

2e1
18



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

**“Optimización de Redes de Intercambiadores
de Calor Mediante Computadoras Digitales”**

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a :

Juvenal Macías Lupercio



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

INDICE

Página

Objetivosiii

CAPITULO I INTRODUCCION 1

CAPITULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Consideraciones y Simplificaciones 9

CAPITULO III GENERALIDADES SOBRE OPTIMIZACION

3.1 La forma general del problema de optimización.....12

3.1.1 El Objetivo12

3.1.2 Las restricciones15

3.2 Modelo matemático.....17

3.3 Las funciones18

3.3.1 Representación de una función19

3.3.2 Continuidad de una función20

3.4 Región posible24

3.4.1 Optimos locales y globales25

3.5 Métodos de optimización26

CAPITULO IV METODOS USADOS PARA RESOLVER EL PROBLEMA

4.1 Algoritmo del área mínima33

4.2 Método del intervalo de temperaturas (TI).....49

4.3 Método termodinámico combinatorio (TC)65

4.4 Método del pliegue74

4.4.1 Filosofía del método74

4.4.2 Criterios de factibilidad76

4.5 Progresos de los trabajos anteriores89

INDICE

Página

CAPITULO V METODO PROPUESTO

5.1 Desarrollo del modelo general	92
5.1.2 Modelo matemático	93
5.1.3 Descripción del algoritmo.....	95
5.2 Coeficientes globales de transferencia de ca - lor variables y otros factores en el costo del equipo.....	97
5.3 Número de envolventes en los intercambiadores.	99
5.4 Flexibilidad	104

CAPITULO VI RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 Resultados	109
6.2 Conclusiones	126
6.3 Comentarios sobre futuras investigaciones	128

BIBLIOGRAFIA	129
--------------------	-----

APENDICE	134
----------------	-----

OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son:

1. Aplicar los principios y métodos de la optimización en un problema de interés práctico en Ingeniería Química.
2. Presentar los principales métodos de síntesis de redes de intercambio de calor óptimas, desde diferentes puntos de vista.
3. Realizar las síntesis de redes de intercambios de calor óptimas en recuperación de energía y costo total, a partir de un programa de computo.
4. Mostrar los avances que en síntesis de redes de intercambio de calor flexibles hay hasta el momento.

CAPITULO I**INTRODUCCION**

El creciente aumento en los costos de la energía, lo mismo que los costos de inversión en equipo requeridos en una planta Química o Petroquímica, han motivado un mayor interés por diseñar plantas y procesos que logrando un consumo mínimo de energía tengan, un costo total mínimo.

Dentro de este campo, los costos asociados a los sistemas de intercambio de calor frecuentemente llegan a representar una tercera parte del costo total de una planta. De aquí se desprende la importancia de diseñar sistemas que cubriendo eficientemente las necesidades térmicas de un proceso, tengan un costo mínimo. Estas necesidades térmicas están constituidas por una serie de corrientes de proceso que tienen que ser enfriadas y otras corrientes que deben ser calentadas, por lo que son combinadas con el fin de lograr un mejor aprovechamiento de la energía disponible, constituyendo lo que comúnmente se conoce como redes de intercambio de calor.

El determinar la mejor estructura para la combinación de las corrientes de proceso para el intercambio de calor es el objeto de estudio de una de las ramas más importantes de la Ingeniería de Procesos, la Síntesis de Procesos, que en este caso será la Síntesis de Redes de Intercambio de Calor, y que consta de una serie de herramientas y técnicas de diseño que permite la generación y evaluación de alternativas para la configuración de los sistemas más prometedores

El problema en sí mismo presenta las características propias de un problema de optimización en donde se desea realizar una serie de actividades, con unos recursos dados, de forma tal que bajo una serie de limitantes, el costo total de la actividad resulte mínimo.

Una de las características más significativas del problema es el carácter combinatorio del mismo, ya que el número de combinaciones posibles aumenta en forma casi exponencial con el número de corrientes de proceso involucradas. Así para un problema de diez corrientes, el número de posibilidades a evaluar (Ponton y Donaldson 1974) es de 10^{25} . Esto hace que, en determinados métodos, la computadora sea una herramienta indispensable.

El presente trabajo tiene el siguiente alcance:

En el capítulo II se hace un planteamiento general del problema de la Síntesis y Optimización de las redes de intercambio de calor, junto con la serie de simplificaciones o supuestos que comúnmente se hacen al abordar este problema como son el trabajar sólo con corrientes líquidas que no sufren cambio de fase, utilización de cambiadores de calor de tubo y envolvente, empleo de coeficientes globales de transferencia de calor iguales y constantes para todas las corrientes (excepto cuando se usa vapor), el tratamiento considerando un sólo paso a través del equipo, etc.

En el capítulo III se presenta un panorama general sobre la optimización en donde se hace principal hincapie en los conceptos más importantes manejados alrededor de la misma.

El capítulo IV contiene algunos de los métodos propues-

tos anteriormente para resolver el problema. Estos son:

- 1.- El Algoritmo del Area Mínima que es un método gráfico sencillo que intenta producir redes de mínimo costo y máxima recuperación de energía.
- 2.- El Método Termodinámico Combinatorio (TC) que busca producir redes óptimas desde el punto de vista de recuperación de energía y número de cambiadores.
- 3.- El Método del Intervalo de Temperaturas (TI) que intenta encontrar redes con máxima recuperación de calor.
- 4.- El Método del Pliegue que permite sintetizar redes con máxima recuperación de energía.

El capítulo IV termina haciendo un resumen de las principales aportaciones al conocimiento de la Síntesis y Optimización de Redes de Intercambio de Calor de los trabajos anteriores al presentado en este trabajo.

En el capítulo V se presenta un nuevo método de Síntesis de Redes de Intercambio de Calor que además de asegurar una máxima recuperación de energía, un número mínimo de unidades y un costo total mínimo, presenta la opción de utilizar modelos más realistas para la Síntesis de Redes de Intercambio de Calor al incorporar coeficientes globales de transferencia de calor variables, multipaso en los intercambiadores y considerar flexibilidad en el comportamiento de la red. El método es una modificación hecha por Parkinson al algoritmo desarrollado por Raghavan en 1977.

El capítulo VI contiene los resultados obtenidos con el programa de cómputo del método de Parkinson así como las conclusiones y observaciones sobre futuras investigaciones en este campo.

Final mente, en el Apéndice se da una descripción general del programa de computo y los listados del mismo.

CAPITULO II. .**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Uno de los primeros pasos seguidos de la creación de un proceso es el de dar la configuración o estructura del mismo. La materia encargada de estudiar los métodos y herramientas que faciliten concebir y diseñar un proceso completo se conoce como Síntesis de Procesos.

La síntesis integral de un proceso generalmente se realiza siguiendo la siguiente secuencia:

- 1.- Síntesis de Rutas de Reacción, cuyo objetivo es el de seleccionar una reacción o secuencia de reacciones encaminadas a obtener de la forma más eficiente posible, un producto (s) determinado (s).
- 2.- Síntesis de Sistemas de separación, tiene como tarea dar la secuencia de separación, así como elegir el equipo y sus condiciones de operación que produzcan las separaciones deseadas con alta eficiencia y mínimo costo.
- 3.- Síntesis de Sistemas de Control, encargado de seleccionar los sistemas de control que permitan controlar adecuadamente un proceso.
- 4.- Síntesis de Redes de Intercambio de calor, cuyo objetivo es el de desarrollar la estructura de redes de intercambio de calor que cumpliendo las necesidades de calentamiento y enfriamiento, tenga un costo

mínimo y/o se logre una máxima reconversión de energía.

El diseñar o sintetizar redes de intercambio de calor óptimas desde un punto de vista técnico-económico es precisamente el objetivo de este trabajo.

Como se mencionó anteriormente, en la industria de procesos químicos existe la necesidad de contar con corrientes de proceso a una temperatura dada (o dentro de un rango determinado). Por lo que estas corrientes deberán ser calentadas o enfriadas (según sea el caso). Esto se puede realizar - - usando servicios auxiliares como son vapor y agua de enfriamiento; pero el utilizar directamente estos servicios para alcanzar las condiciones requeridas, resultaría costoso y acarrearía un gasto innecesario de energía.

Es generalmente eficiente y de costo bajo, transferir calor de las corrientes que tienen que ser enfriadas con las corrientes que tienen que ser calentadas y dejar al final la utilización de los servicios auxiliares.

El problema puede describirse como sigue:

"Para una serie de corrientes de proceso calientes S_{hi} y una serie de corrientes de proceso frías S_{cj} que requieren - enfriarse y calentarse respectivamente, se conocen las temperaturas de entrada T y sus temperaturas de salida T^* asociadas a cada corriente y un flujo de capacidad calorífica dado Mcp . Se cuenta además, con una serie de equipos auxiliares-calentadores o enfriadores, S_{uk} . De tal forma que se busca la combinación óptima de las corrientes de manera que los

costos totales de la red propuesta resulte mínimo.

$$Sh_i, Thi, Thi^+, Wh_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad \text{---} \quad 2.1$$

$$Sc_j, Tc_j, Tc_j^+, Wc_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad \text{---} \quad 2.2$$

$$Suk \quad (k = 1, 2, \dots, p) \quad \text{---} \quad 2.3$$

Además:

$$\sum_{i=1}^m Wh_i = Q_h \quad \text{---} \quad 2.4$$

$$\sum_{j=1}^n Wc_j = Q_c \quad \text{---} \quad 2.5$$

$$\sum_{i=1}^m Wh_i = \sum_{j=1}^n Wc_j \quad \text{---} \quad 2.6$$

Donde:

Wh_i = flujo de capacidad calorífica para la corriente caliente i .

Wc_j = flujo de capacidad calorífica para la corriente fría j .

Th_i = temperatura de entrada para la corriente caliente.

Q_c = Calor total requerido para las corrientes frías.

Q_h = Calor total de las corrientes calientes.

Th_i^+ = temperatura de salida para corriente caliente.

Tc_j = temperatura de entrada para la corriente fría.

$T_{c_j}^+$ = temperatura de salida para la corriente fría.

m = número total de corrientes calientes.

n = número total de corrientes frías.

S_{uk} = Corrientes de servicio (vapor o agua de enfriamiento) en libras/hora..

Los costos de inversión de cada intercambiador puede obtenerse a partir de la expresión empírica,

$$C = aA^b \quad \text{--- 2.7}$$

Donde C = costo de la inversión.

a y b = constantes conocidas (reportadas por fabricante)

A = área de transferencia de calor.

De tal forma que el costo total de la red puede expresarse mediante

$$C_t = \int \left(\sum_i C_{ci} + \sum_i C_{si} \right) + \sum_k \sum_i U_k S_{ki} \quad \text{--- 2.8}$$

Donde C_t = Costo total anual (inversión + servicios auxiliares).

\int = Depreciación (supuesta a 10 años) = 0.1

C_{ci} = costo de inversión para el intercambiador i .

C_{ai} = Costo de inversión para un equipo auxiliar (calentador o enfriador).

2.1 CONSIDERACIONES Y SIMPLIFICACIONES.

- 1.- Se supone el uso de intercambiadores de tubos y envolvente por ser éstos los de uso más generalizado dentro de la industria Química y Petroquímica.

Para este tipo de intercambiadores la ecuación de diseño es:

$$Q = UA \Delta T_{LMTD} \quad (2.1)$$

donde:

Q = Calor transferido en Btu/hr.

U = coeficiente de transferencia de calor en Btu/hr ft²

ΔT_{LMTD} = media logarítmica de la temperatura.

A = área de transferencia en ft².

- 2.- Sólo se trabaja con corrientes que no sufren cambio de fase.
- 3.- Se toma un coeficiente global de transferencia de calor "U" constante e igual para todos los intercambios. Excepto para aquellos en los que se utiliza vapor.

- 4.- Se suponen capacidades caloríficas constantes con la temperatura.
- 5.- Las caídas de presión en los intercambiadores y los costos de bombeo se ignoran.
- 6.- No se incluyen los costos de tuberías, accesorios - controles, ni mantenimiento.

CAPITULO III

GENERALIDADES SOBRE OPTIMIZACION.

De manera general puede decirse que la Optimización es la materia encargada de estudiar los métodos matemáticos en caminados a encontrar el valor o conjunto de valores, condiciones o características de los parámetros o variables de un sistema dado, tales que proporcionen, de acuerdo a un criterio preestablecido, los mejores resultados posibles para la solución de un problema determinado.

La optimización, en la mayoría de los casos, se efectúa desde dos puntos de vista. El económico, en el que se desea realizar una actividad de forma tal que su costo total resulte mínimo y/o produzca el máximo beneficio. O el optimizar desde un punto de vista técnico, como puede ser buscar minimizar el consumo de energía requerida en un proceso y/o lograr la máxima calidad en la producción de un artículo determinado.

Algunas aplicaciones típicas dentro del campo de la Ingeniería Química son las siguientes:

- 1.- El diseño de una unidad o proceso para producir un material, de tal forma que, cumpliendo con una serie de especificaciones, se tenga un mínimo costo de producción ó una máxima rentabilidad.
- 2.- Las condiciones de operación de una planta o unidad de

manera que se ajuste a una máxima producción o costo mínimo. Esto puede ser, por ejemplo, encontrar la temperatura a la cual un reactor produce la máxima cantidad de un producto particular.

- 3.- Planear el mantenimiento o reemplazo de equipo con el fin de reducir los costos de operación.
- 4.- Encontrar la estructura de un sistema de separación (absorbedores, destiladores, etc), de forma tal que una separación determinada se realice con un consumo mínimo de energía.

3.1 LA FORMA GENERAL DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACION.

3.1.1 EL OBJETIVO

Para resolver cualquier problema de optimización, y en general cualquier problema de la vida real, es necesario definir el objetivo exacto que se persigue. Al mismo tiempo se requiere tener un conocimiento profundo del problema a fin de poder predecir las posibilidades y limitaciones de la optimización. Es decir, es necesario saber hasta que grado es deseable optimizar, y a que precio se puede lograr esto.

Una vez delimitado el objetivo concreto de la operación, la tarea general de la optimización será:

"Encontrar el valor máximo o mínimo de la función que represente el objetivo deseado, denominada función ob

jetivo, sujeta a una serie de limitaciones físicas o restricciones asociadas al sistema."

Es decir, se desea encontrar los valores de las variables $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ necesarias para maximizar la función objetivo:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{--- 3.1}$$

Sujeta a las restricciones:

$$G_K(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad K=1, 2, 3, \dots, M \quad \text{--- 3.2}$$

De esta forma todo problema de optimización presenta las siguientes características:

- a) La existencia de una función objetivo que se desea maximizar o minimizar.
- b) El conocimiento de las restricciones a las que se encuentra sujeto el sistema estudiado, y que determinan los valores posibles de las variables de dicho sistema.

Como se anotó anteriormente, los objetivos más frecuentes son de índole técnico o económico o bien una combinación de ambos.

A continuación se da un ejemplo en el que se muestra la importancia de definir correctamente el objetivo y conocer, las restricciones a las que se encuentra sujeto el sistema.

"Se tiene un reactor enchaquetado en el que tiene lugar la siguiente reacción $A+B \rightarrow C+D$ en fase líquida, y se desea operar en condiciones tales que la concentración de la especie C en el producto P sea máxima". (Fig. 3.1)

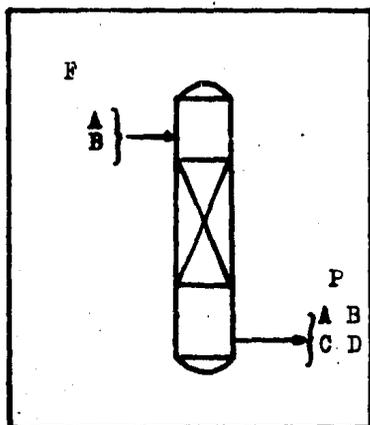


Fig 3.1

En este problema se podrían plantear los siguientes objetivos:

1. Encontrar la relación de los reactivos (A/B en la alimentación - que proporciona la máxima concentración de C en P.
- 2.- Encontrar la temperatura de operación del reactor de manera que se obtenga la máxima concentración de C en P.
- 3.- Encontrar la temperatura de operación, así como la característica de la alimentación P que produzcan la máxima concentración de C en P.
- 4.- Encontrar la relación de alimentación y la temperatura, de operación, de tal forma que se obtenga una concentración cuando menos 95% de C en P y se tenga un costo total mínimo.

Entre las restricciones más usuales asociadas a dicho -

problema, se encuentran las siguientes:

- 1.- La temperatura máxima de operación (ya sea por cambios de fase de productos o reactivos , descomposición del producto o bien por la máxima temperatura que resista, el material de construcción del propio reactor).
- 2.- Características de los reactivos (pureza , costo, disponibilidad, etc.).
- 3.- Características termodinámicas y económicas del medio de calentamiento (máximo temperatura que puede proporcionar, estado físico).

Como puede observarse, aunque estos objetivos parecen perseguir metas similares, en realidad cada uno de ellos tiene implicaciones diferentes.

3.1.2 LAS RESTRICCIONES.

Por lo que a las restricciones se refiere, pueden clasificarse según su origen en dos tipos:

- 1.- Restricciones Internas. Impuestas por el mismo diseñador o restricciones debidas a la obligación de cumplir con limitaciones del tipo:
 - a) De conservación de masa.

- b) De conservación de energía.
- c) De conservación de cantidad de momentum.
- d) De relaciones de diseño.
- e) De limitaciones termodinámicas o de cinética.

2.- Restricciones Externas. Impuestas al sistema por factores ajenos al proceso como son:

- a) Factores climatológicos.
- b) Restricciones de tipo legal.
- c) Limitaciones económicas.
- d) Factores de contaminación.
- e) Factores políticos.

Matemáticamente las restricciones pueden ser escritas en forma de igualdades.

$$G_k = G_k (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0 \quad \text{---} \quad 3.3$$

O bien, en forma de desigualdades:

$$G_k = G_k (X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0 \quad \text{---} \quad 3.4$$

Estas últimas pueden transformarse fácilmente en igualdades mediante la introducción de nuevas variables denominadas de holgura. El espacio de soluciones posibles depende de la forma original de las restricciones.

Por ejemplo, para las funciones $G_1 (X_2)$, $G_2 (X_1, X_2)$ se tienen las siguientes zonas de solución admisible. (Fig 3.2).

$$G_1 = -X_2 \leq 0 \quad \text{---} \quad 3.5$$

$$G_2 = -1 + X_1^2 + X_2^2 \leq 0 \quad \text{---} \quad 3.6$$

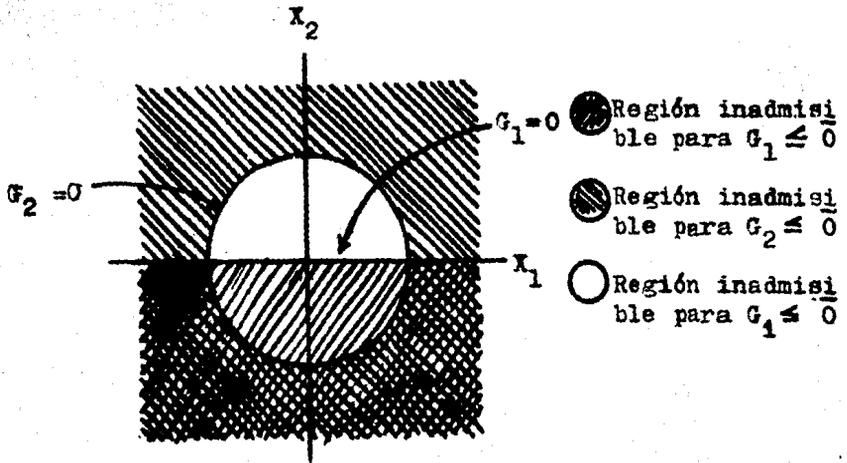


Fig. 3.2

3.2 MODELO MATEMATICO

Para aplicar los métodos matemáticos cuantitativos de la optimización en cualquier problema, es preciso poseer algún modelo matemático. Para la construcción de un modelo matemático es inevitable simplificar el fenómeno real. Cuanto más acertadamente se seleccione el modelo matemático, tanto mejor reflejará éste los aspectos característicos del fenómeno, más exitosa será la optimización y más útiles los resultados obtenidos.

Es necesario, en cada caso una correspondencia entre la precisión del modelo y la cantidad de detalles que lo caracterizan:

- a) Una precisión necesaria para solucionar el problema - en cuestión.
- b) Una información disponible adecuada.

Si los datos iniciales disponibles para el cálculo son inexactos, es evidente que no es necesario entrar en detalles, componer un modelo muy minucioso y gastar tiempo (del investigador y de la computadora) en optimizar la solución del modelo preciso y con muchos detalles.

El modelo matemático debe considerar los aspectos más importantes del fenómeno, además, según la posibilidad, el modelo debe ser simple, sin detalles secundarios, que dificulten, el análisis matemático e imposibiliten la consideración, los resultados de la investigación. En la construcción del modelo matemático existen dos peligros. El primero consiste en hundirse en detalles ("los árboles tapan el bosque"), y el segundo en generalizar demasiado el modelo ("hechar al niño de la bañera junto con la bañera").

La creación del modelo matemático es una parte fundamental que requiere conocimientos profundos, no tanto de matemáticas como de la esencia de los fenómenos que se simulan.

3.3 LAS FUNCIONES

Una vez que se cuenta con un modelo matemático (analítico) que represente el problema en cuestión, es necesario analizar las funciones que conforman dicho modelo, desde un punto de vista matemático; ya que serán sus características matemáticas las que determinen, por un lado las posibilidades de optimizar (encontrar un máximo o mínimo), y por otro el tipo de técnica de optimización a emplear.

3.3.1 REPRESENTACION DE UNA FUNCION

Una función puede representarse de muy diversas maneras. En general, la variable dependiente es expresada en términos de las variables independientes. Una de las formas más útiles de representar una función, es la forma gráfica, para la cual, para una serie de valores de las variables independientes X_1, X_2, \dots, X_n , se gráfica la función objetivo en un espacio de N -dimensiones formado por las variables independientes X_1, X_2, \dots, X_n , como coordenadas.

En las figuras (3.3, 3.4 y 3.5) se muestran los tipos más comunes de gráficas usadas para representar las funciones objetivo.

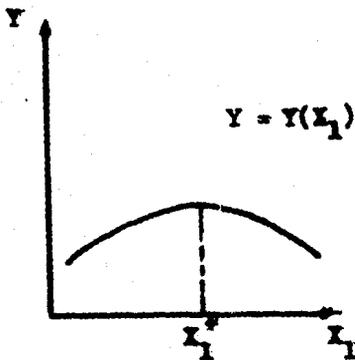


Fig. 3.3 Representación en una dimensión.

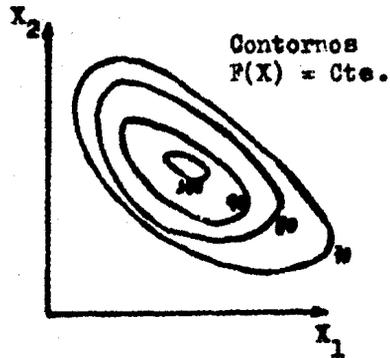


Fig. 3.4 Representación en dos dimensiones

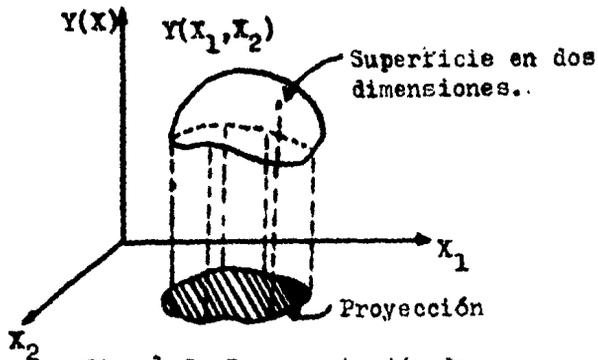


Fig. 3.5 Representación de proyección en dos dimensiones

Las ventajas más importantes que se tienen al contar con una representación gráfica de una función objetivo son:

- a) Se puede observar objetivamente el tipo de dependencia que existe entre la función y las variables independientes.
- b) Se puede examinar la sensibilidad del óptimo con el cambio en las variables independientes.
- c) Ayuda a comprender en una forma más apropiada el concepto de óptimo.
- d) Permite comprender en forma intuitiva y clara el fundamento en que se basa y la forma de actuar de una técnica de optimización determinada. Es decir, tiene un interés didáctico.
- e) Se pueden observar características de las funciones -- (continuidad, unimodalidad, concavidad, etc.)

Desafortunadamente para la mayoría de los casos de interés práctico, el número de variables manejadas, es mayor de dos -- por lo que la representación y análisis geométricos no pueden efectuarse.

3.3.2 CONTINUIDAD DE UNA FUNCION

Aunque puede definirse la continuidad de una función en forma rigurosa, para los propósitos de este trabajo simplemente diremos que una función es continua en un punto dado, si esta función está definida en este punto. O dicho de otra forma: una función será continua si al evaluarse en un punto determinado adquiere un valor finito.

Gráficamente una función continua puede diferenciarse fácilmente de una discontinua por el hecho de que la primera puede trazarse en forma ininterrumpida en un intervalo dado. Ver figura (3.6).

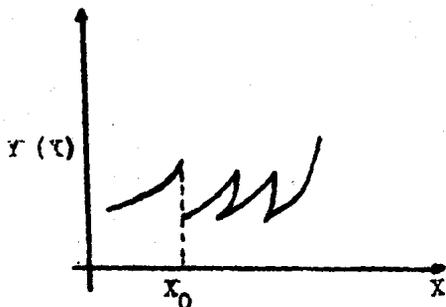


Fig. 3.6

Esta función es discontinua en x_0 .

La característica de continuidad es importante ya que como se sabe, toda función derivable es continua, y la derivada de una función, igualada a cero, será una condición necesaria para la existencia de un óptimo.

Otras clasificaciones útiles desde el punto de vista de la optimización son las siguientes:

- 1.- Funciones monotónicas. Una función $Y(x)$ que crece o decrece continuamente con un cambio en la (s) variable (s) independiente (s), es conocida como función monotónica.

2.- Funciones unimodales. Una función $Y(x)$ se denomina unimodal si presenta un solo "pico" o cima (máximo o mínimo) en un intervalo $X_1 X_2$. Figs. 3.7, 3.8

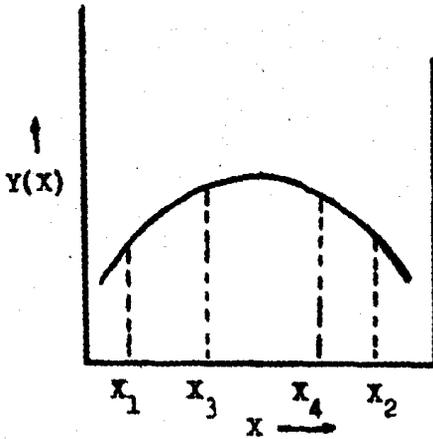


Fig. 3.7 Función Unimodal

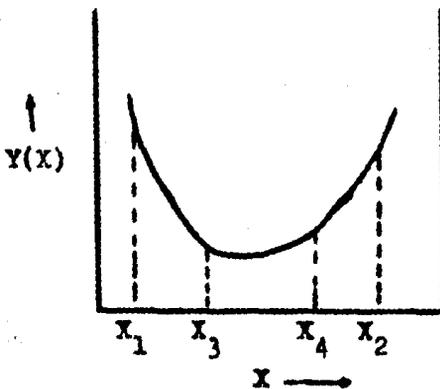


Fig. 3.8 Función Unimodal

3.- Funciones concavas y convexas. Se dice que una función es convexa si un valor interpolado (linealmente) en un punto X , entre X_1 y X_2 , nunca adquiere un valor menor que el valor exacto de la función. Contrariamente a lo anterior, una función será concava si para un valor interpolado (linealmente) y en un punto X , entre X_1 , X_2 , nunca es mayor que el valor real de la función (Figs 3.9 y 3.10).

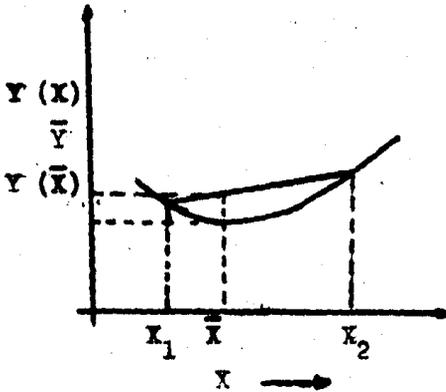


Fig. 3.9 Función convexa

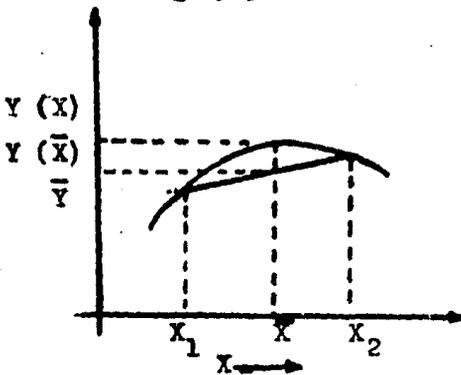


Fig. 3.10 Función concava

La figura 3.11 muestra el mismo concepto o caracterización extendido a dos dimensiones (región).

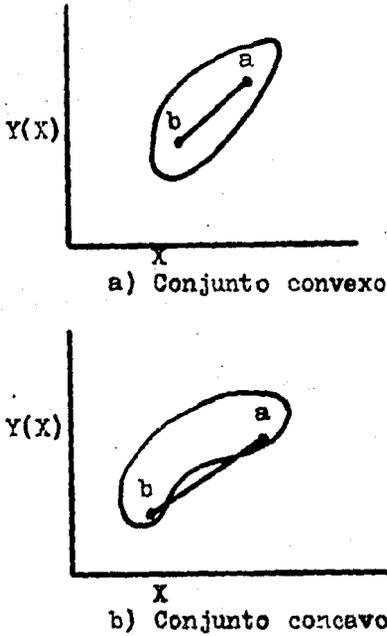


Fig. 3.11 Conjuntos concavos y convexos

3.4. REGION POSIBLE

La búsqueda del óptimo para un problema con restricciones debe realizarse en el interior de una región o a lo largo de unos límites fijados por las restricciones. A esta región se le conoce como región posible.

En este sentido, es necesario conocer la región posible o válida, ya que suele ocurrir que el máximo valor para una función objetivo, que represente una situación real no tenga ningún significado físico o requiera unas condi--

ciones inalcanzables: bien sea por consideraciones prácticas o económicas (Fig. 3.12)

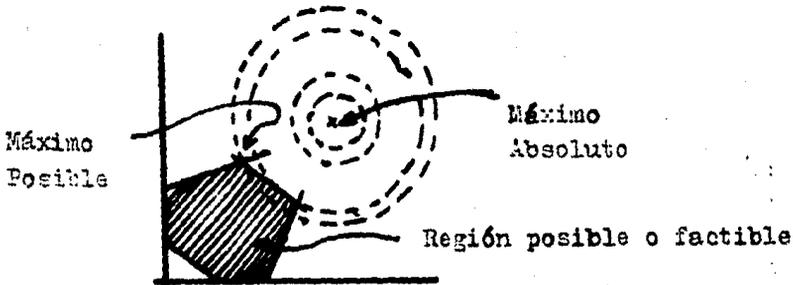


Fig. 3.12

3.4.1 OPTIMOS LOCALES Y GLOBALES.

De cálculo elemental se tiene que para que exista un máximo o mínimo de una función $V(X)$, es necesario que su derivada en el punto de interés sea igual a cero ($\frac{dy}{dx} = 0$). Sin embargo, una función como la que se representa en la figura 3.13, el término máximo puede resultar ambiguo. Para evitar esto y poder hablar con más precisión es necesario clasificar a los óptimos como locales y globales o absolutos. Para ello, se define un punto estacionario como aquel que cumple la condición necesaria.

$$\frac{dy}{dx_i} = 0 \quad i=1, 2, \dots, n$$

El tener un punto estacionario implicará contar con algún óptimo. Para el caso en que existan dos o más puntos estacionarios en un intervalo dado, el óptimo global será aquel que proporcione el máximo valor (o mínimo según sea el caso) de la función objetivo. Por ejemplo, en la figura 3.13 el punto A representa el máximo global y el punto B es un máximo local.

3.5 METODOS DE OPTIMIZACION

Una vez que se tiene bien delimitado el objetivo de un problema, se conocen a fondo las características y limitaciones y se cuenta con un modelo matemático que represente al sistema en cuestión en forma adecuada el siguiente paso a seguir para efectuar la optimización, es encontrar el algoritmo que ayude a encontrar la solución óptima de dicho problema.

El método concreto a utilizar en cada caso depende de varios factores entre los que se pueden anotar:

- a) Forma de la función objetivo (lineal, cuadrática, etc.)
- b) Forma de las restricciones (en forma de igualdades, desigualdades, lineales, etc.)
- c) Cantidades de variables a manejar,
- d) Características de la función (concava o convexa).

En el cuadro 3.1 presenta una clasificación de las técnicas de optimización dependiendo de éstos y otros factores.

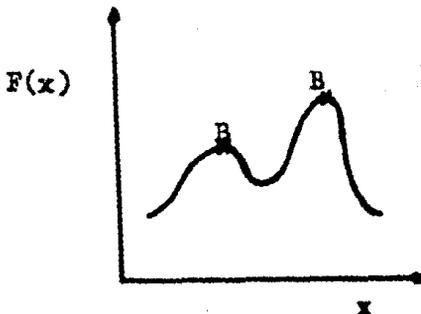


Figura 3.13

Técnicas	Problemas implícitos	Problemas explícitos	Una Variable	Multivariables	Sin Restricciones	Restricciones de Igualdad	Restricciones de Desigualdad	Función Obj. Lineal	Función Obj. Cuadrática	Función Obj. No Lineal	Restricciones Lineales	Restricciones No Lineales	Requieren Derivadas (Analíticas o Numéricas)	Solución Integral	0-1 Solución Integral	Solución General
Simplex	x	x		x		x	x	x			x					x
Simplex Modificado	x	x		x		x	x	x			x					x
Programación Integral	x	x		x		x	x	x			x			x		
Programación Binaria(0-1)	x	x		x		x	x	x			x				x	
Wolfe	x	x		x		x	x		x		x					x
Diferencial	x	x		x		x	x		x		x					x
Blau	x	x		x		x										x
P.D.* Discreta	x	x		x		x				x		x				x
P.D. Continua	x	x		x		x				x		x				x
Regresión Lineal	x	x		x	x											x
Gauss-Newton	x	x		x		x					x		x			x
Marquardt	x	x		x		x					x		x			x
Powell	x	x		x	x								x			x
Coggin	x	x	x		x					x						x
Fibonacci	x	x	x			x				x	x					x
Nelder-Mead	x	x		x	x					x						x
Hooke-Jeeves	x	x		x	x					x						x
Rosenbrock	x	x		x	x					x						x
Powell	x	x		x	x					x						x
Fletcher-Reeves	x	x		x	x					x			x			x
Fletcher-Powell	x	x		x	x					x			x			x
Metodo Box	x	x		x		x				x		x				x
Rosenbrock Restringido	x	x		x		x				x		x				x
Rosen	x	x		x		x				x	x		x			x
Fletcher-Powell Restringido	x	x		x		x	x			x		x	x			x

* P.D. = Programación Dinámica

Tabla 3.1 CLASIFICACION DE LAS TECNICAS DE OPTIMIZACION.

CAPITULO IV.

MÉTODOS UTILIZADOS PARA RESOLVER EL PROBLEMA.

En general, los métodos utilizados para la solución del problema de los sistemas de intercambio de calor son los métodos comunes de síntesis de procesos o una combinación de los mismos

Estos métodos son los siguientes:

1) Diseño Heurístico.

Este es un método de síntesis que se basa en el análisis de las alternativas desarrolladas en experiencias anteriores para situaciones similares y que permite la deducción de una serie de reglas empíricas o heurísticas, que de seguirse, conducirán a la selección de la mejor alternativa en todos los casos o en la mayoría de ellos.

Estas reglas ahorran gran cantidad de esfuerzo y dinero, sobre todo en las etapas iniciales del diseño de un proceso, donde resultaría incosteable optimizar las condiciones de diseño de cada una de las alternativas consideradas.

2) Diseño Evolutivo.

El diseño evolutivo consiste en proponer una configuración base y a partir del análisis de ésta, generar una

modificación con el objeto de reducir el efecto de la principal contribución al costo global del proceso. - Si dicha modificación tiene éxito, se aplica el método en forma recursiva, partiendo de la mejor configuración propuesta hasta el momento, y continuando hasta que no se encuentre ninguna modificación adicional que mejore la economía del proceso.

Este método tiene la ventaja de permitir la evaluación cualitativa del efecto de cada una de las modificaciones.

3) Diseño Algoritmico.

Los métodos agrupados bajo esta clasificación están basados en algoritmos matemáticos que permiten generar en forma exhaustiva todas las posibles alternativas y evaluarlas, explícita o implícitamente, para determinar cual es la óptima de acuerdo con una función previamente establecida. Estos métodos tienen la ventaja de garantizar que la configuración seleccionada, será la óptima, pero están limitados a la resolución de un número reducido de problemas cuyas posibles alternativas de configuración están perfectamente definidos. En algunos casos es posible reducir el número de alternativas mediante el uso inicial de reglas heurísticas.

Como ya se mencionó en la introducción, el creciente aumento de los costos de inversión aunado a la crisis energética

tica ocasionada por el embargo petrolero de Arabia y la dupli-
cación simultanea de los precios para el petróleo y el gas na-
tural en 1973, han motivado para que el problema de la sínte-
sis de redes de intercambio de calor reciba una atención espe-
cial por parte de los investigadores, principalmente en los -
últimos diez años.

En la tabla 4.1 se presenta un resumen de las estrategias-
seguidas en los últimos 15 años, junto con algunas de sus ca-
racterísticas principales, para la solución del problema de
síntesis de redes de intercambio de calor.

AUTOR	DIVISION DE CORRIENTES	MINIMO No. UNIDADES	ACERCAMIENTO MINIMO	MAYOR PROBLEMA RESUELTO	REQUIERE, PRO- GRAMA DE COMP.	TECNICA USADA
1.- HAW(1965)	NO	NO	--	--	SI	PROGRAMACION SEPARABLE
2.- KESLER Y PAR- KER (1969)	NO	NO	NO	6 CORRIENTES	SI	PROGRAMACION LINEAL
3.- MASSO Y RUDD (1969)	NO	NO	NO	7 CORRIENTES	SI	ESTRUCTURA HEURISTICA
4.- LEE Y et. al. (1970)	NO	NO	NO	7 CORRIENTES	SI	ALGORITMICA
5.- KOBAYASHI Y et. al. (1971)	SI	NO	NO	7 CORRIENTES	SI	PROGRAMACION LINEAL
6.- NISHIDA Y et. al. (1971)	SI	NO	NO	9 CORRIENTES	SI	ALGORITMICA
7.- MEZIES Y JOHN- SON	NO	NO	NO	9 CORRIENTES	SI	ALGORITMICO- HEURISTICO
8.- FHO Y LAIDUS (1973)	NO	NO	NO	10 CORRIENTES	SI	ALGORITMICA
9.- SIAROLA (1974)	NO	NO	--	13 CORRIENTES	SI	ALGORITMICA
10.- TONTON Y DO- NALSON (1974)	NO	NO	NO	10 CORRIENTES	SI	ALGORITMICO- HEURISTICO
11.- RANTHORE Y PO- LARE (1975)	NO	NO	NO	4 CORRIENTES	SI	ALGORITMICO
12.- SHIH Y LESGER- BARR (1975)	SI	NO	--	6 CORRIENTES	SI	HEURISTICO- EVOLUTIVO

TABLA 4.1 RESUMEN DE TRABAJOS SOBRE SINTESIS DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR

AUTOR	DIVISION DE CORRIENTES	MINIMO No. UNIDADES	ACERCAMIENTO MINIMO	MAYOR PROBLEMA RESUELTO	REQUIERE PRO- GRAMA DE COMP.	TECNICA USADA
13.- HOMMANN (1976)	SI	SI	SI	8 CORRIENTES	SI	HEURISTICA- ALGORITMICA
14.- LINNHOFF Y WER (1978)	NO	NO	SI	10 CORRIENTES	NO	EVOLUTIVA
15.- LINNHOFF Y WER (1978)	NO	SI	SI	10 CORRIENTES	NO	HEURISTICO
16.- RACHAVAN (19)	SI	SI	SI	10 CORRIENTES	SI	ALGORITMICA
17.- NISHIDA Y et. al. (1977)	SI	SI	SI	10 CORRIENTES	NO	ALGORITMICO EVOLUTIVA
18.- CERDA (1982)	SI	--	SI	10 CORRIENTES	SI	PROGRAMACION LINEAL
19.- LINNHOFF Y HINDMARSH (1982)	SI	SI	SI	10 CORRIENTES	NO	EVOLUTIVO

TABLA 4.1 CONTINUA

AUTOR	DIVISION DE CORRIENTES	MINIMO No. UNIDADES	ACERCAMIENTO MINIMO	MAYOR PROBLEMA RESUELTOS	REQUIERE PROGRAMA DE COMP.	TECNICA USADA
13.- HOMMANN (1976)	SI	SI	SI	8 CORRIENTES	SI	HEURISTICA-ALGORITMICA
14.- LINNHOFF Y WER (1978)	NO	NO	SI	10 CORRIENTES	NO	EVOLUTIVA
15.- LINNHOFF Y WER (1978)	NO	SI	SI	10 CORRIENTES	NO	HEURISTICO
16.- RAGHAVAN (19)	SI	SI	SI	10 CORRIENTES	SI	ALGORITMICA
17.- NISHIDA Y et. al. (1977)	SI	SI	SI	10 CORRIENTES	NO	ALGORITMICO EVOLUTIVA
18.- CERDA (1982)	SI	--	SI	10 CORRIENTES	SI	PROGRAMACION LINEAL
19.- LINNHOFF Y HINDMARSH (1982)	SI	SI	SI	10 CORRIENTES	NO	EVOLUTIVO

TABLA 4.1 CONTINUA

En este trabajo se presentan los métodos de síntesis y optimización de redes de intercambio de calor que mayor aceptación han tenido.

Estos métodos son:

- 1) Algoritmo del Area Mínima.
- 2) Método de Intervalo de Temperatura.
- 3) Método Termodinámico Combinatorio.
- 4) Método del Pliegue.

4.1.- Algoritmo del Area Mínima.

El método de área mínima es un método algorítmico evolutivo para la síntesis de redes de intercambio de calor de costo mínimo. Fue propuesto inicialmente por N. Nishida, S. Kobayashi y A. Ichikawa en 1971 y complementado por N. Nishida, A. Liu y León Lapius en 1977.

El planteamiento del problema hecho por estos autores lo mismo que las consideraciones y simplificaciones utilizadas, son similares a las propuestas en el planteamiento del problema dado en el capítulo III.

El principio general en que se basa el método, es el de suponer que una red de intercambio óptima será aquella para la cual el área total de transferencia de calor sea mínima. Dado que el costo total de una red

depende de el costo total de inversión más el costo total de los servicios requeridos, para construir la red óptima será necesario:

-Diseñar la red de forma tal que logre la mayor utilización posible de la carga térmica disponible (corrientes de proceso). Reduciéndose así los gastos de servicio.

-Diseñar la red, buscando que el número total de unidades sea el mínimo posible, reduciéndose así, los costos de inversión.

Esta última idea la ilustran los autores de la siguiente forma:

Dada la fórmula para el costo de un intercambiador de calor

$$C_i = a_i^b \quad \text{--- 4.1}$$

Donde b se toma como 0.6 en la mayoría de los casos, para una serie de M intercambiadores se tiene:

$$a (A_1^b + A_2^b + \dots + A_M^b) \cong a (A_1 + A_2 + \dots + A_M)^b \quad \text{--- 4.2}$$

ó también

$$a (A_1^b + A_2^b + \dots + A_M^b) \cong a (A_1 + A_2 + A_3)^b + (A_4 + A_5)^b + \dots + (A_{i-1} + \dots + A_M)^b \quad \text{--- 4.3}$$

Lo anterior sugiere que el costo de una red, se reduce cuando el número total de unidades se reduce.

El algoritmo general se puede dividir en dos etapas:

1. Creación de una red inicial mediante el uso sistemático de un diagrama de contenido de calor.
2. Mejorar la red propuesta mediante una serie de reglas evolutivas encaminadas a dar una red cercana a la óptima.

Para iniciar el algoritmo del área mínima lo primero que se tiene que hacer es construir un diagrama de contenido de calor. Este diagrama es la representación, mediante bloques, de la cantidad relativa de calor que debe transferir una corriente. El diagrama consiste en unos ejes cartesianos formados por dos cuadrantes, en las ordenadas de los ejes se representan las temperaturas de entrada o salida de las corrientes de proceso y en las abscisas se representan los flujos de capacidad calorífica ($M C_p$). De esta forma, en la parte superior del diagrama se representan los bloques de las corrientes calientes y en la parte inferior frías, las corrientes auxiliares (vapor - agua de enfriamiento), se representan por un punto que se localiza en el diagrama de acuerdo con la temperatura de entrada al sistema.

A continuación se sintetiza una red inicial usando el diagrama de contenido de calor de la siguiente forma:

- a) El intercambio de calor entre las corrientes de proceso frías y calientes, se indica asignándoles una misma letra o número (esto indica un intercambiador de calor)

- b) La división horizontal de un bloque presenta intercambio de calor múltiple (con más de una corriente), y la división vertical representa la división de corrientes
- c) Cuando haya dos bloques con un mismo nivel de temperaturas haga una división horizontal formando un nuevo bloque e ignorando la configuración original.
- d) Los bloques fríos y calientes (corrientes de proceso), incluyendo los servicios, se combinan en orden decreciente de sus temperaturas.

De esta forma, las combinaciones tienen que:

- la corriente caliente con mayor temperatura se combina con la corriente fría de mayor temperatura final.
- Las corrientes calientes con temperaturas iniciales-intermedias deben ser combinadas con corrientes frías con temperaturas de salida intermedias.
- La corriente caliente con temperatura de suministro menor se combina con la corriente fría que tiene la temperatura final más baja.

La temperatura de salida de un bloque caliente (i) nunca debe ser menor que la temperatura de entrada del bloque caliente ($i + 1$). Análogamente la temperatura de entrada de un bloque frío (J), nunca debe ser menor que la temperatura de salida del bloque frío siguiente ($J+1$).

- e) La máxima cantidad de calor intercambiado entre corrientes de proceso, se determina en base al mínimo acercamiento permitido en los intercambiadores (diferencia entre la temperatura de salida de una corriente y la temperatura de entrada de la otra corriente). En este método el mínimo acercamiento permitido es de 20° F.

SEA:

T_{ck} = La temperatura de entrada más baja para bloques fríos.

T_{hk} = La temperatura de salida mas baja para los bloques calientes.

ΔT_m = Mínimo acercamiento de temperatura permitido.

T_{hk} = La temperatura de entrada más alta para los bloques calientes.

T_{ck} = La Temperatura de salida más alta para los bloques fríos.

SI $T_{ck} + \Delta T_m < T_{hk}$ Elimine la porción del bloque (A) caliente que se encuentre por debajo de la temperatura $T_{ck} + \Delta T_m$.

SI $T_{hk} - \Delta T_m < T_{ck}$ Elimine la porción del bloque frío arriba de la temperatura $T_{hk} + \Delta T_m$.

f) Posteriormente, una vez que todos los bloques han sido combinados, se comparan las cantidades de calor residuales de cada grupo de bloques a fin de utilizar los servicios auxiliares necesarios para obtener las temperaturas finales deseadas, de acuerdo al siguiente criterio.

SI $Q_c > Q_H$ (Mayor carga térmica en las corrientes frías).

$\Delta Q = Q_c - Q_H$ Será la cantidad de calor que deberá cubrirse con vapor (calentamiento) y viceversa.

DONDE

Q_c = Carga de calor residual de corrientes frías.

Q_H = Carga de calor residual de corrientes calientes.

Utilizando el diagrama de contenido de calor tal como se indicó anteriormente, se construye una red inicial, el siguiente paso consiste en proponer modificaciones tendientes a mejorar esta red. Esto se logra aplicando las siguientes reglas evolutivas:

1. Compare el área de los bloques resultantes y elimine aquel que tenga la menor área (esto equivale a eliminar, el intercambiador con la menor cantidad de calor intercambiadas).

2. Si la red resultante contiene una red interna (subred) en la que una corriente caliente (o fría) intercambia calor, se combina en más de una ocasión con una corriente fría (o caliente). Elimine una de estas dos combinaciones.
3. Reemplace una corriente dividida por una corriente única, (no dividida) acomodando los intercambiadores en orden de creciente de su promedio aritmético de temperaturas.

De esta forma, el procedimiento general para construir una red cercana a la óptima es el siguiente:

ETAPA 1: Construir el diagrama de contenido de calor del problema.

ETAPA 2: Tomando como base las cargas térmicas totales y los acercamientos recomendados, determinar la máxima cantidad de calor que puede intercambiarse por las corrientes de proceso y a su vez encontrar los requerimientos de servicios auxiliares.

ETAPA 3: Dividir horizontalmente los bloques que tengan un mismo nivel de temperaturas.

ETAPA 4: Cuando un bloque cualquiera (frío o caliente) está formado por varios bloques al combinarse con otro bloque cualquiera (frío o caliente), este último debe dividirse verticalmente.

ETAPA 5: Construir una red inicial.

ETAPA 6: Aplicar las reglas evolutivas para intentar mejorar esta red inicial.

NOTA: La aplicación de la primera regla evolutiva siempre produce redes de bajo costo.

-Se ha observado que es más conveniente aplicar la primera regla junto con las etapas 3 y 4 del algoritmo.

A fin de ilustrar la forma en que aplica el método, considere el siguiente problema formado por cuatro corrientes - de proceso (problema 45 P1).

PROBLEMA 45P1

<u>CORRIENTE</u>	<u>FLUJO DE CAPACIDAD CALORIFICA</u>	<u>TEMPERATURA ENTRADA (°F)</u>	<u>TEMPERATURA SALIDA (°F)</u>
FRIA 1 (SC1)	14,450.1	140	320
FRIA 2 (SC2)	11,530.0	240	500
CALIENTE 1 (SH1)	16,666.8	320	200
CALIENTE 2 (SH2)	20,000.0	480	280

OTROS DATOS USADOS EN LA SOLUCION DEL PROBLEMA SON LOS SIGUIENTES:

COSTOS

PARAMETRO $a = 350$ $b = 0.6$
 DEPRECIACION ANUAL = 0.1
 AGUA DE ENFRIAMIENTO = 5×10^4 DOLARES/LIBRA
 VAPOR = 1×10^6 DOLARES/LIBRA ϕ_1

CARACTERISTICAS DE SERVICIOS.

1) VAPOR:

PRESION ... 925 PSIA
 TEMPERATURA 530 ° F
 CALOR LATENTE 656.6 BTU/LB

2) AGUA DE ENFRIAMIENTO

TEMPERATURA 100° F
 CAPACIDAD CALORIFICA 1.0 BTU/LB °F

MAXIMOS ACERCAMIENTOS PERMITIDOS

INTERCAMBIADORES	20° F
CALENTADORES CON VAPOR	25° F
ENFRIADORES CON AGUA	20° F

COEFICINETE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

INTERCAMBIADORES	150 BTU/HR FT	OF
CALENTADORES DE VAPOR	200 BTU/HR FT	OF
ENFRIADORES CON AGUA	150 BTU/HR FT	OF

TIEMPO MUERTO DE LOS EQUIPOS: 380 HORAS/AÑO.

*1 ESTOS PRECIOS CORRESPONDEN A JUNIO DE 1977.

NOTA: Los costos totales reportados para las redes resultan tanto en este método como en los siguientes, serán, por cuestiones de la naturaleza cambiante en el tipo de cambio o paridad de nuestra moneda frente al dolar, - puestos en dolares. Para obtener el costo actual en moneda nacional se puede utilizar la siguiente formula de escalación

$$C_2 = C_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^x \text{ FA}$$

Donde: Costo actual en Moneda Nacional

C_1 = Costo en el año base en Dolares

I_1 = Índice para el año base

I_2 = Índice actual

PA = Paridad a la fecha

Los índices a los que se hace referencia son los publicados en revistas especializadas de USA o bien, a los índices de precios publicados por el Banco de México, teniendo cuidado que el año de referencia para ambos índices sea el mismo.

Esto se hace porque el costo reportado se utiliza aquí como mera referencia de comparación entre diferentes estructuras propuestas para un mismo método.

DESARROLLO DEL METODO.

ETAPA 1 CONSTRUCCION DEL DIAGRAMA DE CONTENIDO DE CALOR (FIG 4.1)

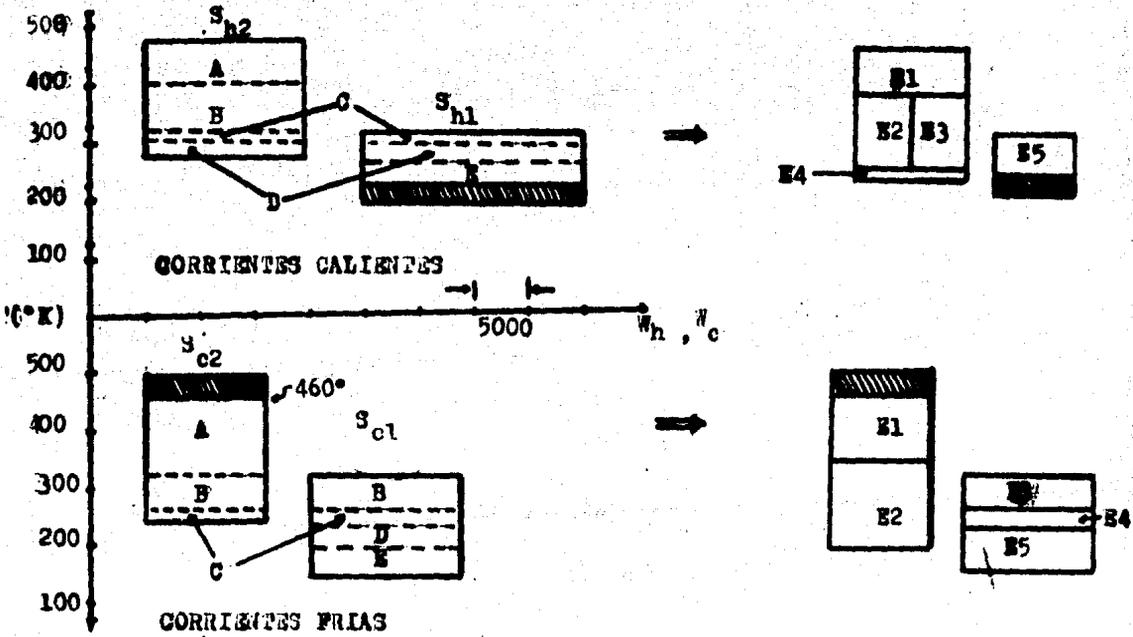


Fig. 4.1 Diagrama de Contenido de Calor

ETAPA 2: Obtención de máxima cantidad de calor que puede transferirse por las corrientes de proceso.

Q_H = Carga térmica total de las corrientes calientes.

Q_C = Carga térmica total de las corrientes frías.

$$Q_H = 6 \times 10^6 \text{ Btu/hr}$$

$$Q_C = 5.69 \times 10^5 \text{ Btu/hr}$$

Como $Q_H > Q_C$ corrientes frías pueden ser calentadas hasta una temperatura $T = T_{hk} - \Delta T_m$ $T = 480 - 20$ $T = 460^\circ \text{ F}$.

El área del bloque Sh_2 por encima de 460° (sombreado) representa la cantidad de calor que deberá proporcionarse en un calentador auxiliar (ver fig. 4.1).

A continuación se combinan los bloques en forma decreciente de sus temperaturas. Esto produce las 5 combinaciones, mostradas en la figura 1 y que se denotan por A, B, C, D y E, respectivamente.

ETAPA 3: Se efectúan las divisiones horizontales de los bloques que tienen un mismo nivel de temperaturas, que en las corrientes calientes se presenta con los bloques C y D

ETAPA 4: El bloque B de la corriente Sh_2 , que se combina con las dos corrientes frías, es dividido verticalmente. (lo que origina una división de la corriente Sh_2).

Ahora bien dado que el bloque C (de Sh_2) es el más pequeño de la red, aplicando la regla 1, se suprime este bloque y se forma un nuevo bloque $B^1 = B + C$ que se etiqueta como E_2 y E_3 . Los bloques restantes A, D y E se reetiquetan como E_1 , E_4 , y E_5 respectivamente, tal como se encuentra en la fig. 4.1

La red inicial resultante junto con las temperaturas a la salida de cada intercambiador se muestra en la figura 4.2.

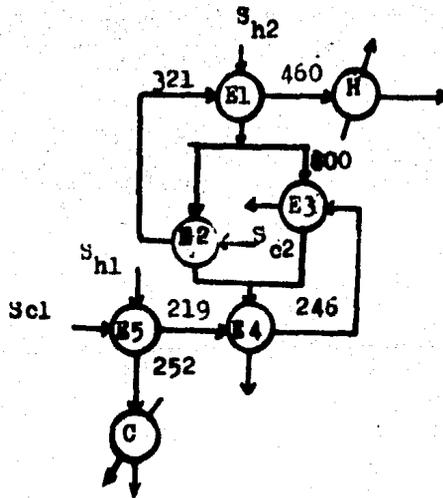


Fig. 4.2 Red Inicial

El costo total de esta red es de: \$14,025/año.

- E_1, E_2, \dots, E_5 representan los intercambiadores de la red
- C representa un enfriador que utiliza agua.
- H representa un calentador con vapor.

Esta red inicial puede modificarse al aplicar sucesivamente las reglas evolutivas.

En la figura 4.1 puede observarse que el área correspondiente al bloque E_4 es la más pequeña, por lo que se puede aplicar la regla 1 y eliminar el intercambiador formado por esta combinación. Esto trae como consecuencia un aumento en el calor intercambiado en E_2 y E_3 . La red modificada se muestra en la Figura 4.3

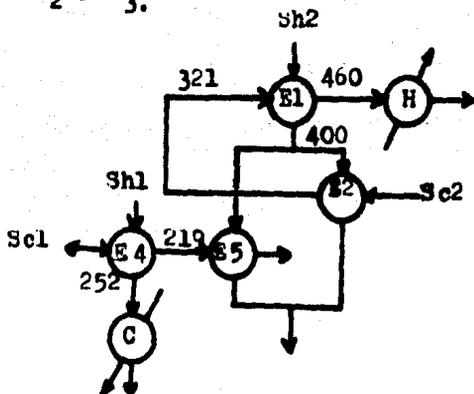


Fig. 4.3

El costo de esta red es de: \$13,833/año.

Esta red puede ser mejorada aplicando las reglas 2 y 3.

La red resultante contiene una red interna en la que la corriente fría Sc_2 intercambia calor con la corriente caliente Sh_2 en dos ocasiones (E_2 y E_1) por lo que aplicando la regla 2 puede eliminarse una de estas combinaciones. El resultado se muestra en la fig. 4.4

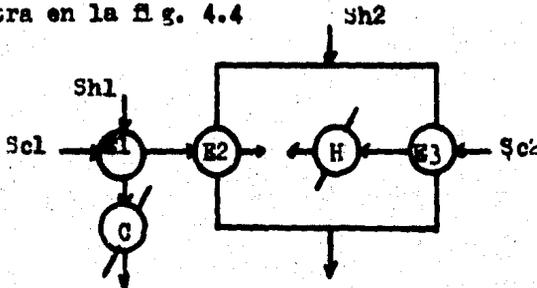


Fig. 4.4

Finalmente la corriente dividida Sh_2 puede transformarse en una corriente no dividida usando la regla 3. Esto nos lleva a la red mostrada en la figura 4.5

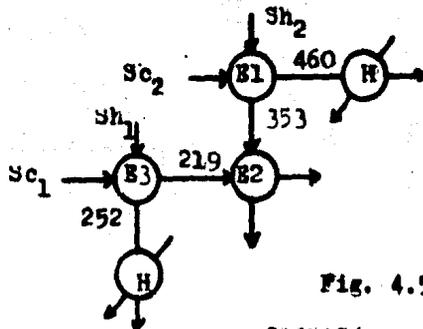


Fig. 4.5

El costo de esta red es de 11,3519/e. y resulta ser la red más simple y de menor costo (ya que no hay modificación que disminuya el costo) por lo que será la red óptima.

4.2.- METODO DEL INTERVALO DE TEMPERATURAS.(TI)

Este método fue desarrollado en 1978 por B. Linnhoff y -- J.R. Flower . el método resuelve el problema generando redes para las cuales se logra una máxima de recuperación de calor.

El problema es descompuesto en subredes en las cuales hay requerimientos de calentamiento y enfriamiento de las corrientes frías y calientes de proceso. La combinación de estas subredes se efectua de acuerdo a las siguiente etapas.

1. Clasificación de las corrientes calientes y frías en orden decreciente de las velocidades de flujo de capacidad calorífica.

El propósito de esta etapa es determinar secuencia de combinación preferenciales.

2. Determinación de intervalos de temperatura de las subredes para las corrientes frías y calientes.

El objetivo de esta etapa es descomponer el problema de síntesis en subproblemas. Las corrientes en una subred se encuentran en el mismo intervalo de temperaturas.

3. Combinación de los requerimientos de calentamiento y enfriamiento subred por subred. Después que todas las posibles combinaciones son llevadas a cabo en las subredes. Los requerimientos de enfriamiento y calenta--

miento restantes se tratan de cubrir mediante la combinación entre subredes.

Finalmente los requerimientos de calentamiento y/o enfriamiento residuales son cubiertos por servicios auxiliares.

Los detalles de cada una de estas etapas se dan a continuación.

-Determinación de intervalos de temperaturas.

Para las corrientes calientes se determinan por dos temperaturas consecutivas de la cadena formada por las temperaturas de suministro y objetivo de las corrientes frías incrementadas por el mínimo acercamiento de temperatura permitida en la red.

Si en la cadena hay temperaturas mayores que la más alta-temperatura de suministro de las corrientes calientes son reemplazadas por esta. Si hay temperaturas más bajas que la temperatura objetivo menor de las corrientes calientes, estas deben ser reemplazadas por esta última.

Para las corrientes frías, los intervalos de temperatura se determinan por dos temperaturas consecutivas de la cadena formada por las temperaturas de suministro y objetivo de las corrientes calientes reducidas por el mínimo acercamiento de temperatura.

Si en la cadena, hay temperaturas más altas que la temperatura objetivo mayor de las corrientes frías, estas son reemplazadas por esta última.

-El procedimiento de combinación de corrientes, en una subred, es el siguiente:

- a) Selección de las corrientes a combinarse. Esto se hace, tomando las corrientes frías y calientes con mayor contenido calorífico por separado. Al menos una de estas debe ser la primera en combinar. Si ninguna de las dos corrientes seleccionadas es primera corriente de combinación, cambiar una de ellas, de preferencia la corriente con la capacidad calorífica mayor.

La condición anterior, se requiere para generar la mínima diferencia de temperaturas a través de todos los intercambiadores de calor.

- b) Efectuar la combinación entre las corrientes y obtener el calor asociado a dicha combinación.

El calor de la combinación se obtiene de la forma siguiente:

$$1) \Delta T: \quad \Delta T = \text{Min} (Q_H / M c p_H, Q_c / M c p_c)$$

$$2) Q: \quad Q = M c p \Delta T \text{ con } M c p = \text{min} (M c p_H, M c p_c)$$

- c) Determine un orden secuencial para la siguiente combinación. Cuando se combina una corriente, el primer intercambiador de calor es localizado en el lado caliente de la subred; el segundo intercambiador sobre la misma corriente caliente, debe ser localizado sobre el lado derecho, cerca del lado frío de la subred. Cuando se combina una corriente fría de la subred, el segundo intercambiador de calor sobre la misma corriente fría, es localizado en el lado izquierdo, cerca del lado caliente de la subred.

El colocar los intercambiadores de esta forma asegura la mínima diferencia de temperaturas, además de evitar que una corriente se combine más de una vez.

El procedimiento se realiza hasta que ya no existan más combinaciones posibles en la subred. Los requerimientos de calentamiento o enfriamiento residuales se cubrirán mediante la combinación entre subredes.

-El procedimiento a seguir para realizar las combinaciones entre las subredes es el siguiente:

- a) Combinar los requerimientos de enfriamiento restantes en la subred K ($K=1, 2, 3, \dots$) con los requerimientos de calentamiento restantes, acumulados en la subred $K+1$. La combinación se realiza empezando con la última subred, a partir del lado frío de la subred.

Análogamente los requerimientos de calentamiento se combinan con los requerimientos de enfriamiento residuales de la subred $K-1$, continuando el procedimiento hasta la

subred 1.

El procedimiento de combinación es similar al seguido en la combinación en las subredes. Salvo que en este caso, el calor de la combinación está dado por

$$Q = \text{Min} (Q_H, Q_C)$$

Una vez que se han combinado las subredes entre sí, los requerimientos restantes de calor (enfriamiento o calentamiento) se cubren con servicios auxiliares.

Para ilustrar el método considere el problema 4SP2; mostrado en la tabla 4.2

TABLA 4.2 DATOS PARA EL PROBLEMA 4SP2

<u>CORRIENTE</u>	<u>FLUJO DE CAPACIDAD CALORIFICA (KW °C)</u>	<u>TEMPERATURA ENTRADA(°C)</u>	<u>TEMPERATURA SALIDA (°C)</u>
Fria 1	3.0	60	180
Fria 2	2.6	30	105
Caliente 1	2.0	180	45
Caliente 2	4.0	150	40

I - DETERMINACION DE LOS INTERVALOS DE TEMPERATURA

-Temperaturas de las corrientes calientes: 180 - 150 - 40

- Temperaturas para las corrientes frías: 180 - 105 - 60 - 30

Temperaturas de las corrientes frías incrementadas por ΔT_{min} (10°C) 190 - 115 - 70 - 40

Temperaturas de las corrientes calientes disminuidas por ΔT_{min} (10°C) 170 - 140 - 30

De esta forma la cadena de temperaturas para las corrientes calientes es: 190 - 180 - 150 - 115 - 70 - 40.

La cadena de temperaturas para las corrientes frías es 180 - 170 - 140 - 105 - 60 - 30.

Como la primera temperatura (190) es mayor que la temperatura de suministro, más la de las corrientes calientes (180) aquella es reemplazada por esta última.

Con estas cadenas de temperaturas, se tienen los sig. intervalos:

INTERVALO	SUBRED	INTERVALO	SUBRED
180 - 180	H_1	180 - 170	C_1
180 - 150	H_2	170 - 140	C_2
150 - 115	H_3	140 - 105	C_3
115 - 70	H_4	105 - 60	C_4
70 - 40	H_5	60 - 30	C_5

Estos intervalos de temperatura y subredes, se presentan por medio de las Figuras 4.6 y 4.7.

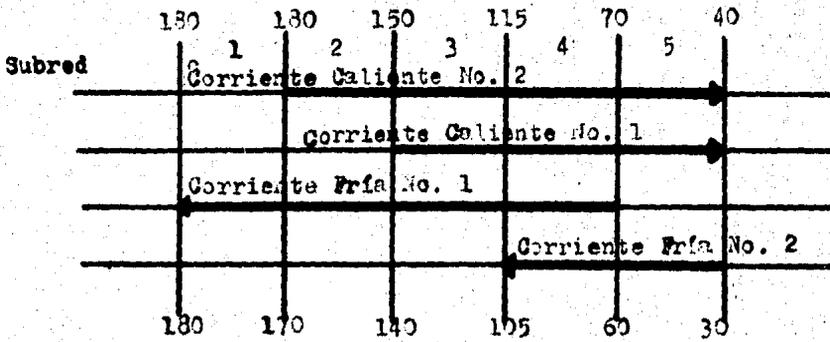


Fig. 3.6 Intervalos de Temperatura para las Subredes (°C)

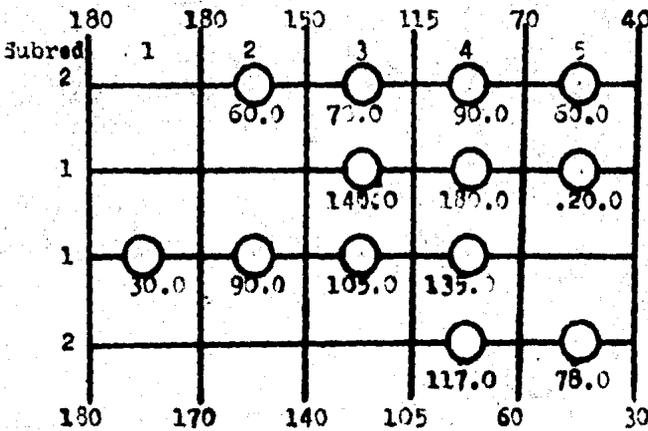


Fig. 4.7 Cambio de contenido calorífico de corrientes a través de las subredes (KW)

Las cantidades bajo los círculos de cada intervalo (Fig. 4.7) representan las cantidades de calor intercambiadas por las corrientes a su paso por la subred, obtenidas a partir de la relación $Q=MCp \Delta T$

El siguiente paso es realizar las combinaciones de las corrientes en las subredes ya definidas.

A fin de ilustrar el procedimiento en forma gráfica, considere la subred 4 (Fig. 4.8)

- a) Combinar primero las corrientes con mayor contenido calórico en esta caso será la corriente caliente 1 (Q=180).

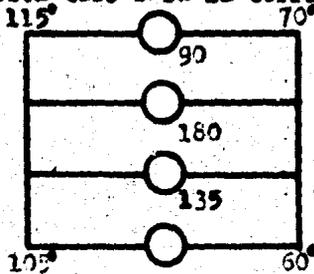
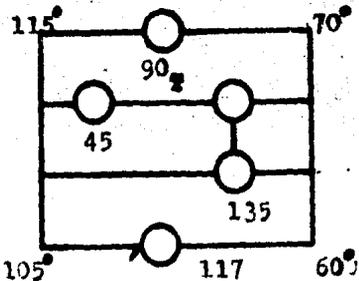


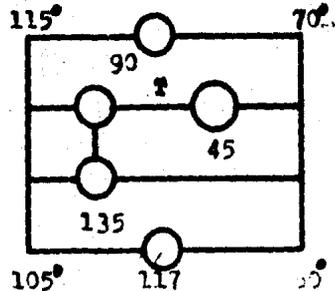
Fig. 4.8 Subred 4

- b) Efectuar combinaciones.

En la Fig 4.9 se muestran las combinaciones para esta subred.



- a) Estructura no factible después de la primera combinación $T = 103.75$



- b) Estructura factible después de la primera combinación $T = 81.25^\circ \text{ C}$.

Fig. 4.9 Combinaciones para la Subred 4

Una vez ejemplificado el mecanismo de combinación de corrientes en una subred, éste se aplicará para todas las subredes.

La tabla 4.3 muestra un resumen de los datos por subred para el problema.

TABLA 4.3 DATOS POR SUBRED PARA EL PROBLEMA 4SP2

<u>CORRIENTE</u>	<u>VELOCIDAD DE FLUJO DE CAPACIDAD CALORIFICA</u>	<u>CONTENIDO CALORIFICO (KW) EN SUBREDES</u>				
Caliente 2	2.0	0	60	70	90	60
Caliente 1	4.0	0	0	140	180	120
Fria 1	3.0	30	90	105	135	0
Fria 2	2.6	0	0	0	117	78

SUBRED 5

Primera combinación : Caliente 1 - Fria 2

$$AT = \min (12014, 7812.6) = 30$$

$$Q = \min (30 \times 4, 30 \times 2.6) = 78$$

		CONTENIDO DE CALOR REMANENTE		
		PREVIO	COMBINADO	BALANCE
Caliente 2		60	—	60
Caliente 1		120	78	42
Fria 1	1	0	—	0
Fria 2	2	78	78	0

Segunda combinación: Debido a que no hay requerimientos de calentamiento, no es posible realizar más combinaciones.

SUBRED 4

Primera combinación: Caliente 1 - Fría 1

$$\Delta t = \min (180/40, 135/3) = 45$$

$$Q = \min (45 \times 4, 45 \times 3) = 135$$

CONTENIDO DE CALOR REMANENTE

		PREVIO	COMBINADO	BALANCE
Caliente 2		90	—	90
Caliente 1		180	135	45
Fría 1	1	135	135	0
Fría 2	2	117	—	117

Segunda combinación: Caliente 2 - Fría 2

$$\Delta t = \min (90/2, 117/2.6) = 45$$

$$Q = \min (45 \times 2, 45 \times 2.6) = 90$$

-Este intercambiador se coloca a la izquierda del sintetizado anteriormente.

CONTENIDO DE CALOR REMANENTE

		PREVIO	COMBINADO	BALANCE
Caliente 2		90	90	0
Caliente 1		45	—	45
Fría 1	1	0	—	0
Fría 2	2	117	90	27

Tercera combinación: Las corrientes caliente 1 y Fría 2 - (que no han cubierto sus necesidades de combinación) no pueden ser combinadas ya que ninguna de estas dos es una primera corriente de combinación (tienen los flujo de capacidad calorífica menores).

Combinación entre subredes: Aunque ya se realizaron las - combinaciones entre las corrientes en dos subredes (4 y 5) , no existe una combinación factible entre estas debido a que no hay requerimientos de calentamiento residual en la subred 5 y la corriente fría con requerimientos de calor de la subred 4 tiene una temperatura superior a las de las corrientes calientes con requerimientos de enfriamiento de la subred 5.

CONTENIDO DE CALOR RESIDUAL ACUMULADO (SUBREDES 4 Y 5)

CORRIENTES	BALANCE
Caliente 2	60
Caliente 1	87
Fría 1	0
Fría 2	27

SUBRED 3

Primera combinación: Caliente 1 - Fría 1

$$\Delta t = \min (140/4, 105/3) = 35$$

$$Q = \min (35 \times 4, 35 \times 3) = 105$$

CONTENIDO DE CALOR REMANENTE

CORRIENTE	PREVIO	COMBINADO	BALANCE
Caliente 2	70	—	70
Caliente 1	140	105	35
Fría 1	105	105	0
Fría 2	0	—	0

Segunda combinación: Como no hay requerimientos de calentamiento, no es posible otra combinación.

COMBINACION ENTRE SUBREDES

Primera combinación: Caliente 2 (Subred 3) - Fría 2 (Subred 4).

$$Q = \min(70, 27) = 27$$

-Este intercambiador está localizado entre los intercambiadores sintetizados en la subred 4 y en la subred 3.

CONTENIDO DE CALOR REMANENTE

CORRIENTE	PREVIO	DISPONIBLE	COMBINADO	BALANCE
Caliente 2	70	—	27	43
Caliente 1	35	—	—	35
Fría 1	0	0	—	0
Fría 2	0	27	27	0

Segunda combinación: Como no se requiere calentamiento extra, esta etapa termina.

CONTENIDO DE CALOR RESIDUAL ACUMULADO

CORRIENTE	PREVIO	BALANCE	ACUMULACION
		SUBRED 3	
Caliente 2	60	43	103
Caliente 1	87	35	122
Fría 1	—	0	0
Fría 2	—	0	0

SUBRED 2

Primera combinación: Caliente 2 - Fría 1

$$\Delta t = \min(60/2, 90/3) = 30$$

Q = 60

CONTENIDO DE CALOR REMANENTE

CORRIENTE	PREVIO	COMBINADO	BALANCE
Caliente 2	60	60	0
Caliente 1	0	—	0
Fría 1	90	60	30
Fría 2	0	—	0

-No hay una segunda combinación en la red, tampoco hay combinación posible entre subredes.

CALOR RESIDUAL ACUMULADO

CORRIENTE	ACUMULADO PREVIAMENTE	BALANCE SUBRED 2	BALANCE ACUMULADO
Caliente 2	103	0	103
Caliente 1	122	0	122
Fría 1	0	30	30
Fría 2	0	0	0

SUBRED 1

Primera combinación: No hay combinaciones posibles (sólo está la corriente fría 1).

Combinaciones entre subredes: ninguna.

CORRIENTE	CALOR RESIDUAL TOTAL A ACUMULADO		BALANCE ACUMULADO
	ACUMULADO PREVIAMENTE	BALANCE SUBRED 1	
Caliente 2	103	0	103
Caliente 1	122	0	122

.../

...Continuación

Fria	1	30	30	60
Fria	2	0	0	0

III. COMBINACIONES CON SERVICIOS AUXILIARES

1. Enfriamiento

Corriente Caliente	Carga requerida de enfriamiento
2	103
1	122

2. Calentamiento

Corriente Fria	Carga de Calor
1	60

Tomando en cuenta, estos servicios, obtenemos la sig. red:

INTERCAMBIADOR DE CALOR	CARGA DE CALOR	CORRIENTES	
		FRIA	CAIENTE
1	78	2	1
2	135	1	1
3	90	2	1
4	27	2	2
5	105	1	1
6	60	1	2

De esta forma la estructura sintetizada es la siguiente.
(Fig. 4.10).

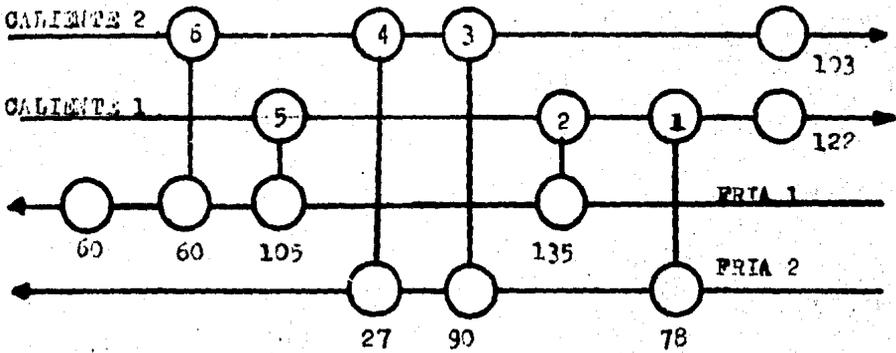


Fig. 4.10 Estructura final

Lo que equivale a la siguiente red (Fig. 4.11).

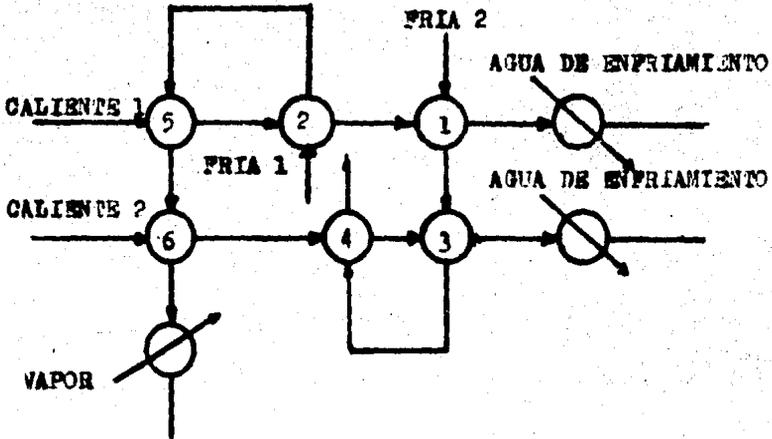


Fig. 4.11 Red sintetizada con el método TI para el problema 4SP2.

4.3 METODO TERMODINAMICO COMBINATORIO (TC).

Este método también fue desarrollado por John R. Flower y Bodo Linnhoff. El método permite sintetizar en forma sencilla redes de intercambio de calor sujetas a las siguientes restricciones.

- 1) Máxima recuperación de energía.
- 2) Mínimo número de unidades.
- 3) No utilizan división de corrientes.

El método en general, considera la naturaleza combinatoria del problema y propone argumentos termodinámicos y topológicos para reducir el tamaño del mismo a fin de evaluar sólo las alternativas más promisorias.

FUNDAMENTO TEORICO

Para un problema con N_H corrientes calientes y N_C corrientes frías, para las cuales se conocen tanto sus temperaturas - de suministro y objetivo como sus valores de velocidad de flujo de capacidad calorífica, el número mínimo de unidades requeridas (considerando los intercambiadores, los calentadores y enfriadores) viene dado, según Homman, por la siguiente expresión:

$$N_{min} = N_H + N_C + N_{HS} + N_{CS} - 1 \quad \text{---} \quad 4.4$$

Donde:

N_{HS} = Número de corrientes de servicio calientes.

N_{CS} = Número de corrientes de servicio frías.

El número de posibles combinaciones vendrá dado por:

$$N_{POS} = (N_H + N_{HS}) \times (N_C + N_{CS}) - (N_{HS} \times N_{CS}) - 4.5$$

El problema combinatorio consiste en determinar el conjunto de combinaciones de N_{min} que pueden formarse cuando se seleccionan a partir de las diferentes N_{POS} , de acuerdo a la ecuación 4.6.

$$C_{N_{min}}^{N_{POS}} = \frac{N_{POS}!}{N_{min}! \times (N_{POS} - N_{min})!} \quad 4.6$$

El número de redes a evaluar, se reduce utilizando los siguientes argumentos topológicos y termodinámicos.

I.- Posibilidad de alcanzar las temperaturas objetivo.

Cada corriente debe llevarse a su temperatura objetivo, combinándose con corrientes de proceso o servicios auxiliares - cuyas temperaturas de suministro sean compatibles con esta temperatura objetivo.

II.- Posibilidad topológicas.

Todas las corrientes de proceso o servicios auxiliares de un problema deben combinarse cuando menos en una ocasión.

III.- Posibilidad de carga de calor.

Si una corriente cualquiera se combina una vez, entonces su pareja (corriente con la que se combina) debe tener una carga de calor igual o mayor.

Una consecuencia de esto es que las corrientes de proceso o servicio con mayor carga de calor deben combinarse en cuando menos dos ocasiones. La corriente de proceso o servicio que sigue en orden decreciente de carga de calor debe tener por lo menos dos combinaciones, o menos que se combine con la co-

riente de proceso o servicio con mayor carga de calor.

Estas restricciones son condiciones necesarias pero no suficientes, sin embargo el uso inteligente de ellas reduce considerablemente el tamaño del problema.

A fin de mostrar la forma de usar este método, considerese el problema SSP1 mostrado en la figura 4.12 Las flechas superiores corriendo hacia la derecha corresponden a las corrientes calientes, las flechas que van hacia la izquierda son para las corrientes frías. En cada caso, las temperaturas mostradas al inicio de la flecha corresponden a las temperaturas de suministro de cada corriente y las que se encuentran en la punta de la flecha corresponden a las temperaturas objetivo. Las cantidades mostradas a la derecha corresponden a las velocidades de flujo de capacidad calorífica.

$T(^{\circ}C)$	$T(^{\circ}C)$	$MCp (Kw/ C)$	$Q (Kw)$
2: 248	121	16.62	2124.03
4 204.4	65.6	13.29	1844.65
204.	37.9	11.39	1896.43
18212	65.6	12.92	1506.17
204.4	33.3	13.03	1447.63

Fig. 4.12 Datos para el problema SSP1

Un dato adicional para este problema son los requerimientos de servicios auxiliares, que en este caso son de calentamiento: $Q = 885.1 Kw (302 \times 10^4 BTU/Hr)$.

-El mínimo número de unidades, de acuerdo a la ecuación 4.4, será:

$$N_{\min} = 2 + 3 + 1 - 1$$

$$N_{\min} = 5$$

-El número de combinaciones posibles, tal como se observa en la Fig. 4.13 es de nueve (Eq. 4.5)

$$N_{\text{pos}} = (N_H + N_{HS}) (N_C + N_{CS}) - (N_{HS} + N_{CS})$$

$$N_{\text{pos}} = (2 + 1) (3 + 0) - (1 + 0)$$

$$N_{\text{pos}} = 9$$

Como puede observarse directamente de los datos, debe haber una combinación entre las corrientes 4 y 1 Fig 4.14 ya que la temperatura objetivo de la corriente 4 (65.6 °C) es la única compatible con la temperatura de suministro de la corriente 1 (37.9 °C) esto resulta de aplicar el argumento de posibilidad al argumento de posibilidad de temperaturas. (Las temperaturas de suministro de las corrientes 3 y 5 ocasionarían un acercamiento igual a cero y negativo respectivamente).

		C. CALIENTES			
		1	2	3	
C. FRIAS	1	*	*	*	2
	3	*	*	*	1
	4	*	*	*	1
	5	*	*	*	1
		3	1	2	AMBIENTE

FIG 4.13

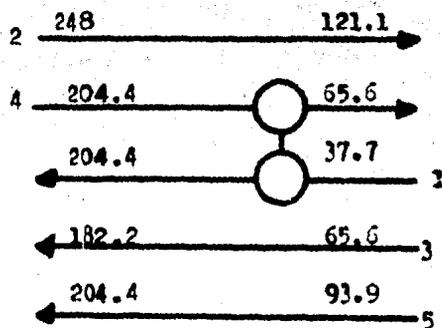


Fig. 4.14

Fijando esta combinación en número de combinaciones posibles es de ocho, y el número mínimo de unidades es de cuatro (una de las corrientes combinadas cubre sus requerimientos). De esta forma el conjunto de combinaciones que pueden formarse serán, de acuerdo a la ecuación 3, igual a setenta

$$C_4^8 = \frac{8!}{4!(8-4)!} = 70$$

Este número es todavía grande para manejarse (cuando menos - manualmente). Sin embargo, si en primera instancia no se toman en cuenta las combinaciones entre las corrientes de proceso y los servicios de calentamiento el número se reduce a $C_5^4 = 5$ posibilidades. Si además se eliminan cinco combinaciones para el caso en que se mantuviese desconectada la corriente No. 2, análogamente otras cinco por las corrientes No. 3 y No. 5 la reducción sería a

$$70 - (4 \times 5) = 50$$

Esto se hace debido a que una corriente sin combinar también es una de las posibilidades (caso particular) que se considera - al enumerar todas las combinaciones posibles, y obviamente, no es práctico sintetizar redes en las que alguna corriente no se combine con alguna otra corriente de proceso, de ahí que estas posibilidades (50) no se tomen en cuenta.

A continuación, usando el criterio de posibilidad de carga - de calor, se eliminan las combinaciones en las que la corriente - con mayor carga de calor realiza una sola combinación. (en este problema es No. 2). Dado que esto puede ocurrir con tres corrien

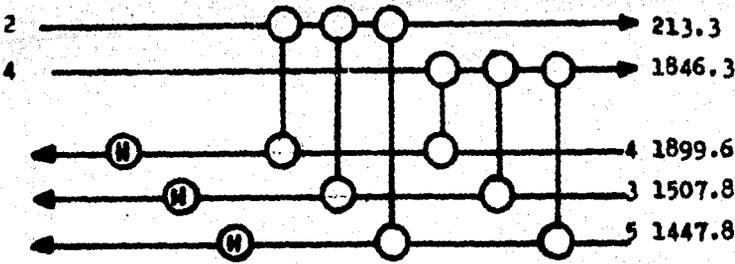
tes, se eliminan otras $3 \times C_3^3 = 30$ posibilidades.

Ahora bien, en realidad cuatro de estas treinta posibilidades ya fueron desechadas. Dos para el caso en que la corriente No. 3 permanece desconectada y dos para cuando la que no se conecta es la corriente no. 5. Con todo esto el número final de posibilidades a considerar es de veinticuatro.

$$50 - (30 - 2 - 2) = 24$$

Estas posibilidades ya pueden evaluarse manualmente. La figura 4.15 muestra las nueve posibilidades de combinación total más los veinticuatro juegos de posibles redes. Las combinaciones de estas veinticuatro estructuras se obtuvieron seleccionando primero las combinaciones de la corriente No. 2 y los posibles calentadores necesarios, para posteriormente realizar las combinaciones restantes. En cada caso la presencia de una cruz implica una combinación. Obsérvese además, que en cada red posible el número de intercambiadores es igual al mínimo número de unidades (cinco).

El primer argumento utilizado para desechar opciones es el de temperaturas. En la combinación entre las corrientes No. 4 y No. 1 por consideraciones de acercamiento mínimo de temperaturas, la corriente no. 1 no puede llegar a su temperatura objetivo de -204.4°C (Para hacerlo se requeriría un acercamiento de cero grados), de esta forma, tomando un acercamiento mínimo de 11.1°C , la carga de calor intercambiada no es suficiente para cubrir los requerimientos de la corriente no. 4 por lo que necesitará una combinación posterior. La columna 1 de la figura 4.19 muestra nueve opciones desechadas al no considerar una segunda combinación de la corriente no. 4.



Carga de calor (Kw)

							1	2	3		
1	x			x	x	x	x	N			
2		x			x	x	x	N			
3				x	x	x	x	N			
4	x			x	x	x		N	N		
5		x		x	x	x		N	N		
6				x	x	x			N		
7				x	x	x					///
8	x				x	x					///
9		x			x	x					///
10	x	x			x		x	N		N	
11				x	x	x		N		N	
12				x		x	x				///
13				x		x	x			N	
14	x				x		x				///
15				x	x		x				///
16	x	x			x	x	x	N			
17	x			x		x	x	N			
18	x				x	x	x				///
19	x				x	x	x				///
20				x	x		x		N		
21				x		x	x		N		
22				x		x	x		N		
23				x	x	x	x		N		
24				x		x	x		N		

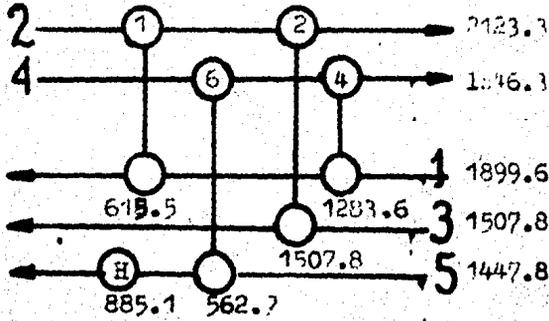
FIG. 4.15 Juego de posibles combinaciones para el problema 5SP1

El segundo argumento utilizado es el de posibilidad de carga de calor, de acuerdo a este argumento las corrientes no. 2 y no. 1 al tener las mayores cargas de calor, deben realizar al menos dos combinaciones. Tal como se observa en la columna 2 de la figura 4.15, las opciones 20 a 24 son desechadas ya que solo consideran una sola combinación para la corriente no. 1.

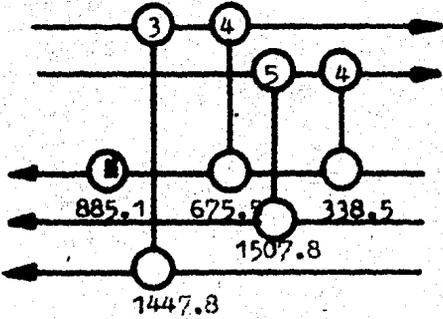
Finalmente, la columna 3 de la misma figura muestra seis opciones desechadas debido a que consideran una combinación entre alguna de las corrientes frías con un calentador sin considerar una combinación posterior con alguna corriente caliente, al hacer esto no se está aprovechando la energía disponible en forma adecuada, por lo que no son combinaciones que lleven a una máxima recuperación de energía.

En esta etapa sólo quedan ocho opciones, sin embargo, sólo cinco de estas se realizan cumpliendo con el mínimo acercamiento de temperaturas $\Delta t_{min} = 11.1^{\circ} C$ ($20^{\circ} F$). Estas opciones se muestran en la figura 4.16. La estructura 10a. corresponde a la opción 7 de la figura 4.15; la 10b a la no. 14, la 10c a la no. 15, la figura 10d a la no. 18 y la estructura 10e corresponde a la no. 10. Lo anterior implica que existen sólo cinco posibles redes de intercambio de calor para el problema 5SP1 que aseguren una máxima recuperación de calor, sujetas a las restricciones de un acercamiento de temperaturas de $11.1^{\circ} C$ y sin considerar división de corrientes.

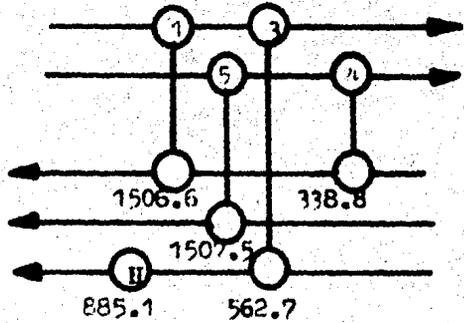
La tabla 4.3 muestra los costos anuales para estas cinco redes. Como puede observarse la estructura 10b es la que presenta el menor costo.



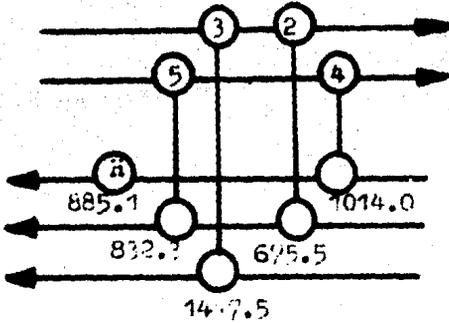
a)



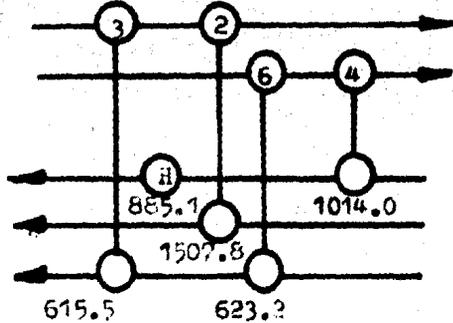
b)



c)



d)



e)

Fig. 116 Las cinco soluciones para el problema 5.11

TABLA 4.2 COSTOS ANUALES PARA LA SOLUCION
DEL PROBLEMA 5SPI

ESTRUCTURA	COSTO ANUAL ⁺ (\$)
10a	38,336
10b	38,268
10c	38,519
10d	38,550
10e	38,278

⁺Costos de 1978

4.4 METODO DEL PLIEGUE

Este método también fué desarrollado por Linnhoff y aunque utiliza algunos de los principios de los métodos anteriores - (TI, TC) es más sencillo de aplicar. El método tiene como meta principal el lograr redes con máxima recuperación de energía.

4.4.1 FILOSOFIA DEL METODO

La primera etapa del método es la localización del pliegue de temperaturas, el cual puede identificarse fácilmente en un diagrama de temperaturas contra el calor, como el punto en el cual la diferencia de temperaturas entre las corrientes calientes y frías es mínima. La fig. 4.17 muestra el punto de pliegue para un problema general. El punto de menor fuerza impulsora para la transferencia de calor de tal forma que el transferir calor en este punto ocasiona un aumento de los servicios auxiliares requeridos tanto de calentamiento como de enfriamiento, para llevar las corrientes a sus temperaturas objetivo.

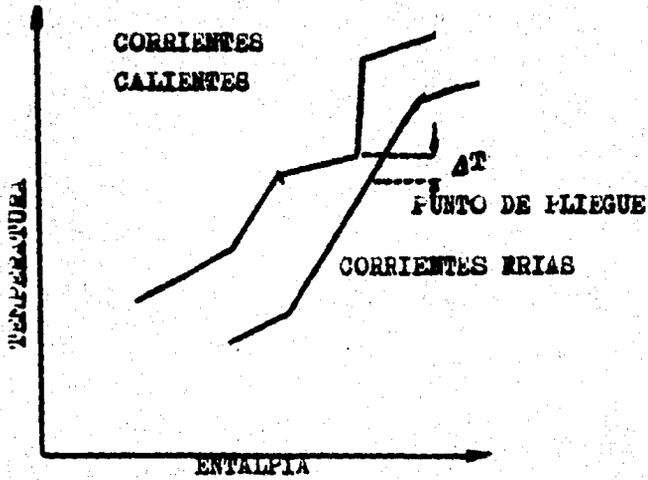


Fig. 4.17 Punto de fliegue para un problema general.

El punto de pliegue representa la zona más restringida para el diseño, por lo que la idea general del método es iniciar la solución del problema en esta zona y después continuar en las zonas arriba y abajo de este en una forma más libre.

4.4.2 CRITERIOS DE FACTIBILIDAD

1) Número de corrientes o ramales de proceso.

El método permite identificar las situaciones en las que es inevitable el uso de corrientes divididas para mantener los requerimientos mínimos de servicios auxiliares, considere las corrientes mostradas en la figura 4.18 .

En ella se representa una de las dos zonas resultantes a partir de la identificación del punto de pliegue. En la Fig.4.18 se identifican las combinaciones entre la corriente caliente 2 y la corriente fría 4 y la corriente 3 con la corriente fría 5. Sin embargo, si se realizan estas combinaciones, la corriente 1 no puede combinarse con alguna de las corrientes frías sin violar el acercamiento mínimo $\Delta t_{min} = 10^{\circ}$ en tales circunstancias, parecería que los datos de las corrientes no son compatibles con el punto de pliegue. Cuando esto ocurre se requiere utilizar corrientes divididas tal como se muestra en la fig.

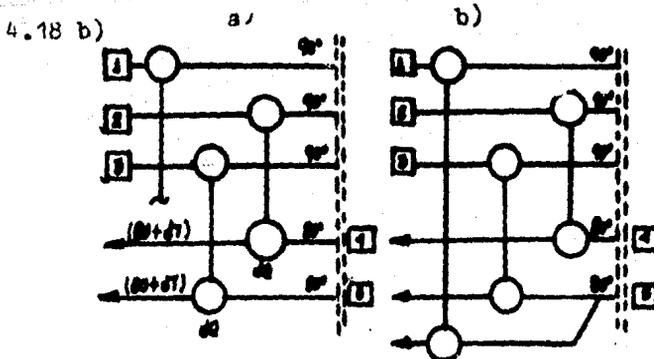


Fig. 4.18

2) La desigualdad de capacidad calorífica para las combinaciones.

El segundo criterio está relacionado con la factibilidad de temperaturas. Este criterio dice que las fuerzas impulsoras para la transferencia (diferencia de temperaturas) no puede disminuir más que en el punto de pliegue (esto equivaldría a tener una región más crítica que el punto de pliegue). En la fig. 4.20 se muestra graficamente este criterio. Como puede observarse después del punto de pliegue las fuerzas impulsoras aumentan. El criterio se puede expresar mediante las siguientes desigualdades.

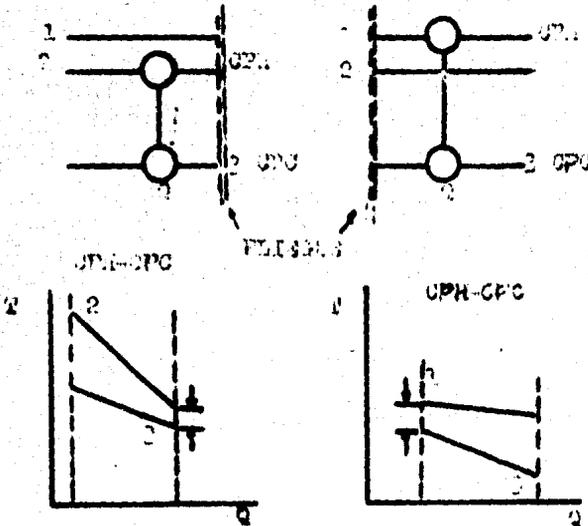


Fig. 4.20

Para el lado caliente

$$CPH \leq CPC \dots\dots 4.9$$

Para el lado frío

$$CPC \geq CPH \dots\dots 4.10$$

Donde CPH = Velocidad de flujo de capacidad calorífica de las corrientes calientes.

CPC = Velocidad de flujo de capacidad calorífica de las corrientes frías.

Cuando estas desigualdades se cumplen, no será necesario utilizar corrientes divididas. En la fig. 4.21 se muestra un esquema en el que se explica la forma de aplicar los criterios de factibilidad.

Además de los criterios de factibilidad, se sugiere la aplicación de la siguiente regla heurística "Seleccione las cargas de calor a intercambiar en cada combinación de tal forma que una de las corrientes llegue a su temperatura objetivo". Esta regla tiene como objetivo intentar un número de unidades.

El método completo puede resumirse como sigue:

- Identificar el punto de pliegue.
- El problema de redes de intercambio de calor es dividido en el punto de pliegue en dos subproblemas.
- El diseño de las zonas resultantes se inicia realizando las combinaciones probables e identificando las necesidades de usar división de corrientes a partir de la aplicación de los criterios de factibilidad.

En la elección de corrientes a combinar se permite plena libertad del diseñador, de manera que la discriminación entre dichas combinaciones se puede hacer en base a la regla heurística y a su mejor criterio y conocimiento del proceso.

EJEMPLO DE APLICACION

A fin de mostrar la forma de aplicar el método del pliegue considerese el problema TC3 listado en la Table 4.4.

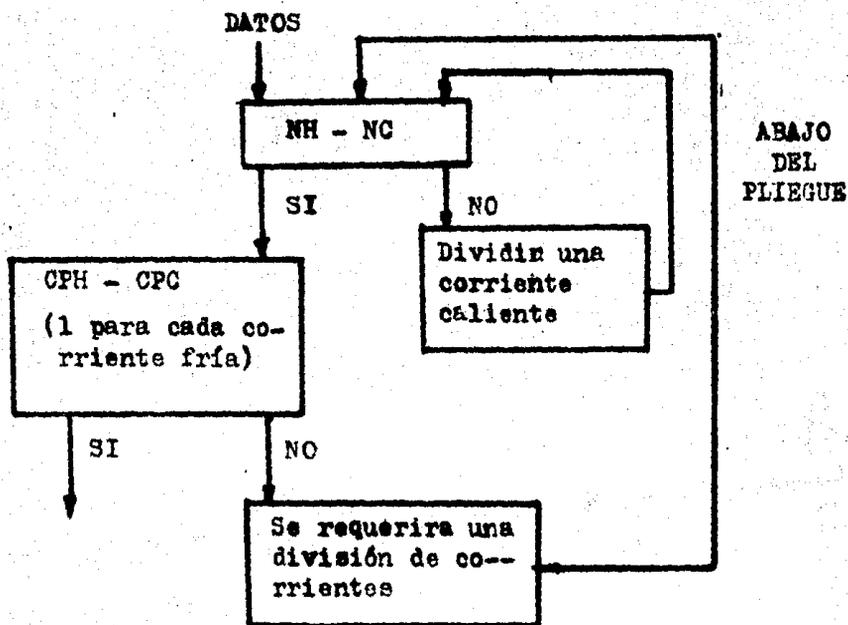
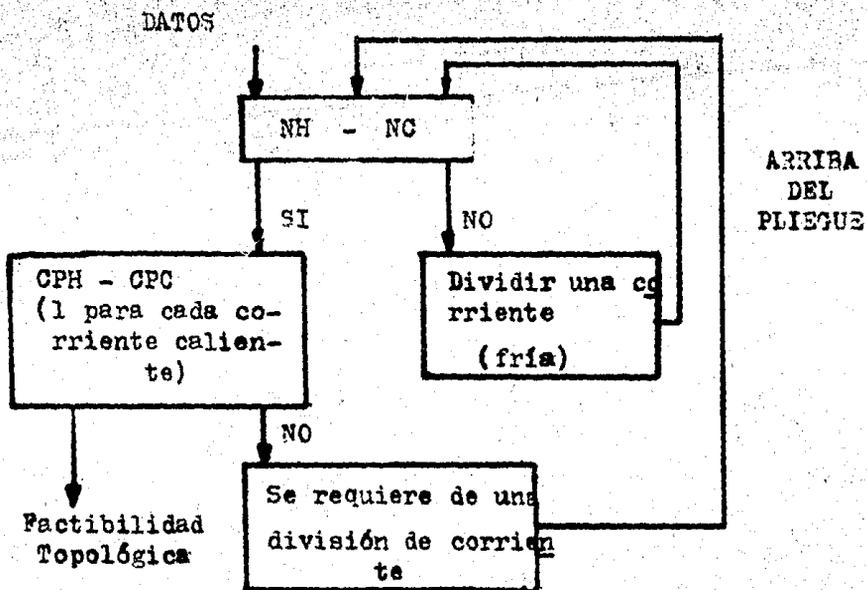


FIG. 4.21

TABLA 4.4 PROBLEMA TC3

# DE CORRIENTE	CORRIENTE	VELOCIDAD DE FLUJO DE CAPACIDAD CALO- RIFICA (KWI °C)	TEMPERATURA DE SUMINISTRO (°C)	TEMPERATURA META (°C)
1	Caliente 1	2	150	60
2	Caliente 2	88	90	60
3	Fría 1	2.5	20	125
4	Fría 2	3.0	25	100

1. IDENTIFICACION DEL PUNTO DE PLIEGUE

Para la identificación del punto de pliegue, se requiere conocer la zona en la cual la transferencia de calor es más difícil. - Esto se logra construyendo una tabla en la que se observe el flujo de calor de cada corriente, en forma paulatina, para diferentes niveles de temperatura. Estos niveles de temperatura se formarán en forma parecida a como se hacían las subredes en el método TI (con los valores de temperatura de entrada de las corrientes frías más el $\Delta T_{min} = 20^{\circ}F$).

La columna 1, representa el deficit de calor que hay en cada subred (un signo negativo indica exceso). Las columnas dos y tres indican las cantidades acumuladas y las columnas los flujos de calor en cada caso. Como puede observarse, en la subred SN3 el flujo de calor es cero (columna 5), esto implica que en este punto se tiene la zona de transferencia más crítica, por lo que aquí se localizará el punto de pliegue, que este caso estará entre las temperaturas de 70 y 90. Ver Tabla 4.5

El fenómeno se muestra en forma esquemática en la figura 4.22.

COLUMNA			1	2	3	4	5
SUBRED	CORRIENTES Y TEMPERATURAS		DEFICIT	ACUMULADO		FLUJOS DE CALOR	
	CORRIENTES FRIAS 3	T(°C) 4		CORRIENTES CALIENTES 1	2	ENTRADA	SALIDA
		150					
SN1		125 145	- 10	0	10	107.5	117.5
SN2	↑	100 120	+ 12.5	10	- 2.5	117.5	105
SN3	↑	70 90	+105	2.5	-107.5	105	0
SN4		40 60	-135	-107.5	27.5	0	135
SN5		25	+ 82.5	27.5	-55	135	52.5
SN6		20	+ 12.5	+12.5	-55	-67.5	52.5

TABLA 4.5 DE FLUJO DE CALOR PARA EL PROBLEMA TC3

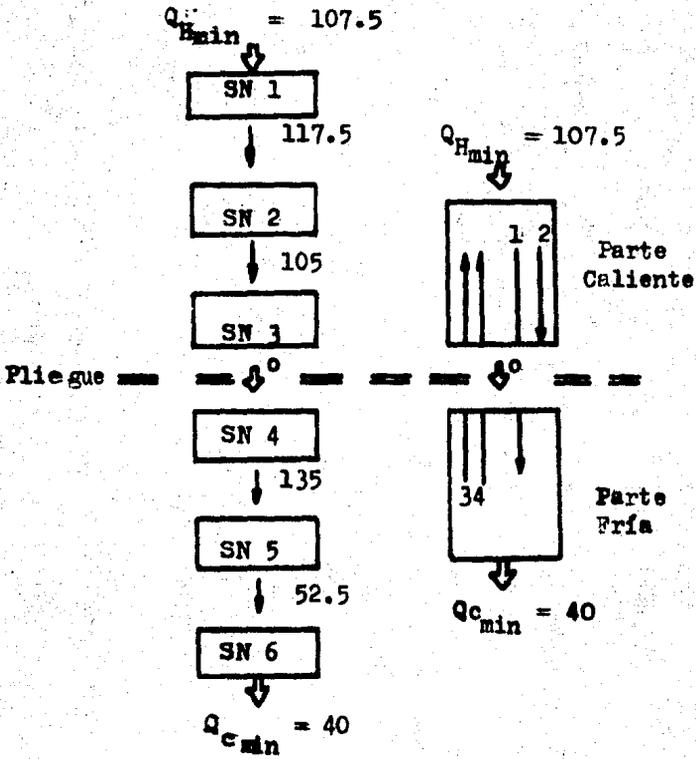


Fig 4.22 Identificación del Punto de Pliegue

2. DISEÑO DE LA PARTE CALIENTE

Si se toma una sola corriente caliente para iniciar el diseño, podemos representar los CP's de las corrientes en unas tablas como las que se muestran en la Fig. 4.23.

La aplicación del primer criterio de factibilidad, muestra -
ques:

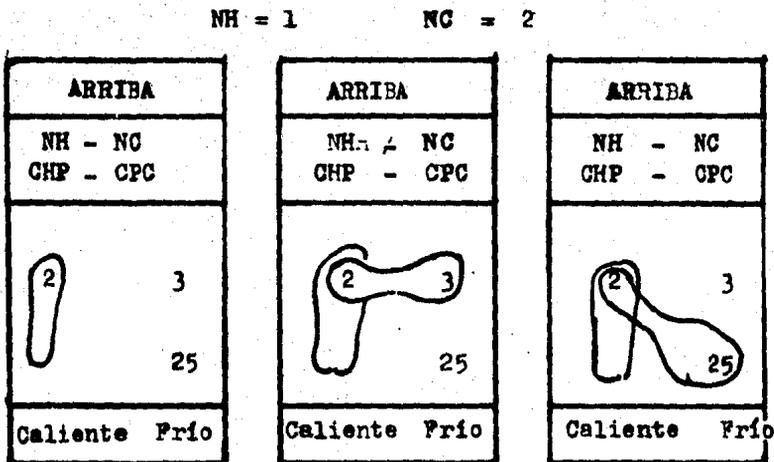


FIG. 4.23

Por lo que la población de corrientes es compatible con una máxima recuperación de energía. La aplicación del segundo criterio, tal como lo sugiere el esquema de la Fig. 4.21, muestra que hay dos opciones de diseño, tal como se puede observar

$$CPH = 2 < \begin{cases} CPC = 3 \\ CPC = 2.5 \end{cases}$$

En la fig. 4.22 *b y c*, que se muestran en la figura 4.24 (con la nomenclatura ya utilizada en los métodos anteriores). En la Fig.

4.24 *a*, la combinación se ha escogido aplicando la regla heurística propuesta e intentar llevar a la corriente 1 a su temperatura meta. Al hacer esto, la única opción que existe es utilizar 2 calentadores (uno con una $Q = 17.5$ para la corriente 3 y otro con $Q = 90.0$ para la corriente 4). La otra opción de diseño puede identificarse en la Fig. 4.23 *c*, y se muestra en la figura 4.24 *b*. En esta opción la regla heurística se aplicó buscando cubrir la necesidad total de calor de la corriente 4 ($Q=90+$, de esta forma el problema restante es tratar de utilizar las 30 unidades de calor disponibles lo que se logra con una combinación en la corriente tres. Al hacer esto se requiere un calentador extra.

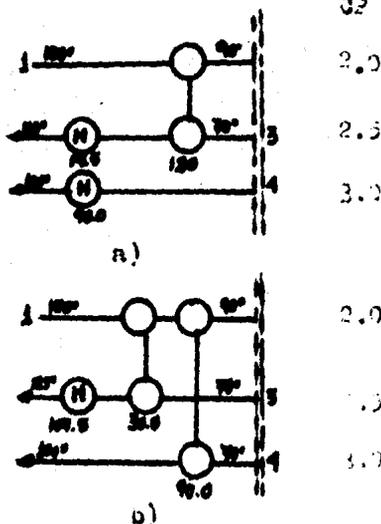


Fig. 4.24

Lo anterior puede resumirse diciendo que para que las combinaciones de las corrientes calientes se realicen con una máxima recuperación de energía (mínimo gasto de servicios auxiliares) se debe cumplir la siguiente desigualdad.

$$N_H \leq N_C \dots\dots\dots 4.7$$

Dónde N_H = Número de corrientes o ramales calientes.
 N_C = Número de corrientes o ramales fríos.

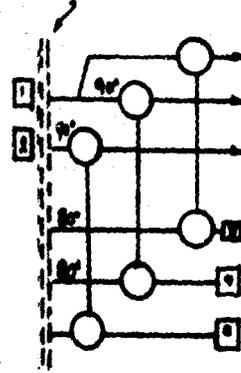
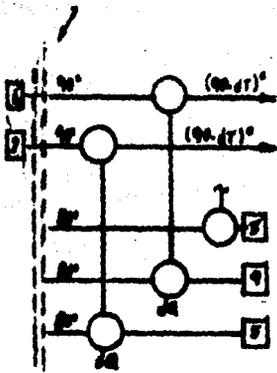
Por lo que respecta a la parte abajo del punto de pliegue, los requerimientos de máxima recuperación se tiene cuando

$$N_H \geq N_C \dots\dots\dots 4.8$$

Este caso se ejemplifica en la fig. 4.19

PUNTO DE PLIEGUE

PUNTO DE PLIEGUE



$\Delta T_{min} = 10'$

$\Delta T_{min} = 10'$

Fig. 4.19

3.- DISEÑO DE LA PARTE FRIA

Una tabla conteniendo los CP's de todas las corrientes se muestra en la fig. 8.24. La colocación de los intercambiadores se obtiene al aplicar los criterios de posibilidad de acuerdo al esquema de la Fig. 8.21. El primer criterio muestra que

$$NH = 2 - NC = 2$$

por lo que se puede esperar una máxima recuperación de energía sin embargo, no puede decirse lo mismo del segundo criterio ya que no se cumple la desigualdad 8.16 al aplicarse simultáneamente a todas las corrientes (ver Fig. b).

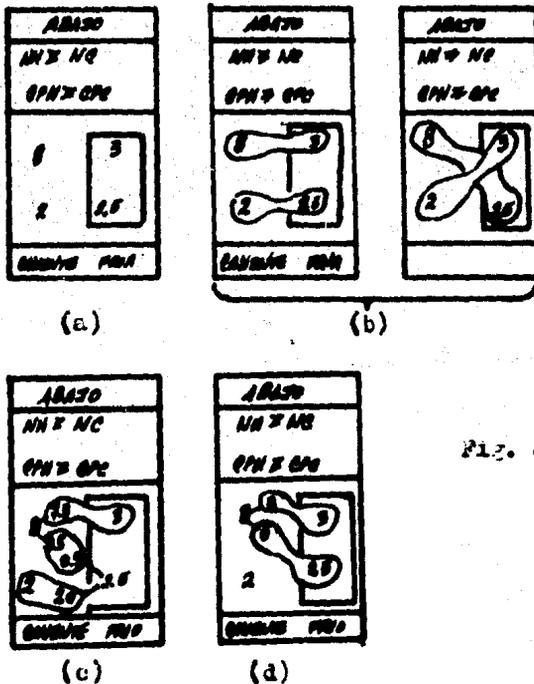


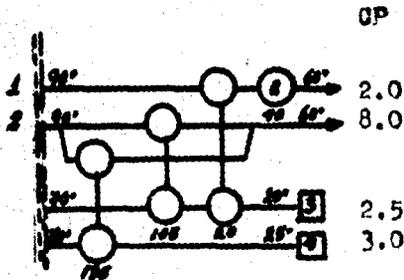
Fig. 8.25

Lo anterior implica la necesidad de utilizar división de corrientes; no obstante la solución no es tan elemental ya que al haber igual número de corrientes calientes y frías al dividir una corriente fría, se deberá dividir también una corriente ca-

liente, para cumplir con la desigualdad 4.3. Esto se demuestra con la figura 4.25c, en la cual se observa una división en el CP = 2.5 por lo que también fue necesario dividir el CP = 8 de la corriente 2, con lo que se cumpliría la desigualdad 4.3. Con este antecedente (ya sabiendo que la división de corrientes será necesaria) se intentará obtener el mejor diseño en forma más o menos libre. De esta forma se propone una división en la corriente caliente de CP = 8 (ver Fig. 4.25d) y llegaría a un arreglo con una sola división de corrientes.

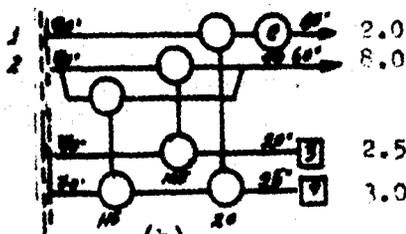
Dos opciones de diseño se obtienen a partir de esta propuesta. Fig. 4.26.

PLIEGUE



(a)

PLIEGUE



(b)

Fig. 4.26

En cada caso la regla heurística se ha aplicado a diferentes corrientes. La fig. 4.26a resulta cuando se aplica la regla a la carga de calor de la corriente 4. La topología de la fig. 4.26b se obtiene cuando la regla es aplicada en la corriente 3.

El diseño completo se obtiene al combinar los diseños resultantes en la parte caliente y la parte fría. La figura 4.27 muestra la estructura completa. Este diseño logra una máxima recuperación de energía con siete unidades.

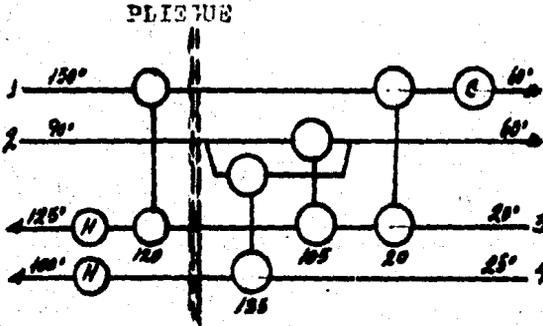


Fig. 4.27 Solución al problema TC3 mediante el método del pliegue.

4.5 PROGRESOS DE LOS TRABAJOS ANTERIORES

En general puede decirse que los trabajos hasta ahora realizados en síntesis de redes de intercambio de calor, han permitido conocer los siguientes principios.

1) La naturaleza combinatoria del problema lo que provoca - que el espacio de soluciones aumente en forma casi exponencial con el tamaño del mismo.

2) El costo de la red es determinada por los costos de energía por lo que una red óptima deberá contar con una máxima recuperación de energía (MRE).

3) El costo en equipo se minimiza cuando se utiliza el mínimo número de unidades (MNU) que usualmente es igual al número de corrientes de proceso y servicios auxiliares - menos uno.

El considerar soluciones con el número mínimo de unidades contiene implícitamente otras ventajas como son fácil instalación y mantenimiento, menor cantidad de instrumentación, etc.

4) Cuando existen varias redes cercanas a la óptima, otros - criterios tales como controlabilidad, seguridad, operabilidad; pueden ayudar a elegir la mejor.

CAPITULO V

METODO PROPUESTO

El nuevo método fue desarrollado por Parkinson a finales de 1982 y consiste en una modificación al algoritmo desarrollado por Raghavan en 1977. Este método además de asegurar una máxima recuperación de energía, un mínimo número de unidades y un costo total mínimo; presenta las opciones de utilizar modelos más realistas para la Síntesis de Redes de Intercambio de Calor al incorporar coeficientes globales de transferencia de calor variables, multipaso en los intercambiadores y flexibilidad en el comportamiento de la red.

El método puede considerarse dentro de los algoritmos denominados comunmente del árbol (en los cuales se intenta analizar todas las posibles combinaciones entre las corrientes) pero mantiene una "expansión controlada" para el número de combinaciones. Las combinaciones que se evalúan son solo las opciones más prometedoras.

Otras características importantes del nuevo método son el que no utiliza un mínimo acercamiento en las temperaturas de los intercambiadores y trabaja con todos los tipos de combinaciones, es decir, evalúa combinaciones tanto con máxima, mínima e intermedia diferencia de temperaturas, así como con división de corrientes. Estos tipos de combinaciones se ejemplifican en la figura 5.1, en esta figura se muestran mediante rectángulos la cantidad de calor disponible o requerida por una corriente de proceso, en las abscisas se representa la temperatura y en las ordenadas la velocidad de flujo de capacidad calorífica ($\dot{M}C_p$). Por simplicidad se ha supuesto que la corriente fría alcanza su temperatura objetivo.

En la figura 5.1(b) se ve una combinación en la que existe una máxima diferencia de temperaturas entre las corrientes la fig. 5.1(c) muestra una combinación con una mínima diferencia de temperaturas, en la 5.1(d) se ejemplifica el caso de una combinación con corrientes divididas. Aquí solo se utiliza una parte de la corriente caliente para llevar a la corriente fría a su temperatura meta; finalmente la fig. 5.1(e) muestra una combinación con una diferencia de temperaturas intermedia.

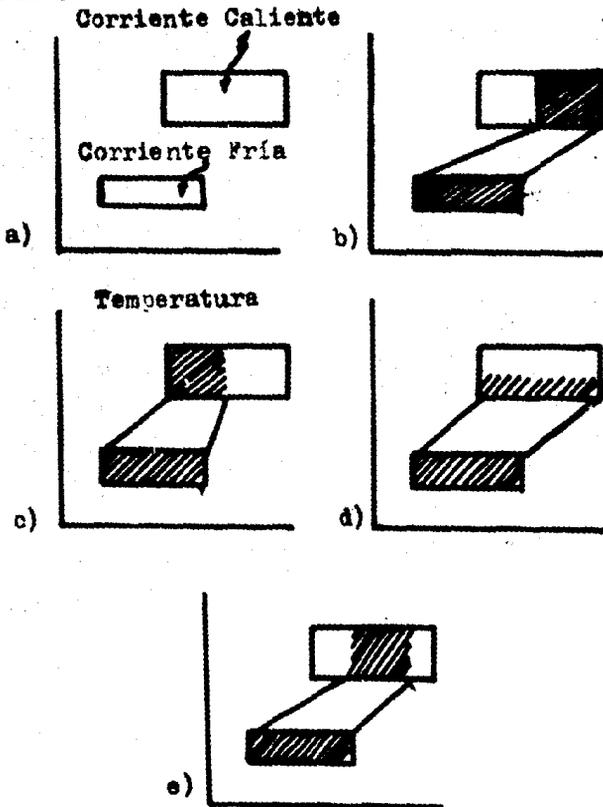


Fig. 5.1 Tipos de Combinaciones

- a) Corrientes a Combinar
- b) Combinación con máxima diferencia de temperaturas.
- c) Combinación con mínima diferencia de temperaturas.
- d) Combinación con división de corrientes.
- e) Combinación con diferencia intermedia de temperaturas.

5.1 DESARROLLO DEL MODELO GENERAL

5.1.1 Recuperación de Energía

A fin de analizar si una combinación se realiza con una máxima recuperación de energía, Parkinson utiliza una función denominada de calor útil HAF. Para una temperatura T HAF se define como la energía disponible de las corrientes calientes a una temperatura T menos la energía requerida para llevar -- las corrientes frías a sus temperaturas meta. HAF tiene dada por la siguiente expresión:

$$HAF(T) = \sum_{i=1}^m \int_T^{T_{max}} Chi(T) dT - \sum_{j=1}^n \int_T^{T_{max}} Ccj(T) dT \dots \dots \dots 5.1$$

Donde: m=número de corrientes calientes

n=número de corrientes frías

Chi=velocidad de flujo de capacidad calorífica de la corriente caliente i

Ccj=velocidad de flujo de capacidad calorífica de P corriente fría j

Tmax=máxima temperatura del sistema

Un ejemplo de HAF para las corrientes del problema 43P1 (tabla 5.1), se muestra en la figura 5.2

TABLA 5.1 DATOS PARA EL PROBLEMA 5SP1

<u>CORRIENTE</u>	<u>T entrada (°C)</u>	<u>T salida (°C)</u>	<u>MCp (Kw/K)</u>
H ₁	150.0	93.3	8.79
H ₂	248.9	137.8	10.55
C ₁	60.0	160.0	7.62
C ₂	116.6	260.0	6.08

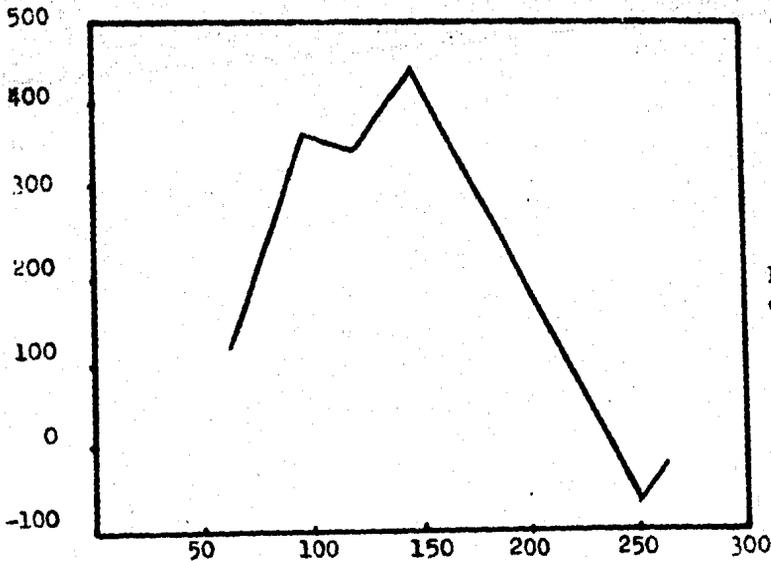


Fig. 5.2 HAF para el problema 4SP1

De el análisis de la figura 5.2 se pueden dar las siguientes conclusiones sobre la función HAF:

- 1.- Si se suponen velocidades de flujo de capacidad calorífica constantes HAF es lineal, cambiando de pendiente cuando se alcanzan las temperaturas de entrada o salida de las corrientes.
- 2.- La mínima cantidad de calor útil se tiene cuando HAF toma valores negativos.
- 3.- Un valor de HAF igual a cero entre las temperaturas mínima y máxima, indica un acercamiento de cero lo que requeriría de una área de transferencia infinita, algo que, lógicamente, no es deseable.
- 4.- Los valores de HAF a las mínimas temperaturas del sistema indican si hay una "deficiencia" de calentamiento o enfriamiento.

5.1.2.- Modelo Matemático

Definiendo F_p como el área evaluada sobre HAF (área de la gráfica HAF(T) contra T), se tiene:

$$F_{ij} = Q_{ij} T_{ij} \dots\dots\dots 5.2$$

Donde: i= subíndice que denota el número de corriente caliente

j= subíndice que denota el número de corriente fría

Q_{ij} = calor transferido entre estas corrientes

De esta forma el área de transferencia (para un intercambiador de tubos y envolvente), viene dada por:

$$A_{ij} = Q_{ij}^2 / U_{ij} F_{ij} \dots\dots\dots 5.3$$

Recordando que el costo de un intercambiador viene dado por la ecuación 3.7

$$C = aA^b \dots\dots\dots 3.7$$

con esto el modelo matemático para el problema de optimización puede escribirse como:

$$\text{MIN } C = a \sum_j^n \sum_i^n Q_{ij}^{2b} (F_{ij} U_{ij})^{-b} \dots\dots\dots 5.4$$

Sujeto a:

$$\sum_j^n Q_{ij} = Q_{cj} \quad \forall j \dots\dots\dots 5.5$$

$$\sum_i^n Q_{ij} = Q_{hi} \quad \forall i \dots\dots\dots 5.6$$

$$\sum_j^n Q_{cj} = \sum_i^n Q_{hi} = Q_T \dots\dots\dots 5.7$$

$$\sum_i \sum_j F_{ij} = F_T \dots\dots\dots 5.8$$

y la segunda ley de la Termodinámica.

Las restricciones 5.5 y 5.6 establecen que la cantidad de calor transferido por alguna corriente en uno o varios intercambiadores debe ser igual a la cantidad de calor total disponible o requerida por la misma. La restricción 5.7 establece que el calor total transferido por todas las corrientes debe ser igual al calor total disponible. La restricción 5.8 esta-

blece que la suma de las áreas sobre HAF deben ser igual al área total sobre la misma F_T . Finalmente la segunda ley de la Termodinámica interviene al evitar combinaciones de corrientes que por sus niveles de temperatura no son posibles.

5.1.3 Descripción del Algoritmo

El algoritmo inicia generando todas las posibles combinaciones que permiten llevar a las corrientes a sus temperaturas objetivo, manteniendo un valor de HAF positivo. Una vez efectuadas las combinaciones se almacenan y clasifican de acuerdo a su costo, colocándose la combinación de menor costo a la cabeza, de tal forma que son las primeras combinaciones las que se utilizan en futuras expansiones (combinaciones posteriores). El algoritmo termina cuando todas las combinaciones se han considerado y, según su costo, se expanden o desechan.

Dado que se consideran todas las posibles combinaciones y se expanden solo las que presentan un costo mínimo, la solución final garantiza un óptimo global. Un diagrama parcial de la síntesis del problema 4SP1 se muestra en la figura 5.3, -- dentro de los cuadros se indica el tipo de combinación realizada. El costo de la porción sintetizada se muestra en la parte superior de los cuadros, y el número a la derecha, el número de combinaciones de la expansión.

Como puede observarse, se generan siete combinaciones en el primer nivel, de estas combinaciones se expandió la que tenía el costo mínimo. La expansión continua hasta que se crea una red con un costo de 23124/año. Los nodos que generan combinaciones con un precio superior a este se desecharon.

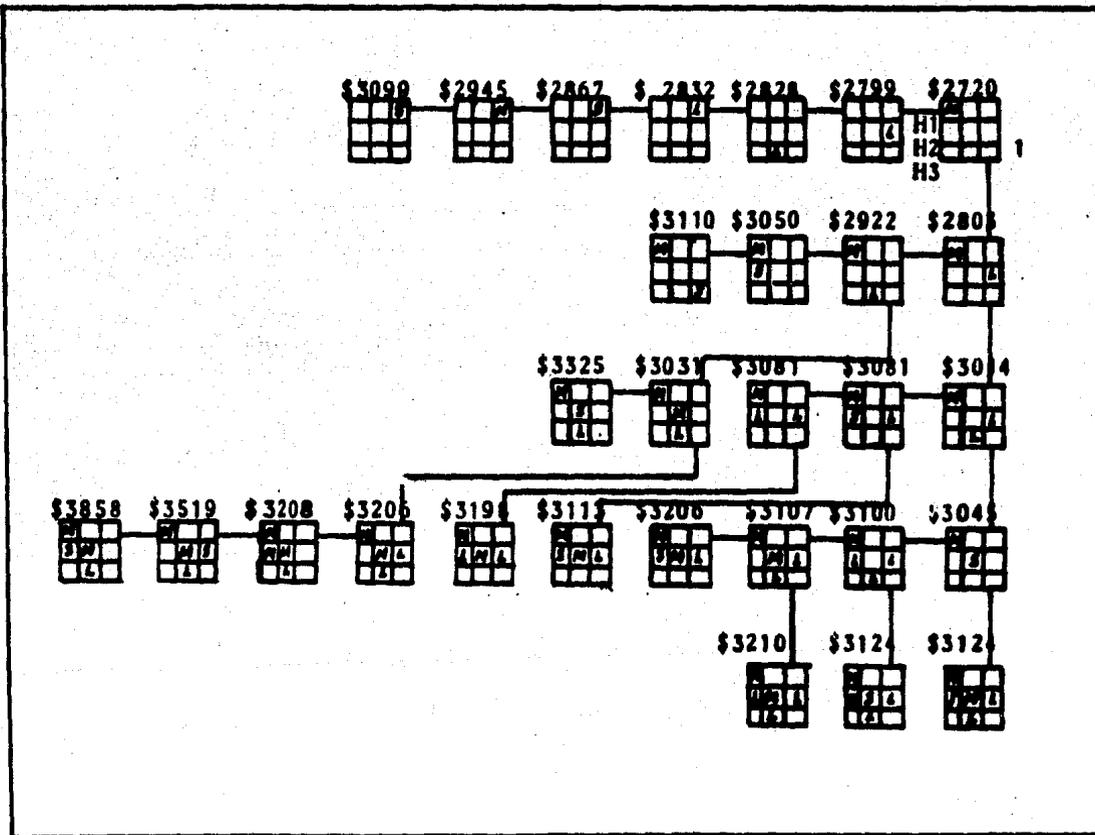


FIGURA 5.3 Síntesis parcial para el problema 4SP1

El algoritmo general desarrollado en esta sección puede extenderse para considerar otros factores como son el uso de coeficientes globales de transferencia de calor variables, - opción de varios pasos a través de los intercambiadores y flexibilidad en el comportamiento de la red, estas extensiones, que conforman un modelo más realista en la búsqueda de redes de intercambio de calor óptimas se tratan en la siguiente sección.

5.2 Coeficientes Globales de Transferencia de Calor Variables y Otros Factores en el Costo del Equipo.

El prefactor "a" de la ecuación 3.7 para el costo de los intercambiadores de calor, que hasta ahora se ha supuesto constante, ha sido ampliado por Guthrie introduciendo algunos factores de corrección que toman en cuenta el tipo de diseño, la presión de operación y los materiales de construcción. La nueva ecuación para el costo de intercambiadores de calor de tubos y envolvente viene dada por:

$$C = a(M_d + M_p)(M_m)A^b \dots\dots\dots 5.9$$

Donde:

M_d = Factor de corrección por tipo de diseño

M_p = Factor de corrección por presión

M_m = Factor de corrección por los materiales de construcción.

La tabla 5.2 muestra los valores reportados por Guthrie para estos factores.

TABLA 5.2 FACTORES DE COSTO DE GUTHRIE

$C = (M_d + M_p) \times M_m \times m A^b$

TIPO DE DISEÑO	M_d	PRESION DE DISEÑO (PSI)	M_p
Reborer Tipo Kettle	1.35	150	0.00
Cabeza Flotante	1.00	300	0.10
Tubos en U	0.85	400	0.25
Tubos Fijos	0.80	500	0.52

FACTOR POR MATERIALES M_m .

AREA PIES ²	AC/ AC	AI/ B	AC/ Mo	AC/ AI	AI AI	AC MONEL	MONEL/ MONEL	AC TITANIO	TITANIO TITANIO
0-100	1.00	1.05	1.60	1.54	2.50	2.00	3.20	4.10	10.28
100-500	1.00	1.10	1.75	1.78	3.10	2.30	3.50	4.10	10.60
500-1000	1.00	1.10	1.82	2.25	3.26	2.50	3.55	6.15	10.75
1000-5000	1.00	1.30	2.15	2.31	3.75	3.10	4.25	8.95	13.05
5000-10000	1.00	1.52	2.50	3.52	4.50	3.75	4.95	11.10	13.60

Donde: AC= Acero al carbón
 AI= Acero inoxidable
 Mo= Molibdeno
 B= Bronce

Sustituyendo la ecuación 5.9 en la 5.3 tenemos:

$$A_{ij} = Q_{ij} / U_{ij} P_{ij} \dots\dots\dots 5.10$$

y definiendo:

$$X_{ij} = \frac{(M_{dij} + M_{pij}) M_{mij}}{U_{ij}} \dots\dots\dots 5.10$$

La ecuación del costo puede ser escrita como:

$$C_{ij} = X_{ij} Q_{ij}^{2b} F_{ij} \dots \dots \dots .5.11$$

La diferencia entre esta ecuación y la usada anteriormente se encuentra en el factor X_{ij} que ahora depende del coeficiente global de transferencia de calor y los factores de corrección para el costo. El suministrar valores de X_{ij} junto con los datos para las corrientes permite trabajar con coeficientes globales de transferencia de calor variables.

Con esta variación la nueva función objetivo tendrá la siguiente forma:

$$\text{MIN } C' = \sum_i \sum_j X_{ij} Q_{ij}^{2b} F_{ij} \dots \dots \dots .5.12$$

sujeta a las restricciones 5.5 a 5.8.

5.3 Número de Envolventes en los Intercambiadores

En el trabajo industrial es común la utilización de cambiadores de tubos y envolvente con más de un paso a través de los tubos y/o la envolvente. La figura 5.4 muestra el esquema para un intercambiador con dos pasos por la envolvente y cuatro pasos por los tubos.

Cuando se trabaja con varios pasos el modelo de flujo que se presenta no es el de contracorriente pura por lo que la diferencia media logarítmica de temperaturas utilizada como medida del potencial para la transferencia debe corregirse. El factor de corrección por este efecto se expresa comúnmente por F_t .

Los valores de este parámetro vienen reportados en la mayoría de los textos sobre Transferencia de Calor. Usualmente se encuentran graficados en función de los parámetros "R" o radio de velocidades de flujo y "r" o eficiencia térmica que están dados por:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \dots \dots \dots 5.13$$

$$r = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_1} \dots \dots \dots 5.14$$

Donde las T's mayúsculas refieren al fluido caliente y las minúsculas al fluido frío, los subíndices 1 a las condiciones de entrada, en tanto que los números 2 lo hacen para las de salida.

La idea general de usar este parámetro, es trabajar con eficiencias, con respecto a la contracorriente pura, mayores a 80% por lo que sólo se aceptan diseños que proporcionen valores de cuando menos 0.8.

Una gráfica de los perfiles de temperatura para un intercambiador a contracorriente se muestra en la figura 5.5. Una forma bastante aproximada de encontrar el número mínimo de envolventes requeridas para mantener R_t mayor a 0.8 es igual al número de líneas horizontales que pueden trazarse entre ambos perfiles.

En el caso de la figura 5.5, el número de envolventes es de dos. Si se denota por X_1 la longitud de esta línea de unión entonces la condición que se debe satisfacer es de:

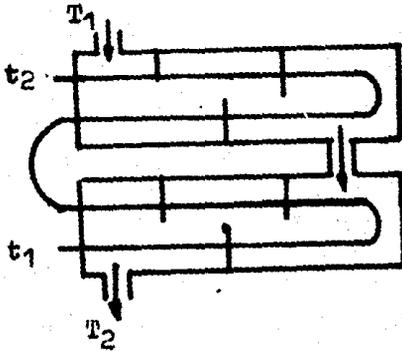


Figura 5.4

LINEA DE UNION

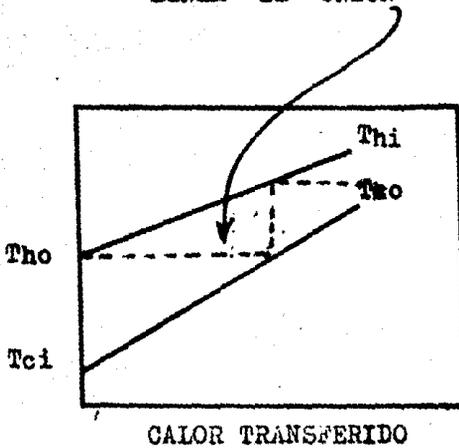


Fig. 5.5 Perfiles de temperatura en un intercambiador a contra corriente. En este intercambiador se requieren dos envolven--tes para mantener F_t mayor a 0.8

$$\sum_{i=1}^N X_i > Q \dots\dots\dots 5.15$$

Donde Q=Carga total de calor del cambiador

N=Número mínimo de líneas = número mínimo de envolventes

Ahora bien, los parámetros P y R se pueden escribir como:

$$P = \frac{T_{hi}-T_{ho}}{T_{co}-T_{ci}} = \frac{C_c}{C_h} \quad P = \frac{T_{co}-T_{ci}}{T_{hi}-T_{ho}}$$

Donde:

- T = temperatura
- c = Subíndice que indica una corriente fría
- C = Velocidad de flujo de capacidad calorífica
- o = Subíndice que indica condición a la salida
- i = Subíndice que indica condición a la entrada

Puede demostrarse que $X_i = R^{i-1} (X_1)$ substituyendo esto en la Ec. 5.15 y expandiendo tenemos:

$$X_1 (1+R+R^2 + \dots\dots+R^{N-1}) > Q \dots\dots\dots 5.16$$

Y dado que $X_i = (T_{ho}-T_{ci}) C_c \dots\dots\dots 5.17a$

$A = (T_{co}-T_{ci}) C_c \dots\dots\dots 5.17b$

La ecuación 5.16 puede escribirse como

$$(1+R+R^2 + \dots\dots+R^{N-1}) \frac{P}{1 - PR} \dots\dots\dots 5.18$$

El primer miembro de la Ec. 5.18 es una serie geométrica igual a $(1-R^N)/(1-R)$. Substituyendo este resultado en la ecuación

anterior obtenemos

$$N = \frac{\ln (1-P)/(1-RP)}{\ln N} \dots\dots\dots 5.19$$

Donde N debe ser entero para que tenga sentido, volviendo a las variantes originales de P y R, N vendrá dado por

$$N = \frac{\ln (Thi-Tco)/(Tho-Tci)}{\ln (Thi-Tho)/(Tco-Tci)} \dots\dots\dots 5.20$$

La ecuacion 5.20 permite estimar en números de envolventes usando solo temperaturas de entrada y salida de las corrientes

El modelo para la red de intercambiadores de multipaso puede escribirse como

$$\text{Min } C = \sum_i \sum_j N_{ij} [X_{ij} Q_{ij}^{2b} (N_{ij} F_{ij} F_{ij})^{-b}] \dots 5.21$$

Sujeta a las restricciones 5.5-5.8 y a la necesidad de que N sea entero.

Sin embargo dado que las temperaturas obtenidas en cada combinación no se conocen sino hasta que ésta se ha realizado la solución analítica es difícil. Para resolver este problema se supone que parte de la solución obtenida para el caso de una sola envolvente sigue siendo valida, y apartir de ésta se obtiene la solución completa resolviendo el siguiente problema de optimización.

$$\text{Min } N_{ij} = \frac{\ln (Thi-Tco)/(Tho-Tci)}{\ln (Thi-Tho)/(Tco-Tci)} \dots\dots 5.21$$

Sujeto a:

$$Thi+Tho-Tco-Tco = 2F_{ij}/Q_{ij} \dots\dots\dots 5.22$$

$$Ch (Thi-Tho) = Cc (Tco-Tci) = Q_{ij} \dots\dots\dots 5.23$$

$Ch < Chi$

$Cc = Ccj$ Si la corriente fría J llega a 5.24a
su T objetivo

$Ch = Chi$

$Cc < Ccj$ Si la corriente caliente i llega 5.24b
a su T objetivo

Las variantes de decisión son ahora Thi , Tho , Tco , Tci y Cc con Oij , Chi , Ccj constantes.

El óptimo para este problema se obtiene de la siguiente forma:

Suponiendo que la corriente fría llega a sus condiciones meta, se tendrá $(Tco - Tci) = Cc = Cte$. Donde los valores de Tco y Tci pueden obtenerse a partir de la temperatura promedio $Tm = (Tce - Tct) / 2$ estimada, de donde:

$$Tco = Tm + Qij/Sc \dots\dots 5.25 a$$

$$Tci = Tm - Qcj/Cc \dots\dots 5.25 b$$

Donde Tco = Temperatura de entrada de la corriente fría J

Tct = Temperatura meta de la corriente fría J

Usando además la restricción de igualdad, el problema restante tiene dos variables de decisión Thi , Tho , dos restricciones de igualdad y, por tanto, una solución única.

La solución obtenida puede mejorarse si se utiliza la Ec. 5.24 y se optimiza usando la técnica del gradiente.

5.4 FLEXIBILIDAD

Aunque esta parte quedaría un poco fuera del alcance de este trabajo, es un enfoque que además de novedoso es muy in

interesante. Por lo que aquí se presenta un breve resumen sobre el mismo, haciendo la aclaración que los resultados que aquí se reportan no se obtuvieron a partir del programa de cómputo utilizado para los problemas de las secciones anteriores, sino que son los reportados por Parkinson.

En un proceso real es muy difícil mantener constantes los valores de las variables de proceso tales como la temperatura y gastos. Mas bien estas (y otras) variables tienden a observar ciertas variaciones o fluctuaciones con el tiempo, - es decir, el estado estacionario perfecto es quizá solo un estado ideal que ocurre con poca frecuencia. Este hecho ha sido el que ha llevado a intentar el diseño de redes flexibles.

Una red flexible será aquella que puede absorber las variaciones en los parámetros de las corrientes que la forman de tal forma que todas las corrientes alcancen sus temperaturas meta. Una red flexible óptima será aquella que además de absorber estas variaciones, tenga un costo total mínimo.

Cuando la fluctuación de las variables ocurre existen un número infinito de estados posibles y en cada estado las corrientes requieren una área de transferencia diferente para satisfacer estas condiciones y llegar a sus temperaturas objetivo. Una forma de asegurar esto sería dimensionar los intercambiadores tomando como base las condiciones o estados más críticos, para los cuales se requeriría una de transferencia máxima.

Una función objetivo para el sistema descrito puede escribirse como:

$$\text{Min. } C = a \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \max (A_{ij1}, A_{ij2}, A_{ij3}, \dots, A_{ijk}, \dots, A_{ijn})^b \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 5.26$$

Donde los subíndices i y j denotan las corrientes frías y calientes que forman una combinación y el subíndice k representa un estado dado.

En sí mismo, el tratamiento para la evaluación de todas las condiciones en las corrientes, supone la elección de un número finito de estados que representen adecuadamente los posibles estados. El algoritmo propuesto por Parkinson utiliza tres estados límite en la generación de la red flexible óptima.

- 1) La energía requerida por las corrientes calientes es máxima. (Requerimientos máximos de enfriamiento).
- 2) La energía requerida por las corrientes frías es máxima (requerimientos máximos de calentamiento).
- 3) A partir de la aplicación de las siguientes pruebas:

-PRUEBA DE RECUPERACION DE ENERGIA

En los problemas de un sólo estado, se utilizó la función HAF para asegurar la máxima recuperación de energía, esta función puede extenderse a los problemas de redes flexibles.

Dado que es computacionalmente imposible examinar todos los estados posibles de una corriente, un criterio alternativo será utilizar un promedio pesado de la función HAF denominada $WAHAF$. Matemáticamente $WAHAF$ viene dado por la solución del problema :

$$\text{Min WAHAF} = \frac{\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \text{HAF}(T) dT}{T_{\max} - T_{\min}} \quad \dots 5.27$$

Sujeto a las restricciones del sistema de corrientes y la conservación de energía. El denominador de la evaluación anterior es una constante, mientras que el numerador es el área sobre la función HAF, o sea F_T , por lo que la función WAHAF estará dada por la función HAF con F_T mínimo.

Si se supone una velocidad de flujo de capacidad calorífica constante, el valor F_T promedio puede evaluarse con la siguiente expresión

$$F_T = 1/2 \sum_i^m \text{Chi} (Thij^2 - Thio^2) - \sum_j^n \text{Ccj} (Tcjo^2 - Tcji^2) \quad \dots 5.8$$

Sustituyendo la ecuación anterior, se puede evaluar el valor de WAHAF a partir de la solución del problema.

$$\text{Min } 2 F_T = \sum_i^m \text{Chi} (Thij^2 - Thio^2) - \sum_j^n \text{Ccj} (Tcjo^2 - Tcji^2) \quad \dots 5.29$$

Sujeto a

$$\sum_i^m \text{Chi} (Thij - Thio) - \sum_j^n \text{Ccj} (Tcjo - Tcji) = 0 \quad \dots 5.30$$

-PRUEBA DE FACTIBILIDAD

Esta prueba tiene por objeto probar que, para todas las fluctuaciones, la aproximación de temperaturas sigue siendo positiva. Esto puede lograrse encontrando la solución al problema.

Min $(Thi - Tco)$ en el lado caliente del intercambiador...5.31

Min $(tho - Tci)$ en el lado frío del intercambiador5.30

El método completo abarca las siguientes etapas:

ETAPA 1

Generación de la red flexible.

ETAPA 2

Establecer unos límites superiores e inferiores para los valores de las variables. Estos límites son $\pm 5^{\circ}$ C en las -- temperaturas y $\pm 10\%$ en las velocidades de flujo.

ETAPA 3

Verificación del comportamiento de la red por simulación.

CAPITULO VI

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 RESULTADOS

Se implementó el programa de cómputo desarrollado por Parkinson para el nuevo método de síntesis de redes de intercambio de calor óptimas desde el punto de vista de recuperación de energía y costo total. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de este programa, estos resultados abarcan los siguientes casos:

- 1) Redes óptimas usando en modelo general
- 2) Redes óptimas usando coeficientes globales de transferencia de calor variables
- 3) Redes óptimas para la opción con varios pasos a través de la envolvente.

Finalmente se presentan los resultados reportados por Parkinson para redes flexibles de intercambio de calor óptimas.

En la tabla 6.1 y 6.2, se presentan los datos usados para los problemas resueltos. Las figuras 6.1 y 6.9 muestran las redes obtenidas mediante el modelo general y la opción de multipaso.

TABLA 6.1 DATOS PARA LOS PROBLEMAS EJEMPLO

<u>PROBLEMA 4SP1</u>				
CORRIENTE	T1 (°C)	T2 (°C)	Mcp (Kw/K)	COMENTARIOS
H1	160.0	93.3	8.79	
H2	248.9	137.8	10.55	
H3	282.2	281.2	152.0	vapor
C1	60.0	160.0	7.62	
C2	115.6	260.0	6.08	
C3	37.8	82.2	6.09	Agua de enfriamiento

<u>PROBLEMA 4SP3</u>				
CORRIENTE	T1 (°C)	T2 (°C)	Mcp (Kw/K)	COMENTARIOS
H1	185.0	129.4	5.28	
H2	137.8	104.4	17.58	
C1	63.4	121.1	5.28	
C2	93.3	148.9	10.55	

TABLA 6.1 CONTINUA

PROBLEMA 55FI

CORRIENTE	T1 (°C)	T2 (°C)	Mcp (Kw/K)	COMENTARIOS
H1	248.9	121.1	16.62	
H2	204.4	65.6	13.29	
H3	235.6	234.6	883.00	Vapor
C1	37.8	204.4	11.39	
C2	65.6	182.2	12.92	
C3	93.3	204.4	13.03	

PROBLEMA 75FI

CORRIENTE	T1 (°C)	T2 (°C)	Mcp (Kw/K)	COMENTARIOS
H1	226.7	65.6	14.71	
H2	271.1	148.9	12.55	
H3	198.9	65.6	17.72	
H1	37.8	221.1	8.44	
C2	82.2	176.7	17.28	
C3	93.3	204.4	13.90	
C4	176.7	210.0	10.47	
C5	37.8	82.2	27.47	Agua de enfriamiento

TABLA 6.1 CONTINUA

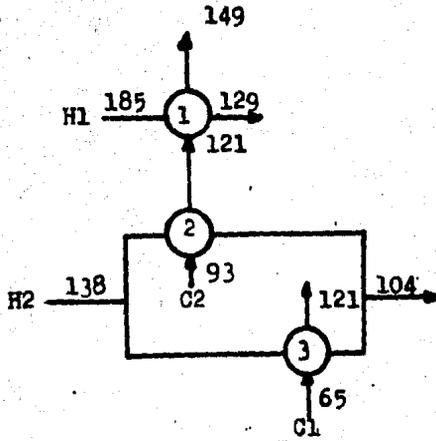
PROBLEMA 10SP1

CORRIENTE	T1 (°C)	T2 (°C)	Mcp (Kw/K)	COMENTARIOS
H1	160.0	93.3	8.79	
H2	248.9	137.8	10.55	
H3	226.7	65.6	14.77	
H4	271.1	148.9	12.55	
H5	198.9	65.6	17.72	
C1	60.0	160.0	7.62	
C2	115.6	221.7	6.08	
C3	37.8	221.1	8.44	
C4	82.2	176.7	17.28	
C5	93.3	204.4	13.90	
C6	37.8	82.2	42.80	Agua de enfriamiento

TABLA 6.2 DATOS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO

PROBLEMAS		
Vapor	4SP1	Todos los demás
Presión (kPa)	6635	3102
Calor latente (Kj/Kg)	1527.17	1785.11
Temperatura	282.22	236.56
Agua de enfriamientos		
Temperatura		37.8 °C
Capacidad Calorífica		4.1840 Kj/Kg °K
Máxima temperatura de salida permitida		82.2 °C
Coeficientes Globales de Transferencia de calor		
Intercambiadores		851.71 W/M ² °K
Calentadores con vapor		1136.61 W/M ² °K
Enfriadores con agua		851.71 W/M ² °K
Tiempo muerto de los equipos		380 Hr/año para 4SP1 260 Hr/año para los demás
Costo de intercambiadores		1456 A ^{0.6} (A en M ²)
Depreciación Anual		0.1
Costo del agua de enfriamiento		\$ 1.1023 x 10 ⁻⁴ /Kg
Costo del Vapor		\$ 2.2046x10 ⁻³ /Kg

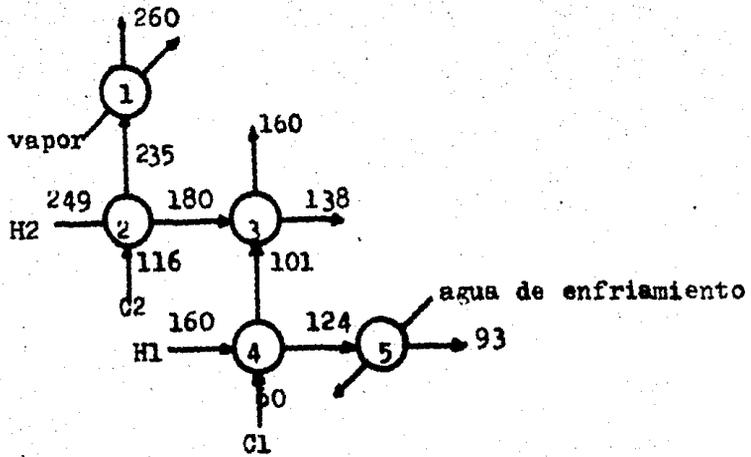
Nota: Datos de costos para Diciembre de 1982.



INT	CORRIENTE		TH1 (°C)	TH2 (°C)	MCP (Kw/Kg)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	MCP (Kw/Kg)
	H	C						
3	2	1	137.8	104.4	8.81	65.4	121.1	5.28
2	2	2	137.8	104.4	8.77	93.3	121.1	10.55
1	1	2	185.0	129.4	5.28	121.1	148.9	10.55

COSTO = \$ 2511 \$/AÑO

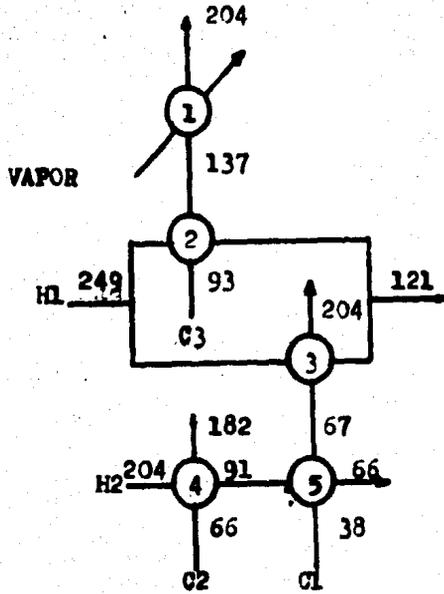
FIG. 6.1 SOLUCION AL PROBLEMA 4SP3



INT	H	C	TH1 (°C)	TH2 (°C)	MCp (KW/Kg)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	MCp (KW/Kg)
1	3	2	282.2	281.2	152.20	235.0	260.0	6.08
2	2	2	248.9	180.1	10.55	115.6	233.0	6.08
3	2	1	180.7	137.8	10.55	101.4	160.0	7.62
4	1	1	160.0	124.1	8.79	60.0	101.4	7.62
5	1	3	124.7	93.3	8.79	37.8	82.2	6.09

COSTO = \$ 3098 / AÑO

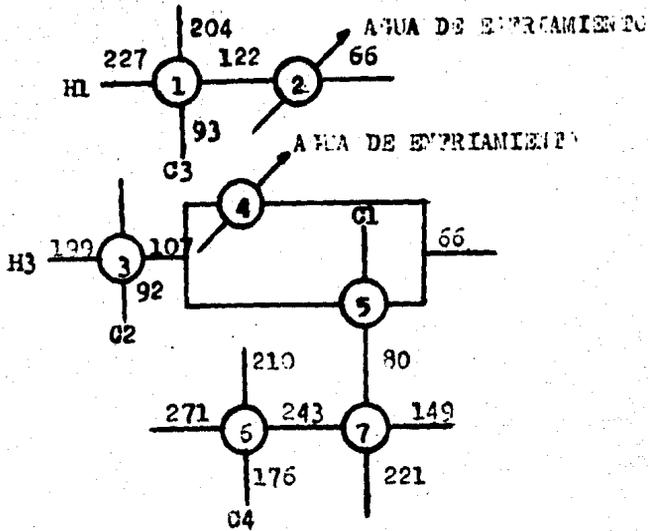
FIG. 6.2 SOLUCION AL PROBLEMA 43P1



INT	CORRIENTE		TH1 (°C)	TH2 (°C)	MCp (KW/Kg)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	MCp (KW/Kg)
	H	C						
1	3	3	235.6	234.6	882.99	136.6	204.4	13.03
2	1	3	248.9	121.1	4.42	93.3	136.6	13.03
3	1	1	248.9	121.1	12.20	67.5	204.4	11.39
5	2	1	91.0	65.6	13.29	37.8	67.5	11.39
4	2	2	204.4	91.0	13.29	65.6	182.2	12.92

COSTO = \$ 5263 / AÑO

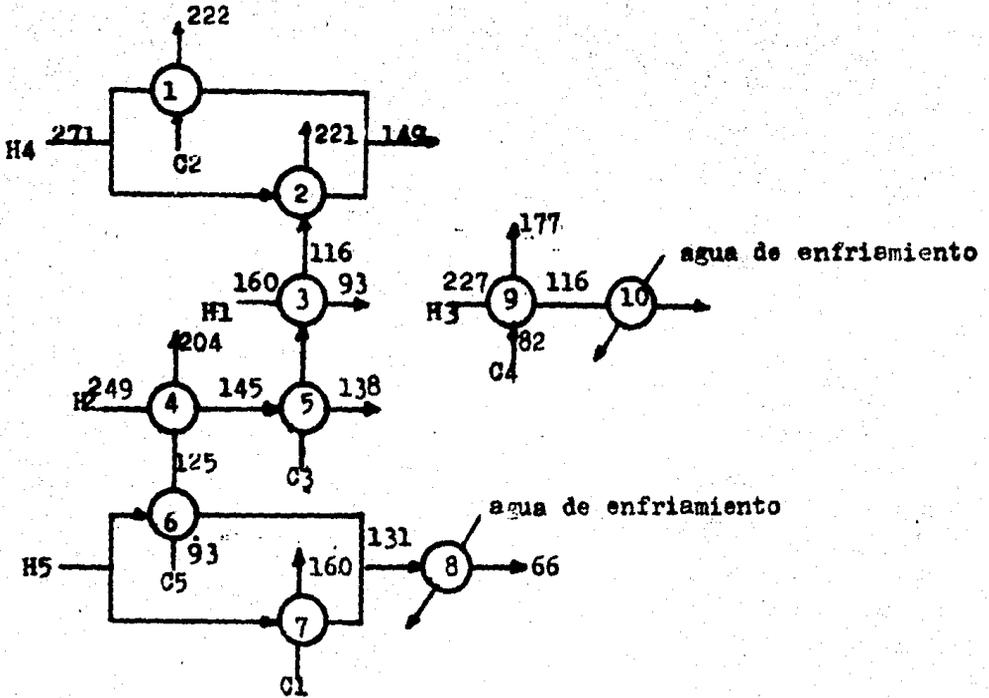
FIG. 6.3 SOLUCION AL PROBLEMA 5SP1



INT	CORRIENTE		TH1 (°C)	TH2 (°C)	MCp (KW/Kg)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	MCp (KW/Kg)
	H	C						
3	3	2	198.9	106.7	17.72	62.2	176.7	17.28
1	1	3	226.7	122.1	14.77	93.3	204.4	13.90
2	1	5	122.1	65.6	14.77	37.8	82.2	18.81
4	3	5	106.7	65.6	8.92	37.8	82.2	8.27
7	2	1	243.3	148.9	12.55	80.7	221.1	8.44
9	3	1	106.7	65.6	8.80	37.8	80.7	8.44
6	2	4	271.1	243.3	12.55	176.7	210.47	10.47

COSTO = \$ 8226 / AÑO

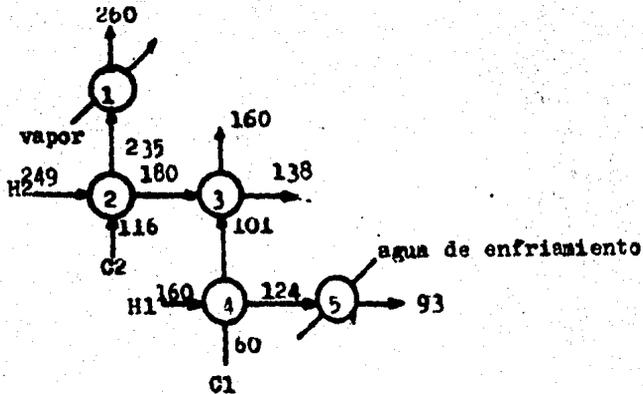
FIG. 6.4 SOLUCION AL PROBLEMA 7SP1



INT	CORRIENTE		TH1 (°C)	TH2 (°C)	MCp (Kw/Kg)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	MCp (Kw/Kg)
	H	C						
9	3	4	226.7	116.1	14.77	82.2	176.7	17.28
10	3	6	116.1	65.6	14.77	37.8	82.2	16.81
8	5	6	130.8	65.6	17.72	37.8	82.2	26.03
7	5	1	198.3	130.8	11.19	60.0	160.0	7.62
6	5	5	198.9	130.8	6.53	93.9	125.3	13.90
4	2	5	248.9	144.6	10.55	125.3	204.4	13.90
5	2	3	144.6	137.6	10.55	37.8	46.8	8.44
3	1	3	160.0	93.3	8.79	46.4	115.8	8.44
2	4	3	271.1	148.9	7.27	115.8	221.1	8.44
1	4	2	271.1	148.9	5.26	115.8	221.7	6.08

COSTO = 3 9276 / ANO

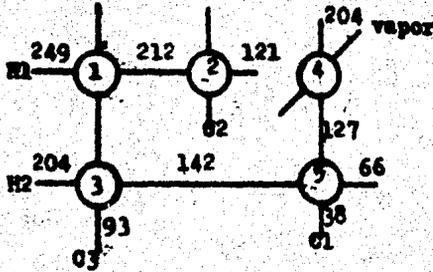
FIG. 6.5 SOLUCION AL PROBLEMA 10SP1



INT	CORRIENTE H C	NO. DE ENVOL VENTES	P	TH1	TH2 (°C)	MCP (KW/Kg)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	MCP (KW/Kg)
1	3 2	1	1.00	282.2	261.2	152.00	235.0	260.0	6.08
5	1 3	1	0.89	124.1	93.2	8.79	37.8	82.2	6.09
2	2 2	3	0.84	249.9	180.1	10.55	115.6	235.0	6.08
4	1 1	1	0.93	160.9	124.1	8.79	60.0	101.4	7.62
3	2 1	2	0.84	180.1	137.8	10.55	101.4	160.0	7.62

COSTO = \$ 4290/AÑO

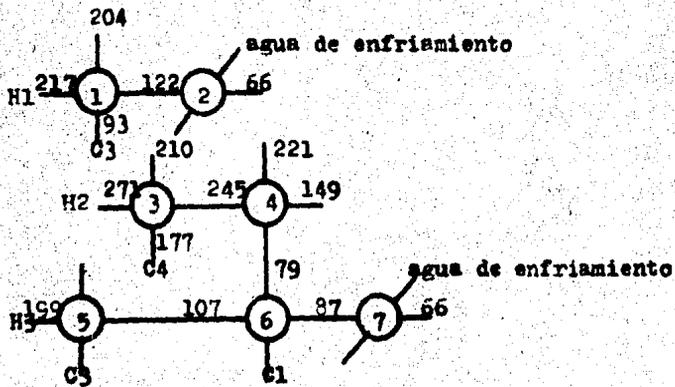
FIG. 6.6 PROBLEMA 4SPL SOLUCION DE MULTIPASO



INT	CORRIENTE		NO. DE ENVOL VENTES	P	TH1 (°C)	TH2 (°C)	MCp (KW/Kg)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	MCp (KW/Kg)
	H	C								
2	1	2	3	0.87	211.7	121.1	16.62	65.5	182.2	12.92
4	3	1	1	1.00	235.6	234.6	882.99	125.9	204.4	11.39
5	2	1	4	0.81	141.9	65.6	13.29	37.8	126.9	11.39
3	2	3	2	0.92	204.9	141.9	13.29	93.3	158.0	13.03
1	1	3	1	0.87	248.9	211.7	16.62	157.0	204.4	13.05

COSTO = \$ 8309/ AÑO

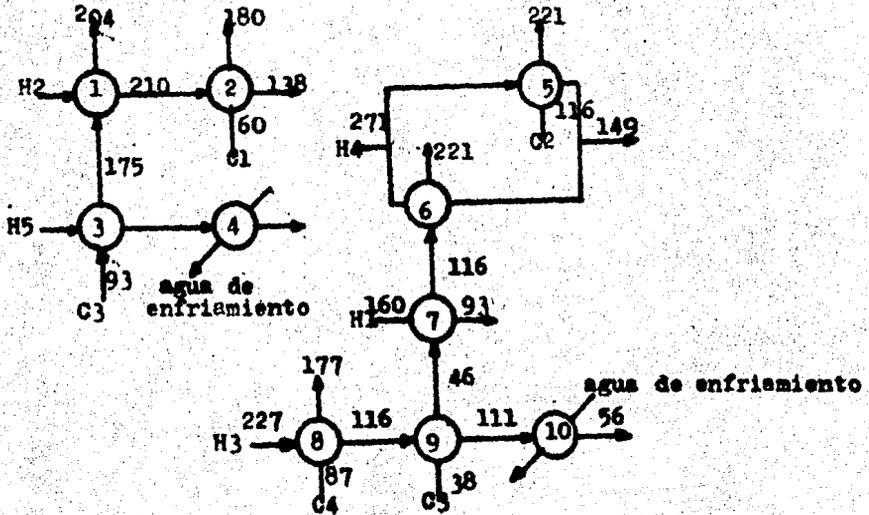
FIG. 6.7 PROBLEMA 55F1 SOLUCION DE MULTIPASO



INT	CORRIENTE H	C	NO. DE ENVOL VENTES	γ	TH1 (°C)	TH2 (°C)	MCp (KW/Kg)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	MCp (KW/Kg)
1	1	3	5	0.87	226.7	122.1	14.77	93.3	204.4	13.90
2	1	5	2	0.87	122.1	65.6	14.77	51.4	82.2	27.08
7	3	5	1	0.95	86.3	65.6	17.72	37.8	51.4	27.08
5	3	2	1	0.80	198.9	105.7	17.72	82.2	176.7	17.28
6	3	1	1	0.87	106.7	86.3	17.72	37.8	80.7	8.44
4	2	1	3	0.83	243.3	148.9	12.55	80.7	221.1	8.44
3	2	4	1	0.96	271.1	243.3	12.55	176.7	210.0	10.47

COSTO = \$ 13,829

FIG. 6.8 PROBLEMA 7SP1 SOLUCION DE MULTIPASO



INT	CORRIENTE		NO. DE ENVOL	P	TH1	TH2	MCp	TC1	TC2	MCp
	H	C	VENTES		(°C)	(°C)	(KW/Kg)	(°C)	(°C)	(KW/Kg)
2	2	1	2	0.92	210.0	137.8	10.55	60.0	160.0	7.62
1	2	5	1	0.86	248.9	210.0	16.55	174.9	204.4	13.90
3	5	5	3	0.90	198.9	134.9	17.72	93.3	174.9	13.90
4	5	6	2	0.88	134.9	65.6	17.72	53.5	82.2	42.84
10	3	6	1	0.92	111.2	85.6	14.77	37.8	53.3	42.84
8	3	4	3	0.87	226.7	116.1	14.77	82.2	176.7	17.28
9	3	3	1	1.00	116.1	111.2	14.77	37.8	66.4	8.44
7	1	3	2	0.90	160.0	93.3	8.79	46.4	115.8	8.44
6	4	3	3	0.84	271.1	148.9	7.27	115.2	221.1	8.44
5	4	2	3	0.83	271.1	148.9	5.28	115.2	221.1	6.08

COSTO = \$13,963/AÑO

FIG. 6.9 PROBLEMA 10SP1 SOLUCION DE MULTIPASO

La tabla 6.3 muestra los datos utilizados y los costos obtenidos para los problemas 4SP1 y 5SP1 usando diferentes valores de coeficientes globales de transferencia de calor.

TABLA 6.3 VALORES DE COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR ($\text{KW/M}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$) Y COSTOS OBTENIDOS PARA LOS PROBLEMAS 4SP1 Y 5SP1.

PROBLEMA 4SP1

CASO	C_1	C_2	COSTO (3 1 AÑO)
1	H_1 0.85171	0.85700	3612
	H_2 0.42586	0.56781	
2	H_1 0.42586	0.85700	3554
	H_2 0.56781	0.85171	
3	H_1 0.56781	0.85700	3744
	H_2 0.85171	0.42581	

PROBLEMA 5SP1

CASO	C_1	C_2	C_3	
1	H_1 0.17034	0.28390	0.42586	7381
	H_2 0.56781	0.70976	0.85171	
2	H_1 0.42586	0.28390	0.56781	7014
	H_2 0.70976	0.17034	0.85171	
3	H_1 0.56780	0.28390	0.70976	7879
	H_2 0.17030	0.42586	0.85171	

La figura 6.10 muestra la solución de la red flexible para los pro lemas 6SPJR para dos casos diferentes.

a) Asumiendo una distribución uniforme de todas las variables con un rango de distribución $\pm 5^{\circ}$ C en las temperaturas y $\pm 10\%$ en las velocidades de flujo.

b) Asumiendo una distribución normal de todas las variables dentro del rango anterior, pero con una desviación estándar de $\pm 3\%$.

Finalmente la tabla 6.4 muestra una comparación de los resultados obtenidos en ambos casos tomando un intervalo de confianza de 99%. Como puede observarse, los resultados obtenidos en ambos casos, caen dentro de este intervalo de confianza, por lo que las áreas obtenidas por el algoritmo son suficientes para absorber las fluctuaciones de las variables.

TABLA 6.4 INTERVALO DE CONFIANZA EN AREAS OBTENIDAS PARA EL PROBLEMA 6SPJR-1

CAMBIADOR	INTERVALO DE CONFIANZA 99%		INTERVALO DE 100%
	VARIABLES DISTRIBUIDAS NORMALMENTE	VARIABLES DISTRIBUIDAS UNIFORMEMENTE	
1	9.7	10.8	11.2
2	24.5	30.3	38.2
3	14.1	16.1	18.1
4	0.0	0.0	2.3
5	8.1	8.9	9.6
6	51.5	61.4	79.8
7	70.8	74.5	79.1

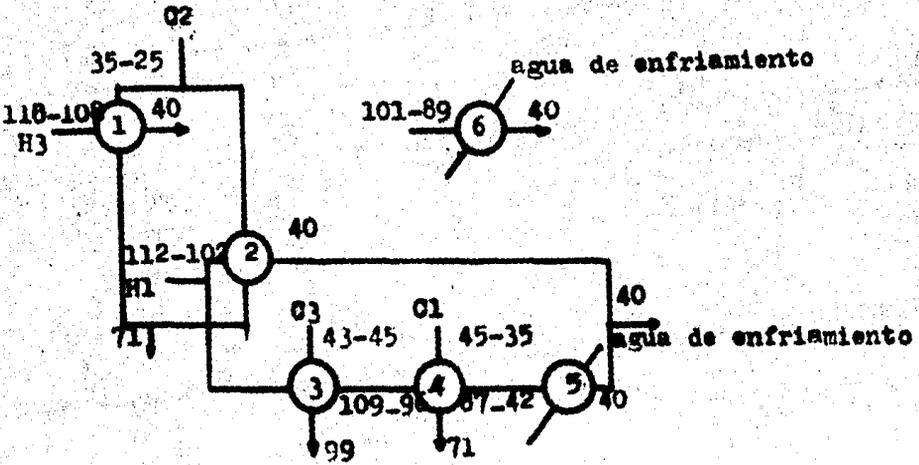
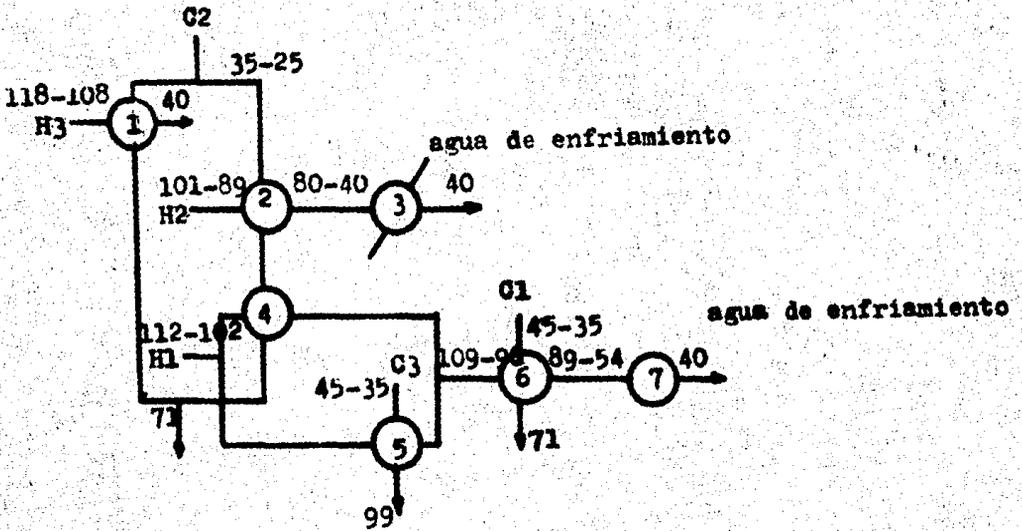


FIGURA 6.10

6.2 CONCLUSIONES

El uso eficiente de los recursos ha sido, desde siempre, uno de los problemas más importantes en todos campos del quehacer humano, esto es particularmente cierto en la ingeniería Química, en donde el uso eficiente de la energía es una de sus tareas de mayor trascendencia al repercutir directa y fuertemente en el costo total de todo proceso.

En este sentido, el conocimiento, comprensión y manejo de los conceptos de la optimización son de gran importancia para todo Ingeniero Químico interesado en el diseño de procesos intrínsecamente eficientes.

En este trabajo se presentaron varios métodos de síntesis de redes de intercambio de calor óptimas desde varios puntos de vista.

1. El algoritmo del área mínima que ayuda a sintetizar redes de máxima recuperación de calor y mínimo costo.
2. El método TI resuelve el problema obteniendo redes de intercambio de calor con máxima recuperación de calor; aunque no optimiza el costo de la misma.
3. El método TC a partir de argumentos termodinámicos y topológicos permite encontrar redes de intercambio de calor de máxima recuperación de calor sujetas a las restricciones de mínimo número de unidades y sin usar división de corrientes.

4. El método del pliegue donde se aplica el principio del pliegue (The pinch) a la síntesis de redes de intercambio de calor con máxima recuperación de calor.

Estos métodos tienen en común el ser métodos relativamente sencillos de aplicar en problemas pequeños, medianos (no mayores de seis corrientes). Su aplicación en problemas grandes (de ocho o más corrientes) es difícil.

Para los métodos TI y TC se han desarrollado programas de computo, lo que elimina esta falla.

La comparación directa de los diferentes métodos, no puede hacerse ya que cada uno de ellos está planteado para objetivos diferentes. Sin embargo, lo que sí puede decirse es que el nuevo método aquí presentado, es más completo, ya que además de asegurar la optimización desde los puntos de vista de recuperación de energía, número de unidades y costo total (al mismo tiempo), permite la extensión del algoritmo al considerar modelos más realistas para la síntesis de redes de intercambio de calor óptimas. La incorporación de coeficientes globales de transferencia de calor, la opción de multipaso y la flexibilidad en el comportamiento de la red, representa un avance significativo no sólo en el conocimiento de síntesis de redes de intercambio de calor, sino en la ingeniería de procesos en general.

6.3 COMENTARIOS SOBRE FUTURAS INVESTIGACIONES

En el campo de síntesis de redes de intercambio de calor pueden vislumbrarse desarrollos en dos sentidos. En uno sería el realizar mejoras al modelo general incorporando el manejo de velocidades de flujo capacidad calorífica en función de la temperatura y corrientes susceptibles a cambiar de fase. El otro sentido es el que se espera más desarrollo es en el de la integración de programas de síntesis de redes de intercambio de calor a paquetes simuladores generales que permitan el diseño de procesos integrales de uso eficiente de energía. En el campo de flexibilidad, ésta es una de las áreas con amplias perspectivas en todos los campos de la ingeniería de procesos.

BIBLIOGRAFIA.

1. BRIVERIDGE S.G., SHECHTER S.R.
OPTIMIZATION THEORY AND PRACTICE
MC. GRAW-HILL
TOKIO, JAPON 1970
2. GENA V., MUSTACCHIE C., NATALI F.
"SYNTHESIS OF HEAT EXCHANGE NETWORKS;
A NON ITERATIVE APPROACH"
CHEM. ENG. SCIENCE VOL 32
pp 1227-1231, 1977
3. GERDA, JAINE
TRANSPORTATION MODELS OF THE OPTIMAL SYNTHESIS
OF HEAT EXCHANGER NETWORK
PH.D. THESIS CARNEGIE-MELLON UNIVERSITY, 1982
4. GERDA J., WESTERBERG A.W., MASSO D., LINNHOFF B.
"MINIMUM UTILITY USAGE IN HEAT EXCHANGER
NETWORK SYNTHESIS".
CHEM. ENG. SCIENCE, VOL 38, No. 3
pp. 373-387, 1983
5. FLOWER J.R., LINNHOFF B.
"THERMOYDYNAMIC ANALYSIS IN THE DESIGN OF
PROCESS NETWORKS"
COMPUTERS AND CHEM ENG., VOL 3.
pp. 283-291, 1979
6. GOMEZ, M. JUAN SALVADOR
SINTESIS DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR
TESIS PROFESIONAL E.N.E.P. "ZARAGOZA" U.N.A.M.
MEXICO 1984
7. GRIMES L.E., RYCHENER M.D., WESTERBERG A.W.
"THE SYNTHESIS AND EVALUATION OF NETWORKS OF
HEAT EXCHANGER THAT FEATURE THE MINIMUM
NUMBER OF UNITS"
CHEM. ENG. COMMUN, VOL 14
pp. 339-360, 1982

8. GROSSMAN E.B., SARGENT H.W.
"OPTIMUM DESIGN OF HEAT EXCHANGER NETWORKS"
COMPUTER AND CHEM. ENG. VOL 2
pp 1-7, 1977
9. GUTHRIE, M.K.
"CAPITAL COST ESTIMATING"
CHEM. ENG. MARZO 1969
10. HODMAN, E.C.
"OPTIMUM NETWORKS FOR HEAT EXCHANGE"
PH.D. THESIS UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA, 1971
11. HUSAIN A., GANGIAH
"OPTIMIZATION TECHNIQUES FOR CHEMICAL ENGINEERS"
MC. MILLAN COMPANY
NUEVA DELHI INDIA, 1976
12. JAUFFRED, M.F. Y ET. AL
"METODOS DE OPTIMIZACION"
REPRESENTACION Y SERVICIOS DE INGENIERIA
MEXICO, 1974
13. KERN, DONALD
"PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR"
C.E.C.S.A.
MEXICO, 1971
14. KESLER, M.G.
"OPTIMAL NETWORKS OF HEAT EXCHANGE"
PH.D. THESIS OF NEW YORK, 1970
15. KESLER M.G., PARKER R.O.
"OPTIMAL NETWORKS OF HEAT EXCHANGE"
CHEM. ENG. PROGRESS SYM. SERIES VOL 65, No. 92
pp. 111-128, 1970
16. KOBAYASHI S., UMEDAT., ICHICAWA A.
"SYNTHESIS OF OPTIMAL HEAT EXCHANGE SYSTEMS, AN
APPROACH BY THE OPTIMAL ASSIGNMENT PROBLEM IN
LINEAR PROGRAMMING"
CHEM. ENG. SCIENCE, VOL. 26
pp. 1367-1380, 1971

17. LINNHOF B., FLOWER J.R.
"SYNTHESIS OF HEAT EXCHANGER NETWORKS II
EVOLUTIONARY GENERATION OF NETWORKS WITH VARIOS
CRITERIA OF OPTIMALITY"
AICHE J., VOL 24, No. 4,
pp. 642-654, 1978a.
18. LINNHOF B., FLOWER J.R.
"SYNTHESIS OF HEAT EXCHANGER NETWORKS I.
SYSTEMATIC GENERATION OF ENERGY OPTIMAL NETWORKS"
AICHE J. VOL. 24 No. 4
pp. 633-642, 1978b.
19. LINNHOF B., HINDMARSH E.
"THE PINCH DESIGN METHOD FOR HEAT EXCHANGER
NETWORKS"
CHEM. ENG. SCIENCE, VOL. 38,
pp. 745-763, 1983
20. LINNHOF B., MASON D.R., WARKALE I.
"UNDERSTANDING HEAT EXCHANGER NETWORKS"
COMPUTERS AND CHEM. ENG., VOL 3
pp. 295-302, 1979
21. LUTHE Y ET AL.
METODOS NUMERICOS
LIMUSA
MEXICO, 1981
22. MASSO H.A., RUDD F.D.
"THE SYNTHESIS OF SYSTEM DESIGNS, II HEURISTIC
STRUCTURING"
AICHE J. VOL 15, No. 1
pp. 10-15, JANUARY 1969
23. MOTARD R.L.
"PROCESS SYNTHESIS"
COMPUTERS AND CHEM. ENG., VOL 3
pp. 13-15, 1979
24. NISHIDAN., KOBASHI S., ICH IKAWA A.
"OPTIMAL SYNTHESIS OF HEAT EXCHANGE SYSTEMS.
NECESSARY CONDITIONS FOR MINIMUM HEAT TRANSFER
AREA AND THEIR APPLICATION TO SYSTEM'S SYNTHESIS"
CHEM. ENG. SCIENCE, VOL 26
pp. 1841-1856, 1971

25. NISHIDA N., LIU Y.A., LAPIDUS L.
 "STUDIES IN CHEMICAL PROCESS DESIGN AND SYNTHESIS
 III. A SIMPLE AND PRACTICAL APPROACH TO THE
 OPTIMAL SYNTHESIS OF HEAT EXCHANGER NETWORKS"
 AIChE J. VOL 23 No. 1
 pp. 77-93, JANUARY, 1977

26. NISHIDA N., STEPHANOPOULOS G.
 WESTERBERG A.W.
 "A REVIEW OF PROCESS SYNTHESIS"
 AIChE J., VOL. 27, No. 3,
 pp. 321-351, May 1981

27. PAPOULIAS S.A., GRISSMAN E.I.
 "A STRUCTURAL OPTIMIZATION APPROACH IN PROCESS
 SYNTHESIS - I UTILITY SYSTEMS"
 COMPUTER AND CHEMICAL ENG. VOL 7, No. 6
 pp. 695-706, 1983

28. PARKINSON, ALAN R.
 "THE DESIGN OF OPTIMAL HEAT EXCHANGER NETWORKS"
 PH. D. THESIS UNIVERSITY OF ILLINOIS 1982

29. PARKINSON A.R., HERMAN J.S.
 PEDERSEN C.O., TEMPLEMAN A.W.
 "THE OPTIMAL DESIGN OF RESILIENT HEAT
 EXCHANGER NETWORKS"
 AIChE SYMPOSIUM SERIES, 1982

30. PHO T.K., LAPIDUS L.
 "TOPICS IN COMPUTER-AIDED DESIGN: PART II
 SYNTHESIS OF OPTIMAL HEAT EXCHANGER NETWORKS
 BY TREE SEARCH ALGORITHMS"
 AIChE J., VOL 19, No. 6,
 pp 1182-1189, NOVEMBER, 1973

31. PONTON J.W. DONALDSON R.A.B.,
 "A FAST METHOD FOR THE SYNTHESIS OF OPTIMAL
 HEAT EXCHANGER NETWORKS"
 CHEM. ENG. SCIENCE, VOL 29,
 pp. 2373-2377, 1974

32. RAGHAVAN, S.
 "HEAT EXCHANGER NETWORK SYNTHESIS"
 Ph. D. THESIS
 PURDUE UNIVERSITY, 1977

33. VENTSEL, ELENA
"INVESTIGACION DE OPERACIONES"
ED. MIR
MOSCU, 1983

APENDICE

NOTAS GENERALES SOBRE EL PROGRAMA DE COMPUTO

A.1 LENGUAJE Y CAPACIDAD

Para correr el programa de El Método de Parkinson (y cuyo listado aparece en este apéndice) en otro sistema, sólo se requiere

1. Un compilador Fortran
2. Una capacidad de cuando menos 60 KBytes

A.2 ESTRUCTURA

Ahora bien, por la forma en que está estructurado el programa, no puede utilizarse por secciones. Es decir, no se puede correr sólo una parte del programa intentando realizar alguna función o cálculo específico, como el calcular solo la estructura de la red sin calcular el costo de la misma o calcular sólo las áreas aproximadas de los intercambiadores.

Esto debido a que, tal como se mencionó en la Sección 5, - la construcción de la red se va realizando paso a paso, analizando cada una de las posibles combinaciones entre las corrientes y para cada combinación analizada se va calculando su costo asociado de tal forma que la red final será aquella que tenga las combinaciones de costo mínimo. (Ver fig. 5.3).

En la siguiente página, se muestra el diagrama de flujo general del Programa.

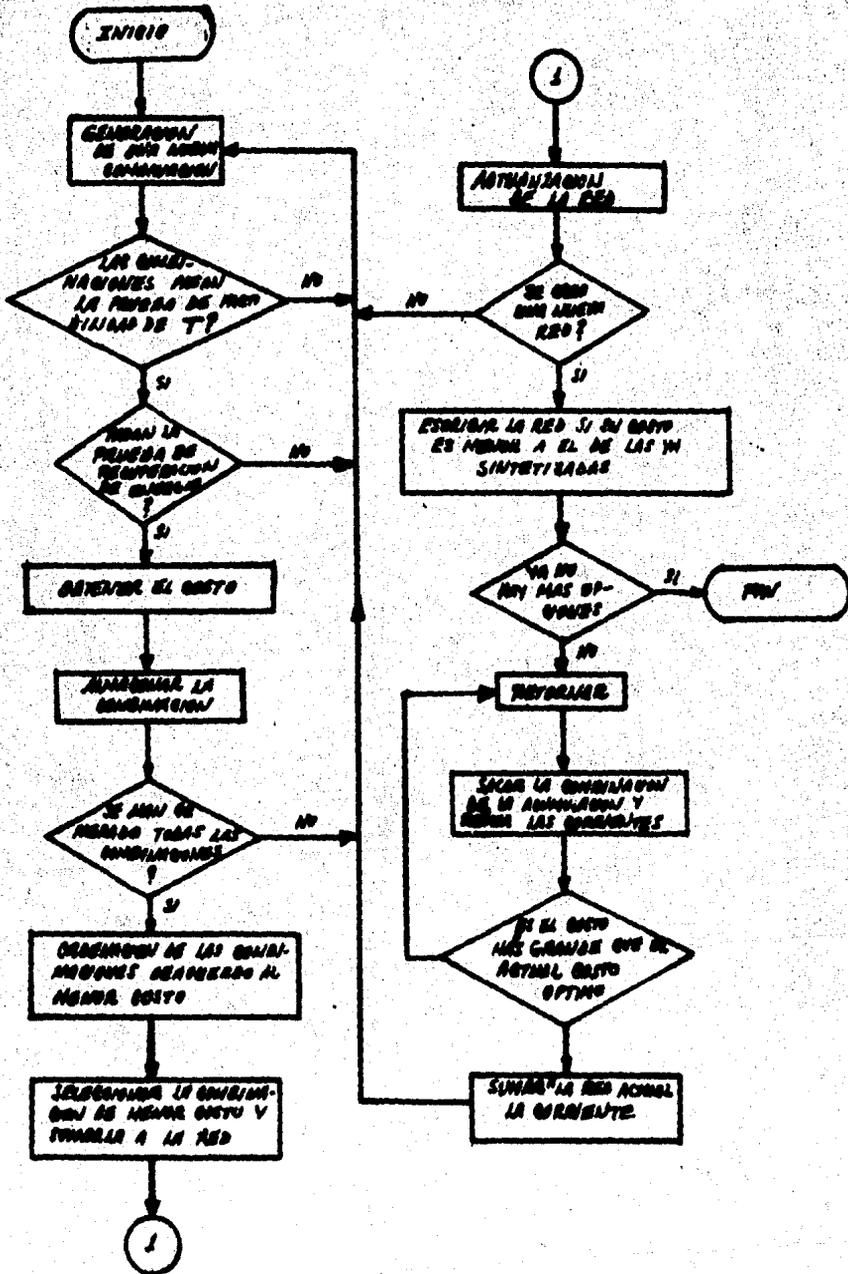


DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL

LISTADO DEL PROGRAMA

TESIS CON FALLA DE ORIGEN


```

5700      DTI=THI-TCO
5800      STZ=THO-TCI
5900      PATIO=AMAXI,DTI,ITCI/AIHIK(DTI,DTI)
6000      IPTRO=PT*4
6100      IF(1PTR,DT,NO,THO,STON) ?
6200      ADD(2,1PTI)-BLNGL(1,1,1)
6300      STK(2,1PTI)=THO
6400      STK(4,1PTI)=THO
6500      STK(3,1PTI)=THO
6600      STK(1,1PTI)=TCI
6700      STK(2,1PTI)=TCI
6800      STK(3,1PTI)=TCI
6900      STK(4,1PTI)=TCI
7000      STK(1,1PTI)=CC
7100      STK(2,1PTI)=CC
7200      STK(3,1PTI)=CC
7300      STK(4,1PTI)=CC
7400      IF(437001-NT(2),LT,1,1)DTL=DTI+PTI*2
7500      C=CH+THI-THO
7600      IF(437001-NT(2))GO TO 100
7700      PUSH(1)SHLL(THI,THO,TCI,TCO)
7800      PUSH(1)X(1)SHL(1,0)
7900      CALL(1)X(1)SHL(1,0)
8000      C      WRIT(0,1)X(1)SHL(1,0)
8100      TCO      FUR(1)X(1)SHL(1,0)
8200      TCO      CONTINU:
8300      C      WRIT(0,1)X(1,1)SHL(1,0)
8400      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
8500      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
8600      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
8700      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
8800      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
8900      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9000      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9100      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9200      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9300      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9400      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9500      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9600      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9700      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9800      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)
9900      STK(1,1PTI)=X(1,1)SHL(1,0)

```

```

0000336C
0000340C
0000350C
0000360C
0000370C
0000380C
0000390C
0000400C
0000410C
0000420C
0000430C
0000440C
0000450C
0000460C
0000470C
0000480C
0000490C
0000500C
0000510C
0000520C
0000530C
0000540C
0000550C
0000560C
0000570C
0000580C
0000590C
0000600C
0000610C
0000620C
0000630C
0000640C
0000650C
0000660C
0000670C
0000680C
0000690C
0000700C

```




```

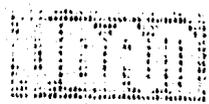
14400      120  CONTINUE
14500      C   CALL SCD010,T2)
14600          IF(T2-T1,LT-PT200 TO 125
14700          T1=T2
14800          WRIT_((,T-2)T2
14900          WRIT_((,T-2)T2
15000          WRIT_((,T-2)(LEVEL(T,2),I-1,LEVEL)
15100
15200      125  CALL UPDAT_
15300          IF(IPTR,(LEVEL)GO TO 11)
15400          WRIT_((,T-2)T2
15500          WRIT_((,T-2)T2,OPT
15600      C   CALL SCD010,T2)
15700          T0=T1-T2
15800          WRIT_((,T-2)T2,TOTAL TIME=T,TOTTIME
15900          WRIT_((,T-2)T2,TOTAL TIME=T,TOTTIME
16000          STOP??
16100
16200      130  CALL JLTFRK
16300          GO TO 12)
16400      135  FORMATE14,"NOV 05,"(2)I5)
16500      14)  FORMATE14,"(NOV 05) RECD=",(5)TA,"CJCTO MINIM=",(13)2)
16600      14)  FORMATE14,"(NOV 05) TRAJI URRIDO (1500)000=",(13)3)
16700      15)  FORMATE14,"(NOV 05)
16800          (NOV 05)
16900
17000      SUMPROJIL RESULT
17100      INTLGLI 30T
17200      L00-CAL 00)
17300      COMMM/INT/HMAY,HP,C,40)
17400      COMMM/SSV(1),14)
17500      COMMM/AGR/TMI,TIU,CI,TCL,TCO,CC,UCK,DAK,PHAY,OK
17600      COMMM/VS1/TK(TO,TO),D,DT,LZ:SC,SPHT,ILXN,MPASS
17700      COMMM/VS2/TK,HNAY,COST,OPT,OPT,J3,04,MP,EP8,QT,PT,HNDS (20)
17800      DIM=(12)0, HACT,4)
17900      IF(TIME,TC)00,3,3,THO,LT,TC)0,3,3,RTU0)
18000
18100      END

```

```

JOU1740L
0001450C
0001460C
0001470C
00014800
0001490C
0001500C
0001510C
0001520C
0001530C
0001540C
0001550C
0001560L
0001570C
0001580C
0001590C
0001600C
0001610C
0001620C
0001630L
0001640L
00016500
0001660C
0001670C
0001680C
0001690C
0001700C
0001710C
0001720C
0001730C
0001740C
0001750C
0001760C
0001770C
0001780C
00017900
00018000
00018100
00018200
0001830C

```




```

21600 125 WRITE(6,14)NACT,1)
21700 STOP
21800 140 FORMAT(1X,"LA TEMPERATURE POSSIBLE TOJAJJA ZB WAZA",4F3.2)
21900 END
22000
22100 SUBROUTINE HAFCAL
22200
22300 INTEGER ISY
22400 COMMON/STRH/M1,ISTR4,1,13
22500 COMMON/STRG/M2,CSTR4,1,13
22600 COMMON/HAF/HAF,IAF,3,433
22700 COMMON/SS/SSTR1,1,10
22800 COMMON/IAI,IAF
22900 105 HAF(1,1)=0.0
23000 DO 110 I=1,41
23100 IF(CSTR(1,1).LE.0.0)GO TO 910
23200 CALL HAFIP(HAF,IAF,ISTR(1,1),ISTR(2,1),ISTR(3,1))
23300
23400 110 CONTINUE
23500 DO 110 I=1,41
23600 IF(CSTR(1,1).LE.0.0)GO TO 910
23700 CALL HAFIP(HAF,IAF,CSTR(1,1),CSTR(2,1),CSTR(3,1))
23800
23900 115 CONTINUE
24000 CALL HAFIP(HAF,IAF,1,1,1,1,1,1)
24100 RETURN
24200 END
24300 SUBROUTINE HAFIP(LARRAY,ISTR1,ISTR2,ISTR3)
24400 DIMENSION IARRAY(4)
24500 IF(ISTR1.EQ.0)GO TO 120
24600 IO I=1,41
24700 IF (ARRAY(1,1).EQ.0)GO TO 115
24800 105 CONTINUE
24900 110 WRITE(6,15)ISTR1,ISTR2
25000 WRITE(6,7)M CRRON 31 ARRAY
25100 DO 110 I=1,41
25200 90 WRITE(6,21)(ARRAY(I,1),J=1,2)
25300 CONTINUE

```

```

0C02160C
0C02170C
0C02180C
0C02190C
0C02200C
0C02210C
0C02220C
0C02230C
0C02240C
0C02250C
0C02260C
0C02270C
0C02280C
0C02290C
0C02300C
0C02310C
0C02320C
0C02330C
0C02340C
0C02350C
0C02360C
0C02370C
0C02380C
0C02390C
0C02400C
0C02410C
0C02420C
0C02430C
0C02440C
0C02450C
0C02460C
0C02470C
0C02480C
0C02490C
0C02500C
0C02510C
0C02520C
0C02530C
0C02540C

```



```

28700      N#N#401
28800      NSTR(4,1) (CSTR(1,1)+CSTR(2,1)+CSTR(3,1))
29000      ST=ST+CSTR(1,1)+CSTR(2,1)+CSTR(3,1)
29100      C1=ST+CSTR(4,1)
29200      N#N#402
29300      NAF(1,N#N#402)=NSTR(4,1)
29400      NAF(1,N#N#402)+CSTR(2,1)
29500  105 CONTINUE
29600      GO TO 101,100
29700      IF (CSTR(3,1) LE 0.001) GO TO 113
29800      N#N#401
29900      CSTR(4,1)=(CSTR(1,1)+CSTR(2,1)+CSTR(3,1))
30000      ST=ST+CSTR(1,1)+CSTR(2,1)+CSTR(3,1)
30100      C2=C2+CSTR(4,1)
30200      N#N#402
30300      NAF(1,N#N#402)=CSTR(1,1)
30400      NAF(1,N#N#402)+CSTR(2,1)
30500  110 CONTINUE
30600      ST=0.0
30700      ST=1
30800      IF (CSTR(1,1) EQ 'DATE') GO TO 4
30900      IF (CSTR(1,1) EQ 'LIST') GO TO 5
31000      WRITE(6,10) ST, ST, ST
31100      WRITE(6,11) (CSTR(1,1), I=1,4), J=1, N1
31200      WRITE(6,12) (CSTR(1,1), I=1,4), J=1, N2
31300      STOP 4
31400  111 FORMAT(4, '10 5. 5. PROBLEMA COMBADO', /, '01', G13.5, '02', /,
31500 /, '03', G13.5, '04', /)
31600  112 FORMAT(4, '05', /)
31700      END
31800
31900
32000  C      EN ESTA SUBRUTINA SE DAN LAS OPCIONES DE CAMPO DE PARAMETROS
32100  C      Y MULTIPLICACION DE LLEN LOS DATOS
32200  C
32300      ESCRIBIR EL REPORT
32400      COMPILE/ST=1/AM,15746,100
32500      COMMON/ST=1/AM,15746,100) D.B.T. 1.1.1.1 (REV. 1.00)

```

```

06028500
06028600
06028700
06028800
06028900
06029000
06029100
06029200
06029300
06029400
06029500
06029600
06029700
06029800
06029900
06030000
06030100
06030200
06030300
06030400
06030500
06030600
06030700
06030800
06030900
06031000
06031100
06031200
06031300
06031400
06031500
06031600
06031700
06031800
06031900
06032000
06032100
06032200

```



```

25100      WRITE(6,7) ' ERROR IN ARRAY'
25200      GO TO 25100
25300      GO WRITE(6,7)(ARRAY(I,1),J=1,2)
25400      STOP 1
25500      I=I+1
25600      GO TO 110
25700      ARRAY(I,1)=ARRAY(I,1)+F
25800      IF(ARRAY(I,1).LE.1) GO TO RETURN
25900      CONTINUE
26000      GO TO 110
26100      TIME ARRAY(I,1)
26200      GO TO 110
26300      ARRAY(I,1)=ARRAY(I,1)+(ARRAY(I,1)-ARRAY(I,1))*ARRAY(I,1)
26400      CONTINUE
26500      RETURN
26600      TIME FORMAT('*** JAFCH ***-DIFFERENTS TEMPERATURE',/,F0X,'THI-',
26700      1003.0,0X,'TPOCH',F10.0)
26800      TIME FORMAT(14,3F14.2)
26900      END
27000
27100      SUBROUTINE LIST
27200      INTEGER ISF
27300      COMMON/STR1/NI,ISTR(4,1)
27400      COMMON/STR2/IC,ISTR(4,1)
27500      COMMON/IAF/IAF(4,4)
27600      COMMON/IS/ISF(1,1)
27700      COMMON/STR3/IX,INXT,COST,OPT,DO"1,02,UM,OP1,CPS,OT,PT,HNDS(20)
27800
27900      GO 20
28000      GO 60
28100      IT=01
28200      NX=2
28300      IIAF=J
28400      GO TO 100
28500      IF(NXT(1,1).LE.1) GO TO 100

```

```

00023000
00023100
00023200
00023300
00023400
00023500
00023600
00023700
00023800
00023900
00024000
00024100
00024200
00024300
00024400
00024500
00024600
00024700
00024800
00024900
00025000
00025100
00025200
00025300
00025400
00025500
00025600
00025700
00025800
00025900
00026000
00026100
00026200
00026300
00026400
00026500
00026600
00026700
00026800
00026900
00027000
00027100
00027200
00027300
00027400
00027500
00027600
00027700
00027800
00027900
00028000
00028100
00028200
00028300
00028400
00028500
00028600
00028700

```



42500 105 CONTINUE
 42600 110 CONTINUE
 42700 RETURN
 42800 END
 42900 SUBROUTINE HOIST
 43000 COMMON/INDEX/1,2,3
 43100 COMMON/STRM/NL,ISTR(4,13)
 43200 COMMON/STRC/IC,CSTR(4,13)
 43300 EG 107-109,111
 43400 CALL HOIST
 43500 105 CONTINUE
 43600 RETURN
 43700 END
 43800 SUBROUTINE HOIST
 43900 COMMON/INDEX/1,2,3
 44000 INTL=0
 44100 COMMON/STRM/NL,ISTR(4,13)
 44200 COMMON/STRC/IC,CSTR(4,13)
 44300 COMMON/APP/IAF,IAF(3,40)
 44400 COMMON/STK/STK(10,13)
 44500 COMMON/STK/INSTR,IPTR,IPTR,IPTR,LIST,LIST,LIST,STK(11,200)
 44600 E=NLIC(1) * ICS(1,13)
 44700 EQUIVALENCE (INSTR(1,1),STK(1,1))
 44800 COMMON/IV3/IA,INSTR,COST,OPT,JOPT,02,03,04,05,06,07,08,09,10,11,12
 44900 IL=IPTR-2
 45000 IF(INSTR(1,1)) GO TO 117
 45100 IF(IPTR-2) IL=0 TO 117
 45200 DO 115 IL,IPTR,1
 45300 L=LIST(1,1) * ICS(1,13)
 45400 IF(L=LIST(1,1) * ICS(1,13)) GO TO 115
 45500 IF(INSTR(1,1)) L=0 TO 115
 45600 CALL HOIST
 45700 105 CONTINUE
 45800 110
 45900 CALL HOIST
 46000 J=LIST
 46100 CALL HOIST

00042500
 00042600
 00042700
 00042800
 00042900
 00043000
 00043100
 00043200
 00043300
 00043400
 00043500
 00043600
 00043700
 00043800
 00043900
 00044000
 00044100
 00044200
 00044300
 00044400
 00044500
 00044600
 00044700
 00044800
 00044900
 00045000
 00045100
 00045200
 00045300
 00045400
 00045500
 00045600
 00045700
 00045800
 00045900
 00046000
 00046100
 00046200




```

54000  (C=027(1,2))
54100  (STR(1,2))-(STR(7,2))-(STR(3,1PTN))
54200  IF((STR(1,2)/CC-L...J2003) (STR(1,2))=,0001
54300  STR(1,2)-(STR(1,2))-(STR(7,1PTN))
54400  IF((STR(1,2)/C%L...0005) (STR(1,2))=,0001
54500  RETURN
54600  H20  STR(1,2) (STR(6,1PTN))
54700  STR(1,2) (STR(7,1PTN))
54800  H25  CONTINUE
54900  IF((STR(1,2))=,001) (STR(1,2))-(STR(1,2))=,0001
55000  IF((STR(1,2))=,001) (STR(1,2))-(STR(1,2))=,0001
55100  RETURN
55200  END
55300  SUBROUTINE GETSTR(I,J)
55400  COMMON/STRH/HA,ISTR(4,10)
55500  COMMON/STRC/IC,CSTR(4,13)
55600  LOGICAL JK
55700  COMMON/437/TH1,TH0,C1,TC1,TC0,C2,CEN,OH,FLX,ON
55800  TH1=ISTR(1,1)
55900  TH0=ISTR(2,1)
56000  C1=ISTR(1,2)
56100  C2=ISTR(1,3)
56200  TC1=ISTR(1,4)
56300  TC0=ISTR(2,4)
56400  C0=ISTR(2,3)
56500  C1X=C1*(C11-MAX1(TC1,TH0))
56600  C2X=C2*(C21-M1(TH1,TC0)-TC1)
56700  C0=FALSE
56800  RETURN
56900  END
57000  SUBROUTINE SORT
57100  COMMON/STRS/STR(1,1),D,PT,L,CCS,PP,MAXI,PASS
57200  COMMON/STRC/STR(1,1PTN),STR(1,1PTN),STR(1,1PTN),STR(1,1PTN),STR(1,1PTN),STR(1,1PTN)
57300  IF((PTN...L...1) RETURN
57400  IN=1
57500  DO 11 J=PTN,1

```

```

54000 00054000
54100 00054100
54200 00054200
54300 00054300
54400 00054400
54500 00054500
54600 00054600
54700 00054700
54800 00054800
54900 00054900
55000 00055000
55100 00055100
55200 00055200
55300 00055300
55400 00055400
55500 00055500
55600 00055600
55700 00055700
55800 00055800
55900 00055900
56000 00056000
56100 00056100
56200 00056200
56300 00056300
56400 00056400
56500 00056500
56600 00056600
56700 00056700
56800 00056800
56900 00056900
57000 00057000
57100 00057100
57200 00057200
57300 00057300
57400 00057400
57500 00057500
57600 00057600
57700 00057700
57800 00057800
57900 00057900

```




```

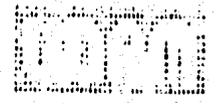
64700 RETURN
64800 END
65000 SUBROUTINE TYP3
65100 LOGICAL OK
65200 COMMON/ADR/THI,THO,CH,TCL,TCO,CC,CCA,CAH,PHAK,OK
65300 CR=.TRUE.
65400 IF(OML.LT.-1X)GO TO 105
65500 IF((THI-THO).GT.2)GO TO 10
65600 CR=.FALSE.
65700 RETURN
65800 100 THI=THO+CC/CH
65900 RETURN
66000 105 CONTINUE
66100 TCO=TCO-CH/CC
66200 RETURN
66300 END
66400 SUBROUTINE TYP4(K)
66500 LOGICAL OK
66600 COMMON/ADR/THI,THO,CH,TCL,TCO,CC,CCA,CAH,PHAK,OK
66700 IF(OML.LT.-1X)GO TO 110,115,110,115,K
66800 IF((THI-THO).GT.2)GO TO 100
66900 RETURN
67000 100 THI=THI-CH/CH
67100 CR=.TRUE.
67200 RETURN
67300 105 CONTINUE
67400 TCO=TCO+CH/CC
67500 CR=.TRUE.
67600 RETURN
67700 END
67800 SUBROUTINE TYP5(K)
67900 LOGICAL OK
68000 COMMON/ADR/THI,THO,CH,TCL,TCO,CC,CCA,CAH,PHAK,OK
68100 IF(OML.LT.-1X)GO TO 110,115,110,115,K
68200 CR=.TRUE.
68300 GO TO 110,110,110,110,K
68400 105 THO=TCO

```

```

UC064700
UC064800
UC065000
UC065100
UC065200
UC065300
UC065400
UC065500
UC065600
UC065700
UC065800
UC065900
UC066000
UC066100
UC066200
UC066300
UC066400
UC066500
UC066600
UC066700
UC066800
UC066900
UC067000
UC067100
UC067200
UC067300
UC067400
UC067500
UC067600
UC067700
UC067800
UC067900
UC068000
UC068100
UC068200
UC068300
UC068400
UC068500

```



```

63000 LOGICAL M
63100 CONT(1/107/PH, TH, CH, TC, TCO, CC, UCA, AM, PHAX, CK
63200 CK=, TRUE.
63300 CU TO(111, 112, 113, 120), K
63400 100 THO=TCO
63500 GO TO 110
63600 110 TCO=THO
63700 115 IF(CHA, JT=CC) GO TO 120
63800 CC=CHK/(TCO=TCO)
63900 120 RETURN
64000 125 CH=CC/(THO=THO)
64100 RETURN
64200 END
64300 SUBROUTINE UPDATE
64400 COMMON/STRM/ML, HSTR(4, 10)
64500 COMMON/STRC/IC, CST(4, 10)
64600 COMMON/STK1/HSTK, IPTK, IPTL, LSTL, LSTJ, LSTK, STK(11, 300)
64700 COMMON/STK2/LL, LEV, LEVEL(2, 20)
64800 COMMON/STL/STL(1, 20)
64900 COMMON/STC/MX, INET, COST, OPT, JUNT, B2, MW, OPT, LPS, RT, PT, WND(20)
65000 DIMENSION IA(11, 30)
65100 EQUIVALENCE(IA, STK(1, 1))
65200 100 IF(IPTL, 10.0) RETURN
65300 ML=LST(1, 0), IAD(10360, IPTK)
65400 C WNET=IC/(1.0), L
65500 IF(HD(10, IPTK, ST=0) GO TO 120
65600 COST=(COST-STK(1, IPTK)
65700 GO TO 111, 4
65800 HSTK(1, 0)=STK(1, LEV)
65900 CSTK(1, 0)=STK(1, LEV)
66000 115 CONTINUE
66100 IPTL=LEV(1, LEV)
66200 LEV=LEV-1
66300 110 IPTL=IPTL-1
66400 GO TO 110
66500 120 CONTINUE
66600 IF(PTK(11, IPTK), ST, COST=0) GO TO 110

```

```

7000100
7000200
7000300
7000400
7000500
7000600
7000700
7000800
7000900
7001000
7001100
7001200
7001300
7001400
7001500
7001600
7001700
7001800
7001900
7002000
7002100
7002200
7002300
7002400
7002500
7002600
7002700
7002800
7002900
7003000
7003100
7003200
7003300
7003400
7003500
7003600
7003700
7003800
7003900
7004000
7004100
7004200
7004300
7004400
7004500
7004600
7004700
7004800
7004900
7005000
7005100
7005200
7005300
7005400
7005500
7005600
7005700
7005800
7005900
7006000
7006100
7006200
7006300
7006400
7006500
7006600
7006700
7006800
7006900
7007000
7007100
7007200
7007300
7007400
7007500
7007600
7007700
7007800
7007900
7008000
7008100
7008200
7008300
7008400
7008500
7008600
7008700
7008800
7008900
7009000
7009100
7009200
7009300
7009400
7009500
7009600
7009700
7009800
7009900
7010000

```




```

74700 7 RATT=1.001
74710 DEF=9.001
74720 CEX=1.
74730 GJ TO 1-1, 1H
74740 IF(CEX) 10, 10, 10
74750 10 GO TO J=1, 1C
74760 IF(CEJ) 20, 10, 10
74770 10 DEKA=MIN(1, (CEX(1), CEJ))
74780 RATT=(1.0, J)/(DEKA+0.01)
74790 DIFF=ABS(CEX(1))-CEJ)
74800 C WRITE(1, 7) DEKA, DEKA, "RATT", RATT, "DIFF", DIFF
74810 IF(RATT.EQ.1) GO TO 2)
74820 IF(RATT.EQ.0) GO TO 1)
74830 IF(DIFF.GE.0.01) GO TO 2)
74840 10 RATT=RATT
74850 DEF=DIFF
74860 CEX=DEKA
74870 IP=1
74880 J=1
74890 20 CONTINUE
74900 10 CONTINUE
74910 IF(CEX.EQ.0) GO TO 3)
74920 C WRITE(1, 7) DEKA, DEKA, "RATT", RATT, "CEX", CEX
74930 FSUM=SUM(IP, J)*DEKA**2)
74940 LCM=CEX
74950 PAP(LCM)=1.0+0.01
74960 Q=PAP(LCM)*CEX
74970 SXT=Q**P2UH
74980 CH(IP)=Q*(IP)-SXT-1.
74990 CC(JP)=Q*(JP)-QJ-1.
75000 GO TO 1)
75010 3) ALA=ABS(CEX(1))-0.01
75020 IF(PAP(SXT)) GO TO 2)
75030 L=CEX-ALA**P1/3
75040 RETURN
75050 4) L=CEX

```

```

00074700
00074800
00074900
00075000
00075100
00075200
00075300
00075400
00075500
00075600
00075700
00075800
00075900
00076000
00076100
00076200
00076300
00076400
00076500
00076600
00076700
00076800
00076900
00077000
00077100
00077200
00077300
00077400
00077500
00077600
00077700
00077800
00077900
00078000
00078100
00078200

```



93300	CONJN/STAC/NO, 1 STR(4, 10)	UC0923UC
93400	CONJN/STAC/NO, 2 STR(4, 10)	UC0924UC
93500	CONJN/STAC/NO, 3 STR(4, 10)	UC0925UC
93600	CONJN/STAC/NO, 4 STR(4, 10)	UC0926UC
93700	1 PT, 11000000	UC0927UC
93800	CONJN/STAC/NO, 1 STR(4, 10)	UC0928UC
93900	CONJN/STAC/NO, 2 STR(4, 10)	UC0929UC
94000	CONJN/STAC/NO, 3 STR(4, 10)	UC0930UC
94100	CONJN/STAC/NO, 4 STR(4, 10)	UC0931UC
94200	10 CONTINUE	UC0932UC
94300	CONJN/STAC/NO, 1 STR(4, 10)	UC0933UC
94400	CONJN/STAC/NO, 2 STR(4, 10)	UC0934UC
94500	CONJN/STAC/NO, 3 STR(4, 10)	UC0935UC
94600	CONJN/STAC/NO, 4 STR(4, 10)	UC0936UC
94700	20 CONTINUE	UC0937UC
94800	CONJN/STAC/NO, 1 STR(4, 10)	UC0938UC
94900	CONJN/STAC/NO, 2 STR(4, 10)	UC0939UC
95000	CONJN/STAC/NO, 3 STR(4, 10)	UC0940UC
95100	CONJN/STAC/NO, 4 STR(4, 10)	UC0941UC
95200	CONJN/STAC/NO, 5 STR(4, 10)	UC0942UC
95300	CONJN/STAC/NO, 6 STR(4, 10)	UC0943UC
95400	CONJN/STAC/NO, 7 STR(4, 10)	UC0944UC
95500	CONJN/STAC/NO, 8 STR(4, 10)	UC0945UC

