores de calor, los primeros intentos sistemáticos para solucionar el problema datan de principios de los 60 . El trabajo de Westbrook (1961) [5], usando programación dinámica y el de Hwa (1965) [6], usando programación separable, son los primeros intentos de abordar el problema de esta manera.

Rudd y sus alumnos de la Universidad de Wisconsin, y Hohmann y Lockhart de la Universidad del Sur de California son los pioneros en esta área, y proponen los primeros algoritmos usando el enfoque de síntesis de procesos.

2.2 INTRODUCCIÓN A LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Para la elaboración de los productos químicos, el uso de energéticos representa un gran porcentaje del costo asociado a éstos. Aunado a esto, se ha dado un rápido incremento de los precios de los energéticos, especialmente después de la crisis del petróleo en 1973; esto ha motivado un creciente interés por la conservación de la energía.

La tendencia de los últimos años es recuperar al máximo la energía del sistema, usando todo el equipo necesario para lograrlo, ya que mientras el costo de los energéticos se ha cuadruplicado en un período de 10 años (1967 - 1977), el costo de los intercambiadores de calor solo ha aumentado al doble en ese mismo período (Rathore, 1982) [7].

El objeto de procurar la recuperación de energía al máximo es recuperar calor y reintegrarlo al proceso, además de reducir el calor rechazado que tiene que pasar por el sistema de enfriamiento. Como beneficios adicionales de la recuperación de energía tenemos una reducción de contaminación del agua y del aire, debido a que se está disminuyendo la demanda de servicios de enfriamiento y calentamiento.

Normalmente, se pueden alcanzar ahorros de un 20 a un 30 por ciento en energéticos, lo que da por resultado ahorros de capital, si se emplea una tecnología de diseño apropiada en la red de recuperación de calor.

Esto ha traído como consecuencia grandes avances en todas las áreas relacionadas con el consumo de energéticos; en la industria química las redes de intercambiadores de calor forman la parte principal del sistema de recuperación de energía y han sido objeto de una amplia investigación en los últimos años.

2.3 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

La síntesis de redes industriales de intercambiadores de calor es muy compleja, ya que el apareamiento entre las corrientes frías y calientes es un problema de naturaleza combinatoria. Además, implica el conocimiento de propiedades de transporte y físicas dependientes de la temperatura; la posibilidad de dividir el flujo de las corrientes involucradas; el uso de varios tipos de restricciones (e.g. apareamientos especificados como "prohibidos"); así como el manejo de corrientes en diferentes estados físicos.

El objetivo de diseño incluye una parte cuantitativa (costo del equipo de intercambiadores de calor y de los servicios externos) y una parte cualitativa (seguridad, flexibilidad, operabilidad y controlabilidad) . Esto dificulta establecer una función objetivo única. Y dado que muchos de los aspectos cualitativos de la red no pueden evaluarse antes de tener una configuración completa de esta red, el óptimo global es difícil de precisar, y el ingeniero se ve forzado a hacer simplificaciones a su modelo y a usar heurísticas para encontrar una solución cercana a la óptima (Gundersen y Naess, 1988 [8]).

El problema de síntesis de redes de intercambiadores ha sido objeto de gran investigación dentro de la síntesis de procesos. Hasta 1980 existían aproximadamente 200 referencias en la literatura acerca de síntesis de procesos; para 1988 existía ese mismo número de referencias solamente para síntesis de redes de intercambiadores de calor, y se calcula que seguirá creciendo el volumen de publicaciones vertiginosamente en años venideros.

2.4 REPRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Una de las primeras representaciones del problema es el Diagrama Temperatura-Entalpía, (Whistler, 1948 [9]) . La temperatura (ordenada) de cada corriente se grafica contra la entalpía (abscisa). La escala de entalpía es relativa;

se pueden trasladar las corrientes sobre esta escala, manteniendo la temperatura constante. Un apareamiento entre dos corrientes se indica poniendo la corriente caliente arriba de la fría; en la zona de traslape ocurre el apareamiento. La distancia vertical entre las corrientes indica la diferencia de temperatura en el apareamiento.

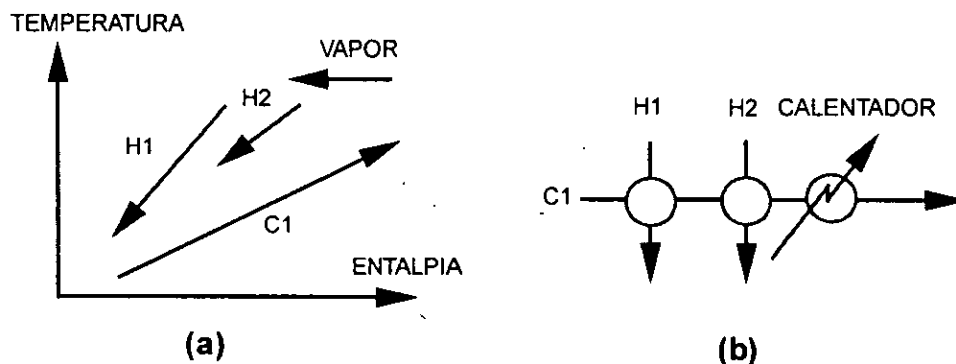


FIGURA 1

Diagrama Entalpía-Temperatura (a) Apareamiento de corrientes en el diagrama (b) red de intercambiadores

Otra representación es la "matriz de apareamientos simples" introducida por Pho y Lapidus (1973) [10], en la cual solamente se pueden representar redes que no tengan más de un apareamiento por cada par de corrientes, y que no involucren divisiones de flujo.

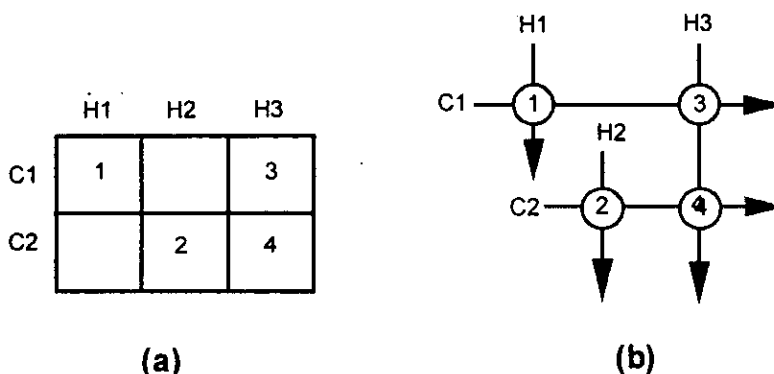


FIGURA 2

Matriz de apareamientos simples (a) Apareamiento de corrientes (b) Red de intercambiadores

Una tercera representación es el "Diagrama de Contenido Calorífico" de Nishida *et al* (1971) [11]. Las corrientes se grafican en un diagrama Temperatura (ordenada) vs. FCp (abscisa) de tal manera que cada corriente se representa como una área que indica el calor total de la corriente que debe suplirse o quitarse de ésta. Un apareamiento se representa asignando áreas iguales entre dos corrientes, y la medida de cualquiera de estas áreas indica el calor transferido.

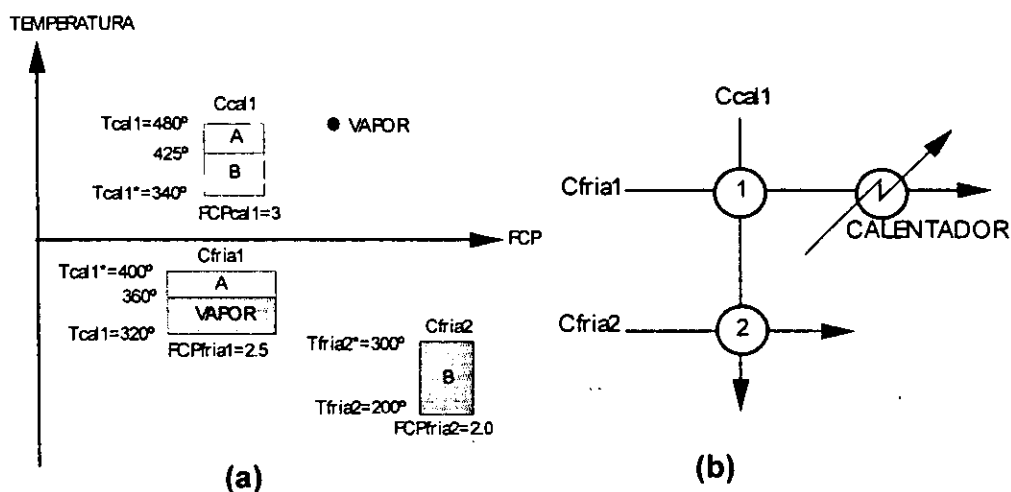


FIGURA 3

Diagrama de contenido calorífico. (a) Representación de corrientes y apareamientos en el diagrama Temp. - Fcp (b) Representación de la red sintetizada

La representación de Linnhoff y Flower (1978) [12] consiste en simbolizar los apareamientos mediante un par de círculos en cada una de las corrientes, y conectándolos con una línea vertical. Las corrientes están escaladas de acuerdo con sus temperaturas.

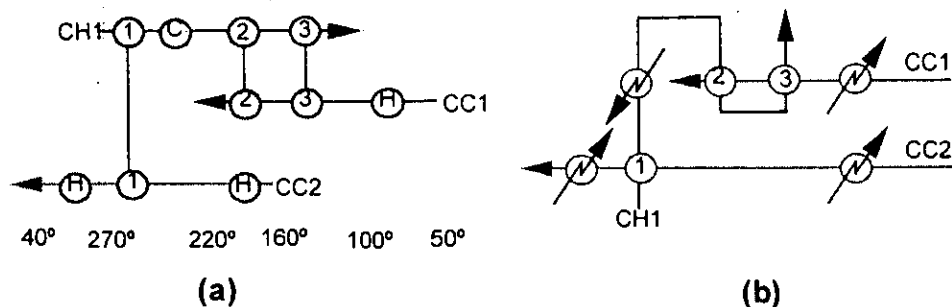


FIGURA 4

Representación de Linnhoff y Flower. (a) Red de intercambiadores mostrando los niveles de temperatura (b) Red sintetizada

2.5 DESARROLLOS FUTUROS

A pesar de considerarse el más simple de los problemas de síntesis en Ingeniería Química, y del trabajo de investigación a lo largo de dos décadas, aún está lejos de considerarse un problema totalmente resuelto.

La generación automática de redes aún no determina la mejor solución; existen muchas configuraciones que cumplen con el número mínimo de unidades y de servicios para un problema dado, y se hace evidente la necesidad de generar sistemáticamente todas estas posibilidades y compararlas, a fin de encontrar el óptimo.

Otro problema es que en la realidad rara vez se usan intercambiadores del tipo 1-1 a contracorriente, lo cual es una suposición muy común que se hace para sintetizar un red de intercambiadores.

Aún no se encuentran medidas convenientes para aspectos como la flexibilidad de las redes, aunque ya existe literatura al respecto. El problema de una red que interactúa dentro de un proceso global sujeto a condiciones cambiantes aún no se ha resuelto (Westerberg, 1989 [2]).

2.6 ENFOQUES EN LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Tradicionalmente han existido dos enfoques en la solución del problema de síntesis:

Uno usa modelos matemáticos (como programación lineal o no lineal, mixta entera, etc.) para lograr el objetivo. El otro se basa en principios termodinámicos y algunas reglas heurísticas, y el diseñador sintetiza la red manualmente o con la ayuda de un asistente interactivo.

2.6.1 El enfoque matemático

El enfoque matemático involucra el establecimiento de un criterio de optimización para la red y la solución de las ecuaciones del modelo. Todas las conexiones en la red son generadas simultáneamente y las decisiones del apareamiento se hacen en paralelo (ver por ejemplo: Cena et al (1977) [13], Cerdá et al (1983) [14], Durán y Grossmann (1986) [15], Floudas et al (1986, 1987) [16,17], Grossmann (1985) [18], Papoulias y Grossmann (1983) [19]).

Aunque se han hecho grandes avances en este tipo de enfoque, aún tiene deficiencias. En primer lugar, no todos los aspectos de una red, como los cualitativos, puede formularse convenientemente; las representaciones del problema aún son limitadas. En segundo lugar, se obtiene la "mejor" solución como resultado de un problema definido rigurosamente, sin la posibilidad de identificar otras soluciones que posiblemente serían mejores (e.g. queda excluida la posibilidad de identificar soluciones "flexibles") . Resulta a veces imposible modificar la red sintetizada para alcanzar algunos aspectos cualitativos como "simplicidad" o "flexibilidad" ya que la estructura sintetizada sólo puede modificarse hasta cierto punto.

Un criterio de costo único, así como la definición de la función objetivo para subproblemas, no siempre evalúa correctamente el costo real desde el punto de vista del ingeniero. Es práctica común en este tipo de métodos la asignación a

priori de ciertos parámetros de costo, y al hacer esta asignación antes de conocer su valor real, se pone en duda la validez del óptimo.

Otra desventaja es que muchos de estos métodos requieren mucho tiempo de procesamiento en una computadora y una gran cantidad de memoria; estos requerimientos tienden a crecer en forma no lineal al aumentar el número de corrientes involucradas.

2.6.2 El enfoque heurístico

En la solución de problemas se recurre muchas veces al uso de reglas de dedo que proporcionan una dirección probable para hallar la solución. Estas reglas se llaman heurísticas, y son útiles para la resolución de un problema, pero son empíricas y no están demostradas.

Existe una reducción importante en el espacio de búsqueda al emplear estos métodos, pero se corre el peligro de eliminar soluciones óptimas o subóptimas. Sin embargo, este enfoque es atractivo ya que el diseñador puede usar su conocimiento del problema para identificar una solución cercana a la óptima con relativa facilidad; el diseñador puede interactuar durante la solución del problema y tomar decisiones a medida que se presenta un nuevo apareamiento, ya que las decisiones son secuenciales. La red resultante puede modificarse gradualmente, ya que se diseña con vistas a una mejora posterior .

El enfoque heurístico en la síntesis de redes de intercambiadores de calor fue introducido por Masso y Rudd (1969) [20], que usaron pesos de selección sobre una serie de reglas heurísticas; estos pesos son ajustados de acuerdo con las experiencias de las síntesis anteriores, lográndose así un sistema con capacidad de aprendizaje.

Ponton y Donaldson (1974) [21] sugirieron aparear la corriente caliente de mayor temperatura de entrada, con la corriente fría de mayor temperatura de salida; esta heurística aún se usa mucho en la actualidad. Otros métodos

heurísticos tradicionales son los de Masso y Rudd (1969) [20], Kobayashi et al. (1971) [22] y el de Nishida *et al.* (1977) [23].

En los últimos años se han combinado diversas heurísticas con métodos termodinámicos (como la tecnología del punto de pliegue o pinch point) y métodos de búsqueda en árboles, entre otros (Muraki *et al.* (1982) [24], Rev y Fonyo (1986) [25], Grossmann y Sargent (1978) [26], Boland y Linnhoff (1979) [27], Irazoqui (1986) [28], Jezowski et al (1986) [29], Lee *et al.* (1970) [30], Nishitani *et al.* (1982) [31], Pho y Lapidus (1973) [10], Rathore (1982) [7], Rathore *et al.* (1975) [32], Umeda *et al.* (1979) [33]).

2.7 ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Se tiene un número n_h de corrientes "calientes" que requieren enfriamiento, y un número n_c de corrientes "frías" que requieren calentamiento. Cada corriente i -ésima tiene asociada un flujo másico w_i , una temperatura de entrada T_i^i , una temperatura de salida T_i^o , y una capacidad calorífica c_i , todo en unidades consistentes. Se tiene además los coeficientes de transferencia de calor $U_{i,j}$ para el apareamiento entre la corriente i y la corriente j , así como una temperatura mínima de acercamiento permitida $T_{i,j}$. Se especifican el tipo de servicios disponibles de enfriamiento y de calentamiento.

Adicionalmente, se pueden agregar ciertas restricciones al problema (no permitir apareamientos cíclicos, por ejemplo). Para sintetizar la red inicial, se supone que los intercambiadores son del tipo de coraza y tubo, de un solo paso, operando a contracorriente.

2.8 ALGORITMOS DE SÍNTESIS DE REDES DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

El problema de síntesis de redes de intercambiadores de calor puede ser dividido en los siguientes tres pasos básicos:

- I. Preanálisis.

II. Determinación de la red inicial.

III. Evolución.

2.8.1 Preamálisis

Involucra el establecimiento de los objetivos de la red que se va a diseñar. Estos objetivos son: a) mínima cantidad de servicios que se utiliza, b) mínima área requerida (suponiendo que todos los coeficientes de transferencia son iguales), c) mínimo número de intercambiadores necesarios. Se ha visto que los objetivos a) y c) son económicamente atractivos, pero el objetivo b) no siempre coincide con el diseño óptimo desde el punto de vista económico (Nishida et al, 1981 [34]).

A partir de 1984, se ha introducido el objetivo de costo anual total, que evalúa el costo anual total tomando en cuenta los aspectos anteriores (Ahmad y Linnhoff, 1984 [35]).

2.8.2 Determinación de la estructura inicial

Como ejemplo de las particiones previas al diseño de la estructura inicial tenemos:

En el método pinch, el problema se subdivide en dos subsistemas, uno arriba del pinch y otro abajo (se supone que la determinación del punto de pliegue y de los servicios mínimos se hizo durante la fase de preanálisis).

En otro tipo de algoritmos (Nishida *et al.*, 1971 [11]) , se propone que las corrientes con calor equivalente sean unidas en una "supercorriente".

El siguiente punto es la selección de un par de corrientes (o supercorrientes) para realizar el apareamiento. Esta decisión puede ser secuencial o en paralelo.

2.8.3 EVOLUCIÓN.

Se puede definir como la modificación de la estructura inicial a fin de obtener una mejoría en alguna de sus propiedades. Linnhoff y Flower (1989) [12], McGallard y Westerberg (1982) [36], Shah y Westerberg (1975) [37], Umeda *et al* (1978) [38], Linnhoff y Hindmarsh (1983) [3]; Muraki y Hayakawa (1982) [24], Nishida *et al* (1977) [23], Naka y Takamatsu (1982) [39], Shiroko y Umeda (1983) [40], Pehler y Liu (1984) [41], Grimes *et al* (1982) [42].

2.9 DIFERENTES TIPOS DE OBJETIVOS EN LA SÍNTESIS

Con el fin de acotar el espacio de búsqueda, se han introducido límites máximos y mínimos, que después se convirtieron en objetivos de energía, área de transferencia de calor, número de unidades de intercambiadores de calor, y finalmente, costo total anual.

2.9.1 Consumo de servicios

El objetivo de servicios mínimos se ha establecido básicamente de cinco maneras:

a) Usando la diferencia neta de calor necesaria para calentar las corrientes calientes, y la necesaria para enfriar las corrientes frías. Este tipo de límite sólo se usó en los primeros algoritmos de síntesis.

b) Lo mismo que en a), pero con modificaciones, para tomar en cuenta las corrientes frías que requieren calentamiento por encima de cualquier temperatura disponible de las corrientes calientes, y las corrientes calientes que requieren enfriamiento por debajo de cualquier temperatura disponible de las corrientes frías.

Como ejemplos tenemos: Rathore y Powers (1975) [32], Nishida *et al*. (1977) [23] y Grossman y Sargent (1978) [26].

c) Valor exacto de la cantidad de servicios consumida tomando en cuenta el mínimo acercamiento de temperatura permitido (el mismo para todos los apareamientos) .

Como ejemplos de este método podemos encontrar el uso de "supercorrientes" (Umeda, Itoh y Shiroko, 1978 [42]), o bien el uso de la tecnología *pinch* o de punto de pliegue (Linnhoff y Hindmarsh, 1983 [3]). En este último método, así como en los trabajos anteriores de Linnhoff, se realiza un balance de entalpía por intervalos de temperatura, y se determina la demanda o disponibilidad de calor por intervalos de temperatura.

Linnhoff y Flower (1978) [12] desarrollan el PTA (Problem Table Algorithm) y Umeda *et al.* (1978) [42] usan el diagrama Temperatura - Calor , obteniendo los valores mínimos de los servicios necesarios de esta gráfica. En estos métodos, se unen las corrientes calientes en una "supercorriente" caliente, y todas las corrientes frías en una "supercorriente" fría. Ambas se grafican en el diagrama Temperatura-Calor y se mueve verticalmente la "supercorriente" fría hasta que la mínima distancia vertical entre las dos corrientes sea igual al mínimo acercamiento de temperatura permitido : Las porciones sin aparear en el diagrama corresponden a los servicios mínimos de enfriamiento y calentamiento requeridos.

d) Valor exacto de los servicios consumidos tomando en cuenta el mínimo acercamiento de temperatura permitido (el mismo para todos los apareamientos), y los apareamientos especificados como prohibidos o forzosos por el diseñador.

Los problemas con restricciones (como apareamientos prohibidos o requeridos) se han representado como el Problema de Transportación de Programación Lineal, usado inicialmente por Cerdá *et al.* (1983) [14].

e) Lo mismo que d) pero el mínimo acercamiento de temperatura es variable y depende de cada apareamiento.

Los primeros algoritmos que tenían los objetivos del tipo a) o b) eran eficientes en problemas sin punto de pliegue, pero fallaban cuando estos se presentaban en el problema.

Los algoritmos c), d) y e) representan un avance con respecto a los anteriores, ya que se logra la determinación exacta del consumo de energía mínima en problemas con *pinch*.

El fijar un límite mínimo de servicios consumidos tiene por objetivo restringir el espacio de búsqueda y sirve como criterio para determinar la optimalidad de la red sintetizada. Esto es especialmente importante cuando se utilizan métodos de búsqueda, en los cuales es necesario usar un criterio adecuado para truncar las posibilidades que han rebasado cierta expectativa, a fin de descartar familias de configuraciones no óptimas.

2.9.2 Área de transferencia de calor

Hohmann (1971) [43] usando el diagrama Temperatura vs. Calor, y Nishida (1971) [11] que aparea las corrientes de acuerdo con la temperatura decreciente de entrada en un diagrama de contenido calorífico, diseñan redes orientadas a tener un área de transferencia de calor mínima.

Conceptualmente, esta área mínima corresponde a un intercambiador diseñado para el apareamiento de "supercorrientes", que se forman sumando el valor de los flujos másicos multiplicados por el C_p (Calor específico a presión constante) de las corrientes que están en un intervalo de temperatura dado. De aquí en adelante, este término se representará como FC_p , (siglas del inglés *Flow Rate Cp*).

Dada la ecuación de área de transferencia de calor A :

ECUACIÓN 1.

$$A = \int (U * \Delta T)^{-1} \delta Q$$

donde U es el coeficiente global de transferencia de calor.

- ΔT es el gradiente de temperaturas en el punto en donde se transfiere el diferencial de calor dQ .
- Q es el calor intercambiado.

Para diferentes redes que resuelven el mismo problema de recuperación de calor, la cantidad de calor Q es constante. El coeficiente global de transferencia de calor permanece casi constante, independiente de las decisiones de apareamiento, al igual que los gradientes promedio. Por lo tanto, la superficie total de diferentes redes que resuelven el mismo problema es muy similar. La variación es usualmente de 3%, y esto explica por qué el área mínima no es un objetivo muy conveniente (Boland y Linnhoff, 1979 [27]).

Sin embargo, Rathore y Powers (1975) [32] y Nishida *et al* (1977) [23] han encontrado que para un problema dado, existen varias configuraciones que tienen el mismo costo de operación (es decir, la misma cantidad de servicios consumidos), pero el área de éstas es substancialmente diferente, haciendo una diferencia en costos totales hasta de 10% entre la red óptima y las demás. Cabe señalar que el algoritmo de Nishida *et al* genera redes con muchos intercambiadores pequeños, violando el menor número de unidades. De esta manera, a pesar de tener un área total mínima, ésta se encuentra distribuida en demasiados intercambiadores, aumentando así el costo total del área.

Jezowski *et al* (1986) [29] reportan un caso en el cual dos redes con la misma cantidad de servicios y el mismo número de unidades; la red que tiene un área mayor total (con 7% de diferencia) tiene un costo ligeramente menor que la red de menor área, debido a la distribución de ésta.

Nishida (1977) [23] modificó su algoritmo para incluir servicios en el apareamiento. Saboo (1986) [44] abordó el problema usando Programación Lineal.

2.9.3 Número de unidades

Hohmann propuso que el número mínimo de unidades es función del número de corrientes de proceso y de servicios (**N**).

ECUACIÓN 2

$$\text{Número mínimo de unidades} = N - 1$$

Para obtener este resultado se supone que cada apareamiento eliminará completamente al menos una de las dos corrientes involucradas, y dejará la otra corriente con un solo residuo.

Existen ciertos problemas en los cuales son mutuamente incompatibles el número mínimo de unidades y el mínimo de servicios consumidos. Esta incompatibilidad es resultado de la división del problema en el punto de pliegue en dos subsistemas independientes; aunque en cada subsistema se tenga el número mínimo de unidades ($N - 1$ unidades, donde N es el número de corrientes presente en cada subsistema), pueden existir un apareamiento entre las mismas corrientes, uno arriba y otro abajo del *pinch*, dando lugar a redes cíclicas.

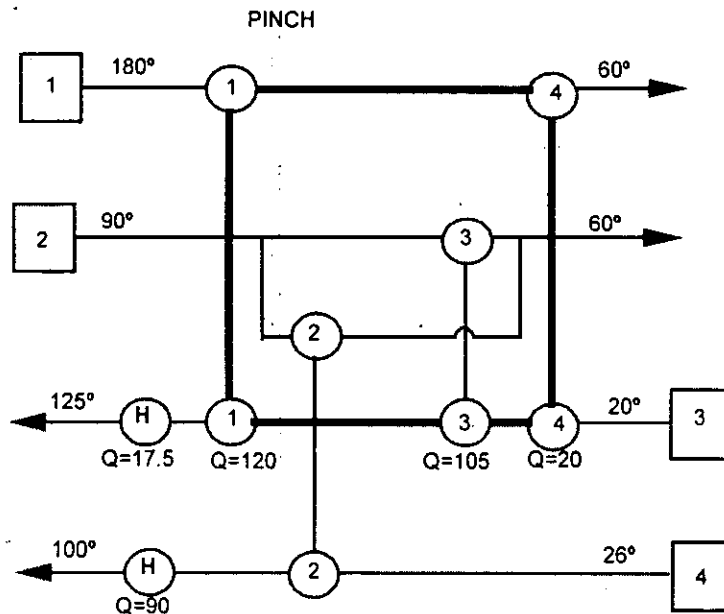


FIGURA 5
Apareamiento cíclico alrededor del pinch

Esta relación es compatible con el mínimo de servicios consumidos cuando se aplica por separado a los subsistemas de arriba y de abajo del punto de pliegue (denominados en la literatura como "frente caliente" y "frente frío" respectivamente).

Boland y Linnhoff (1979) [27] extendieron esta regla para tomar en cuenta el número de subsistemas y los ciclos dentro de la red, ya que la metodología del punto de pliegue puede obligar a separar el problema en dos subsistemas. Linnhoff y Turner (1981) [45] introducen el concepto de Máxima Recuperación de Energía (*MER*, por sus siglas en inglés. De aquí en adelante, se hará referencia a este término como **MRE**) para un número de unidades.

Cerdá y Westerberg (1983) [14] posteriormente formulan un modelo de Programación Mixta Entera Lineal usando los conceptos anteriores.

2.9.4 Costo anual total

Ya que aún logrando alguno de los objetivos anteriores no se garantiza un costo óptimo, se usa el costo anual total como objetivo.

El costo anual total está formado por los siguientes componentes:

INVERSIÓN FIJA	ENERGÍA	OTROS
Ingeniería	Costo del combustible	Mantenimiento
Costo del equipo	Ineficiencias en	Bombeo (ΔP)
Instalación y mano de obra	combustión, pérdidas de calor	

Los costos de capital varían de acuerdo con la estructura de la red, así como el tamaño de los intercambiadores (Ahmad y Linnhoff, 1990 [35]). Es evidente que existe un compromiso entre el nivel de consumo energético de la red, el área total de intercambio de la red, y el número de unidades que se necesitan. El

tratar de optimizar alguno de éstos parámetros por separado tiene implicaciones en los elementos restantes, afectando el costo total anual.

Al considerar estos factores, se puede ver que existen soluciones óptimas dependiendo del costos de la energía en relación con el costo de la inversión fija; se puede ver en la **FIGURA 6** que el Costo Total Anual es $f(\text{Costos fijos, costos variables})$.

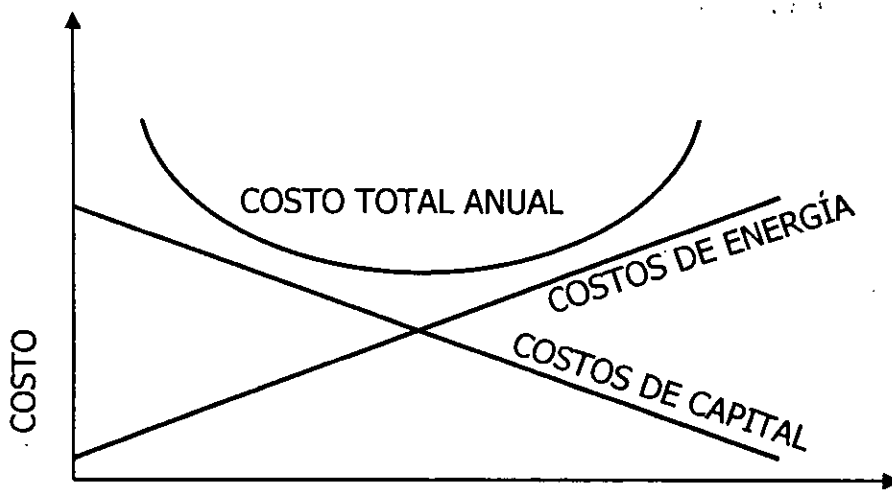


FIGURA 6.- Costo Total Anual como función de costos fijos y variables. Se observa como varía el óptimo del Costo Total Anual, al cambiar los costos fijos en relación con los variables.

Es por esta razón que el costo total anual se toma como el principal criterio para determinar la conveniencia del diseño. Sin embargo, otros factores pueden ser determinantes en la elección de la configuración final: facilidad de operación y mantenimiento, flexibilidad a los cambios en los parámetros de operación, restricciones físicas o de seguridad en las corrientes que se pueden aparear, etc.

En el presente trabajo, se toma como base el costo total anual para comparar la efectividad de las heurísticas utilizadas, y comparar contra otros trabajos reportados en la literatura, independientemente de que hayan utilizado enfoque heurístico o matemático.

Para calcular el Costo Total Anual, se consideraron los casos de estudio reportados en la literatura, tomando los parámetros ahí definidos. El uso de éstos casos de estudio permite la comparación con otros trabajos realizados anteriormente; no obstante lo anterior, los parámetros considerados en su resolución no son limitantes para el sistema, ya que el usuario puede utilizar cualquier parámetro o método de cálculo para estimar la inversión fija (cambiando el tiempo de depreciación, parámetros de la fórmula de costos, ΔT , etc) o incluso reemplazar la fórmula de cálculo.

La experiencia derivada de comparar la efectividad de las heurísticas usando el costo total anual, beneficiará al ingeniero de procesos que realice la síntesis, ya que podrá discriminar y seleccionar entre diferentes heurísticas y estrategias de diseño.

2.9.4.1 Cálculo de costos en los problemas reportados en la literatura

Por conveniencia, se utilizan las siguientes suposiciones en la resolución de los problemas:

- Uso de intercambiadores a contracorriente, de coraza y tubos, un solo paso
- No hay cambios de fase
- Valores iguales del coeficiente de transferencia en todos los intercambiadores
- El costo de intercambiadores, calentadores y enfriadores se calcula en función de su área, con la Ecuación 4.
- No se considera un costo asociado a las divisiones, uniones, e instalación de la tubería.
- Tampoco se consideran los costos de operación y mantenimiento, aislamiento, pérdidas de calor, tubería y bombeo de los fluidos.

Desde los primeros trabajos reportados en la literatura, los costos relacionados con la inversión fija (intercambiadores, calentadores y enfriadores) se han calculado con base en su área de transferencia, mediante las expresiones

empíricas $C_{interc_i} = \alpha * (A)_{INTi}^b$, $C_{cal_i} = \alpha * (A)_{CALi}^b$, $C_{enfr_i} = \alpha * (A)_{ENFRI}^b$, donde C_{interc_i} , C_{cal_i} y C_{enfr_i} son los costos totales del intercambiador, unidad de calentamiento y de enfriamiento, respectivamente. α es un factor empírico de costo, A es el área de transferencia de la unidad i , y b es un índice de costo. Típicamente, $\alpha = 350$ y $b = 0.6$, reconociendo la economía de escalas (Nishida *et al*, 1977 [23]); el área se expresa en pies cuadrados, y el costo total resulta en dólares norteamericanos.

El Costo Total Anual está dado por la fórmula:

ECUACIÓN 3

CTA = Inversión fija + Costo de la energía

Donde: CTA = Costo Total Anual,

Inversión fija y Costo de la energía, están dados por la ECUACION 4 y 5, respectivamente.

ECUACIÓN 4

$$\text{Inversión fija} = \delta \left[\sum_i C_{INTi} + \sum_i C_{CALi} + \sum_i C_{ENFRI} \right]$$

Donde: C_{INTi} = Costo del intercambiador_i

C_{CALi} = Costo del calentador_i

C_{ENFRI} = Costo del enfriador_i

δ = depreciación anual

ECUACIÓN 5

$$\text{Costo de la energía} = \sum r_k Q_k \theta_k$$

Donde: r costo unitario del servicio k

Q cantidad del servicio por hora del servicio k

θ horas de operación efectiva al año del servicio k

Estas suposiciones, aunque pueden modificar el estimado del costo final respecto al real, son válidas para encontrar la estructura óptima.

Los costos de energía se toman de la definición de los problemas propuestos. Es así como en la literatura, los autores han definido problemas que se toman como estándares, y que las nuevas propuestas de resolución siguen tomando como base estos problemas, a fin de poder comparar la efectividad de las nuevas técnicas de resolución, a pesar de que los parámetros económicos no corresponden precisamente a la situación actual de la industria.

Por ejemplo, el problema 5SP1, definido en 1969 por Masso et al., aún sigue siendo un caso de estudio vigente, y utilizado en varios artículos de actualidad.

2.9.4.2 Optimización a priori del ΔT_{\min}

El ΔT_{\min} tiene un efecto importante en la determinación del costo total anual. Un ΔT_{\min} grande se traduce en menores costos fijos, pero con costos de energía altos. Asimismo, un ΔT_{\min} pequeño implica mayor área, con costos de energía bajo. Existe un punto óptimo, en el cuál el costo total anual es el menor.

El método consiste en añadir las contribuciones de los objetivos de área, energía

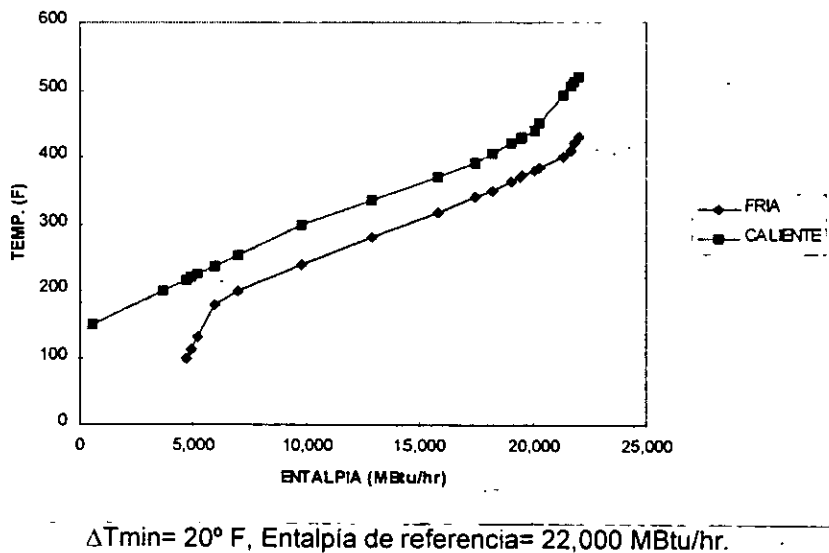
y unidades al costo total anual. Como los objetivos anteriormente mencionados se pueden estimar antes de iniciar el diseño, se calculan los costos anuales totales para diferentes valores de temperatura mínima de acercamiento entre las corrientes de un apareamiento. Una vez que se establece el valor óptimo de este valor, se inicia la síntesis. Como ejemplos de este método tenemos el de Ahmad y Linnhoff, 1984 [45], 1986 [46] , y Gundersen y Naess (1984) [48].

Ahmad *et al.* [45] utilizaron el diagrama de gradiente de temperaturas para examinar si cada uno de los apareamientos estaba haciendo un buen uso del gradiente de temperatura disponible, al determinar si la transferencia de calor es "vertical". En el diagrama Temperatura vs. Entalpía, la distancia entre las curvas compuestas representa el gradiente de temperatura disponible en cada punto del mismo. Tomando como base el diagrama T vs. H, Ahmad et al [45] construyeron una gráfica usando como eje de las abcisas la temperatura fría, y como el gradiente de temperatura como ordenada, obteniéndose una curva que representa el gradiente disponible de temperatura. Véase la **Figura 7**.

Las temperaturas de cada intercambiador se grafican en dicho diagrama. Si el intercambiador está por encima o por debajo de la curva de gradiente disponible, significa que la transferencia de calor en el diagrama T vs. H es de manera "lateral", y se está sobreutilizando o subutilizando el gradiente, respectivamente. Por otra parte, si el intercambiador coincide exactamente con la curva de gradiente disponible, significa que el intercambio de calor en el diagrama T vs. H es "vertical", y esto optimiza el área, al mismo tiempo que ayuda a cumplir las metas de servicios mínimos. El mal uso del gradiente de temperatura disponible, siempre resulta en costos asociados al incremento de área, pero no necesariamente en un aumento de consumo energético. La información proporcionada por éste análisis es de tipo cuantitativa. Véanse las Figuras 8a, 8b y 8c.

FIGURA 7.

a) Diagrama T vs. H para el problema 7SP1



b) Diagrama ΔT vs. T fría para el problema 7SP1

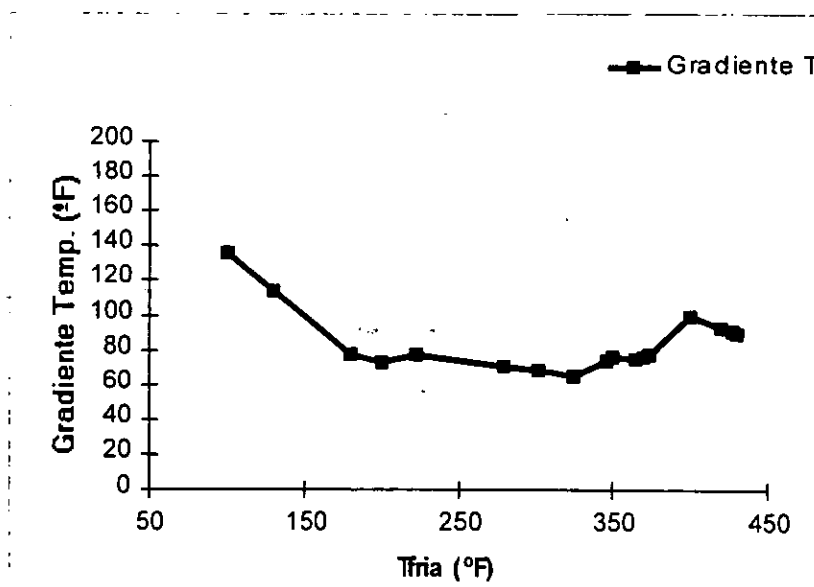


FIGURA 8a.

Utilización del óptimo del ΔT disponible en los diagramas T vs. H, y ΔT vs. T fría [transferencia de calor "vertical"]

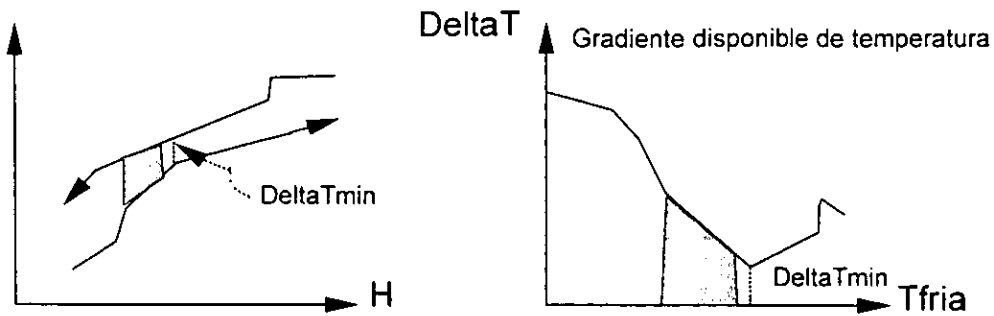


FIGURA 8b.

Sobreutilización del ΔT disponible en los diagramas T vs. H, y ΔT vs. T fría [transferencia de calor horizontal]

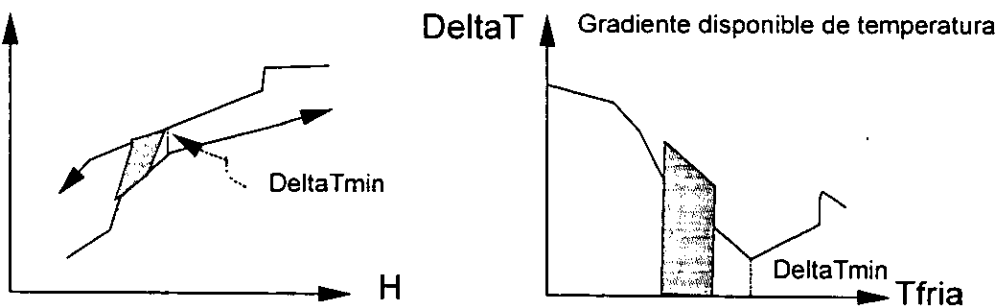
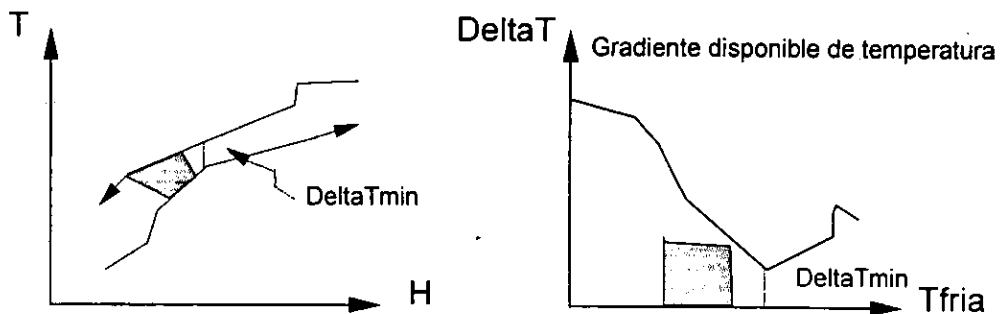


FIGURA 8c.

Subutilización del ΔT disponible en los diagramas T vs. H, y ΔT vs. T fría [transferencia de calor horizontal]



2.10 HEURÍSTICAS EN LA SÍNTESIS DE REDES DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Básicamente, estas reglas heurísticas se pueden dividir en tres clases:

- a) Heurísticas de selección de corrientes para un apareamiento.
- b) Heurísticas de restricción de apareamientos.

c) Heurísticas de tipo de intercambio de calor para un apareamiento dado.

También existen otras adicionales, como las de determinación de divisiones de flujo, y colocación de servicios dentro de la red .

2.10.1 Heurísticas de selección de corrientes

En el trabajo de Nishida *et al.* (1971 [11], 1977 [23]), se propone el apareamiento de la corriente caliente con la temperatura más alta de entrada, con la corriente fría con la temperatura objetivo más alta. En el trabajo de 1971 se expone la prueba de que este tipo de apareamiento conduce a una red con la menor área posible; para realizar la demostración se supuso que:

- Los coeficientes de transferencia de calor eran los mismos para todos los intercambiadores.
- Intercambiadores de tubo y coraza de un solo paso a contracorriente.
- Una correlación del costo del tipo $Costo_i = \alpha * (A)_i^b$ donde α es un factor de costo, A es el área del intercambiador i , y b es un índice de costo. Inicialmente se usó $b= 1$, y en el trabajo de 1977 se modificó a $b= 0.6$ que es más preciso.

El apareamiento se representa mediante un diagrama Temperatura vs. Calor. Cuando coinciden las corrientes calientes en un intervalo de temperatura $T_{superior} - T_{inferior}$ se suman los FCp de cada corriente involucrada en el intervalo y se considera ese "bloque" como una sola corriente. De esta manera, la nueva corriente tiene un calor igual a:

ECUACIÓN 6

$$FCp_{total} * (T_{superior} - T_{inferior})$$

Donde $T_{superior}$ es la temperatura inicial del intervalo
 $T_{inferior}$ es la temperatura final del intervalo

ECUACIÓN 7

$$FCp_{total} = \sum_{i=1}^n FCp_i$$
, de donde FCp_i es el FCp de la corriente i

involucrada en el intervalo correspondiente, y n es el número de corrientes en el mismo intervalo. Este mismo procedimiento se aplica a las corrientes frías.

Se hace el apareamiento entre los bloques calientes con temperatura de entrada más alta y los bloques fríos con temperatura objetivo más baja. Después de calcular el calor transferible entre los bloques, se procede a la repartición del calor entre las corrientes individuales que conforman el bloque; para lograr distribuir la cantidad exacta de calor requerido o cedido por cada corriente individual se puede recurrir a la subdivisión de un bloque en nuevos intervalos más pequeños o bien, a dividir el flujo másico las corrientes individuales.

Este método es equivalente al apareamiento de "supercorrientes", que cumple el objetivo de optimizar el área, pero el número de corrientes requeridas solamente corresponde al mínimo si cada apareamiento en el intervalo correspondiente a un bloque puede realizarse con un solo intercambiador. Como los bloques generalmente están formados por varias corrientes, que a su vez están divididas en intervalos de temperatura, el método de apareamiento genera un número de intercambiadores muy por encima del número de intercambiadores mínimo, aunque son de una área pequeña. Esto se debe a que no se transfiere el máximo calor posible para cada apareamiento, sino que se limita al intervalo de temperatura considerado.

El trabajo de Nishida *et al.* (1977) [23] también incluye el "apareamiento" de los servicios según su temperatura, de acuerdo con las mismas reglas, que evitan el uso de servicios con temperaturas extremas colocados en los extremos de la red (Ver FIGURA 3).

Es importante hacer notar que se ha encontrado que para un problema

dado de recuperación de energía, las diferentes soluciones óptimas o subóptimas tienen casi el mismo costo de operación de servicios, y que lo que hace la diferencia es el costo de inversión fija debido a la diferencia de área total de transferencia de calor. Esta observación es confirmada por Nishida *et al.* (1977) [23] y Rathore (1982) [7], aunque cabe aclarar que para una misma área total de transferencia de calor, la inversión fija es menor si se agrupan los intercambiadores en un número pequeño de unidades, que si se tienen muchos intercambiadores de área pequeña.

Otra heurística también orientada hacia redes con área mínima es la propuesta por Ponton y Donaldson (1974) [21]; aunque también recomiendan aparear la corriente caliente de mayor temperatura de entrada con la corriente fría de mayor temperatura de salida, no se agrupan las corrientes en supercorrientes, sino que simplemente en cada apareamiento se transfiere el máximo calor posible. Esto origina redes mucho más simples que las generadas con la heurística de Nishida *et al.*, redes que son fácilmente controlables, con la ventaja adicional de concentrar el área en menos intercambiadores y con una reducción en el costo de la inversión fija, según la siguiente ecuación:

ECUACIÓN 8

$$\alpha * (A_1^b + A_2^b + \dots + A_m^b) \geq \alpha * (A_1 + A_2 + \dots + A_m)^b$$

Donde A_i es el área de la unidad de transferencia i

para $0 < b < 1$, donde m es el número de intercambiadores y el costo se correlaciona con la ecuación exponencial anteriormente dada, con $b = 0.6$.

Esto implica que si tenemos una área fija de transferencia de calor, la inversión fija de los intercambiadores puede ser reducida si se combinan varios intercambiadores en uno solo. Generalmente se pueden lograr redes con un número mínimo de intercambiadores de calor, excepto en los casos en que el FCp de alguna corriente sea mucho mayor que cualquiera de las demás.

Este método y todos los basados en la misma regla de apareamiento también tienen la ventaja de lograr redes con un mínimo de servicios, ya que se asegura un aprovechamiento eficiente de los gradientes de temperatura. Ponton y Donaldson recomiendan también una heurística para recuperación de calor "frío", el apareamiento de la corriente fría con temperatura más baja de entrada, con la corriente caliente de menor temperatura de salida, que tiene la misma ventaja explicada anteriormente.

Actualmente es una de las heurísticas más utilizadas, y se ha combinado con métodos termodinámicos y con algunas modificaciones (Rev y Fonyo, 1986 [25]; Boland y Linnhoff, 1979 [27]).

Una de las modificaciones al método de Ponton y Donaldson más exitosas es la propuesta por Muraki y Hayakawa, 1982 [24]. Se propone el apareamiento de la corriente fría con la temperatura objetivo más caliente, con la corriente caliente con la que se obtenga el mayor valor del cociente $Q/\alpha^*(A)^b$ (calor intercambiado entre costo de la área). De esta manera, se asegura que el apareamiento es óptimo en el costo; generalmente el uso de este criterio de selección de la corriente caliente lleva a resultados parecidos a los que se obtienen utilizando el algoritmo de Ponton y Donaldson. Este método usa información de la localización del punto de pliegue, así como el apareamiento de los servicios de acuerdo con la regla mencionada.

Rathore (1982) [7] propone una heurística orientada a lograr el mínimo número de unidades. El apareamiento se hace ordenando las corrientes calientes y frías en orden decreciente a su FC_p , y apareando la primera corriente caliente con la primera fría, la segunda caliente con la segunda fría, etc., hasta que las únicas corrientes originales que queden sean todas calientes o frías; se procede a realizar apareamientos entre las corrientes originales y las corrientes residuales ordenadas de la misma manera y, por último, se hace apareamientos entre las corrientes residuales y al acabarse las corrientes residuales calientes o frías, se usan los servicios.

Esta estrategia produce redes que tienden a un número mínimo de unidades debido a que "elimina" primero las corrientes que pueden requerir una carga calorífica más grande (usando el FCp como una medida de la carga), asegurando así intercambiadores con carga calorífica grande. Sin embargo, no es muy efectiva ya que no se hace un uso racional de los gradientes de temperatura, y las redes sintetizadas de esta manera tienden a consumir más servicios de los necesarios.

2.10.2 Heurísticas de restricción de apareamientos

Aunque no se encuentra mucha literatura al respecto de heurísticas de este tipo, es importante considerar este tópico, ya que en problemas de diseño reales, existen restricciones tales como:

- Mezclas peligrosas en caso de que haya fugas en el intercambiador.
- Distancia física entre las corrientes.
- Consideraciones respecto a los fluidos manejados que hacen que un intercambio entre diferentes corrientes sea considerado poco conveniente, *a priori*. Cabe recordar que entre los supuestos del diseño inicial se considera un coeficiente de intercambio constante para todos los intercambiadores, así como intercambiadores de tipo coraza a contracorriente de un solo paso; estos supuestos se podrían alejar mucho de la realidad si se habilitan ciertos apareamientos.
- También existen otras consideraciones respecto al control de la red sintetizada que pueden afectar el proceso de diseño, aunque hasta el momento, el procedimiento normal es diseñar primero la red, y después probar sus características de controlabilidad.

Por otra parte, los métodos matemáticos asignan penalizaciones a los apareamientos indeseables, para evitar que se lleven a cabo. Como ejemplo de esto, se puede citar el trabajo de Cerdá y Westerberg, 1983 [14], Papoulias y Grossman, 1983 [19], Viswanathan y Evans (1987) [48].

2.10.3 Heurísticas de tipo de apareamiento

Los tipos de apareamientos entre dos corrientes que pueden presentarse son los siguientes:

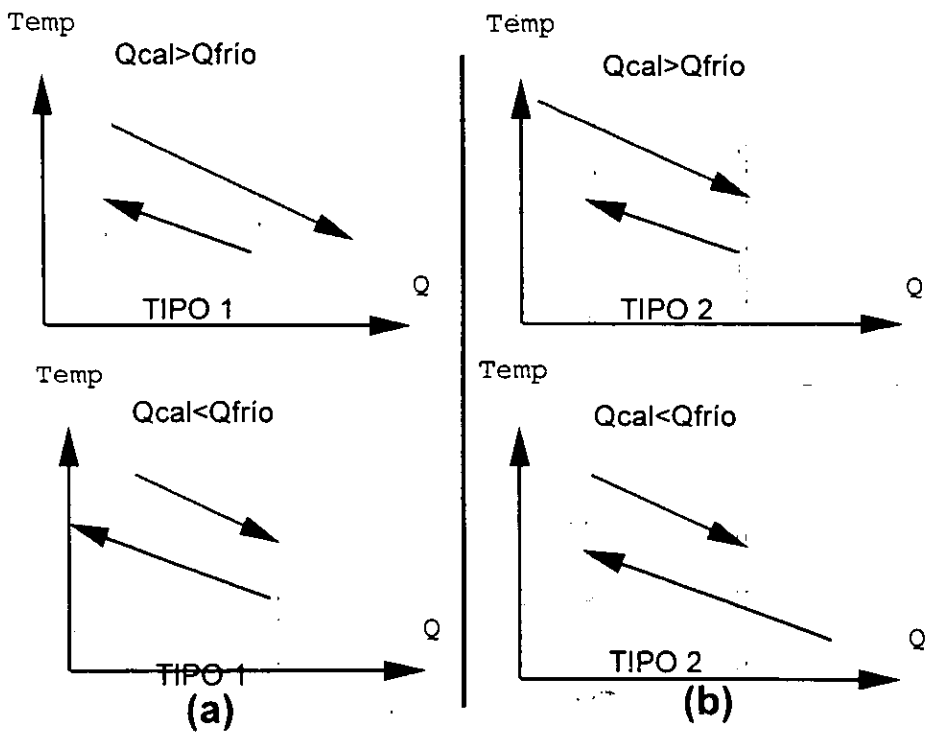


FIGURA 9
Tipos de apareamientos. (a) Tipo1, irreversibles (heurística CALOR1) (b) Tipo 2, reversibles (heurística CALOR2)

Los apareamientos del tipo 1, resultan por lo general en intercambiadores con menor área, debido a que tiene un gradiente de temperatura grande, pero tienen la desventaja de producir apareamientos muy irreversibles, debido a que los residuales de las corrientes son menos transferibles.

Los apareamientos del tipo 2 reducen las irreversibilidades, debido a una distribución racional de la diferencia de temperaturas en el apareamiento, además de que las corrientes residuales de este tipo de apareamientos tienen mayor probabilidad de poder aparearse con otras corrientes. Se pueden emplear servicios con temperaturas menos extremas, y por tanto, más baratos.

Los apareamientos 1a y 2b corresponden al tipo extremo caliente (*hot end*, en inglés) debido a la localización del calor transferible en la corriente con mayor calor. Este tipo de apareamientos son los usados por Ponton y Donaldson, y heurísticas derivadas. Los apareamientos 1b y 2a son del tipo extremo frío (*cold end*).

Jezowski y Hahne (1985) hicieron un estudio de varias redes óptimas, tomando en cuenta el compromiso entre menor costo de inversión (relacionado con apareamientos tipo 1) y menor costo de servicios (relacionado con apareamientos tipo 2), y usaron el siguiente criterio para seleccionar el tipo de apareamiento:

ECUACIÓN 9.

$$CS = \frac{(I_{h-c})_1 + (I_r)_1}{(I_{h-c})_2 + (I_r)_2} * FACTOR$$

Si $CS > 1$, seleccionar las opciones 2a o 2b.

Si $CS < 1$, seleccionar las opciones 1a o 1b.

$(I_{h-c})_1, (I_{h-c})_2$

Costo del área del intercambiador entre las corrientes h y c, para la 1era. y 2a. opción.

$(I_r)_1, (I_r)_2$

Costo del área del intercambiador entre la corriente residual del apareamiento I_{h-c} y otra corriente, para la 1era. y la 2a. opción.

FACTOR

Variable de decisión de la heurística.

El valor de *FACTOR* está determinado por el usuario. Un valor de *FACTOR* igual a 1.0 significa que solo el costo de inversión de los dos tipos de apareamiento se toma en cuenta; para un *FACTOR* mayor de 1.0, se le da preferencia a la opción 2.

CAPITULO III

FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS: MÉTODO DEL PUNTO DE PLIEGUE

3.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DEL PUNTO DE PLIEGUE

Actualmente, resulta muy difícil pensar en el diseño de sistemas de recuperación de energía sin utilizar la tecnología del "pinch" o punto de pliegue. Esta herramienta termodinámica ha tenido un impacto definitivo en la industria, y puede considerarse una tecnología "madura", ya que se aplica como "estándar" al diseño y remodelación de plantas químicas y se cuenta a la fecha con una extensa literatura al respecto. Dada la utilidad del método pinch, se han incorporado estas reglas en el asistente de diseño, de tal manera que puedan utilizarse en combinación con otras heurísticas de apareamiento y distribución de calor. El resultado es un sistema más robusto y poderoso. El usuario puede decidir si estas reglas pinch estarán habilitadas o no en el momento de la síntesis.

3.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Dada una serie de corrientes calientes y frías que requieren enfriarse o calentarse, respectivamente, se plantea el problema de diseñar una red de recuperación de calor, del tal manera que se minimice el costo de los servicios consumidos, y esta red sintetizada sea operable.

Con el fin de analizar el problema de recuperación de calor, se puede construir una "curva compuesta" de todas las corrientes frías y calientes, mediante el uso de las "supercorrientes".

Para construir una supercorriente fría, se suman todos los FCp de las corrientes frías que se encuentran en un intervalo de temperatura, como se

explicó en el Capítulo II, sección 2.10.1., en lo referente al algoritmo propuesto por Nishida (1971) [11].

La supercorriente caliente debe ser más caliente que la supercorriente fría, por lo menos en una cantidad igual al gradiente mínimo de temperatura que deben tener las corrientes en un intercambiador (ΔT_{min}). La distancia horizontal entre las puntas de las curvas definen el mínimo de servicios de calentamiento y de enfriamiento posibles, para el ΔT_{min} seleccionado. Si se escoge un valor de ΔT_{min} menor, se reduce el consumo de los servicios, pero se tiene un gradiente menor de temperatura y se tiene que utilizar un área mayor.

Si en el punto más estrecho entre las curvas se tiene un gradiente de temperatura igual al ΔT_{min} , éste dará lugar a un cuello de botella, ya que el máximo gradiente de temperatura posible en ese punto es ΔT_{min} ; este punto ha sido llamado pinch o punto de pliegue. Este punto de pliegue tiene una importancia capital en el diseño de redes de intercambiadores de calor, ya que divide el problema en dos subsistemas: arriba y abajo del pinch.

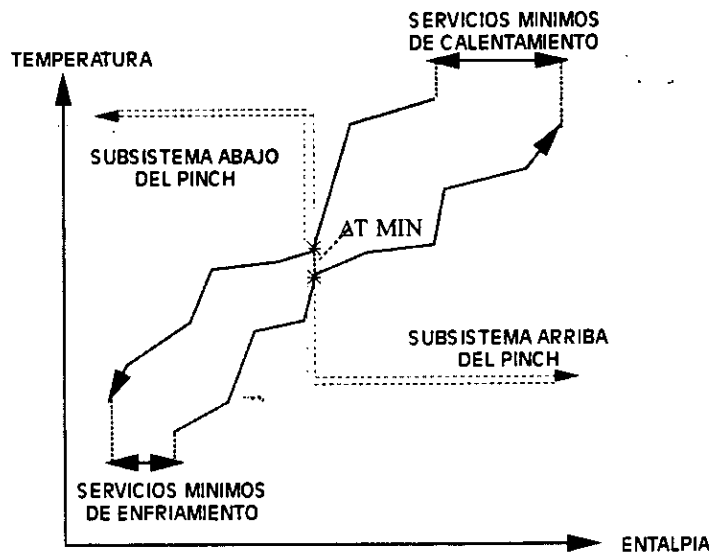


FIGURA 10

Diagrama Temperatura-Entalpía, con las supercorrientes fría y caliente.

Si suministramos más servicios de calentamiento que el mínimo necesario, el calor en exceso será transferido a través del pinch , ya que las corrientes arriba de éste no pueden absorber más calor que el necesario según el balance de entalpía; el consumo de servicios de enfriamiento aumenta en una cantidad igual al exceso que se transfirió alrededor del pinch.

Dado que arriba del pinch no se necesitan servicios de enfriamiento, el extraer calor del subsistema situado arriba del pinch aumenta el consumo de servicios de calentamiento; de la misma manera, si suministramos calor abajo del pinch aumenta los servicios de enfriamiento.

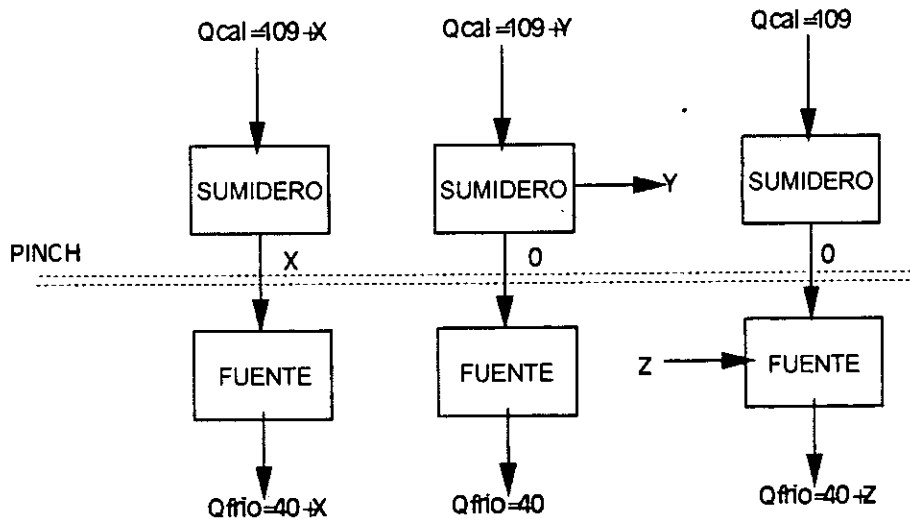


FIGURA 11

- (a) Efecto de la transferencia de calor a través del pinch.
- (b) Efecto de los servicios de enfriamiento arriba del pinch.
- (c) Efecto de los servicios de calentamiento abajo del pinch.

Por lo tanto, es claro que el diseño con máxima recuperación de energía tiene un flujo nulo de calor alrededor del punto de pliegue. Cualquier violación a este principio provoca un aumento de servicios de calentamiento y de enfriamiento en una cantidad igual al calor transferido alrededor del pinch.

Este principio permite al diseñador :

- Determinar objetivos de energía *a priori*.
- Diseñar redes de consumo mínimo de energía, como dos subsistemas: arriba y abajo del pinch.
- Interactuar en cada paso de la síntesis.
- Obtener un diseño transparente.

Además, esta tecnología ha expuesto varios mitos (Linnhoff y Vrevedeld, 1984 [50]):

- Para diseñar mejores procesos, se necesita más tiempo.
- La integración calorífica de un proceso implica problemas de control.
- La conservación de calor siempre tiene un costo alto de diseño.

En el **Anexo 1** se muestra la metodología para la localización del punto de pliegue, de acuerdo a lo propuesto por Linnhoff y Flower (1978) [12].

3.3 PROBLEMAS TIPO UMBRAL

No en todos los problemas de síntesis de integración calorífica presentan el pinch; en algunos problemas, éste no se presenta hasta que se incrementa el ΔT_{\min} más allá de un valor umbral, $\Delta T_{\min \text{umbral}}$. Cuando alcanza este último valor, el problema sólo se necesita un tipo de servicio (calentamiento o enfriamiento).

Si se aumenta el ΔT_{\min} hasta igualar el valor umbral, el problema presenta punto de pliegue, pero no aumenta el consumo de servicios; si se aumenta el ΔT_{\min} arriba del valor umbral, además de introducirse un punto de pliegue, se crea la necesidad de utilizar ambos tipos de servicios.

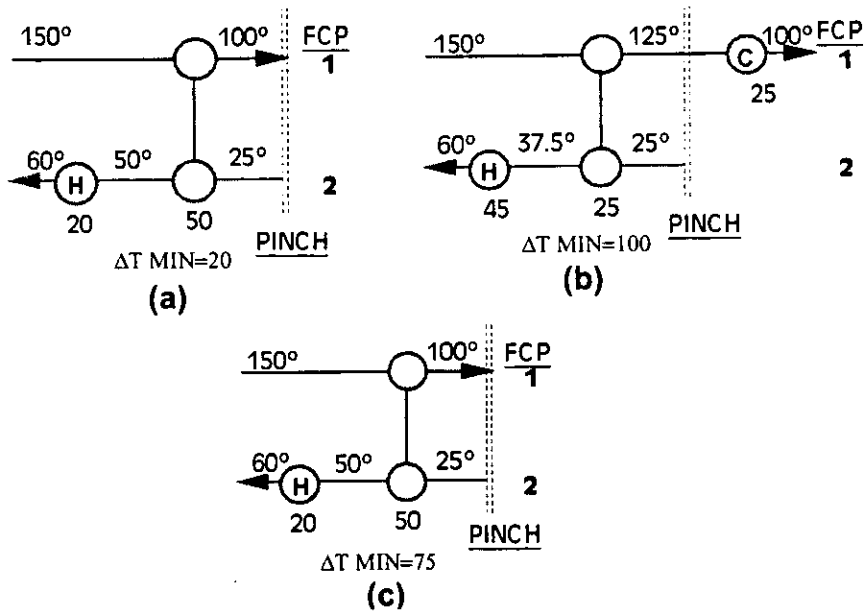


FIGURA 12

Tipos de problemas de transferencia de calor.-

(a) Problema Umbral (b) Problema con punto de pliegue (c) Límite del problema umbral ($\Delta T = \Delta T_{min}$).

Por lo general los problemas de tipo umbral se dan cuando corrientes muy calientes se aparean con corrientes muy frías; este tipo de procesos resulta cada vez menos frecuente debido a que se procura evitar el uso de servicios con temperaturas extremas, se puede decir que la mayoría de los procesos actuales presentan punto de pliegue.

Puede crearse un nuevo punto de pliegue al usar un servicio de temperatura intermedia e incrementarse su uso de tal manera que satisfaga los requerimientos de la región, como se muestra en el dibujo.

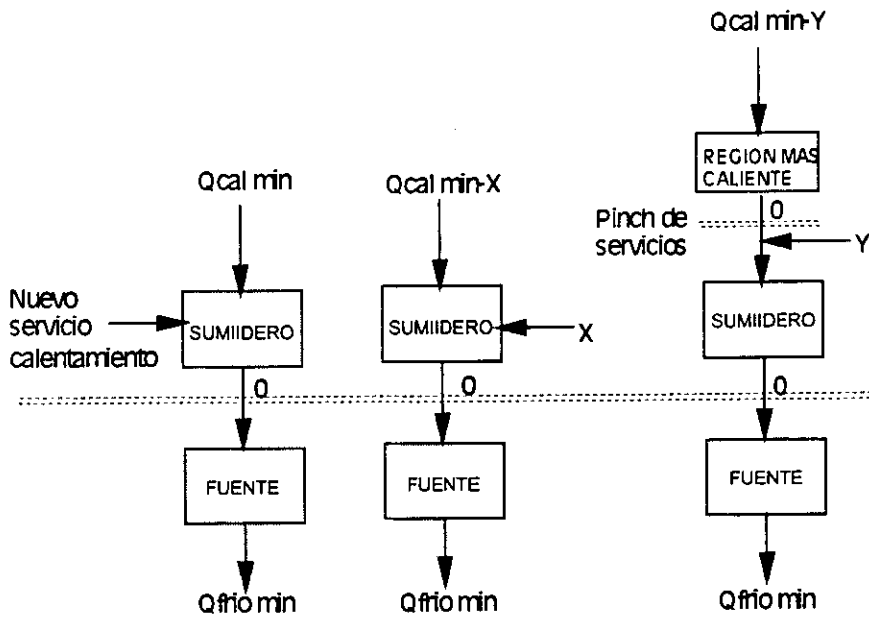


FIGURA 13

Creación de nuevos puntos de pliegue.-

- (a) Localización correcta del servicio de calentamiento
- (b) Distribución del mínimo requerimiento de calentamiento
- (c) Punto de pliegue de servicios

3.4 MÉTODO DE DISEÑO DEL PUNTO DE PLIEGUE

Ya que el punto de pliegue constituye la región con más restricciones, se puede considerar que los apareamientos pinch son determinantes para lograr una recuperación máxima de la energía aprovechable.

Cuando se tiene un problema que presenta punto de pliegue, es conveniente comenzar a diseñar en la región del pinch, -por ser la zona que tiene más restricciones de temperatura-, y moverse gradualmente lejos de ésta.

En el **Anexo 2, 3, 4, 5, 6 y 7** se detallan las reglas del pinch, en cuanto a apareamientos permitidos, número de corrientes, desigualdad de FC_p , las heurística de eliminación y el problema restante. En el **Anexo 8** se muestra el resumen del método pinch.

3.5 FENÓMENOS DE PINCH OCULTO Y PSEUDO PINCH

Existen casos en los cuales a pesar de seguirse los principios anteriores, se obtienen redes con estructuras demasiado complicadas como consecuencia de usar el máximo posible de carga calorífica, o bien, redes que violan el consumo mínimo de servicios (Rev y Fonyo, 1986 [25]). Esto se debe a situaciones relacionadas con la presencia de pinch oculto y/o pseudo-pinch.

3.5.1 Pinch oculto

Al determinarse el punto de pliegue y comenzar a hacer los apareamientos, pueden modificarse los balances de entalpía creando nuevos puntos de pliegue que únicamente pueden detectarse realizando los balances de entalpía explicados anteriormente, para tener la localización del pinch después de cada apareamiento.

Si se detecta que el nuevo apareamiento viola el consumo mínimo de energía, es necesario disminuir la carga calorífica del intercambiador, y volver a realizar el balance de entalpía, para asegurarse que no se incurre en el mismo problema.

Una vez que se localiza el pinch oculto mediante este proceso iterativo, se aplican las mismas reglas que en el método de diseño pinch.

3.5.2 Falso pinch

Cuando en un problema que presenta $\Delta T_{\min} < \Delta T_{\min \text{umbral}}$ se obtiene una red con un número de unidades mayor al mínimo que predice la formula de Euler, y es recomendable especificar una carga calorífica mínima aceptable; si un apareamiento presenta una carga calorífica menor, se rechaza por no ser económico y se considera la necesidad de hacer una división de flujo.

Es aconsejable "forzar" el método de diseño pinch a una temperatura cercana a la temperatura pinch, que involucre a todas las corrientes del

problema. Como la temperatura del pinch solamente puede ser definida por las temperaturas de entrada de las corrientes, se puede usar como la temperatura "falso pinch" la temperatura de entrada de la corriente más cercana a la temperatura pinch real.

Cuando no se puede forzar el pinch especificando una temperatura para efectuar el método de diseño pinch, se presenta una situación de pseudopinch implícito. Aunque se puede forzar un diseño pinch a otra temperatura más lejana al "pinch", se prefiere partir la corriente que esté limitando la carga calorífica, de tal manera que permita la eliminación de alguna corriente, de ser posible. Esta regla no se basa en el método de diseño pinch, y es de tipo heurística, exclusivamente.

3.6 PRINCIPIO DE RELAJAMIENTO DIRECTO DEL PINCH

Una insistencia ciega en las reglas de diseño pinch puede provocar redes demasiado complicadas (e.g. con demasiadas divisiones de flujo, que dificultan el control de la red).

El principio de relajamiento se refiere a una violación intencional del pinch, transfiriendo calor alrededor del pinch para permitir que se transfiera el máximo calor posible en el apareamiento, siempre y cuando el calor transferido alrededor del pinch no exceda un valor especificado. Este principio puede simplificar redes evitando el uso de divisiones de flujo, aunque no se logre una recuperación máxima de energía.

En el siguiente capítulo se presenta una explicación del sistema, donde se muestra cómo interactúan las diferentes reglas y heurísticas que componen el sistema.

CAPITULO IV

ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA

4.1. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

En el presente capítulo se describe la estructura general del sistema y su funcionamiento; en éste se incorporan los conceptos de I.A., recuperación de calor y los fundamentos termodinámicos, todos éstos descritos en los capítulos anteriores.

El programa realizado tiene una estructura híbrida; maneja conocimiento procedural, así como marcos de referencia. El conocimiento está dividido en 3 categorías:

- 1.- Identificación del problema.
- 2.- Síntesis de la red.
- 3.- Generación de ecuaciones.

Las partes 1) y 3) forman el conocimiento cuantitativo de problema; la parte 2) se basa en el manejo de reglas heurísticas y constituye la parte central del sistema.

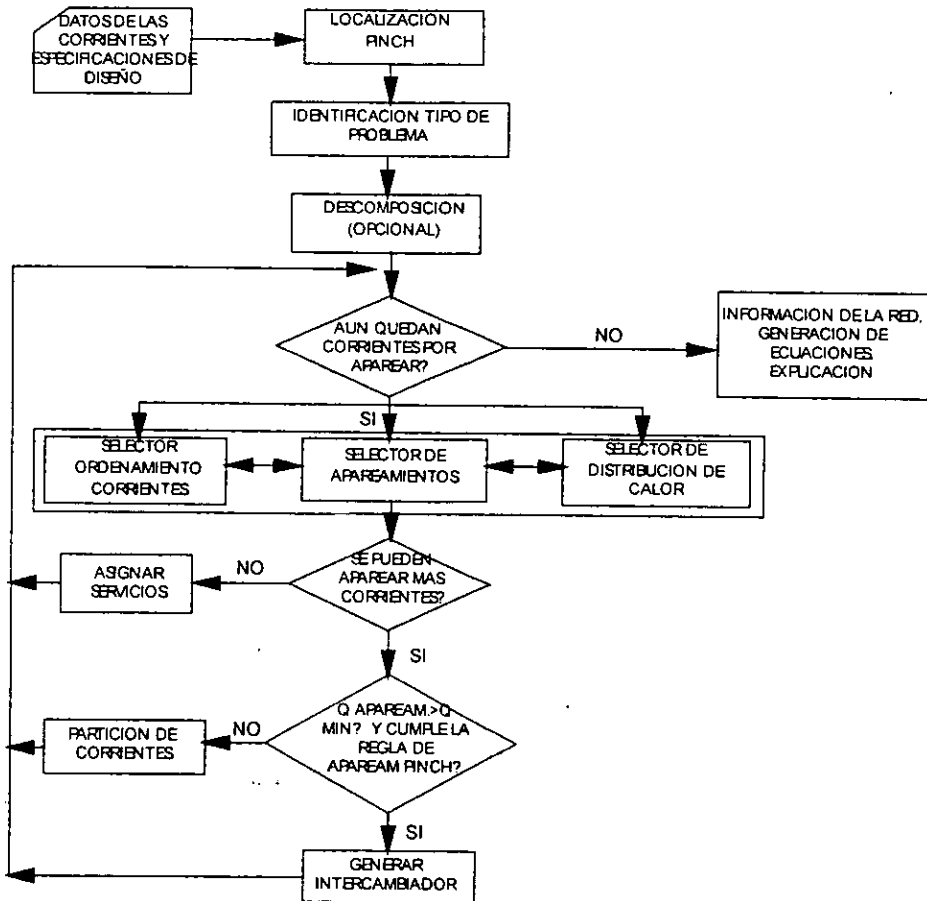
En cuanto al tipo de control, se centra en acción, ya que el sistema sabe cómo tratar con las diferentes clases de objetos y cuando realizar diferentes funciones asociadas con el proceso.

Dada la naturaleza del problema, el sistema funciona con encadenamiento hacia adelante, escogiendo nuevos apareamientos de entre las corrientes residuales, hasta llegar a la solución, que corresponde a una red con todas las cargas caloríficas cubiertas (e.g. se alcanza la temperatura objetivo de todas las corrientes).

A continuación se pueden ver los diferentes módulos que conforman el sistema,

este diagrama no debe entenderse como un diagrama de flujo en el sentido estricto; es más bien un plano donde se observa cómo interactúan los diferentes módulos que conforman el mismo.

FIGURA 12: ESTRUCTURA DEL SISTEMA



4.1.1 Representación del problema

Las corrientes están representadas por estructuras de datos de tipo declarativo; al iniciar el problema, se tiene la temperatura de entrada, y la temperatura objetivo. Al irse realizando los apareamientos y cubrirse total o parcialmente la carga calorífica de cada corriente, también cambian los valores de

sus temperaturas de entrada y temperatura objetivo. Las corrientes pueden ramificarse, y al hacerlo se genera una nuevas corrientes que toman todas las características de la corriente madre, excepto el FCp. De la misma manera, se pueden unir los flujos de estas corrientes, fusionándose en una nueva corriente con una temperatura de entrada igual a la temperatura de mezclado de las corrientes que la forman.

4.1.2 Estrategia de solución

A diferencia del programa propuesto por Chen et al. (1989) [51], en el presente sistema no existe una estrategia de razonamiento preestablecida de apareamientos y división de corrientes para resolver el problema; el usuario tiene una gran flexibilidad para definir nuevas heurísticas y si así lo desea, realizar apareamientos que no sería posible lograr siguiendo estrictamente la heurística. Adicionalmente, el sistema cuenta con herramientas para guiar al usuario en cada paso de la síntesis.

Se pueden manejar problemas con número ilimitado de corrientes frías y calientes, mientras que el programa propuesto por Chen et al. únicamente puede manejar problemas con una sola corriente fría o caliente. Con este nuevo sistema, después de la determinación del punto de pliegue, el usuario elige las heurísticas en los siguientes categorías:

- Corrientes por aparear
- Distribución de calor en el apareamiento
- División de flujo
- Descomposición del problema en el punto de pliegue.

Las reglas de producción son explícitas y pueden ser modificadas fácilmente por el usuario, como en el caso de la selección de corrientes por aparear y el tipo de distribución de calor por realizar.

Las heurísticas de selección de apareamientos (con el nombre genérico de FILTRO-) son marcos de representación, con un código procedural en uno de los atributos. Las reglas de selección del tipo distribución de calor, así como las reglas de división de flujo, son subrutinas.

El estado actual del problema se modifica mediante la generación de apareamientos, divisiones de flujo, uniones de ramales o asignaciones de servicios a las corrientes; al ocurrir cualquiera de los anteriores, se modifican las temperaturas residuales o el flujo de las corrientes. Esto se almacena en el campo "MATCH" de los marcos de referencia que representan la red generada (de la clase "RED"). En este campo, se encuentra una lista de listas; cada lista contiene una información rápida de algún objeto que conforma la topología de la red. Por ejemplo:

((C11) (C11 SC11-23) SPLITTER-3)

División de flujo. La corriente C11 se divide en dos ramales, C11 y SC11-23, mediante el separador Splitter-3.

(H11 C12 INTERCAMBIADOR-4 870.0)

Intercambiador. Apareamiento de corrientes H11 y C12, en el Intercambiador-4, con una carga calorífica de 870 unidades.

(H13 HEATER-32 55.0)

Servicio (Calentamiento). Sobre la corriente H13, el calentador Heater-32 con una carga de 55 unidades.

((RC11-32 SC11-3) (UC11-43) UNION-44)

Unión de ramales. Unión de las corrientes RC11-32 y SC11-3 en la corriente UC11-43 mediante la Unión-44.

Para información más detallada acerca de los objetos generados por el sistema, véase el **Anexo 9**.

Además del conocimiento que se puede representar mediante las técnicas de IA, la generación de ecuaciones complementa este programa, proporcionando el conocimiento cuantitativo de la red generada. Mediante el uso de estas herramientas, se pueden estudiar las características de flexibilidad y controlabilidad de la red sintetizada.

4.2 LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE PLIEGUE

Aunque la localización del punto de pliegue es una condición necesaria para que el sistema empiece la síntesis, el usuario puede decidir si se activaran las reglas del MDP (Método de Diseño Pinch, Linnhoff y Hindmarsh, 1983) [3] que consisten en empezar a diseñar a partir del punto de pliegue (opcional) y ciertas reglas para el apareamiento de corrientes involucradas en el punto de pliegue; dentro de éstas, se toman en cuenta las divisiones flujo y también se puede limitar la transferencia de calor alrededor del pinch. Estas reglas se presentan a manera de sugerencias en el modo interactivo, y queda a criterio del usuario tomarlas en consideración.

En caso de que se decida no activar las reglas del MDP, la información obtenida de la localización del punto de pliegue sirve al diseñador para predecir la cantidad mínima de servicios posible y efectuar la síntesis con el conocimiento de ésta información, para determinar que tan cerca del óptimo se encuentra la red sintetizada, tal como recomiendan Boland y Linnhoff, 1979 [27].

4.3 CLASIFICACION DEL PROBLEMA

Siempre que se inicia un problema nuevo, se hace la localización del punto de pliegue, y se determina a que tipo de problema corresponde, de acuerdo a los criterios explicado en la sección referente al punto de pliegue:

1.- Problema Umbral:

- a) Sólo se requieren servicios de enfriamiento.
- b) Sólo se requieren servicios de calentamiento.

2.- Arriba del punto de pliegue (solamente servicios de calentamiento).

3.- Abajo del punto de pliegue (solamente servicios de enfriamiento).

4.- Cruzando el punto de pliegue (son necesarios los servicios de enfriamiento y calentamiento).

Si se tiene un problema con punto de pliegue, el sistema lo considera como dos sistemas independientes, y comienza diseñando el sistema arriba del punto del pliegue. Si las reglas del MDP están activadas, las corrientes de estos problemas a su vez son separadas en corrientes en el pinch, y corrientes lejanas al pinch. En este caso, la síntesis comienza por el apareamiento de las corrientes pinch.

4.4 RELACION ENTRE SELECTOR DE APAREAMIENTOS Y MÉTODO DE DISEÑO PINCH

El sistema asigna prioridad a ciertas corrientes, dependiendo del tipo de problema de que se trate. Estas prioridades están en concordancia con lo recomendado con el MDP.

Cuando se diseña el sistema arriba del pinch, el sistema considera que las corrientes prioritarias son las calientes, ya que para lograr el objetivo de utilización mínima de servicios, las corrientes calientes se deben "eliminar" utilizando exclusivamente las corrientes frías existentes arriba del pinch, en caso contrario, será necesario aplicar servicios de enfriamiento a las corrientes calientes, y se violará el consumo mínimo de energía (Ver Capítulo 3).

De la misma manera, cuando se diseña el sistema abajo del pinch, el sistema considera a las corrientes frías como las principales; las corrientes frías se deben "eliminar" utilizando únicamente las corrientes de proceso calientes, y si no se logra esto, será necesario utilizar servicios extras de calentamiento por encima de los objetivos de la máxima recuperación de calor.

De aquí en adelante, las corrientes prioritarias se denominarán **corrientes clave**, y a las otras corrientes, se denominarán **corrientes secundarias**.

La prioridad asignada a las corrientes claves, consiste en explorar todas las combinaciones posibles de una o algunas corrientes de este tipo, -que fue (fueron) seleccionada(s) previamente mediante alguna heurística-, con todas las corrientes secundarias disponibles, a fin de asegurar la "eliminación" de la corriente clave. Además, las reglas heurísticas del MDP (como la de "eliminación" -"Tick-off" en inglés- y las referentés a los FCp) ayudan a lograr este fin.

Si se activan las reglas MDP, el apareamiento inicialmente se hace entre las corrientes al punto de pliegue, por ser la zona con más restricciones de temperatura y la que influye de manera más importante en la recuperación de calor; cuando se eliminan por completo estas corrientes, o no se pueden realizar apareamientos con las corrientes secundarias en el pinch, se procede a hacer apareamientos con las corrientes secundarias lejanas al punto de pliegue.

Si aún se tienen corrientes clave en el pinch y no existen corrientes secundarias en el pinch con las que se pueda aparear (ya sea por restricciones de temperatura o por no tener carga calorífica), el sistema procede automáticamente a tratar de hacer apareamientos con las corrientes secundarias lejanas del pinch.

El usuario tiene la facultad de explorar los posibles apareamientos entre corrientes en el punto de pliegue y las lejanas al punto de pliegue, y llevarlos a cabo, a pesar de que no correspondan al apareamiento sugerido por el sistema.

Si el usuario trabaja con las reglas MDP inhibidas, todas las corrientes se toman como si estuvieran en el pinch; e.g., no existe ninguna preferencia para aparear en primer lugar las corrientes en el pinch. Este modo de funcionamiento se implementó para permitir que las heurísticas propuestas por Ponton *et al* (1975) [21] funcionen tal como se concibieron.

4.5 REGLAS RELACIONADAS CON EL MDP

En esta sección se explica como se implementaron algunas reglas relacionadas con el MDP. En el **Anexo 10** se pueden ver los parámetros y las variables que utiliza el sistema, relacionadas con las reglas MDP.

4.5.1 Casos cuando el sistema realiza divisiones de flujo

Cuando se detecta un apareamiento que tiene una carga calorífica baja (menor a la permisible, definida como $0.5 \cdot Q_{Tran-Min}$), el sistema revisa si realizando una partición de flujo sobre alguna de las corrientes puede mejorar la transferencia de calor, tomando en cuenta el tipo de apareamiento (extremo caliente/ extremo frío) y el FCp de las corrientes.

Si es así, el sistema sugiere una división de flujo en la corriente de mayor FCp. Si es posible, el sistema determina una relación de partición óptima, de tal manera que se elimine completamente alguna de las dos corrientes; cuando no se puede lograr esto por restricciones de temperatura, se realiza una división de flujo sobre alguna corriente, de tal manera que dos corrientes tengan el mismo FCp, para evitar

problemas de transferencia de calor por violación de ΔT_{min} , como se ilustra en la **Figura 13**. Este tipo de problemas también se presenta cuando existe un pseudo pinch implícito (Ver Capítulo 3) y el sistema los intenta resolver realizando divisiones en las corrientes por aparear.

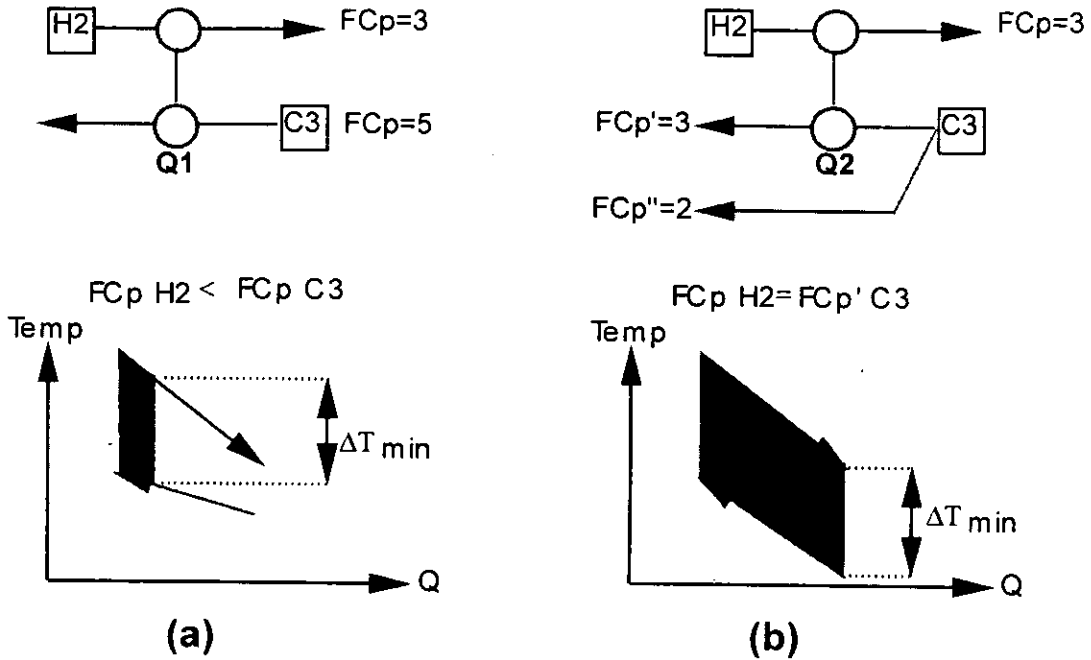


FIGURA 13

Divisiones de flujo y su relación con el gradiente de temperatura.-

- a) Sin división de flujo, cuando se tiene el ΔT_{min} en el extremo frío del apareamiento, ocurre una violación del ΔT_{min} en el extremo caliente del apareamiento.
- b) Realizando la división de flujo, con FCp igual, no ocurre la violación del ΔT_{min}

Este mecanismo de partición también funciona cuando se están tratando de aparear dos corrientes pinch, dando por resultado un apareamiento que no es pinch (solo una de las corrientes apareadas toca el punto de pliegue); esto indica que no se cumple la regla pinch de diferencias de FCp . En este caso, el sistema tratará de hacer una partición de tal manera que se cumpla esta regla y el apareamiento resultante sea pinch (e.g. el intercambiador tiene dos corrientes que transfieren calor en el punto de pliegue).

4.5.2 Asignación de servicios de calentamiento/enfriamiento

El sistema tratará de dar preferencia a la eliminación de las corrientes pinch. Si aún se tienen corrientes clave en el pinch que necesiten ser apareadas y se han agotado todas las posibilidades de apareamiento con las corrientes secundarias en el punto de pliegue, se usan las corrientes secundarias lejanas al punto de pliegue. Si ninguna de las corrientes secundarias puede transferir calor con la corriente clave seleccionada, se asignan automáticamente servicios de enfriamiento o calentamiento sobre ésta; si se hicieron divisiones de flujo, el sistema tratará de unir los ramales de la corriente para asignarles servicios, siempre que sea posible.

4.6 SELECTOR DE APAREAMIENTOS

Una vez determinadas la(s) heurística(s) de selección de apareamiento, el sistema puede operar en dos modalidades:

- Interactiva: A cada paso de la síntesis, el sistema presenta al usuario todas las posibilidades. El usuario decide si utiliza la heurística, o utiliza su criterio. Véase el **Anexo 11**.
- Automática: El usuario determina la heurística, el sistema presenta los resultados al terminar la síntesis, junto con una explicación de los criterios utilizados para la toma de decisiones. Véase el **Anexo 12**.

4.7 EVALUACIÓN DE LOS PESOS DE LAS HEURÍSTICAS

El sistema posee dos funciones mediante las cuales se pueden combinar diferentes heurísticas, siempre y cuando sean propiedades relacionadas con el apareamiento (e.g. menor gradiente de temperatura, mayor calor transferido, etc.). En uno de ellos, la combinación de heurística se realiza mediante el producto de éstas, para dar un valor final que es la "deseabilidad" total de ese par de corrientes. En el otro, la combinación se realiza mediante la suma del valor de las heurísticas. Véase el **Anexo 13**.

4.8 TIPO DE APAREAMIENTO

El sistema determina el tipo de apareamiento de distribución de calor en el apareamiento, de acuerdo con los siguientes factores:

- Calor disponible transferible ($\dot{Q}_{caliente}$ es mayor o menor que \dot{Q}_{frio} ?).
- Subsistema en el que se está diseñando (arriba del pinch / abajo del pinch).
- ¿Se trata de un apareamiento entre corrientes pinch? (sí/no).

Con base en estos factores, el sistema selecciona el tipo de distribución de calor que aplicará para un par de corrientes, previa determinación del calor disponible transferible (que es el máximo calor que puede transferir una corriente, sin violar los gradientes mínimos de temperatura; este valor es independiente del tipo de distribución de calor utilizado).

La función que selecciona el tipo de apareamientos se llama a través de la instrucción (FUNCALL TCALC S1 S2) donde S1 y S2 son las corrientes por aparear. Actualmente, el sistema tiene implementadas dos reglas generales de este tipo: TCALC2 y TCALC-1/2. Ver **Anexo 14 y 15**.

4.9 CRITERIOS DE PARTICIÓN DE CORRIENTES

El sistema permite la división del flujo de las corrientes, para los casos en que se trata de un problema que presenta punto de pliegue o bien, en los caso en que existe un punto de pliegue implícito o problemas de transferencia de calor debido a la diferencia de FC_p entre las corrientes que se quieren aparear; asimismo, puede guiar al usuario mostrándole cuántas corrientes debe de partir, suministrando información general sobre las corrientes existentes, y dando al usuario la posibilidad de proponer una partición sobre una corriente y explorar los posibles apareamientos que podrían realizarse si se acepta la partición. El usuario puede modificar la relación de división, hasta encontrar la adecuada y habilitarla, o bien, después de explorar las posibilidades, puede decidir no habilitar la división de flujo. El sistema

puede sugerir la corriente y la relación de partición al usuario, en los siguientes casos:

- a) Cuando $N_{clave} > N_{secundaria}$. Véase el **Anexo 16 y 17** para el planteamiento del problema, y un ejemplo de resolución.
- b) Cuando $N_{clave} \leq N_{secundaria}$, pero no se cumple con $FCp_{clave} \leq FCp_{secundaria}$ para cada par de corrientes. Véase el **Anexo 18 y 19** para el algoritmo, y un ejemplo de resolución.

4.10 REPRESENTACION DE HEURÍSTICAS DEL SELECTOR DE APAREAMIENTOS

En esta sección, se explica cómo se implementaron las heurísticas de selección de apareamientos. La información detallada se encuentra en los anexos correspondientes.

4.10.1 La variable global SEL (función selectora de apareamientos)

Aprovechando la ventaja que permite LISP de utilizar argumentos que sean funciones, la selección de apareamientos se realiza mediante llamadas a una función SEL, mediante una instrucción (**FUNCALL SEL F1 F2 F3 F4 N1 N2**) que tiene 6 parámetros y es la encargada de escoger las corrientes por aparear, así como el tipo de apareamiento que se realizará con estas corrientes (extremo caliente/extremo frío). Dado que el parámetro SEL es una variable global, en cualquier momento puede tomar cualquier valor, es decir, puede utilizarse cualquier función que realice apareamientos.

Todas estas tareas las debe realizar una sola función, ya que para ciertas heurísticas no es posible desacoplar las heurísticas de selección de corrientes por aparear y el tipo de distribución de corrientes a utilizar. Por ejemplo, para las heurísticas que utilizan las propiedades intrínsecas del apareamiento, -como temperatura logarítmica media o máxima relación de Calor/Costo-, es necesario

especificar de antemano cuáles son las corrientes con las que se van a formar los posibles apareamientos, la distribución de calor, y una vez realizado esto, es factible evaluar una función (como las anteriormente mencionadas) en cada posibilidad de apareamiento y elegir el mejor par.

Actualmente, se tiene implementado la función SEL2 que puede funcionar con la mayoría de las heurísticas que se han publicado a la fecha, la cuál tiene 6 parámetros que determinan la heurística. Los parámetros que utiliza la función SEL2 se muestran en el **Anexo 20**.

4.11 OTRAS FUNCIONES DEL SISTEMA

4.11.1 Explicación de decisiones

Cuando el sistema funciona en modo automático y termina la síntesis de la red por completo, el usuario puede conocer los criterios que utilizó el sistema para tomar las decisiones, mediante la opción [E]XPLICA que aparece en un menú al finalizar la síntesis; esta opción muestra al usuario el porqué de la selección de apareamientos, desde el momento en el que se activó el modo automático. Véase el **Anexo 21** para detalles acerca de esta opción.

4.11.2 Generación de ecuaciones de la red sintetizada

El usuario puede generar las ecuaciones, para posteriormente simular la red que sintetizó. Esta función se activa con la GENERAR [E]CUACION. El sistema cuenta con un módulo que construye automáticamente las ecuaciones de la red, basado en los modelos propuesto por Linnhoff y Kotjabasakis (1986) [52]; éstas ecuaciones, a diferencia de los modelos tradicionales, son lineales en la temperatura, facilitando así la simulación de la red. Cada uno de los objetos que se generan en la red tiene un tipo particular de ecuación asociada.

El sistema va generando una por una las ecuaciones de los generados

durante la síntesis; "busca" si existe conexión entre el nuevo objeto (aún sin ecuación) y los que ya tienen ecuación; si es así, toma los parámetros correspondientes para generar la ecuación del objeto que se quiere conectar. Estas ecuaciones se pueden alimentar al programa de resolución de sistemas de ecuaciones desarrollado por Carlos Rojas G. [53].

Para un intercambiador:

ECUACIÓN 10.

$$(1-RB)T_2 + (B-1)RT_3 + (R-1)T_1 = 0$$

ECUACIÓN 11.

$$R(1-RB)T_4 + (B-1)RT_1 + (T-1)BRT_3 = 0$$

ECUACIÓN 12.

$$R = \frac{C_{Pc}}{C_{Ph}}$$

ECUACIÓN 13.

$$B = \text{EXP} [(UA/C_{Pc})(R-1)]$$

Donde:

C_{Ph} = F_{cp} de la corriente caliente

C_{Pc} = F_{cp} de la corriente fría

T₁, T₂ = Temperatura de entrada y de salida de la corriente caliente

T₃, T₄ = Temperatura de entrada y de salida de la corriente fría

Q = Calor transferido en el intercambiador

U = Coeficiente de transferencia de calor del intercambiador

A = Area del intercambiador

4.11.3 Cálculo de costos

Los costos de inversión fija se calculan a partir de una fórmula exponencial del tipo $\alpha * A^\beta$ donde α y β son parámetros empíricos (por default, $\alpha = 350$ y $\beta = 0.6$) y A representa el área total (en pies cuadrados). El costo de cada unidad se distribuye a lo largo de la vida útil del bien, -que se considera de 10 años-, para obtener el costo fijo anual. Véase el **Anexo 22** para los detalles.

4.12 LIMITACIONES

El sistema tiene varias limitaciones, pero debido a su flexibilidad, pueden definirse nuevas funciones que superen estas deficiencias. Entre éstas, podemos mencionar las siguientes:

- Sólo se pueden manejar coeficientes globales de transferencia de calor constantes. A pesar de que el sistema puede trabajar con gradientes mínimos de temperatura que varíen dependiendo del apareamiento, pero la localización del punto de pliegue está limitada a un gradiente mínimo de temperatura constante. Definiendo una nueva función para calcular el punto de pliegue, el sistema podrá manejar apareamientos con ΔT_{\min} dependiente del apareamiento.

- El sistema está habilitado para la localización de un solo punto de pliegue, antes de iniciar la síntesis, y no está implantada la localización del pinch después de cada apareamiento.

- También falta el manejo de "apareamiento" de servicios; el uso de servicios está limitado a un solo tipo de servicios de enfriamiento y uno de calentamiento. Actualmente, no es posible usar hervidores de fuego directo.

4.13 FLEXIBILIDAD DEL PROGRAMA.

En general las funciones más importantes del sistema son los parámetros relacionados con las reglas de producción. El selector de apareamiento, el tipo de distribución de calor y los criterios de división de flujo funcionan a través de una llamada a un argumento que es una función. Es

importante recalcar que debido a esto, se pueden construir nuevas funciones que realicen las tareas de selección de apareamiento, distribución de calor y criterios de división de flujo, y que es factible implantar virtualmente cualquier heurística nueva.

4.15 USO DEL SISTEMA

4.15.1 Cargando los archivos del sistema

Es necesario instalar en la computadora una versión de LISP antes de correr el programa. El programa funciona con la mayoría de las versiones de LISP para computadoras personales compatibles con IBM, ya que está realizado con los comandos más simples y comunes del LISP.

Para correr el programa, es necesario copiar en el disco duro todos los archivos contenidos en el diskette de la tesis, en el subdirectorío correspondiente a la versión de LISP que se este utilizando. Para realizar este trabajo en particular, se instaló la versión GCLISP en un directorío del mismo nombre, y se copiaron los archivos del programa en el directorío "C: \\GCLISP\".

Una vez copiados los archivos del programa, se inicia el LISP, y los archivos del programa serán llamados desde LISP. El archivo que carga todas las funciones y archivos se llama "INICIO.LSP" .

La instrucción para cargar los archivos desde LISP es **(LOAD 'INICIO)** .

Solamente resta ejecutar el inicio del programa, con la instrucción **(SYNTE1)** .

Debido a algunos problemas inherentes a la versión de LISP utilizada, no es posible utilizar el módulo de explicación de decisiones, -que utiliza cuando se generan las redes en modo automático-, al mismo tiempo que el módulo de generación de ecuaciones.

Para cargar el módulo de generación de ecuaciones, es necesario dar la instrucción **(LOAD 'ECUA)** antes de iniciar el programa. Asimismo, si se habilita el módulo de generación de ecuaciones, se tiene que usar la instrucción:

(LOAD 'EXPLICA) de la misma manera.

El diskette del sistema incluye problemas "estándar" como 4SP2, con todas las especificaciones del problema original; dichos problemas, se encuentran en archivos del mismo nombre (4SP1.LSP, 5SP1.LSP, 6SP1.LSP, etc.). Dentro de estos archivos también se especifican parámetros económicos de la red, así como los datos de los servicios a utilizarse. El archivo para el problema 7SP1 sirve para ejemplificar:

```

;**** CORRIENTES CALIENTES *****
(setf h11 (make-sdata :fcpl 2.38 :fcp 2.38 :tsupply 520 :ttarget 300
  :tressupply 520 :trestarget 300 :deltatemp 10 :type 'hot :name 'h11 ))
(setf h12 (make-sdata :fcpl 2.8 :fcp 2.8 :tsupply 440 :ttarget 150
  :tressupply 440 :trestarget 150 :deltatemp 10 :type 'hot :name 'h12 ))
(setf h13 (make-sdata :fcpl 3.36 :fcp 3.36 :tsupply 390 :ttarget 150
  :tressupply 390 :trestarget 150 :deltatemp 10 :type 'hot :name 'h13 ))

;**** CORRIENTES FRIAS *****
(setf c11 (make-sdata :fcpl 1.6 :fcp 1.6 :tsupply 100 :ttarget 430
  :tressupply 100 :trestarget 430 :deltatemp 10 :type 'cold :name 'c11 ))
(setf c12 (make-sdata :fcpl 1.984 :fcp 1.984 :tsupply 350 :ttarget 410
  :tressupply 350 :trestarget 410 :deltatemp 10 :type 'cold :name 'c12 ))
(setf c13 (make-sdata :fcpl 2.635 :fcp 2.635 :tsupply 200 :ttarget 400
  :tressupply 200 :trestarget 400 :deltatemp 10 :type 'cold :name 'c13
))
(setf c14 (make-sdata :fcpl 3.276 :fcp 3.276 :tsupply 180 :ttarget 350
  :tressupply 180 :trestarget 350 :deltatemp 10 :type 'cold :name 'c14 ))

(setf L1 '(H11 h12 h13)) (setf L2 '(c14 c13 c12 c11))

;***PARÁMETROS ECONÓMICOS Y OPERATIVOS ****
(setf q-calentamiento 767.5) (setf hrs-operacion 8500) (setf Q-
Enfriamiento 80)
(setf factor-fcp 1d4) (setf t-vapor1 456) (setf t-vapor2 456)
(setf T-Agual 180) (setf T-Agua2 100)

```

Cada corriente se crea con la instrucción Setf, y se especifican para cada una, el FCP, temperaturas de entrada y salida, el gradiente de temperatura mínimo de cada corriente (el ΔT_{\min} que se especifica en los problemas es la suma del

gradiente mínimo de cada corriente que forma el apareamiento), tipo de corriente, y nombre de la misma.

En las listas L1 y L2 se determina los nombres de las corrientes calientes y frías que forman parte del problema. Por último, en cada problema se asignan los parámetros económicos y operativos que completan la descripción del problema. Es importante cuidar que las unidades que se utilicen sean consistentes entre sí. Siguiendo el modelo mostrado, se pueden especificar nuevos problemas.

Estos problemas se pueden cargar desde el programa principal, al igual que las heurísticas (véase **Anexo 23** para localizar el nombre del archivo en que se encuentra alguna heurística).

4.15.2 Especificación de las heurísticas

Al iniciar el problema, aparece en pantalla una serie de opciones para escoger las heurísticas de selección de corrientes, distribución de calor y otras heurísticas relacionadas con el pinch. Las heurísticas de selección de corrientes incluyen una breve explicación de su funcionamiento. Como se explicó anteriormente, estas heurísticas de selección de apareamiento se pueden clasificar en dos:

- a) Heurísticas de propiedades intrínsecas de corrientes.
- b) Heurísticas de propiedades de pares de corrientes.

Para el segundo tipo de heurísticas, es importante mencionar que es factible combinar las funciones básicas, para definir nuevas funciones: el producto del calor transferible por pérdida de exergía.

La definición de las heurísticas utilizadas y su implementación, se muestran en el **Anexo 23**.

4.15.3 Presentación de resultados

Al finalizar la síntesis, con la opción [I]NFO RED aparece el costo total de la red, dividido en costos fijos anuales (costos de inversión en intercambiadores, calentadores y enfriadores) y costos variables anuales (combustible y agua para los servicios de enfriamiento y calentamiento). También se incluye la información del área total, y las unidades de calentamiento y enfriamiento que requiere la red.

La primera información mostrada es una lista de listas, cada lista contiene un objeto y las corrientes involucradas; para los intercambiadores y servicios aparece además su carga calorífica. Estas listas están en el orden en el que fueron generados y seleccionados, y corresponden a la propiedad RED-MATCH, de la última red generada (con el nombre de RED-"NÚMERO", en la lista de redes).

En la información desglosada se presentan primero los intercambiadores con sus corrientes, temperaturas de operación, tipo de apareamiento y carga calorífica. El valor del calor transferido aparece normalmente dividido en un factor de 0.001, con el fin de permitir que el usuario visualice rápidamente los números significativos, y además, que el LISP calcule más rápidamente las operaciones numéricas.

Después, aparecen los divisores o uniones de flujo con sus corrientes, FCp y la temperatura a la que se realiza la división o unión de flujo.

Por último, se da información de los servicios; las temperaturas de operación y su carga calorífica. También esta información aparece en el orden en que fueron generados los objetos, y permite reconstruir la historia de selección de corrientes. Se puede obtener aún más información de los campos de cada objeto generado usando la instrucción (DESCRIBE [OBJETO]), donde [OBJETO] puede ser cualquier intercambiador o servicio generado; así aparecerán todos los campos del objeto.

CAPÍTULO V.

RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS.

Se puede dividir este análisis de resultados en tres categorías principales:

- a) Selección de corrientes por aparear.
- b) Selección del tipo de apareamiento.
- c) Especificación de divisiones de flujo.

Dado que los dos primeros puntos están íntimamente ligados y no es posible separarlos en muchos casos, éstos se tratarán como un solo punto.

Con el fin de explicar los resultados obtenidos, se utilizaron como herramientas analíticas los siguientes criterios:

- a) Cálculo de servicios mínimos necesarios
- b) Diagramas Temperatura vs. Entalpía
- c) Diagramas ΔT vs. $T_{fría}$
- d) Mínimo número de unidades
- e) Costo anualizado y área de transferencia de la red.

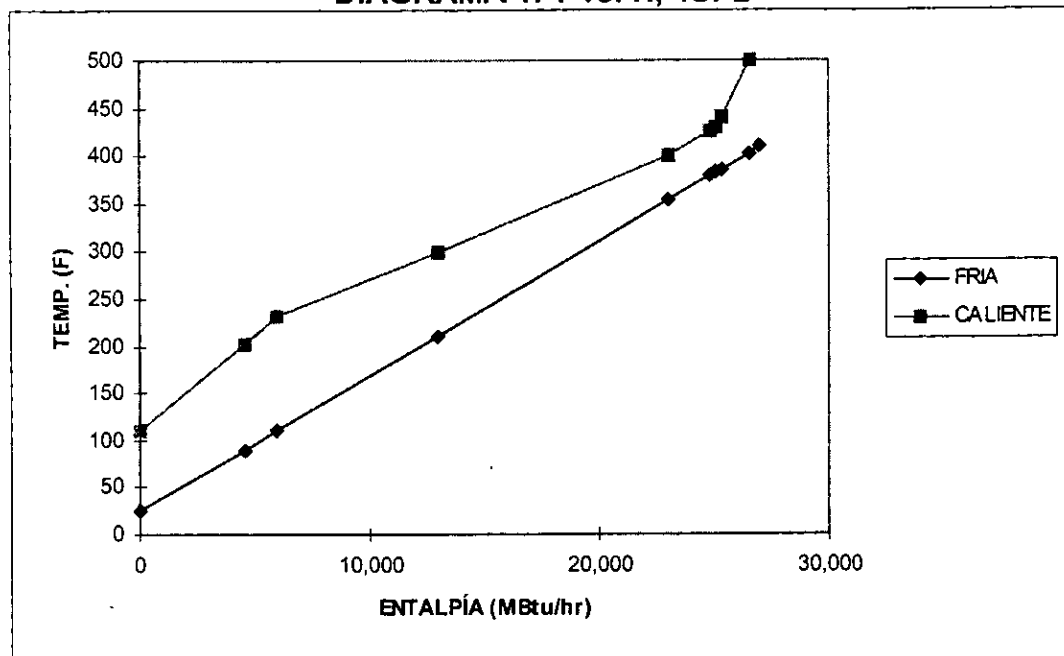
Como ya se explicó, el costo anualizado total, será el principal parámetro para determinar la efectividad de las heurísticas. De esta manera, se compararán los resultados obtenidos contra los reportados en la literatura.

5.1 PROBLEMAS ESTUDIADOS, Y DIAGRAMAS TEMPERATURA-ENTALPÍA

Problema 4SP2.

Consta de 3 corrientes calientes y 1 fría, requiere servicios de calentamiento únicamente (1,150,000 Btu/hr), y se trata de un problema sin punto de pliegue. Es importante señalar que el FCp de la corriente fría es mucho mayor que el de sus contrapartes.

DIAGRAMA 1. T vs. H, 4SP2



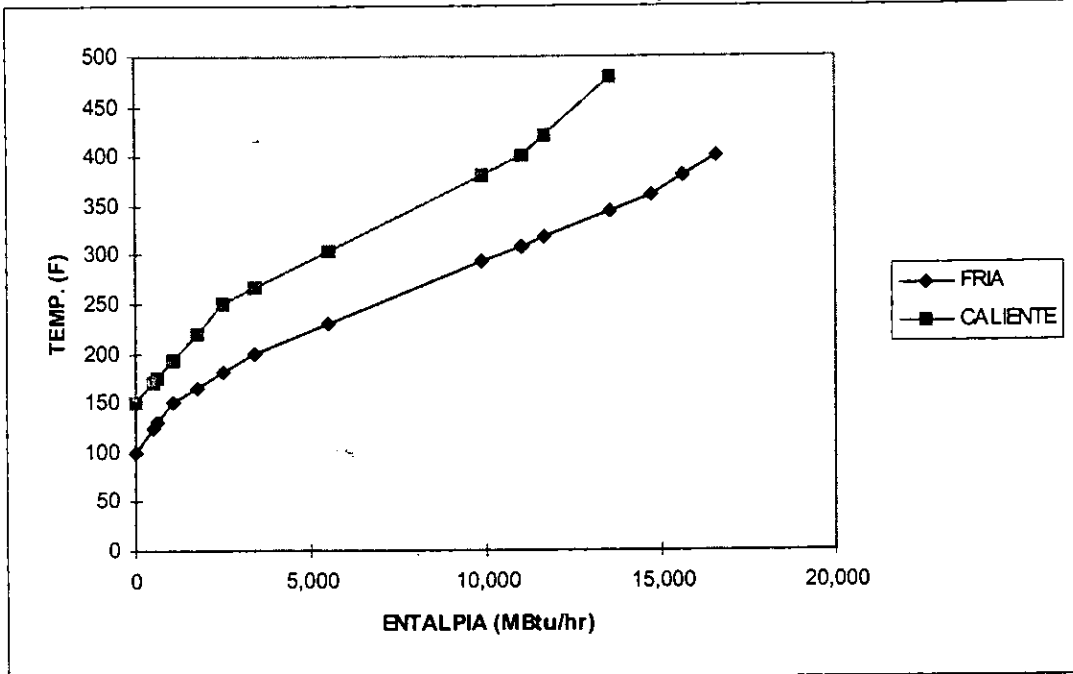
$\Delta T_{min} = 20^\circ \text{ F}$, Entalpía de referencia = 0 MBtu/hr.

La configuración óptima en cuanto al costo total anualizado, tiene costo de \$19,567/año, según lo reportado por Linnhoff y Flower, 1978 [12]. En esta configuración se utilizó división de flujo. Ponton y Donaldson 1974 [21] encontraron la configuración óptima sin división de flujo, con un costo anualizado de \$23,716.

Problema 5SP1

El problema consta de tres corrientes calientes y dos frías, y requiere únicamente de servicios de calentamiento (3,020,000 Btu/Hr) . La curva T vs. H indica que no existe un punto de pliegue.

DIAGRAMA 2. T vs. H, 5SP1



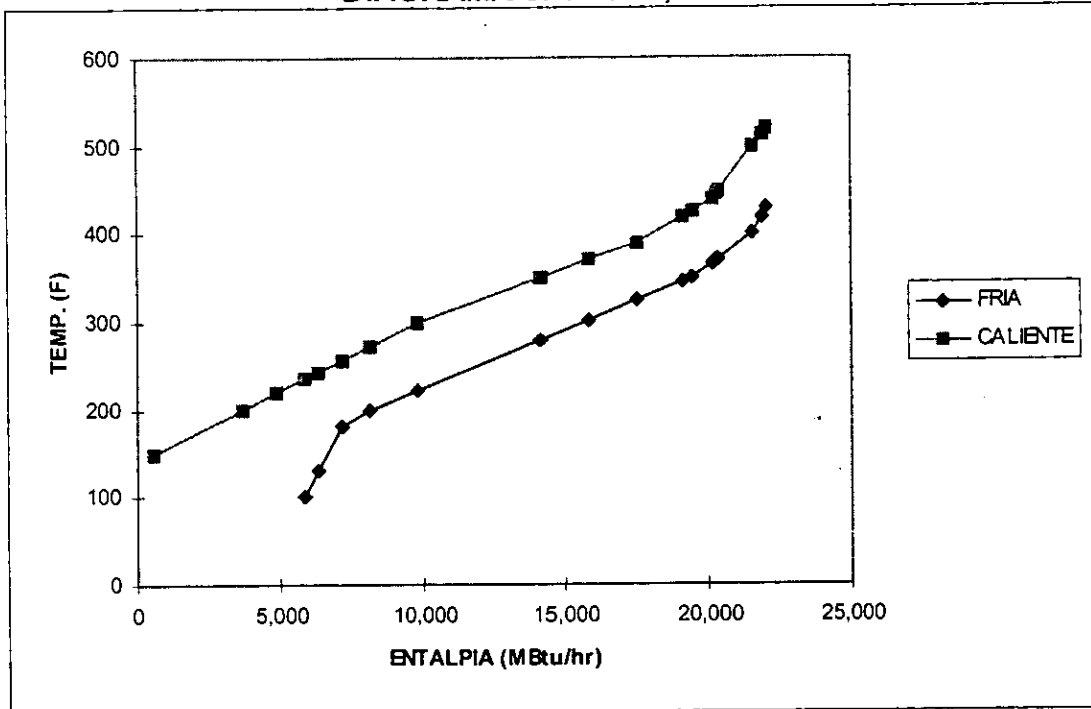
$\Delta T_{min} = 20^\circ \text{ F}$, Entalpía de referencia = 0 MBtu/hr.

La configuración óptima reportada en la literatura, tiene un costo total anualizado de \$38,263/año, según Pho y Lapidus 1973 [10]; en ésta configuración no se utilizó la división de flujo.

Problema 6SP1

Consta de 3 corrientes calientes y 3 corrientes frías. De acuerdo al diagrama T vs. H, el problema requiere solamente de servicios de enfriamiento (5,030,000 Btu/Hr) y no presenta punto de pliegue.

DIAGRAMA 3. T vs. H, 6SP1



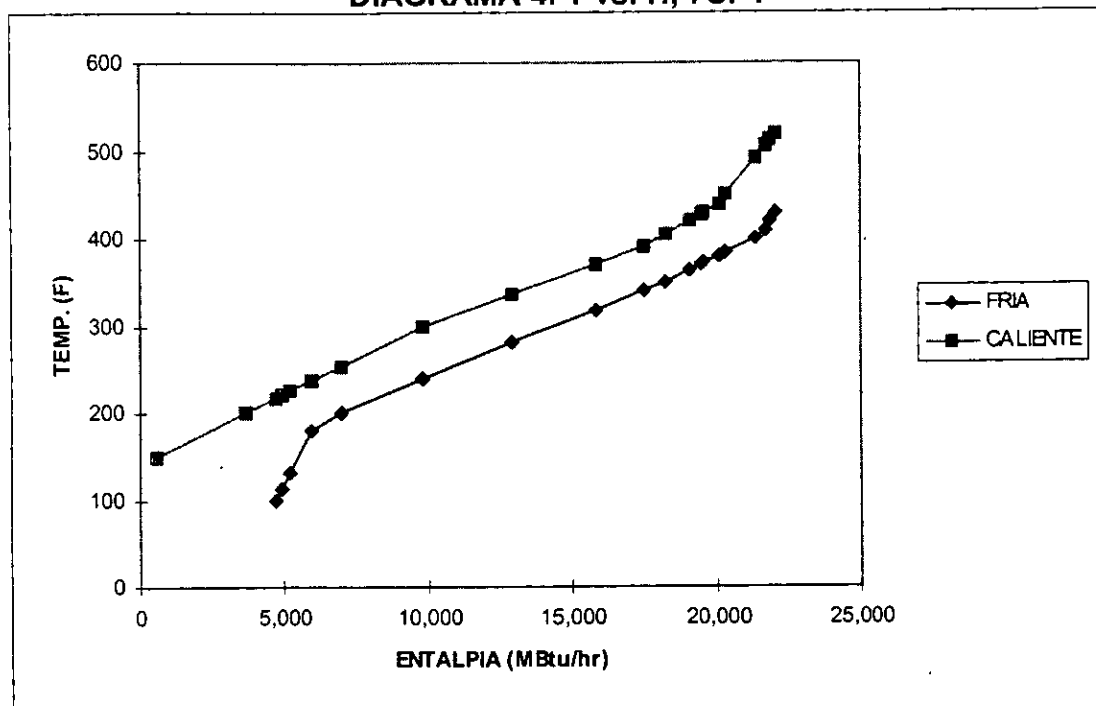
$\Delta T_{min} = 20^\circ \text{ F}$, Entalpía de referencia = 0 MBtu/hr.

Nishida et al. 1977 [23] obtuvieron la configuración con un costo anualizado más bajo reportada hasta la fecha, con \$35,010/año.

Problema 7SP1

Consta de 4 corrientes calientes y 3 corrientes frías. De acuerdo al diagrama T vs. H, requiere únicamente de servicios de enfriamiento (4,110,000 Btu/Hr), y no presenta punto de pliegue.

DIAGRAMA 4. T vs. H, 7SP1



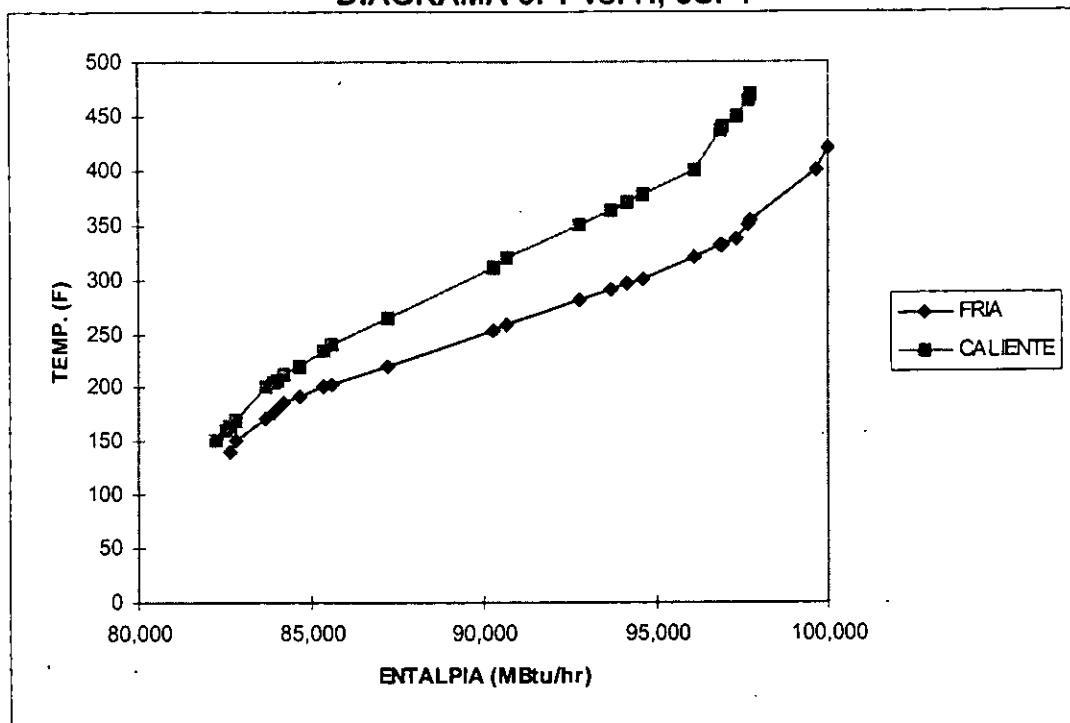
$\Delta T_{min} = 20^\circ \text{ F}$, Entalpia de referencia = 22,000 MBtu/hr.

La configuración con un costo anualizado más bajo hasta la fecha, fue reportada por Muraki y Hayakawa 1982 [24], con \$30,172/año.

Problema 8SP1

Consta de 4 corrientes calientes y 4 corrientes frías. Presenta un punto de pliegue, situado en la temperatura de 150 / 170 °F . Por lo tanto, son necesarios los servicios de calentamiento arriba del punto de pliegue (2,227,000 Btu/Hr) y de enfriamiento abajo del mismo (175,200 Btu/Hr).

DIAGRAMA 5. T vs. H, 8SP1



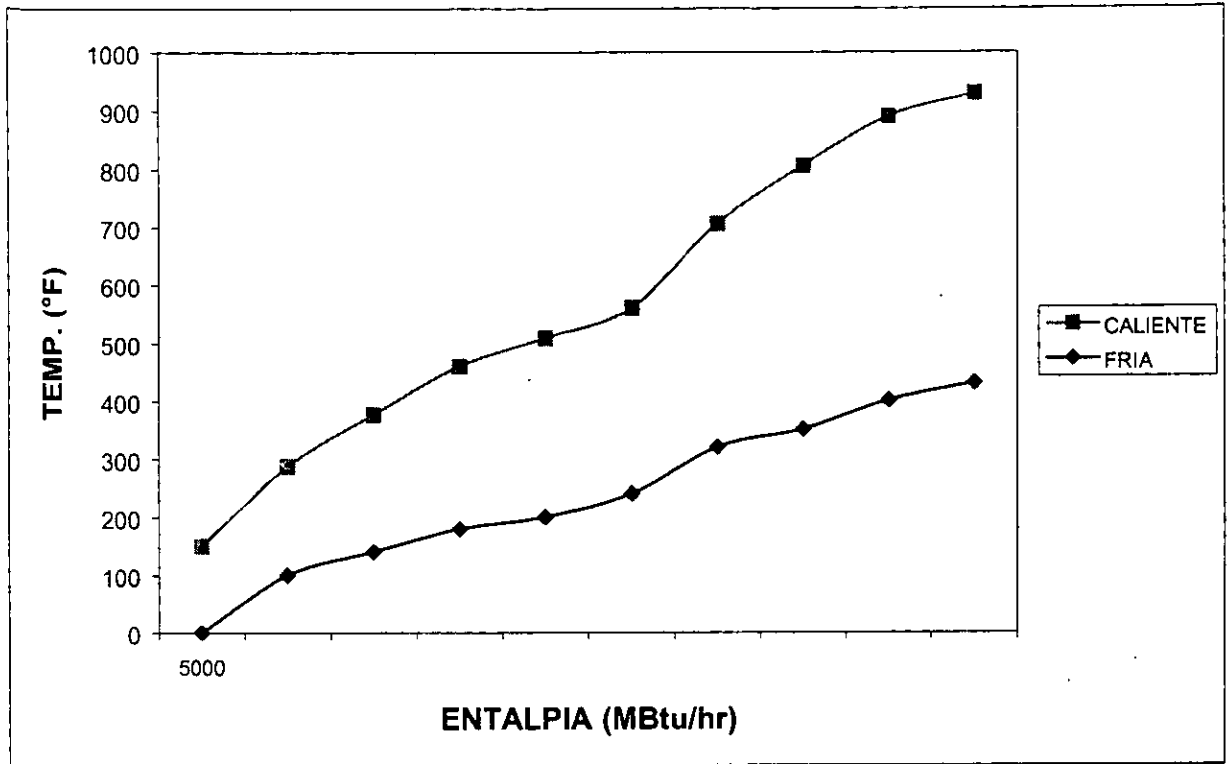
$\Delta T_{min} = 20^\circ \text{ F}$, Entalpía de referencia = 100,000 MBtu/hr.

La configuración óptima reportada en la literatura tiene un costo anualizado de \$38,303 (Muraki y Hayakawa, 1982 [24]).

Problema 10SP1

El problema consta de 5 corrientes calientes y 5 corrientes frías. El diagrama T vs. H muestra que no tiene punto de pliegue, y que solamente requiere servicios de enfriamiento (6,498,000 Btu/Hr).

DIAGRAMA 6. T vs. H, 10SP1



$\Delta T_{min} = 20^\circ F$, Entalpia de referencia = 5,000 MBtu/hr.

La configuración óptima reportada en la literatura tiene un costo anualizado de \$43,857/año (Boland y Linnhoff, 1979 [27]).

5.2 SELECCIÓN DE CORRIENTES Y TIPO DE APAREAMIENTO.

Los resultados de las heurísticas aplicadas a los problemas seleccionados, se pueden ver en los **ANEXOS 24** (heurísticas simples), **25** (heurísticas combinadas) y **26** (problema con punto de pliegue). Los costos anualizados para las configuraciones que se discuten aquí, se comparan contra el óptimo reportado en la literatura, mediante un porcentaje (si es positivo, significa que esta X% sobre el precio del óptimo, si es negativo, significa que está X% abajo del costo óptimo reportado).

5.2.1 Heurísticas derivadas de Ponton y Donaldson

a) Ponton *et al*

En general se obtienen redes con una buena recuperación de calor. En algunos casos se excede ligeramente el mínimo de servicios posible. Esta heurística se basa en la utilización racional de los gradientes de temperatura; si la corriente caliente con temperatura de entrada más alta no puede "eliminar" la parte más caliente de la corriente fría con temperatura objetivo más alta, ninguna otra corriente caliente lo conseguirá, y así se usan servicios solo donde son necesarios. Por esta razón la heurística es apropiada para racionalizar el uso del calor "caliente" y es muy útil en problemas arriba del pinch, en los que solo se necesitan los servicios de calentamiento.

Como una limitante de esta heurística de distribución de calor, -extremo caliente-, se puede mencionar el problema que se presenta cuando el gradiente de temperaturas entre dos corrientes es igual al gradiente mínimo permitido en el lado caliente, y la corriente caliente tiene un FCp menor que la corriente fría; si se siguiera rígidamente la heurística, no se podría transferir calor, ya que si se hace, se viola el gradiente mínimo de temperaturas. La solución es hacer que el ΔT_{min} aparezca del lado más frío, como se ilustra en la FIGURA 14.

Cuando este tipo de apareamiento se produce, generalmente la red sintetizada presenta más unidades y/o servicios de los mínimos requeridos, ya que se rompe el "escalonamiento" de temperaturas en el cual se basa este método.

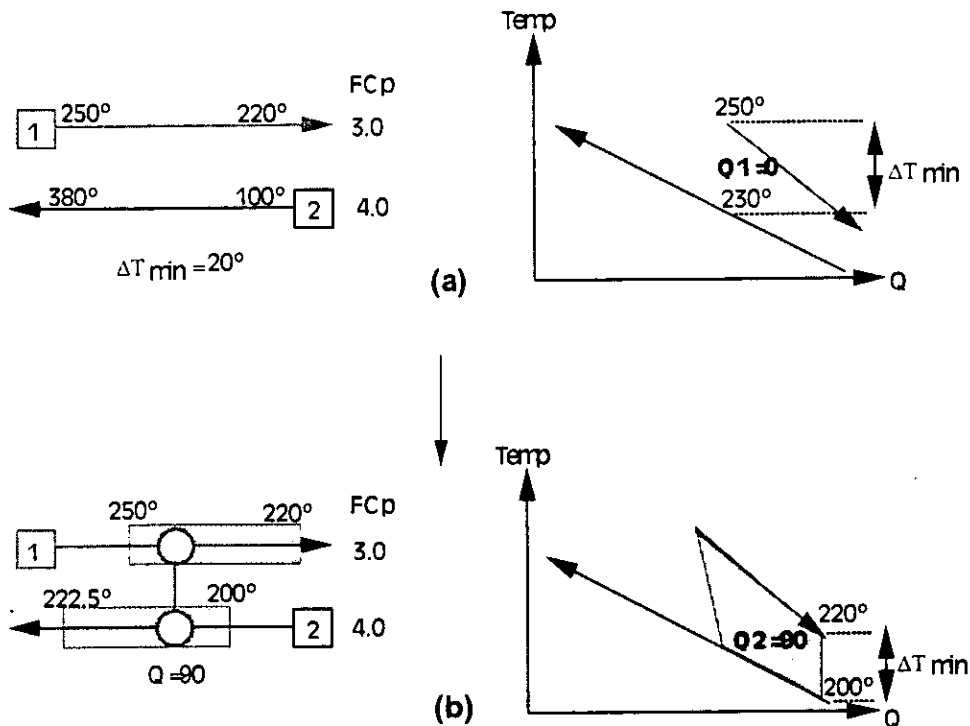


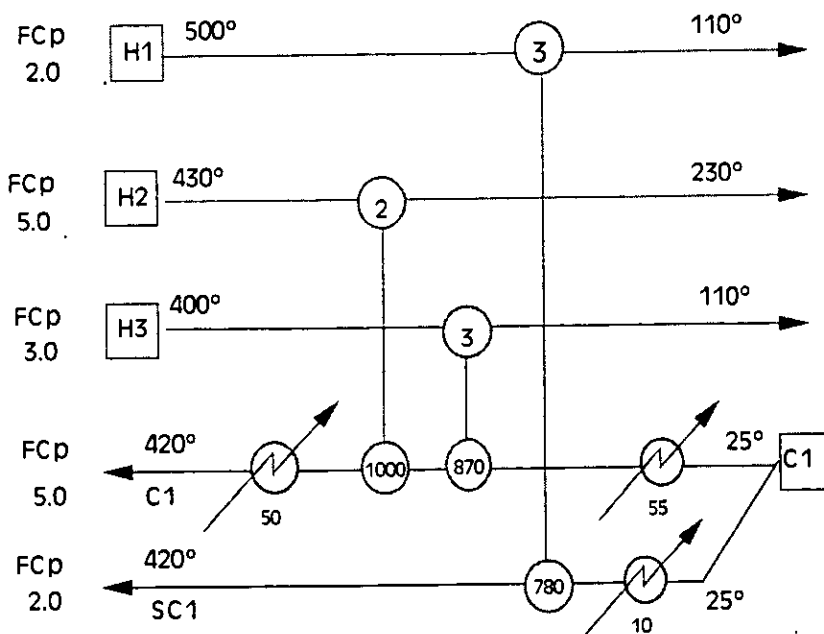
FIGURA 14

(a) Al intentar aparear la corriente caliente 1 con la corriente fría 2 con con una distribución de calor "extremo caliente", el calor transferido es 0 en el primer caso, ya que como Tentrada caliente= 250°, la Tentrada fría se fija = 250° - ΔT_{min}, =230°. Como FCp caliente < FCp frío, el intentar transferir calor resultaría en una violación al ΔT_{min} establecido.

(b) La solución es fijar el ΔT_{min} como se muestra en (b), en la Tsalida de la corriente caliente.

Al aplicar esta heurística al problema 4SP2, y realizar la división de flujo sugerida por el sistema sobre la corriente fría, da por resultado una red que presenta M.R.E. con 3 intercambiadores y tres unidades de calentamiento, para un costo anualizado de \$20,968 [+7.2% arriba del óptimo] y un área total de 4,524 pies². Si se varía la relación del flujo para la corriente fría, se puede optimizar el área y el número de unidades de calentadores, para obtener un configuración con un costo anualizado de \$20, 684 [+5.7% arriba del óptimo] y un área total de 2,962 pies². Se debe notar el efecto tan radical que tiene la relación de flujo en el área total.

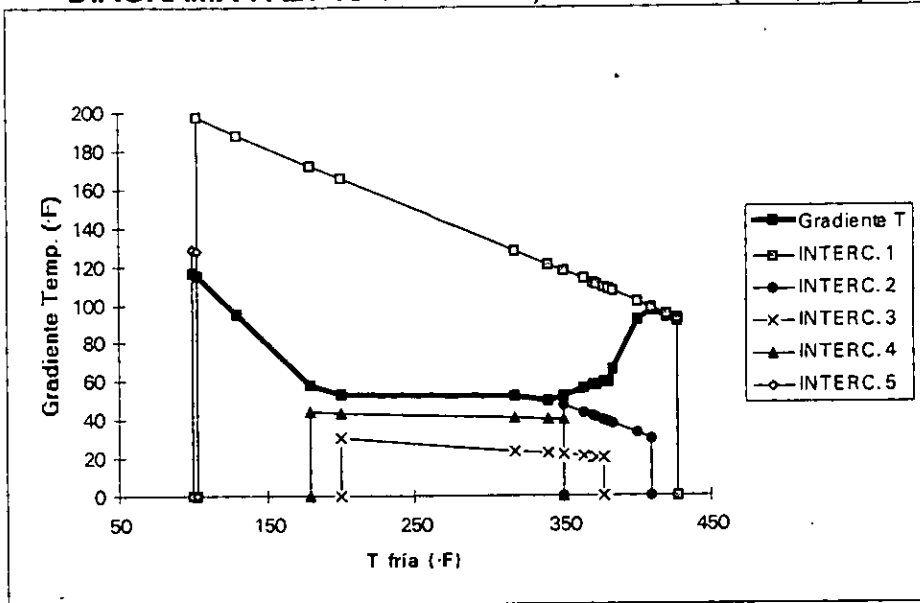
CONFIGURACIÓN 1. 4SP2, PONTON (\$20,968)



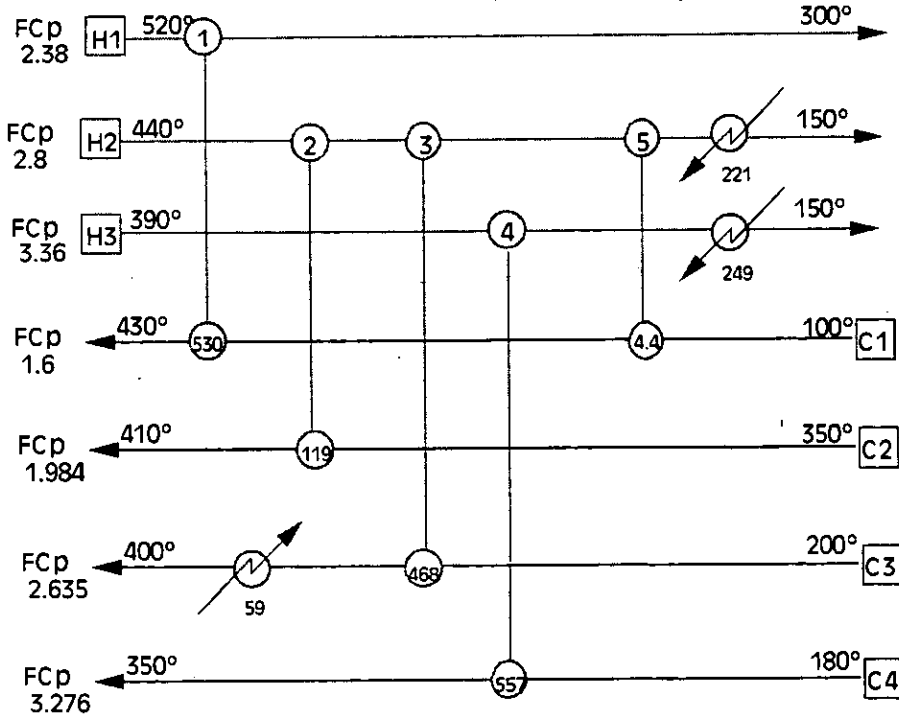
En el caso del problema 7SP1 [\$40,621, +34.6% arriba del óptimo], durante el preanálisis se determinó que solo se necesita enfriamiento; la red sintetizada aplicando esta heurística no presenta M.R.E., requiriendo también calentamiento. Esto parece indicar que para estos problemas, es prioritaria la recuperación de calor "frío"; cuando se utiliza la heurística inversa de Ponton y Donaldson con el mismo problema, se logra una red con el mínimo de servicios posible. Como se puede apreciar del diagrama ΔT vs. $T_{fría}$, el Intercambiador-1 hace uso de un ΔT grande, mientras que el ΔT disponible es limitado. Sin embargo, la red generada con esta heurística puede servir como base para aplicarle métodos evolutivos, ya que los servicios extras de calentamiento se encuentran concentrados en una sola unidad, con una carga calorífica baja. Cabe aclarar que en todos los casos aquí presentados, los intercambiadores se numeraron según su orden de generación durante la síntesis.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

DIAGRAMA 7. ΔT vs T_{fria} 7SP1, PONTON (\$40,621)



CONFIGURACIÓN 2. 7SP1, PONTON (\$40,621)



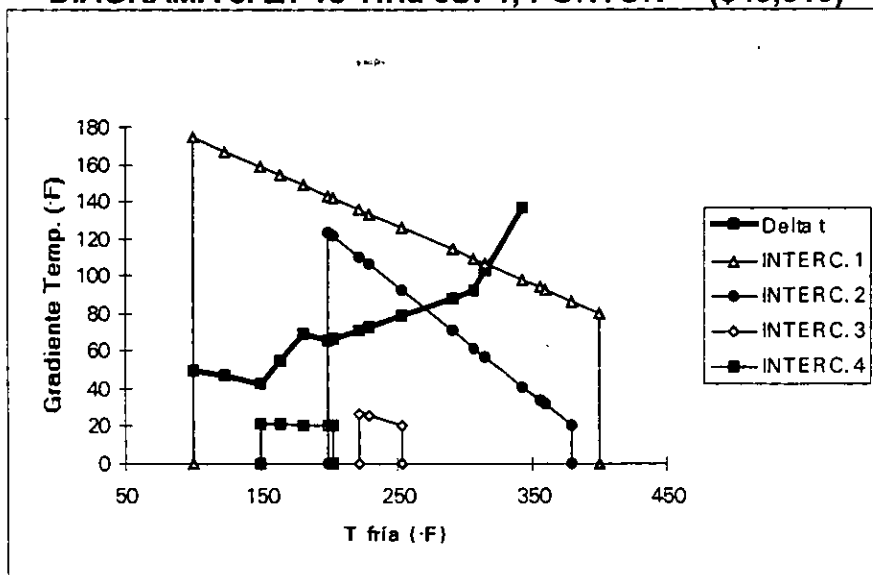
Sin embargo, para el problema 10SP1 (que también solo requiere enfriamiento), usando la heurística normal de Ponton et al. se obtuvo una red con M.R.E. y además, de todas las redes que presentan M.R.E. (incluidas las

heurísticas combinadas), ésta es la que presenta un menor costo anual (menor área y un menor número de unidades).

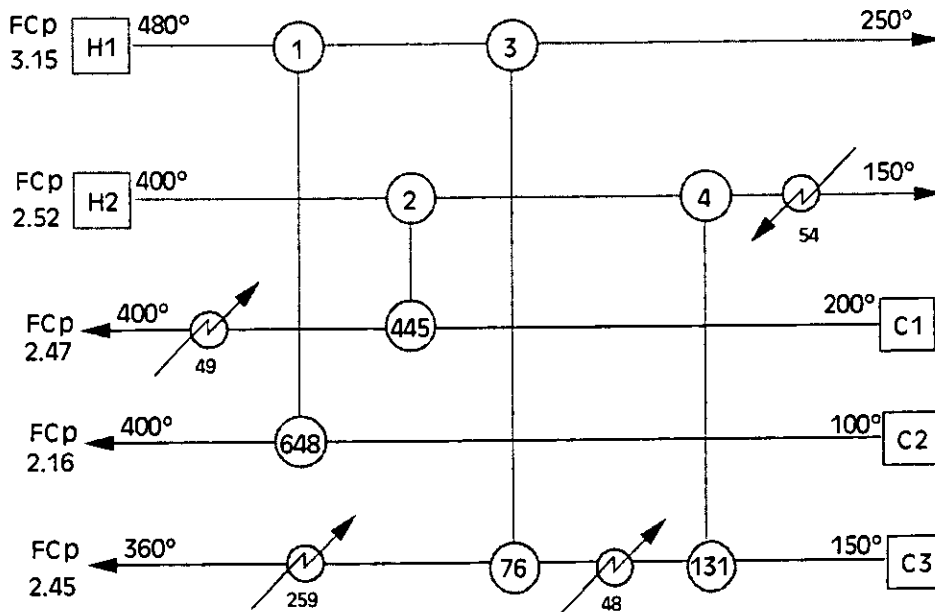
En el caso del problema 5SP1, que según el análisis de punto de pliegue solo necesita servicios de calentamiento, se obtuvieron dos redes; ambas violan la cantidad mínima de servicios. Esto se debe a que se realizan apareamientos con una carga calorífica grande y un ΔT excesivo, que se extienden demasiado en las zonas de baja temperatura.

Véase la gráfica de una de las redes sintetizadas para el problema 5SP1 (configuración de \$49,310 [+28.9% arriba del óptimo] de costo anualizado), notando que el Intercambiador-1 utiliza un ΔT muy grande, -por encima de la curva de ΔT disponible-, especialmente en la zona de temperaturas frías. El problema podría eliminarse si se utiliza otro tipo de distribución de calor para el Intercambiador-1, o bien, limitando la carga de dicho intercambiador. Como el problema de distribución de calor ocurre en la zona más fría con esta heurística, se decidió probar la regla inversa de Ponton, dando por resultado la mejor red sintetizada para el problema.

DIAGRAMA 8. ΔT vs Tfría 5SP1, PONTON (\$49,310)

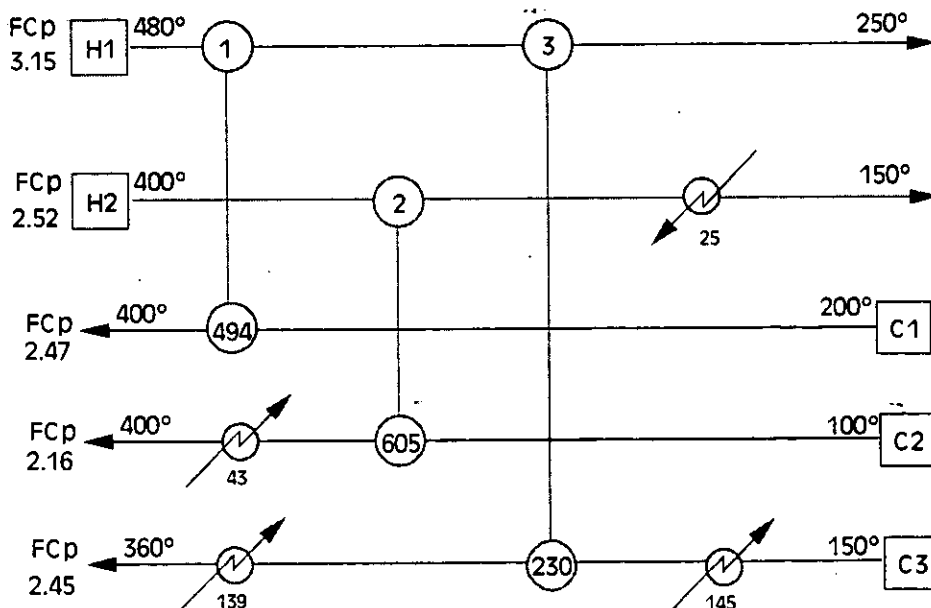


CONFIGURACIÓN 3. 5SP1, PONTON ET AL, (\$49,310)



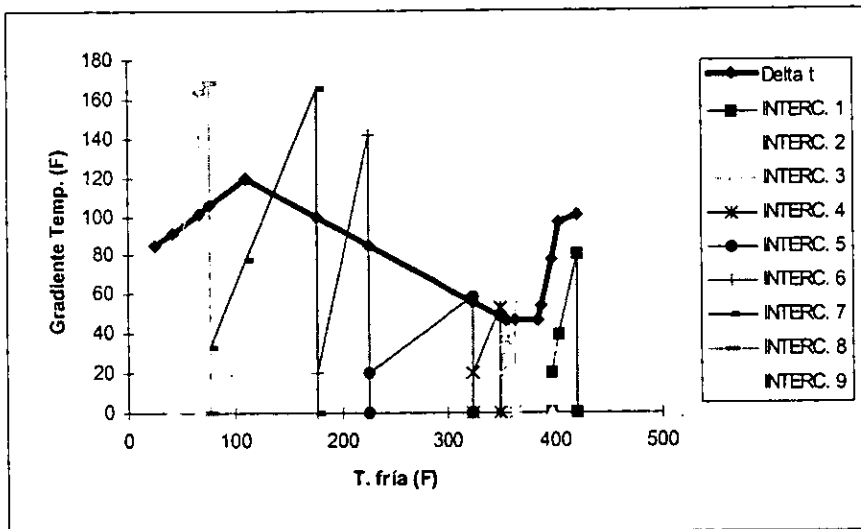
La otra configuración obtenida para el mismo problema, presenta una unidad menos y se acerca más a un diseño M.R.E. Las configuraciones obtenidas se pueden evolucionar, ya que los servicios extras se encuentran en una sola unidad que presenta una carga calorífica baja; asimismo, el área reducida que presenta la configuración de \$43,307 [+13.2% arriba del óptimo], la hace un buen candidato para modificaciones posteriores.

CONFIGURACIÓN 4. 5SP1, PONTON ET AL. (\$43,307)



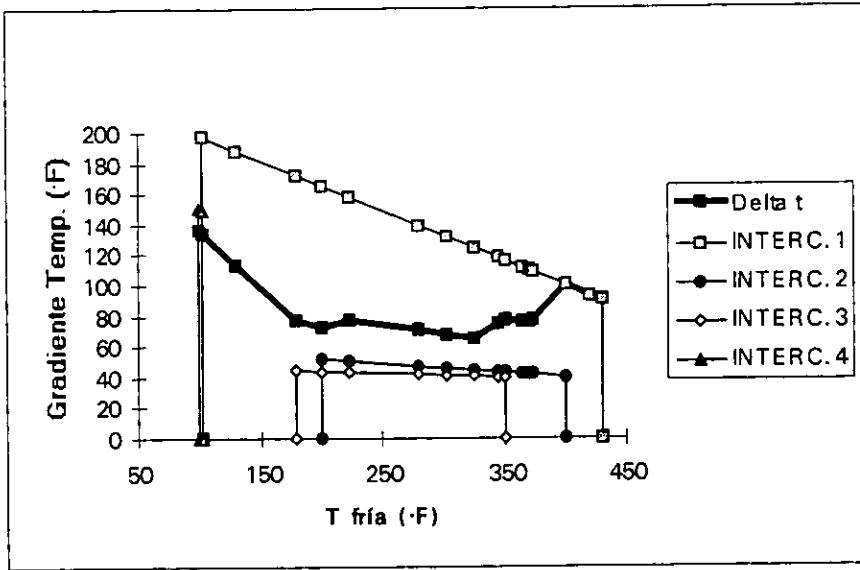
Para el problema 4SP2 sin división de flujo (\$23,716, red óptima), se obtuvo la mejor red, que coincide con la óptima reportada en la literatura. Se puede observar del diagrama ΔT vs. $T_{fría}$ que los apareamientos denotan una marcada diferencia en el FCp de las corrientes que se aparean (gradiente de temperatura muy diferente a la entrada y a la salida del intercambiador, llegando muchas veces al gradiente mínimo de temperatura). Esto da por resultado una configuración con muchos intercambiadores con carga calorífica pequeña.

DIAGRAMA 9. ΔT vs $T_{fría}$ 4SP2 SIN DIVISION DE FLUJO (\$23,716)

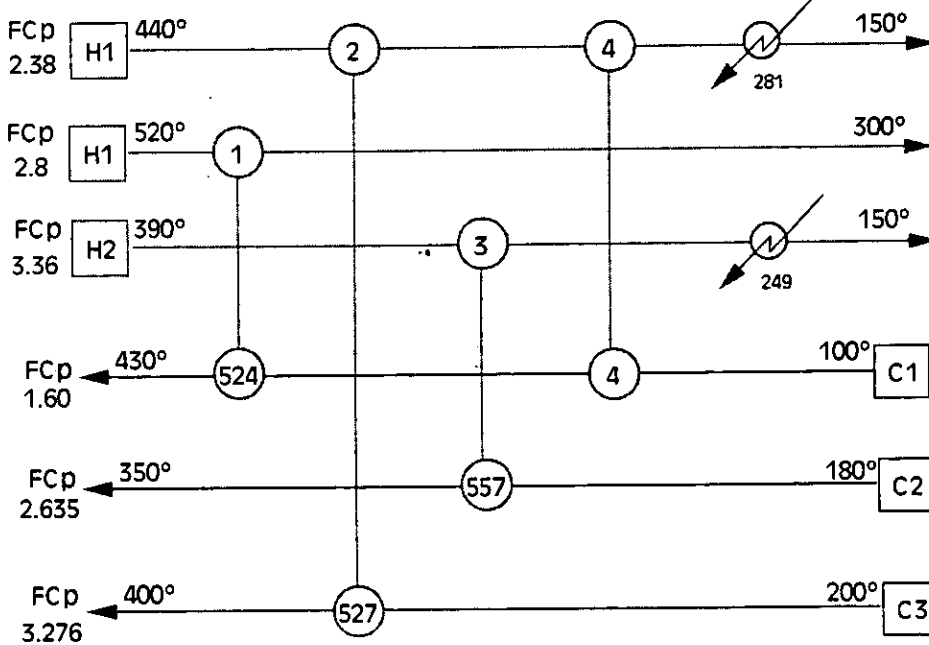


Asimismo, para el problema 6SP1 (\$35,010, red óptima), se obtuvo la red óptima reportada en la literatura. Aunque el Intercambiador-1 hace uso de un ΔT excesivo, esto no parece afectar mucho la recuperación de calor de la red.

DIAGRAMA 10. ΔT vs $T_{fría}$ 6SP1, PONTON ET AL. (\$35,010)



CONFIGURACIÓN 4. 6SP1, PONTON ET AL. \$35,010



En los casos en los cuales falla la heurística (por no presentar Máxima Recuperación de Energía) es importante notar que las redes para estos problemas presentan el número mínimo de intercambiadores posible, y los servicios "extras" se encuentran concentrados en una sola unidad, ya sea un calentador o enfriador.

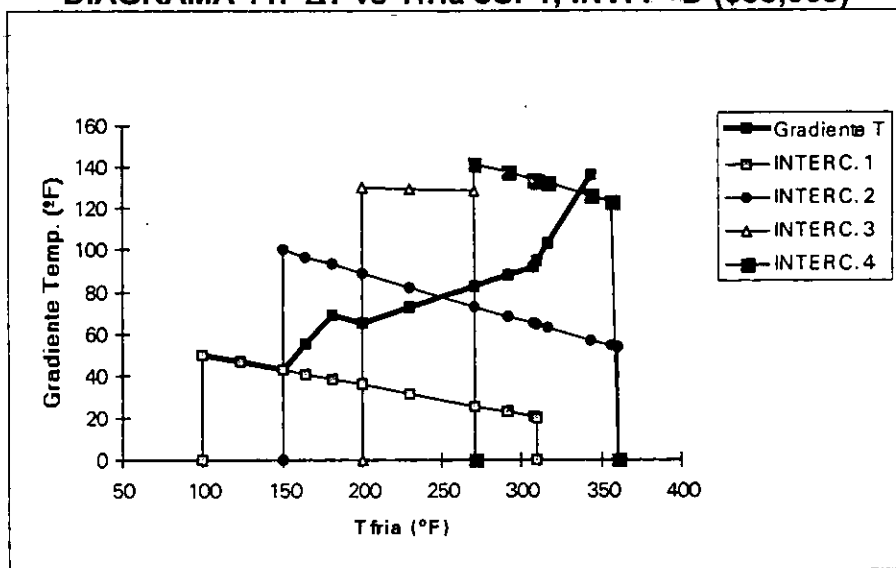
Además, estas redes presentan un área que puede considerarse pequeña. Por lo tanto, parece factible usar un método evolutivo para "romper" estos ciclos de calor y lograr una red con M.R.E. y costo óptimo (Véase la sección 2.8.3. del Capítulo 2).

La mayoría de los apareamientos de Ponton et al. coinciden con los propuestos por la heurística modificada de Muraki y Hayakawa, lo cual indica que la relación (Calor Intercambiado / Costo del intercambiador) casi siempre es la óptima para la heurística simple. Por esta razón, se pueden obtener redes con una área e inversión fija cercanas al óptimo en costo.

b) Inversa Ponton

Casi todas las redes sintetizadas usando esta heurística presentan M.R.E. La excepción es el problema 4SP2 sin división de flujo. Adicionalmente, se obtuvo con la misma heurística la mejor red de todas las heurísticas simples para el problema 5SP1 (\$38,563, +0.8% arriba del óptimo). Como se puede observar del diagrama ΔT vs. T_{fria} correspondiente, la distribución de los gradientes de temperatura sigue de cerca la curva de ΔT disponible.

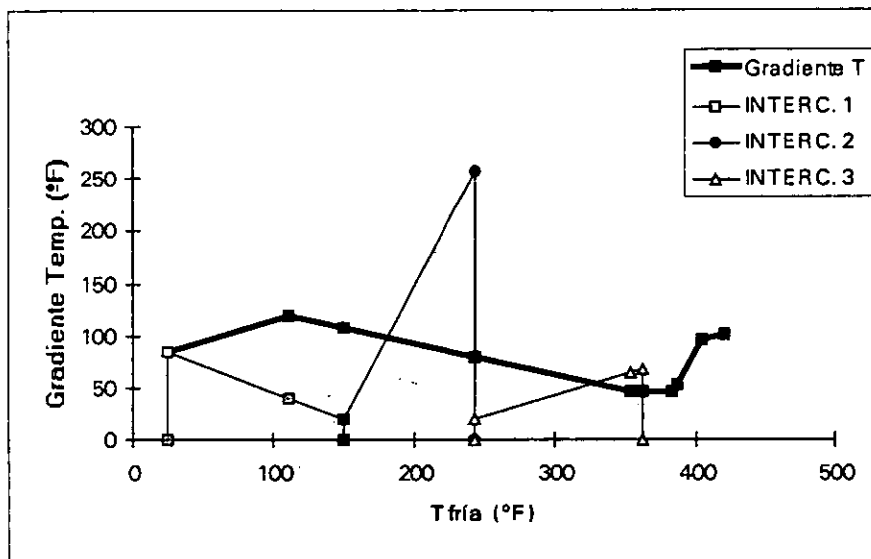
DIAGRAMA 11. ΔT vs T_{fria} 5SP1, INV. P+D (\$38,563)



En el problema 4SP2 sin división de flujo (\$66,490, +180.4% arriba del óptimo) falla la heurística debido a que la única corriente fría tiene un FC_p mucho mayor que cualquiera de las corrientes calientes, y provoca irregularidades en los apareamientos.

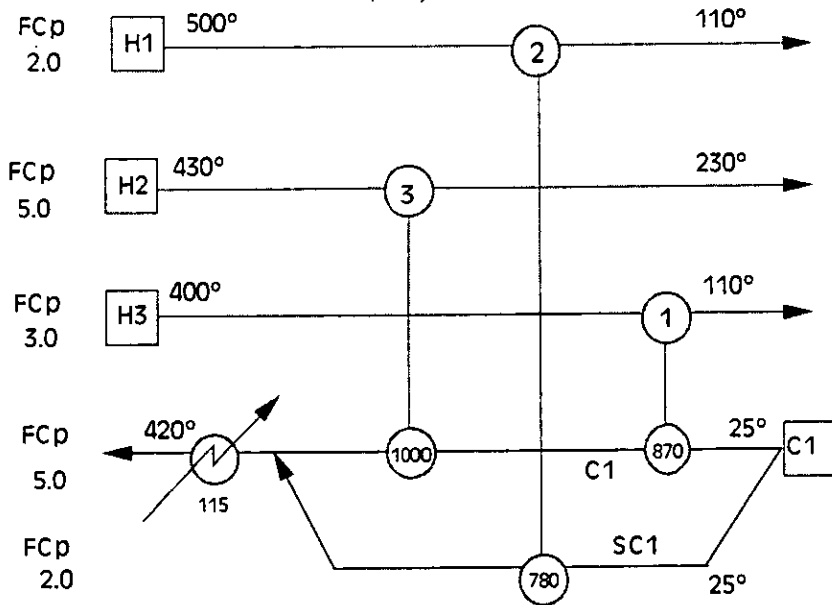
En el diagrama ΔT vs. $T_{fría}$ se puede apreciar que el Intercambiador-2 usa un ΔT excesivo, dejando a las demás corrientes con un menor gradiente de temperatura disponible. Véase la diferencia que existe en el ΔT entre las corrientes a la entrada y salida de los intercambiadores.

DIAGRAMA 12. ΔT vs $T_{fría}$ 4SP2 INVERSA P+D, (\$66,490)



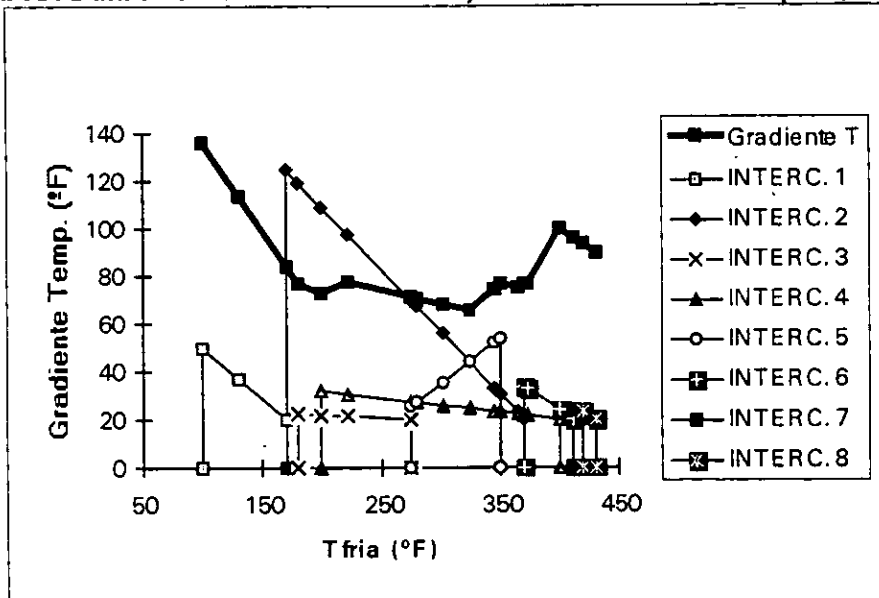
Para el mismo problema, al realizar la división de flujo sobre la corriente fría de acuerdo con lo sugerido por el sistema, se obtuvo la mejor de todas las redes sintetizadas. La red consta de 3 intercambiadores y una unidad de calentamiento, con un área total de 3,324 pies², y un costo total anualizado de \$19,862 [+1.5% arriba del óptimo].

CONFIGURACIÓN 5. INVERSA DE PONTON 4SP2 CON DIVISIÓN DE FLUJO, \$19,862



En los problemas donde solo son necesarios servicios de enfriamiento se desempeña bien, aunque generalmente el número de unidades de las configuraciones excede el mínimo posible; para el problema 6SP1 se obtiene una red con 8 intercambiadores y 5 enfriadores [\$39,829, +13.8% arriba del óptimo].

DIAGRAMA 13. ΔT vs $T_{fría}$ 6SP1, INVERSA PONTON (\$39,829)



Para el problema 10SP1 se obtiene una red con 20 intercambiadores y 8 enfriadores (con un área 64% más grande que la mínima obtenida), lo cual aumenta mucho el valor de la inversión fija, no solo por tener un área mayor sino que además está distribuida en un número mayor de unidades (Recordar que para evaluar el costo del área se usa $\text{Costo} = \alpha * A^\beta$ donde $\beta < 1$; así, podemos afirmar que $\alpha * (A_1^b + A_2^b + \dots + A_m^b) \geq \alpha * (A_1 + A_2 + \dots + A_m)^b$).

La distribución de calor usada por la heurística ("extremo frío") utilizada por la heurística no puede ser aplicado cuando se tiene un gradiente de temperaturas igual al ΔT_{\min} en el extremo frío, y la corriente fría presenta un FC_p menor que la corriente caliente. La solución es fijar un gradiente de temperatura igual al ΔT_{\min} en el extremo caliente, como lo anteriormente explicado para el apareamiento tipo "extremo caliente" para la heurística de simple de Ponton. Cuando se utiliza este tipo de apareamiento, se rompe el "escalonamiento" de temperaturas, con las consecuentes complicaciones que esto acarrea.

En general se puede decir que la heurística Inversa de Ponton conducirá a redes con M.R.E., aunque pueden tener un número de unidades y un área mayor al óptimo; estas configuraciones pueden ser un buen inicio para modificaciones posteriores.

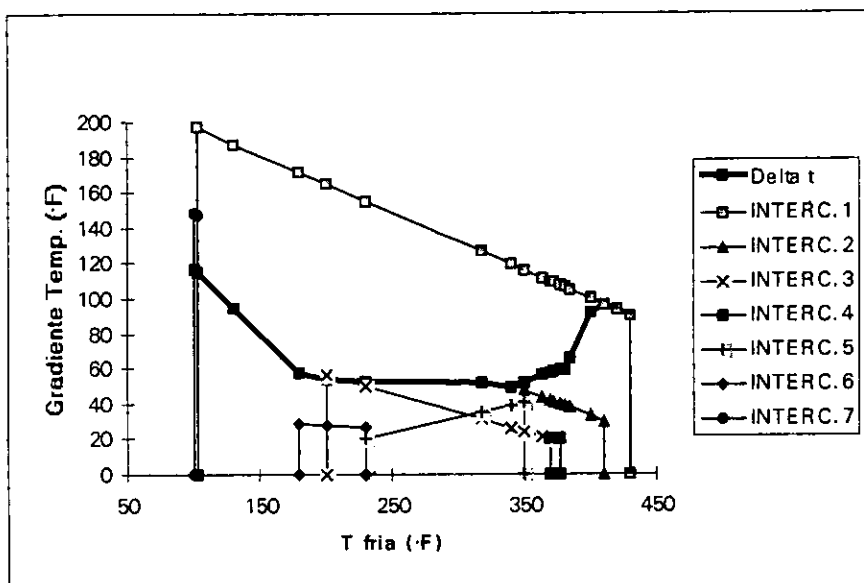
c) Muraki y Hayakawa

Generalmente se obtienen los mismos resultados en cuanto a la recuperación de energía que para la heurística de Ponton y Donaldson, aunque el área total puede diferir. Esto se presenta cuando existe la posibilidad de realizar apareamientos extremos, -con gradientes de temperatura desmedidos- ; la heurística de Muraki y Hayakawa tiene más probabilidades de escogerlos, ya que presentan una relación -calor intercambiado/costo del intercambiador- muy baja.

La heurística aplicada al problema 6SP1 [\$35,010, red óptima] da por resultado la red óptima reportada en la literatura, con cuatro intercambiadores. Esta red es idéntica a la obtenida con la heurística de Ponton.

En el caso del problema 7SP1 [\$41,821, +38.6% arriba del óptimo], la configuración obtenida difiere de la obtenida con la heurística de Ponton; a partir del Intercambiador-3, que utiliza mejor el ΔT disponible que su similar con la otra heurística, empiezan a diferir los resultados. El resultado final con esta heurística es una red que presenta la misma recuperación de calor que la obtenida con la heurística de Ponton, pero con un área mayor, distribuidos en un mayor número de intercambiadores.

DIAGRAMA 14. ΔT vs $T_{\text{fría}}$ 7SP1, MURAKI Y HAYAKAWA (\$41,821)



Aparentemente, el Intercambiador-3 afecta de manera significativa el aprovechamiento del gradiente de temperatura disponible para los siguientes apareamientos. En la gráfica ΔT vs $T_{\text{fría}}$ para el mismo problema utilizando la heurística de Ponton en el **Diagrama 14**, se puede apreciar que se tiene un mejor aprovechamiento del gradiente disponible en los intercambiadores subsecuentes al número 3.

5.2.2 Rathore

a) Calor1

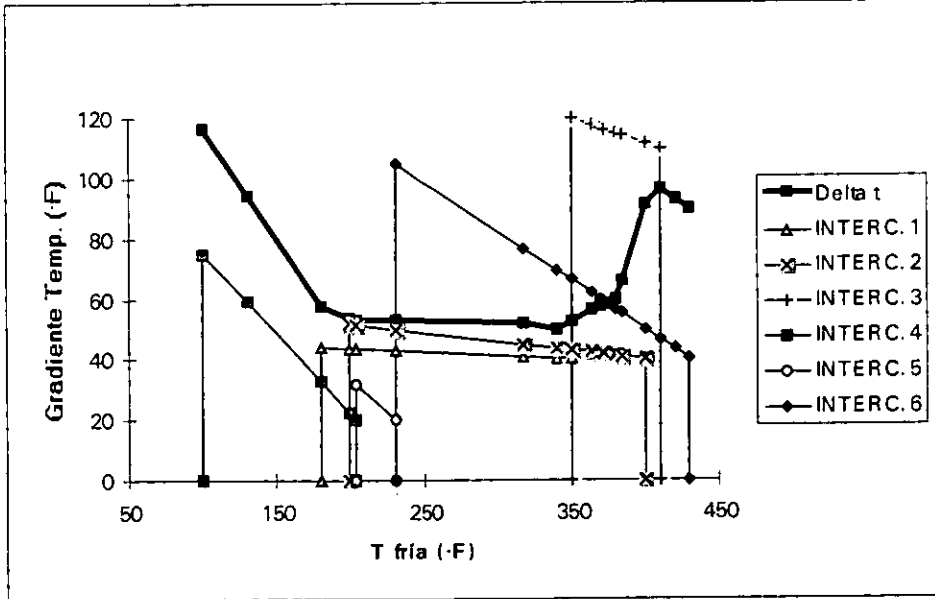
Al estar apareando las corrientes con mayor FCp (que puede ser una medida del calor disponible; e.g. a mayor FCp, mayor calor disponible, al menos en los primeros apareamientos) se trata de obtener intercambiadores muy grandes, que tiendan a lograr redes con el mínimo número de unidades posible.

Cuando se usa con la distribución de calor CALOR1, se realizan apareamientos entre corrientes con diferencias significativas en la temperatura de entrada; además, la regla de distribución de calor hace que el calor se distribuya de manera que los residuales sean menos "transferibles", ya que el apareamiento ocurre en la zona de "entrada" de la corriente (donde se localizan las temperaturas extremas). Por esta razón, no es muy recomendable el empleo de CALOR1 con la presente heurística de selección de apareamientos.

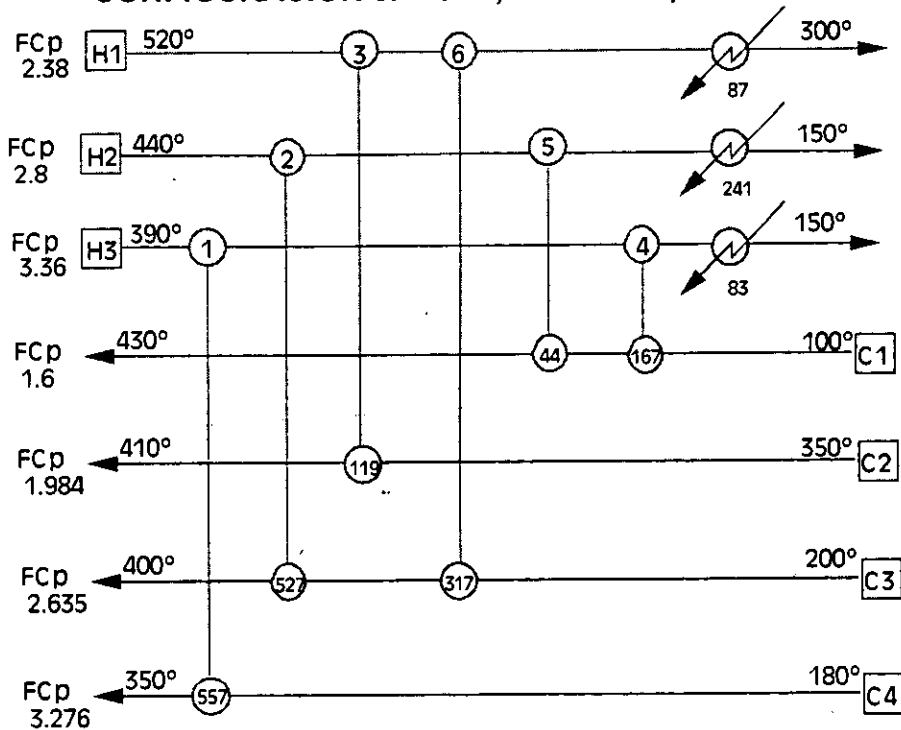
Sin embargo, utilizando esta heurística se obtuvo la mejor red para el problema 7SP1, con 7 intercambiadores y 3 unidades de enfriamiento, y un costo anualizado de \$31,358 [+3.9% arriba del óptimo].

Dicha red presenta el número menor de unidades, así como un área de transferencia reducida, debido a que se diseñó usando apareamientos muy irreversibles. En especial el Intercambiador-3 y el Intercambiador-6 presentan un ΔT desmedido, pero no afecta el desempeño de la red. Fuera de estos intercambiadores, el uso del ΔT disponible es adecuado.

DIAGRAMA 15. ΔT vs $T_{fría}$ 7SP1, RATHORE, CALOR1 (\$31,358)

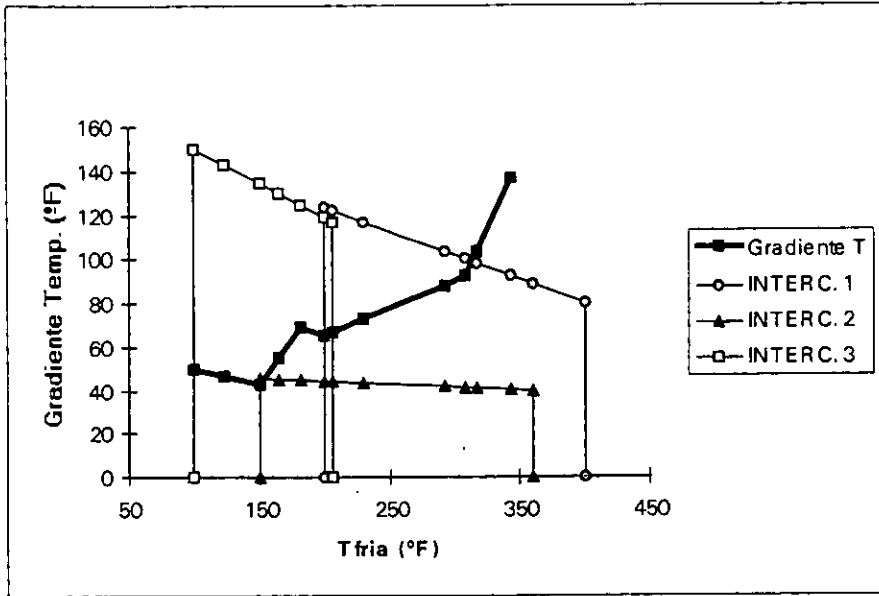


CONFIGURACIÓN 6. 7SP1, RATHORE, CALOR1



El diagrama ΔT vs. $T_{fría}$ correspondiente al problema 5SP1 muestra al Intercambiador-3 haciendo uso desmedido del ΔT disponible. Este puede ser la causa de la pobre recuperación de energía que presenta la red obtenida y con costo total anualizado muy alto [\$56,943, +48.8% arriba del óptimo].

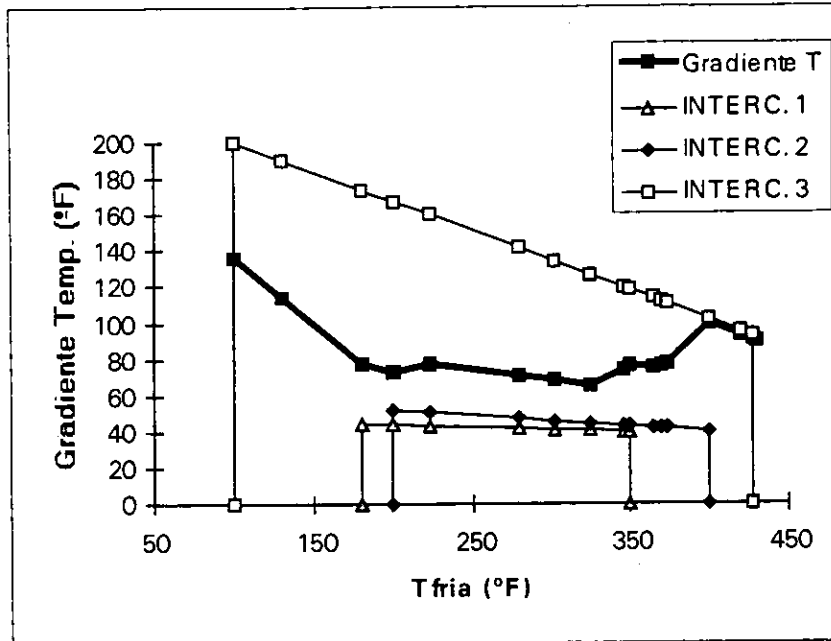
DIAGRAMA 16. 5SP1, RATHORE, CALOR1



En el caso del problema 4SP1 con división de flujo, se obtiene la peor red en cuanto al costo anualizado, debido a los servicios extras de enfriamiento ocasionados por los apareamientos con temperaturas extremas.

La aplicación de esta regla al problema 6SP1 es muy peculiar: aunque no presenta MRE, solamente excede los servicios mínimos por un ligero margen. Por otro lado, la configuración presenta únicamente 3 intercambiadores, lo cual puede representar ventajas operativas y de control. El resultado es una de las mejores redes obtenidas en cuanto a costo anualizado se refiere [\$35,782, +2.2% arriba del óptimo]; puede servir como alternativa de diseño para cuando existen problemas de control. El diagrama ΔT vs. $T_{fría}$ muestra al Intercambiador-3 muy por encima de la curva de ΔT disponible. Esto puede explicar la recuperación de calor que presenta la configuración obtenida.

DIAGRAMA 17. ΔT vs Tfría 6SP1, RATHORE, CALOR1 (\$35,782)

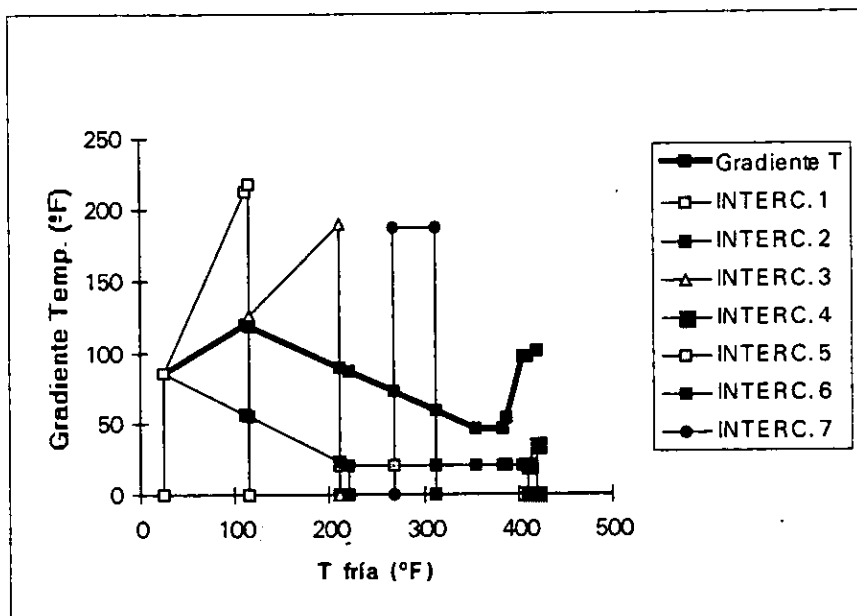


A pesar de obtenerse redes simples y con pocas unidades, la recuperación de energía no siempre es adecuada. No se logran sistemáticamente redes con M.R.E.

b) Calor2

Muchas de las redes obtenidas con esta heurística, presentan M.R.E.; generalmente existen empates en la selección de la corriente secundaria, por tener el mismo valor de FC_p ; cuando se dan estos casos es mejor seleccionar el apareamiento con menor ΔT (ya sea promedio o logarítmico), para lograr una red con M.R.E. Las redes sintetizadas con esta heurística, a pesar de presentar M.R.E., tienen un área total que se encuentra entre las mayores, y exceden el número mínimo de unidades. Para el problema 4SP2 con división de flujo, se obtuvieron dos configuraciones posibles; una de las cuales presenta M.R.E. pero con un área dos veces mayor que la correspondiente a la red con M.R.E. de menor área obtenida (5,734 pies² vs. 2,217 pies²). Como se puede apreciar del diagrama ΔT vs. Tfría, la utilización del ΔT disponible en esta configuración [\$24,251, +23.9% arriba del óptimo], es irregular. En algunos casos se subutiliza éste, mientras que en otros apareamientos se sobreexplota.

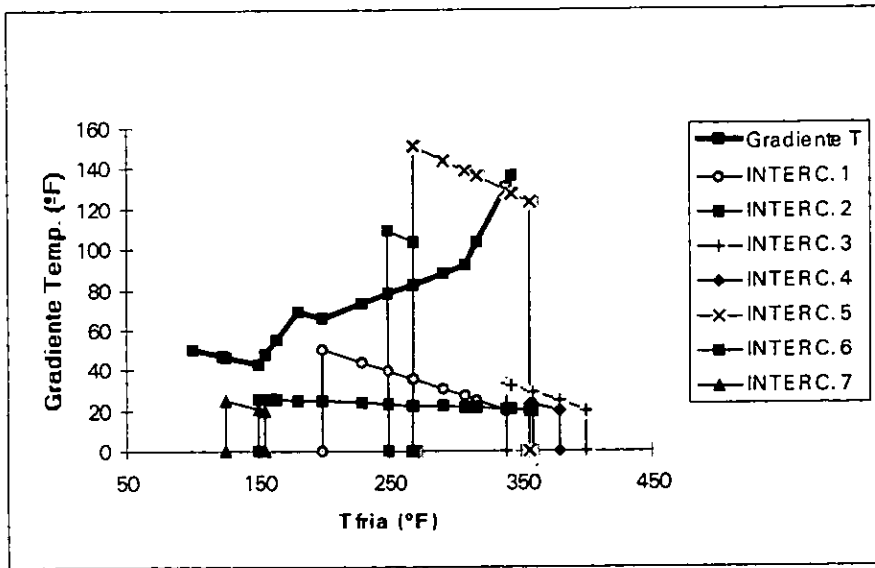
DIAGRAMA 18. ΔT vs Tfría 4SP2 CON DIVISI3N DE FLUJO, RATHORE, CALOR2 (\$24,251)



Los problemas 5SP1 y 6SP1 presentan M.R.E., aunque exceden el mínimo número de unidades. Para el problema 5SP1 se pueden obtener 2 configuraciones posibles [\$41,865, +9.41% arriba del óptimo; \$42,072, +10.0% arriba del óptimo]. Como se puede ver de la gráfica ΔT vs. Tfría de dicho problema, las configuraciones no aprovechan al máximo el ΔT disponible, dando por resultado en ambos casos, un número de unidades mayor al mínimo posible (7 y 8 intercambiadores, respectivamente).

De la misma manera, se espera que los intercambiadores no presenten un área pequeña, ya que el gradiente de temperatura promedio es moderado.

DIAGRAMA 19. 5SP1, RATHORE, CALOR 2 (\$41,865)



CONFIGURACIÓN 7. 5SP1, RATHORE, CALOR 2 (\$41,865)

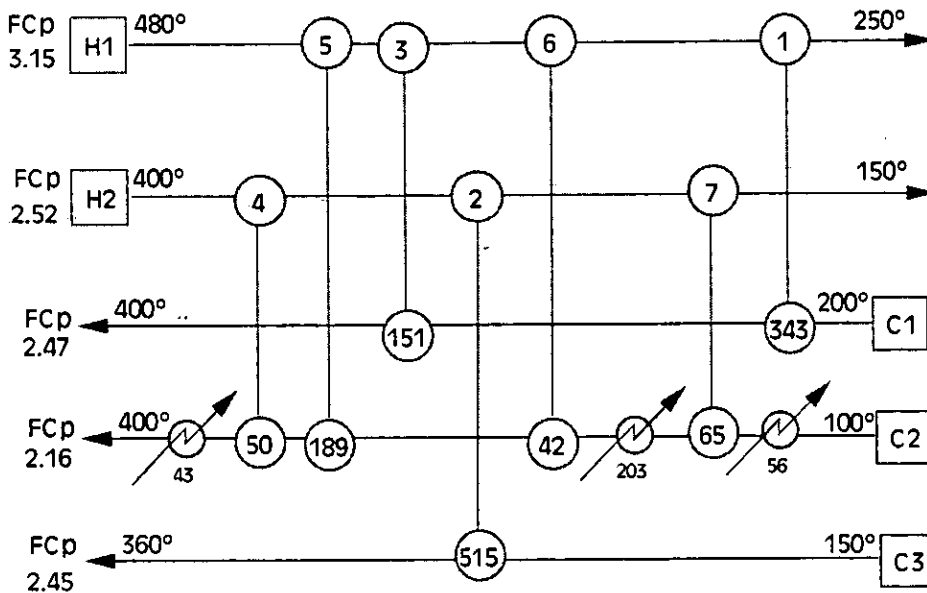
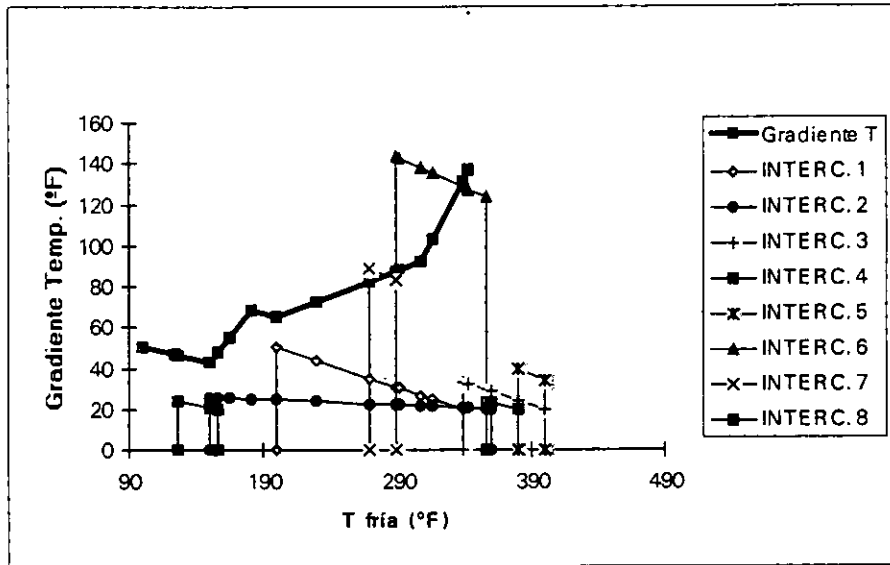


DIAGRAMA 20. ΔT vs Tfría 5SP1, RATHORE, CALOR 2 (\$42,072)



Aunque aparentemente la heurística esta encaminada a obtener intercambiadores con cargas caloríficas grandes, el hecho de aparear corrientes con FCp grande no asegura esto, ya que pueden existir limitantes debido a las temperaturas de las corrientes que no permiten que se transfiera todo el calor disponible. Esto se ve reflejado en que los intercambiadores no van disminuyendo su carga al irse generando nuevos apareamientos; existen irregularidades en el comportamiento esperado, que bien pueden deberse a este tipo de problemas.

A pesar de todo, generalmente se obtienen redes con M.R.E. debido a que los residuales de estos apareamientos son más fácilmente transferibles.

5.2.3 Mayor carga calorífica

a) Calor1

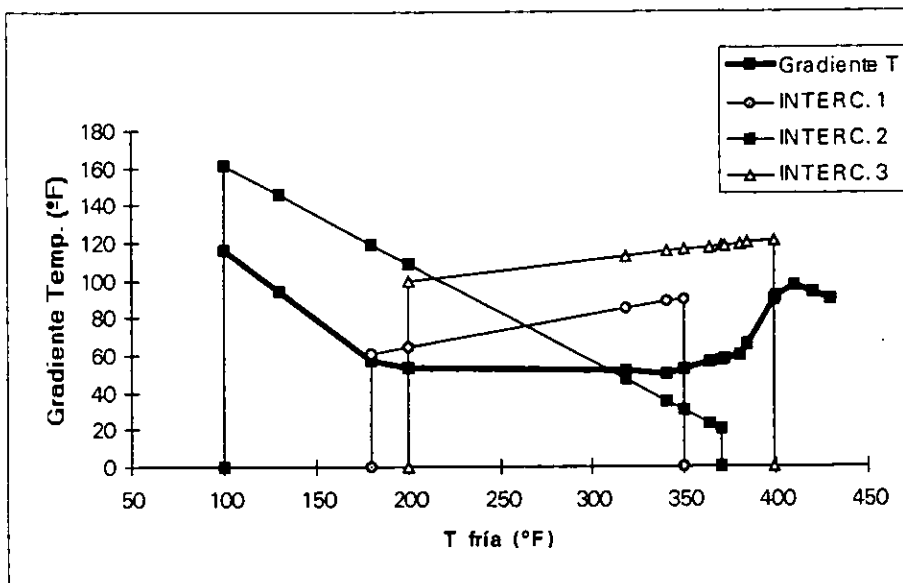
Al aparear las corrientes con mayor calor disponible en primer lugar, se espera que los intercambiadores tengan una carga calorífica grande, y que paulatinamente conforme avanza la síntesis, esta carga vaya disminuyendo. Al igual que en el caso de la heurística anterior, esto no se cumple debido a que no se puede hacer siempre un uso racional del ΔT disponible. A pesar de esto, en esta heurística se espera una mejoría respecto a la anterior, ya que al menos se asegura que se aparearán primero las corrientes con mayor carga calorífica, lo cual no se puede asegurar con la heurística anterior.

Cuando se tiene un número reducido de corrientes presentes en el problema, los resultados son muy parecidos a los generados con la heurística de Rathore, aunque cuando este número aumenta, empiezan a diferir los resultados.

Para todos los problemas estudiados, la heurística de Rathore usada con CALOR1 es igual o mejor que la heurística de MAYOR-CARGA-CALORÍFICA con la misma regla de distribución de calor. Si el apareamiento que escoge MAYOR-CARGA-CALORÍFICA es irreversible, éste tendrá un impacto negativo importante en la recuperación de calor para los siguientes apareamientos generados, debido a la carga calorífica que involucra dicho apareamiento. Esto puede explicarse por qué razón para los problemas 7SP1 y 5SP1, la heurística de Rathore utilizada en combinación con CALOR1, tiene un mejor desempeño.

A continuación se muestra el diagrama ΔT vs. $T_{fría}$ para el problema 7SP1 combinada con CALOR1 [\$64,956, +115.3% arriba del óptimo]; se observa aquí el uso excesivo del ΔT disponible en todos los apareamientos, lo cual explica la pobre recuperación de calor de la configuración obtenida.

DIAGRAMA 21. ΔT vs Tfría 7SP1, MAYOR-CARGA-CALORÍFICA, CALOR1

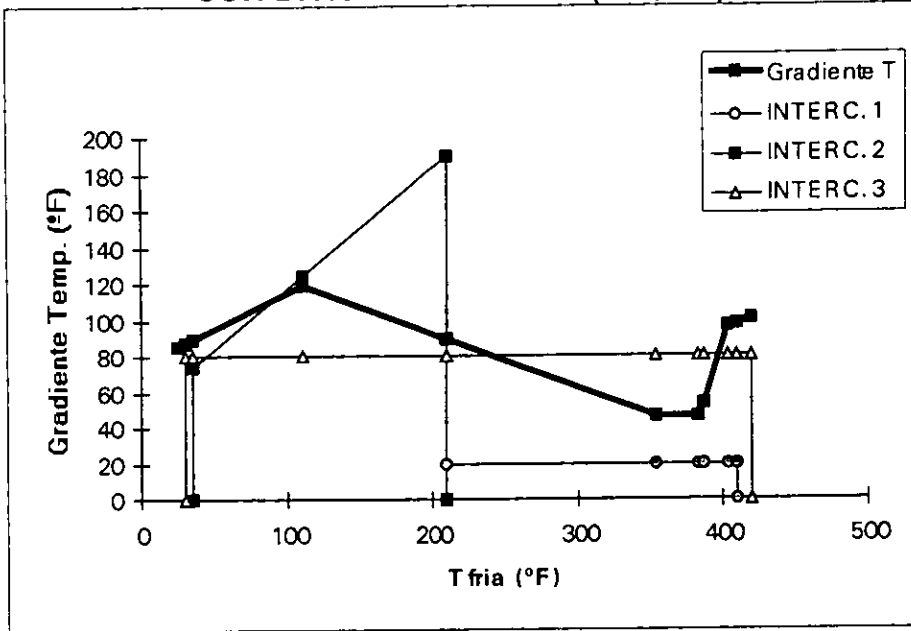


b) Calor2

Sin embargo, cuando se usa CALOR2 como regla de distribución de calor, los resultados varían mucho respecto a la heurística de Rathore: algunas veces mejor, en otro casos peor. Queda de relieve que para fines prácticos, las heurísticas de Rathore y MAYOR-CARGA-CALORIFICA no conducen a sistemáticamente a redes con M.R.E.

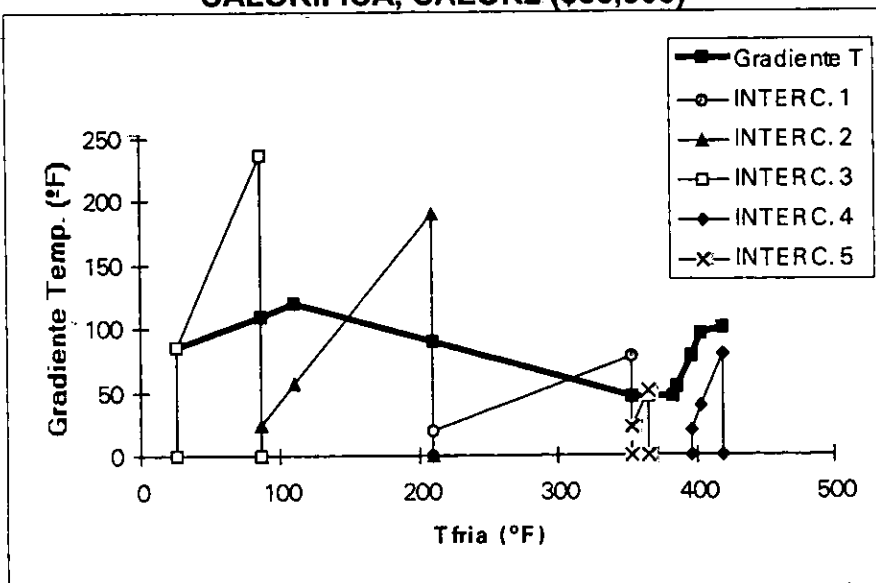
La red obtenida con CALOR2 para el problema 4SP2 con división de flujo, es idéntica a la obtenida con la heurística de Ponton et al. (que solamente usa apareamientos tipo "extremo caliente"). Dicha red presenta M.R.E. y un costo anualizado aceptable [\$20,928, +6.9% arriba del óptimo]. Es de notarse la subutilización que existe en el Intercambiador-1 del gradiente de temperatura disponible.

DIAGRAMA 22. ΔT vs T_{fria} 4SP2, MAYOR-CARGA-CALORÍFICA, CALOR 2, CON DIVISIÓN DE FLUJO (\$20,928)



Para el mismo problema, pero sin división de flujo, se obtuvo una red que no presenta M.R.E. [\$36,905, +55.6% arriba del óptimo]; del diagrama ΔT vs. T_{fria} se observa que existen problemas de transferencia de calor debido a la diferencia de FC_p entre las corrientes (véase la diferencia de temperaturas de entrada y de salida para cada intercambiador).

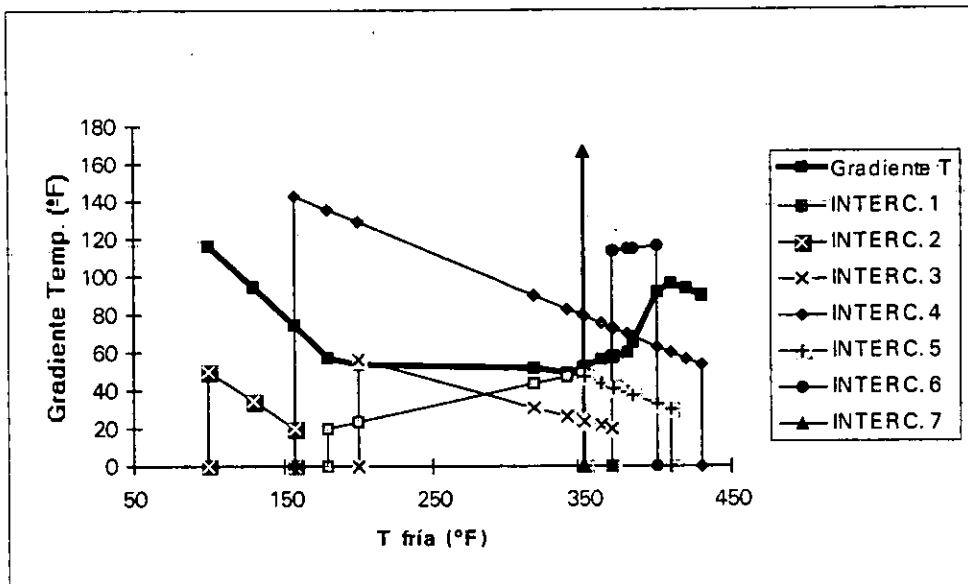
DIAGRAMA 23. ΔT vs T_{fria} 4SP2 SIN DIVISIÓN DE FLUJO, MAYOR-CARGA-CALORÍFICA, CALOR2 (\$36,905)



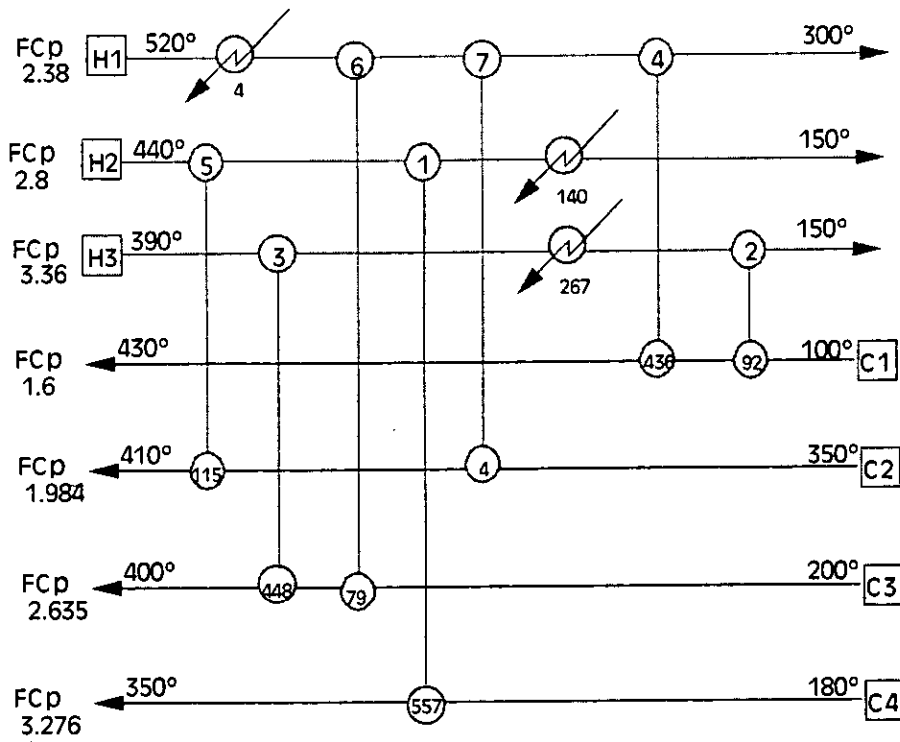
Para el problema 5SP1 en combinación con la regla de distribución de calor CALOR2, se obtiene una red que no presenta M.R.E. y que tiene 4 intercambiadores. El costo total anualizado es de \$49,891 [+30.4% arriba del óptimo], muy por encima del costo de las redes obtenidas con la heurística de Rathore con la misma regla de distribución de calor [\$41,865, +9.4% arriba del óptimo; \$42,072, +9.9% arriba del óptimo].

La gráfica ΔT vs. $T_{fría}$ del problema 7SP1 con la regla CALOR2, muestra una utilización más eficiente del ΔT disponible. Esto explica por qué la red obtenida es la 2a. mejor de todas en cuanto a costo anualizado [\$31,386, +3.9% arriba del óptimo] y consta de 7 intercambiadores (1 más por encima del número mínimo de unidades).

DIAGRAMA 24. ΔT vs $T_{fría}$ 7SP1, MAYOR-CARGA-CALORÍFICA, CALOR2 (\$31,386)



**CONFIGURACIÓN 8. 7SP1, MAYOR-CARGA-CALORÍFICA, CALOR2
(\$31,386)**



Cuando se utiliza CALOR 2, se existen algunas diferencias entre esta heurística y la anterior: se puede ver que las redes sintetizadas con esta heurística presentan en general intercambiadores con mayor carga calorífica y una distribución más equitativa de ésta (e.g. los intercambiadores con carga calorífica "baja" son la excepción y no la norma). Se puede probar esta heurística para tratar de obtener configuraciones con un número reducido de unidades.

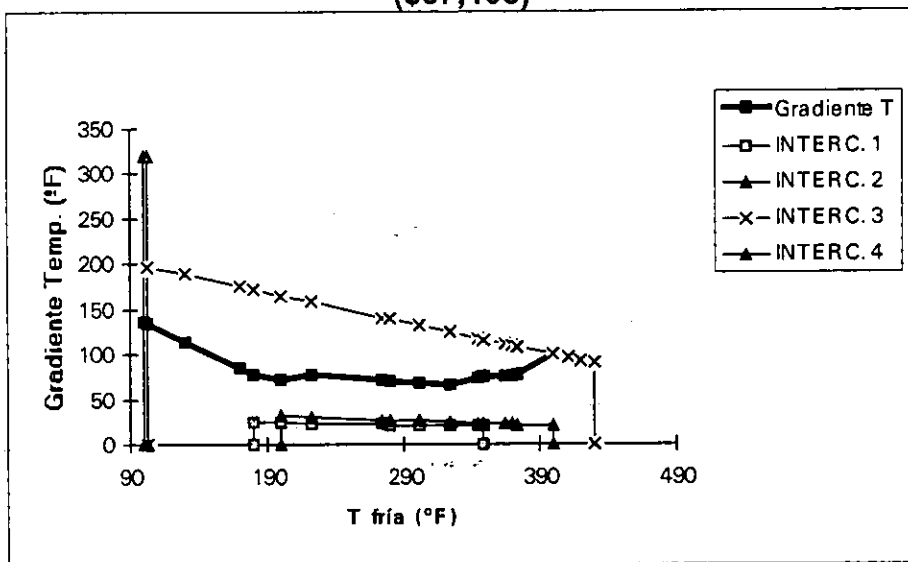
5.2.4 Máximo calor transferido

Esta heurística se comporta muy similar a la anterior; en casi todos los casos el aparear las corrientes con la heurística MAYOR-CARGA-CALORÍFICA es equivalente a usar la heurística de MÁXIMO-CALOR-TRANSFERIDO. Esto es válido para las dos reglas de distribución de calor usadas.

Cuando se usa MÁXIMO-CALOR-TRANSFERIDO con CALOR1, el resultado es equivalente a utilizar la heurística anterior; cuando se usa con CALOR2 existen algunas diferencias significativas; en el caso del problema 6SP1

con CALOR2 existen "empates" (y por lo mismo, varias redes para la misma heurística), ninguno de los cuales coincide con la topología obtenida para la heurística anterior. Dos de estas redes presentan un costo total ligeramente menor que para la heurística de MÁXIMO-CALOR-TRANSFERIDO. Una de las configuraciones posibles para el problema 6SP1 presenta M.R.E. con 4 intercambiadores, y 4 unidades de enfriamiento [\$37,108, +6.0% arriba del óptimo]; la otra presenta 5 intercambiadores y 2 unidades de enfriamiento [\$36,437, +4.1% arriba del óptimo]. En el diagrama ΔT vs $T_{fría}$ para la primera configuración, puede observarse que los Intercambiadores 1 y 2 no utilizan adecuadamente el ΔT disponible, lo cual puede explicar una distribución inadecuada de los servicios de enfriamiento, en varias unidades pequeñas.

DIAGRAMA 25. ΔT vs $T_{fría}$ 6SP1, MÁXIMO-CALOR-TRANSFERIDO, CALOR2 (\$37,108)

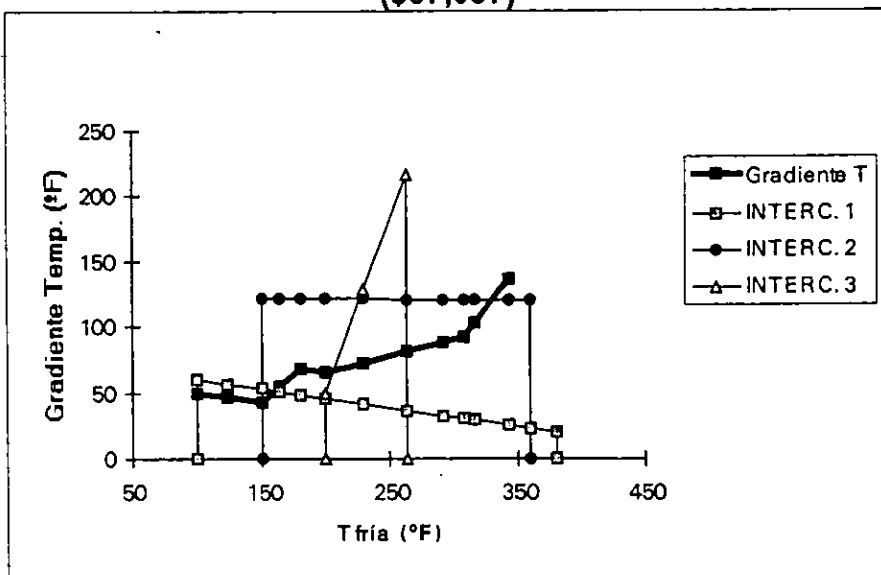


En el problema 7SP1 con la regla de distribución de calor CALOR2, la diferencia entre las heurísticas es aún más marcada: ni siquiera coinciden las redes en la recuperación de calor; las redes sintetizadas usando la heurística de MÁXIMO-CALOR-TRANSFERIDO no presentan M.R.E. y sus costos anualizados son elevados a pesar de que solo presentan 6 intercambiadores [\$36,117, +19.7% arriba del costo óptimo; \$47,627, +57.8% arriba del costo óptimo].

Aunque es probable que con la heurística de MAYOR-CARGA-CALORÍFICA se lleguen a aparear corrientes con un ΔT excesivo, es más probable que ocurra con la presente heurística, ya que la condición para seleccionar un apareamiento es que éste sea el que transfiera la mayor cantidad de calor posible, y los apareamientos con un ΔT elevado son buenos candidatos para ser elegidos. Se pudo comprobar que para el caso del problema 7SP1, la heurística de MÁXIMO-CALOR-TRANSFERIDO combinada con CALOR1 hace en su segunda selección un apareamiento que tiene un gradiente logarítmico de temperatura de 136.68 °F y transfiere 5,236 Btu/hr, lo cual representa un ΔT desmedido. La calidad de los resultados obtenidos con esta heurística es inferior a los obtenidos con la anterior, y además implica generar todos los apareamientos posibles, lo cual requiere más tiempo de computación.

Para el problema 5SP1 combinada con CALOR1, se obtuvo una red con servicios extras de enfriamiento y 3 intercambiadores. Como se observa del diagrama siguiente, dos intercambiadores exceden la curva de ΔT disponible, razón por la cual no presenta M.R.E. así como un costo anualizado muy alto [\$57,007, +48.9% arriba del óptimo].

DIAGRAMA 26. ΔT vs Tfría 5SP1, MÁXIMO-CALOR-TRANSFERIDO, CALOR1 (\$57,007)



5.2.5 Menor ΔT promedio de temperaturas

El realizar apareamientos que tengan el menor ΔT tiene por objetivo racionalizar el uso del ΔT disponible. Desde el punto de vista termodinámica, se están creando apareamientos más "reversibles", que disminuyen la pérdida de exergía. Al utilizar ΔT moderados, es factible obtener redes con M.R.E., ya que implícitamente se está haciendo un "escalonamiento" de temperaturas al aparear las corrientes más parecidas entre sí, aunque el número de unidades generalmente excede el mínimo posible, con un área de transferencia grande.

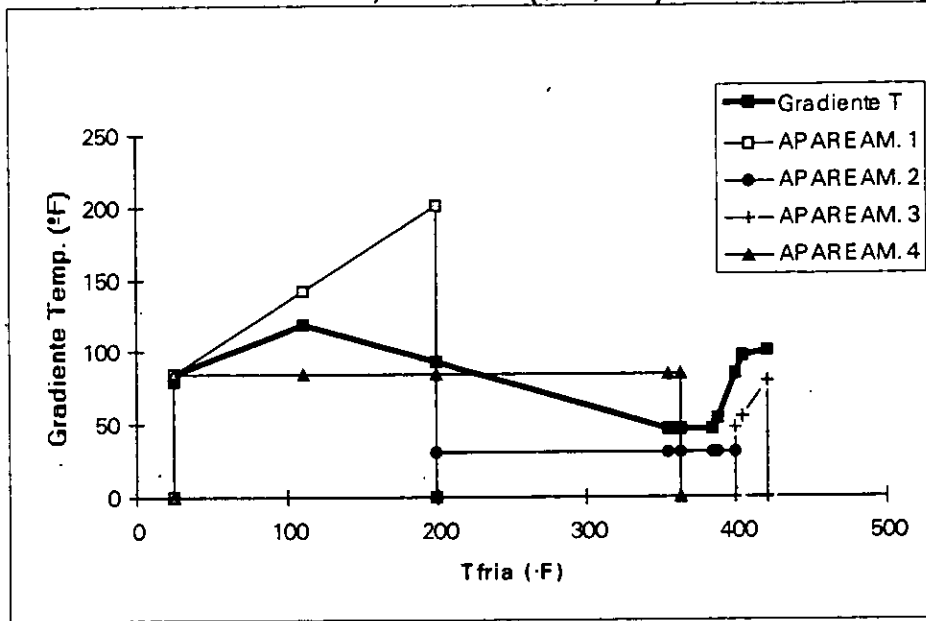
A la inversa que en las heurísticas anteriores, se obtienen mejores resultados usando CALOR1 que con CALOR2. Esto se debe a que la distribución del calor en CALOR1 es más "irreversible" y conduce a apareamientos con un área menor; al usarse en combinación con esta heurística de selección de apareamientos, se escoge el más reversible de los posibles apareamientos irreversibles, que sin embargo asegura un apareamiento con residuales suficientemente "transferibles" y un área moderada.

Como consecuencia, las redes obtenidas usando CALOR1 tienen un número de unidades y un área menor que las obtenidas con CALOR2, sin dejar de presentar M.R.E. Sólo en el caso del problema 4SP2 sin división de flujo con CALOR1 no se obtuvo una red con M.R.E., debido a que cuando la carga calorífica de la corriente fría es mayor que el de la corriente caliente, esta regla distribuye el calor en el extremo frío de las corrientes, y no quedan corrientes calientes que puedan cubrir la temperatura objetivo de la corriente fría. Además, como el FCp de la corriente fría es mucho más grande que el de las corrientes calientes, se limita la cantidad de calor transferido.

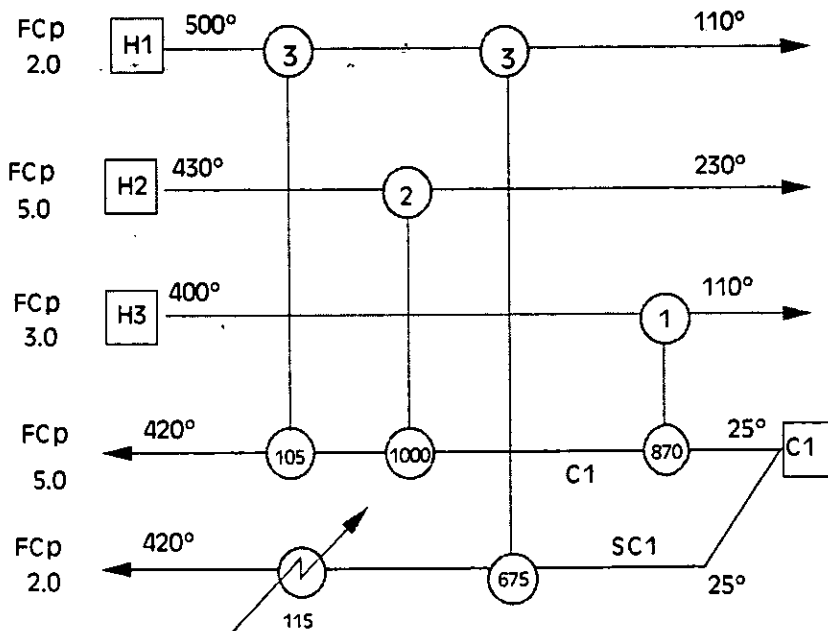
Para el problema 4SP2 con división de flujo con CALOR1, se obtiene la segunda mejor configuración, con 4 intercambiadores y un costo anualizado de \$20,202 [+3.2% arriba del óptimo]. Aunque el área total es menor que el de la mejor red (2,217 ft² vs. 3,324 ft²), el hecho de que ésta esté distribuida en 4 intercambiadores (vs. 3 obtenidas con la heurística Inversa de Ponton) inclina la

balanza a favor de la configuración de menor número de unidades. Como se puede ver del diagrama ΔT vs T_{fria} , los apareamientos hacen un uso racional de la curva de ΔT disponible.

DIAGRAMA 27. ΔT vs T_{fria} 4SP2 CON DIVISI3N DE FLUJO, MENOR ΔT PROM, CALOR1 (\$20,202)

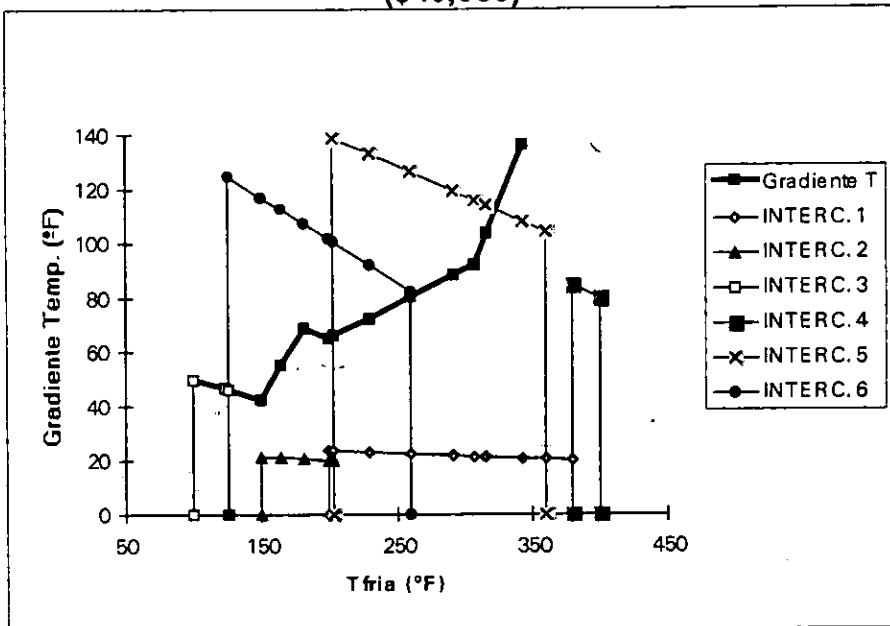


CONFIGURACI3N 9. 4SP2 CON DIVISI3N DE FLUJO, MENOR ΔT PROM, CALOR1 (\$20,202)



Para el problema 5SP1 combinado con CALOR1, se logró una red con 6 intercambiadores y M.R.E. [\$40,066, +4.7% arriba del óptimo]; los servicios de calentamiento están concentrados en una sola unidad. Parece factible utilizar métodos evolutivos para “unir” intercambiadores. El costo anualizado de esta red es el segundo mejor (\$40,066), después de la red obtenida con la heurística inversa de Ponton. Como se puede ver del diagrama ΔT vs $T_{\text{fría}}$, se puede mejorar el aprovechamiento del gradiente de temperatura disponible, en especial para los Intercambiadores 1, 2 y 4. Esto puede explicar el número excesivo de unidades que presenta dicha configuración.

DIAGRAMA 28. ΔT vs $T_{\text{fría}}$ 5SP1, MENOR ΔT PROM, CALOR1 (\$40,066)



Cuando se utiliza CALOR2 se logran redes que son óptimas en aprovechamiento de exergía, ya que se están escogiendo los apareamientos con menor ΔT promedio y todas las posibilidades se generaron usando la regla de distribución de calor más reversible; no obstante, el área y el número de unidades requeridos son excesivos, haciendo que estas redes no sean óptimas desde el punto de vista económico. La heurística utilizada con CALOR2 es un buen punto

de partida para determinar la configuración óptima para aprovechamiento de exergía, y a partir de ésta se puede evolucionar la red, hasta llegar a una mejor en cuanto a la relación (costo / aprovechamiento de exergía).

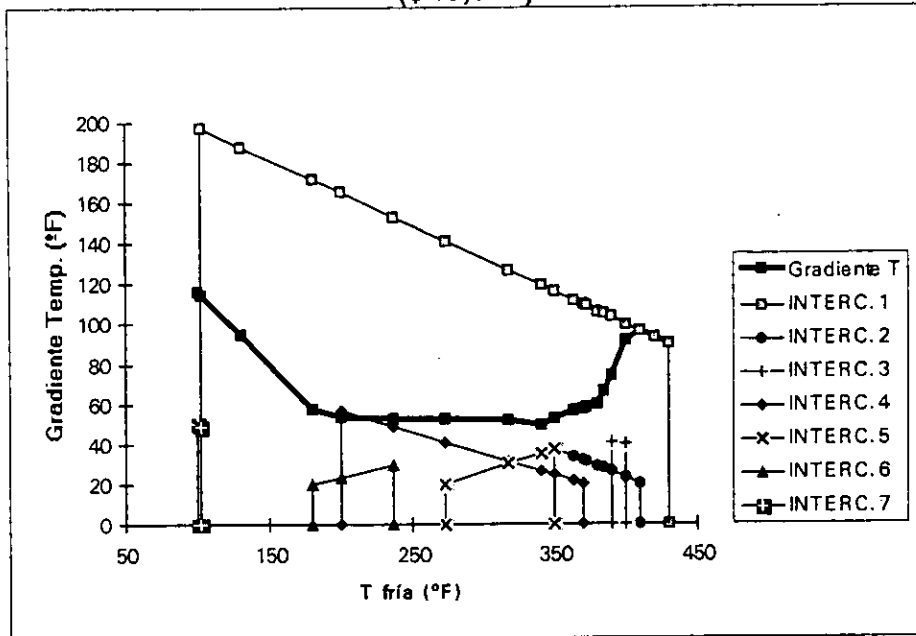
5.2.6 Producto Ponton

La regla de distribución de calor propuesta originalmente por Ponton tiene un apareamiento "reversible", similar al de CALOR2 (cuando la carga calorífica de la corriente fría es mayor al de la corriente caliente) y otro apareamiento "irreversible", similar al de CALOR1 (cuando la carga calorífica de la corriente caliente es mayor al de la corriente fría).

Esta heurística tiene como fin investigar los efectos de los diferentes tipos de apareamiento, usados con una heurística de selección de apareamientos que puede resultar potencialmente en el "escalonamiento" de temperaturas (aparear la corriente caliente de mayor temperatura de entrada con la corriente fría de mayor temperatura objetivo), con el fin simular una heurística de selección de corrientes similar a la de Ponton, e investigar los efectos de otras reglas de distribución de calor diferentes a la normalmente utilizada (en vez de utilizar "extremo caliente" se utilizó CALOR1 y CALOR2).

En el problema 7SP1 con CALOR2 se obtuvo una red con 7 intercambiadores y que no presenta M.R.E. [\$45,992, +52.4% arriba del óptimo]. Se puede observar del diagrama ΔT vs. $T_{fría}$ que el Intercambiador-1 excede por mucho la curva de $\Delta T_{disponible}$, y los siguientes intercambiadores, a raíz del primer apareamiento, se encuentran generalmente muy por debajo de esta curva.

**DIAGRAMA 29. ΔT vs Tfría 7SP1, PRODUCTO PONTON, CALOR2
(\$45,992)**



Al analizar el diagrama anterior se observó que con CALOR2 el primer apareamiento tiene un ΔT excesivo (139.5 °F) con una carga calorífica grande (523,600 Btu/hr) lo cual puede explicar por qué en este caso las redes no presentan M.R.E.

Como se esperaba, cuando se usa con CALOR1 el resultado es bastante deficiente; en ningún caso se logra tener redes con M.R.E. Al realizar apareamientos de acuerdo a la regla de Ponton (corriente caliente con mayor temperatura de entrada con la corriente fría con mayor temperatura objetivo) y combinarla con CALOR1, el resultado es que se aparean las corrientes en temperaturas extremas, y quedan corrientes residuales menos transferibles. Debido a esto, las redes sintetizadas con estas reglas presentan una recuperación de energía muy pobre, pero con área reducida.

Con CALOR2 se logran redes con M.R.E. en casi todos los casos (menos en 7SP1); es importante notar que para el caso del problema 4SP2 sin división de flujo, que presenta muchas dificultades en la recuperación de energía, se obtuvo

una red con M.R.E. idéntica a la obtenida con la heurística de Ponton et al, que usa exclusivamente apareamientos en el extremo caliente de las corrientes. Como la carga calorífica de la única corriente fría en todos los casos era más grande que la correspondiente a las corrientes calientes, la regla CALOR2 distribuye el calor en el extremo caliente de la corriente fría, al igual que la regla de distribución de calor originalmente utilizada por Ponton ("extremo caliente").

5.3 HEURÍSTICAS COMBINADAS

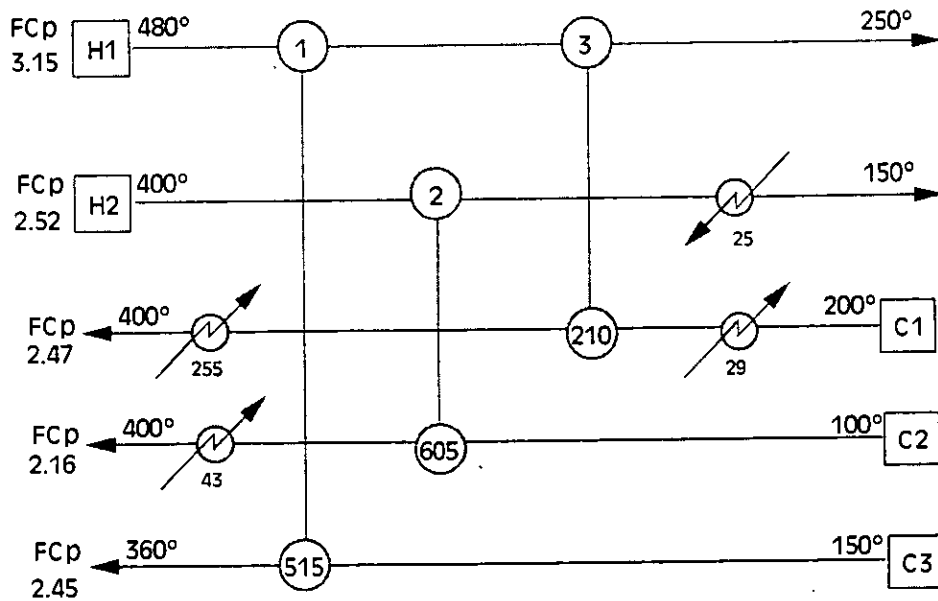
5.3.1 Ponton modificada¹

Cuando se le da mayor énfasis al valor a la función ΔT^1 que a CALOR/COSTO, generalmente se obtienen redes con M.R.E., pero con un mayor número de unidades arriba del mínimo posible. En el caso del problema 5SP1, se logra una mejoría con la heurística modificada respecto a los obtenidos con la heurística simple de Ponton.

Al aumentar el peso de la función CALOR/COSTO, como en el caso del problema 10SP1, se logró disminuir el número de unidades empleado, -con una reducción en la inversión fija-, aunque se corre el riesgo de obtener redes que no presenten M.R.E. , como lo ilustra el caso del problema 5SP1.

Cuando la función CALOR/COSTO tiene el menor peso, para el problema 5SP1 se obtuvo una red que presenta M.R.E. y un costo anualizado de \$40,165; ésta es mejor que las obtenidas con la heurística simple de Ponton et al, ninguna de las cuales presenta M.R.E. Al aumentar el peso de la función CALOR/COSTO para la heurística combinada, la red obtenida ya no presenta M.R.E., su costo anualizado es de \$43,166 [+12.8 arriba del costo óptimo].

**CONFIGURACIÓN 10. 5SP1, PONTON MODIFICADA1, F1=F3=1
(\$43,166)**



En el problema 10SP1 que es de los más complicados por tener mayor número de corrientes, se obtuvo la mejor red de las heurísticas combinadas al aumentar la intensidad de la función CALOR/COSTO, con 10 intercambiadores y un costo anualizado de \$45,467 [+3.6% arriba del costo óptimo]. Aunque así, la red obtenida con la heurística simple es mejor, ya que presenta solo 8 unidades y un costo anualizado de \$44,675 [+1.9 arriba del óptimo]. Al disminuir la intensidad de la función CALOR/COSTO para la heurística combinada, se obtiene una red de 22 intercambiadores y un costo anualizado de \$53,260 [+21.4% arriba del óptimo], a pesar presentar M.R.E. El efecto de la disminución de la intensidad de dicha función es dramático para este problema, que se caracteriza por presentar una gran complejidad.

5.3.2 Inversa de Ponton modificado1

Para el problema 10SP1 ninguna de las redes obtenidas presenta M.R.E. (los costos anualizados son \$53,711 [+22.4% arriba del óptimo] y \$134,011 [+205% arriba del óptimo]; la recuperación de calor es muy pobre), mientras que para el problema 7SP1 solamente la red que se sintetizó con la menor intensidad

para la función CALOR/COSTO presenta M.R.E. (8 intercambiadores, con un costo anualizado de \$33,496 [+11.0% arriba del óptimo]).

Para el problema 5SP1 se obtuvo la mejor red de todas (incluyendo las heurísticas simples) cuando se utilizó la misma intensidad para las funciones CALOR/COSTO y ΔT^{-1} [\$38,563. +0.8% arriba del óptimo]), con 4 intercambiadores y dos unidades de calentamiento; es idéntica a la obtenida con la heurística inversa simple de Ponton. Para el mismo problema, la red sintetizada con la menor intensidad para la función CALOR/COSTO presenta M.R.E., aunque tiene el inconveniente de tener 9 intercambiadores [\$42,123, +10.0% arriba del óptimo].

Por los resultados obtenidos, se puede observar que la sensibilidad al peso de la función CALOR/COSTO es mayor en esta heurística que en la anterior; los pesos utilizados para esta función parecen demasiado altos en algunos casos, impidiendo una recuperación de calor adecuada.

5.3.3 Ponton modificado2

Solamente para el problema 7SP1 no se presenta M.R.E.; en este caso, los servicios auxiliares extras se concentran en una sola unidad (susceptible de evolucionarse). Para el problema 10SP1 se obtuvo una red con 12 intercambiadores [\$46,772, +6.6% arriba del óptimo]; para el problema 5SP1 se obtiene una red con el número mínimo de intercambiadores, pero con 3 unidades de calentamiento, elevando sensiblemente su costo anualizado [\$40,165, +4.9% arriba del óptimo]. No obstante, el hecho de que estas redes presenten M.R.E. hace que puedan considerarse como punto de partida, y perfeccionarse mediante métodos evolutivos.

5.3.4 Inversa de Ponton modificada2

La aplicación de la presente heurística lleva a resultados que contrastan con la heurística anterior, ya que donde la anterior se desempeña muy bien, con la

presente heurística los resultados no son tan buenos, y viceversa. Para el problema 7SP1 se logra una red con M.R.E. y que figura como la 2a. mejor red obtenida de todas las heurísticas probadas por una pequeña diferencia respecto a la primera [\$31,374, +3.9% arriba del óptimo]; para el problema 10SP1 se tiene una red que presenta gran cantidad de servicios extras, con un costo elevado [\$86,419, +97.0% arriba del óptimo]. Para el problema 5SP1, al igual que en la heurística anterior se obtiene una red con M.R.E., que además es idéntica a la obtenida con la regla inversa simple de Ponton [\$38,563, +0.8% arriba del óptimo] que es la mejor de todas las obtenidas. Esto refuerza la teoría de que cuando se utilizan las reglas propuestas por Ponton y se obtiene una red que no presenta M.R.E., es conveniente utilizar la regla inversa.

5.3.5 Carga calorífica + Calor/Costo

Funciona deficientemente; el seleccionar las corrientes con mayor contenido calorífico y usar la función CALOR/COSTO como criterio de selección, habilita apareamientos con ΔT muy grandes. Como se puede ver de los resultados obtenidos, ninguna de las redes diseñadas con esta heurística presentan M.R.E., ni aún en las que se utilizó CALOR2. Se tiene por resultado redes con un costo anualizado muy alto, y que son difíciles de evolucionar, por que en la mayoría de los casos los servicios extras se encuentran distribuidos en varias unidades.

5.3.6 Carga calorífica + Calor/Costo + ΔT^1

Si la función ΔT^1 es el criterio principal, existe una mejoría en los resultados; se debe resaltar que ninguna de las redes con CALOR1 presenta M.R.E. Cuando se usa con la regla CALOR2 y la menor intensidad para la función CALOR/COSTO, se obtienen redes con M.R.E., aunque en algunos casos el número de intercambiadores es muy grande (21 para el problema 10SP1, con un costo anualizado de \$52,360 [+19.4% arriba del óptimo]).

Si se decide dar una intensidad mayor a 0.1 a la función CALOR/COSTO, es recomendable introducir un criterio adicional para limitar el ΔT (e.g. si aún

existen otras posibilidades, rechazar apareamientos seleccionados si en algún extremo del intercambiador $\Delta T > 120^{\circ}\text{F}$). Este tipo de reglas podrían funcionar como un seguro para evitar que seleccionen apareamientos altamente irreversibles.

El peso de las funciones se puede optimizar al aplicarse con la presente heurística; cuando se utiliza con CALOR 2 y manteniendo el peso de la función ΔT^1 constante en 1.0, el valor óptimo de la función CALOR/COSTO fluctúa entre 0.1 y 0.5. No se recomienda la utilización de CALOR1 con esta heurística.

5.3.7 Suma1 (Calor/Costo + ΔT^1)

Cuando la intensidad de la función CALOR/COSTO es baja, los resultados son aceptables al utilizarse con CALOR1; en los problemas 5SP1 y 10SP1 se obtienen redes con M.R.E., aunque el número de unidades está por encima del mínimo. Para el problema 7SP1 se obtienen una red con pocas unidades (8 intercambiadores), y que puede ser una buena opción [\$32,802, +8.7% arriba del óptimo].

Al usarse intensidades bajas de la función CALOR/COSTO combinadas con CALOR2, se obtienen redes con M.R.E. pero con demasiados intercambiadores. Para el caso de 10SP1 con CALOR2 no se obtuvo un resultado porque la generación de intercambiadores agota la memoria de la computadora. Sin embargo, cabe mencionar que al usarse intensidades de 1.0 con dicha función, no se obtienen redes que presenten M.R.E. con ninguna de las reglas de distribución de calor probadas.

Aparentemente, esta heurística puede mejorarse si se le da un peso a la función CALOR/COSTO de tal manera que $0.1 < \text{Peso función CALOR/COSTO} < 1.0$. Esto es especialmente cierto cuando se use en conjunto con CALOR2, ya que esto llevará a intercambiadores más grandes, y un menor número de unidades.

La calidad de los resultados obtenidos con esta regla se encuentran a la

mitad entre los generados a partir de reglas de conservación de exergía (e.g. aparear las corrientes con menor ΔT), y los generados con reglas muy irreversibles (e.g. aparear las corrientes con mejor relación CALOR/COSTO).

5.3.8 Suma3 (Calor/Costo + Calor Transferido + ΔT^1)

Cuando se utilizó combinada con CALOR1, una red con M.R.E. para el problema 5SP1, con un costo aceptable [\$40,066, +4.6% arriba del óptimo]; para los problemas 7SP1 y 10SP1, no se obtuvieron redes con M.R.E., pero los servicios extras se encuentran concentrados en una sola unidad, y la carga calorífica es pequeña [\$36,433, +20.7% arriba del óptimo; \$59,123, +34.8% arriba del óptimo, respectivamente].

Al combinarse esta heurística con CALOR2, se obtuvo una red con M.R.E. para el problema 7SP1, con un número de unidades excesivo (16 unidades, \$38,202, +26.6% arriba del óptimo). Para el problema 10SP1 no fue posible obtener resultados, al agotarse la memoria de la computadora.

No se probaron variaciones con el peso de las funciones que constituyen esta heurística, sin embargo, se cree factible que se puedan optimizar para mejorar los resultados. En especial cuando se utiliza con CALOR2, es importante aumentar el peso de las funciones CALOR/COSTO o CALOR TRANSFERIBLE, de tal manera que se habiliten apareamientos con intercambiadores más grandes. Los mejores resultados se obtuvieron con CALOR1.

5.3.9 Calor/Costo* ΔT^1

Solo en el caso del problema 5SP1 se obtienen redes con M.R.E. (\$39,708, +3.8% arriba del óptimo, 4 intercambiadores con CALOR1; \$40,668, +6.3% arriba del óptimo, 5 intercambiadores con CALOR2). En los problemas 10SP1 y 7SP1, la recuperación de calor es muy deficiente. Aparentemente, el utilizar el producto de estas dos funciones conlleva a apareamientos altamente irreversibles.

5.3.10 Calor/Costo * Q-Transferible * ΔT^1

La recuperación de energía es similar al de la heurística anterior; las redes tienen pocas unidades de carga calorífica grande, pero no se logran redes con M.R.E. en ninguno de los casos y además los servicios extras se encuentran distribuidos en varias unidades. Los apareamientos realizados por esta heurística son aún más irreversibles que en el caso anterior.

5.4 ESTUDIO DE UN PROBLEMA CON PUNTO DE PLIEGUE

Se eligió el problema 8SP1 que presenta un punto de pliegue a la temperatura de 170/150 °F, debido a que es un problema razonablemente complicado (por el número de corrientes involucrado) y que además requiere división de flujo en una corriente en el punto de pliegue. Para abordar el problema, se seleccionaron unas pocas heurísticas de selección de apareamiento, todas ellas sencillas, que permitieran estudiar el efecto de otras variables de diseño, como son: relación de división de flujo, selección de apareamientos en el punto de pliegue y reglas de distribución de calor más adecuadas. En todos los casos estudiados, se separaron las corrientes, de tal manera que se pudiera realizar primero la síntesis del sistema arriba del pinch, y después, la parte de abajo.

5.4.1 Heurística Ponton

Para esta heurística se decidió empezar a diseñar partiendo desde el extremo caliente de la red y realizar la división de flujo hasta que fuera necesario; es decir, se parte del extremo caliente y se "escalonan" los apareamientos, hasta llegar a la temperatura de pinch. Cuando el sistema indicaba que podía llevarse a cabo un apareamiento pinch y solamente una de las corrientes del intercambiador quedaba en el pinch, se realizaba la división de flujo. Cuando se presentaba el caso, se tenía la opción de realizar la división de flujo en modo interactivo (guiado por el usuario) o usar la sugerencia del sistema como guía. Las dos posibilidades presentadas en los resultados corresponden a la sugerencia del sistema (basada

en los criterios explicados en el Capítulo IV), y el otro, a criterio del usuario (basada en el cálculo del FCp de la corriente caliente necesario para igualar el contenido calorífico de la corriente fría con la que se va a aparear).

Se probaron varias posibilidades para la división de flujo en la corriente caliente H13 que según el MDP es necesario dividir en dos ramales. Arriba del pinch, las redes obtenidas tienen un número grande de unidades (10 ambas, con \$38,275, -0.07% abajo del óptimo; \$38,236, -0.2% abajo del óptimo); con una de las divisiones de flujo ensayadas se logra M.R.E., con la otra se logra una red con una cantidad de servicios ligeramente mayor al mínimo posible. A consecuencia del número de unidades excesivo, el área para los dos casos se encuentra lejana al óptimo.

Existen problemas potenciales cuando se realizan los apareamientos pinch, ya que la regla de distribución de calor de Ponton realiza el apareamiento en el extremo caliente, es posible que este tipo de apareamientos aplicados sobre dos corrientes pinch, no necesariamente conduzca a un apareamiento pinch (Véase el **Anexo 2**)

5.4.2 Heurística de Ponton con Calor3

Con el fin de asegurar que los apareamientos entre corrientes pinch eliminen la parte de la corrientes que toca el punto de pliegue, se modificaron las reglas de distribución de calor. Se creó la regla CALOR3 que habilita apareamientos del tipo extremo caliente cuando se encuentra en la zona lejana al pinch (igual que la heurística de Ponton); extremo frío cuando se tienen corrientes pinch cuando se está diseñando la zona arriba del pinch; y apareamientos del tipo extremo caliente (como los usados en la heurística original de Ponton) cuando ambas corrientes tocan el punto de pliegue y se está diseñando la parte de abajo del pinch. De esta manera, se facilita el aparear correctamente las corrientes pinch (dando por resultado apareamientos pinch), y se puede lograr el escalonamiento de temperaturas en los apareamientos.

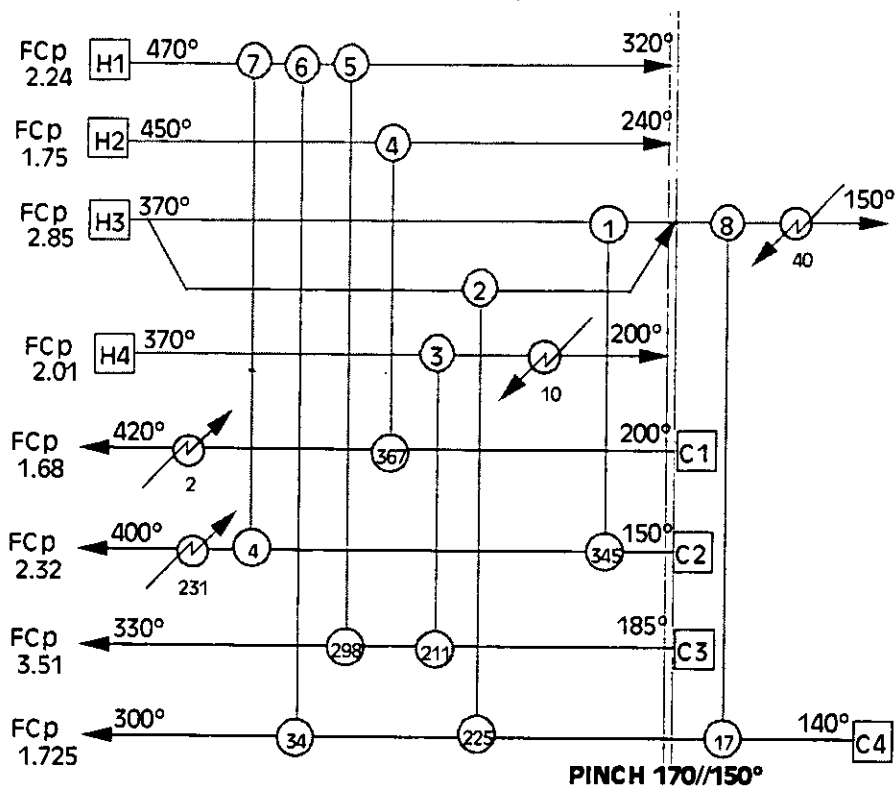
Cuando se diseñó la red sin hacer la división de corrientes pinch/lejanas al pinch, se obtuvo una red con M.R.E., con 10 unidades [\$38,164, -0.36% abajo del óptimo]. Sin embargo, a pesar de ser una de las dos redes que presentan M.R.E. entre todas las obtenidas, las mejores redes obtenidas no presentan M.R.E. (por un ligero margen), ya que el efecto del número de unidades es muy importante.

5.4.3 Heurística inversa de Ponton

Para lograr los mejores resultados con esta heurística, se realizó la división de flujo desde el inicio de la síntesis (ya que la heurística empieza apareando las corrientes en las temperaturas más bajas, que para el sistema arriba del pinch, corresponden a las corrientes pinch), y no se separaron las corrientes en pinch y lejanas al pinch. Esto da por resultado redes que no presentan M.R.E. pero que tienen un número muy reducido de unidades y un área pequeña. Existe una moderada transferencia de calor alrededor del pinch. Sin embargo, la principal virtud de esta heurística es una reducción sustancial en el número de unidades y en el área de transferencia asociada a ésta. Se observó en este caso un efecto interesante: una red con un número menor de unidades (el caso de la red con un ramal de H13 con FCp de 23,200 Btu/Hr °F, 7 intercambiadores con un costo anualizado \$37,767, -1.4% abajo del óptimo y 3,157 ft²) tiene un área y costo mayor que su contraparte con el ramal de 17,250 Btu/Hr °F (8 intercambiadores, \$37,613, -1.8% abajo del óptimo y 2,746 ft²). Esto se debe a la distribución de la carga calorífica en los intercambiadores.

La siguiente red se generó con heurística inversa de Ponton, realizando una partición de flujo desde el inicio de la síntesis, con lo cual se obtuvo la mejor red para el problema 8SP1 [\$36,527, - 4.9% abajo del óptimo reportado].

**CONFIGURACIÓN 11. 8SP1, INVERSA DE PONTON
(\$36,527)**



Para la presenta heurística, no se implantó una regla de distribución de calor modificada similar a la de CALOR3, ya que para la zona abajo del pinch, -que es donde se podría aplicar la modificación-, es muy simple el problema (solo existe una corriente fría y otra caliente) .

5.4.4 Mayor FCP

La implementación de esta heurística se hizo permitiendo la división de corrientes pinch/lejanas al pinch; cuando se usa CALOR1 la recuperación de energía es deficiente y se rebasa por bastante el consumo de servicios mínimo. Con CALOR2, se obtienen redes con 10 intercambiadores y que exceden ligeramente el consumo de servicios de enfriamiento, pero que tienen un costo global aceptable [\$38,606, +0.8% arriba del óptimo y \$39,855, +4.0% arriba del óptimo).

5.5 INFLUENCIA DE LA RELACION DE DIVISION DE FLUJO

La relación de la división de flujo sobre la corriente H13 determina en gran medida el área total y en muchos casos, la recuperación de calor. Esto último se debe a que dependiendo de la regla de distribución de calor, se puede dar el caso de apareamientos tipo extremo frío o caliente que tengan que limitarse debido a la diferencia de FC_p entre las corrientes, tal como se explicó que ocurría en el caso de las heurística propuestas por Ponton. El hecho de que se haya realizado la división de flujo desde el principio para la heurística Inversa de Ponton, puede ser un factor que ayuda al éxito de la misma, ya que se obtuvieron los mejores resultados con esta heurística.

5.6 SELECCION DE APAREAMIENTOS EN EL PINCH

Todas los apareamientos en el pinch se hicieron usando la siguiente heurística: Aparear la corriente clave con la corriente secundaria de tal manera que la diferencia $FC_{p_{secundaria}} - FC_{p_{clave}}$ sea positiva y más pequeña posible. Así, si existen varias corrientes clave en el pinch, se logra una racionalización del FC_p y se propicia que estas corrientes logren un apareamiento que cumpla con las reglas del MDP. Si no se sigue esta regla, algunas corrientes clave en el pinch no tendrán apareamientos en la zona del punto de pliegue, con el riesgo de violarse el consumo mínimo de energía.

5.7 USO DE REGLAS DE DISTRIBUCIÓN DE CALOR

Cuando se utiliza la regla de distribución de calor TCALC-1/2, se encontró que el costo de I_{h-c} más I_r para la primera opción es generalmente menor que para la segunda opción. Ya que la diferencia es pequeña, se determinó que *FACTOR* debe de valer más de 1.0 y menos de 1.1. Un valor entre estos límites asegura un alto grado de recuperación de energía, sin grandes costos de inversión. El valor usado finalmente fue *FACTOR* = 1.06.

5.9 CONCLUSIONES

Dependiendo de los objetivos de la síntesis, se pueden recomendar diferentes estrategias para el diseño y utilización del programa de síntesis de redes de recuperación de calor. En general, se recomienda empezar con las heurísticas sencillas, tomando como referencia los datos proporcionados por el programa para el cálculo de los requerimientos energéticos mínimos. Las heurísticas derivadas de Ponton son muy consistentes y pueden servir como primera aproximación, independientemente de los objetivos específicos de la síntesis. La heurística MENOR ΔT , combinada con CALOR1 lleva de igual manera a resultados consistentes. Dependiendo de los resultados generados con estas heurísticas, se pueden seleccionar las que conduzcan a un menor número de unidades (utilizando heurísticas combinadas y manipulando el peso de las funciones CALOR/COSTO y ΔT^{-1}), o bien, a redes que presenten M.R.E.

Esto es aplicable a problemas con o sin punto de pliegue. Una vez seleccionada la heurística "óptima", se puede explorar el efecto de las divisiones de flujo; en caso de que el problema de diferencias de FC_p sea crítico, el sistema lo detectará y sugerirá una solución. Sin embargo, se pueden explorar posibilidades no sugeridas por el sistema, ya sea en caso de existir problemas obvios de transferencia de calor, o simplemente por detectar mejoras potenciales.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

6.1 UTILIZACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El uso de un lenguaje de inteligencia artificial probó tener facilidades que ayudaron al logro de los objetivos iniciales:

- Es fácil hacer modificaciones al sistema actual. Pueden modificarse o añadirse nuevas heurísticas, funciones de cálculo de precios, etc. El uso de objetos y procedimientos facilita estas adecuaciones, ya que la información se encuentra separada de los procedimientos.
- El procesamiento simbólico facilita la generación de las ecuaciones correspondientes a la red.
- Permite que el ingeniero de proceso interactúe con el sistema a cada paso de la síntesis.

La manera en la que está estructurado el LISP, especialmente el uso de listas, facilita mucho la implementación de ciertas heurísticas. Por ejemplo, en una heurística en la cual se escoge el apareamiento con menor ΔT promedio, existen funciones que ordenan los posibles apareamientos de acuerdo con una función (que puede ser calcular el ΔT promedio, el calor transferido, etc.).

6.2 ESTRUCTURA DEL SISTEMA

6.2.1. Enfoque heurístico vs. enfoque matemático

A pesar de que en el enfoque heurístico es necesario probar varias estrategias, en esto radica su principal fortaleza, ya que el ingeniero de proceso puede

escoger entre diferentes opciones, eligiendo la que se ajuste más a sus necesidades. Aun si se modifican las especificaciones de operación de la etapa de diseño a la etapa previa a la construcción, el ingeniero cuenta con opciones factibles que se pueden adaptar rápidamente a estas condiciones cambiantes.

En el enfoque matemático, es muy complejo modelar todos los parámetros -incluyendo entre otros, el costo total anualizado-, que se toman en cuenta para la selección de una configuración. Aun suponiendo que esto fuera factible, los modelos matemáticos tienen como resultado final una sola configuración "óptima", la cual no siempre corresponde al óptimo global. De todas maneras, la rigidez y formalidad matemática propia del enfoque, limita el número de opciones a una sola. Cualquier modificación en las especificaciones de operación u otras limitantes, obliga a reformular el modelo matemático, haciendo más difícil la solución del problema.

En cuanto al costo total anualizado, el enfoque matemático no garantiza necesariamente que el óptimo encontrado es el global, tal como prueba la extensa literatura sobre el tema. Aunque así fuera, las configuraciones halladas con el presente sistema basado en heurísticas, están -en el peor de los casos- dentro del 4% arriba de los costos del óptimo reportado en la literatura, lo cuál representa un incremento marginal en los costos anualizados. Como ventajas, se tienen más opciones para evaluar la flexibilidad de la red, facilidad de operación, restricciones operativas, etc. Este ligero incremento de los costos queda suficientemente compensado al considerar opciones en otros parámetros que pueden significar a la larga costos adicionales significativos, en caso de ignorarse.

Otra diferencia importante es que el uso de heurísticas permite ir tomando decisiones en forma secuencial, y el sistema dispone de información adicional para guiar al usuario en la toma de decisiones. En el enfoque matemático, todas

las decisiones se toman en paralelo, y el usuario está imposibilitado de interactuar durante la síntesis de la red.

6.2.2. Cumplimiento de los diferentes objetivos

Como se mencionaba anteriormente, el cumplimiento de otros objetivos diferentes al costo anualizado total mediante el enfoque matemático, resulta muy complejo e inflexible.

Con el presente sistema, es factible analizar el cumplimiento de éstos objetivos una vez realizada la síntesis. Mediante la información que se encuentra como parte de los atributos del objeto "RED", se puede saber cuál es el número de unidades requerido, área total, costo del área, costo de los servicios, calor de calentamiento y de enfriamiento, etc. Además, se puede analizar la topología de la red, para elegir las configuraciones más sencillas, fáciles de operar, que cumplan con las restricciones impuestas, etc.

Una herramienta muy útil con la que cuenta el sistema para el análisis de la flexibilidad y comportamiento de la red ante cambios en las variables operacionales, es la generación automática de ecuaciones, con lo cuál se puede realizar la simulación de las redes.

6.2.3. Uso de las reglas del punto de pliegue

La incorporación de las reglas del punto de pliegue al sistema tiene efectos positivos en el funcionamiento general del mismo. La manera en la que se implantaron permite el funcionamiento de las heurísticas de apareamiento y distribución de calor en las zonas cercanas y lejanas al pinch, así como también el realizar la síntesis con o sin la separación entre los subsistemas arriba/abajo del pinch.

Cabe recordar en las reglas del pinch existen ciertos grados de libertad para decidir las corrientes a aparear o la división de flujo de corrientes. Las heurísticas de apareamiento de corrientes y de división de flujo implantadas, cumplen su función al cubrir los requerimientos del pinch y además proporcionar una base para tomar una mejor decisión en donde existan grados de libertad. Muchas de las heurísticas desarrolladas para tratar problemas que presentan punto de pliegue, sirven para todo tipo de problemas, aún los de tipo umbral. Como ejemplo de esto, tenemos las heurísticas para partición de corrientes, que pueden aplicarse en todo tipo de problemas (Anexos 16 al 20).

Como ejemplo de la efectividad del uso de reglas pinch aunadas a heurísticas, está el problema 8SP1 donde se lograron sintetizar redes con costos anualizados más bajos que los reportados en la literatura.

6.3 ESTRATEGIAS RECOMENDADAS

Dependiendo de los objetivos de la síntesis, se pueden recomendar diferentes estrategias para el diseño y utilización del programa de síntesis de redes de recuperación de calor. En general, se recomienda empezar con las heurísticas sencillas, tomando como referencia los datos proporcionados por el programa para el cálculo de los requerimientos energéticos mínimos. Las heurísticas de derivadas de Ponton son muy consistentes y pueden servir como primera aproximación, independientemente de los objetivos específicos de la síntesis. La heurística MENOR ΔT , combinada con CALOR1 lleva de igual manera a resultados consistentes. Dependiendo de los resultados generados con estas heurísticas, se pueden seleccionar las que conduzcan a un menor número de unidades (utilizando heurísticas combinadas y manipulando el peso de las funciones CALOR/COSTO y ΔT^{-1}), o bien, a redes que presenten M.R.E. Esto es aplicable a problemas con o sin punto de pliegue. Una vez seleccionada la heurística "óptima", se puede explorar el efecto de las divisiones de flujo; en

caso de que el problema de diferencias de FCp sea crítico, el sistema lo detectará y sugerirá una solución. Sin embargo, se pueden explorar posibilidades no sugeridas por el sistema, ya sea en caso de existir problemas obvios de transferencia de calor, o simplemente por detectar mejoras potenciales.

6.3.1 Heurísticas combinadas

Al trabajar con las heurísticas PONTON-MODIFICADA1, PONTON-MODIFICADA2, SUMA1 y SUMA3, se utilizaron heurísticas de selección de apareamiento variando las intensidades de las funciones auxiliares CALOR/COSTO y ΔT^{-1} ; partiendo de los pesos de 0.1 y 1 para estas heurísticas, respectivamente, se fue aumentando el peso de la función CALOR/COSTO. Se pudo observar que a medida que crecía la intensidad de este parámetro, se optimizaba el área y algunas veces disminuía el número de unidades, todo esto con una recuperación de energía constante, hasta llegar a un punto donde un incremento en este peso tenía como consecuencia una disminución en la recuperación de energía. Cabe señalar que el peso óptimo depende de la regla de distribución de calor utilizada, así como de la heurística para selección de corrientes por aparear.

En general se puede decir que estas heurísticas combinadas que aparentemente contienen más "información", no tienen un desempeño muy bueno; algunas son poco sistemáticas y más complicadas de manejar. Algunas de estas heurísticas logran redes con M.R.E.; entre las mejores se encuentran las derivadas de Ponton et al. (normal e inversa) usando combinaciones de las funciones CALOR/COSTO y ΔT^{-1} , que producen redes alternativas a las que se construyen con las heurísticas simple. Es recomendable utilizar las heurísticas combinadas sólo después de haber probado con las heurísticas simples, ya que aunque se dan casos en que la mejor red se construye con la heurística

combinada, es necesario mucho tiempo de computación probando heurísticas y cambiando las intensidades de éstas.

En todo caso, es factible mejorar el programa para adicionar un módulo de aprendizaje, en el cual se determine cuál es la heurística de selección de apareamiento y distribución de calor, así como los pesos de las funciones auxiliares adecuados para el tipo de problema que se quiere resolver.

6.4 MEJORAS FUTURAS

El sistema tal como se encuentra actualmente, presenta varias áreas de oportunidad:

- Para el cálculo de los requerimientos energéticos de acuerdo al método de pinch, el sistema considera un ΔT_{min} constante e igual para todos los apareamientos. Podría incorporarse un método de cálculo que considere un ΔT_{min} dependiendo del apareamiento.
- La detección del punto de pliegue se realiza antes de iniciar la síntesis. En una mejora posterior, se podría implantar el cálculo del punto de pliegue después de cada apareamiento, a fin de detectar situaciones de pinch implícito.
- La incorporación de un módulo de aprendizaje que con base en experiencias pasadas, determine cual es la mejor estrategia de solución de acuerdo al tipo de problema de que se trate.
- La implantación de métodos evolutivos que, partiendo de una configuración, modifiquen la estructura a fin de obtener una red con menor número de unidades o con un menor requerimiento de energía.

- El análisis sistemático de la flexibilidad y comportamiento ante cambios en las variables operativas en las redes sintetizadas
- El implantar heurísticas basadas en la comparación de las posibles secuencias de decisiones, para determinar cual es el apareamiento siguiente. Este método es similar al que utilizan algunas computadoras programadas para jugar ajedrez, en la que analizan las posibilidades de jugadas hacia adelante.
- Aunque no es una características indispensable, una interfase gráfica para ingresar los datos del problema y mostrar los resultados de la síntesis sería deseable.
- Por razones de manejo de memoria, el sistema sólo puede trabajar al mismo tiempo con el módulo de explicación o el de generación de ecuaciones. De la misma manera, existen limitaciones en cuanto al tamaño de las redes que puede generar; en caso de que se sature la memoria por la generación de objetos, es necesario volver a reiniciar el sistema.
- Muchas de las propuestas anteriores dependen en gran medida de tener un lenguaje más robusto y con mejor manejo de memoria. La versión que se utilizó para el desarrollo del programa es Golden Common Lisp de 1985. Las nuevas versiones para ambiente Windows están disponibles en el mercado, lo cuál facilita la programación y también el manejo de memoria. No es necesario modificar el programa para que funcione en éstas versiones, ya que las funciones que utiliza son las más comunes del lenguaje.

6.5 CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS

6.5.1 Comparación contra otros trabajos anteriores

El presente trabajo realiza algunas contribuciones importantes a los trabajos reportados en la literatura:

- Se hace un análisis comparativo de todas las heurísticas reportadas, con base en los resultados y los diagramas de gradiente disponible de temperatura. Se explica por qué las heurísticas utilizadas fallan o resultan en redes económicamente satisfactorias. Entre otros errores en el diseño, podemos mencionar:
 - a) Uso irracional del gradiente disponible de temperatura
 - b) Problemas de transferencia por diferencia de FCP's entre las corrientes que se aparean, debido a situaciones de pinch, pinch implícito o pseudo-pinch.
 - c) No existe un "escalonamiento" de temperaturas en los apareamientos.
 - d) Violación de las reglas de diseño pinch
 - e) Apareamientos con poca carga calorífica

- Se desarrollan heurísticas nuevas y se combinan las ya existentes. Estas heurísticas las podemos dividir en tres rubros básicos:
 - a) Selección de corrientes por aparear
 - b) Reglas de distribución de calor una vez que se seleccionaron las corrientes por aparear
 - c) División del flujo de las corrientes

- Se combinan las heurísticas de selección de apareamiento y distribución de calor con las reglas del método de diseño Pinch, proporcionando así un

fundamento termodinámico al uso de las mismas. Adicionalmente, el usuario conoce de antemano los requerimientos caloríficos mínimos del problema, y decide si inhibe las reglas pinch, y si fragmenta o no el problema en subsistemas de acuerdo al punto de pliegue.

- Se desarrollaron heurísticas nuevas para decisiones respecto a la partición de corrientes. Estas son válidas para casos con punto de pliegue, pinch implícito o pseudo pinch:

a) Para casos en los que $N_{clave} > N_{secundaria}$:

Basado en el ordenamiento de las corrientes (FC_p decreciente), se revisa si para cada "par" se puede realizar una división de flujo con FC_p mayor o igual a alguna corriente clave que no tenga una corriente secundaria como pareja. El criterio para corroborar la decisión es que puedan transferir las nuevas "parejas" formadas.

b) Si $N_{clave} \leq N_{secundaria}$:

Tomando los mismos principios que en el caso anterior (ordenamiento de corrientes según su FC_p), se pueden generar ($N_{clave} - N_{secundarias}$) divisiones de flujo en las corrientes clave, sin violar los criterios de diseño pinch. En este caso, para cada corriente clave, se revisa si su "pareja" secundaria cumple con $FC_{p_{clave}} \leq FC_{p_{secundaria}}$; en caso contrario, se corrobora si existe una corriente secundaria no asignada que pudiera ser asignada a una potencial división de flujo de la corriente clave. Si es así, se realiza una división de flujo en la corriente clave.

c) Si el calor transferido está por abajo del mínimo aceptable:

El sistema revisa en forma automática si esto se debe a diferencias de FC_p entre las corrientes que se intentan aparear. Si al dividir el flujo de algunas de las corrientes, mejora sensiblemente la transferencia de calor, el sistema lo mostrará como sugerencia.

- El sistema sugiere al usuario las opciones recomendadas de acuerdo con las heurísticas en uso, pero el usuario tiene la información suficiente para tomar cualquier decisión a cada paso de la síntesis. El usuario decide:

- a) La estrategia de solución del problema (fragmentar el problema en subsistemas arriba/abajo del pinch,
- b) Realizar partición de flujo desde el inicio o hasta que sea necesario
- c) Habilita o rechaza las sugerencias del sistema de realizar divisiones de flujo, adicionalmente puede modificar la relación de partición de flujo y ver qué pasaría si habilita esa división de flujo, sin que sea definitivo.
- d) Realizar apareamientos que no estén considerados por la heurística utilizada en ese momento.

6.5.2 Logros del presente trabajo

Se estudiaron seis casos prácticos, en tres de ellos se lograron redes que típicamente no exceden el 2% por encima del costo óptimo reportado en la literatura. En dos casos (6SP1 y 4SP2 sin división de flujo) se igualó el costo óptimo reportado en la literatura; en el caso del problema 8SP1 se logró mejorar el costo óptimo reportado, por un margen significativo (4.9% abajo del mejor costo reportado anteriormente).

El trabajo más parecido al presente, es el de Chen et al (1989, [51]) . Como ya se discutió anteriormente en el Capítulo IV, sección 4.1.2., éste cuenta con muchas limitaciones:

- Estrategias de solución preestablecidas
- Únicamente puede manejar una sola corriente fría o caliente.
- No existe la posibilidad de implementar nuevas heurísticas
- No cuenta con módulo de explicación.

La presente propuesta supera ampliamente dichas limitaciones.

6.5.3 Integración

La integración de los módulos de síntesis, explicación y generación de ecuaciones resulta en un sistema muy robusto, con muchas herramientas que ayudan al ingeniero de procesos a la toma de decisiones. Esta integración es propia de sistemas comercialmente disponibles.

6.6 SUMARIO

El presente trabajo cumple totalmente con los objetivos trazados originalmente:

- Síntesis de redes de intercambiadores de calor a partir de las especificaciones de las corrientes y del gradiente mínimo de temperatura.
- Permite al usuario probar diferentes heurísticas de apareamiento (incluyendo combinaciones e incluso diseñar nuevas), distribución de calor y división de flujo. Provee múltiples alternativas para el diseño de redes, ya que ofrece soluciones, y las almacena.
- Provee al usuario de flexibilidad para tomar decisiones, así como el soporte de información necesaria.
- Tiene acoplado un módulo de generación de ecuaciones, para el análisis cuantitativo de las redes generadas.
- Módulo de explicación de decisiones, cuando el sistema funciona en modo automático.

- No existen estrategias predeterminadas; el usuario decide para cada problema la estrategia más conveniente.
- El sistema provee la información correspondiente al punto de pliegue y los mínimos requerimientos de calor. Éstos sirven como guía para el diseño.
- Se prueban diferentes heurísticas (incluyendo nuevas), y se hace un análisis termodinámico de su funcionamiento.
- Se crearon nuevas heurísticas para la partición de corrientes.
- Generación de redes óptimas o muy cercanas al óptimo, que tienen aplicaciones reales en la ingeniería de procesos. Los resultados obtenidos se pueden comparar favorablemente con otros métodos reportados en la literatura.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Winston, P. Henry, *Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, 1984
- 2.- Westerberg, A.W., "Synthesis in Engineering Design", Computers and Chemical Engineering, Vol. 13, No. 4, 1989, pp. 365-376.
- 3.- Linhoff B. y E. Hindmarsh, "The pinch design method for heat exchanger networks", Chemical Engineering Science Vol. 38, 1983, pp. 745-763.
- 4.- Ichikawa, A., "Optimum Construction of Process Systems", Kagaku Kogaku (Japón), Vol. 36, 1972, pp. 1053.
- 5.- Westbrook G. T., "Use this method to size each stage for best operation", Hydrocarbon Processing Petroleum Refining, Vol. 40, 1961, pp. 201-206.
- 6.- Hwa, C.S. "Mathematical formulation and optimization of heat exchanger networks using separable programming", AIChE Chemical Engineering Symposium, Vol. 4, 1965, pp. 101-106.
- 7.- Rathore R. N. S., "Process Resequencing for energy conservation", Chemical Engineering Progress, Diciembre 1982, pp. 75-82.
- 8.- Gundersen T., L. Naess, "The synthesis of Cost Optimal Heat Exchanger Networks. An Industrial Review of the State of Art", Computers and Chemical Engineering, Vol. 12, 1988, pp. 503-530.
- 9.- Whistler, A.M. "Heat exchanger network design", Petroleum Refinery, Vol. 27, No. 1, 1948, pp. 57.
- 10.- Pho T. K. y L. Lapidus, "Topics in Computer-Aided Desing II. Synthesis of Optimal Heat Exchanger Networks by Tree Search Algorithms", AIChE Journal, Vol. 19, 1973, pp. 1182.

- 11.- Nishida N., S. Kobayashi y A. Ichikawa "Optimal Synthesis of Heat Exchanger Networks- Necessary Conditions for Minimum Heat Transfer Area and their Applications to System Synthesis", Chemical Engineering Science, Vol. 27, 1971, pp. 1408.
- 12.- Linnhoff B. y J.R. Flower, "Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks", AIChE Journal, Vol. 24, 1978, pp. 642-654.
- 13.- Cena J. C. Mustacchi y F. Natali, "Synthesis of Heat Exchange Networks: A Non Interactive Approach", Chemical Engineering Science, Vol. 32, 1977, pp. 1227.
- 14.- Cerdá J. y A. W. Westerberg "Synthesizing heat exchanger networks having restricted stream/stream match using transportation problem formulations" Chemical Engineering Science, Vol. 38, 1983, pp. 1723-1740.
- 15.- Duran M. A., I. E. Grossmann, "Simultaneous Optimization and Heat Integration of Chemical Process", AIChE Journal, Vol. 32, 1986, pp. 123-186.
- 16.- Floudas, C. A., A. A. Ciric y I. E. Grossmann, "Automatic Synthesis of Heat Exchanger Network Configurations", AIChE Journal, Vol. 32, 1986, pp. 277-290.
- 17.- Floudas, C.A. y I.E. Grossman, "Synthesis of flexible heat exchanger networks with uncertain flowrates and temperatures", AIChE Journal Meeting, Houston Texas, 1987.
- 18.- Grossman I.E. "Mixed Integer programming approach for the synthesis of integrated process flowsheets", Computation and Chemical Engineering, Vol. 9, 1985, pp. 463-482.

- 19.- Papoulias S. A. y I. E. Grossmann, "A Structural Optimization Approach in Process Synthesis. II. Heat Recovery Networks", Computers and Chemical Engineering, Vol. 7, 1983, pp. 707.
- 20.- Masso A.H. y D.F. Rudd, "The Synthesis of Systems Designs", AIChE Journal, Enero 1969, pp 10-17.
- 21.- Ponton J. M. y R. A. B. Donaldson, "A Fast Method for the Synthesis of Optimal Heat Exchanger Networks", Chemical Engineering Science, Vol. 29, pp. 1974, 2375-2377.
- 22.- Kobayashi S., T. Umeda y A. Ichikawa, "Synthesis of Optimal Heat Exchange Systems- An Approach by the Optimal Assignment in Linear Programming", Chemical Engineering Science, Vol. 26, 1971, pp. 3167.
- 23.- Nishida, N., A. Liu y L. Lapidus, "Studies in chemical process design and synthesis. III. A simple and practical approach to the optimal synthesis of heat exchanger networks.", AIChE Journal, Vol. 23, 1977, pp. 77-93.
- 24.- Muraki y Hayakawa, "Synthesis of Heat Exchanger Networks", Journal of Chemical Engineering of Japan, No. 2, 1982, pp 136-141.
- 25.- Rév E. y Z. Fonyó, "Hidden and pseudo pinch phenomena and relaxation in the synthesis of heat-exchange networks", Computers and Chemical Engineering, Vol. 10, No. 6, 1986, pp. 601-607.
- 26.- Grossmann I. E. y R. W. H. Sargent, "Optimum Design of Heat Exchanger Networks", Computers and Chemical Engineering, Vol. 2, 1978 pp. 77.

27.- Boland D., B. Linnhoff, "The preliminary design of networks for heat exchange by systematic methods", The Chemical Engineer, Abril 1979, pp. 222-228.

28.- Irazoqui H. A., "Optimal thermodynamical synthesis of thermal energy recovery systems", Chemical Engineering Science, Vol. 41, 1986, pp. 1243-1255.

29.- Jezowski J. y E. Hahne, "Heat exchanger network synthesis by a depth first method- a case study", Chemical Engineering Science, Vol. 41, No. 12, 1986, pp. 2989-2997.

30.- Lee K. F., A. H. Masso, D. F. Rudd, "Branch and Bound Synthesis of Integrated Process Designs", Ind. Eng. Chem. Fundamentals, Vol. 9, 1970, pp. 48.

31.- Nishitani H., E. Kunugita y L.T. Fan, "On the vector optimization of heat exchange", Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 15, 1982, pp. 475-480.

32.- Rathore R. N. S. y G. J. Powers, "A forward branching scheme for the energy recovery systems", Ind. Eng. Chem. Des. Dev., Vol. 14, No. 2, 1975, pp. 175-181.

33.- Umeda L., T. Harada y K. Shiroko, "A thermodynamic approach to the synthesis of heat integration systems in chemical processes", Computation and Chemical engineering, Vol. 3, 1979, pp. 273-282.

34.- Nishida N., G. Stephanopoulos y A.W. Westerberg, "A review of process synthesis", AIChE Journal, Vol. 27, 1981, pp. 321-351.

- 35.- S. Ahmad y Linnhoff B., "Cost Optimum Heat exchanger Networks- 1.- Minimum Energy and capital using simple models for capital cost", Computers and Chemical Engineering, Vol. 14, No. 7, 1990, pp. 729-750.
- 36.- McGallard R.L. y A.W. Westerberg. Structural sensitivity analysis in design synthesis. Chemical Engineering Journal, Vol. 4, 1972, pp. 127-138.
- 37.- Shah J. V. y A. W. Westerberg. Evolutionary Synthesis of heat-exchanger networks. AIChE Meeting, 1975, Los Angeles.
- 38.- Umeda T., J. Itoh y K. Shiroko, "Heat exchanger system synthesis", Chemical Engineering Progress, Julio 1978, pp. 70-76.
- 39.- Naka Y. y Takamatsu. Design of heat exchanger networks in the heat availability diagram. Proc. CHEMCOMP-82, Antwerp, Belgium 1982.
- 40.- Shiroko K. y T. Umeda. A practical approach to the optimal design of heat exchanger systems. Proc. Econ. Int., Vol. 3, 1983, pp. 44-49.
- 41.- Pehler F.A. y Y.A. Liu. Studies in chemical process design and synthesis. VI. A thermodynamic approach to the evolutionary synthesis of heat exchanger networks. Chemical Engineering Communications. No. 25, 1984, pp. 295-310.
- 42.- Grimes L. E., M.D. Rychener y A.W. Westerberg. The synthesis and evolution of networks of heat exchange that feature the minimum number of units. Chemical Engineering Communications. No. 14, 1982, pp. 339-360.
- 43.- Hohmann E. C., "Optimum networks for heat exchange", Tesis de doctorado, University of Southern California, 1971.

44.- Saboo A. K. , M. Morari y R. P. Colberg, "RESHEX: an Interactive Software Package for the Synthesis of Heat Exchanger Networks", Computers and Chemical Engineering, Vol. 6, 1986, pp. 577-599.

45.- Linnhoff B. y J. A. Turner, "Heat recovery networks: new insights yield big savings", Chemical Engineering, November 2, 1981, pp. 56-70.

46.- Ahmad S. Y B. Linnhoff. Overall cost targets for heat exchanger networks. IchemE Annual. Res. Meeting, 1984.

47.- Ahmad S. y B. Linnhoff. SUPERTARGET: optimisation of a chemical solvents plant- different process structures for different economics. ASME Mtg, Anaheim, California, 1986.

48.- Naess L. y T. Gundersen. SUPERTARGET - prototype software for heat exchanger network design. Confidential Norsk Hydro Report. Porsgrunn, 1984.

49.- Viswanathan M. y L.B. Evans. Studies in the heat integration of chemical process plants. AIChE Journal, 1987, pp. 1781-1790.

50.- Linnhoff B. y D.R. Vredeveld, "Pinch Technology Has Come of Age", Chemical Engineering Progress, Julio 1984, pp. 33-40.

51.- Chen B., J. Shen, Q. Sun y S. Hu, "Development of an Expert System for Synthesis of Heat Exchanger Networks", Computers and Chemical Engineering, Vol. 13, No. 11/12, 1989, pp. 1221-1227.

52.- Kotjabasakis E. y B. Linnhoff, "Sensitivity tables for the Design of Flexible Process (1) - How much Contingency in Heat Exchangers is Cost-Effective?", Chemical Engineering Res. Des. Dev., Vol. 64, 1986, pp. 197-211.

ANEXO 1. LOCALIZACION DEL PUNTO DE PLIEGUE

Dado un ΔT_{\min} y una serie de corrientes frías y calientes, se puede usar el algoritmo PTA (Problem Table Algorithm) de Linnhoff y Flower (1978), que consiste en:

1.- Identificar los intervalos de temperatura $T_1, T_2 \dots T_{n+1}$, definidos por las temperaturas de entrada y de salida de las corrientes. Estos intervalos de temperatura definen los diferentes subsistemas.

2.- Efectuar un balance de entalpía para el intervalo K definido por la temperatura T_k, T_{k+1} . Calcular el déficit de calor de cada subsistema, estos datos se colocan en la columna 1.

$$D_K = I_K + O_K = (T_K + T_{K+1}) (FC_{p_{\text{frías}}} - FC_{p_{\text{calientes}}})$$

3.- Calcular la entrada de calor (representada por I: es el calor disponible que se transfirió desde el subsistema inmediato superior (columna 2)) y la salida de calor (representada por O: es el calor transferible hacia subsistemas de más baja temperatura (columna 3)), para cada subsistema.

Hacer $I_{K+1} = O_K$ y $O_{K+1} = O_K + D_{K+1}$ (columna 2 y 3 respectivamente); suponer $I_1 = 0$.

4.- Las columnas 4 y 5 se obtienen sumando el menor valor de la entrada de la columna 3 a cada entrada en la columna 2 y 3. Si no hay entradas negativas en la columna 3, las columnas 4 y 5 son idénticas a las columnas 2 y 3.

CUADRO 1a.

SUB-NIVEL	TEMPERATURA (F)		1	2	3	4	5
	FRIA	CALIENTE	DEFICIT (BTU/HR)	ACUMULADO (BTU/HR)*E-6			
			*E-6	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
SN (1)	480	460	-1,89	0,00	1,89	3,02	4,91
SN (2)	420	400	0,30	1,89	1,59	4,91	4,61
SN (3)	400	380	-0,21	1,59	1,80	4,61	4,82
SN (4)	380	360	1,83	1,80	-0,03	4,82	2,99
SN (5)	250	230	1,37	-0,03	-1,40	2,99	1,62
SN (6)	220	200	1,05	-1,40	-2,44	1,62	0,58
SN (7)	170	150	-0,07	-2,44	-2,37	0,58	0,65
SN (8)	150	130	0,65	-2,37	-3,02	0,65	0,00
	120	100					

ANEXO 2. CRITERIOS DE APAREAMIENTO EN EL PINCH

Todos los siguientes criterios se aplican exclusivamente a la población de corrientes al pinch, y más específicamente, a los llamados apareamientos pinch, que son los que presentan el gradiente mínimo de temperatura en por lo menos un lado y están en el punto de pliegue.

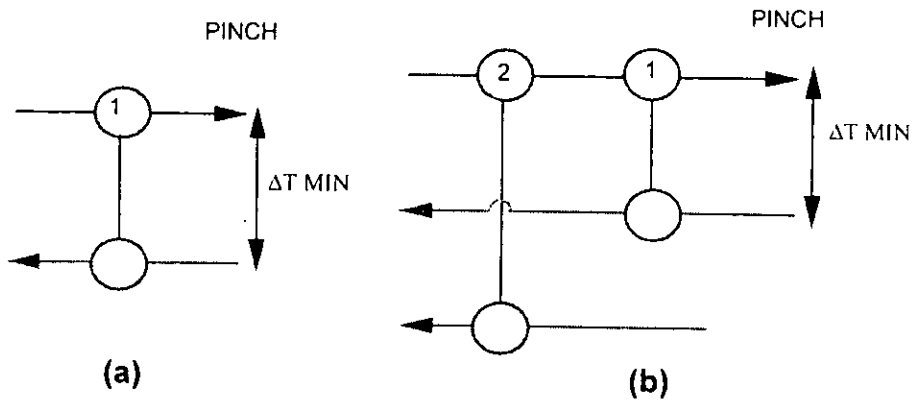


FIGURA 1a.

(a) Apareamiento Pinch (b) El intercambiador 2 no es un apareamiento pinch

ANEXO 3. NÚMERO DE CORRIENTES

La población de corrientes calientes y frías en el pinch debe permitir que se cumplan los objetivos de energía fijados. La colocación de servicios de enfriamiento arriba del pinch, también llamado extremo caliente, violaría el objetivo de energía; es necesario asegurar que cada corriente caliente va a ser enfriada hasta la temperatura pinch por alguna corriente fría. Esto únicamente se puede lograr si para cada corriente caliente en el pinch, podemos encontrar una corriente fría en el pinch para realizar el apareamiento.

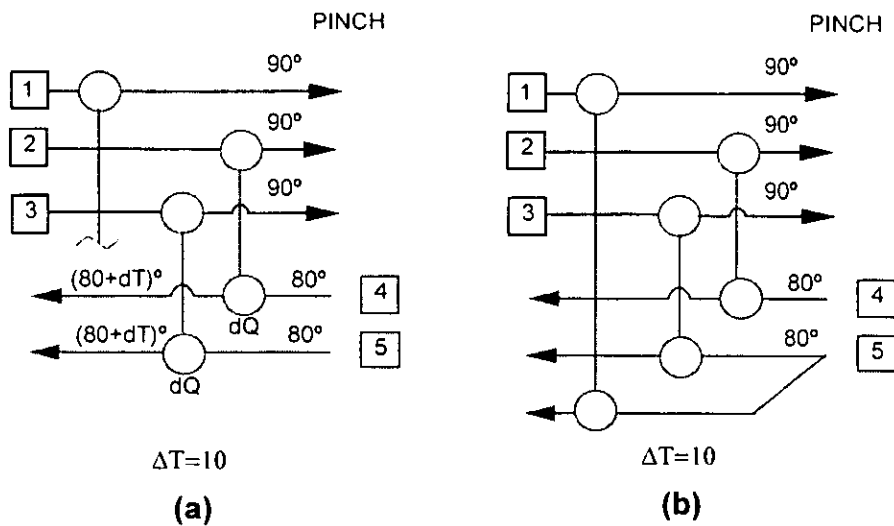


FIGURA 2a.

Diseño de la red arriba del Pinch (a) Diseño no factible (b) Diseño factible, mediante la división de flujo de la corriente 5

Por lo tanto, se tiene:

ECUACIÓN 1a.

$$NH \leq NC \quad (\text{Arriba del pinch})$$

donde NH es el número de corrientes calientes y NC el número de corrientes frías, ambos en el pinch. Para asegurar el cumplimiento de la desigualdad se puede usar una división de flujo.

De igual manera, abajo del pinch es necesario asegurar que cada corriente fría será calentada por una corriente caliente, para evitar el uso de servicios de calentamiento abajo del pinch.

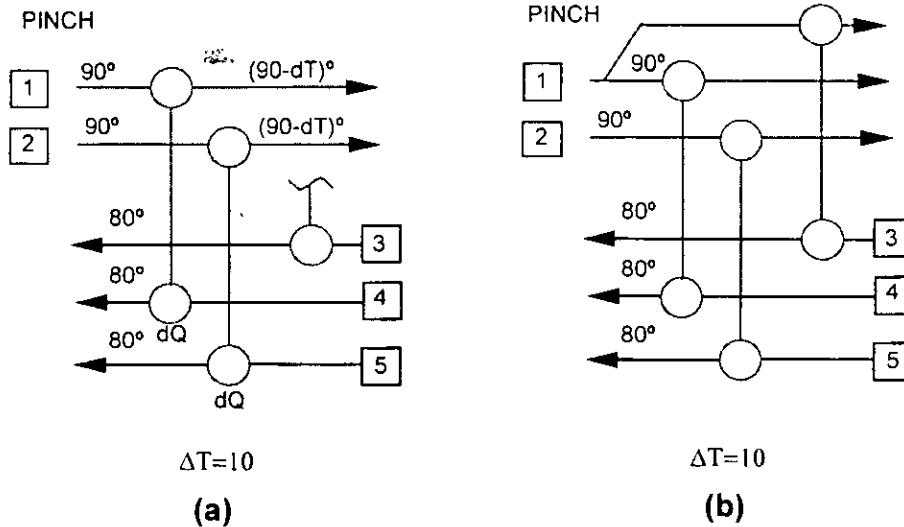


FIGURA 3a.

Diseño de apareamientos abajo del pinch (a) Diseño no factible (b) Diseño factible, al realizar una división de flujo en la corriente 1.

Por lo tanto, se debe cumplir:

ECUACION 2a.

$$NH > NC \quad (\text{Abajo del pinch})$$

De nuevo, se puede recurrir a la división de flujo de las corrientes a fin de cumplir esta desigualdad.

ANEXO 4. DESIGUALDAD DE FCp PARA APAREAMIENTOS INDIVIDUALES

Este criterio se refiere a la factibilidad de temperaturas; el gradiente de temperaturas no puede disminuir más allá del pinch, donde tenemos un gradiente igual a ΔT_{min} . De esta condición se deriva la necesidad de aplicar la siguiente desigualdad a cada apareamiento pinch:

ECUACION 3a.

Apareamiento pinch en el extremo caliente

$$FC_{pH} < FC_{pC}$$

ECUACION 4a.

Apareamiento pinch en el extremo frío

$$FC_{pH} > FC_{pC}$$

donde FC_{pH} es el FC_p de la corriente caliente, y
 FC_{pC} es el FC_p de la corriente fría.

Si no se puede lograr un arreglo de apareamientos que cumpla la desigualdad, es necesario modificar uno o varios FC_p mediante divisiones de flujo. Es necesario hacer notar que estas desigualdades sólo son válidas en el pinch, ya que lejos de éste el gradiente de temperaturas de las "supercorrientes" es mayor al ΔT_{min} y se puede permitir que los apareamientos violen las desigualdades.

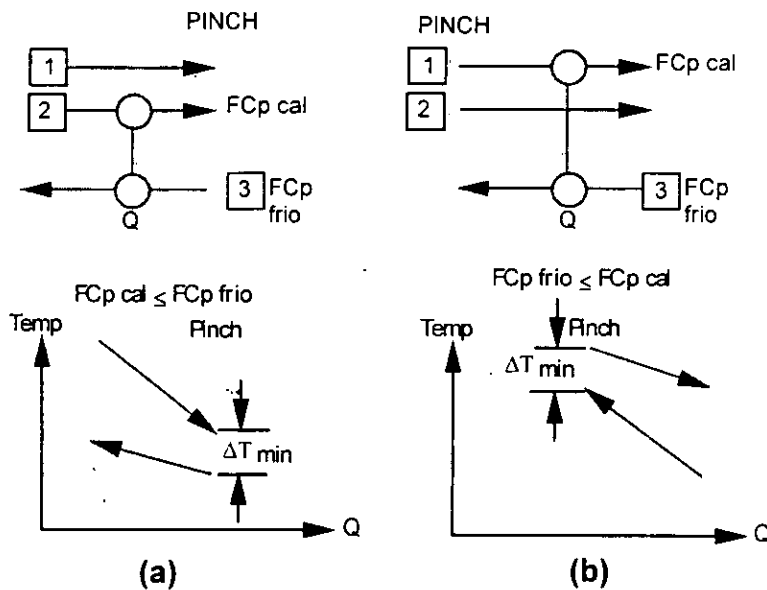


FIGURA 4a.

Diferencia de FC_p para apareamientos individuales.

(a) Diseño correcto del Intercambiador arriba del punto de pliegue.

(b) Diseño correcto del intercambiador abajo del punto de pliegue.

ANEXO 5. LA DIFERENCIA GLOBAL DE FCp

Se define la diferencia de FCp según los siguientes criterios:

- Para un apareamiento pinch en el extremo caliente = $FCpC - FCpH$
- Para un apareamiento pinch en el extremo frío = $FCpH - FCpC$

La diferencia global de FCp se define como:

- Para la población inmediatamente arriba del pinch = $FCpC - FCpH$
- Para la población inmediatamente abajo del pinch = $FCpH - FCpC$

Estas definiciones se usan para identificar los apareamientos que individualmente son factibles, pero que no son compatibles con la red global.

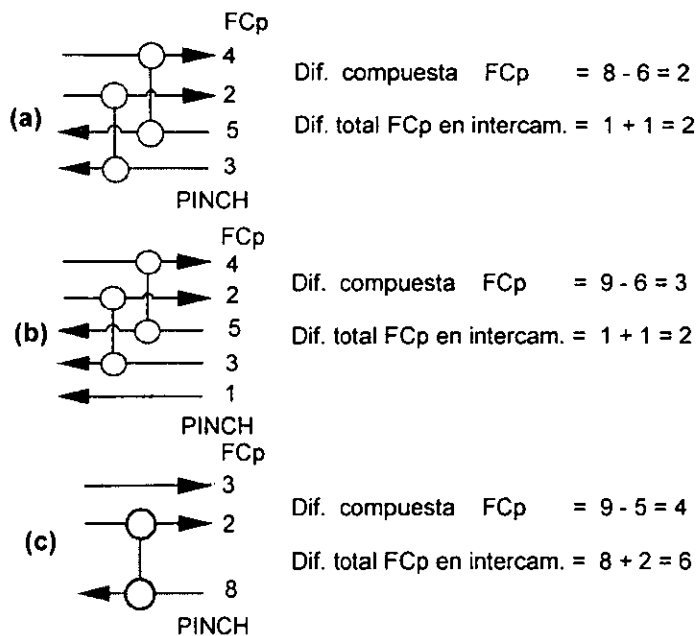


FIGURA 5a.

(a) Dos intercambiadores pinch usando correctamente la diferencia de FCp (b) La diferencia compuesta debe ser igual o menor que la diferencia total (c) Apareamiento incorrecto, según la diferencia de FCp.

ANEXO 6. HEURISTICA DE "ELIMINACIÓN".

Ya que se procura tener un diseño final con el mínimo número de unidades, se emplea la heurística de eliminación para determinar la carga de los intercambiadores. Esta heurística es consecuencia de la ecuación del mínimo número de unidades:

ECUACION 5a.

$$U_{\min} = N - 1$$

Donde:

U_{\min} = Número mínimo de unidades de la red

N = Número de corrientes del problema

Esta ecuación se cumple si para cada apareamiento al menos una de las corrientes es llevada a su temperatura objetivo o se completa su carga calorífica usando un servicio. Se dice que una corriente se ha eliminado cuando ya no se considera parte del trabajo de diseño faltante.

Las desigualdades de FC_p garantizan la posibilidad de escoger intercambiadores con cargas que eliminen corrientes, mientras el C_p de las corrientes permanezca constante con la temperatura.

Esta heurística de eliminación puede fallar al incrementar la necesidad del uso de servicios; el gradiente de temperatura puede ser excesivo en un lado de un apareamiento pinch, provocando que otras corrientes queden sin un gradiente de temperatura suficiente, es decir, que se hace un apareamiento que cumple las condiciones requeridas en el pinch, pero al extenderse el apareamiento lejos del pinch (con el fin de transferir todo el calor posible), el gradiente de temperatura resulta excesivo para ese apareamiento.

ANEXO 7. EL PROBLEMA RESTANTE

Una vez que se han realizado los apareamientos pinch necesarios, el diseñador tiene más libertad, ya que los gradientes de temperatura no restringen las opciones topológicas, y no se aplican las reglas de diseño pinch.

ANEXO 8. RESUMEN DE DISEÑO

- El problema se divide en el pinch en subproblemas independientes.
- El diseño de cada subproblema se empieza en el pinch y se mueve gradualmente alejándose de éste. En el punto de pliegue se aplican los criterios de factibilidad dados anteriormente.
- Cuando existen opciones en el pinch, el diseñador puede utilizar su criterio, de tal manera que se cumplan las reglas y se tenga libertad de decisión.
- Las cargas caloríficas de los intercambiadores en el pinch se determinan usando las heurísticas de eliminación.
- Lejos del pinch, existe libertad para escoger los apareamientos, basándose únicamente en el criterio del diseñador.

ANEXO 9. GENERACIÓN DE OBJETOS

Todas las corrientes, intercambiadores, servicios , uniones, divisores de flujo y redes son estructuras de datos, se definen en LISP mediante la instrucción DEFSTRUCT. Esto permite la programación orientada a objeto.

Las corrientes están definidos por el DEFSTRUCT SDATA, y tienen los siguientes campos:

SDATA

- Tsupply
- Ttarget
- TResSupply
- TResTarget
- FCp1
- FCp
- Residuos
- Hijos
- DeltaTemp
- Type
- Name.

Para definir el problema se tienen que especificar las corrientes y sus datos de la manera mostrada anteriormente.

Cuando se hace una división de flujo sobre una corriente y se genera una nueva corriente; la corriente que la generó se sigue llamando igual pero su FCp se modifica. Por conveniencia, se le asigna automáticamente a la corriente original el mayor FCp.

Para la nueva corriente, aparecerá una indicación de su nombre, que esta formado por "**S**" + "nombre de la corriente original" + "-número" . La "**S**" es para

indicar que es corriente generada de un Split (división, en inglés). Además, aparece en pantalla el FCp de esta nueva corriente.

Cuando el apareamiento realizado sobre una corriente deja dos residuos (debido a que el calor se transfiere en la parte media de la corriente), el nombre de la corriente original se conserva por uno de los residuos y toma sus propiedades. Se genera también otra corriente, que toma las propiedades del otro residuo y se le asigna un nombre compuesto de la siguiente manera: "R" + "nombre de la corriente original" + "-número" , donde la "R" indica Residual de una corriente.

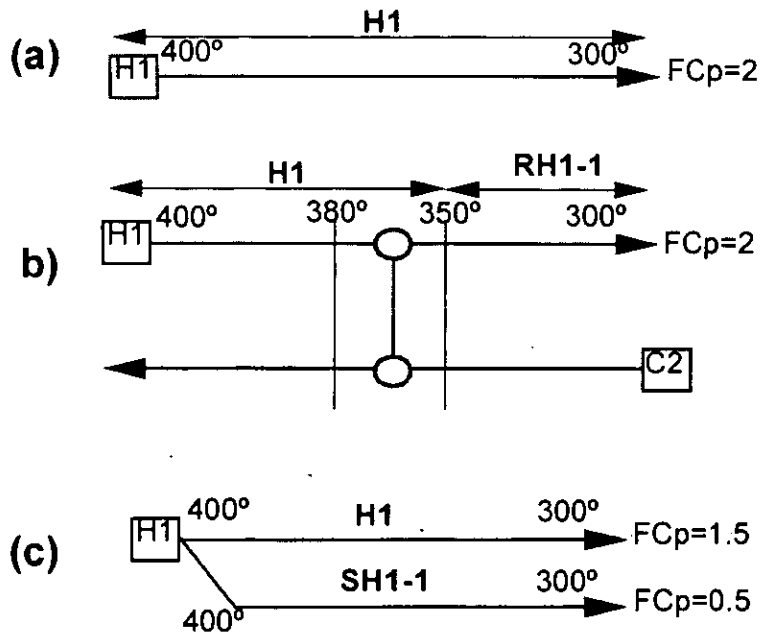


FIGURA 6a.

Representación de corrientes.-

(a) Corriente caliente con temperatura de entrada, salida y datos de FCp. (b) Apareamiento tomando calor de la parte media de H1 (Sombreado): se origina una nueva corriente residual (RH1-1) con temperatura de entrada=350 y Temperatura objetivo= 300. H1 tiene una nueva temperatura de entrada = 400, y temperatura objetivo = 380. (c) División de flujo sobre H1: se crea una nueva corriente con temperatura de entrada y objetivo igual a H1.

Cada vez que se lleva a cabo un apareamiento, se genera un intercambiador, definido por el DEFSTRUCT INTERCAM, con los siguientes campos:

INTERCAM

- Corr
- Cp
- T1
- T2
- T3
- T4
- Ecu
- Dt-Log
- Area
- Costo
- Tipo
- Carga

Los servicios están definidos por el DEFSTRUCT SERVICIO:

SERVICIO

- Type
- Corr
- Especificacion
- T1
- T2
- Area
- Carga
- Ecu
- \$Area
- CostoQ
- Dt-Lm

Los divisiones/uniones de flujo están definidos por el DEFSTRUCT SPLIT/UNION.

SPLIT/UNION

- Temp
- Corr1
- Corr2
- FCp1
- FCp2
- Type
- Ecu.

Las redes están definidas por el DEFSTRUCT RED:

RED

- Match
- Costo
- Name
- ATot
- \$Area
- \$Servicio
- Heating
- Cooling
- Father

ANEXO 10. PARÁMETROS PARA REGLAS DEL MDP

Desde el inicio de la síntesis, el sistema asigna ciertos parámetros que se utilizarán para el funcionamiento de algunas reglas. La función BUSCA-CALORES-MÍNIMOS asigna los siguientes valores por default, de acuerdo con los siguientes criterios:

GUADRO 2a.

Variable	Problema Umbral	Problema con Pinch
QSplit1	0.45 * Calor-Min	0.20 * Calor-Min
QSplit2	0.30 * Calor-Min	0.05 * Calor-Min
Calor-Min	0.25 * Calor-Min	0.25 * Calor-Min
F-SplitCp	1.40	0.75

Las primeras dos variables, QSplit1 y QSplit2 son medidas del calor transferible mínimo aceptable, para validar una división de flujo en una corriente.

Calor-Min es 0.5 veces la menor carga calorífica al inicio de la síntesis; el sistema analiza todas las corrientes del problema original, y encuentra la corriente con menor carga calorífica.

Si las corrientes que se van a aparear pueden potencialmente transferir calor entre sí en una cantidad igual a Calor-Min, pero debido al tipo de distribución de calor escogido se tiene un calor transferible muy bajo, entonces el sistema considera la posibilidad de hacer una división de flujo en alguna corriente, para eliminar el cuello de botella que se podría crear. Estas restricciones se deben generalmente a la diferencia de FCp que existe entre las corrientes.

Este tipo de heurísticas tiene como fin prevenir que se generen intercambiadores con una carga calorífica muy baja, que aumentan el costo total de la red; el parámetro Calor-Min sirve como filtro para detectar los apareamientos que pueden requerir división de flujo y además como criterio para habilitar únicamente las divisiones de flujo que mejoren significativamente la transferencia de calor y lograr de esta manera redes más sencillas.

F-SplitCp es un parámetro para validar la partición de corrientes clave, y corresponde a la relación mínima de FCp de la corriente clave propuesta sobre alguna corriente secundaria con la cual pueda intercambiar calor.

ANEXO 11. MODO INTERACTIVO

Para activar este modo de funcionamiento, basta con seleccionar cada vez que aparezca en el menú la opción [C]ONTINUAR USUARIO, y después poner entre paréntesis la selección de apareamiento del usuario (e.g. (H11 C12)). Para una corriente clave seleccionada de acuerdo con alguna heurística determinada, el sistema muestra en pantalla las corrientes secundarias posibles para aparear con la corriente clave. Es posible que la heurística se refiera únicamente a pares de corrientes (e.g. seleccionar el apareamiento que tenga la menor temperatura logarítmica media), en cuyo caso pueden existir varias corrientes clave elegibles; aparecerán en pantalla todas las posibles combinaciones para estas corrientes clave, ordenadas según su preferencia.

Además de que aparecen en pantalla todas las posibilidades de apareamiento, también se muestra la siguiente información adicional:

La corriente clave considerada, el flujo másico de ésta, así como las corrientes secundarias con las que se puede aparear y el flujo másico de cada una, el valor de la propiedad que se evalúa según la heurística de selección

(e.g. temperatura de entrada, temperatura logarítmica media, temperatura de salida, etc.), el calor transferido si se llevase a cabo el apareamiento, y el número de corrientes que tocan el punto de pliegue para el intercambio propuesto (apareamiento pinch [**2P**], una corriente en el pinch [**1P**], ninguna corriente en el pinch [**NIL**]).

Adicionalmente, se puede pedir más información sobre un apareamiento en particular, con la opción INFO [A]PAREAM. Las temperaturas de entrada y de salida, la temperatura logarítmica media, el área del intercambiador, el costo aproximado de éste, y el tipo de apareamiento (extremo frío/extremo caliente), forman parte de esta información extra. Esta información permite que se pueda explorar detalladamente cada apareamiento y llevarlos a cabo, lo cual tal vez no sería posible lograr si se sigue estrictamente una heurística determinada.

También el sistema puede mostrar todas las corrientes que aún faltan por aparear, junto con sus temperaturas residuales y su carga calorífica; ésta información aparece clasificada en corrientes en el pinch y lejanas al pinch, y divididas según su tipo (frías/calientes). El número total de corrientes de cada tipo, así como la suma de calor disponible se muestra como un dato adicional para guiar al diseñador en sus decisiones. Esta información se activa con la opción de INFO [CO]RRIENTES.

ANEXO 12. MODO AUTOMÁTICO

En el modo automático, que puede ser activado en cualquier momento de la síntesis con la opción [C]ONTINUAR [A]UTO, el usuario fija los parámetros para el diseño de la red, y el sistema genera la red con esos criterios y muestra al usuario el resultado de la síntesis. El usuario puede pedir explicación del porqué se realizaron las decisiones de apareamiento y división de flujo, con la opción MOSTRAR [E]XPLICACION.

Si la heurística utilizada evalúa las propiedades del apareamiento (e.g. mayor calor transferido), el sistema realizará todas las combinaciones posibles de la(s) corriente(s) clave con todas las corrientes secundarias, escogiéndose el "par" de corrientes que presente el mayor valor de acuerdo a la heurística.

Si la heurística usada es de evaluación de propiedades de corrientes (e.g. Ponton, mayor FCp, etc.) se selecciona una corriente clave y se aparea con la corriente secundaria que tenga el mayor valor según la heurística. Si existe empate entre las corrientes secundarias de mayor valor, se procede a un desempate en el que se evalúan propiedades del apareamiento (e.g. menor temperatura promedio, menor generación de entropía, etc.) con la corriente clave, escogiéndose la corriente secundaria con la que se obtenga el mayor valor en el apareamiento.

Si llega a darse otro empate, se procede a repetir el mismo mecanismo, pero utilizando otra propiedad. Si después de esto, aún sigue existiendo un empate, se escoge cualquiera de las corrientes secundarias para aparearse con la corriente clave de mayor peso. Las variables globales a las cuales se les asignan estas funciones de desempate son F-AUX1 y F-AUX2.

ANEXO 13. EVALUACIÓN DE LOS PESOS DE LAS HEURÍSTICAS

En el sistema, aparece como:

ENTRADA A LA LISTA DE HEURISTICAS F4: (FILTRO1 FILTRO3)

OPCIONES PARA EVALUAR LOS VALORES DE LAS FUNC. F4:

- 1.- EVAL-PESO1 (MULTIPLICACION DE FUNCIONES)
- 2.- EVAL-PESO 2 (SUMA PONDERADA DE FUNCIONES)

Cuando se combinan las heurísticas mediante la sumatoria, existe un "peso" o intensidad de la heurística, que por default es 1. Esta intensidad, que puede ser modificada, sirve para darle mayor énfasis a una heurística respecto a otra, cuando se combinan mediante la suma dos o más heurísticas.

Así, cuando se combinan varias funciones que aplican sobre posibles apareamientos, el sistema evalúa la siguiente función para cada heurística simple:

ECUACIÓN 6a.

Peso total de la función simple k =

$$PH_k = \text{FACTOR} * \text{VALOR}_{(i,j)} * \text{FACTOR-N} * \text{PESO-PINCH}$$

PH_k	Peso total de la heurística simple k
FACTOR	Intensidad especificada por el usuario, entre 0 y 1, para la heurística simple k.
VALOR	Valor de la propiedad k (e.g. calor transferible) evaluada sobre el par de corrientes (i, j).
FACTOR-N	Factor para normalizar la heurística simple k.
PESO-PINCH	Función que asigna un valor numérico al tipo de apareamiento; para apareamientos pinch la función regresa 1, si solo 1 corriente queda en el pinch regresa 0.33 y si no queda ninguna corriente en el pinch, regresa 0.66.

La deseabilidad total de un apareamiento en el que se combinan varias funciones, queda determinado por la suma de los valores de las heurísticas simples PH_k , o bien, el producto de los mismos.

La función PESO-PINCH solamente esta activa cuando se activan las reglas pinch. Como se observa, da prioridad a los apareamientos pinch (dos corrientes que tocan el punto de pliegue), con el fin de facilitar el cumplimiento de las reglas del MDP. En segundo lugar de prioridad, tiene los apareamientos lejanos al pinch, por último, la mínima prioridad la ocupan los apareamientos que solamente tienen una corriente en el pinch, por considerarse los más desventajosos de acuerdo con las reglas del MDP.

El factor para normalizar la heurística k (FACTOR-N) es un número que hace que sean comparables los valores de las propiedades, y no se le dé más énfasis a una por su orden de magnitud respecto a otra, al usar la sumatoria de heurísticas simples.

ANEXO 14. FUNCIONAMIENTO DE T_{CALC2}

Es una regla que usa todos los parámetros anteriores para determinar el tipo de apareamiento. Esta regla tiene 8 parámetros, que son variables globales, cada uno de los cuáles puede tomar solo dos valores: HE (del inglés *Hot End*), que es la función que calcula el apareamiento tipo extremo caliente para un par de corrientes, y CE (del inglés *Cold End*), que calcula un apareamiento del tipo extremo frío. Dependiendo de los valores específicos que tomen los 8 parámetros mencionados, se han implementado 6 formas específicas de esta regla:

a) CALOR1.- Corresponde a una distribución de calor en la cual se necesita poca área, pero los residuales del apareamiento son muy irreversibles. Para los apareamientos lejanos al pinch, esta regla se comporta como se muestra en el **FIGURA 7a (1)**, además, para las corrientes pinch habilita apareamientos del tipo extremo caliente si se esta diseñando arriba del pinch, y extremo frio si se diseña abajo del pinch.

b) CALOR2.- Cuando se utiliza esta regla de distribución de calor, se requiere un área más grande que en el caso anterior, pero los residuales del apareamiento son muy transferibles. Esta regla es la mostrada en el FIGURA 7a (2), con la misma regla que la anterior para el caso de las corrientes pinch.

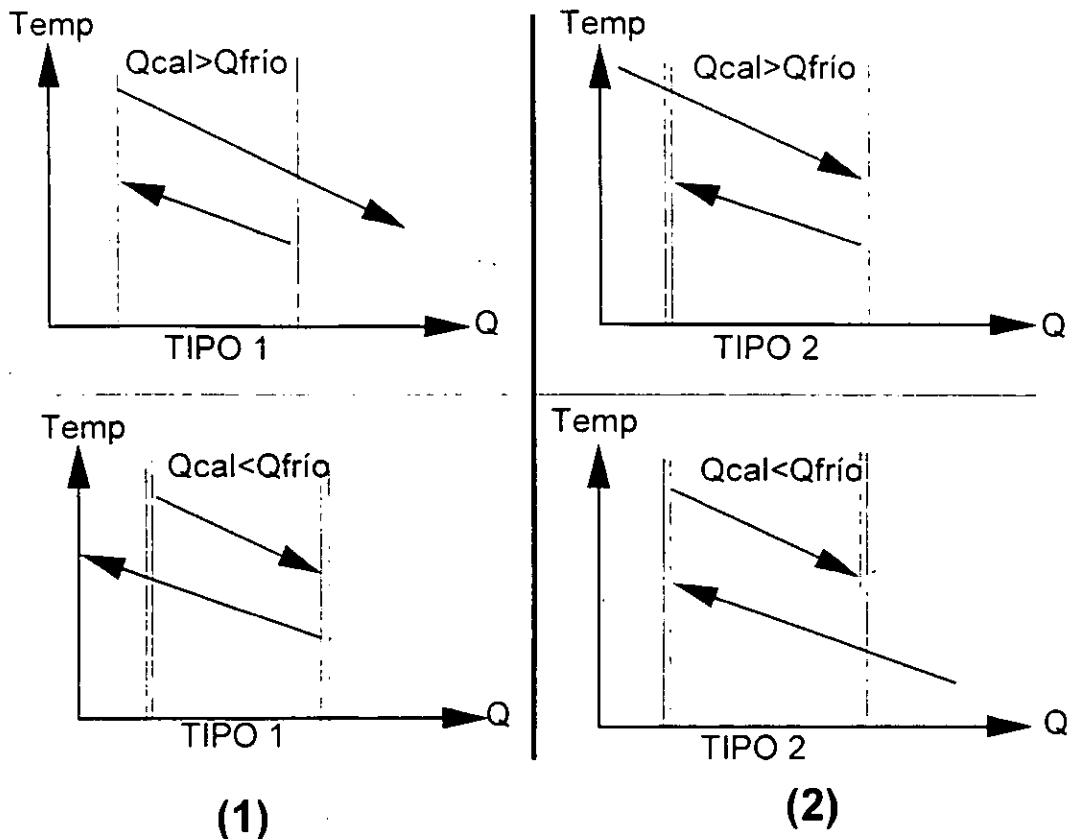


FIGURA 7a.

1) Apareamientos reversibles 2) Apareamientos irreversibles

c) P+D.- Usa exclusivamente apareamientos del tipo extremo caliente, de acuerdo con la distribución de calor propuesta por Ponton et al.

d) INV-P+D.- Usa únicamente apareamientos del tipo extremo frío, de acuerdo con la regla inversa propuesta por Ponton et al.

e) CALOR3.- Para corrientes pinch que se encuentren arriba del punto de pliegue, usa apareamiento del tipo extremo frío. Para corrientes pinch abajo del punto de pliegue, usa apareamientos extremo caliente. En todos los demás

casos, se usan apareamientos extremo caliente. Es similar a la regla propuesta por Ponton et al, pero para corrientes pinch utiliza las mismas reglas que las señaladas en los inciso a) y b) de este punto.

f) CALOR4.- Sigue las mismas reglas que la anterior para corrientes pinch, y en los demás casos, usa la distribución de calor del tipo extremo frío.

ANEXO 15. FUNCIONAMIENTO DE TCALC-1/2

Esta regla compara la relación Calor/Costo para apareamientos denominados "CALOR1" y "CALOR2" (ambos apareamientos son formas específicas de la regla TCALC2), y esta inspirada en la propuesta de Jezowski et al. (1986) [29], de la siguiente manera:

ECUACIÓN 7a.

$$\text{Selector de apareamientos} = \frac{(\text{Calor/ Costo del intercambiador})_{\text{CALOR1}}}{(\text{Calor/ Costo del intercambiador})_{\text{CALOR2}}}$$

Si Selector de apareamientos < FACTOR-CALOR, usar CALOR2;

Si Selector de apareamientos \geq FACTOR-CALOR, usar CALOR1.

Si esta relación es mayor que **FACTOR-CALOR**, se utiliza CALOR1; si no, se usa CALOR2. Se ha encontrado que los valores óptimos de este factor pueden fluctuar entre 1 y 1.3, a fin de darle cierta preferencia a CALOR2, que propone apareamientos más reversibles. Es importante notar que estas reglas de distribución de calor pueden utilizarse con cualquier heurística de selección de corrientes por aparear. Aunque solamente se tienen implementados dos tipos básicos de distribución de calor (extremo caliente/extremo frío), pueden definirse nuevos tipos de distribución de calor, -para tomar o ceder calor de la parte

intermedia de las corrientes-, por ejemplo, y utilizarlos con reglas de distribución de calor del tipo CALOR1 o CALOR2.

ANEXO 16. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ALGORITMO GENERAL

De acuerdo con el MDP, (Linnhoff y Hindmarsh, 1983 [3]) para lograr una máxima recuperación de energía se recomienda tener en el punto de pliegue:

ECUACIÓN 8a.

$$N_{clave} \leq N_{secundaria}$$

donde:

N: número de corrientes de cada tipo.

y además, para cada apareamiento:

ECUACIÓN 9a.

$$FCp'_{clave} \leq FCp^i_{secundaria}$$

donde:

FCp : producto del C_p por el flujo másico

i, j : son corrientes pinch que intercambian calor.

Muchos problemas presentan $N_{clave} > N_{secundaria}$; es necesario realizar divisiones de flujo en las corrientes secundarias, de tal manera se cumpla la igualdad de la **Ecuación 8a**.

En estos casos, el sistema trata de hacer divisiones de flujo sobre las corrientes secundarias, para establecer al menos la igualdad en el número de corrientes clave y secundarias. El sistema funciona de la siguiente manera:

a) Se ordenan las corrientes de cada tipo, de acuerdo a su FCp en orden decreciente.

b) Si se tiene que $N_{clave} \leq N_{secundaria}$, el sistema tratará de generar suficientes divisiones de flujo hasta tener $N_{clave} = N_{secundaria}$, asegurándose de

$$FCp'_{clave} \leq FCp'_{secundaria}$$

que para cada división de flujo propuesta, siempre exista una corriente clave tal se cumpla la desigualdad:

El planteamiento formal de la resolución al problema podría expresarse de la siguiente manera:

Si se tienen $i= 1,2,\dots,n$ corrientes clave, y $j= 1,2,\dots,m$ corrientes secundarias, tal que $n>m$; se intentará generar $n-m$ divisiones de flujo en las corrientes secundarias, con la restricción de que se cumpla:

ECUACIÓN 10a.

$$FCp^{a,j}_{secundaria} - FCp^{\beta,j}_{clave} \geq FCp^{\alpha,k}_{clave} \quad \text{donde:}$$

$FCp^{a,j}_{secundaria}$ una corriente secundaria situada en la posición j -ésima del stack de FCp secundarios, con $1 \leq j \leq m$.

$FCp^{\beta,j}_{clave}$ y $FCp^{\alpha,k}_{clave}$ son corrientes clave situadas en la posición j -ésima y k -ésima de la lista ordenada de FCp de las corrientes clave, tal que $n-m \leq k \leq n$. Además,

es conveniente saber si existe la posibilidad de transferir calor entre las divisiones propuestas en la corriente secundaria, con alguna de las corrientes clave.

Esta ecuación tiene como fin asegurar que para cada corriente clave, al menos existe una corriente secundaria con la cual se cumple la diferencia de FCp y pueden transferir calor.

Para fines de la heurística de división de flujo, se le asigna a cada corriente clave, una corriente secundaria con la cual forman, para propósitos de la división de flujo, un "apareamiento virtual", que es independiente de la manera en que se apareen después de llevar a cabo el procedimiento para la división de flujo. Esta asignación se realizará de acuerdo a su posición en el stack de corrientes. De aquí en adelante, se utilizará el término **corriente espejo** para referirse a la corriente que complementa el "apareamiento virtual", según su posición en el stack de corrientes.

Si la 1era. corriente del stack de corrientes secundarias tiene un FCp mayor al FCp de su corriente espejo (la 1era. corriente del stack de corrientes clave), es factible dividir ésta corriente secundaria. El ramal principal de la corriente secundaria tendrá un FCp igual al de su corriente espejo, el ramal residual se probará si es mayor o igual al FCp de alguna de las corrientes clave que no tenga una corriente secundaria asignada (situadas a partir de la posición $[n-m]$ en el stack de corrientes clave). Si el FCp de la corriente secundaria residual cumple la desigualdad no es suficiente para ser asignado a la corriente clave situada en la posición $n-m$, se probará con las corrientes $n-m+1$, $n-m+2$, ..., hasta llegar a n . Si el FCp residual es suficiente para alguna de las corrientes clave sin asignar, se llevará a cabo la división de flujo.

Este procedimiento se termina al llegar a la corriente m secundaria (última corriente del stack de corrientes ordenadas) y haber explorado todas las posibilidades de asignación de corrientes espejo, llegando hasta la corriente n .

clave, o bien, cuando se han generado suficientes divisiones de flujo de tal manera que $N_{clave} = N_{secundaria}$.

Esta heurística se aplica aunque se trabaje con las reglas MDP desactivadas, o en problemas donde puede existir un pseudo pinch implícito.

ANEXO 17. EJEMPLO DE RESOLUCION PARA $N_{clave} \geq N_{secundaria}$

La población de corrientes en el punto de pliegue es:

	CORR.	FCp*	TIPO
Corrientes secundarias	C11	7	FRIA
Corrientes clave	H11	2	CALIENTE
	H12	5	CALIENTE
	H13	3	CALIENTE

* El FCp de las corrientes está en unidades arbitrarias.

Debido a que se tiene un número menor de corrientes secundarias que de corrientes clave, lo ideal sería poder dividir la corriente C11 en tres ramales, cada uno con FCp mayor o igual que el de su corriente espejo, de tal manera que se cumpla la desigualdad de número de corrientes y de FCp. Aunque por simple inspección es obvio que el FCp de la corriente secundaria no es suficiente para cumplir con las desigualdades de número de corrientes y de FCp, esto ilustrará el funcionamiento del algoritmo.

Las listas ordenadas según el FCp decreciente de las corrientes son:

[C11] para las corrientes secundaria y [H12 H13 H11] para las corrientes clave.

Se tiene una corriente secundaria con FCp mayor que su corriente espejo clave (H12, por estar en la primera posición del *stack* de corrientes clave); por lo tanto, es factible partir la corriente C11 en uno o más ramales, a fin de aumentar el número de corrientes secundarias.

¿ Sería factible generar alguna división de flujo sobre la 1era. corriente del *stack* de corrientes secundarias (C11) tal manera que el ramal principal tenga un FCp igual al de su corriente espejo (la 1er. corriente del *stack* clave, H12), y el ramal residual "elimine" a alguna(s) de las corrientes clave situadas a partir de la posición [n-m] (es decir, las corrientes situadas del 2o. lugar en adelante (H13 H11))? .

Si se tienen las corrientes tales que se cumpla la desigualdad de la **Ecuación 9a**, se propone una división de flujo sobre la corriente secundaria j-ésima tal que se tenga un ramal de la corriente secundaria con un $FCp_{ramal1} = FCp_{secundaria}^{\alpha,j} - FCp_{clave}^{\beta,j}$ y el otro ramal, que es el principal, con $FCp_{ramal2} = FCp_{clave}^{\beta,j}$.

La diferencia de los FCp de las corrientes situadas en la primera posición de los *stacks* es: $7 - 5 = 2$ unidades, ($FCp_{ramal2} = FCp_{secundaria}^{\alpha,j} - FCp_{clave}^{\beta,j}$); este sería el FCp residual en caso de realizarse una división de flujo, y con el cual, se formaría un "apareamiento virtual" entre la corriente residual de C11 (con $FCp=2$) y una corriente clave que no tenga asignada aún una corriente espejo.

Esta corriente clave se "busca" a partir de la segunda posición (en el lugar [n-m]) en la lista ordenada de corrientes clave, con el fin de asegurar que las corrientes clave de mayor FCp tengan asignadas corrientes secundarias que cumplan la desigualdad de FCp.

Ya que la corriente en la 2a. posición (lugar $[n-m]$) de la lista ordenada clave es H12 con un FCp de 3, no se cumpliría la desigualdad de FCp si se realizara un "apareamiento virtual" con el ramal₂ de C11 (con un FCp= 2).

La corriente H11, situada en la posición $n-m+1$ (H11, FCp= 2), parece un buen candidato, ya que el ramal₂ propuesto de C11 iguala el FCp de esta corriente. Para habilitar la división de flujo, solo resta probar si es posible que éstas corrientes intercambien calor entre sí, en una cantidad suficiente para justificar un posible apareamiento. En caso de que esto último sea factible, la heurística para división de flujo termina, ya que no hay más corrientes secundarias que sean susceptibles de dividirse sin afectar la desigualdad de FCp para su "apareamiento virtual". El resultado de la heurística es la división de la corriente C11 en dos ramales, ramal₁ con FCp=5 y ramal₂ con FCp=2. El primer ramal podría aparearse con la corriente H11, con FCp=5, y el segundo ramal, con la corriente H11, con FCp=2. La corriente H12, con FCp=3, aún sigue sin tener una corriente espejo que cumpla la desigualdad de FCp, sin embargo, se logró generar una corriente secundaria más, para disminuir la desigualdad número de corrientes.

Como heurística adicional, se especifica una cantidad mínima aceptable de calor intercambiado entre la corriente *j-ésima* secundaria y su corriente espejo, con el fin de rechazar un apareamiento que dé como resultado un intercambiador muy pequeño y que no sea rentable.

Cabe señalar que este ejemplo fue tomado del problema 4SP2, y el mismo razonamiento fue aplicado para sintetizar las redes con división de flujo con una mejora sustancial en los costos.

ANEXO 18. ALGORITMO PARA CASOS EN LOS QUE $FCp_{clave} \leq FCp_{secundaria}$

Para los casos en los que se tiene $N_{clave} < N_{secundaria}$, solo resta revisar si para cada corriente clave, su corriente espejo cumple la desigualdad de la **Ecuación 9a**; si no se cumple este principio, se puede recurrir a una división de flujo sobre la corriente clave, sin violar el principio del MDP de $N_{clave} \leq N_{secundaria}$.

Si $N_{clave} \leq N_{secundaria}$, es conveniente revisar que las corrientes clave con mayor FCp cumplan la desigualdad de FCp en su "apareamiento virtual" con la corriente espejo; en caso de que no sea así, existe la libertad para realizar $(N_{secundaria} - N_{clave})$ divisiones de flujo sobre las corrientes clave, a fin de asegurar el cumplimiento de la desigualdad de FCp para cada "apareamiento virtual". Si alguna de las corrientes clave no cumple la desigualdad de FCp con su corriente espejo, el sistema tratará de solucionar en primera instancia el problema con las corrientes clave con mayor FCp , ya que generalmente son las que tienen una carga calorífica mayor y pueden influenciar en mayor grado la recuperación de calor.

El algoritmo es muy parecido al anterior, se ordenan las corrientes clave y secundarias según el FCp decreciente en listas separadas, y a cada corriente clave, se le asigna una corriente secundaria, según lo explicado anteriormente. En este caso, algunas de las corrientes secundarias quedarán sin asignar.

Se revisa si para cada corriente clave, su corriente espejo tiene un FCp igual o mayor. En caso de que no se cumpla lo anterior, se considera una división de flujo sobre la corriente clave, bajo los siguientes criterios:

a) Si la corriente clave puede transferir calor con su corriente espejo, en una cantidad mayor o igual a un mínimo especificado.

b) Si la relación $Q_{clave} / Q_{secundaria}$ es mayor que un mínimo especificado. Q_{clave} y $Q_{secundaria}$ representan la carga calorífica de la corriente clave y su corriente espejo, respectivamente.

Este último criterio tiene por objetivo evitar que se realice una división de flujo en una corriente clave que tiene un FCp muy grande, pero con una carga calorífica baja y que no puede intercambiar suficiente calor con otra corriente para obtener un intercambiador de tamaño económicamente adecuado.

Una vez que se hace la partición de la corriente clave, al ramal de menor FCp se le asigna cualquiera de las corrientes secundaria que estén sin asignar.

Cuando se ha validado la factibilidad de la partición de una corriente clave, los ramales se distribuyen de la siguiente manera:

$$\text{-Ramal}_1 \text{ con } FCp = FCp_{secundaria} \cdot$$

$$\text{-Ramal}_2 \text{ con } FCp = FCp_{clave} - FCp_{secundaria} \cdot$$

FCp_{clave} y $FCp_{secundaria}$ son el FCp de la original de la corriente clave y el FCp de su corriente espejo, respectivamente.

El algoritmo termina cuando se han revisado todas las corrientes claves y sus corrientes espejo y se encuentra que para cada par, se cumple la desigualdad de FCp, o bien, cuando se ha generado un número tal de divisiones de flujo y $N_{clave} = N_{secundaria} \cdot$

ANEXO 19. EJEMPLO DE RESOLUCION PARA $N_{clave} < N_{secundaria}$ CON $FCp_{clave} > FCp_{secundaria}$

Se tienen las siguientes corrientes en el punto de pliegue:

	CORR	FCp	TIPO
Corrientes clave	H11	3.15	CALIENTE
	H12	2.52	CALIENTE
Corrientes secundarias	C11	2.16	FRIA
	C12	2.45	FRIA
	C13	2.47	FRIA

Al tratar de realizar los apareamientos, se detectó que la corriente clave H11 tiene un FCp mayor que cualquier corriente secundaria.

Las listas ordenadas según el FCp decreciente son: [H11 H12], para las corrientes clave y [C13 C12 C11], para las corrientes secundarias.

Únicamente es factible partir una corriente clave y seguir manteniendo la desigualdad de $N_{clave} \leq N_{no-clave}$, solo basta revisar si para la primera corriente de la lista ordenadas de corrientes clave (H11), su corriente espejo (en la primera posición de la lista de corrientes secundarias, C13) cumple con la desigualdad $FCp_{clave} \leq FCp_{secundaria}$. Dado que el FCp de H11 (3.15) es mayor que el FCp de C13 (2.47), se hace evidente la necesidad de realizar una división de flujo.

Se propone una división de flujo, partiendo H11 en dos ramales, uno de ellos con un FCp igual al de C13. Para asegurar la validez de la división de flujo,

se revisa si en un supuesto apareamiento, el ramal principal de H11 (de $FC_p=2.47$, igual al de C13) y C13 pueden intercambiar suficiente calor, en una cantidad mayor al mínimo aceptable. Si es así, solo resta probar que H11 supera en calor total disponible a C13, por lo menos por una relación mínima.

Aunque el sistema siempre revisa la población de corrientes y hace sugerencias sobre las divisiones de flujo necesarias antes de iniciarse la síntesis, en cualquier momento de la síntesis en el modo interactivo pueden el usuario pedir una sugerencia y poner en funcionamiento estas heurísticas.

ANEXO 20. PARÁMETROS DE LA FUNCION SEL

Los primeros 2 parámetros (F1 Y F2) de dicha función corresponden a alguna propiedad de la corriente con base en la cual se les asigna una "deseabilidad" a las corrientes; éstas se guardan en un *stack* (o una lista ordenada) en orden decreciente según el valor de la propiedad evaluada, el 1er. parámetro corresponde siempre a las corrientes clave, y el 2o., a las corrientes secundarias. Como ejemplo de este tipo de parámetros está la función CALOR-TOTAL, la cual toma una corriente como argumento y evalúa el valor de la carga calorífica remanente de la misma. Así, podemos formar un *stack* de corrientes ordenadas con base en su FC_p , temperatura de entrada o de salida, etc.

El 3er. parámetro (F3) sirve para especificar si existe una función para evaluación de propiedades intrínsecas del apareamiento (e.g. seleccionar el apareamiento que transfiera más calor) o si la selección depende solo del lugar en el que se ordenaron las corrientes (e.g. se toma la corriente caliente con la temperatura más caliente de entrada, y se aparea con la corriente fría con la temperatura más alta de salida). En este último caso, el selector de apareamientos toma la 1era. corriente clave en el *stack*, y trata de aparear con la 1era. corriente del *stack* de corrientes secundarias; en caso de que no se

pueda aparear ésta, se prueba si es posible realizar el apareamiento con la 2a. corriente secundaria del *stack*, y así sucesivamente. Si la corriente clave seleccionada es pinch, y se agotan las posibilidades de apareamiento con las corrientes secundarias al pinch, se procede a tratar de realizar el apareamiento con las corrientes secundarias lejanas al pinch. Únicamente después de que se probó que no existía ninguna corriente secundaria para aparearse con la corriente clave seleccionada, se asignan servicios de calentamiento o enfriamiento, según el caso, sobre esta última.

El 4o. parámetro (F4) es el criterio de selección sobre las corrientes ordenadas, evalúa una propiedad del apareamiento propuesto (e.g. área, costo del área, temperatura logarítmica media, etc.); este parámetro no tiene efecto si en el tercer parámetro se especificó una heurística que depende únicamente de la posición de las corrientes en el *stack*.

Los últimos 2 parámetros son numéricos y se refieren al número de corrientes claves y secundarias que se examinarán en los *stacks* ordenados; sobre esas corrientes se hacen todas las combinaciones posibles y se evalúa una función, que corresponde al 4o. parámetro. Estos parámetros solo tienen relevancia cuando se trata de heurísticas relacionadas con propiedades del apareamiento.

Una posibilidad es tomar el penúltimo parámetro como 1 (es decir, se selecciona la primer corriente clave del *stack*) y el último es igual o mayor al número de corrientes secundarias, con el fin de asegurar que se explorarán todas las combinaciones posibles entre la 1era. corriente clave del *stack* y todas las corrientes secundarias existentes.

ANEXO 21. EXPLICACIÓN DE DECISIONES

Usando esta opción, aparecerán en pantalla los parámetros usados en la síntesis: la función utilizada para el ordenamiento de las corrientes en el *stack*, el número de corrientes clave y secundarias que se combinaban para su evaluación, función(es) usada(s) para evaluar los apareamientos y sus intensidades fijadas por el diseñador, si son corrientes pinch o lejanas al pinch, y la regla de distribución de calor usada. Por ejemplo, para la heurística de Ponton et. al, la pantalla correspondiente es la siguiente:

HEURISTICAS USADAS EN LA CONSTRUCCION DE LA RED

PARAMETROS DE ORDENAMIENTO

CORRIENTES CLAVE P+D

CORRIENTES SECUNDARIAS P+D

SE HICIERON TODOS LOS APAREAM. POSIBLES DE LAS 1 PRIMERAS
CORRIENTES CLAVE

NO SE APLICÓ NINGUNA FUNCIÓN PARA EVALUAR LOS APAREAMIENTOS

SE REALIZÓ LA SEPARACIÓN DE CORRIENTES EN PINCH/LEJANAS AL
PINCH

LA REGLA DE DISTRIBUCIÓN DE CALOR ES TCALCI

LOS PARAMETROS USADOS SON (HE HE HE HE HE HE HE HE)
(PARA CONTINUAR APRETAR CUALQUIER TECLA+RETURN)

Si la heurística consiste en propiedades intrínsecas de las corrientes (e.g. Ponton y Donaldson), aparecerán las listas con las corrientes frías y calientes, ordenadas según el valor de ésta propiedad. El siguiente ejemplo fue tomado del problema 5SP1 utilizando la heurística de Ponton et. al,

NIVEL DE DECISION: 1 TIPO DE EXPLICACION: ORDEN

CORRIENTES CLAVE

CORRIENTE	VALOR DE LA PROPIEDAD
H12	400
H11	274.286

CORRIENTES SECUNDARIAS

CORRIENTE	VALOR DE LA PROPIEDAD
C11	400.0
C13	360

En este, se muestra el nivel de decisión (número de apareamiento realizados en modo automático), tipo de heurística (de ordenamiento en el *stack*), el valor de la propiedad evaluada (temperatura de entrada para las corrientes calientes, temperatura de salida para las corrientes frías).

Si la heurística consiste en la evaluación de alguna propiedad del apareamiento (menor gradiente de temperaturas promedio, por ejemplo), aparecerá una lista con los posibles apareamientos, ordenados según el valor de la función evaluada. El siguiente ejemplo corresponde al problema 5SP1, para la heurística de menor gradiente de temperatura (representado aquí como el inverso del gradiente de temperatura; ya que el programa siempre selecciona el apareamiento con el mayor valor).

NIVEL DE DECISION: 1		TIPO DE EXPLICACION: FUNCION
CORRIENTE1	CORRIENTE2	VALOR FUNCION
H12	C11	2.44369F-02
H11	C11	1.75125F-02
H12	C13	7.81759F-03
H12	C12	7.14286F-03
H11	C13	3.71078F-03

En el ejemplo, se muestra el nivel de decisión (número de apareamiento realizados en modo automático), tipo de heurística (aplicación de una función para evaluar la propiedad del apareamiento), los posibles apareamientos (CORRIENTE1 para corrientes clave, CORRIENTE2 para corrientes secundarias) y el valor de la propiedad evaluada (inverso de la temperatura logarítmica).

Pueden existir heurísticas en las cuales se selecciona alguna corriente clave mediante un ordenamiento de propiedades de corrientes, y se aparea con la corriente secundaria que maximice el valor de alguna propiedad del apareamiento.

Para la heurística de Muraki et al, se tiene la siguiente pantalla:

NIVEL DE DECISION: 2 TIPO DE EXPLICACION: ORDEN+FUNC
ORDENAMIENTO CORRIENTES CLAVE

CORRIENTE	VALOR DE LA PROPIEDAD
H11	316.667
H12	160.0

APAREAMIENTOS POSIBLES Y VALOR DE FUNCIÓN.

CORRIENTE1	CORRIENTE2	VALOR FUNCION
H11	C11	1.44714538D-02
H12	C12	1.36765499D-02

En el ejemplo, se muestra el nivel de decisión (número de apareamiento realizados en modo automático), tipo de heurística (selección de una(s) corriente(s) del *stack* de corrientes clave y la aplicación de una función para determinar la deseabilidad de las combinaciones entre corrientes clave seleccionadas y las corrientes secundarias), los apareamientos posibles entre las corrientes clave seleccionadas y las corrientes secundarias (CORRIENTE1 para corrientes clave, CORRIENTE2 para corrientes secundarias) y el valor de la propiedad evaluada (Calor transferido/costo del intercambiador).

Si hay corrientes que individualmente son candidatas a aparearse pero que no se puede llevar a cabo el apareamiento por restricciones de temperatura, este par aparecerá en una lista, con las temperaturas de entrada y de salida de cada corriente.

ESTOS APAREAMIENTOS NO SON POSIBLES

CORR1	T1	T2	CORR2	T1	T2
H12	160.0	150	RC11-13	200	211.646
H12	160.0	150	C12	380	400
H12	160.0	150	C11	296.667	400

T1 y T2 representan las temperaturas de entrada y de salida residuales, respectivamente.

Cuando ya no se pueden realizar más apareamientos y es necesario el uso de servicios sobre una corriente, el sistema presenta en pantalla los datos de esta corriente, así como de las corrientes restantes que aún tenían carga calorífica, y sus temperaturas de entrada y de salida.

También el sistema muestra la explicación de cada unión de ramales de una corriente, con sus temperaturas de entrada y la temperatura de equilibrio.

NIVEL DE DECISION: 5

TIPO DE EXPLICACION: ASIGNACION

SERVICIOS EN CORRIENTE C12 CON T1 380 Y T2 400

NO HABIA CORRIENTES PARA APAREAR CON C12

Así se intenta que el usuario conozca la información básica que llevó al sistema a tomar una decisión, y evitar la sensación de trabajar con una "caja negra", a la cual se le alimentan datos y mediante procesos desconocidos, se obtiene una respuesta de dudosa validez.

ANEXO 22. CÁLCULO DE COSTOS

Para obtener el costo de las redes, se usan los siguientes parámetros por default:

Coefficientes de transferencia	(Btu/hr ft ° F)
Intercambiadores	150
Enfriamiento	150
Calentamiento	200
Enfriamiento (Agua)	
Capacidad Calorífica (Btu/lb- ° F)	1.0
Temperatura Entrada (° F)	100

Temperatura Salida (° F)	180
Costo (\$/lb)	$5 \cdot 10^{-5}$
Calentamiento (Vapor)	
Presión (lb/in abs)	450.0
Calor Latente (Btu/lb)	767.5
	768 para 5SP1
Temperatura (° F)	456
Costo (\$/lb)	$1.0 \cdot 10^{-2}$
Solo se transfiere calor latente.	

Datos generales:

Mínima diferencia de Temperatura permitida:

Calentamiento (° F)	25
Enfriamiento (° F)	20
Intercambiadores (° F)	20
Horas de Operación anuales	8,500
	8,380 (5SP1,6SP1)
Tasa de retorno (1/ años de vida útil)	0.1
Costo de intercambiadores (\$)	$350 * A^{0.6}$

Por último, se considera que los divisores y uniones de flujo no tienen un costo asociado.

ANEXO 23. HEURÍSTICAS Y SU IMPLANTACIÓN EN LISP

A continuación se hace una recopilación de las heurísticas utilizadas y de los parámetros necesarios para su implementación en LISP. En esta parte, se detallan el nombre de las funciones creadas en LISP que se utilizaron para su implementación.

Se presentan aquí las heurísticas más comunes, aunque se pueden realizar combinaciones de éstas y/o definir nuevas funciones para abarcar un número ilimitado de posibilidades. El nombre indicado entre paréntesis es la identificación del archivo en el cuál se encuentra la heurística, y se utiliza también en la presentación de los resultados.

i) HEURÍSTICAS SIMPLES

PONTON Y DONALDSON (PONT)

"Aparear la corriente caliente con mayor temperatura de entrada, con la corriente fría con mayor temperatura objetivo". Aunque no se especifica explícitamente en el artículo de Ponton, todos los apareamientos son del tipo "extremo caliente", y los apareamientos se extienden al máximo.

Ordenamiento de corrientes en el stack:	P+D
Distribución de calor:	(CALOR-P+D)
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL2
Función auxiliar:	NIL
Evaluación de funciones auxiliares:	(APLICA-PESO1)
Corrientes del stack clave evaluadas:	1
Archivo LISP en el que se encuentra:	PONT.LSP

INVERSA PONTON Y DONALDSON (IPONT)

"Aparear la corriente fría de menor temperatura de entrada, con la corriente caliente de menor temperatura objetivo". Todos los apareamientos son del tipo extremo frío y estos se extienden hasta el máximo posible.

Ordenamiento de corrientes en el stack:	INV-P+D
Distribución de calor:	(CALOR-INV-P+D)
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	NIL
Evaluación de funciones auxiliares:	(APLICA-PESO1)
Corrientes del stack clave evaluadas:	1
Archivo LISP en el que se encuentra:	IPONT.LSP

MURAKI Y HAYAKAWA (MURA)

"Seleccionar la corriente caliente con mayor temperatura de entrada y aparearla con la corriente fría con la cuál se obtenga la mejor relación de Calor transferido/Costo del intercambiador".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	P+D
Distribución de calor:	(CALOR-P+D)
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	1
Archivo LISP en el que se encuentra:	MURA.LSP

RATHORE (RATH)

" Aparear en orden secuencial las corrientes con mayor FCP; la corriente con mayor FCP caliente se apareará con la corriente fría de mayor FCP, la 2a. mayor corriente caliente con la 2a. mayor corriente fría, etc; una vez apareadas todas las corrientes en este orden, se apareará en la siguiente ronda las corrientes residuales en el mismo orden anteriormente explicado". Puede utilizarse cualquier regla de distribución de calor.

Ordenamiento de corrientes en el stack:	SDATA-FCP
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL3
Función auxiliar:	NIL
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	1
Archivo LISP en el que se encuentra:	RATH.LSP

MAYOR CARGA CALORÍFICA (QMAX)

"Aparear las corrientes con mayor carga calorífica remanente". Se puede utilizar cualquier regla de distribución de calor.

Ordenamiento de corrientes en el stack:	CALOR-DISPONIBLE
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL2
Función auxiliar:	NIL
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	1
Archivo LISP en el que se encuentra:	QMAX.LSP

MAXIMO CALOR TRANSFERIDO (QTRAN)

"Elegir el apareamiento en el cual se transfiera una mayor cantidad de calor".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	SDATA-DELTATEMP
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO2)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	todas
Archivo LISP en el que se encuentra:	QTRAN.LSP

MENOR GRADIENTE PROMEDIO DE TEMPERATURAS (GRAD)

"Seleccionar el apareamiento que presente el menor gradiente de temperaturas promedio".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	SDATA-DELTATEMP
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	todas
Archivo LISP en el que se encuentra:	GRAD.LSP

PRODUCTO PONTON (PPONT)

"Seleccionar el apareamiento que tenga el mayor valor del producto (Temperatura de entrada de la corriente caliente) * (Temperatura objetivo de la corriente fría)". A diferencia de la heurística original de Ponton et al, se utilizó el producto de estas propiedades, con el fin de poder reconocer "empates" en la selección de la corriente clave, y poder seleccionar el apareamiento óptimo. Además, se utilizó también con CALOR1 y CALOR2, en vez de únicamente con

CALOR-P+D, con el fin de investigar los efectos de la regla de distribución de calor.

Ordenamiento de corrientes en el stack:	P+D
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL2
Función auxiliar:	NIL
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	1
Archivo LISP en el que se encuentra:	PPONT.LSP

ii) HEURÍSTICAS COMBINADAS

Cuando se combinan varias funciones mediante una suma, se utiliza una función para "normalizar" el valor absoluto de las diferentes funciones evaluadas, haciendo que sean comparables en magnitud.

Adicionales a esta función de ponderación, se puede modificar la intensidad de cada función; el valor de la intensidad de cada función, por "default" es 1.0.

Usualmente este parámetro se utilizó con valores entre 0.1 y 1.0, ya que se encontró que el utilizar intensidades fuera de este rango hace que las funciones se conviertan en el criterio único o bien, no contribuyan a la toma de decisiones.

PONTON MODIFICADA-1 (PONT1)

"Aparear la corriente caliente con mayor temperatura de entrada, con la corriente fría que haga que la suma de las funciones ΔT^{-1} con CALOR/COSTO sea la mayor". Se utilizó la distribución de calor CALOR-P+D, para poder comparar contra la heurística de Ponton et al. original y ver si existe alguna mejora.

Ordenamiento de corrientes en el stack:	P+D
Distribución de calor:	CALOR-P+D
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1 FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO2
Corrientes del stack clave evaluadas:	1
Intensidad FILTRO1 (ΔT^{-1}):	1.0
Intensidad FILTRO3 (Q/Costo):	0.1//1.0
Archivo LISP en el que se encuentra:	PONT1.LSP

INVERSA PONTON MODIFICADA-1 (IPONT1)

"Escoger el apareamiento de la corriente fría con menor temperatura de entrada, con la corriente caliente que haga que la suma de las funciones ΔT^{-1} con CALOR/COSTO sea la mayor".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	INV-P+D
Distribución de calor:	CALOR-INV-P+D
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1 FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO2
Corrientes del stack clave evaluadas:	1

Intensidad FILTRO1 (ΔT^{-1}):	1.0
Intensidad FILTRO3 (Q/Costo):	0.1//1.0
Archivo LISP en el que se encuentra:	IPONT1.LSP

PONTON MODIFICADA-2 (PONT2)

"Aparear la corriente caliente con mayor temperatura de entrada, con la corriente fría que haga que el producto de las funciones ΔT^{-1} con CALOR/COSTO sea la mayor". Se utilizó la distribución de calor CALOR-P+D.

Ordenamiento de corrientes en el stack:	P+D
Distribución de calor:	CALOR-P+D
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1 FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	1
Intensidad FILTRO1 (ΔT^{-1}):	1.0
Intensidad FILTRO3 (Q/Costo):	0.1//1.0
Archivo LISP en el que se encuentra:	PONT2.LSP

INVERSA PONTON MODIFICADA (IPONT2)

"Seleccionar la corriente fría con menor temperatura de entrada, y aparearla con la corriente caliente que haga que la suma de las funciones ΔT^{-1} con CALOR/COSTO sea la mayor".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	INV-P+D
Distribución de calor:	CALOR-INV-P+D
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1 FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	1

Intensidad FILTRO1 (ΔT^{-1}):	1.0
Intensidad FILTRO3 (Q/Costo):	0.1//1.0
Archivo LISP en el que se encuentra:	IPONT2.LSP

MAYOR CARGA CALORÍFICA MODIFICADA2 (QMAX1)

"Aparear la corriente clave con mayor carga calorífica, con la corriente secundaria que haga que el apareamiento presente la mayor relación de Calor transferido/Costo del intercambiador".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	CALOR-DISPONIBLE
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	1
Archivo LISP en el que se encuentra:	QMAX1.LSP

MAYOR CARGA CALORÍFICA MODIFICADA2 (QMAX2)

"Escoger la corriente clave que tenga mayor carga calorífica, y aparearla con la corriente secundaria que haga que el apareamiento que tenga el máximo de la sumatoria las funciones CALOR/COSTO y ΔT^{-1} ".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	CALOR-DISPONIBLE
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1 FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO2
Corrientes del stack clave evaluadas:	1

Intensidad FILTRO1 (ΔT^{-1}):	1.0
Intensidad FILTRO3 (Q/Costo):	0.1//1.0
Archivo LISP en el que se encuentra:	QMAX2.LSP

MAYOR VALOR DE LA SUMATORIA (CALOR TRANSFERIDO/COSTO INTERCAMBIADOR) + INVERSA DEL GRADIENTE PROMEDIO DE TEMPERATURAS (SUMA1)

"Seleccionar el apareamiento que tenga el mayor valor de la sumatoria de las funciones CALOR/COSTO y ΔT^{-1} ".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	SDATA-DELTATEMP
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1 FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO2
Corrientes del stack clave evaluadas:	todas
Intensidad FILTRO1 (ΔT^{-1}):	1.0
Intensidad FILTRO3 (Q/Costo):	0.1//1.0
Archivo LISP en el que se encuentra:	SUMA1.LSP

MAYOR VALOR DE LA SUMATORIA DE (CALOR TRANSFERIDO/COSTO INTERCAMBIADOR) + (INVERSA DEL GRADIENTE PROMEDIO DE TEMPERATURAS) + CALOR TRANSFERIDO (SUMA3)

"Seleccionar el apareamiento que tenga el mayor valor de la sumatoria de las funciones CALOR/COSTO más ΔT^{-1} más CALOR-TRANSFERIDO".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	SDATA-DELTATEMP
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1 FILTRO2 FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO2
Corrientes del stack clave evaluadas:	todas

Intensidad FILTRO1 (ΔT^{-1}):	1.0
Intensidad FILTRO2 (Q-transferido):	1.0
Intensidad FILTRO3 (Q/Costo):	0.1
Archivo LISP en el que se encuentra:	SUMA3.LSP

MAYOR VALOR DEL PRODUCTO CALOR TRANSFERIDO/COSTO INTERCAMBIADOR * INVERSA DEL GRADIENTE PROMEDIO DE TEMPERATURAS (PROD1)

"Seleccionar el apareamiento que tenga el mayor valor del producto de las funciones CALOR/COSTO por ΔT^{-1} ".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	SDATA-DELTATEMP
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1 FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	todas
Archivo LISP en el que se encuentra:	PROD1.LSP

MEJOR VALOR DEL PRODUCTO CALOR TRANSFERIDO/COSTO INTERCAMBIADOR * GRADIENTE PROMEDIO DE TEMPERATURAS * CALOR TRANSFERIDO (PROD2)

"Seleccionar el apareamiento que tenga el mayor valor del producto de las funciones CALOR/COSTO por ΔT^{-1} por CALOR-TRANSFERIDO".

Ordenamiento de corrientes en el stack:	SDATA-DELTATEMP
Distribución de calor:	cualquiera
Selector de corrientes:	AYUDA-SEL1
Función auxiliar:	(FILTRO1 FILTRO2 FILTRO3)
Evaluación de funciones auxiliares:	APLICA-PESO1
Corrientes del stack clave evaluadas:	todas
Archivo LISP en el que se encuentra:	PROD2.LSP

4SP2 SIN DIVISIÓN DE FLUJO

	INTERC.	CALENTADORES		ENFRIADORES		COSTO SERVICIO	AREA TOTAL	COSTO TOTAL
	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA	NUM.			
	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES			
						USD/AÑO	PIES^2	USD/AÑO
PONTON	9	115	1	0	0	12,736	3,761	23,716
IPONTON	3	402.44	1	287.44	2	58,145	3,106	66,490
MURAKI	9	115	1	0	0	12,736	3,761	23,716
RATHORE (CALOR1)	3	686.12	1	571.22	2	102,957	3,074	111,715
RATHORE (CALOR2)	5	215.71	1	100.71	1	28,646	3,096	36,905
	8	157.55	1	42.55	1	19,458	3,355	29,038
	8	157.55	1	42.55	2	19,458	3,461	29,677
QMAX (CALOR1)	3	686.12	1	571.22	2	102,957	3,074	111,715
QMAX (CALOR2)	5	215.71	1	100.71	1	28,646	3,096	36,905
QTRAN (CALOR1)	3	686.12	1	571.12	2	102,957	3,761	111,715
QTRAN (CALOR2)	5	215.71	1	100.712	2	28,646	30,906	36,905
GRADIENTE (CALOR1)	3	519.28	1	404.28	1	76,602	2,230	83,371
GRADIENTE (CALOR2)	14	115	1	0	0	12,736	4,543	27,392
PPONT (CALOR1)	3	682.85	1	567.85	1	102,441	2,441	109,553
PPONT (CALOR2)	9	115	1	0	0	12,737	3,761	23,716

* Se utilizó para todos los problemas Temp. de agua de entrada = 90°F, para asegurar temp. objetivo en todos los casos

4SP2 CON DIVISIÓN DE FLUJO

	INTERC.	CALENTADORES		ENFRIADORES		COSTO SERVICIO USD/AÑO	AREA TOTAL PIES^2	COSTO TOTAL USD/AÑO
	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA	NUM.			
	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES			
PONTON	3	115	3	0	0	12,736	4,524	20,955
	3	115	2	0	0	12,736	2,962	20,684
IPONTON	4	275	1	160	1	38,012	3,093	47,235
	3	115	1	0	0	12,736	3,324	19,862
MURAKI	3	115	3	0	0	12,736	4,524	20,955
RATHORE (CALOR1)	3	545	1	430	2	80,664	2,986	89,304
RATHORE (CALOR2)	7	115	2	0	0	12,736	5,734	24,251
QMAX (CALOR1)	3	520	1	405	1	76,715	2,742	84,328
QMAX (CALOR2)	3	115	3	0	0	12,736	4,524	20,955
QTRAN (CALOR1)	3	520	1	405	1	76,715	2,742	84,328
QTRAN (CALOR2)	3	115	3	0	0	12,736	4,524	20,955
GRADIENTE (CALOR1)	4	115	1	0	0	12,736	2,217	20,202
GRADIENTE (CALOR2)	10	115	2	0	0	12,736	4,441	25,538
	8	115	2	0	0	12,736	4,006	23,725
PPONTON (CALOR1)	3	520	1	405	1	76,715	2,742	84,328
	3	275	1	160	1	38,012	3,220	46,115
PPONTON (CALOR2)	3	115	3	0	0	12,736	4,524	20,955

* Se utilizó para todos los problemas Temp. de agua de entrada = 90°F, para asegurar temp. objetivo en todos los casos

5SP1

	INTERC.	CALENTADORES		ENFRIADORES		COSTO SERVICIO	AREA TOTAL	COSTO TOTAL
	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA	NUM.			
	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	USD/AÑO	PIES^2	USD/AÑO
PONTON	3	327	3	25.2	1	37,022	2,130	43,307
	4	356	3	54.2	1	41,697	2,610	49,310
IPONTON	4	302	2	0	0	32,953	1,757	38,563
MURAKI	3	327	3	25.2	2	37,022	2,065	43,166
RATHORE (CALOR1)	3	417.5	1	115.5	1	51,605	1,642	56,943
RATHORE (CALOR2)	7	302	3	0	0	32,953	3,142	41,865
	8	302	2	0	0	32,953	3,185	42,072
QMAX (CALOR1)	3	417.5	1	115.5	1	51,605	1,674	57,007
QMAX (CALOR2)	4	367.1	1	65.1	1	43,466	2,368	49,891
QTRAN (CALOR1)	3	417.5	1	115.5	1	51,605	1,674	57,007
QTRAN (CALOR2)	4	367.1	1	65.1	1	43,466	2,368	49,891
GRADIENTE (CALOR1)	6	302	1	0	0	32,953	2,437	40,066
GRADIENTE (CALOR2)	9	302	2	0	0	32,953	3,280	42,771
PPONTON (CALOR1)	3	327.2	2	25.2	25.2	37,022	1,790	42,474
	4	432.7	2	130.7	130.7	54,051	2,365	60,966
PPONTON (CALOR2)	5	302	4	0	0	32,953	2,937	41,230
	5	356.1	1	54.1	54.1	41,695	2,483	48,871

6SP1

	INTERC.	CALENTADORES		ENFRIADORES		COSTO SERVICIO	AREA TOTAL	COSTO TOTAL
	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA	NUM.			
	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	USD/AÑO	PIES^2	USD/AÑO
PONTON	4	0	0	530	2	27,763	2,577	35,010
IPONTON	8	0	0	530	5	27,763	4,159	39,829
MURAKI	4	0	0	530	2	27,763	2,577	35,010
RATHORE (CALOR1)	3	4.4	1	534.48	2	28,474	2,579	35,782
RATHORE (CALOR2)	4	0	0	530	4	27,763	3,993	37,061
	4	0	0	530	4	27,763	2,986	37,108
QMAX (CALOR1)	3	99.4	2	629.5	2	43,822	2,032	50,650
QMAX (CALOR2)	5	0	0	530	4	27,763	3,232	37,162
QTRAN (CALOR1)	3	99.4	2	629.5	2	43,822	2,032	50,650
	3	4.4	1	534.5	2	28,474	2,579	35,781
	3	83.45	2	613.5	2	41,245	2,350	48,505
QTRAN (CALOR2)	5	0	0	530	2	27,763	3,113	36,437
	6	16	1	546	4	30,348	2,854	39,615
	4	0	0	530	4	27,763	2,986	37,108
GRADIENTE (CALOR1)	7	0	0	530	3	27,763	3,157	38,116
GRADIENTE (CALOR2)	12	0	0	530	5	27,763	4,621	42,008
PPONTON (CALOR1)	3	4.4	1	534.5	2	28,474	2,579	35,781
PPONTON (CALOR2)	3	0	0	530	3	27,763	3,884	35,159

7SP1

	INTERC.	CALENTADORES		ENFRIADORES		COSTO SERVICIO	AREA TOTAL	COSTO TOTAL
	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA	NUM.			
	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES			
						USD/AÑO	PIES^2	USD/AÑO
PONTON	5	59.3	1	470.4	2	31,558	3,298	40,621
IPONTON	8	0	0	411	3	21,837	4,186	33,822
	8	0	0	411	3	21,837	3,181	31,993
MURAKI	7	59.3	1	470.4	2	31,558	3,378	41,821
RATHORE (CALOR1)	7	0	0	411	3	21,837	2,949	31,358
RATHORE (CALOR2)	11	11.7	1	422.8	3	23,761	4,623	36,826
	12	0	0	411	5	21,837	4,748	35,376
QMAX (CALOR1)	3	218.4	3	629.5	2	57,633	2,115	64,956
QMAX (CALOR2)	7	0	0	411	3	21,837	3,271	31,386
QTRAN (CALOR1)	3	218.4	3	629.5	2	57,633	2,115	64,956
QTRAN (CALOR2)	6	23.4	1	434.4	2	25,665	4,197	36,117
	6	100	2	511	3	38,217	2,911	47,627
GRADIENTE (CALOR1)	8	0	0	411	3	21,837	3,846	32,802
GRADIENTE (CALOR2)	17	0	0	411	4	21,837	4,770	38,871
PPONTON (CALOR1)	4	63.7	2	474.8	2	32,279	3,300	41,397
PPONTON (CALOR2)	7	83	2	494	2	35,440	3,458	45,992

10SP1

	INTERC.	CALENTADORES		ENFRIADORES		COSTO SERVICIO	AREA TOTAL	COSTO TOTAL
	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA	NUM.			
	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	USD/AÑO	PIES^2	USD/AÑO
PONTON	8	0	0	649.8	3	34,521	2,887	44,675
IPONTON	20	0	0	649.8	8	34,521	4,753	52,559
	13	0	0	649.8	8	34,521	4,690	50,140
MURAKI	7	0	0	649.8	3	34,521	3,159	44,756
QMAX (CALOR1)	7	215.9	3	865.7	4	69,903	2,605	79,994
QMAX (CALOR2)	9	0	0	649.8	5	34,520	3,769	46,609
QTRAN (CALOR1)	5	120.9	2	770.7	4	54,335	3,089	64,316
QTRAN (CALOR2)	8	0	0	649.8	5	34,520	4,528	46,616
GRADIENTE (CALOR1)	19	0	0	649.8	4	34,520	5,067	52,388
PPONTON (CALOR1)	7	70.2	3	720	3	46,026	3,284	57,267
PPONTON (CALOR2)	11	0	0	649.8	4	34,520	3,533	47,072

* Para las heurísticas no mostradas, se terminó la memoria RAM antes de terminar de resolver el problema

5SP1

	INTERC.	CALENTADORES		ENFRIADORES		COSTO SERVICIO	AREA TOTAL	COSTO TOTAL
	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA	NUM.			
	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	USD/AÑO	PIES^2	USD/AÑO
PONTON1 F1=1, F3=0.1	4	302	3	0	0	32,953	2,599	40,165
PONTON1 F1=1, F3=1	3	327.2	3	25.2	1	37,022	2,065	43,166
IPONTON1 F1=1, F3=0.1	9	302	1	0	0	32,953	3,103	42,123
IPONTON1 F1=1, F3=1	4	302	2	0	0	32,953	1,757	38,563
H12a	4	302	3	0	0	32,953	2,599	40,165
H12b	4	302	2	0	0	32,953	1,757	38,563
QMAX1 CALOR1	3	327.2	2	25.2	1	37,022	1,920	42,815
QMAX1 CALOR2	4	367.1	1	65.1	1	43,466	2,368	49,891
QMAX2 CALOR1 F1=F3=1	3	327.2	2	25.2	2	37,022	1,920	42,815
QMAX2 CALOR1 F1=1 F3=0.1	4	473.7	2	171.7	1	60,678	2,216	67,230
QMAX2 CALOR2 F1=F3=1	4	367.1	1	65.1	1	43,466	2,368	49,891
QMAX2 CALOR2 F1=1 F3=0.1	9	302	2	0	0	32,953	3,264	42,704
SUMA1 CALOR1 F1=1 F3=0.1	6	302	1	0	0	32,953	2,437	40,066
SUMA1 CALOR1 F1=F3=1	4	479.6	2	177.6	1	61,628	1,849	67,999
SUMA1 CALOR2 F1=1 F3=0.1	9	302	2	0	0	32,953	3,280	42,771
SUMA1 CALOR2 F1=F3=1	4	364.9	2	62.9	1	43,113	2,470	50,172
SUMA2 CALOR1	4	83.8	2	494.8	2	35,562	3,087	44,307
SUMA2 CALOR2	7	83	2	494	2	35,440	3,458	45,991
SUMA2 CALOR-P+D	5	79.4	2	490.4	1	34,841	3,086	43,526
SUMA3 CALOR1	6	302	1	0	0	32,953	2,437	40,066
SUMA3 CALOR2	5	356.1	1	54.1	1	41,697	2,514	48,727
PROD1 CALOR1	4	302	2	0	0	32,952	2,243	39,708
PROD1 CALOR2	5	302	3	0	0	32,953	2,522	40,668
PROD2 CALOR1	3	417.5	1	115.5	1	51,605	1,674	57,007
PROD2 CALOR2	4	367.1	1	65.1	1	43,466	2,368	49,891

7SP1

	INTERC.	CALENTADORES		ENFRIADORES		COSTO SERVICIO	AREA TOTAL	COSTO TOTAL
	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA	NUM.			
	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	USD/AÑO	PIES*2	USD/AÑO
PONTON1 F1=1, F3=0.1	9	48.68	2	459.7	2	29,814	3,834	42,148
PONTON1 F1=1, F3=1	9	48.68	2	459.7	2	29,814	3,834	42,148
IPONTON1 F1=1, F3=0.1	8	0	0	411	3	21,836	4,032	33,496
IPONTON1 F1=1, F3=1	4	202.5	3	613.5	2	55,019	2,983	63,828
H12a	7	59.3	1	470.4	2	31,558	3,516	42,105
H12b	7	0	0	411	3	21,836	3,261	31,374
QMAX1 CALOR1	3	247.4	4	658.4	2	62,381	2,480	70,459
QMAX1 CALOR2	5	214	3	652.1	3	56,920	2,624	66,137
QMAX2 CALOR1 F1=1 F3=0.1	4	123.4	2	534.5	2	42,065	2,684	50,151
QMAX2 CALOR1 F1=F3=1	4	247.4	4	658.4	2	62,381	2,664	71,363
QMAX2 CALOR2 F1=1 F3=0.1	10	0	0	411	4	21,836	4,708	35,138
QMAX CALOR2 F1=F3=1	5	214	3	625.1	3	56,920	2,612	66,207
SUMA1 CALOR1 F1=1 F3=0.1	8	0	0	411	3	21,836	3,826	32,802
SUMA1 CALOR1 F1=F3=1	6	231.66	3	642.7	2	59,799	2,761	69,574
SUMA1 CALOR2 F1=F3=1	10	133	3	544	3	43,634	3,424	56,661
SUMA1 CALOR2 F1=1 F3=0.1	16	0	0	411	4	21,836	4,724	38,202
SUMA2 CALOR1	4	83.8	2	494.8	2	35,563	3,088	44,307
SUMA2 CALOR2	7	83	2	494	2	35,440	3,458	45,991
SUMA2 CALOR-P+D	5	79.4	2	490.4	1	34,841	3,086	43,526
SUMA3 CALOR1	7	22	1	433	3	25,439	3,842	36,433
SUMA3 CALOR2	16	0	0	411	4	21,836	4,724	38,202
PROD1 CALOR1	7	169.5	2	580.6	2	49,622	2,880	59,795
PROD1 CALOR2	12	133	3	492.9	3	40,921	3,293	54,077
PROD2 CALOR1	3	218.4	3	629.5	2	57,633	2,115	64,946
PROD2 CALOR2	6	159	2	570	3	47,899	3,210	58,208

10SP1

	INTERC.		CALENTADORES		ENFRIADORES		COSTO SERVICIO	AREA TOTAL	COSTO TOTAL
	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA	NUM.	CARGA			
	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	UNIDADES	(BTU/hr)*E-4	USD/AÑO	PIES*2	USD/AÑO
PONTON1 F1=1, F3=0.1	22	0	0	649.8	3	34,521	4,920	53,260	
PONTON1 F1=1, F3=1	10	0	0	649.8	3	34,520	3,257	45,467	
IPONTON1 F1=1, F3=0.1	19	126.8	1	662.5	5	36,082	4,567	53,711	
IPONTON1 F1=1, F3=1	6	543.7	3	1193.5	6	121,873	3,447	134,011	
H12a	12	0	0	649.8	2	34,520	3,428	46,772	
H12b	8	259.6	4	909.4	2	77,070	2,789	86,419	
QMAX1 CALOR1	6	312.4	3	962.2	3	85,709	2,550	95,216	
QMAX1 CALOR2	8	142.5	2	792.2	3	57,866	3,039	67,760	
QMAX2 CALOR1 F1=F3=1	5	312.4	3	962.2	3	84,499	2,561	93,841	
QMAX2 CALOR2 F1=F3=1	8	63.4	1	713.2	5	44,278	3,297	56,139	
QMAX2 CALOR1 F1=1 F3=0.1	10	63.1	2	712.9	3	44,226	3,225	56,178	
QMAX2 CALOR2 F1=1 F3=0.1	21	0	0	649.8	8	34,520	4,754	52,360	
SUMA1 CALOR1 F1=1 F3=0.1	18	0	0	649.8	4	34,520	4,843	52,192	
SUMA1 CALOR1 F1=F3=1	8	346	3	995.9	3	89,943	2,815	100,861	
SUMA1 CALOR2 F1=1 F3=0.1	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
SUMA1 CALOR2 F1=F3=1	11	328.6	4	978.4	5	87,119	3,630	101,511	
SUMA3 CALOR1	12	1	68	717.9	4	45,030	3,766	59,123	
SUMA3 CALOR2	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
PROD1 CALOR1	9	236.6	2	886.4	2	72,265	2,587	82,848	
PROD1 CALOR2	18	75.7	2	725.5	3	46,260	3,747	61,844	
PROD2 CALOR1	5	282.4	3	932.2	3	79,665	2,350	88,624	
PROD2 CALOR2	9	14.3	2	664.1	5	36,869	3,662	48,548	

8SP1

DIVISION DE FLUJO ABAJO DEL FINCH FCP1 / FCP2	DISTRIB. DE CALOR	REGLAS FINCH ACTIVADAS	SELECCION APAREAM.	UNIDADES ARRIBA/ ABAJO FINCH	ARRIBA		ABAJO		ARRIBA		ABAJO		AREA ARRIBA PIES*2	AREA ABAJO PIES*2	COSTO SERVICIOS USD/año	COSTO SERVICIOS USD/año	COSTO AREA USD/año	COSTO AREA USD/año	COSTO TOTAL USD/año	COMENTARIOS
					CALENTADORES		CALENTADORES		ENFRADORES		ENFRADORES									
					CARGA (BTU/h*FE-4)	NUM. UNIDADES	CARGA (BTU/h*FE-4)	NUM. UNIDADES	CARGA (BTU/h*FE-4)	NUM. UNIDADES	CARGA (BTU/h*FE-4)	NUM. UNIDADES								
1 725	PONTON	NO	PONTON	10/1	230.55	5	0	0	7.82	1	17.52	1	3,084	93	25,946	916	36,665	1,610	38,275	DIVISION AL APARECER IP
2 32	PONTON	NO	PONTON	10/1	222.7	6	0	0	0	0	39.75	1	3,139	133	24,664	2,112	35,259	2,977	38,236	DIVISION AL APARECER IP
1 725	CALOR3	NO	PONTON	10/1	230.52	5	0	0	7.82	1	39.75	1	3,097	133	25,946	2,112	36,717	2,977	39,694	DIVISION AL APARECER IP
2 32	CALOR3	NO	PONTON	10/1	222.7	6	0	0	0	0	39.75	1			24,664	2,112	35,187	2,977	38,164	DIVISION AL APARECER IP
1 725	CALOR3	SI	PONTON	6/1	234.73	3	0	0	12.03	1	39.75	1	2,428	133	28,636	2,112	35,550	2,977	38,527	
1 725	CALOR3	SI	PONTON	6/1	263.8	4	0	0	41.00	1	39.75	1	2,354	133	31,398	2,112	40,233	2,977	43,210	
2 32	CALOR3	SI	PONTON	7/1	232.75	4	0	0	10.05	1	39.75	1	3,256	133	26,311	2,112	35,868	2,977	38,845	
1 725	COLD END	NO	PONTON INV	7/1	232.75	2	0	0	10.05	1	39.75	1	2,613	133	26,311	2,112	34,636	2,977	37,613	DIVISION DE FLUJO AL INICIO
1 725	COLD END	NO	PONTON INV	7/1	232.72	2	0	0	10.05	1	39.75	1	2,306.82	133	26,311	2,112	33,896	2,977	36,873	DIVISION DE FLUJO AL INICIO
1 725	HOT END	NO	PONTON IM1	12/1	232.72	3	0	0	10.05	1	39.75	1	2,887	133	26,311	2,112	37,729	2,977	40,706	DIVISION DE FLUJO AL INICIO
1 725	CALOR1	SI	RATHORE	7/1	368.81	3	0	0	176.117	2	39.75	1	2,143	133	53,525	2,112	62,094	2,977	65,071	
1 725	CALOR1	SI	RATHORE	7/1	404.87	2	0	0	182.179	2	39.75	2	2,407	133	54,518	2,112	63,433	2,977	66,410	
1 725	CALOR2	SI	RATHORE	9/1	232.72	4	0	0	10.05	1	39.75	1	2,484	133	26,311	2,112	35,629	2,977	38,606	DIVISION DE FLUJO AL INICIO
1 725	CALOR2	SI	RATHORE	9/1	232.72	4	0	0	10.05	1	39.75	1	2,973	133	26,311	2,112	36,878	2,977	39,855	DIVISION DE FLUJO AL INICIO
2 32	COLD END	NO	PONTON INV	6/1	232.72	3	0	0	10.05	1	39.75	1	3,024	133	26,311	2,112	34,790	2,977	37,767	DIVISION DE FLUJO AL INICIO