

00579  
1 20j



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
MAESTRIA EN INGENIERIA QUIMICA (PROCESOS)**

**INTEGRACION TERMICA DEL TREN DE AROMATICOS DEL  
COMPLEJO PETROQUIMICO DE LA CANGREJERA, VERACRUZ**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**  
**MAESTRIA EN INGENIERIA QUIMICA**  
**P R E S E N T A**  
**VICTOR MANUEL BRIONES VALLEJO**

**MEXICO, D. F.**

**1989**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **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.

**TESIS: "INTEGRACION TERMICA DEL TREN DE AROMATICOS DEL COMPLEJO PETROQUIMICO DE LA CANGREJERA, VERACRUZ".**

<b>CONTENIDO :</b>	<b>Página</b>
Resumen .....	i
Lista de tablas y figuras .....	iii
1. Introducción .....	1
2. Síntesis de redes de intercambio de calor .....	3
2.1 Establecimiento del problema de síntesis .....	3
2.2 Desarrollos mas relevantes .....	4
2.3 Aportaciones de este trabajo .....	10
2.4 Procedimiento de síntesis .....	11
3. Implantación de métodos de cálculo en un Sistema de Cómputo. ....	19
3.1 Características de cada programa de cómputo. ...	21
3.1.1 Programa de cómputo I (desarrollado en este trabajo). ....	21
3.1.2 Programa de cómputo II (paquete matemático)	28
3.1.3 Programa de cómputo III (desarrollado en este trabajo). ....	31
3.1.4 Programa de cómputo IV (paquete matemático)	40
4. Análisis de las plantas que integran el tren de aromá- ticos del Complejo Petroquímico de la Cangrejera, Ver. ....	49
4.1 Descripción de la función de cada planta .....	49
4.2 Bases del análisis .....	55
4.3 Consumo de servicios considerado en el diseño original de cada planta. ....	57

4.4 Estrategia de análisis .....	59
4.5 Resultados del análisis .....	61
4.6 Discusión de resultados .....	70
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	80
Apéndice A Método de la Tabla Problema para determinar el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento, y localizar el punto de pliegue. Aspectos importantes sobre el punto de pliegue. ....	84
Apéndice B Método para determinar el número mínimo de unidades de intercambio de calor. ....	102
Apéndice C Método para determinar la configuración final de la red de recuperación de calor. ....	109
Apéndice D Método para determinar el efecto de modificar el número de unidades de intercambio de calor sobre el consumo de servicios. (Formulación desarrollada en este trabajo). ....	126
Apéndice E Modelo del Transbordo. ....	137
Apéndice F Método de Diseño del Punto de Pliegue (Reglas para encontrar un arreglo posible de la red de recuperación de calor). ....	142
Apéndice G Ejemplo de Cálculo. ....	163
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS. ....	255

## RESUMEN.

En este trabajo se presenta una metodología para la síntesis óptima de redes de intercambio de calor. La síntesis se divide en varias etapas. En primer lugar, se calculan los requerimientos mínimos de servicios de calentamiento y enfriamiento. Después, se determina el número mínimo de unidades de intercambio de calor. En el último paso, se obtiene la configuración final de la red mediante la solución de un problema de optimización donde se minimiza el costo de la red. Los métodos empleados se basan en desarrollos recientes publicados en la literatura.

También, se desarrolla un método nuevo en el que se determina el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento habiéndose establecido un número de unidades de intercambio de calor. Este método se utiliza para determinar el efecto de reducir el número de unidades de intercambio de calor sobre el consumo de servicios.

La metodología de síntesis se aplicó al análisis de las plantas del tren de aromáticos de la Canchajera, Veracruz, de Petróleos Mexicanos, de donde se obtienen conclusiones importantes sobre la aplicabilidad y funcionalidad de la metodología presentada en este trabajo.

## ABSTRACT.

This paper presents a systematic procedure for the optimum synthesis of heat exchanger networks. The systematic procedure goes through a series of steps. First, the minimum heating and cooling utilities consumption is calculated. Second, the minimum number of heat exchanger units is determined. Finally, the network configuration is obtained through an optimization procedure where the investment cost is minimized. The methods and techniques used here are based on recent developments from literature.

Also in this paper, it is presented a new method to determine the heating and cooling utilities consumption when the number of heat exchanger units is specified by the designer. This method is employed to evaluate the effect of decreasing the number of heat exchanger units on the heating and cooling utilities consumption.

The systematic procedure proposed was used to analyze the energy integration of the plants of La Canguera, Veracruz, PEMEX Aromatics Complex, obtaining important conclusions about the applicability of this procedure.

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.

\*\*\* TABLAS \*\*\*

CAPITULO 4.

- TABLA 4.1 Consumo de servicios y recuperación de calor considerados en el diseño original de cada planta del tren de aromáticos.
- TABLA 4.2 Consumo de servicios y recuperación de calor calculados para cada planta, empleando un acercamiento de temperaturas límite igual al del diseño original.
- TABLA 4.3 Consumo de servicios y recuperación de calor calculados para cada planta, empleando un acercamiento de temperaturas límite de 20 GF.
- TABLA 4.4 Comparación del consumo de servicios considerado en el diseño original y el calculado con el método de la Tabla Problema.
- TABLA 4.5 Estimación del costo total de la red de recuperación de calor del diseño original.
- TABLA 4.6 Resultados obtenidos en la determinación del número mínimo de unidades de intercambio de calor, configuración final y costo total de la red de recuperación de calor, empleando un acercamiento de temperaturas límite igual al del diseño original de cada planta.
- TABLA 4.7 Resultados obtenidos en la determinación del número mínimo de unidades de intercambio de calor, configuración final y costo total de la red de recuperación de calor, empleando un acercamiento de temperaturas límite igual a 20 GF.

**TABLA 4.8** Resultados obtenidos en la determinación del número mínimo de unidades de intercambio de calor, configuración final y costo total de la red de recuperación de calor, empleando un número de unidades de intercambio de calor igual al del diseño original.

**TABLA 4.9** Resumen final de los resultados del análisis de las plantas del tren de aromáticos.

#### **APENDICE A.**

**TABLA A.1** Datos de las corrientes para el problema ejemplo.

**TABLA A.2** La Tabla Problema para el ejemplo de cálculo.



\*\*\* FIGURAS \*\*\*

**CAPITULO 2.**

**FIG. 2.1** Máxima integración de calor para las curvas compuestas caliente y fría.

**CAPITULO 4.**

**FIG. 4.1** Plantas del Tren de Aromáticos.

**FIG. 4.2** Red de intercambio de calor de la planta de Isomerización de Xilenos.

CASO: Diseño original.

**FIG. 4.3** Red de intercambio de calor de la planta de Isomerización de Xilenos.

CASO:  $\Delta T_{min} = 64$ . GF

**FIG. 4.4** Red de intercambio de calor de la planta de Isomerización de Xilenos.

CASO:  $\Delta T_{min} = 20$ . GF.

**FIG. 4.5** Red de intercambio de calor de la planta de Hidrodesalquilación de Tolueno.

CASO: Diseño original.

**FIG. 4.6** Red de intercambio de calor de la planta de Hidrodesalquilación de Tolueno.

CASO:  $\Delta T_{min} = 100$ . GF

**FIG. 4.7** Red de intercambio de calor de la planta de Hidrodesalquilación de Tolueno.

CASO:  $\Delta T_{min} = 20$ . GF.

**APENDICE A.**

**FIG. A.1 (a)** Diagrama de flujos de calor entre subredes.

**(b)** Subredes combinadas en una región caliente y una región fría.

- FIG. A.2 (a) Efecto de transferir calor a través del punto de plieque.  
(b) Efecto de emplear servicio de enfriamiento arriba del punto de plieque.  
(c) Efecto de utilizar servicio de calentamiento abajo del punto de plieque.
- FIG. A.3 División del punto de plieque mostrado en la representación de malla.
- FIG. A.4 (a) Un problema de umbral.  
(b) Un problema de punto de plieque.  
(c) El acercamiento de temperaturas de umbral ( $\Delta T_{\text{umbral}}$ ).
- FIG. A.5 (a) La correcta localización de un nuevo servicio de calentamiento.  
(b) Distribución de los requerimientos de calentamiento.  
(c) Punto de plieque debido a un servicio.
- FIG. A.6 (a) El número de unidades para la máxima recuperación de calor.  
(b) El número mínimo de unidades global.

#### APENDICE C.

- FIG. C.1 Superestructuras de las corrientes C1, H1, H2 y H3.
- FIG. C.2 Arreglos alternativos en la superestructura de la corriente C1.

#### APENDICE E.

- FIG. E.1 Analogía de la red de recuperación de calor con el modelo del transbordo.
- FIG. E.2 Patrón de flujo de calor en cada intervalo de temperatura.

**APENDICE F.**

- FIG. F.1** (a) Un intercambio "pinch".  
(b) El cambiador 2 no es un intercambio "pinch".  
(c) El cambiador 3 no es un intercambio "pinch".
- FIG. F.2** (a) El diseño del lado caliente no es factible en el punto de plieque.  
(b) División de corrientes en el punto de plieque (lado caliente).
- FIG. F.3** (a) El diseño del lado frío no es factible en el punto de plieque.  
(b) División de corrientes en el punto de plieque (lado frío).
- FIG. F.4** (a) Un intercambio "pinch" factible arriba del punto de plieque.  
(b) Un intercambio "pinch" factible abajo del punto de plieque.
- FIG. F.5** (a) Se involucran todas las corrientes en los intercambios "pinch". La suma de las diferencias de CP de los intercambios "pinch" es igual a la diferencia global de CP's. (intercambios factibles).  
(b) No se involucran todas las corrientes en los intercambios "pinch". La suma de las diferencias de CP de los intercambios "pinch" es menor que la diferencia global de CP's. (intercambios factibles).  
(c) El intercambio "pinch" no es factible basado en la diferencia global de CP's, ya que la excede.
- FIG. F.6** (a) Procedimiento del método de diseño del punto de plieque para el lado caliente.  
(b) Procedimiento del método de diseño del punto de plieque para el lado frío.
- FIG. F.7** (a) La tabla de valores de CP para el lado caliente del problema ejemplo.

- FIG. F.7 (b) y (c) Intercambios "pinch" factibles identificados en la tabla de valores de CP.
- FIG. F.8 (a) La tabla de valores de CP para el lado frio del problema ejemplo.
- (b) Topologías en el punto de pliegue que no son factibles.
- (c) Topologías en el punto de pliegue que son factibles con división de dos corrientes.
- (d) Topologías en el punto de pliegue que son factibles con división de una corriente.

#### APENDICE B.

- FIG. B.1 Curva de calor de la corriente caliente compuesta y curva de calor de la corriente fria compuesta versus temperatura.
- FIG. B.2 Gradiente de temperaturas entre la corriente caliente compuesta y la corriente fria compuesta versus temperatura de la corriente fria.
- FIG. B.3 Flujos de calor entre subintervalos de temperatura versus temperaturas límite de los subintervalos.
- FIG. B.4 (A) Resultados obtenidos en la solución de la superestructura de la corriente caliente 5.
- (B) Resultados obtenidos en la solución de la superestructura de la corriente fria 2.
- (C) Resultados obtenidos en la solución de la superestructura de la corriente fria 3.
- FIG. B.5 Resultados obtenidos en la solución de la superestructura de la corriente fria 6.
- FIG. B.6 Red de intercambio de calor resultante del ejemplo de cálculo.

## 1. INTRODUCCION.

Este trabajo tiene como objetivos el desarrollo de programas de cómputo para la síntesis óptima de redes de intercambio de calor y su aplicación en el análisis de plantas industriales para probar su funcionalidad.

Se hace una revisión general de los desarrollos más relevantes y en base a éstos se propone un procedimiento de síntesis. En este procedimiento la síntesis de redes de recuperación de calor se divide en varias etapas. (i) El cálculo del consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento mediante el método de la Tabla Problema. (ii) El cálculo del número mínimo de unidades de intercambio de calor mediante una formulación de un problema de programación lineal mixta entera el cual se resuelve con un paquete matemático. (iii) La determinación de la configuración final de la red mediante una formulación de un problema de programación no lineal que se resuelve con el paquete matemático SOL/NPSOL de la Universidad de Stanford, E.U.A.

Una alternativa en el procedimiento de síntesis consiste en un análisis de sensibilidad en el que se determina cuanto se incrementa el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento al reducir el número de unidades de intercambio de calor. Para este propósito se desarrolló una formulación que comprende un problema de programación lineal mixta entera la cual se resuelve con un paquete matemático.

Se presentan las características más importantes de los programas de cómputo desarrollados y de igual manera se mencionan las de los paquetes matemáticos requeridos.

Se realiza un análisis de la integración térmica de las plantas del tren de aromáticos de la Canchrejera, Veracruz, de Petróleos Mexicanos, donde se utilizan los programas de

cómputo desarrollados probándose su funcionalidad. El análisis se centra en seis plantas las cuales son susceptibles de mejorar su integración de calor sin necesidad de integrarse con otras plantas. Como resultado de este análisis se hacen algunas recomendaciones referentes a la integración de calor de las plantas y se obtienen conclusiones importantes sobre la aplicabilidad y funcionalidad de los métodos.

En los apéndices se presentan los métodos empleados en la síntesis de redes y se muestra el desarrollo completo de un ejemplo de cálculo.

## 2. SINTESIS DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR.

### 2.1 ESTABLECIMIENTO DEL PROBLEMA DE SINTESIS.

Como se ha mencionado en publicaciones anteriores (3) la red de recuperación de calor es uno de los componentes cruciales en una planta de proceso, dado que su tarea es intercambiar calor entre corrientes del proceso con el propósito de reducir el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento adicionales.

El problema de síntesis de una red de recuperación de calor (objetivo de este trabajo) puede establecerse de la siguiente manera: En un sistema de procesamiento existe un conjunto  $H = (i/i=1, NH)$  de corrientes calientes que se requieren enfriar, y un conjunto  $C = (j/j=1, NC)$  de corrientes frías que se requieren calentar. Para cada corriente caliente  $i$  se conoce su flujo másico  $F_i$ , capacidad calorífica ( $C_{p_i}$ ), y se requiere enfriar de una temperatura inicial  $T_{i1}^s$  a una temperatura final  $T_{i1}^t$ . De manera similar, para cada corriente fría se conoce su flujo másico  $F_j$ , capacidad calorífica ( $C_{p_j}$ ), y se requiere calentar de una temperatura inicial  $T_{j1}^s$  a una temperatura final  $T_{j1}^t$ . Dado que la cantidad de calor que requieren las corrientes calientes y frías es a menudo diferente, y debido a las restricciones termodinámicas (diferencia de temperatura) en la transferencia de calor, se requiere utilizar calentamiento y enfriamiento auxiliares. Consideréese entonces, que se tiene disponibilidad de un conjunto  $S = (a/a = 1, NS)$  de servicios de calentamiento (por ejemplo: vapor de agua, combustible) y de un conjunto  $M = (n/n = 1, NM)$  de servicios de enfriamiento (por ejemplo: agua, refrigerantes).

El objetivo del problema de síntesis es el obtener una red de cambiadores de calor en contracorriente que satisfaga las restricciones impuestas por el diseñador (acercamiento de temperaturas y otras), a un costo anual total mínimo (costo de inversión anualizado más costo anual de operación).

## 2.2 DESARROLLOS MAS RELEVANTES.

Debido al gran número de posibles configuraciones de la red y a las no linealidades involucradas en las funciones de costo de inversión de los cambiadores de calor, en los últimos años la tendencia ha sido la de desarrollar objetivos que simplifiquen y reduzcan el tamaño del problema de síntesis. Aunque estos objetivos no pueden garantizar una rigurosa minimización de los costos, tienen la propiedad de generar redes con una máxima recuperación de calor que a menudo corresponden a una solución óptima o cercana a la óptima.

Los objetivos más importantes pueden resumirse en cuatro desarrollos principales que pueden utilizarse para el diseño de redes energéticamente eficientes. Estos son: consumo mínimo de servicios, número mínimo de unidades de intercambio de calor, costo mínimo de inversión de la red, y modificación de los puntos de pliegue que limitan la integración de calor. Los primeros dos objetivos fueron identificados primeramente por Hohmann (7) y posteriormente por Linnhoff y Flower (2), el tercer objetivo fue desarrollado por Floudas, Ciric y Grossmann (6), mientras que el cuarto objetivo fue propuesto por Umeda y col. (8).

Consumo Mínimo de Servicios. Este es el objetivo más importante para el diseño de una red eficiente de intercambio de calor, dado que corresponde a la máxima integración de calor que pueda obtenerse en una red que sea factible para un acercamiento de temperatura establecido. También, dado que el costo de los servicios comúnmente es el término dominante (del orden de 20 veces el costo de inversión anualizado), este objetivo persite la eliminación de muchas configuraciones de la red que son ineficientes y costosas. La predicción del consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento puede llevarse a cabo antes de desarrollar la estructura real de la red de recuperación de calor.



Posteriormente, este objetivo puede refinarse mayormente con la predicción del costo mínimo de servicios. Esto es necesario y muy recomendable porque en redes reales, comúnmente se emplean una variedad de servicios de calentamiento y enfriamiento, y cada servicio tiene un costo diferente (por ejemplo: combustible, vapor de calentamiento a diferentes niveles de presión, aceites térmicos, agua caliente, agua de enfriamiento, refrigerantes, etc.).

Número Mínimo de Unidades de Intercambio de Calor. Otro objetivo importante es la determinación del número mínimo de unidades de intercambio de calor requerido en la red. Este objetivo intenta minimizar indirectamente el costo de inversión de la red dado que el costo de cada intercambiador se asume como una función cóncava del área de transferencia de calor. De acuerdo a lo señalado por Hohmann (7), el número mínimo de unidades es comúnmente igual a la suma del número total de corrientes de proceso y corrientes de servicio requeridas, menos una unidad.

Red de Costo Mínimo de Inversión. Este objetivo consiste en determinar la configuración final de la red que corresponde al costo mínimo de inversión y que cumple con las restricciones de consumo mínimo de servicios y número mínimo de unidades de intercambio de calor. La configuración de la red de recuperación de calor no está limitada, pudiéndose manejar arreglos serie y/o paralelo de las unidades de intercambio de calor, así como divisiones, mezclados y derivación de las corrientes que intercambian calor.

Modificación de los Puntos de Pliegue. Un punto de pliegue puede considerarse como un cuello de botella que limita la integración de calor que puede alcanzarse en la red. Un ejemplo de un punto de pliegue se muestra en la Fig. 2.1, en la que las curvas compuestas por las corrientes calientes y frías de un proceso se grafican en un diagrama temperatura-entalpía. Obsérvese que la presencia del punto de pliegue limita la máxima integración de calor que es posible.

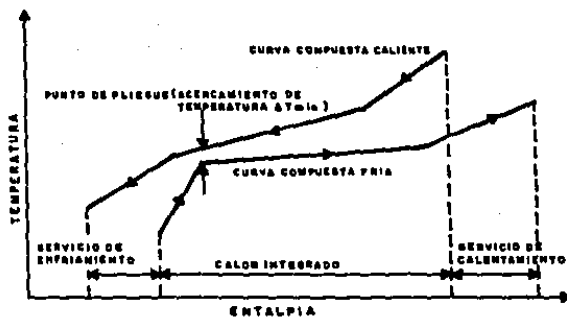


FIG. 2.1 MAXIMA INTEGRACION DE CALOR PARA LAS CURVAS COMPUESTAS CALIENTE Y FRIA.

Por lo tanto, es importante identificar la localización de los puntos de plieque antes de desarrollar el diseño de una red con el propósito de considerar cambios en el proceso que puedan eliminar o modificar estos cuellos de botella y por lo tanto mejorar la integración de calor (18).

Los primeros dos objetivos se han usado en métodos para la síntesis de redes de intercambio de calor eficientes. Flower y Linnhoff (8) propusieron el algoritmo termodinámico-combinatorial que genera todas las redes de número mínimo de unidades de intercambio de calor con consumo mínimo de servicios, sin permitir división de las corrientes. El primer paso en el algoritmo termodinámico combinatorial es dividir el rango completo de temperaturas de las corrientes en intervalos de temperatura de acuerdo a las reglas de partición que permiten un intercambio de calor factible. A continuación, se predicen el consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento mediante el procedimiento de cálculo de la tabla problema reportado por Linnhoff y col. (1 y 2). El último paso consiste en generar todas las redes que requieren un consumo mínimo de servicios y que tienen el menor número de unidades.

Una estrategia similar para la síntesis de redes de recuperación de calor ha sido propuesta por Cerda y col. (12) y Cerda y Westerberg (13, 14 y 15). En la fase inicial se considera el problema del consumo mínimo de servicios. El rango de temperaturas de todas las corrientes se divide en intervalos de temperaturas, pero entonces el problema se modela como un problema de transporte donde se consideran todas las rutas posibles en las que el calor es transportado desde las corrientes calientes hacia las corrientes frías. Dado que el calor puede fluir únicamente de una corriente caliente de mayor temperatura hacia una corriente fría de menor temperatura, se asignan coeficientes de costos grandes a las rutas que son termodinámicamente infactibles. Este modelo de transporte de programación lineal se puede modificar si se considera necesario tomar en cuenta intercambios prohibidos entre ciertas corrientes y se

resuelva empleando el algoritmo de la esquina noroeste. El siguiente paso, consiste en determinar las redes con consumo mínimo de servicios que involucran el menor número de unidades. Esto se realiza mediante una reformulación del problema del transporte como un problema lineal mixto entero, y entonces relajan las restricciones enteras con el propósito de resolverlo como un problema lineal. La estructura final de la red de recuperación de calor se deriva a menudo por cálculos manuales, y si se requiere puede llevarse a cabo la división de corrientes.

Se han resuelto exitosamente varios problemas ejemplo empleando los dos métodos de síntesis descritos anteriormente. Aunque estos métodos no pueden garantizar una red de costo mínimo, se obtienen diseños eficientes que en muchos casos son soluciones óptimas o cercanas a las óptimas. Por lo tanto, los objetivos de consumo mínimo de servicios y número mínimo de unidades proporcionan una herramienta muy poderosa en la síntesis de redes de recuperación de calor.

Papoulias y Grossmann (4) proponen una estrategia de síntesis que hace uso de los dos primeros objetivos. Inicialmente, emplean el modelo del transbordo generándose un problema de programación lineal cuya solución predice el consumo de servicios de costo mínimo con o sin intercambios de calor prohibidos entre corrientes. A continuación, emplean el modelo del transbordo obteniéndose un problema de programación lineal mixto entero y su solución genera redes que involucran un número mínimo de unidades de intercambio de calor con posibilidad de división y mezclado de corrientes, e incluso pueden asignarse preferencias en los intercambios de calor entre corrientes. La principal ventaja de estos modelos consiste en que pueden resolverse con un razonable esfuerzo computacional.

Para derivar la estructura final de la red de recuperación de calor, Floudas, Ciric y Grossmann (6) hacen uso del tercer objetivo. Ellos encuentran la estructura final mediante una formulación que considera todas las posibles configuraciones de la red de intercambio de calor. Esta formulación consiste en un problema de programación no lineal

que puede resolverse por algoritmos de cálculo comunes. La solución que corresponde a una red de costo mínimo de inversión (y que cumple con las restricciones de costo mínimo de servicios y número mínimo de unidades), proporciona la configuración final de la red.

Es importante resaltar que uno de los desarrollos de mayor relevancia en el área de síntesis de redes de intercambio de calor, fué la predicción del consumo mínimo de servicios y la localización del punto de pliegue, porque eliminó la naturaleza combinatorial de este problema.

Este desarrollo (cuyo crédito se debe a Hohmann (7) y Linhoff y Flower (2)), aunado a los desarrollos generados por Grossmann y col. (4 y 6), han permitido que la tarea de obtener redes eficientes de recuperación de calor pueda realizarse en una manera sencilla, rápida y confiable a través de métodos de cálculo que requieren ser implantados en una computadora.

### 2.3 APORTACIONES DE ESTE TRABAJO.

En este trabajo, se implantó un procedimiento de síntesis de redes de intercambio de calor basado en los desarrollos descritos anteriormente. La infraestructura computacional desarrollada se utilizó en el análisis de la integración de calor de las plantas que comprenden al tren de aromáticos del Complejo Petroquímico de la Canchajera, Ver., México, probándose las ventajas que representa el contar con un procedimiento de síntesis automatizado como éste. Adicionalmente, en este trabajo se desarrolló una formulación nueva que permite evaluar el efecto de modificar el número de unidades de intercambio de calor sobre el consumo de servicios.

Esta formulación se incluyó dentro del procedimiento de síntesis y al igual que los otros modelos se utilizó en el análisis de la integración de calor de las plantas mencionadas.

De este análisis se obtienen conclusiones importantes sobre la aplicabilidad y funcionalidad de los métodos de cálculo expuestos.

## 2.4 PROCEDIMIENTO DE SINTESIS.

En base a los desarrollos más relevantes que se han dado en el campo de la síntesis de redes de recuperación de calor descritos en los incisos anteriores, se propone el siguiente procedimiento para la síntesis. Los métodos de cálculo y análisis que se emplean en las diferentes etapas de este procedimiento de síntesis se describen en detalle en los apéndices A, B, C, D, E y F de este trabajo, y en el apéndice B, se presenta el desarrollo completo de un ejemplo de cálculo para un mejor entendimiento de los métodos utilizados y del procedimiento de síntesis que se propone.

### PASO 1. Definición de los intervalos de temperatura.

En este primer paso, se realiza la partición del rango completo de temperaturas de todas las corrientes en intervalos de temperaturas. Los métodos de partición propuestos por Linnhoff y Flower (2), Brimes (9) y Cerda (13) pueden emplearse con este propósito. Sin embargo, el primer procedimiento (presentado por Linnhoff y Flower) produce aproximadamente el doble del número de intervalos para un mismo problema en comparación con los otros dos métodos. Por lo tanto, el procedimiento más eficiente es el propuesto primeramente por Brimes y modificado posteriormente por Cerda, dado que el modelo resultante tiene menor número de intervalos de temperatura que a su vez reduce el tamaño de los modelos del transbordo. En particular, las siguientes reglas se aplican en el método descrito por Brimes:

Regla 1. A la temperatura de entrada de cada corriente caliente y servicio de calentamiento, se resta el acercamiento de temperaturas establecido  $\Delta T_{\min}$ .

Regla 2. Las temperaturas que se generaron al restar el acercamiento de temperaturas  $\Delta T_{\min}$  a la temperatura de entrada de las corrientes calientes y servicios de calentamiento, se colocan en una lista junto con las

temperaturas de entrada de todas las corrientes frías y servicios de enfriamiento. Estas temperaturas, que definen la partición para las corrientes frías, se ordenan en forma decreciente. Las temperaturas de las corrientes calientes y servicios de calentamiento en la lista estarán dadas mediante un incremento de  $\Delta T_{\text{min}}$  a las temperaturas de las corrientes frías y servicios de enfriamiento. Nótese que la temperatura más alta (primer valor en la lista) debe corresponder a un servicio de calentamiento y/o una corriente de proceso caliente, y la temperatura más baja (último valor en la lista) debe corresponder a un servicio de enfriamiento o una corriente de proceso fría, para asegurar que siempre se tenga disponible calentamiento al nivel más alto y enfriamiento al nivel de temperatura más bajo.

Regla 3. Los intervalos de temperatura  $k$  se enumeran en orden ascendente,  $k = 1, 2, \dots, K$ , iniciando desde el par de temperaturas más alto en la lista.

El número de intervalos de temperatura de partición  $K$ , que se obtendrá con este procedimiento estará dado por:

$$K \leq N_H + N_C + N_M + N_S - 1$$

donde:

$N_H$  = número de corrientes calientes de proceso.

$N_C$  = número de corrientes frías de proceso.

$N_M$  = número de servicios de enfriamiento.

$N_S$  = número de servicios de calentamiento.

PASO 2. Predicción del consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento.

En esta etapa, se determina el consumo mínimo de servicios para un problema dado, mediante el método de la Tabla problema (véase el Apéndice A). Este método proporciona el consumo mínimo de servicios y la localización del punto de pliegue, para un acercamiento de temperaturas establecido  $\Delta T_{\text{min}}$ . Aunque con este método no se genera el



diseño real de la red (es decir, no se señalan los intercambios de calor entre las corrientes), se establece la base del diseño de la red, para la que se considerarán todas las redes que consuman el mínimo de servicios establecido. Por lo tanto, este paso de la estrategia de síntesis reduce significativamente el número de redes de recuperación de calor a ser consideradas, sin excluirse los diseños eficientes desde el punto de vista de energía.

**PASO 3. Selección de las redes que tienen el número mínimo de unidades de intercambio de calor.**

Una vez que se ha determinado el consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento, se procede a determinar el número mínimo de unidades y los intercambios de calor que integrarán la red de recuperación de calor. Para este propósito, se emplea la formulación del modelo del transbordo que comprende un problema de programación lineal mixta entera (descrita en el Apéndice B). La solución de este problema puede obtenerse con métodos de cálculo conocidos de ramificación y acotamiento (16 y 17), y con la opción de descomponer la red en subredes.

Es importante señalar que la solución del modelo del transbordo del problema de programación lineal mixta entera, no proporciona directamente la configuración final de la red de intercambio de calor. Sin embargo, la solución contiene toda la información necesaria para derivar la configuración de la red. Específicamente, la solución indica el par de corrientes involucrados en cada intercambio de calor, la cantidad de calor correspondiente que se intercambia, y los intervalos de temperatura en los que tiene lugar el intercambio de calor.

**PASO 4. Derivación de la configuración final de la red de recuperación de calor.**

La configuración final de la red se determina mediante el modelo de la superestructura que comprende un problema de programación no lineal (vease Apéndice C ). En este modelo se deriva una superestructura para cada red o subred que comprende como unidades de intercambio de calor los intercambios de calor obtenidos en el paso 3. Esta superestructura contiene corrientes de interconexión desconocidas que pueden definir arreglos en serie y/o paralelo, así como división de las corrientes o corrientes de derivación.

La superestructura para cada subred se formula como un problema de programación no lineal que tiene como función objetivo la minimización del costo de inversión de los intercambiadores de calor. La solución de este problema proporciona automáticamente para cada subred una configuración de la red de recuperación de calor con las corrientes de interconexión apropiadas para los intercambiadores, así como sus flujos y temperaturas. La configuración final de la red se obtiene simplemente mediante la adición de la configuración de cada subred.

Una observación importante en la formulación es que no puede garantizarse una solución óptima única. Así que la solución que se obtiene puede considerarse únicamente como un mínimo local para el costo de inversión. Sin embargo, esto no representa una desventaja importante en aplicaciones prácticas dado que las funciones de costos son generalmente planas. Adicionalmente, con este modelo puede esperarse que se generen estructuras relativamente simples de la red, siendo una característica muy importante desde un punto de vista práctico.

- Sin embargo, dado que la convergencia de la solución del problema de programación no lineal depende grandemente del tamaño del problema y de la solución inicial que se proponga,

es deseable realizar un análisis preliminar en busca de una reducción del tamaño del problema y contar con un procedimiento para una buena inicialización de las variables.

**PASO 5. Análisis preliminar del problema de programación no lineal e inicialización de variables.**

Anteriormente a los desarrollos del modelo del transbordo para la determinación del número mínimo de unidades de intercambio de calor y del modelo de la superestructura para la obtención de la configuración final de la red, Linhoff y Hindmarsh (1) desarrollaron el método de diseño del punto de pliegue (véase Apéndice F) con el que establecen una serie de reglas para encontrar un arreglo posible de la red de recuperación de calor. Estos autores parten de los datos de las corrientes, y determinan el mínimo consumo de servicios y la localización del punto de pliegue, y únicamente con esta información y la aplicación de sus reglas encuentran arreglos posibles de la red de recuperación de calor. Por lo tanto, es claro que resulta ventajoso la aplicación de estas reglas en un análisis preliminar del problema de programación no lineal, ya que en esta etapa se dispone de mucho más información del problema (se conocen intercambios de calor y cargas térmicas de estos intercambios) y pueden encontrarse fácilmente intercambios de calor "amarrados" disminuyéndose la magnitud del problema. Estas mismas reglas son de utilidad en la obtención de una buena inicialización de las variables del problema de programación no lineal.

Es importante señalar, que empleando el procedimiento de síntesis descrito en los pasos 1 a 5, se puede generar automáticamente la configuración de la red de recuperación de calor que involucra las posibilidades de división, mezclado y derivaciones de las corrientes, y que al mismo tiempo tiene las características de emplear el consumo mínimo de servicios, el número mínimo de unidades de intercambio de

calor y el costo mínimo de inversión. Aunque estos tres objetivos de diseño no son necesariamente equivalentes al mínimo costo anual total, proporcionan una muy buena aproximación al mínimo total, permitiéndose en la mayoría de las veces, que se obtengan soluciones prácticas en este problema de síntesis.

Además, es importante señalar que con este procedimiento de síntesis el valor fijo de acercamiento de temperaturas  $\Delta T_{\text{min}}$  empleado, puede relajarse calculándose su valor óptimo. Esto puede realizarse optimizando el costo total (costo de servicios y costo de inversión de los equipos) versus el acercamiento de temperaturas  $\Delta T_{\text{min}}$  en un ciclo de cálculo externo al procedimiento de síntesis propuesto.

#### DTRAS ALTERNATIVAS DE ANALISIS EN EL PROCEDIMIENTO DE SINTESIS.

No obstante las ventajas que representa el procedimiento de síntesis descrito, en este trabajo se desarrolló una formulación que permite analizar el efecto de disminuir el número de unidades de intercambio de calor sobre el consumo de servicios.

En algunas circunstancias, durante el diseño de la red de recuperación de calor en que se comprenden los objetivos de consumo mínimo de servicios, número mínimo de unidades y costo mínimo de inversión, se encuentra que la configuración final de la red es muy complicada (Por ejemplo, que existan un gran número de divisiones, mezclados y derivación de corrientes). Estas características se presentan al intentar cumplir con los objetivos de consumo mínimo de servicios y número mínimo de unidades. En estos casos, resulta muy ventajoso evaluar el efecto de modificar el número de unidades sobre el consumo de servicios, ya que mediante este análisis se puede buscar una configuración más sencilla que aunque pueda ser que emplee un consumo de servicios mayor, resulte más práctica y operable. Dadas estas características,

es conveniente incluir dentro del procedimiento de síntesis la siguiente alternativa de análisis.

**PASO 6. Análisis de sensibilidad de la red de recuperación de calor.**

En esta etapa, se realiza un análisis en el que se determina el efecto de modificar el número de unidades de la red sobre el consumo de servicios. Esta evaluación se lleva a cabo mediante una formulación desarrollada en este trabajo (véase Apéndice D), y que consiste en emplear un modelo del transbordo que comprende un problema de programación lineal mixta entera para determinar el consumo mínimo de servicios de la red habiéndose establecido el número de unidades de intercambio de calor y el acercamiento de temperaturas  $\Delta T_{\min}$ . En esta formulación, se presenta la opción adicional de emplear varios servicios de calentamiento y enfriamiento, involucrándose los costos de cada servicio, en cuyo caso se determina el consumo de servicios correspondiente al costo mínimo de servicios, bajo las restricciones de un número de unidades y acercamiento de temperaturas  $\Delta T_{\min}$  fijos. En ambas opciones, se cuenta con la alternativa de prohibir intercambios de calor entre las corrientes que integran la red. Esta prohibición puede realizarse parcial o totalmente, es decir, el intercambio de calor entre dos corrientes puede prohibirse en ciertos intervalos de temperatura o en todos los intervalos.

En esta formulación, al igual que en la determinación del número mínimo de unidades, la solución del modelo no proporciona directamente la configuración final de la red de intercambio de calor. No obstante, la solución contiene toda la información necesaria para derivar la configuración de la red. La configuración final de la red podrá determinarse mediante el modelo de la superestructura del problema de programación no lineal descrito en el Paso 4 del procedimiento de síntesis.

Otra alternativa en el procedimiento de síntesis de una red de recuperación de calor consiste en mejorar la integración de calor en la red mediante la eliminación ó modificación del punto de pliegue (cuello de botella) con el propósito de reducir el consumo de servicios. Esta mejora puede hacerse únicamente si es posible alterar ciertos flujos y/o temperaturas en el proceso. Consecuentemente, la implantación de esta alternativa es opcional dado que en muchos casos no se permite alterar las condiciones del proceso. En el caso de que puedan variarse las temperaturas y flujos de las corrientes de proceso, se requiere disponer, adicionalmente a los modelos mencionados para la síntesis, de una infraestructura computacional que permita analizar las modificaciones que se propongan en las condiciones de operación del proceso en busca de una mayor integración de calor. Esta alternativa puede ser muy ventajosa, pero debido a que para su aplicación se requiere de una infraestructura computacional muy completa, en este trabajo no se hace uso de esta opción.

### **3. IMPLANTACION DE METODOS DE CALCULO EN UN SISTEMA DE COMPUTO.**

Una vez que se definió el procedimiento de síntesis de la red de recuperación de calor, se procedió a implantar en un sistema de cómputo, los métodos de cálculo correspondientes a cada paso mencionado en el procedimiento.

Primeraente, se desarrolló un programa de cómputo en el que se realizan los siguientes cálculos:

- PASO 1. Definición de los intervalos de temperatura.
- PASO 2. Cálculo del consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento.
- PASO 3. Establecimiento del sistema de ecuaciones y restricciones que definen un problema de programación lineal mixta entera para el cálculo del mínimo número de unidades de intercambio de calor.

Para resolver el problema de programación lineal mixta entera resultante, se emplea un paquete matemático comercial. La solución de este problema proporciona el mínimo número de unidades de intercambio de calor y la carga térmica involucrada en cada intercambio de calor.

Posteriormente, se desarrolló otro programa de cómputo que comprende los siguientes cálculos:

- PASO 4. Desarrollo de una superestructura de corrientes que considera todas las posibles configuraciones de la red de recuperación de calor, y el establecimiento de un sistema de ecuaciones o restricciones no lineales que definen un problema de programación no lineal.

La solución del sistema de ecuaciones del problema de programación no lineal, se realiza mediante un paquete

matemático comercial, llamado SOL/NPSOL desarrollado en la Universidad de Stanford, California, E.U.A. De esta manera, se obtiene la configuración final de la red de intercambio de calor que cumple con los objetivos mencionados en el capítulo anterior.

Es importante señalar que los cálculos correspondientes al análisis de sensibilidad de la red de recuperación de calor (PASO 6 del procedimiento de síntesis), se encuentran comprendidos en el alcance del primer programa de cómputo, es decir, en este programa se cuentan con diferentes opciones de cálculo (que se describen más adelante) que permiten seleccionar la alternativa de cálculo deseada.

A continuación se presenta una descripción general de los programas de cómputo desarrollados en este trabajo y los programas de cómputo (paquetes matemáticos) empleados en la solución del problema de programación lineal mixta entera y el problema de programación no lineal.



### 3.1 CARACTERISTICAS DE CADA PROGRAMA DE COMPUTO.

#### 3.1.1 PROGRAMA DE COMPUTO I (desarrollado en este trabajo).

##### ALCANCE.

Este programa de cómputo parte de la información básica del problema consistente en los datos de cada una de las corrientes de proceso, y realiza los siguientes cálculos:

1. Definición de los intervalos de temperatura de acuerdo al método de partición propuesto por Brines (9) y modificado posteriormente por Cerda (13).
2. Cálculo del consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento y localización del punto de plique aplicando el método de la Tabla Problema reportado por Linnhoff y Hindmarsh (1).
3. Establecimiento de ecuaciones y restricciones para determinar el mínimo número de unidades de intercambio de calor, aplicando el método reportado por Papoulias y Grossmann (4). En esta opción se emplea el consumo de servicios calculado en el inciso anterior.
4. Establecimiento de ecuaciones y restricciones para determinar el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento habiéndose establecido un número de unidades de intercambio de calor (formulación nueva). En esta opción de cálculo pueden manejarse intercambios de calor prohibidos entre corrientes de proceso.
5. Establecimiento de ecuaciones y restricciones para determinar el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento en base a una función objetivo expresada en términos de costos de los servicios, habiéndose establecido un número de unidades de intercambio de calor (formulación nueva). En esta opción de cálculo pueden manejarse intercambios de

calor prohibidos entre corrientes de proceso y además pueden emplearse hasta tres servicios de calentamiento diferentes y tres servicios de enfriamiento diferentes.

6. Impresión del sistema de ecuaciones y restricciones del problema de programación lineal mixta entera resultante en los cálculos de los incisos 3, 4 y 5.
7. Cálculo e impresión de datos para la construcción de las siguientes gráficas:
  - a) gráfica de curvas de calor de la corriente compuesta caliente y curva de calor de la corriente compuesta fría contra temperatura.
  - b) gráfica de gradiente de temperaturas entre la corriente compuesta caliente y la corriente compuesta fría contra temperatura de la corriente compuesta fría.
  - c) gráfica de flujos de calor entre subintervalos de temperatura contra las temperaturas límite de los subintervalos.

#### CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA.

Este programa de cómputo consta de un programa principal y 19 subrutinas los cuales se escribieron en lenguaje de programación FORTRAN 77. El programa se instaló en una computadora Sperry UNIVAC 1100.

El espacio de memoria ocupado por el programa es de 64 K-palabras y el tiempo empleado en la ejecución de un problema típico es de 35 segundos.

#### DESCRIPCION DE LA LECTURA DE DATOS DEL PROGRAMA.

En este inciso se presenta la información básica requerida por el programa para iniciar el trabajo de síntesis de la red de recuperación de calor.

La lectura de datos se realiza mediante la proposición NAMELIST, con la cual se evita la rigidez del formato fijo y el desorden del formato libre, haciendo fácil y flexible la

etapa de alimentación de información.

A continuación, se presenta una lista de las variables que se alimentan al programa y una descripción de su significado.

#### DATOS REQUERIDOS POR EL PROGRAMA DE COMPUTO I.

Primer tarjeta:

Nombre de la Planta: se tiene asignado un formato de lectura de 72 caracteres alfanuméricos.

#### NAMELIST DAT1

NC = número total de corrientes.

NCC = número de corrientes calientes.

IUNIT = indicador del sistema de unidades empleado en los cálculos.

IUNIT	0	1	2
SIST.UNID.	Inglés	Métrico	-----
Temperatura	BF	BC	BC
CP	BTU/(H BF)	KCAL/(H BC)	WATTS/OC
Carga térm.	BTU/H	KCAL/H	WATTS

DTRIN = acercamiento de temperaturas.

IOPCIO = indicador de la opción de cálculo.

Si IOPCIO = 0 se realiza el cálculo del consumo mínimo de servicios aplicando el método de la Tabla Problema, y se establecen las ecuaciones para determinar el mínimo número de unidades de intercambio de calor empleándose el consumo de servicios calculado.

Si IOPCIO = 1 se establecen las ecuaciones para determinar el consumo mínimo de servicios habiéndose establecido un número de unidades de intercambio de calor. Pueden sanejarse intercambios de calor prohibidos entre corrientes de proceso.

Si IOPCIO = 2 se establecen las ecuaciones para determinar el consumo mínimo de servicios en base a

una función objetivo expresada en términos de costos de los servicios, habiéndose establecido un número de unidades de intercambio de calor. Pueden manejarse intercambios de calor prohibidos entre corrientes de proceso.

**IARCH** = indicador de impresión en archivos.

Si **IARCH** = 0 todos los resultados se imprimen en papel.

Si **IARCH** = 1 el sistema de ecuaciones y restricciones del problema de programación lineal mixta entera y los datos para la construcción de gráficas se imprimen en archivos.

Si **IARCH** = 2 el sistema de ecuaciones y restricciones del problema de programación lineal mixta entera se imprimen en archivos.

**IPRINT** = indicador de control de impresión.

Si **IPRINT** = 0 no se imprimen las matrices donde se almacena la información de los posibles intercambios de calor.

Si **IPRINT** = 1 sí se imprimen (en papel) las matrices donde se almacena la información de los posibles intercambios de calor.

**NUMUNI** = número de unidades de intercambio de calor.  
(aplica sólo si **IOPCIO** = 1 o **IOPCIO** = 2).

**NIPROH** = número de intercambios de calor prohibidos entre corrientes de proceso.  
(aplica sólo si **IOPCIO** = 1 o **IOPCIO** = 2).

**NHOTUT** = número de servicios de calentamiento de diferente costo y diferentes condiciones de operación (aplica sólo si **IOPCIO** = 2).

**NCOLUT** = número de servicios de enfriamiento de diferente costo y diferentes condiciones de operación (aplica sólo si **IOPCIO** = 2).

**FIN DEL NAMELIST DAT1.**

#### NAMELIST DAT2

NOTA: Se debe alimentar un bloque de este tipo de datos por cada corriente de proceso caliente y fria.

Se recomienda alimentar primero las corrientes calientes y luego las corrientes frias, pero no es necesario un orden.

- HCP** = Capacidad calorifica de la corriente  
(flujo de la corriente \* capacidad calorifica de la corriente).
- TENT** = Temperatura de entrada de la corriente
- TSAL** = Temperatura de salida de la corriente

#### FIN DEL NAMELIST DAT2

#### NAMELIST DAT3

NOTA: Se debe alimentar un bloque de este tipo de datos por cada intercambio de calor prohibido. Estos datos aplican sólo si IOPCIO = 1 o IOPCIO = 2.

- IPROHI** = Número de la corriente caliente cuyo intercambio de calor está prohibido con la corriente fria JPROHI.
- JPROHI** = Número de la corriente fria cuyo intercambio de calor está prohibido con la corriente caliente IPROHI.
- KIPROH** = Número del intervalo de temperatura desde el que se prohíbe el intercambio de calor entre la corriente caliente IPROHI y la corriente fria JPROHI.
- KFPROH** = Número del intervalo de temperatura hasta el que se prohíbe el intercambio de calor entre la corriente caliente IPROHI y la corriente fria JPROHI.

NOTA: Si KIPROH = 0 y KFPROH = 0, entonces el intercambio de calor entre la corriente caliente IPRONI y la corriente fría JPROHI se prohíbe en todos los intervalos de temperatura existentes en la red.

FIN DEL NAMELIST DAT3.

NAMELIST DAT4

NOTA: Se debe alimentar un bloque de este tipo de datos por cada servicio de calentamiento. Estos datos aplican sólo si IOPCIO = 2.

KHOTUT = Número del intervalo de temperatura en el que se localiza el servicio de calentamiento.  
DHUT = Capacidad energética por unidad de masa del servicio de calentamiento.  
COSTHU = Costo unitario del servicio de calentamiento.

FIN DEL NAMELIST DAT4

NAMELIST DAT5

NOTA: Se debe alimentar un bloque de este tipo de datos por cada servicio de enfriamiento. Estos datos aplican sólo si IOPCIO = 2.

KCOLUT = Número del intervalo de temperatura en el que se localiza el servicio de enfriamiento.  
DHCU = Capacidad energética por unidad de masa del servicio de enfriamiento.  
COSTCU = Costo unitario del servicio de enfriamiento.

FIN DEL NAMELIST DAT5.

## RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL PROGRAMA.

La información que proporciona el programa es la siguiente:

1. Resultados de los cálculos de la Tabla Problemas:
  - i) intervalos de temperatura
  - ii) flujos de calor entre intervalos de temperatura
  - iii) carga térmica del servicio de calentamiento
  - iv) carga térmica del servicio de enfriamiento
  - v) integración de calor entre las corrientes de proceso.
2. Localización del punto de plieque referido a la temperatura de la corriente fría.
3. Representación esquemática de las corrientes de proceso, indicándose la localización de cada corriente en los intervalos de temperatura, señalándose la localización del punto de plieque.
4. Sistema de ecuaciones del problema de programación lineal mixta entera para la opción de cálculo seleccionada.
5. Lista de datos para la construcción de las gráficas mencionadas anteriormente.

En el Apéndice G de este trabajo se presenta el desarrollo de un ejemplo de cálculo completo en el cual pueden revisarse la alimentación de datos a este programa y la presentación de resultados del mismo.

### 3.1.2 PROGRAMA DE COMPUTO II (Paquete Matemático).

Para resolver el problema de programación lineal mixta entera, puede emplearse un paquete matemático que reúna las siguientes características:

#### ALCANCE.

El programa de cómputo debe ser capaz de resolver el problema que se establece de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{minimizar } z &= c x + d y \\ \text{sujeto a} \\ A x + B y &= b \\ x &\geq 0 \\ y &= 0 \text{ ó } 1 \end{aligned}$$

donde A y B son matrices de  $m \times n$ ; c y d son vectores hilera de n componentes; b un vector columna de m componentes; x y y vectores columna de n variables.

Existen otras formas de representar un problema de programación lineal. Así, la función z puede maximizarse o minimizarse y los signos de igualdad en cada una de las restricciones pueden ser mayor o igual ( $\geq$ ) o de menor o igual ( $\leq$ ), asimismo algunos componentes del vector x pueden no estar sujetos a la condición de no negatividad.

#### CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA.

En general, los paquetes matemáticos emplean métodos de ramificación y acotamiento en la solución de problemas de programación lineal mixta entera, que aparentemente son los que se comportan mejor en la solución de problemas de dimensión intermedia.

Los problemas que se manejan en este trabajo son en general de dimensión intermedia, aunque en algunos casos tienden a ser de dimensiones grandes. El espacio de búsqueda



RAM (Random Access Memory) requerido es de aproximadamente 640 K-bytes.

#### DESCRIPCION DE LA LECTURA DE DATOS DEL PROGRAMA.

El programa de cómputo I descrito anteriormente, desarrolla la formulación del problema de programación lineal mixta entera y la imprime en un archivo de computadora. Esta formulación del problema comprende toda la información que es requerida por el paquete matemático, así que de esta manera se elimina toda posibilidad de que el usuario cometa errores en la formulación del problema y la solución del mismo, y la aplicación del paquete matemático se convierte en una tarea rápida y sencilla. Por lo anterior, no se requiere describir en forma detallada los datos requeridos por el paquete matemático, basta con mencionar que es necesario indicarle al programa el archivo en el que se encuentran los datos (formulación del problema) y controlar el número de iteraciones.

Por último, es importante mencionar que si el análisis de la red de recuperación de calor se desarrolla dividiendo la red en las regiones que la componen (lado caliente y lado frío), se genera una formulación del problema para cada lado (subred), siendo necesario resolver el problema de programación lineal mixta entera para cada subred, es decir, se deberá utilizar el paquete matemático tantas veces como subredes compongan la red total de recuperación de calor.

#### RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL PROGRAMA.

Una característica importante del paquete es que el nombre de las variables incógnitas puede ser de hasta 8 caracteres, así en la formulación del problema se manejan variables neotécnicas, es decir, que el nombre comprende el significado de la variable. A continuación se presentan unos ejemplos de las variables que se manejan en la formulación del problema de programación lineal mixta entera.

- R0102            representa el calor residual de la corriente caliente 01 en el intervalo de temperatura 02.
- G010302        representa la carga térmica del intercambio de calor entre la corriente caliente 01 y la corriente fría 03 en el intervalo de temperatura 02.
- VO10301        es una variable entera (0,1) que indica la existencia del intercambio de calor entre la corriente caliente 01 y la corriente fría 03 en la subred 01.

La información generada por el paquete consiste en los valores de las variables incógnitas que satisfacen la condición de la función objetivo. El paquete presenta una lista con los nombres de las variables y sus valores correspondientes. El significado de cada variable puede interpretarse fácilmente con la descripción anterior. También, el paquete presenta el valor de la función objetivo y el número de iteraciones empleadas en los cálculos.

Con la información anterior el usuario puede identificar fácilmente los intercambios de calor que se llevan a cabo en la subred y la carga térmica total de cada intercambio de calor en la misma.

En el Apéndice B de este trabajo se presenta el desarrollo de un ejemplo de cálculo completo en el cual pueden revisarse la alimentación de datos a este paquete y la presentación de resultados del mismo.

### 3.1.3 PROGRAMA DE COMPUTO III (Desarrollado en este trabajo)

#### ALCANCE.

Este programa de cómputo parte de la información resultante en la solución del problema de programación lineal mixta entera y realiza la formulación de una superestructura que contiene todas las posibles configuraciones de la red de recuperación de calor obteniéndose un sistema de ecuaciones (restricciones) no lineales que representan un problema de programación no lineal.

El problema de programación no lineal se resuelve posteriormente por un paquete matemático cuyas características se describen más adelante. El trabajo comprendido en la formulación de la superestructura y en la preparación de la información para su solución por el paquete matemático es complejo y dadas las dimensiones de los problemas considerados en este trabajo existe un alto riesgo de cometer errores si se desarrollara en forma manual. Por esta razón se consideró conveniente desarrollar este programa de cómputo el cual construye la superestructura del problema, realiza la formulación del problema de programación no lineal e imprime toda la información requerida por el paquete matemático para su solución, eliminándose toda posibilidad de cometer errores.

A continuación se presenta una descripción más detallada de los cálculos realizados por este programa:

1. Desarrollo de una superestructura para cada corriente de proceso que intercambia calor con dos, tres o cuatro corrientes.
2. Integración de las superestructuras de cada corriente en una superestructura global para la red de recuperación de calor.
3. Establecimiento de un problema de programación no lineal para la solución de la superestructura global de la red de recuperación de calor. El problema de

programación no lineal consiste en :

- > Un sistema de ecuaciones o restricciones lineales y la definición de sus límites inferior y superior.
  - > Un sistema de ecuaciones o restricciones no lineales y la definición de sus límites inferior y superior.
  - > Definición de los límites inferior y superior de cada una de las variables.
  - > Una función objetivo no lineal expresada en términos de los costos de inversión de cada cambiador de calor.
4. Impresión de la información requerida por el paquete matemático para la solución del problema de programación no lineal. Esta información consiste en:

- > Una subrutina en FORTRAN llamada OBJFUN, que contiene la función objetivo y las primeras derivadas analíticas de la función objetivo.
- > Una subrutina en FORTRAN llamada CONFUN, que contiene las ecuaciones o restricciones no lineales y la primera derivada analítica de cada una de ellas.
- > Un programa principal escrito en FORTRAN que contiene la definición de las ecuaciones o restricciones lineales, definición de los límites superior e inferior de las variables, ecuaciones o restricciones lineales y ecuaciones o restricciones no lineales. Este programa principal controla la lógica de cálculo global del paquete matemático y realiza la inicialización de las variables del problema.

Toda esta información se graba en archivos de computadora para que pueda incorporarse fácilmente al paquete matemático que realiza la solución del problema de programación no lineal.

## CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA.

El programa de cómputo consta de un programa principal y 33 subrutinas, los cuales se escribieron en lenguaje de programación FORTRAN 77. El programa se instaló en una computadora Sperry UNIVAC 1100.

El espacio de memoria ocupado por el programa es de 71 K- palabras y el tiempo empleado en la ejecución de un problema típico es de 40 segundos.

## DESCRIPCION DE LA LECTURA DE DATOS DEL PROGRAMA

En este inciso se presenta la información requerida por el programa para desarrollar la superestructura de la red de recuperación de calor y la formulación del problema de programación no lineal.

La lectura de datos se realiza mediante la proposición NAMELIST, siendo de esta manera una tarea fácil y rápida.

Es importante mencionar que si el análisis de la red de recuperación de calor se desarrolla dividiendo la red en las regiones que la componen (lado caliente y lado frío), se genera una formulación del problema para cada lado (subred), siendo necesario utilizar este programa de cómputo tantas veces como subredes compongan la red total de recuperación de calor.

A continuación se presenta una lista de las variables que se alimentan al programa y una descripción de su significado.

DATOS REQUERIDOS POR EL PROGRAMA DE COMPUTO III.

NAMELIST DATGEN

IRUN = Indice de control de cálculos del programa.

Si IRUN = 0

Se efectúa una corrida completa del programa

Si IRUN = 1

Solo se efectúa un análisis de los requerimientos de memoria del problema y los disponibles en el programa.

IOPCIO = Indicador de la opción de cálculo del programa.

Si IOPCIO = 0

La red de recuperación de calor se divide en dos regiones: Un lado caliente y un lado frío.

Si IOPCIO = 1

La red de recuperación de calor no se divide en dos regiones, sino que se analiza en forma completa.

LADO = Indicador de la región de la red de intercambio de calor que se analiza.

(sólo aplica si IOPCIO = 0)

Si LADO = 1 Se analiza el lado caliente.

Si LADO = 2 Se analiza el lado frío.

IARCH = Indicador de la impresión en archivos.

Si IARCH = 0 Los resultados generados por el programa se imprimen en papel.

Si IARCH = 1

Los resultados generados por el programa correspondientes al programa principal y las subrutinas que empleará el paquete matemático se guardan en archivos de computadora.

NUMUNI = Número de unidades de intercambio de calor.

**BIGEND** = Es una variable real positiva (usada por el paquete matemático SOL/NPSOL) cuya magnitud denota un componente infinito de los límites inferior (l) y superior (u). Cualquier límite superior, mayor o igual a BIGEND se considerará como más infinito (y similarmente para un límite inferior menor o igual a BIGEND se considerará como menos infinito).

**FIN DEL NAMELIST DATGEN**

**NAMELIST DAT1**

**NCC** = Número de corrientes calientes y servicios de calentamiento.  
**NCF** = Número de corrientes frías y servicios de enfriamiento.  
**DTMIN** = Acercamiento de temperaturas.  
**TPINCH** = Temperatura donde se localiza el punto de pliegue (referida a las corrientes frías).

**FIN DEL NAMELIST DAT1.**

**NAMELIST DAT2**

**NOTA:** Se debe alimentar un bloque de este tipo de datos por cada corriente caliente y servicio de calentamiento, y por cada corriente fría y servicio de enfriamiento. Aliméntense primero las corrientes calientes y servicios de calentamiento.

**NCP** = Capacidad calorífica de la corriente de proceso o servicio. (flujo de la corrientes capacidad calorífica de la corriente).  
**TENT** = Temperatura de entrada de la corriente de proceso o servicio.

TSAL = Temperatura de salida de la corriente de proceso o servicio.

FIN DEL NAMELIST DAT2.

NAMELIST DAT3.

NOTA: Se debe alimentar un bloque de este tipo de datos por cada unidad de intercambio de calor.

ICORRH = número de la corriente caliente o servicio de calentamiento que intercambia calor con la corriente fría o servicio de enfriamiento ICORRC.

ICORRC = número de la corriente fría o servicio de enfriamiento que intercambia calor con la corriente caliente o servicio de calentamiento ICORRH.

QIJ = carga térmica del intercambio de calor entre la corriente ICORRH y la corriente ICORRC.

UIJ = coeficiente global de transferencia de calor a considerarse en el intercambio de calor entre las corrientes ICORRH e ICORRC.

BIJ y CIJ

= constantes de la función para calcular el costo de inversión del equipo donde se realiza el intercambio de calor entre las corrientes ICORRH e ICORRC.

La función considerada es de la forma:

$$\text{COSTO} = \text{CIJ AREA}^{\text{BIJ}}$$

donde AREA es el área de transferencia de calor del equipo donde se realiza el intercambio de calor entre las corrientes ICORRH e ICORRC.



DTIJ = Acercamiento de temperaturas límite en el intercambio de calor entre las corrientes ICORRH e ICORRC.

Si DTIJ = 0.0 el acercamiento de temperaturas límite que se considera en los cálculos corresponde al valor DTMIN especificado en la red.

Si DTIJ > 0.0 el valor alimentado se considera en los cálculos que involucran el intercambio de calor entre las corrientes ICORRH e ICORRC.

NOTA: Esta opción se emplea generalmente, cuando en el intercambio de calor entre las corrientes ICORRH e ICORRC se involucra un servicio (ya sea de calentamiento o enfriamiento), donde no es una restricción el acercamiento de temperaturas DTMIN especificado en la red.

FIN DEL NAMELIST DAT3.

## RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL PROGRAMA.

La información que proporciona el programa de cómputo es la siguiente:

1. Impresión de una descripción de la superestructura desarrollada para cada corriente, indicando:

- > Tipo de superestructura (2,3, ó 4 intercambios)
- > Corrientes involucradas en la superestructura
- > Datos de las corrientes
- > Número de variables de la superestructura
- > Variables que corresponden a flujos
- > Variables que corresponden a temperaturas
- > Número de ecuaciones lineales correspondientes a los balances de materia
- > Número de ecuaciones no lineales correspondientes a balances de energía.

2. Impresión de un resumen final que comprende a la superestructura global de la red de recuperación de calor, indicando:

- > Número total de variables
- > Número de ecuaciones lineales correspondientes a los balances de materia
- > Número de ecuaciones lineales correspondientes a restricciones de temperatura
- > Número total de ecuaciones lineales
- > Número total de ecuaciones no lineales .

3. Impresión de un resumen del espacio de memoria requerida para el planteamiento del problema y la disponible en el programa.

4. Impresión del programa principal y las subrutinas OSJFUN y CONFLIN escritos en lenguaje FORTRAN 77, que

contienen el planteamiento completo del problema de programación no lineal para que se resuelva mediante el paquete matemático SOL/NPSOL.

En el Apéndice B de este trabajo se presenta el desarrollo completo de un ejemplo de cálculo al cual puede hacerse referencia para un mejor entendimiento de la alimentación de datos del programa y la presentación de resultados del mismo.

### 3.1.4 PROGRAMA DE COMPUTO IV (Paquete Matemático).

Para resolver el problema de programación no lineal se emplea el paquete matemático SOL/NPSOL desarrollado en la Universidad de Stanford, California, E.U.A.

#### ALCANCE.

SOL/NPSOL es un programa de cómputo que consiste en un conjunto de subrutinas en FORTRAN diseñadas para resolver un problema de programación no lineal (minimización de una función no lineal sujeta a un conjunto de restricciones sobre las variables).

El problema se establece de la siguiente forma:

minimizar  $F(x)$

$x \in R$

sujeta a:

$$l \leq \begin{Bmatrix} x \\ Ax \\ c(x) \end{Bmatrix} \leq u$$

donde  $F(x)$  es una función no lineal,  $Ax$  es una matriz de constantes ( $Ax$  representa el conjunto de restricciones lineales), y  $c(x)$  es un vector de funciones de restricciones no lineales. La matriz  $Ax$  y el vector  $c(x)$  pueden estar vacíos. Nótese que se especifican límites inferior ( $l$ ) y superior ( $u$ ) para todas las variables y todas las restricciones. Esta forma permite una completa generalidad en el establecimiento de otros tipos de restricciones. En particular, la restricción  $i$ -ésima puede definirse como una igualdad haciendo  $l_i = u_i$ . Si no se presentan ciertos límites, pueden asignarse valores especiales a  $l$  o  $u$  de manera que sean tratadas como  $-a$  ó  $+a$ .

El usuario debe proporcionar subrutinas que definan la función objetivo, las funciones de restricciones y sus primeras derivadas. Además, debe suministrar un estimado inicial de la solución al problema de programación no lineal.

#### CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA.

El programa de cómputo SOL/NPSOL resuelve el problema de programación no lineal mediante un método de programación cuadrática secuencial. El problema de programación cuadrática se resuelve usando subrutinas del paquete SOL/QPSOL, versión 3.1 (22). El programa SOL/NPSOL contiene aproximadamente 9000 líneas de FORTRAN Standard ANSI (1966), de las cuales el 47 % son comentarios.

El espacio de memoria ocupado por el programa de cómputo depende del problema que se resuelve, sin embargo, para un problema típico de este trabajo el programa ocupa 90 K-palabras y el tiempo empleado en la ejecución es de 180 segundos, en una computadora Sperry UNIVAC 1100.

#### DESCRIPCION DE LA LECTURA DE DATOS DEL PROGRAMA.

El programa de cómputo SOL/NPSOL original, no realiza una lectura de datos, sino que toda la información requerida por el programa se suministra a través del programa principal y las subrutinas OBJFUN y CONFUN, las cuales son desarrolladas por el usuario y mediante las cuales se definen la función objetivo, las restricciones lineales, las restricciones no lineales, las primeras derivadas de la función objetivo y restricciones no lineales, y los límites inferior y superior de las variables y restricciones en general. Una descripción detallada de la manera en que deben generarse el programa principal y las subrutinas se encuentra en el manual de usuario del programa SOL/NPSOL (23).

Como se mencionó anteriormente, la preparación del programa principal y las subrutinas OBJFUN y CONFUN es compleja y requiere un conocimiento completo de la formulación del problema, y dadas las dimensiones de los

problemas analizados en este trabajo, fácilmente pueden cometerse errores que originarían que el programa no encontrara una solución factible o bien que se interrumpiera su ejecución. Por lo anterior, se desarrolló el programa de cómputo III el cual desarrolla la formulación del problema de programación no lineal e imprime en varios archivos el programa principal y las subrutinas requeridas por el programa SOL/NPSOL. Además, para facilitar la ejecución del programa se introdujeron algunas lecturas al programa para que puedan controlarse fácilmente el número de iteraciones, valores de tolerancia para la convergencia y además se incluyó la facilidad de modificar los valores iniciales de las variables.

Al igual que los programas anteriores, la lectura de datos se realiza mediante la proposición NAMELIST, haciéndose fácil y flexible la etapa de alimentación de información.

Es importante mencionar que si el análisis de la red de recuperación de calor se desarrolla dividiendo la red en las regiones que la componen (lado caliente y lado frío), se genera una formulación del problema para cada lado (subred), siendo necesario utilizar este programa de cómputo tantas veces como subredes compongan la red total de recuperación de calor.

A continuación, se presenta una lista de las variables que se alimentan al programa y una descripción de su significado.

## DATOS REQUERIDOS POR EL PAQUETE MATEMATICO SOL/NPSOL.

### NAMELIST DATOS:

- ITMAX** = Número máximo de iteraciones en los cálculos. A menos de que se conozca que el problema es excepcionalmente difícil, se recomienda que ITMAX sea 50.
- MSGLVL** = Indicador para el control de impresión de resultados. Existen muchas opciones en la impresión de resultados y si se desea una impresión detallada se recomienda referirse al manual de usuario del programa ( 23 ). Para la impresión de la solución final y una breve descripción de cada iteración se recomienda MSGLVL = 10.
- EPSMCH** = Precisión de la computadora.
- ETA** = Es un número que satisfaga  $0 \leq \text{ETA} \leq 1$ , y que controla con qué exactitud el valor de  $q_k$  se aproxima a un mínimo de la función escrito a través de  $p_k$  ( entre más pequeño es el valor de ETA, más exacta es la búsqueda de línea). El valor recomendado de ETA para problemas con restricciones no lineales es de 0.9, que corresponde a una búsqueda de línea relajada.
- RFTOL** = Es una tolerancia positiva ( $\text{RFTOL} < 1$ ) que indica la aproximación deseada en la función objetivo en la solución. Por ejemplo, si RFTOL es  $1 \times 10^{-6}$  y NPSOL termina los cálculos correctamente, la solución calculada tendrá una aproximación de  $1 \times 10^{-6}$ . RFTOL nunca debe ser menor que la aproximación de la máquina.
- RTEPS** = Es una tolerancia positiva ( $\text{RTEPS} < 1$ ) que define la violación máxima permisible en cada restricción de manera que un punto se

considere factible, es decir, la restricción  $f$  se considera satisfecha si su valor calculado no se desvía del valor requerido por más de la tolerancia RTEPS.

**INICIA** = Indicador que controla la inicialización de variables del problema.

Si **INICIA** = 0

El usuario no alimenta una inicialización de variables del problema y se utiliza la calculada por el programa de cómputo III.

Si **INICIA** = 1

El usuario alimenta una inicialización de variables del problema.

**ITOLER** = Indicador que controla la alimentación de valores de tolerancia para las restricciones.

Si **ITOLER** = 0

Se utiliza la tolerancia positiva RTEPS en todas las restricciones.

Si **ITOLER** = 1

El usuario alimenta un arreglo de dimensión igual a número de variables + número de restricciones lineales + número de restricciones no lineales, que contiene las tolerancias positivas que definen la violación máxima permisible en cada restricción de manera que un punto se considere factible.

**FIN DEL NAMELIST DATOS1**



**NAMelist DATOS2**

**NOTA:** Este bloque de datos aplica sólo si  
**INICIA = 1**

**x** = Arreglo de dimensión igual al número de  
variables que contiene los valores iniciales  
de cada variable.

**FIN DEL NAMelist DATOS2**

**NAMelist DATOS3**

**NOTA:** Este bloque de datos aplica sólo si  
**ITOLER = 1**

**FEATOL** = Arreglo de dimensión igual a número de  
variables + número de restricciones lineales  
+ número de restricciones no lineales, que  
contiene las tolerancias positivas que  
definen la violación máxima permisible en  
cada restricción de manera que un punto se  
considere factible.

**FIN DEL NAMelist DATOS3.**

## RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL PROGRAMA.

Una descripción detallada de los resultados proporcionados por el programa de cómputo SOL/NPSOL se encuentra en el manual de usuario (23). La impresión de resultados se controla mediante un índice y es muy variada.

Sin embargo, de manera general puede decirse que la información que proporciona el programa en la solución final es la siguiente:

1. Mensajes indicando si se alcanzó la convergencia.
2. Para cada variable  $x_j$ :

VARIABLE	Es el número de variable $j$ . $j = 1$ a $N$ .
STATE	Da el estado de la variables (FR si no se encuentra en el conjunto de trabajo, EQ si se encuentra en el conjunto de trabajo como una variable fija, LL si se encuentra en el conjunto de trabajo con el valor correspondiente a su límite inferior, y UL si se encuentra en el conjunto de trabajo con el valor correspondiente al límite superior). Si el valor se encuentra fuera del límite superior o inferior por más de FEATOL( $j$ ), STATE será "+*" o "--" respectivamente.
VALUE	Es el valor de la variable $x_j$ en la iteración final.
LOWER BOUND	Es el límite inferior BL( $j$ ) especificado para la variable.
UPPER BOUND	Es el límite superior BU( $j$ ) especificado para la variable.
LAGR MULTIPLIER	Es el valor del multiplicador de Lagrange para la restricción límite correspondiente. Este será igual a cero si STATE es FR. Si $x$ es óptima y STATE es LL, el multiplicador

deberá ser no negativo; si STATE es UL, el multiplicador deberá ser no positivo.

**RESIDUAL** Es la diferencia entre la variable y su límite más cercano.

3. Para cada restricción lineal o no lineal dependiendo del caso:

**LINEAR CONSTR**

Es el número de restricción lineal  $i$ ,  $i = 1$  a NCLIN.

o

**NONLNR CONSTR**

Es el número de restricción no lineal  $i$ ,  $i = 1$  a NCNLN.

**STATE**

Es el estado de la restricción (FR para una restricción que no se encuentra en el conjunto de trabajo, EQ para una igualdad en el conjunto de trabajo, LL para una restricción de desigualdad en el conjunto de trabajo en su límite inferior, UL para una restricción de desigualdad en el conjunto de trabajo en su límite superior). STATE será "++" o "---" respectivamente si el valor se encuentra fuera del límite superior o inferior por más de la tolerancia de factibilidad.

**VALUE**

Es el valor de la restricción en el punto final.

**LOWER BOUND**

Es el límite inferior especificado para la restricción.

**UPPER BOUND**

Es el límite superior especificado para la restricción.

#### **LAGR MULTIPLIER**

Es el valor del multiplicador de Lagrange. Este será igual a cero si STATE es FR. Si  $x$  es óptima y STATE es LL, el multiplicador deberá ser no negativo; si STATE es UL, el multiplicador deberá ser no positivo.

#### **RESIDUAL**

Es la diferencia del valor de la restricción con respecto a su límite más cercano.

En el Apéndice B de este trabajo se presenta el desarrollo de un ejemplo de cálculo completo en el cual pueden revisarse la alimentación de datos a este programa y la presentación de resultados del mismo.

#### 4. ANALISIS DE LAS PLANTAS QUE INTEGRAN EL TREN DE AROMATICOS DE LA CANGREJERA, VERACRUZ.

##### 4.1 DESCRIPCION DE LA FUNCION DE CADA PLANTA.

El tren de aromáticos consta de las siguientes plantas:

##### i . REFORMACION B-T-X (Benceno-Tolueno-Xilenos).

Sección de preparación de la carga  
Sección de reacción  
Sección de estabilización de reformado

ii .	FRACCIONADORA DE REFORMADO	(UNIDAD 20)
iii .	EXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO DE AROMATICOS.	(UNIDAD 30)
iv .	FRACCIONADORA DEL REFINADO	(UNIDAD 35)
v .	FRACCIONADORA BENCENO-TOLUENO	(UNIDAD 40)
vi .	FRACCIONADORA DE XILENOS	(UNIDAD 45)
vii .	CRISTALIZACION DE PARA-XILENO	(UNIDAD 50)
viii .	FRACCIONADORA DE LA ALIMENTACION A ISOMERIZACION DE XILENOS.	
ix .	ISOMERIZACION DE XILENOS	(UNIDAD 60)
x .	XILENOS PLUS	(UNIDAD 70)
xi .	HIDRODEALQUILACION	(UNIDAD 80)

La función del tren de aromáticos es la obtención de compuestos aromáticos de alta pureza. En la Fig. 4.1 se muestra un diagrama de bloques simplificado indicándose la interrelación de las plantas. A continuación se describe la función de cada planta.

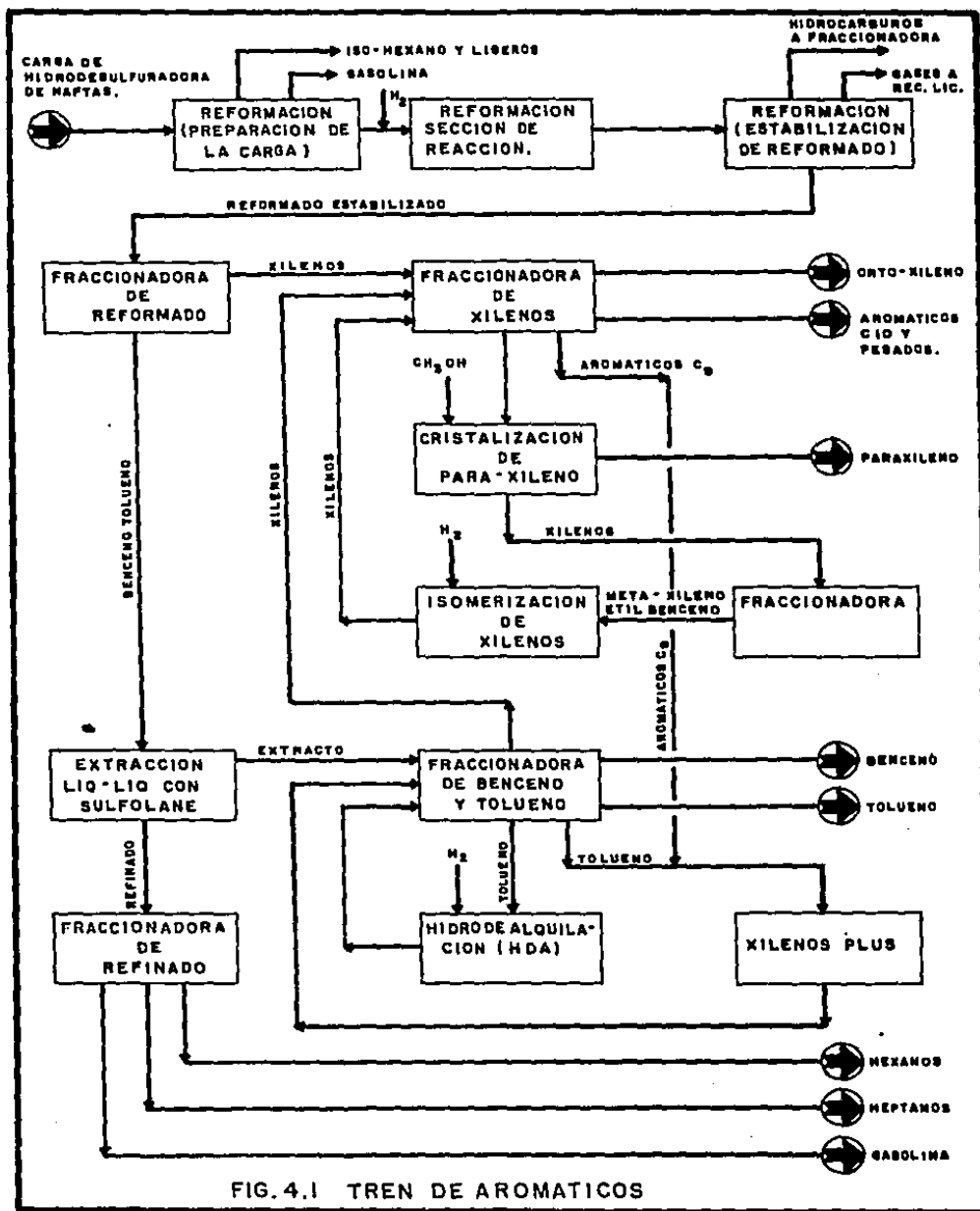


FIG. 4.1 TREN DE AROMATICOS

## i. REFORMACION BTX.

### Sección de preparación de la carga.

La alimentación al proceso de reformación BTX consiste en una nafta proveniente de la planta de hidrodesulfuración. En esta sección se separan los isómeros del hexano y los compuestos más ligeros, y la nafta resultante se envía a la sección de reacción.

### Sección de reacción.

La sección de reacción tiene por objeto transformar los compuestos parafínicos y nafténicos que se encuentran en las naftas para producir hidrocarburos aromáticos (benceno-tolueno-xilenos) a través de un proceso catalítico.

### Sección de estabilización de reformado.

El reformado obtenido contiene compuestos ligeros resultantes de las reacciones de desintegración que tienen lugar en la reformación. El gas resultante se separa y se envía a recuperación de licuables. Los hidrocarburos ligeros se separan y son enviados a fraccionamiento.

El reformado estabilizado se envía a fraccionamiento.

## ii. FRACCIONADORA DE REFORMADO (UNIDAD 202).

En esta sección se efectúa una separación entre los compuestos aromáticos más ligeros (benceno y tolueno) y los compuestos aromáticos más pesados (xilenos). El propósito de esta separación es el de preparar la carga a la planta de extracción líquido-líquido de aromáticos y a la planta fraccionadora de xilenos.

#### iii. EXTRACCIÓN LIQUIDO-LIQUIDO DE AROMATICOS UNIDAD 302.

El proceso de extracción de aromáticos tiene como objeto obtener estos compuestos con una alta pureza y libres de parafinas y naftenos que se encuentran mezclados con ellos, como productos de la reformación BTX. Para efectuar la separación se emplea un solvente selectivo, que en el caso de la planta existente en la Cangrejera, Veracruz, es el sulfolano.

El extracto obtenido consistente en benceno, tolueno y un poco de xilenos, se envía a la fraccionadora benceno-tolueno. El refinado se envía a fraccionamiento de refinado.

#### iv. FRACCIONADORA DE REFINADO UNIDAD 302.

En esta sección se obtienen por fraccionamiento los siguientes productos: hexanos, heptanos y gasolina.

#### v. FRACCIONADORA DE BENCIENO-TOLUENO UNIDAD 402.

La alimentación a esta planta consiste en una mezcla de compuestos aromáticos: benceno, tolueno y xilenos provenientes de las plantas de extracción liquido-liquido de aromáticos, de xilenos plus y de hidrodesalquilación.

En esta planta se obtienen por destilación los siguientes productos con una alta pureza:

Benceno (Grado Nitración)

Tolueno (Grado Nitración)

También se obtiene una corriente consistente en xilenos la cual se envía a fraccionamiento de xilenos. Otra corriente más, que contiene tolueno, se mezcla con una corriente de aromáticos de 9 átomos de carbono proveniente de la fraccionadora de xilenos y se envían a la planta de xilenos plus.



**vi. FRACCIONADORA DE XILENOS (UNIDAD 452).**

La alimentación a esta planta consiste en una mezcla de compuestos aromáticos, principalmente xilenos, provenientes de las plantas de : fraccionadora de reformado, fraccionadora de benceno-tolueno e isomerización de xilenos.

En esta planta se obtienen por destilación los siguientes productos: orto-xileno y aromáticos pesados.

También se obtiene una corriente consistente en xilenos la cual se envía al proceso de cristalización de para-xileno. Otra corriente, que contiene compuestos aromáticos de 9 átomos de carbono, se mezcla con una corriente de tolueno proveniente de la fraccionadora benceno- tolueno y se envían a la planta de xilenos plus.

**vii. CRISTALIZACION DE PARA-XILENO (UNIDAD 502).**

En este proceso se efectúa la separación de para-xileno de una mezcla de xilenos. La separación se realiza mediante una cristalización fraccionada de la carga. El solvente empleado es metanol.

En esta planta se obtiene como producto el para-xileno, y la mezcla resultante se envía a la sección de fraccionamiento de la alimentación de la planta de isomerización de xilenos.

**viii. FRACCIONADORA DE LA ALIMENTACION A ISOMERIZACION DE XILENOS.**

En esta sección se lleva a cabo la separación de meta-xileno y etil-benceno los cuales se envían al proceso de isomerización de xilenos.

ix. ISOMERIZACION DE XILENOS UNIDAD 602.

El propósito de esta unidad es el de isomerizar etilbenceno y meta-xileno a para-xileno y orto-xileno. Esto se lleva a cabo mediante la acción de un catalizador de un metal precioso, a temperatura y presión elevadas en la presencia de hidrógeno. La mezcla resultante se envía a la fraccionadora de xilenos.

x. XILENOS PLUS UNIDAD 702.

En esta sección se lleva a cabo la conversión de tolueno a benceno y xilenos a través de una reacción de desproporción, y la conversión de tolueno y aromáticos de 9 átomos de carbono a xilenos a través de una reacción de transalquilación. La reacción predominante es la desproporción del tolueno.

La mezcla resultante se envía a la fraccionadora benceno-tolueno.

xi. HIDRODEALQUILACION UNIDAD 802.

En este proceso se lleva a cabo la conversión de tolueno a benceno. La mezcla resultante se envía a la unidad fraccionadora de benceno-tolueno.

## 4.2 BASES DEL ANALISIS.

Para este estudio, se contempló la posibilidad de considerar las siguientes alternativas en la integración térmica de las plantas del tren de aromáticos:

- i. Considerar las condiciones de operación reales de cada planta.
- ii. Considerar el desarrollo de un diseño nuevo de cada planta.
- iii. Considerar las condiciones de operación del diseño original de cada planta.

Las primeras dos alternativas se desecharon, considerándose que la tercera opción es la más conveniente para el desarrollo de este análisis. Las razones para tal decisión fueron las siguientes:

Para que el estudio se realizara en base a las condiciones de operación reales de cada planta, sería necesario disponer de una instrumentación muy completa en las plantas, así como de elementos de cálculo que permitan obtener los datos de propiedades y condiciones de operación de las corrientes sujetas a intercambio de calor. Actualmente no se dispone de todos estos elementos por lo que no se considera esta alternativa en este estudio.

En el desarrollo de un diseño nuevo de cada planta, se requiere de una infraestructura amplia para el diseño y simulación de equipos y procesos, así como de una amplia experiencia y conocimiento de éstos. Por lo anterior, esta alternativa se considera fuera del alcance de este estudio.

Referente a considerar como base de este estudio las condiciones de operación del diseño original de cada planta, se tiene toda la información requerida en este caso (consistente en datos de operación y propiedades de las

corrientes de proceso y servicios) en los libros de proceso de las plantas. De esta manera, obteniéndose estos datos se puede desarrollar el análisis de integración térmica. Además, dadas las características de este trabajo en el que se pretende probar la funcionalidad de los programas de cómputo desarrollados, los esquemas de integración de calor considerados en el diseño original de cada planta representan una muy buena base de comparación.

Es importante mencionar que el desarrollo de este análisis se centra en aquellas plantas que son susceptibles de mejorarse en su integración de calor sin necesidad de integrarse con otras plantas, esto se decidió con el propósito de mantener la flexibilidad y operabilidad de cada planta.

En relación con la planta fraccionadora del refinado, se excluyó del análisis debido a que no se encontró el libro de proceso donde se localiza la información requerida para el desarrollo del análisis.

#### 4.3 CONSUMO DE SERVICIOS CONSIDERADO EN EL DISEÑO ORIGINAL DE CADA PLANTA.

El consumo de servicios considerado en el diseño original de cada planta es una de las bases de comparación en el análisis que se desarrolla en este trabajo. También, se consideran como parámetros de comparación, el costo total de la red, la flexibilidad y operabilidad de la misma.

En la Tabla 4.1 se presenta para cada planta del tren de aromáticos, el consumo de servicios y la recuperación de calor considerados en el diseño original de cada una de ellas.

Posteriormente, cuando ya se ha determinado en el análisis que plantas son susceptibles de mejorarse en su integración de calor, se presenta para estas plantas una estimación del costo total de la red de recuperación de calor.

TABLA 4.1 CONSUMO DE SERVICIOS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO Y RECUPERACION DE CALOR CONSIDERADOS EN EL DISEÑO ORIGINAL DE CADA PLANTA.

PLANTA O SECCION	DTmin OF	CARGA TERMICA CALENTAMIENTO BTU/HR	CARGA TERMICA ENFRIAMIENTO BTU/HR	CALOR RECUPERADO BTU/HR	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS BTU/HR
REFORMACION BTX (PREP. CARGA)	31.	129 600 000.	208 645 200.	8 975 500.	338 245 200.
REFORMACION BTX (REACCION)	43.	322 300 000.	143 200 000.	410 500 000.	465 500 000.
REFORMACION BTX (ESTAB. REFOR)	190.	83 400 000.	52 109 000.	28 849 600.	135 509 000.
FRACCIONADORA DE REFORMADO	15.	60 134 000.	76 734 000.	0.	136 868 000.
EXTRACCION LIO-LIO AROMATICOS	30.	102 800 000.	99 870 000.	76 600 000.	202 670 000.
FRACCIONADORA BENCENO-TOLUENO	15.	147 961 000.	175 506 000.	0.	323 467 000.
FRACCIONADORA DE XILENOS	39.	286 604 000.	370 577 000.	0.	657 181 000.
CRISTALIZACION DE PARA-XILENO	20.	61 760 000.	89 383 000.	98 143 000.	151 143 000.
FRACCIONADORA ALIM. ISOM. XIL.	15.	15 793 000.	15 905 000.	0.	31 698 000.
ISOMERIZACION DE XILENOS	64.	207 500 000.	155 000 000.	555 800 000.	962 500 000.
XILENOS PLUS	79.	60 942 000.	50 944 000.	65 721 000.	111 866 000.
HIDRODEALQUILACION DE TOLUENO	100.	12 900 000.	18 670 000.	59 240 000.	31 570 000.
TOTAL	—	1491 694 000.	1456 543 200.	1303 829 100.	2948 237 200.

#### 4.4 ESTRATEGIA DE ANALISIS.

El delimitamiento de una estrategia en el análisis de las plantas del tren de aromáticos es de primordial importancia ya que deben considerarse todas las posibles alternativas de mejoramiento de la integración de calor en cada planta, asegurándose que la red de recuperación de calor que se identifique como mejor opción sea práctica, operable y de bajo costo, y además debe procurarse que no sea excesivamente grande el número de cálculos involucrados en el análisis.

Para este trabajo, el estudio de las plantas se dividió en siete etapas, las cuales se describen a continuación:

1. Determinación del mínimo consumo de servicios para cada planta empleándose el acercamiento de temperaturas límite considerado en el diseño original.

2. Determinación del mínimo consumo de servicios para cada planta empleándose un acercamiento de temperaturas límite de 20.0 °F el cual es menor al considerado en el diseño original.

3. Análisis de resultados identificándose las plantas cuya integración de calor no puede mejorarse y las plantas en las que existe la posibilidad de mejorar la integración de calor.

Para las plantas en las que puede mejorarse la integración de calor se continuó el análisis con los siguientes cálculos:

4. Determinación del mínimo número de unidades de intercambio de calor, configuración final de la red de recuperación de calor y costo total de la misma, empleándose el acercamiento de temperaturas límite considerado en el diseño original.

5. Determinación del mínimo número de unidades de intercambio de calor, configuración final de la red de recuperación de calor y costo total de la misma, empleándose un acercamiento de temperaturas límite igual a 20.0 °F, el cual es menor al considerado en el diseño original.

6. Determinación del mínimo consumo de servicios, configuración final de la red de recuperación de calor y costo total de la misma, empleándose un número de unidades de intercambio de calor igual al existente en el diseño original de cada planta.

#### 7. Análisis de resultados.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas en que se dividió el estudio.



#### 4.5 RESULTADOS DEL ANALISIS.

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos en la determinación del mínimo consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento, para cada planta, empleándose el acercamiento de temperaturas límite considerado en el diseño original.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos en la determinación del mínimo consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento, para cada planta, empleándose un acercamiento de temperaturas límite de 20.0 GF.

En la Tabla 4.4 se presenta una comparación del consumo de servicios considerado en el diseño original de cada planta, el calculado empleando un acercamiento de temperaturas límite igual al diseño original y el calculado empleando un acercamiento de temperaturas límite de 20.0 GF.

Como puede apreciarse en los resultados reportados en la Tabla 4.4 las siguientes plantas no son susceptibles de mejorarse en su integración de calor:

- Reformación BTX (preparación de la carga).
- Reformación BTX (estabilización de reformado).
- Fraccionadora de reformado.
- Fraccionadora Benceno-Tolueno.
- Fraccionadora de Xilenos.
- Fraccionadora de la alimentación a isomerización de Xilenos.

Por el contrario, las plantas que pueden mejorarse en su integración de calor son las siguientes:

- Reformación BTX (sección de reacción).
- Extracción líquido-líquido de aromáticos.
- Cristalización de Para-Xileno.

- Isoerización de Xilenos.
- Xilenos Plus.
- Hidrodesalquilación de Tolueno.

En la Tabla 4.5 se presenta una estimación del costo total de la red de recuperación de calor para las plantas que son susceptibles de mejorarse en su integración de calor, para las condiciones de operación consideradas en el diseño original de cada planta. Estos valores estimados se utilizan como base de comparación en el análisis.

En las Tablas 4.6 a 4.8 se presentan los resultados obtenidos en la determinación del número mínimo de unidades de intercambio de calor, configuración final de la red, costo anual de los servicios, costo anual de los equipos y costo total anual, para cada planta susceptible de mejorarse en su integración de calor.

La Tabla 4.6 muestra estos resultados para el caso en el que se emplea un acercamiento de temperaturas límite igual al del diseño original de cada planta.

La Tabla 4.7 muestra los resultados para el caso en el que se emplea un acercamiento de temperaturas límite igual a 20.0 GF.

La Tabla 4.8 presenta los resultados para el caso en el que se emplea un número de unidades de intercambio de calor igual al del diseño original de cada planta.

TABLA 4.2 CONSUMO DE SERVICIOS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO Y RECUPERACION DE CALOR EMPLEANDO UN ACERCAMIENTO DE TEMPERATURAS LIMITE IGUAL AL DISEÑO ORIGINAL DE CADA PLANTA.

PLANTA O SECCION	$\Delta T_{min}$ GF	CARGA TERMICA CALENTAMIENTO BTU/HR	CARGA TERMICA ENFRIAMIENTO BTU/HR	CALOR RECUPERADO BTU/HR	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS BTU/HR
REFORMACION BTX (PREP. CARGA)	31.	129 600 000.	208 645 200.	8 975 500.	338 245 200.
REFORMACION BTX (REACCION)	43.	302 494 388.	123 394 396.	430 305 576.	425 888 784.
REFORMACION BTX (ESTAB. REFOR)	190.	89 400 000.	52 109 000.	28 849 599.	135 509 000.
FRACCIONADORA DE REFORMADO	15.	60 134 000.	76 734 000.	0.	136 868 000.
EXTRACCION LIO-LIQ AROMATICOS	30.	99 999 999.	97 069 999.	79 399 996.	197 069 998.
FRACCIONADORA BENCENO-TOLUENO	15.	147 961 000.	175 505 996.	0.	323 466 996.
FRACCIONADORA DE XILENOS	39.	286 604 000.	370 576 988.	0.	657 180 988.
CRISTALIZACION DE PARA-XILENO	20.	34 085 422.	61 708 371.	125 817 566.	95 793 793.
FRACCIONADORA ALIM. ISOM. XIL.	15.	15 799 000.	15 905 000.	0.	31 698 000.
ISOMERIZACION DE XILENOS	64.	182 092 044.	129 592 046.	581 207 936.	311 684 090.
XILENOS PLUS	79.	54 362 514.	44 364 515.	72 300 482.	98 727 029.
HIDRODEREQUILIBACION DE TOLUENO	100.	7 740 000.	13 509 999.	64 399 998.	21 249 999.
T O T A L	--	1404 266 367.	1369 115 510.	1391 256 653.	2773 381 877.

TABLA 4.3 CONSUMO DE SERVICIOS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO Y RECUPERACION DE CALOR EMPLEANDOSE UN ACERCAMIENTO DE TEMPERATURAS LIMITE IGUAL A 20.0 GF.

PLANTA O SECCION	DT <sub>min</sub> GF	CARGA TERMICA CALENTAMIENTO BTU/HR	CARGA TERMICA ENFRIAMIENTO BTU/HR	CALOR RECUPERADO BTU/HR	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS BTU/HR
REFORMACION BTX (PREP. CARGA)	20.	129 600 000.	208 645 200.	8 975 500.	338 245 200.
REFORMACION BTX (REACCION)	20.	278 614 180.	99 514 192.	454 185 784.	378 128 372.
REFORMACION BTX (ESTAB. REFOR)	20.	83 400 000.	52 109 000.	28 849 599.	135 509 000.
FRACCIONADORA DE REFORMADO	20	60 134 000.	76 734 000.	0.	136 868 000.
EXTRACCION LIO-LIO AROMATICOS	20.	96 607 142.	93 677 143.	82 792 850.	190 284 285.
FRACCIONADORA BENCENO-TOLUENO	20.	147 961 000.	175 505 996.	0.	323 466 996.
FRACCIONADORA DE XILENOS	20.	286 604 000.	370 576 988.	0.	657 180 988.
CRISTALIZACION DE PARA-XILENO	20.	34 085 422.	61 708 371.	125 817 566.	95 793 793.
FRACCIONADORA ALIM. ISOM. XIL.	20.	15 793 000.	15 905 000.	0.	31 698 000.
ISOMERIZACION DE XILENOS	20.	126 098 428.	73 598 429.	637 201 544.	199 696 857.
XILENOS PLUS	20.	45 193 566.	35 195 566.	81 469 430.	80 389 132.
HIRODEALQUILACION DE TOLUENO	20.	3 612 000.	9 381 999.	68 527 998.	12 993 999.
T O T A L	--	1307 702 738.	1272 551 884.	1487 820 271.	2580 254 622.

TABLA 4.4 COMPARACION DEL CONSUMO DE SERVICIOS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO CONSIDERADO EN EL DISEÑO ORIGINAL DE CADA PLANTA Y EL CALCULADO MEDIANTE EL METODO DE LA TABLA PROBLEMA.

PLANTA O SECCION DEL TREN DE AROMATICOS	DISEÑO ORIGINAL		CALCULADO CONSIDERANDO DT <sub>min</sub> = DISEÑO ORIGINAL		CALCULADO CONSIDERANDO DT <sub>min</sub> = 20.0 GF	
	DT <sub>min</sub> GF	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS BTU/HR	DT <sub>min</sub> GF	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS BTU/HR	DT <sub>min</sub> GF	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS BTU/HR
REFORMACION BTX (PREP. CARGA)	31.	338 245 200.	31.	338 245 200.	20.	338 245 200.
REFORMACION BTX (REACCION)	43.	465 500 000.	43.	425 888 784.	20.	378 128 372.
REFORMACION BTX (ESTAB. REFOR)	190.	135 509 000.	190.	135 509 000.	20.	135 509 000.
FRACCIONADORA DE REFORMADO	15.	136 868 000.	15.	136 868 000.	20	136 868 000.
EXTRACCION LIO-LIO AROMATICOS	30.	202 670 000.	30.	197 069 998.	20.	190 284 285.
FRACCIONADORA BENCENO-TOLUENO	15.	323 467 000.	15.	323 466 996.	20.	323 466 996.
FRACCIONADORA DE XILENOS	39.	657 181 000.	39.	657 180 988.	20.	657 180 988.
CRISTALIZACION DE PARA-XILENO	20.	151 149 000.	20.	95 793 793.	20.	95 793 793.
FRACCIONADORA ALIM. ISOM. XIL.	15.	31 698 000.	15.	31 698 000.	20.	31 698 000.
ISOMERIZACION DE XILENOS	64.	362 500 000.	64.	311 684 090.	20.	199 696 857.
XILENOS PLUS	79.	111 886 000.	79.	98 727 029.	20.	80 389 132.
HIDRODEALQUILACION DE TOLUENO	100.	31 570 000.	100.	21 249 999.	20.	12 993 999.
TOTAL	--	2948 237 200.	--	2773 381 877.	--	2580 254 622.

\* EN ESTAS PLANTAS NO SE MEJORA LA INTEGRACION DE CALOR.

TABLA 4.5 ESTIMACION DEL COSTO TOTAL DE LA RED DE RECUPERACION DE CALOR PARA LAS PLANTAS DEL TREN DE AROMATICOS PARA EL CASO DEL DISEÑO ORIGINAL.

PLANTA O SECCION	DTmin GF	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS MM BTU/HR	NUMERO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO	COSTO DE LOS SERVICIOS MM \$/AÑO	COSTO DE LOS EQUIPOS MM \$/AÑO	COSTO TOTAL MM \$/AÑO
REFORMACION BTX (REACCION)	43.	465.500	13	20 387.	1 126.	21 513.
EXTRACCION LIO-LIO AROMATICOS	30.	202.670	14	11 405.	199.	11 604.
CRISTALIZACION DE PARA-XILENO	20.	151.143	15	5 750.	215.	5 965.
ISOMERIZACION DE XILENOS	64.	362.500	9	13 658.	785.	14 443.
XILENOS PLUS	79.	111.886	13	4 688.	231.	4 919.
HIDRODEALQUILACION DE TOLUENO	100.	31.570	11	965.	101.	1 066.
TOTAL	—	1325.269	—	56 853.	2 657.	59 510.

TABLA 4.6 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DETERMINACION DEL NUMERO MINIMO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO DE CALOR,  
 CONFIGURACION FINAL Y COSTO TOTAL DE LA RED DE RECUPERACION DE CALOR, EMPLEANDOSE UN  
 ACERCAMIENTO DE TEMPERATURAS LIMITE IGUAL AL DISEÑO ORIGINAL DE CADA PLANTA.

PLANTA O SECCION	$DT_{min}$ GF	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS MM BTU/HR	NUMERO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO	COSTO DE LOS SERVICIOS MM \$/AÑO	COSTO DE LOS EQUIPOS MM \$/AÑO	COSTO TOTAL MM \$/AÑO
REFORMACION BTX (REACCION)	43.	425.889	21	18 909.	1 138.	20 047.
EXTRACCION LIO-LIO AROMATICOS	30.	197.070	15	11 094.	215.	11 309.
CRISTALIZACION DE PARA-XILENO	20.	95.794	20	3 632.	273.	3 905.
ISOMERIZACION DE XILENOS	64.	311.684	14	11 931.	814.	12 745.
XILENOS PLUS	79.	98.727	17	3 957.	278.	4 235.
HIDRODEALQUILACION DE TOLUENO	100.	21.250	16	604.	110.	714.
TOTAL	—	1150.413	—	50 127.	2 928.	52 955.

TABLA 4.7 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DETERMINACION DEL NUMERO MINIMO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO DE CALOR,  
 CONFIGURACION FINAL Y COSTO TOTAL DE LA RED DE RECUPERACION DE CALOR, EMPLEANDOSE UN  
 ACERCAMIENTO DE TEMPERATURAS LIMITE IGUAL A 20.0 GF.

PLANTA O SECCION	DT <sub>min</sub> GF	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS MM BTU/HR	NUMERO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO	COSTO DE LOS SERVICIOS MM \$/AÑO	COSTO DE LOS EQUIPOS MM \$/AÑO	COSTO TOTAL MM \$/AÑO
REFORMACION BTX (REACCION)	20.	378.128	19	17 418.	1 153.	18 571.
EXTRACCION LIQ-LIQ AROMATICOS	20.	190.284	17	10 717.	257.	10 974.
CRISTALIZACION DE PARA-XILENO	20.	95.794	20	3 632.	273.	3 905.
ISOMERIZACION DE XILENOS	20.	199.697	14	8 125.	812.	8 937.
XILENOS PLUS	20.	80.389	17	3 959.	255.	4 214.
HIDRODEALQUILACION DE TOLUENO	20.	12.994	17	314.	121.	435.
TOTAL	—	957.206	—	44 165.	2 871.	47 036.



**TABLA 4.8 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DETERMINACION DEL NUMERO MINIMO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO DE CALOR, CONFIGURACION FINAL Y COSTO TOTAL DE LA RED DE RECUPERACION DE CALOR, EMPLEANDOSE UN NUMERO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO DE CALOR IGUAL AL DISEÑO ORIGINAL DE CADA PLANTA.**

PLANTA O SECCION	DT <sub>min</sub> GF	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS MM BTU/HR	NUMERO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO	COSTO DE LOS SERVICIOS MM \$/AÑO	COSTO DE LOS EQUIPOS MM \$/AÑO	COSTO TOTAL MM \$/AÑO
REFORMACION BTX (REACCION)	43.	465.500	13	20 387.	1 126.	21 513.
EXTRACCION LIG-LIG AROMATICOS	30.	202.670	14	11 405.	199.	11 604.
CRISTALIZACION DE PARA-XILENO	20.	-----	15	-----	-----	-----
ISOMERIZACION DE XILENOS	64.	362.500	9	13 658.	785.	14 443.
XILENOS PLUS	79.	111.886	13	4 688.	231.	4 919.
HIDRODEALQUILACION DE TOLUENO	100.	31.570	11	965.	101.	1 066.
TOTAL	---	-----	---	-----	-----	-----

#### 4.6 DISCUSION DE RESULTADOS.

En la Tabla 4.9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el análisis de las plantas del tren de aromáticos que son susceptibles de mejorarse en su integración de calor. Para las plantas en que se tiene el mayor potencial de ahorro en el costo total (Isomerización de Xilenos e Hidrodealquilación de Tolueno), en las Figuras 4.2 a 4.7 se muestran los esquemas de la red de recuperación de calor correspondientes a cada caso.

Las Figuras 4.2 a 4.4 presentan tres esquemas de la red de recuperación de calor de la Planta de Isomerización de Xilenos. Estos esquemas corresponden a la configuración de la red que se tiene en el diseño original de la planta, la configuración obtenida empleando un acercamiento de temperaturas de 64 BF, y la configuración resultante cuando se emplea un acercamiento de 20 BF.

Las Figuras 4.5 a 4.7 presentan tres esquemas de la red de recuperación de calor de la Planta de Hidrodealquilación de Tolueno. Estos esquemas corresponden a la configuración de la red que se tiene en el diseño original de la planta, la configuración obtenida empleando un acercamiento de temperaturas de 100 BF, y la configuración resultante cuando se emplea un acercamiento de 20 BF.

En base a los resultados reportados en la Tabla 4.9 y en los esquemas mostrados en las Figuras 4.2 a 4.7, se hacen las siguientes observaciones:

1. En los cálculos que se desarrollaron para estas plantas empleándose un acercamiento de temperaturas igual al considerado en el diseño original de cada planta, se obtuvo un consumo de servicios menor aunque el número de unidades de intercambio de calor es mayor. Por consiguiente el costo de los servicios es menor y el costo de los equipos mayor. Sin embargo, dado que el costo de los servicios es el factor dominante el resultado es una disminución en el costo total.

71 TABLA 4.9 RESUMEN FINAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANALISIS DE LAS PLANTAS DEL TREN DE AROMATICOS.

PLANTA / CASO	DTMIN GF.	CONSUMO TOTAL DE SERVICIOS EN \$/AÑO	NUMERO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO	COSTO DE LOS SERVICIOS EN \$/AÑO	COSTO DE LOS EQUIPOS EN \$/AÑO	COSTO TOTAL EN \$/AÑO	AHORRO (%)
<b>REFORMACION BTH (REACCION)</b>							
CASO: DISEÑO ORIGINAL	43.	465.500	13	20 387.	1 126.	21 513.	0.00
CASO: DTMIN = DISEÑO ORIGINAL	43.	425.889	21	18 909.	1 138.	20 047.	6.81
CASO: DTMIN = 20. GF	20.	378.128	13	17 419.	1 153.	18 571.	19.68
CASO: No UNI = DISEÑO ORIGINAL	--	465.500	13	20 387.	1 126.	21 513.	0.00
<b>EXTRACCION LIO-LIO AROMATICOS</b>							
CASO: DISEÑO ORIGINAL	30.	202.670	14	11 405.	199.	11 604.	0.00
CASO: DTMIN = DISEÑO ORIGINAL	30.	197.070	15	11 094.	215.	11 309.	2.54
CASO: DTMIN = 20. GF	20.	190.284	17	10 717.	257.	10 974.	5.43
CASO: No UNI = DISEÑO ORIGINAL	--	202.670	14	11 405.	199.	11 604.	0.00
<b>CRISTALIZACION DE PARA-XILENO</b>							
CASO: DISEÑO ORIGINAL	20.	151.143	15	5 750.	215.	5 965.	0.00
CASO: DTMIN = DISEÑO ORIGINAL	20.	95.794	20	3 632.	273.	3 905.	34.53
CASO: DTMIN = 20. GF	20.	95.794	20	3 632.	273.	3 905.	34.53
CASO: No UNI = DISEÑO ORIGINAL	--	151.143	15	5 750.	215.	5 965.	0.00
<b>ISOMERIZACION DE XILENOS</b>							
CASO: DISEÑO ORIGINAL	64.	362.500	9	13 658.	785.	14 443.	0.00
CASO: DTMIN = DISEÑO ORIGINAL	64.	311.684	14	11 931.	814.	12 745.	11.76
CASO: DTMIN = 20. GF	20.	199.697	14	9 125.	812.	9 937.	36.12
CASO: No UNI = DISEÑO ORIGINAL	--	362.500	9	13 658.	785.	14 443.	0.00
<b>XILENOS PLUS</b>							
CASO: DISEÑO ORIGINAL	79.	111.886	13	4 688.	231.	4 919.	0.00
CASO: DTMIN = DISEÑO ORIGINAL	79.	98.727	17	3 957.	278.	4 235.	13.91
CASO: DTMIN = 20. GF	20.	60.289	17	3 959.	255.	4 214.	14.33
CASO: No UNI = DISEÑO ORIGINAL	--	111.886	13	4 688.	231.	4 919.	0.00
<b>HIDRODEALQUILACION DE TOLUENO</b>							
CASO: DISEÑO ORIGINAL	100.	31.570	11	965.	101.	1 066.	0.00
CASO: DTMIN = DISEÑO ORIGINAL	100.	21.250	16	604.	110.	714.	39.02
CASO: DTMIN = 20. GF	20.	12.994	17	214.	121.	435.	59.19
CASO: No UNI = DISEÑO ORIGINAL	--	31.570	11	965.	101.	1 066.	0.00

FIG. 4.2 RED DE INTERCAMBIO DE CALOR DE LA PLANTA DE ISOMERIZACION DE XILENOS. CASO: DISEÑO ORIGINAL

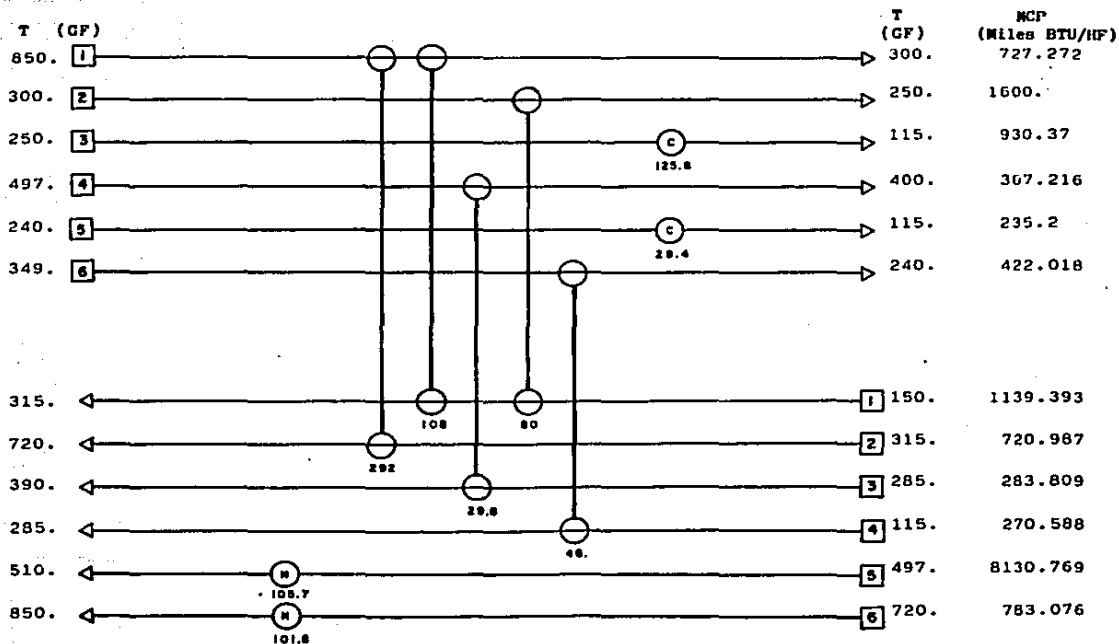


FIG. 4.3 RED DE INTERCAMBIO DE CALOR DE LA PLANTA DE ISOMERIZACION DE XILENOS. CASO:  $\Delta T_{min} = 64 \text{ GF}$

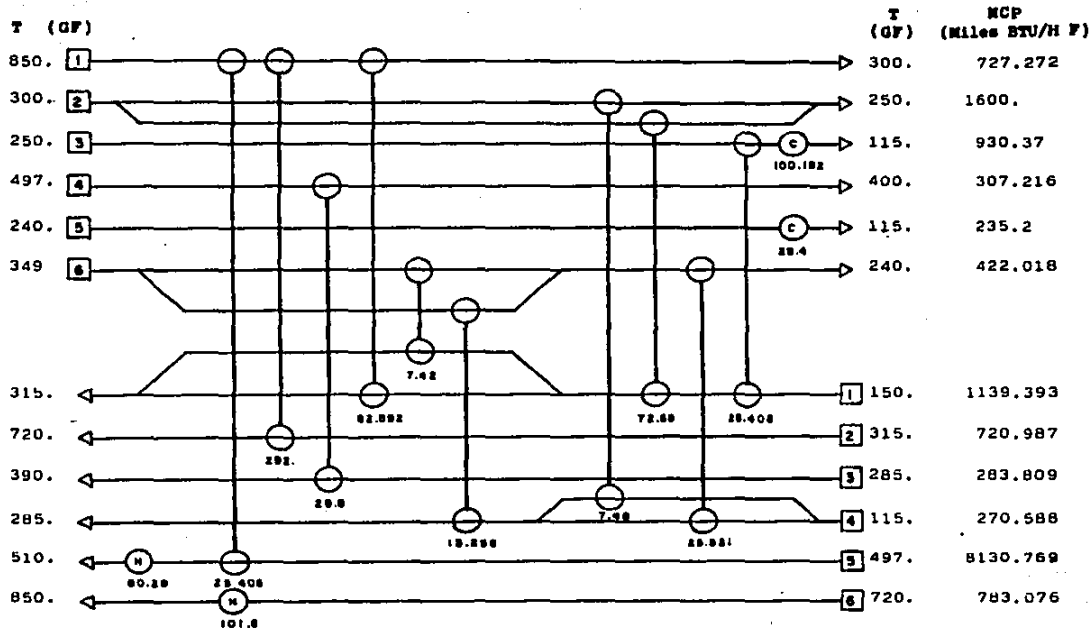


FIG. 4.4

RED DE INTERCAMBIO DE CALOR DE LA PLANTA DE ISOMERIZACION DE XILENOS.  
CASO: AT min = 20 °GF

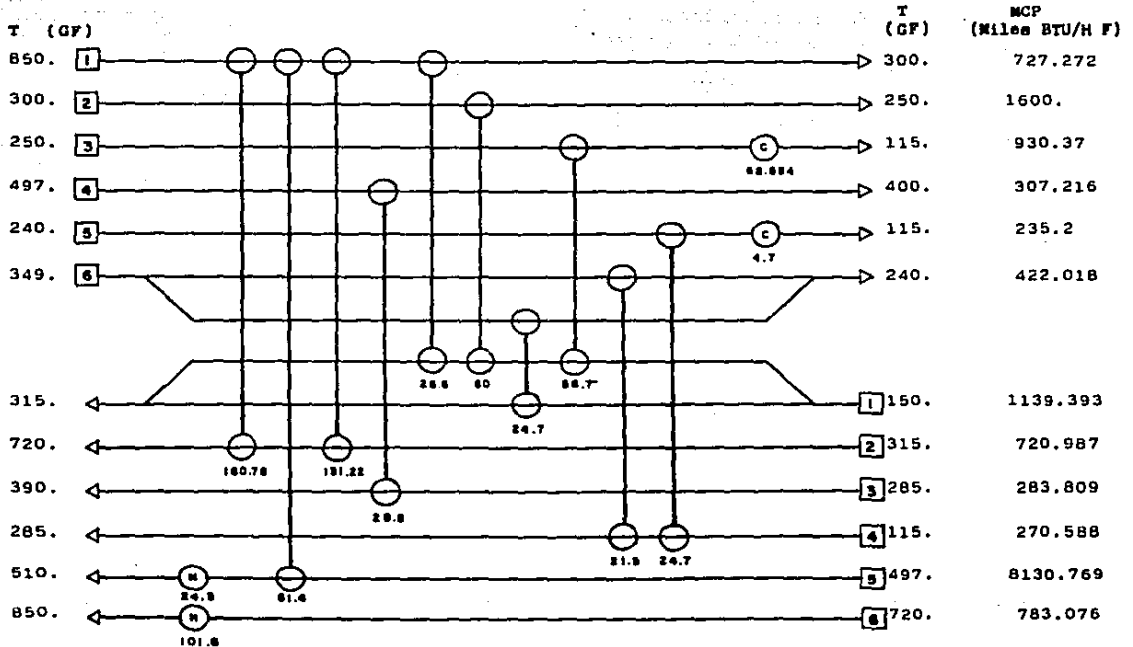


FIG. 4.5 RED DE INTERCAMBIO DE CALOR DE LA PLANTA DE HIDRODEALQUILACION.  
CASO: DISEÑO ORIGINAL.

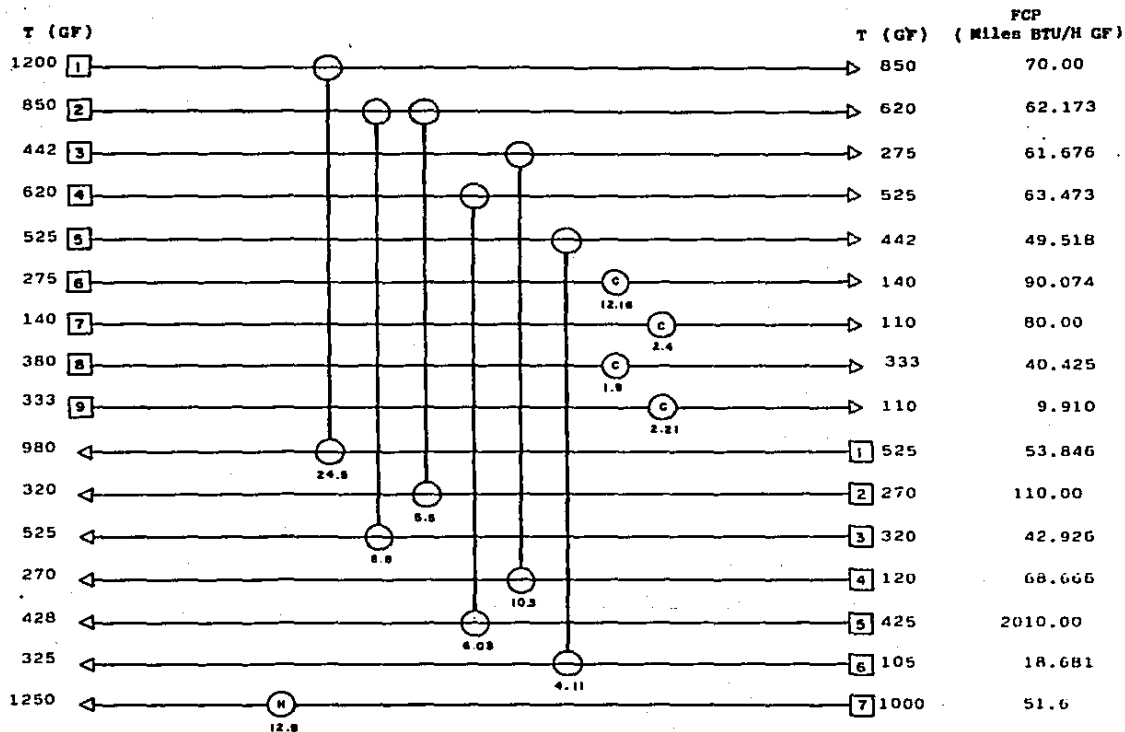


FIG. 4.6 RED DE INTERCAMBIO DE CALOR DE LA PLANTA DE HIDRODEALQUILACION.  
CASO:  $\Delta T_{min} = 100$  GF

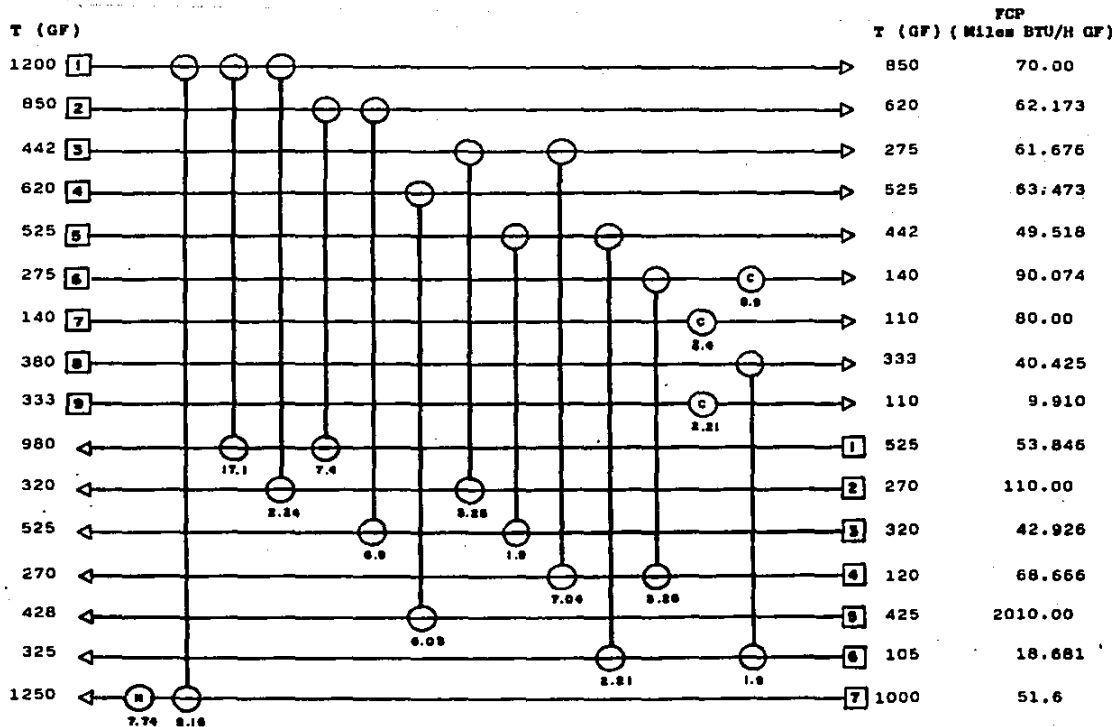
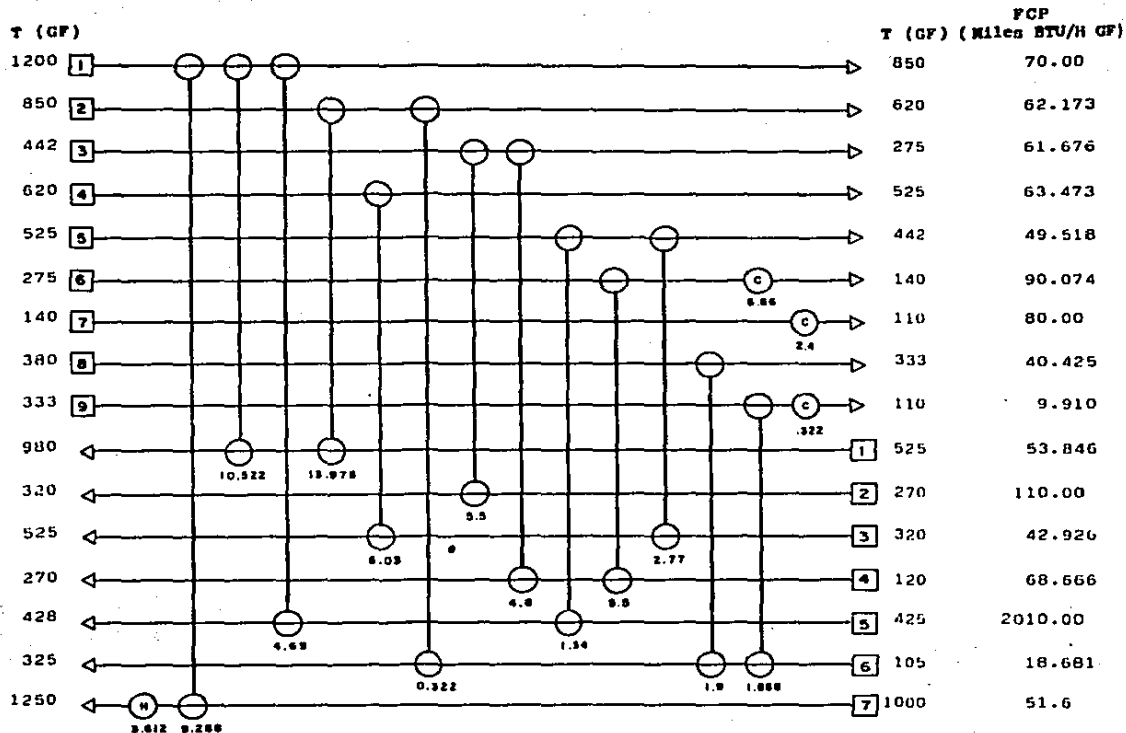




FIG. 4.7 RED DE INTERCAMBIO DE CALOR DE LA PLANTA DE HIDRODEALQUILACION.  
CASO:  $\Delta T_{min} = 20$  GF



2. En los cálculos que se desarrollaron para estas plantas empleándose un acercamiento de temperaturas igual a 20.0 6F, se obtuvo un ahorro considerable en el consumo de servicios y se esperaba que el costo de los equipos se incrementara notablemente debido a que el acercamiento de temperaturas empleado era pequeño ocasionando que se obtuviera un área de transferencia de calor grande. Sin embargo, se encontró que aunque el costo de los equipos si se incrementa (con respecto al costo de los equipos del diseño original), no es el término de costos dominante y por consiguiente al tenerse un ahorro grande en el consumo de servicios el resultado final es un ahorro en el costo total. Este comportamiento se observó en todas las plantas.

3. En los cálculos que se desarrollaron para estas plantas empleándose un número de unidades de intercambio de calor igual al del diseño original de cada planta, se encontró que el consumo de servicios considerado en el diseño original de la mayoría de las plantas corresponde al mínimo posible para ese número de unidades de intercambio de calor, lo cual indica que esas plantas estuvieron bien integradas en la época en que se desarrolló su diseño (1975) y la razón de que ahora sean susceptibles de mejorarse en su integración de calor se debe al constante incremento en los costos de los servicios (agua de enfriamiento, vapor de calentamiento, gas combustible, etc.). Sin embargo, la planta de cristalización de para-xileno fué la excepción. En esta planta se encontró que la red de recuperación de calor considerada en el diseño original viola el concepto del punto de pliegue, (se emplea servicio de calentamiento abajo del punto de pliegue y servicio de enfriamiento arriba del punto de pliegue) de manera que se incurre en la penalización de incrementar el consumo de ambos servicios. Este diseño no es recomendable y es de alto costo, más aun debido a que el costo de los servicios es el término dominante.

4. Una característica importante de las redes de recuperación de calor considerada en el diseño original de las plantas es que se utilizan pocas unidades de intercambio de calor y por el contrario las redes calculadas en este trabajo emplean un mayor número de unidades de intercambio de calor e incluso se requiere de división de corrientes, mezclado de corrientes y corrientes de derivación complicándose en un alto grado la configuración de la red que desde el punto de vista energético es muy eficiente. Sin embargo, como indican Linnhoff y Hindmarsh (1) : "... el objetivo de diseño no es únicamente la identificación de una topología de costo óptimo sino también una que sea práctica, segura y controlable", y por ello los resultados reportados (con ahorros en el costo total) no deben considerarse como la mejor opción sino que únicamente son indicativos de los potenciales de ahorro que pueden lograrse con un análisis más profundo de cada una de las plantas. Al decir un análisis más profundo nos referimos a un análisis conjunto del proceso, condiciones de operación e integración de calor que permitirá obtener ahorros considerables de energía empleándose una red que sea práctica, segura y controlable y por consiguiente una red óptima.

## 5. CONCLUSIONES.

1. Los métodos de cálculo para la síntesis óptima de redes de intercambio de calor empleados en este trabajo resultaron en su mayoría de gran utilidad, ya que son confiables, rápidos y de fácil utilización. La excepción es el método para la obtención de la configuración final de la red ya que no es tan rápido como se desea y la obtención de la solución es compleja para problemas de magnitudes grandes como los manejados en este trabajo.

2. Se recomienda que antes de proceder a la aplicación del método para la obtención de la configuración final, se realice un análisis preliminar de la red de intercambio de calor, intentando simplificar el problema y cuidar la inicialización de variables de la cual depende grandemente la obtención de la solución. Probablemente, con un mayor trabajo de desarrollo sobre este método se salven los problemas encontrados.

3. El método desarrollado en este trabajo para la determinación del consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento, habiéndose establecido el número de unidades de intercambio de calor, es de gran utilidad en el desarrollo de un análisis de sensibilidad de la red de recuperación de calor, ya que permite determinar en cuanto se incrementa el consumo de servicios al disminuir el número de unidades de intercambio de calor. Este método se empleó en el análisis de las plantas del tren de aeronáuticos, resultando ventajoso en este análisis en los casos en que se fijó el número de unidades de intercambio de calor en la planta.

4. Los programas de cómputo desarrollados en este trabajo permiten al usuario desarrollar la síntesis óptima de redes de recuperación de calor, sin que tenga un conocimiento profundo de los métodos empleados y de manera muy rápida y

sencilla. Sin que esto quiera decir, que el usuario utilice una "caja negra", ya que los métodos utilizados se basan en desarrollos publicados en la literatura, y si se desea pueden corroborarse las formulaciones desarrolladas y los resultados en cada una de las etapas del procedimiento de síntesis.

5. En el análisis de las plantas del tren de aromáticos se excluyó la planta de fraccionamiento del refinado (proveniente de la planta de extracción líquido-líquido de aromáticos) por falta de información.

6. El análisis se centra en aquellas plantas que son susceptibles de mejorarse en su integración de calor, sin necesidad de integrarse con otras plantas, con el propósito de mantener la flexibilidad y operabilidad de cada planta.

7. En este análisis se encontró que seis plantas no pueden mejorarse en su integración de calor por sí solas, sino que se requiere integrarse con otras plantas.

8. Las seis plantas restantes sí son susceptibles de mejorarse en su integración de calor y se encontró en todos los casos, que si se disminuye el acercamiento de temperaturas límite, se pueden lograr ahorros sustanciales en el costo total de la red.

9. El costo de los servicios de calentamiento y enfriamiento es el término dominante en la síntesis de redes de recuperación de calor, por lo que el diseño de la red se dirige hacia el uso de acercamientos de temperatura límite pequeños que minimicen el consumo de servicios y por consiguiente el costo total. Sin embargo, esto ocasiona que se emplee un mayor número de unidades de intercambio de calor, división de corrientes, mezcla de corrientes y corrientes de derivación que complican en gran manera la configuración de la red y debe tenerse en cuenta que el objetivo de diseño además de comprender la obtención de una red de costo total óptimo, debe asegurar que esta sea

práctica, segura y controlable. Para cumplir lo anterior, se recomienda que el análisis no sólo comprenda la síntesis de la red sino que se realice conjuntamente un análisis del proceso, condiciones de operación, integración de calor (síntesis de redes), y se consideren otros factores como son la localización y arreglo general del equipo.

10. Por lo anterior, los resultados reportados con ahorro en el costo total, no deben considerarse como la mejor opción sino que únicamente son indicativos de los potenciales de ahorro que pueden lograrse en cada una de las plantas.

11. La síntesis de la red óptima de recuperación de calor debe desarrollarse conjuntamente con un análisis del proceso. Además, deben considerarse diferentes condiciones de operación de la planta (por ejemplo, condiciones máximas, normales y mínimas), con el propósito de obtener una red de costo total óptimo, práctica, segura y controlable.

**A P E N D I C E S**

## APENDICE A.

METODO DE LA TABLA PROBLEMA PARA DETERMINAR EL CONSUMO DE SERVICIOS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO, Y LOCALIZAR EL PUNTO DE PLIEGUE. ASPECTOS IMPORTANTES SOBRE EL PUNTO DE PLIEGUE.

En este apéndice se presenta una discusión del punto de pliegue y del método descrito por Linnhoff y Flower (2), y Linnhoff y Hindmarsh (1). La discusión se divide en cinco partes. Primeramente, se presenta una revisión de como localizar el punto de pliegue y la determinación del consumo mínimo de servicios. En segundo término, se explica el significado físico del punto de pliegue y sus implicaciones en el uso de servicios de calentamiento y enfriamiento. Como tercer punto, se presenta un arreglo esquemático que es de gran valor en la representación del punto de pliegue y los datos de las corrientes que integrarán la red de intercambio de calor. Posteriormente, en cuarto lugar, se describen los factores que afectan la existencia de puntos de pliegue en problemas industriales de redes de intercambio de calor y se da una explicación de porqué en la mayoría de los problemas industriales se localizan puntos de pliegue. Finalmente, se consideran las implicaciones del punto de pliegue en los costos de capital.

### LOCALIZACION DEL PUNTO DE PLIEGUE.

La tarea de localizar el punto de pliegue y por consiguiente la aplicación del método de la tabla problema se ilustra mediante un problema ejemplo cuyos datos de las corrientes se muestran en la Tabla A.1. Nótese que los datos se basan en una capacidad calorífica constante. Esta característica a menudo era considerada una desventaja por muchos autores que realizaban desarrollos en esta área. Sin embargo, muchos procesos prácticos, con o sin cambio de fase, pueden fácilmente describirse en términos de datos



CORRIENTE, NUMERO Y TIPO	CAPACIDAD CALORIFICA MCP ( KW / °C )	TENT ( °C )	TSAL ( °C )
(1) CALIENTE	2.	150.	60.
(2) CALIENTE	8.	90.	60.
(3) FRIA	2.5	20.	125.
(4) FRIA	3.	25.	100.

$\Delta T_{min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

TABLA A.1 DATOS DE LAS CORRIENTES PARA EL PROBLEMA EJEMPLO.

linearizados de temperatura-entalpía ( es decir, capacidad calorífica constante) (11).

Mediante el algoritmo de la tabla problema presentado por Linnhoff y Flower (2), puede localizarse el punto de pliegue para una red de intercambio de calor y calcularse los requerimientos mínimos de servicios de calentamiento y enfriamiento, empleándose un valor específico de acercamiento de temperaturas ( $\Delta T_{min}$ ). Los resultados obtenidos con este procedimiento de cálculo se muestran en la Tabla A.2 .

En esta tabla, se presentan a la izquierda, los datos de las corrientes divididas en 6 intervalos de temperaturas, correspondientes a las "subredes" y por consiguiente llamados SN1 - SN6. Estos intervalos se definen por las temperaturas de entrada y salida de las corrientes de proceso. Por ejemplo, SN3 está definida por la temperatura de salida de la corriente 4 y la temperatura de entrada de la corriente 2.

Nótese que para asegurar la factibilidad de un intercambio de calor , las corrientes calientes y frías estan separadas por  $\Delta T_{min}$ . Por ejemplo, el límite superior de SN3 está definido por la corriente 4 a 100  $^{\circ}$ C, mientras que la corriente caliente en este punto está a 120  $^{\circ}$ C. La factibilidad de los intercambios de calor entre las corrientes calientes y frías es una característica importante del algoritmo de la tabla problema. Además, para cada subred existirá un déficit o un exceso de calor neto pero nunca se presentarán ambos. Este déficit o exceso de calor neto se muestra en la columna 1 de la Tabla A.2 . La convención de los signos es tal que un exceso de calor se representa por un signo negativo y un déficit por un signo positivo.

Otra característica importante del algoritmo de la tabla problema es la factibilidad de transferir calor de las subredes que se encuentran a mayor temperatura hacia las subredes de menor temperatura (transferencia de calor en cascada). En otras palabras, el exceso de calor que se encuentre en las subredes de mayor temperatura puede emplearse para satisfacer el déficit de calor que se presente en las subredes de menor temperatura. El cálculo de la cantidad de calor que puede transferirse de esta manera se

T (m) (°C)	CORRIENTES Y TEMPERATURAS				DEFICIT	ACUMULADO		FLUJOS DE CALOR	
	SUBRED	CORRIENTES T (°C)		CORRIENTES CALIENTES (1) (2)		ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
		FRIAS (3) (4)							
130			180						
125	SN1	-125	145		-10	0	10	107.5	117.5
100	SN2	-100	120		+12.5	10	-2.5	117.5	108
70	SN3	-70	95		+105	-2.5	-107.5	108	0
40	SN4	-40	60		-138	-107.5	27.5	0	138
25	SN5	-25			+82.5	27.5	-88	138	82.5
20	SN6	-20			+12.5	-88	-67.5	82.5	40

TABLA A.2 LA TABLA PROBLEMA PARA EL EJEMPLO DE CALCULO.

lleva a cabo en las columnas 2 y 3 de la Tabla A.2. Inicialmente se supone que el calor suministrado por servicios de calentamiento externos es cero. Esto se representa en la Tabla A.2 por una entrada de calor de cero en la subred SN1 ( columna 2 ). Habiéndose hecho esta suposición , es una tarea fácil calcular la salida de calor de SN1 mediante la adición del exceso a la entrada de calor. Esta salida de calor de la subred SN1 es la entrada a la subred SN2. El procedimiento de cálculo se repite para todas las subredes.

Para que la red sea factible, el flujo de calor de las subredes de mayor temperatura hacia subredes de menor temperatura no debe ser negativo. Así que, si se generan valores negativos en las columnas 2 y 3 de la Tabla A.2, el flujo de calor de entrada a SN1 (que corresponde a los servicios de calentamiento) debe incrementarse. El mínimo incremento será el que garantice que todos los flujos de calor sean positivos o iguales a cero - véanse las columnas 4 y 5 de la Tabla A.2 -. (Es decir, el mínimo incremento que garantiza que todos los flujos de calor sean positivos o igual a cero, corresponde a la entrada de calor de valor más negativo - véase la columna 2 - ). Así, el mínimo uso de servicios de calentamiento está dado por la alimentación a la subred SN1 (columna 4). El mínimo uso de servicios de enfriamiento está dado por la salida de calor de la subred más fría (columna 5).

Los resultados generados por el análisis de la tabla problema (Tabla A.2) se muestran esquemáticamente en la Fig. A.1(a). Cada subred se muestra con todos los flujos de calor que fueron calculados por el algoritmo de la tabla problema. Obsérvese que el flujo de calor de la subred SN3 a la subred SN4 es cero. Todos los demás flujos son positivos. El punto donde el flujo de calor es cero, representa el punto de pliegue.

En la Fig. A.1(b), se muestra el punto de pliegue dividiendo el problema en dos regiones, un lado caliente y un lado frío. El lado caliente, comprende todas las corrientes o partes de las corrientes que están más calientes que la

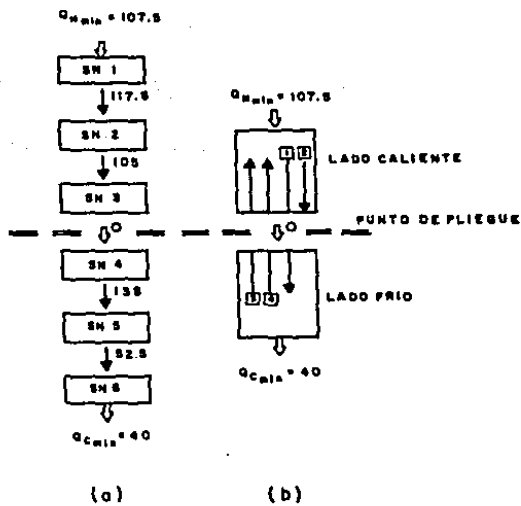


FIG. A.1 (a) DIAGRAMA DE FLUJOS DE CALOR ENTRE SUBREDES.  
 (b) SUBREDES COMBINADAS EN UN LADO CALIENTE Y UN LADO FRIO.

temperatura del punto de pliegue, y en este lado se permite el intercambio de calor entre las corrientes de proceso que se encuentran en esta región y únicamente se requiere calor proveniente del servicio de calentamiento. No se requiere servicio de enfriamiento. El lado frío, comprende todas las corrientes o partes de las corrientes que están más frías que la temperatura del punto de pliegue, y en este lado se permite el intercambio de calor entre las corrientes de proceso que se encuentran en esta región y únicamente se requiere el uso de servicio de enfriamiento. No se requiere servicio de calentamiento. Como se puede observar, no existe transferencia de calor a través del punto de pliegue, y los requerimientos de servicios corresponden al mínimo posible.

#### SIGNIFICADO DEL PUNTO DE PLIEGUE.

Con el propósito de presentar las causas y efectos de utilizar un consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento mayor que el consumo mínimo requerido, se hará uso del mismo problema ejemplo, dividido en lado caliente y lado frío (véase la Fig. A.2). Nótese que en esta Figura el lado caliente se refiere como un "sumidero de calor", ya que únicamente se requiere el uso de servicio de calentamiento.

Primero, se considera el efecto de transferir calor a través del punto de pliegue (véase Fig. A.2(a)). Cualquier cantidad de calor que se transfiera a través del punto de pliegue, debe (por un balance de entalpía alrededor del sumidero) ser suministrado por un servicio de calentamiento en exceso al requerimiento mínimo. Similarsente, un balance de entalpía alrededor de la fuente (lado frío) muestra que la transferencia de calor a través del punto de pliegue también incrementa el uso de servicio de enfriamiento arriba del mínimo requerido. En otras palabras, la transferencia de calor a través del punto de pliegue incurre en una doble penalidad, incrementándose los requerimientos de servicios de calentamiento y enfriamiento en el diseño de la red de intercambio de calor.

Empleando argumentos equivalentes, pueden estudiarse los

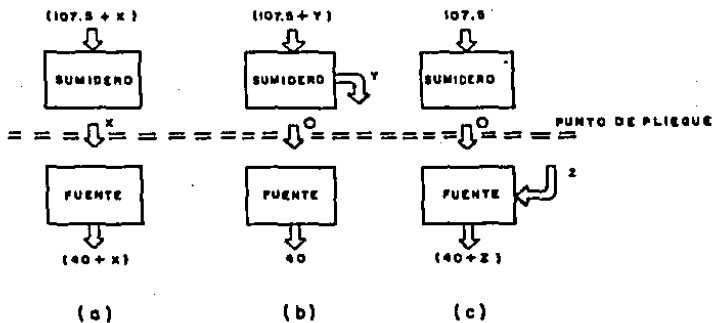


FIG. A.2 (a) EFECTO DE TRANSFERIR CALOR A TRAVES DEL PUNTO DE PLIEGUE.

(b) EFECTO DE EMPLEAR SERVICIO DE ENFRIAMIENTO ARRIBA DEL PUNTO DE PLIEGUE.

(c) EFECTO DE UTILIZAR SERVICIO DE CALENTAMIENTO ABAJO DEL PUNTO DE PLIEGUE.

efectos de utilizar un servicio de enfriamiento arriba del punto de pliegue (lado caliente) y utilizar servicio de calentamiento abajo del punto de pliegue (lado frío), (véanse Figs. A.2(b) y A.2(c)).

El retirar una cantidad de calor  $Y$  del suadero, incrementa ambos servicios en una cantidad  $Y$  (véase Fig. A.2(b)). Un suministro de calor  $Z$  en la fuente tiene efectos análogos (véase Fig. A.2(c)). De esta manera, para emplear el mínimo consumo de servicios, no se permite utilizar servicio de enfriamiento arriba del punto de pliegue, y servicio de calentamiento abajo del punto de pliegue.

Las relaciones anteriores entre el punto de pliegue y el uso de servicios son observaciones fundamentales que el diseñador deberá tener presentes si desea obtener diseños de redes de intercambio de calor óptimos. Sin tal conocimiento, el diseño de la red con un buen aprovechamiento de la energía será una mera casualidad.

En redes complejas es común y casi inevitable que los intercambiadores de calor empleando servicios de calentamiento y enfriamiento se sitúan en posiciones que violen el punto de pliegue. El resultado es que se requiere de un mayor consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento que el mínimo necesario. En estudios de rehabilitación o rediseño de plantas existentes se aplican argumentos similares. En conclusión, cuando se tienen equipos que violen el punto de pliegue se limita el diseño de la red de intercambio de calor, requiriéndose un mayor consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento.

#### REPRESENTACION DEL PUNTO DE PLIEGUE

Quando se desarrolla un diseño, ya sea un diseño nuevo o la rehabilitación de una planta existente, es deseable contar con una representación práctica que muestre conjuntamente los datos de las corrientes y el punto de pliegue. Adicionalmente, la representación debe ser lo suficientemente flexible que permita la fácil manipulación de los intercambios de calor.



La representación de malla, presentada por primera vez por Linnhoff y Flower (2), puede modificarse para cumplir con los objetivos propuestos. Para ilustrar esta representación, el problema ejemplo se presenta esquematizado en la representación de malla modificada en la Fig. A.3. las corrientes calientes se agrupan y se localizan en la parte superior, dirigiéndose de izquierda a derecha, desde su temperatura de entrada hacia la temperatura de salida. Las corrientes frías se localizan en contracorriente en la parte inferior. El punto de pliegue se muestra en el diagrama dividiendo los datos de las corrientes a la temperatura correspondiente al punto de pliegue, manteniéndose separadas las corrientes calientes y frías por un  $\Delta T_{min}$ .

Los intercambiadores de calor entre corrientes de proceso se representan por círculos en las corrientes que intercambian calor unidos por una línea vertical (véase Fig. A.4). Los equipos de servicios de calentamiento se representan mediante círculos en las corrientes frías que lo requieren, y los equipos de servicios de enfriamiento se representan por círculos en las corrientes calientes que lo requieren ( véase Fig. A.4).

Como se indica en la Figura A.3, el intercambio de calor entre corrientes calientes que se localizan en el lado frío y corrientes frías que se localizan en el lado caliente no es factible porque viola el  $\Delta T_{min} = 20$  BC. El intercambio de calor entre corrientes calientes que se localizan en el lado caliente y corrientes frías que se encuentran en el lado frío no es deseable ya que esto ocasionaría que se transfiriera calor a través del punto de pliegue incurriéndose en las penalidades de energía mostradas en la Fig. A.2(a).

De esta manera, la representación de malla mostrada en la Fig. A.3, implica dos tareas de diseño separadas, una para el lado caliente y otra para el lado frío de la red de intercambio de calor.

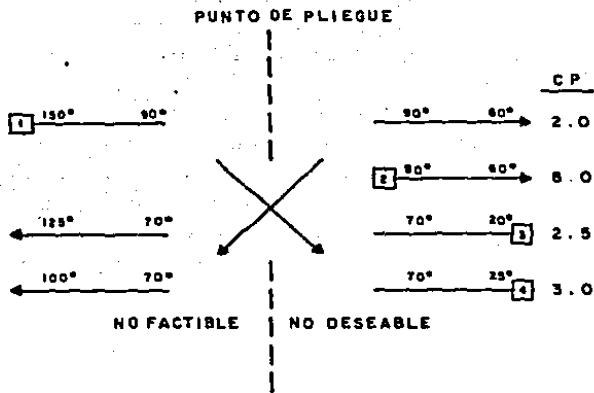


FIG. A.3 DIVISION DEL PUNTO DE PLIEGUE MOSTRADO EN LA REPRESENTACION DE MALLA.

## PROBLEMAS DE UMBRAL.

En problemas de redes de intercambio de calor no siempre se presenta un punto de pliegue. Ciertos problemas permanecen sin punto de pliegue hasta que el acercamiento de temperaturas permitido  $\Delta T_{\text{min}}$  se incrementa más allá de un valor de umbral,  $\Delta T_{\text{umbral}}$ . Es por esta razón que a estos problemas se les llaman "problemas de umbral".

El concepto de un problema de umbral puede entenderse como aquella red de intercambio de calor en la que una corriente caliente "muy caliente" intercambia calor con una corriente fría "muy fría" (véase Fig. A.4(a)). El diseño para esta "red" consiste de un solo intercambiador de calor y un equipo que emplea ya sea servicio de calentamiento o de enfriamiento. El intercambiador de proceso satisface completamente los requerimientos de la corriente de proceso con menor carga térmica. El intercambiador que emplea servicio de calentamiento o enfriamiento se requiere únicamente para alcanzar el balance de energía para el problema total.

En el ejemplo de la Fig.A.4(a) la carga térmica del servicio de calentamiento permanece constante siempre y cuando  $\Delta T_{\text{min}}$  sea menor que el acercamiento de temperatura correspondiente al valor de umbral, es decir,  $\Delta T_{\text{umbral}}$  que para este ejemplo corresponde a 75 BC. (Para propósitos de este ejemplo, se supone que la temperatura de entrada del servicio de calentamiento es tal que el menor acercamiento de temperatura siempre ocurre en el intercambiador que compranda a las corrientes de proceso caliente y fría). Sin embargo, cuando el valor de  $\Delta T_{\text{min}}$  excede al valor de  $\Delta T_{\text{umbral}}$ , surge la necesidad de emplear ambos servicios de calentamiento y enfriamiento, como se muestra en la Fig.A.4(b). Esto se debe a que ya no es factible el intercambio de calor completo entre las dos corrientes de proceso sin violar  $\Delta T_{\text{min}}$ . Obsérvese también, que se introduce en el problema la existencia de un punto de pliegue.

Cuando el valor de  $\Delta T_{\text{min}}$  iguala el valor de  $\Delta T_{\text{umbral}}$  se

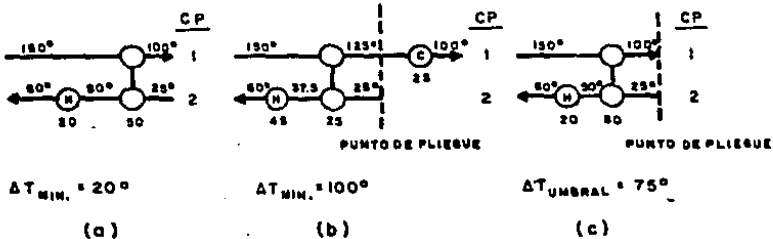


FIG. A.4 (a) UN PROBLEMA DE UMBRAL

(b) UN PROBLEMA DE PUNTO DE PLIEGUE

(c) EL ACERCAMIENTO DE TEMPERATURAS DE UMBRAL ( $\Delta T_{UMBRAL}$ )

presenta un caso límite (véase Fig.A.4(c)). Aunque se introduce la presencia de un punto de pliegue, el consumo de servicios es el mismo que para valores menores de  $\Delta T_{min}$ . Este caso límite ó frontera es una característica general de un problema de umbral.

#### EL PUNTO DE PLIEGUE DEBIDO A UN SERVICIO.

En la aplicación del procedimiento de cálculo de la tabla problema en el ejemplo presentado inicialmente, se supuso que los servicios de calentamiento y enfriamiento se encontraban disponibles a las temperaturas extremas, es decir, el servicio de calentamiento estaba lo suficientemente caliente y el servicio de enfriamiento lo suficientemente frío para satisfacer todos los requerimientos de proceso. En la práctica, esto no es siempre deseable, dado que los servicios menos extremos tienen un costo menor. Por ejemplo, el vapor de calentamiento de baja presión es de menor costo que el vapor de calentamiento de alta presión, el agua de enfriamiento es de menor costo que un refrigerante. A menudo se tienen buenos incentivos económicos para reducir las cargas térmicas de los servicios de temperaturas extremas mediante la introducción de servicios de temperaturas intermedias. Como se vió anteriormente, la existencia de un punto de pliegue indica que cualquier servicio de calentamiento deberá suministrarse arriba del punto de pliegue y cualquier servicio de enfriamiento deberá suministrarse abajo del punto de pliegue. Cualquier falta a esta regla incurrirá en la doble penalidad de incrementar el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento.

En la Fig. A.5(a), se introduce un nuevo servicio de calentamiento en el lado caliente de un problema hipotético. Conforme se incrementa la carga térmica de este nuevo servicio de calentamiento, se ahorra en el suministro del servicio de calentamiento de mayor temperatura (véase Fig. A.5(b)). Se alcanzará un punto en el que la carga térmica del servicio de mayor temperatura se reduce a una extensión tal que solo satisface los requerimientos de calentamiento de la

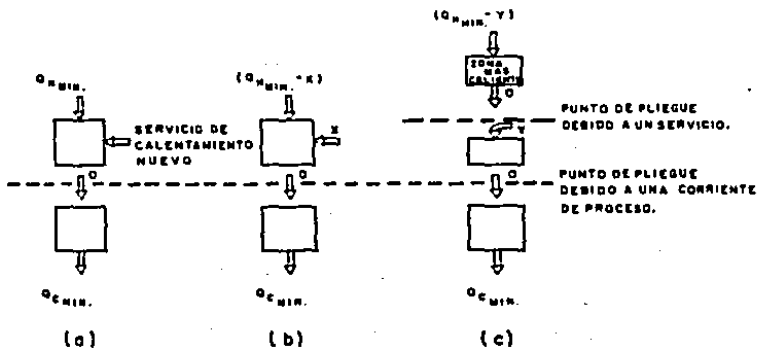


FIG. A.5 (a) LA CORRECTA LOCALIZACION DE UN SERVICIO DE CALENTAMIENTO NUEVO.

(b) DISTRIBUCION DE LOS REQUERIMIENTOS DE CALENTAMIENTO.

(c) PUNTO DE PLIEGUE DEBIDO A UN SERVICIO.

región más caliente del problema (véase Fig. A.3(c)). El resultado es la división del lado caliente en dos regiones separadas, es decir, se ha creado un nuevo punto de pliegue, y por consiguiente se ha dividido en dos tareas el diseño del lado caliente de la red.

Dado que este nuevo punto de pliegue es una consecuencia directa de la introducción de un nuevo servicio, se le conoce como punto de pliegue debido a un servicio. El algoritmo de la tabla problema puede adaptarse fácilmente para calcular las cargas térmicas máximas en servicios de temperatura intermedia y la localización de los puntos de pliegue resultantes (10).

En el diseño de redes de intercambio de calor de aplicación industrial es extremadamente raro encontrar un problema sin punto de pliegue o un problema de umbral. La norma es el problema con punto de pliegue.

#### IMPLICACIONES DEL PUNTO DE PLIEGUE EN LOS COSTOS DE CAPITAL.

Linnhoff(10) y Grimes(9) independientemente uno del otro demostraron que el número mínimo de unidades y el consumo mínimo de servicios a menudo son mutuamente incompatibles en algunos problemas de redes de intercambio de calor. Esta incompatibilidad es resultado de la división del problema por el punto de pliegue.

Demostaron que la ecuación para determinar el "número mínimo de unidades",  $U_{min}$ , está dada por

$$U_{min} = N_H + N_C + N_W + N_S - 1 \quad \dots(A.1)$$

donde:

$U_{min}$  = Número mínimo de unidades de intercambio de calor.

$N_H$  = Número de corrientes calientes de proceso .

$N_C$  = Número de corrientes frías de proceso.

$N_W$  = Número de servicios de enfriamiento.

$N_S$  = Número de servicios de calentamiento.

La Fig. A.6(a) muestra el resultado que se obtiene cuando la ec. A.1 se aplica al problema ejemplo, primero al lado caliente y luego al lado frío.

Se requiere un mínimo de siete unidades para obtener un diseño con consumo mínimo de servicios, tres unidades para el lado caliente, y cuatro unidades para el lado frío. Obsérvese que al introducirse la división del punto de plieque, las corrientes 1, 3 y 4 se contabilizan dos veces en la ecuación para determinar el número mínimo de unidades. Estas corrientes existen en ambos lados caliente y frío.

La Fig. A.6(b) muestra el resultado que se obtiene cuando la ec. A.1 se aplica al problema completo. Las corrientes 1, 3 y 4 no se contabilizan dos veces por lo que el número mínimo de unidades para el diseño completo de la red es de cinco. Sin embargo, el obtener un diseño de cinco unidades en la práctica puede significar que:

-) Una cantidad de calor "x" deba transferirse a través del punto de plieque, incurriendo en la doble penalidad de incrementar el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento, (véase Fig. A.6(b)) ó:

-) La restricción de  $\Delta T_{\min}$  impuesta inicialmente pueda relajarse en ciertos intercambiadores de calor, sujeta a  $\Delta T_{\min} > 0$ .

En el primer caso, existe un compromiso de costos entre el número de unidades y el consumo de servicios. En el segundo caso, existe un compromiso de costos entre el número de unidades y el área de transferencia de calor. El análisis de costos de estos casos puede conducir al diseñador a la obtención del diseño óptimo de la red de intercambio de calor.



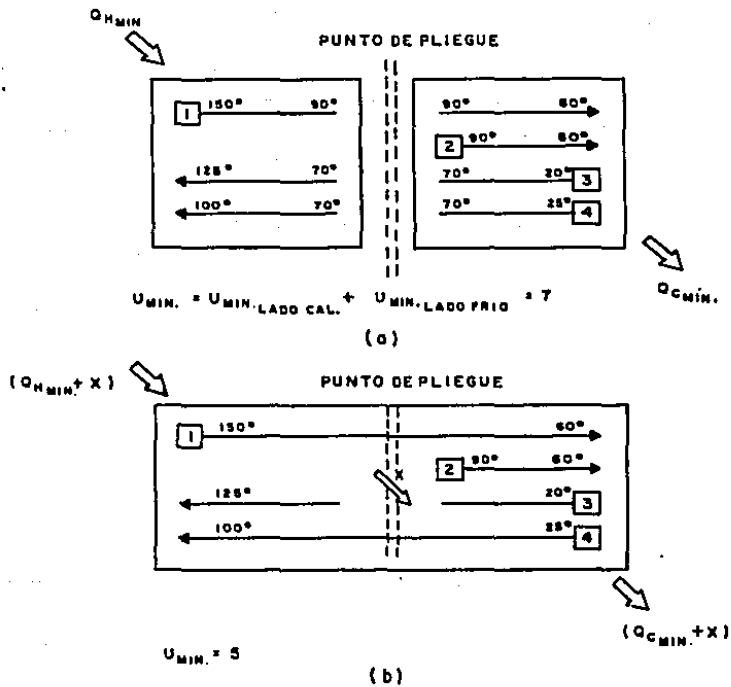


FIG. A.6 (a) EL NUMERO DE UNIDADES PARA LA MAXIMA RECUPERACION DE CALOR.

(b) EL MINIMO NUMERO DE UNIDADES GLOBAL.

## APENDICE B.

### METODO PARA DETERMINAR EL NUMERO MINIMO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO DE CALOR.

El objetivo del método de la Tabla Problema presentado por Linnhoff y col. ( 1 y 2 ) y descrito en el Apéndice A de este trabajo, es el determinar el consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento, así como el de localizar los puntos de plieque (cuellos de botella) presentes en la red de recuperación de calor. Sin embargo, debido a que a menudo existen muchas redes que satisfacen la condición de consumo mínimo de servicios, un objetivo deseable es el obtener entre las posibles redes, una que tenga el número mínimo de unidades de intercambio de calor, dado que esta red comúnmente corresponde a una solución óptima o cercana a la óptima.

En este apéndice se describe un método reportado por Papoulias y Grossmann (4), en el que emplean un modelo del transbordo y plantean un problema de programación lineal mixta entera, cuya solución genera redes que involucran un número mínimo de unidades de intercambio de calor, con posibilidad de división y mezclado de corrientes e incluso pueden asignarse preferencias en los intercambios de calor entre corrientes.

En este punto se asume que se han determinado el mínimo consumo de servicios y se han localizado los puntos de plieque.

### FORMULACION DEL PROBLEMA.

El problema de síntesis de una red de recuperación de calor se formula como un problema del transbordo (véase Apéndice E), y puede estar sujeto a diferentes funciones objetivo.

El primer paso en la formulación consiste en realizar una partición del rango completo de temperaturas de las corrientes de proceso, en  $k$  intervalos de temperatura, para lo cual puede emplearse cualquier método de partición adecuado (2, 9, y 13). Los intervalos se enuncian del nivel de temperatura más alto ( $k = 1$ ) al nivel más bajo ( $k = K$ ), teniéndose un cambio de temperatura  $\Delta T_k$  en cada intervalo  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ).

A continuación se definen los siguientes conjuntos de variables, con el propósito de identificar la localización de todas las corrientes de proceso y servicios relativa a los intervalos de temperatura.

- $H_k = \{ i / \text{la corriente caliente } i \text{ está presente en el intervalo } k \}.$   
 $C_k = \{ j / \text{la corriente fría } j \text{ está presente en el intervalo } k \}.$   
 $B_k = \{ m / \text{el servicio de calentamiento } m \text{ está presente en el intervalo } k \}.$   
 $W_k = \{ n / \text{el servicio de enfriamiento } n \text{ está presente en el intervalo } k \}.$   
 ... (B.1)

Sea  $Q_{ik}^H$  la carga térmica de la corriente caliente  $i$  comprendida en el intervalo de temperatura  $k$ . Esta carga térmica está dada por:

$$Q_{ik}^H = F_i (Cp_i)_k \Delta T_k^i \quad \dots (B.2)$$

Donde  $\Delta T_k^i$  es el cambio de temperatura de la corriente  $i$  en el intervalo  $k$ . De manera similar, la carga térmica  $Q_{jk}^C$  corresponde a la corriente fría  $j$  en el intervalo de temperatura  $k$  y se calcula por:

$$Q_{jk}^C = F_j (Cp_j)_k \Delta T_k^j \quad \dots (B.3)$$

Todos los servicios de calentamiento y enfriamiento se sitúan en los intervalos de temperatura apropiados dependiendo de sus temperaturas de entrada y salida. Entonces  $Q_{nk}^B$  es la carga térmica del servicio de calentamiento  $n$  en el intervalo de temperatura  $k$ . De manera similar,  $Q_{nk}^M$  es la carga térmica del servicio de enfriamiento  $n$  en el intervalo de temperatura  $k$ .

Dado que se conocen los flujos de los servicios de calentamiento y enfriamiento y sus correspondientes contenidos caloríficos, estas corrientes pueden adicionarse a los conjuntos de corrientes de proceso, definiéndose los conjuntos de corrientes calientes y corrientes frías siguientes:

$$\hat{H} = \langle H, S \rangle \quad \text{y} \quad \hat{C} = \langle C, W \rangle \quad \dots (B.4)$$

También, dado que en este punto ya se tiene conocimiento de la existencia de uno o más puntos de plieque en la red, el problema puede dividirse en subredes, considerándose que no existe flujo de calor a través de cada punto de plieque (9). Más específicamente, si se tienen  $NL - 1$  puntos de plieque, los  $K$  intervalos de temperatura pueden dividirse en  $NL$  conjuntos de intervalos arriba y abajo de cada punto de plieque que define la frontera de las subredes. Los subconjuntos de intervalos de temperatura correspondientes a cada subred  $l$ , se identificarán por  $SN_l$ ,  $l = 1, 2, \dots, NL$ .

Con el propósito de satisfacer el mínimo consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento, únicamente se permite el intercambio de calor entre corrientes que se encuentren dentro de la subred  $l$ , ya que de otra manera se transferiría calor a través de los puntos de plieque, y por lo tanto, existiría la posibilidad de que se incrementara el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento. Por lo tanto, es conveniente identificar a las corrientes calientes y frías presentes en la subred  $l$ , mediante los subconjuntos

$$\hat{H}_l \subseteq \hat{H} \quad \text{y} \quad \hat{C}_l \subseteq \hat{C} \quad \dots (B.5)$$

Ahora bien, para cada corriente caliente  $i \in \hat{H}_k$  se asigna un calor residual  $R_{ik}$ ,  $k \in SN_k$ ,  $i = 1, 2, \dots, NL$ ; mientras que el calor intercambiado entre la corriente caliente  $i \in \hat{H}_k$  y la corriente fría  $j \in \hat{C}_k$  en el intervalo de temperatura  $k \in SN_k$ , se representa por  $Q_{ij/k}$ . Debe notarse que existe la posibilidad de que una corriente caliente  $i \in \hat{H}_k$  intercambie calor con una corriente fría  $j \in \hat{C}_k$  en un intervalo de temperatura  $k \in SN_k$  donde la corriente caliente  $i$  realmente no está presente. Esto puede suceder si la corriente caliente  $i$  está presente en un intervalo de temperatura más alta  $\bar{k} < k$ , así que en este caso el intercambio de calor se lleva a cabo a través del calor residual  $R_{ik}$ . Por lo tanto, es conveniente definir los subconjuntos de corrientes para un intercambio de calor potencial en cada intervalo  $k$ , los cuales están dados por:

$\hat{H}_{ik} = \{ i / i \in \hat{H}_k, \text{ la corriente } i \text{ está presente en el intervalo } \bar{k} \leq k, \bar{k}, k \in SN_k \}$ .

$\hat{C}_{jk} = \{ j / j \in \hat{C}_k, \text{ la corriente } j \text{ está presente en el intervalo } k, k \in SN_k \}$ .

... (B.6)

Así que,  $Q_{ik}^H$  es la carga térmica de la corriente caliente ó servicio de calentamiento  $i \in \hat{H}_{ik}$  en el intervalo de temperatura  $k$ , y  $Q_{jk}^C$  es la carga térmica que fluye a la corriente fría ó servicio de enfriamiento  $j \in \hat{C}_{jk}$  en el intervalo de temperatura  $k$ .

Para denotar la existencia de un intercambio de calor entre las corrientes  $i \in \hat{H}_{ik}$  y  $j \in \hat{C}_{jk}$  en la subred  $i$ , se introduce la variable binaria  $y_{ij}$  que puede tomar únicamente los valores de 0 y 1. Se supone que cada uno de estos intercambios de calor está asociado a una unidad de intercambio de calor potencial. Puesto que el intercambio de calor total entre el par de corrientes dado es la suma de sus intercambios en los intervalos de temperatura de la subred,

las variables binarias y las variables  $Q_{tjk}$ , deben satisfacer las desigualdades siguientes:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k \in SN} Q_{tjk} - U_{tjl} Y_{tjl} \leq 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} i \in \hat{H}_l \\ j \in \hat{C}_l \end{aligned} \quad \dots (B.7)$$

donde:

$$U_{tjl} = \min \left( \sum_{k \in SN_l} Q_{ik}^{\hat{H}}, \sum_{k \in SN_l} Q_{jk}^{\hat{C}} \right) \quad \dots (B.8)$$

corresponde al límite superior del calor que puede intercambiarse entre la corriente  $i$  y la corriente  $j$ , en la subred  $l$ .

Nótese que cuando las variables binarias  $Y_{tjl}$  en la ecuación B.7 toman un valor de cero, no se intercambia calor, pero cuando se les asigna un valor de uno, pueden intercambiar cualquier cantidad de calor que no exceda  $U_{tjl}$ .

El problema de minimizar el número de unidades en la red de intercambio de calor puede, entonces, formularse como el siguiente problema del transbordo de programación lineal mixta entera:

$$\text{minimizar } Z = \sum_{l=1}^{NL} \sum_{i \in \hat{H}_l} \sum_{j \in \hat{C}_l} e_{ijl} Y_{ijl}$$

Sujeto a:

$$\left. \begin{aligned} R_{lk} - R_{l,k-1} + \sum_{j \in \hat{C}_{lk}} a_{ljk} &= a_{lk}^{\hat{H}} & i \in \hat{H}_{lk} \\ \sum_{i \in \hat{H}_{lk}} a_{ljk} &= a_{jk}^{\hat{C}} & j \in \hat{C}_{lk} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} k \in \text{BN}_l \\ l = 1, 2, \dots, NL \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k \in \text{BN}_l} a_{ljk} - U_{ijl} Y_{ijl} &\leq 0 \\ & i \in \hat{H}_l, \\ & j \in \hat{C}_l \end{aligned} \right\} l = 1, 2, \dots, NL$$

$$\left. \begin{aligned} R_{lk} &\geq 0 & i \in \hat{H}_{lk} \\ a_{ljk} &\geq 0 & i \in \hat{H}_{lk} \\ & & j \in \hat{C}_{lk} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} k \in \text{BN}_l \\ l = 1, 2, \dots, NL \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} Y_{ijl} &= 0,1 \\ & i \in \hat{H}_l \\ & j \in \hat{C}_l \end{aligned} \right\} l = 1, 2, \dots, NL$$

Nótese que en la función objetivo, cada variable binaria  $Y_{ijl}$ , se multiplica por el factor de peso  $e_{ijl}$ , que puede tomar en cuenta el costo o preferencia del intercambio de calor entre las corrientes caliente  $i$  y fría  $j$ . Dado que los coeficientes de costos son difíciles de calcular debido a las no linealidades que se involucran, es más práctico considerar estos factores de peso  $e_{ijl}$  como coeficientes que

reflejan la preferencia de los intercambios de calor. Si no existe alguna preferencia en particular todos los factores de peso se les asigna valor de uno, en cuyo caso la solución del problema proporcionará una solución con el número mínimo de unidades. Sin embargo, dado que a menudo existirán más de una solución que satisfaga el número mínimo de unidades, entonces la opción de seleccionar intercambios de calor preferenciales cobra mayor importancia. Esto es particularmente cierto cuando para los diferentes pares de intercambios de calor hay diferencias significantes en los coeficientes de transferencia de calor, materiales de construcción, o cuando las corrientes que intercambian calor se localizan en diferentes secciones de la planta. En tales casos, los factores de peso se derivan de manera que la solución óptima exhibe siempre el número mínimo de intercambiadores de calor posible, pero si hay posibilidad de seleccionar el intercambio de calor, se asegura que el intercambio de calor preferencial se seleccione. La derivación y las fórmulas de estos factores de peso se presentan en el Apéndice de la referencia ( 4 ), para los casos en que se asignan niveles de prioridad ya sea a intercambiadores de calor individuales o a grupos de ellos. Debe notarse que es posible manejar fácilmente intercambios de calor prohibidos, asignando a las variables  $Y_{i,jl}$  el valor de cero, es decir

$$Y_{i,jl} = 0 \quad (i,j) \in P \\ l = 1,2,\dots,NL$$

donde

$P = \{ (i,j)/l \in H, j \in C, \text{ el intercambio de calor entre la corriente caliente } i \text{ y la corriente fría } j \text{ está prohibido} \}$ .

El problema del transbordo de programación lineal mixta entera, puede resolverse en su forma completa, o de otra manera, puede descomponerse en NL subproblemas de menor tamaño para cada subred. En ambos casos la solución resultante debe ser la misma.



## APENDICE C.

### METODO PARA DETERMINAR LA CONFIGURACION FINAL DE LA RED DE RECUPERACION DE CALOR.

En este apéndice se presenta un método para determinar la configuración final de la red de intercambio de calor. Primeramente, se describen las características de un modelo de una superestructura que contiene todas las posibles configuraciones de la red de recuperación de calor. En segundo término, se describe la formulación del problema de programación no lineal, el cual está basado en el modelo de la superestructura. Y finalmente, se discuten algunos aspectos de suma importancia referentes a la validez de este método descrito por Floudas, Ciric y Grossmann ( 6 ).

### CONSTRUCCION DE LA SUPERESTRUCTURA.

Con el propósito de construir una superestructura para la red de intercambio de calor, resulta ventajoso utilizar la información que se obtuvo en los pasos 2 y 3 del procedimiento de síntesis de la red, descrito en el inciso 2 de este trabajo.

En el paso 2 de este procedimiento, se determinan las cargas térmicas de los servicios de calentamiento y enfriamiento así como la localización de los puntos de pliegue. Estos puntos de pliegue se emplean para descomponer el problema en subredes.

En el paso 3 del procedimiento, se resuelve para cada subred el modelo del transbordo que comprende un problema de programación lineal mixta entera y se determina el número mínimo de intercambios de calor así como el calor que se intercambia entre las corrientes. Cada uno de estos intercambios de calor con la correspondiente cantidad de calor que se intercambia, es asociado a una unidad de intercambio de calor en la superestructura que proponen Floudas, Ciric y Grossmann ( 6 ), donde las interconexiones

entre las corrientes se tratan como incógnitas al igual que las temperaturas.

Una característica importante en la superestructura es que para cada corriente se desarrolla una superestructura independiente. Las corrientes de las superestructuras pueden combinarse en una superestructura global la cual tiene implícitas todas las configuraciones de interés para cada subred. La superestructura de cada corriente se construye de tal manera que incluye diferentes alternativas en la división de corrientes, mezclado de corrientes, corrientes de derivación, intercambios en serie, intercambios en paralelo, intercambios serie-paralelo, intercambios paralelo-serie, etc.

Con el propósito de mostrar como puede desarrollarse una superestructura, supóngase que se tiene una corriente fría  $C_i$  que intercambia calor con tres corrientes calientes  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$ , teniéndose entonces tres intercambios de calor  $C_i-H_1$ ,  $C_i-H_2$ , y  $C_i-H_3$ . Estos intercambios y el calor que se transfiere entre las corrientes se obtienen en la solución del modelo del transbordo del problema de programación lineal mixta entera. Entonces, es posible postular superestructuras como la que se muestra en la Fig. C.1, donde los cambiadores de calor corresponden a los intercambios de calor requeridos. La carga térmica del equipo es el calor obtenido previamente para cada intercambio.

Los elementos básicos en la construcción de la superestructura de la corriente  $C_i$  son los siguientes (véase la Fig. C.1):

1. Dividir la entrada de la corriente  $C_i$  en tres corrientes que se dirigen a la entrada de los tres intercambios con las corrientes calientes. Es decir,  $C_i$  se divide en las corrientes 1, 2, y 3.

2. Dividir la salida de  $C_i$  en cada intercambio de calor en:
  - a) Una corriente que se dirige a la salida final de  $C_i$  en esta subred.
  - b) Dos corrientes de recirculación que se mezclan con las corrientes de entrada de los otros dos intercambios de calor.

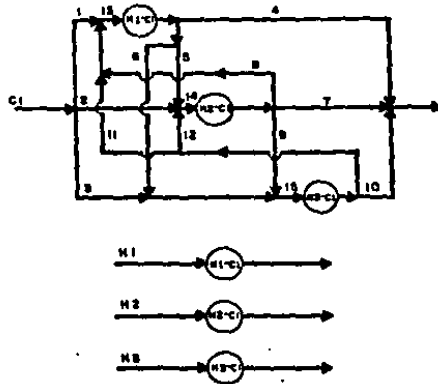


FIG. C.1 SUPERESTRUCTURAS DE LAS CORRIENTES  $C_1$ ,  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$ .

Por ejemplo, considere el intercambio H1-C1. La salida de este intercambio se divide en las corrientes 4, 5, y 6. La corriente 4 se dirige a la salida de C1. La corriente de recirculación 5 se mezcla con la entrada del intercambio H2-C1, mientras que la corriente de recirculación 6 se mezcla con la entrada del intercambio H3-C1.

En el caso de que las corrientes calientes H1, H2, y H3, solo intercambien calor con la corriente fría C1, la superestructura para cada corriente se reduce a un cambiador sencillo como se muestra en la Fig.C.1, y esto se debe a que en estos casos no hay opción de dividir las corrientes calientes en otro intercambio.

A partir de la superestructura para la corriente C1, que se muestra en la Fig.C.1, puede verificarse la existencia de muchas alternativas en las configuraciones. Esto puede realizarse asignando un flujo igual a cero en algunas de las corrientes internas; por ejemplo, a continuación se muestran varias alternativas:

1. La secuencia en paralelo, H1-C1, H2-C1, H3-C1, la cual resulta de la asignación de  $F5 = F6 = F8 = F9 = F11 = F12 = 0$  como se muestra en la Fig.C.2(a).

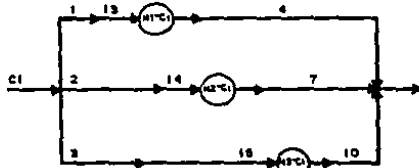
2. La secuencia en serie, H1-C1, H2-C1, H3-C1, la cual resulta de la asignación de  $F2 = F3 = F4 = F6 = F7 = F8 = F11 = F12 = 0$ , como se muestra en la Fig.C.2(b).

3. La secuencia paralelo-serie donde H1-C1, H2-C1 se encuentran en paralelo y H3-C1 en serie, y que resulta de la asignación de  $F3 = F4 = F5 = F7 = F8 = F11 = F12 = 0$ , como se muestra en la Fig.C.2(c).

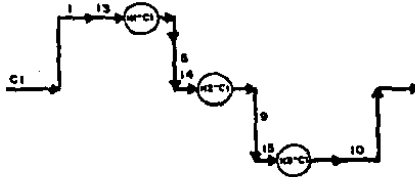
4. La secuencia serie-paralelo donde H1-C1 se encuentra en serie con H2-C1, H3-C1 en paralelo, y que resulta de la asignación de  $F2 = F3 = F4 = F8 = F9 = F11 = F12 = 0$ , como se muestra en la Fig.C.2(d).

5. La secuencia anterior con una corriente de derivación la cual resulta de la asignación de  $F2 = F3 = F4 = F8 = F11 = F12 = 0$ , como se muestra en la Fig.C.2(e).

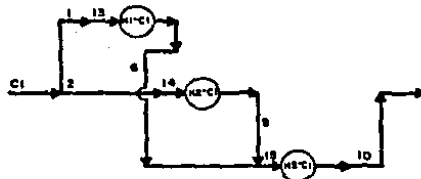
Por lo tanto, a partir del ejemplo anterior, es claro



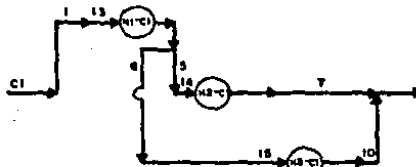
(a) ARREGLO EN PARALELO.



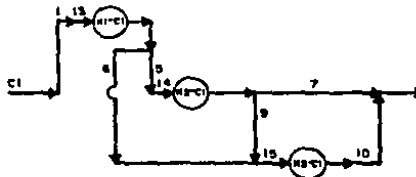
(b) ARREGLO EN SERIE



(c) ARREGLO EN PARALELO-SERIE



(d) ARREGLO EN SERIE-PARALELO



(e) ARREGLO EN SERIE-PARALELO CON UNA CORRIENTE DE "BY-PASS".

FIG.C.2 ARREGLOS DE ALTERNATIVAS EN LA SUPERESTRUCTURA DE LA CORRIENTE C1.

que las superestructuras de corrientes propuestas incluyen todas las posibles configuraciones para los intercambios de calor y las cargas térmicas determinadas en el modelo del transbordo del problema de programación lineal mixta entera (Apéndice B). Adicionalmente, esta superestructura para las corrientes de proceso puede fácilmente generarse para cualquier número de intercambios de calor. En particular, la superestructura de cada corriente consiste de:

1. Una separación inicial de la corriente de entrada.
2. Separadores en la salida de cada cambiador de calor dirigiéndose las corrientes a la entrada de los otros cambiadores.
3. Mezcladores a la entrada de cada cambiador de calor.
4. Un mezclador final para la corriente de salida.

Para construir una superestructura de corrientes de un servicio de calentamiento ó enfriamiento dado, es conveniente representar una corriente de servicio por un número de corrientes separadas que es igual al número de intercambios en los que participa la corriente del servicio original.

Por ejemplo, si la corriente de servicio  $S$  intercambia calor con las corrientes frías  $C_1$  y  $C_2$ , entonces  $S$  puede descomponerse en dos corrientes:  $S_1$  para el intercambio con  $C_1$ , y  $S_2$  para el intercambio con  $C_2$ . De esta manera, una superestructura de corrientes de un servicio, simplemente será la de un intercambio de calor donde la corriente de servicio tendrá la carga térmica obtenida para este intercambio por el modelo del transbordo del problema de programación lineal mixta entera, con las temperaturas de entrada y salida del servicio dado. La razón principal de esta representación es que las corrientes de servicio involucradas en varios intercambios debe de dividirse necesariamente; adicionalmente, este esquema proporciona una representación mas sencilla de la superestructura para cada servicio.

En resumen, el procedimiento para la construcción de la superestructura total para el conjunto de intercambios dado

en una subred en particular es de la siguiente manera:

1. Para cada corriente de proceso construya una superestructura de acuerdo con las siguientes reglas:

(a) Divida cada una de las corrientes de proceso en un número de corrientes igual al número de intercambios en los que participa esta corriente de proceso. Cada rama contiene un cambiador relacionado al intercambio de calor dado.

(b) Divida la corriente de salida de un intercambio (es decir, de un cambiador) en corrientes de recirculación que se alimentan a los mezcladores que se localizan a la entrada de los cambiadores restantes, y en una corriente adicional que se alimenta al mezclador final para la corriente de salida.

2. Para cada corriente de servicio construya una superestructura que consiste de un intercambio donde las temperaturas de entrada y salida del servicio son las proporcionadas en los datos iniciales.

3. Defina la superestructura total para la subred en particular, mediante la integración de todas las superestructuras para corrientes de proceso y las superestructuras para corrientes de servicio. Las cargas térmicas en los cambiadores de esta superestructura están dadas por el calor obtenido para cada intercambio por el modelo del transbordo del problema de programación lineal mixta entera.

Es interesante notar que la superestructura que se desarrolla puede interpretarse como una superestructura "restringida" en la que los cambiadores corresponden a los intercambios establecidos, mientras que las corrientes de interconexión se tratan como incógnitas. En principio, la superestructura podría postularse teniendo los intercambios (cambiadores de calor) como incógnitas. Sin embargo, tal superestructura tan general resultaría en un problema de un tamaño demasiado grande. Una de las mayores ventajas de este modelo de la superestructura es que puede formularse como un problema de programación no lineal de un tamaño manejable para obtener una configuración de la red con costo mínimo de inversión.

## FORMULACION DEL PROBLEMA DE PROGRAMACION NO LINEAL.

Una vez que se ha establecido la superestructura que contempla las diferentes configuraciones para cada subred, el siguiente paso consiste en desarrollar la formulación de un problema de programación no lineal para la generación automática de las estructuras de la red con costo mínimo de inversión. Con el propósito de simplificar la notación en este trabajo, no se incluye un subíndice para identificar la subred.

La información necesaria para derivar la formulación del problema de programación no lineal para cada subred, se obtiene de la solución del modelo del transbordo del problema de programación lineal mixta entera, consistente en:

**DATOS DE LAS CORRIENTES.** Para cada corriente caliente de proceso  $i \in H$  y corriente fría de proceso  $j \in C$ , se conocen los flujos máxicos (realmente interesa el producto flujo  $\times$  capacidad calorífica). Las temperaturas de entrada y salida se definen por el rango de temperaturas de las subredes. Los flujos máxicos y las temperaturas serán  $F_i, T_i^{IN}, T_i^{OUT}$ , para las corrientes calientes, y  $F_j, T_j^{IN}, T_j^{OUT}$ , para las corrientes frías.

**DATOS DE LOS SERVICIOS.** Para cada servicio de calentamiento  $i \in HU$  y servicio de enfriamiento  $j \in CU$ , se conocen sus cargas térmicas correspondientes. Las corrientes de servicios se identifican para cada subred mediante el conjunto de índices  $HU'$  (para los servicios de calentamiento) y  $CU'$  (para los servicios de enfriamiento). Las temperaturas de entrada y salida para estos servicios serán:

$$T_i^{MIN}, T_i^{ROUT} \quad \text{para } i \in HU'$$

y

$$T_j^{CIN}, T_j^{COUT} \quad \text{para } j \in CU',$$

mientras que el cambio de entalpías específicas para estos servicios serán:



$$y \quad \Delta H_i^H \quad \text{para } i \in HU^*$$

$$\Delta H_j^C \quad \text{para } j \in CU^*.$$

**INTERCAMBIOS DE CALOR** .El conjunto de intercambios de calor de las corrientes de proceso y de los servicios, será:

MA =  $\{(i,j) / \text{ corriente de proceso caliente ó servicio de calentamiento } i \text{ intercambia calor con una corriente de proceso fría o servicio de enfriamiento } j, i \in HT, j \in CT\}$

... (C.1)

donde HT =  $\langle H \rangle \cup \langle HU^* \rangle$  y CT =  $\langle C \rangle \cup \langle CU^* \rangle$ .

Además, la carga térmica para cada intercambio de calor entre la corriente  $i \in HT$  y la corriente  $j \in CT$  será:

$$Q_{i,j} \quad \text{donde } (i,j) \in MA.$$

Empieando la información anterior, se construye una superestructura total para cada subred. Como se discutió anteriormente se requiere obtener una superestructura de corrientes para cada corriente caliente de proceso y servicio de calentamiento  $i \in HT$ , y para cada corriente fría de proceso y servicio de enfriamiento  $j \in CT$ .

Con el propósito de derivar la formulación matemática del problema de programación no lineal, se definen los siguientes conjuntos de índices para caracterizar la topología de la superestructura para una subred en particular. Primero, todas las corrientes calientes y frías, ya sean corrientes de proceso o servicios, se identifican por el conjunto de índices

$$NCT = \langle HT \rangle \cup \langle CT \rangle = \langle k \rangle \quad \dots (C.2)$$

La superestructura para cada corriente  $k \in NCT$  involucra un conjunto de corrientes  $l$  que se denotará por el

conjunto de índices  $N_k = \{l\}$ . Cada una de estas corrientes  $l$ , tendrá asociadas las siguientes variables:

$f_l^k$  flujo (capacidad térmica)

$t_l^k$  temperatura

También, la superestructura de cada corriente  $k$  involucra separadores y mezcladores que se identifican por los conjuntos de índices:  $S_k = \{s\}$  y  $M_k = \{m\}$  respectivamente. El separador  $s^o \in S_k$  se identificará como el separador inicial en la superestructura de corrientes  $k$ , mientras que  $m^o \in M_k$  se refiere al mezclado final en la superestructura de corrientes  $k$ . La relación de los conjuntos de separadores y mezcladores con las corrientes internas de entrada y salida en la superestructura de corrientes  $k$ , está dada por:

$$\left. \begin{aligned} S_k^{IN}(s) &= \{l/l \in N_k \text{ es una entrada al separador } s\} \\ S_k^{OUT}(s) &= \{l/l \in N_k \text{ es una salida del separador } s\} \end{aligned} \right\} s \in S_k$$

$$\left. \begin{aligned} M_k^{IN}(m) &= \{l/l \in N_k \text{ es una entrada al mezclador } m\} \\ M_k^{OUT}(m) &= \{l/l \in N_k \text{ es una salida del mezclador } m\} \end{aligned} \right\} m \in M_k$$

... (C.3)

El conjunto de cambiadores de calor que se postula corresponde a los intercambios de calor definidos por el conjunto de índices  $MA$  descrito anteriormente. Las corrientes de entrada y salida de cada cambiador de calor postulado para los intercambios  $MA$  está dado por:

$$E_{i,j}^{IN} = \{n/n \in N_i \text{ es la entrada de la corriente caliente } i \text{ a la unidad } (i,j) \in MA\}$$

$$E_{i,j}^{OUT} = \{p/p \in N_i \text{ es la salida de la corriente caliente } i \text{ de la unidad } (i,j) \in MA\}$$

$E_{lj}^{CIN} = (r/r \in N_j)$  es la entrada de la corriente fría  $j$  a la unidad  $((i,j) \in MA)$

$E_{lj}^{COUT} = (q/q \in N_j)$  es la salida de la corriente fría  $j$  de la unidad  $((i,j) \in MA)$ .

...(C.4)

Habiéndose definido los conjuntos de índices y variables que describen la superestructura total para una subred dada, se tiene que las restricciones que aplican a este problema son las siguientes:

**Balances de materia para los separadores:**

$$\sum_{l \in B_K^{IN}(s)} f_l^k - \sum_{l \in B_K^{OUT}(s)} f_l^k = 0 \quad s \in B_K \quad ; \quad k \in HCT$$

...(C.5)

**Balances de materia para los mezcladores:**

$$\sum_{l \in M_K^{IN}(m)} f_l^k - \sum_{l \in M_K^{OUT}(m)} f_l^k = 0 \quad m \in M_K \quad ; \quad k \in HCT$$

...(C.6)

**Balances de energía para los mezcladores:**

$$\sum_{l \in M_K^{IN}(m)} f_l^k t_l^k - \sum_{l \in M_K^{OUT}(m)} f_l^k t_l^k = 0 \quad m \in M_K \quad ; \quad k \in HCT$$

...(C.7)

Balance de energía para los intercambiadores de calor:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_{ij} - \dot{t}_i^t (t_n^t - t_p^t) &= 0 \\
 Q_{ij} - \dot{t}_i^t \Delta H_{ij}^M &= 0 \\
 Q_{ij} - \dot{t}_i^j (t_q^j - t_r^j) &= 0 \\
 Q_{ij} - \dot{t}_i^j \Delta H_{ij}^C &= 0
 \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned}
 n \in E_{ij}^{MIN} \\
 p \in E_{ij}^{HOUT} \\
 q \in E_{ij}^{COUT} \\
 r \in E_{ij}^{CIN}
 \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned}
 i \in HU^* \\
 j \in CU^* \\
 j \in CU^*
 \end{aligned} \right\} (i,j) \in MA$$

... (C.8)

Restricciones de acercamientos de temperatura:

$$\left. \begin{aligned}
 t_n^t - t_q^j &\geq \Delta T_{min} \\
 t_p^t - t_r^j &\geq \Delta T_{min}
 \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned}
 n \in E_{ij}^{MIN} \\
 p \in E_{ij}^{HOUT} \\
 q \in E_{ij}^{COUT} \\
 r \in E_{ij}^{CIN}
 \end{aligned} \right\} (i,j) \in MA$$

... (C.9)

Especificaciones para los flujos de entrada y salida:

$$\begin{aligned}
 \dot{t}_l^k &= F_k & l \in S_k^{IN} (m^o) & & k \in (H)U(C) \\
 \dot{t}_l^k &= F_k & l \in M_k^{OUT} (m^o) & & k \in (H)U(C)
 \end{aligned}$$

donde:

$$F_k = (F_i, i \in H ; F_j, j \in C)$$

... (C.10)

**Especificaciones para las temperaturas de entrada y salida:**

$$\left. \begin{aligned} t_l^k &= T_k^{IN} & l \in B_k^{IN}(s^o) \\ t_l^k &= T_k^{OUT} & l \in N_k^{OUT}(m^o) \end{aligned} \right\} k \in \text{HCT} \quad \dots (\text{C.11})$$

donde

$$\begin{aligned} T_k^{IN} &= (T_l^{IN}, l \in H_i; T_j^{IN}, j \in C_i \\ &\quad T_l^{MIN}, l \in HU^i; T_j^{CIN}, j \in CU^i) \\ T_k^{OUT} &= (T_l^{OUT}, l \in H_i; T_j^{OUT}, j \in C_i \\ &\quad T_l^{MOUT}, l \in HU^i; T_j^{COUT}, j \in CU^i) \end{aligned}$$

**Igualdad de temperaturas para entradas y salidas de los separadores:**

$$t_l^k = t_p^k \quad l \in B_k^{IN}(s), p \in B_k^{OUT}(s), s \in B_k, k \in \text{HCT} \quad \dots (\text{C.12})$$

**Restricción de No negatividad:**

$$f_l^k \geq 0 \quad l \in N_k \quad k \in \text{HCT} \quad \dots (\text{C.13})$$

Finalmente, las áreas de cada cambiador pueden expresarse en términos de las cargas térmicas  $Q_{ij}$  y las temperaturas de las corrientes, es decir

$$A_{ij} = Q_{ij} U_{ij}^{-1} (\text{LMTD})_{ij}^{-1} \quad \dots (\text{C.14})$$

donde

$U_{ij}$  es el coeficiente de transferencia de calor global para el intercambio de calor  $(i,j) \in MA$ .

(LMTD)  $t_{ij}$  es la diferencia de temperaturas media logarítmica para el intercambio de calor  $(i,j) \in MA$ .

De esta manera, la función objetivo para minimizar el costo de inversión está dado por

$$\min \sum_{(i,j) \in MA} C_{ij} A_{ij} b_{ij} \quad \dots (C.15)$$

donde:

$C_{ij}$  y  $b_{ij}$  son los coeficientes de costos.

$A_{ij}$  son las áreas de transferencia de calor dadas por la ec.C.14, que pueden expresarse explícitamente en términos de las temperaturas.

De esta manera, la función objetivo en la ec.(C.15) sujeta a las restricciones en las ecs.(C.5) a (C.13) define un problema de programación no lineal en el que las variables a optimizar son los flujos (capacidades térmicas)  $f_i^k$  y las temperaturas  $t_i^k$ .

Es importante notar que las cargas térmicas  $Q_{ij}$  en las ecs.(C.8) y (C.14) se manejan como parámetros de valores fijos los cuales fueron obtenidos en la solución del modelo del transbordo del problema de programación lineal mixta entera. La solución numérica al problema de programación no lineal puede obtenerse con algoritmos estándar.

Al obtenerse la solución óptima del problema de programación no lineal, se obtendrá automáticamente la configuración de la red de intercambio de calor de costo de inversión mínimo de la subred dada. La configuración particular estará definida simplemente por los flujos que sean diferentes a cero, la cual indicará las interconexiones de corrientes requeridas para las unidades de intercambio de calor.

## NOTAS EN LA FORMULACION DEL PROBLEMA DE PROGRAMACION NO LINEAL.

Existen 2 cuestionamientos principales sobre la validez de la formulación del problema de programación no lineal presentada en la sección anterior.

El primer cuestionamiento es sobre la posibilidad de que siempre se obtenga de la superestructura una configuración factible de la red que tenga como cambiadores de calor el número mínimo de intercambios obtenidos por el modelo del transbordo de programación lineal mixta entera. Como se muestra en el Apéndice A de la ref. (6), es posible probar la existencia de la correspondencia uno a uno entre los intercambios obtenidos por el modelo del transbordo y las unidades de una red factible contemplada en la superestructura propuesta. De aquí, que la formulación propuesta del problema de programación no lineal para la superestructura siempre garantiza que se tenga una solución factible. Esta propiedad es extremadamente importante porque proporciona las bases teóricas del procedimiento propuesto.

El segundo cuestionamiento que surge es si se eliminarán suficientes corrientes en la superestructura para que se obtenga una configuración práctica de la red. Claramente, puede observarse que si la mayoría de las corrientes postuladas no se eliminan (es decir, que sus flujos sean diferentes a cero), la red que se obtendría sería complicada y de un valor práctico cuestionable. Sin embargo, las corrientes de recirculación que se dirigen a los puntos de mezclado a la entrada de cada cambiador de calor y que provienen de la salida de los otros cambiadores, tendrán la tendencia a que se les asignen valores de cero. Más específicamente, como se muestra en el Apéndice B de la ref. (6), un incremento en los flujos de las corrientes de recirculación resulta en un incremento en la función objetivo. Esto implica que debido a la minimización de la función objetivo, sus flujos serán establecidos igual a cero, a menos que las restricciones de carga térmica o temperaturas

prevengan que esto suceda. Por lo tanto, la principal implicación de esta prueba es que pueden esperarse estructuras de las redes relativamente sencillas con este procedimiento (por ejemplo, estructuras en serie o paralelo). Esta propiedad es claramente muy importante desde un punto de vista práctico.

Otra nota importante en la formulación del problema de programación no lineal es que debido a las bilinearidades de flujos y temperaturas que están presentes en las restricciones de las ecuaciones (C.7) y (C.8), el problema es en general no convexo. Esto implica que no puede garantizarse la existencia de una solución óptima única. Así, la solución que se obtiene puede considerarse únicamente como un mínimo local para el costo de inversión. Esto, sin embargo, no representa una desventaja importante en aplicaciones prácticas dado que es bien conocido que las funciones de costo de inversión son planas (20).

Es importante notar que la suposición de emplear un acercamiento de temperatura fijo puede relajarse y encontrar su valor óptimo. Esto puede realizarse mediante la optimización del costo total (costo de servicios y costo de inversión de los cambiadores de calor) versus el acercamiento de temperatura en un ciclo iterativo externo al procedimiento de síntesis. Este procedimiento permite entonces establecer el balance adecuado entre el costo de servicios y el costo de inversión para el tipo de redes considerado en este trabajo. Debe notarse que dado que la configuración de la red puede cambiar para valores diferentes del acercamiento de temperatura, la función del costo total será en general no diferenciable, y de aquí que deba usarse para esta optimización un procedimiento de búsqueda directa (por ejemplo, búsqueda de sección dorada).

Debe señalarse también, que la suposición de un acercamiento de temperaturas fijo, y cargas térmicas fijas para cada intercambio, pueden relajarse fácilmente en la superestructura propuesta. Esto es, en la ec.(C.9) de la formulación del problema de programación no lineal, pueden especificarse acercamientos de temperaturas menores para cada



intercambiador de calor (aún valores de cero), mientras que las cargas térmicas en la ec.(C.8) pueden tratarse como variables con la adición de restricciones lineales para considerar el contenido de calor de cada corriente.

Finalmente, para evitar dificultades en la solución numérica del problema de programación no lineal, es conveniente reemplazar el término logarítmico en la ec.(C.14) con la aproximación propuesta por Paterson ( 21 ). Este autor demuestra que la diferencia de temperaturas media logarítmica puede reemplazarse por una nueva expresión evitándose las dificultades implícitas en el término logarítmico (indefiniciones en ciertos límites) y obteniéndose una muy buena aproximación. La expresión propuesta por Paterson es la siguiente:

$$\theta_{NM} = \frac{2}{3} \theta_{GM} + \frac{1}{3} \theta_{AM} \approx \theta_{LM}$$

donde:

- $\theta_{NM}$  = nueva diferencia de temperaturas
- $\theta_{GM}$  = diferencia de temperaturas geométrica
- $\theta_{AM}$  = diferencia de temperaturas aritmética
- $\theta_{LM}$  = diferencia de temperaturas logarítmica

## APENDICE D.

**METODO PARA DETERMINAR EL EFECTO DE MODIFICAR EL NUMERO DE UNIDADES DE INTERCAMBIO DE CALOR SOBRE EL CONSUMO DE SERVICIOS. (Formulación desarrollada en este trabajo).**

### FORMULACION DEL PROBLEMA.

El problema de síntesis de una red de recuperación de calor se formula como un problema del transbordo, y puede estar sujeto a diferentes funciones objetivo.

El objetivo empleado en esta nueva formulación, es el de determinar el consumo mínimo de servicios o el consumo correspondiente al costo mínimo de servicios, para un conjunto de corrientes de proceso calientes y un conjunto de corrientes de proceso frías, sujeto a las restricciones de un número fijo de unidades de intercambio de calor y un acercamiento de temperaturas también fijo.

El primer paso en la formulación consiste en realizar una partición del rango completo de temperaturas de las corrientes de proceso, en  $k$  intervalos de temperatura, para lo cual puede emplearse cualquier método de partición adecuado ( 2, 9 y 13 ). Los intervalos se enúseran del nivel de temperatura más alto (  $k = 1$  ) al nivel más bajo (  $k = K$  ), teniéndose un cambio de temperatura  $\Delta T_k$  en cada intervalo  $k$  (  $k = 1, 2, \dots, K$  ). El conjunto de intervalos de temperatura correspondientes a la red se identifica por  $NI = ( k/k = 1, 2, \dots, K )$ .

A continuación se definen los siguientes conjuntos de corrientes, con el propósito de identificar la localización de todas las corrientes de proceso y servicios relativa a los intervalos de temperatura.

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

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

$B_k = \{ m / \text{ el servicio de calentamiento } m \text{ está presente en el intervalo } k \}$

$M_k = \{ n / \text{ el servicio de enfriamiento } n \text{ está presente en el intervalo } k \}$

... (D.1)

Sea  $Q_{ik}^H$  la carga térmica de la corriente caliente  $i$  comprendida en el intervalo de temperatura  $k$ . Esta carga térmica está dada por:

$$Q_{ik}^H = F_i (C_{p_i})_k \Delta T_k^i \quad \dots (D.2)$$

Donde  $\Delta T_k^i$  es el cambio de temperatura de la corriente  $i$  en el intervalo  $k$ . De manera similar, la carga térmica  $Q_{jk}^C$  que fluye a la corriente fría  $j$  en el intervalo de temperatura  $k$  está calculada por:

$$Q_{jk}^C = F_j (C_{p_j})_k \Delta T_k^j \quad \dots (D.3)$$

Todos los servicios de calentamiento y enfriamiento se sitúan en los intervalos de temperatura apropiados dependiendo de sus temperaturas de entrada y salida. Entonces  $Q_{mk}^B$  es la carga térmica del servicio de calentamiento  $m$  en el intervalo de temperatura  $k$ . De manera similar,  $Q_{nk}^M$  es la carga térmica del servicio de enfriamiento  $n$  en el intervalo de temperatura  $k$ .

Un objetivo deseable es el de obtener una red cuyo consumo de servicios sea mínimo sujeta a un número de unidades de intercambio de calor y un acercamiento de temperaturas fijo.

Dado que se desconocen los flujos de los servicios de calentamiento y enfriamiento, es conveniente definir cargas térmicas falsas a los servicios de calentamiento y enfriamiento, con el propósito de que puedan incorporarse a los conjuntos de las corrientes de proceso calientes y frías, así que se pueden definir los siguientes conjuntos de corrientes calientes y frías

$$\hat{H} = \langle H, B \rangle \quad \text{y} \quad \hat{C} = \langle C, W \rangle \quad \dots (D.4)$$

Como se mencionó anteriormente, el consumo de servicios se desconoce, pero con el propósito de manejar los servicios en la formulación del problema, es necesario definir cargas térmicas falsas a ambos. Para establecer estas cargas térmicas se dan las siguientes recomendaciones: 1. Para un servicio de calentamiento, la carga térmica que se le asigna será la suma de cargas térmicas de todas las corrientes de proceso frías. 2. Para un servicio de enfriamiento, la carga térmica que se le asigna será la suma de las cargas térmicas de todas las corrientes de proceso calientes. De esta manera, existirá suficiente carga térmica del servicio de calentamiento para calentar las corrientes de proceso frías que lo requieran, y existirá suficiente carga térmica del servicio de enfriamiento para enfriar las corrientes de proceso calientes que lo requieran. El consumo mínimo de servicios se obtendrá mediante una función objetivo que comprende la minimización del calor intercambiado entre el servicio de calentamiento y las corrientes de proceso frías y el calor intercambiado entre el servicio de enfriamiento y las corrientes de proceso calientes. Por supuesto, el intercambio de calor entre el servicio de calentamiento y el servicio de enfriamiento está prohibido.

Para cada corriente caliente  $i \in \hat{H}$  se asigna un calor residual  $R_{i/k}$ . El calor intercambiado entre la corriente caliente  $i \in \hat{H}$  y la corriente fría  $j \in \hat{C}$  en el intervalo de temperatura  $k$  se denota como  $Q_{i/j,k}$ . Entonces, se puede notar claramente que para los intercambios de calor prohibidos  $Q_{i/j,k} = 0$ .

Debe notarse que existe la posibilidad de que una corriente caliente  $i \in \hat{H}$  intercambie calor con una corriente fría  $j \in \hat{C}$  en un intervalo de temperatura  $k$  donde la corriente caliente  $i$  realmente no está presente. Esto puede suceder si la corriente caliente  $i$  está presente en un intervalo de temperatura más alta  $\bar{k} < k$ . En este caso el intercambio de calor tiene lugar a través del calor residual  $R_{iA}$ . Por lo tanto, es conveniente definir los subconjuntos de corrientes para un intercambio de calor potencial en cada intervalo  $k$ , los cuales están dados por:

$$\hat{H}_k = \{ i / i \in \hat{H}, \text{ la corriente } i \text{ está presente en el intervalo } \bar{k} \leq k; \bar{k}, k \in SN \}$$

$$\hat{C}_k = \{ j / j \in \hat{C}, \text{ la corriente } j \text{ está presente en el intervalo } k, k \in SN \}$$

... (D.5)

Así que,  $Q_{iA}^{\hat{H}}$  es la carga térmica de la corriente caliente ó servicio de calentamiento  $i \in \hat{H}_k$  disponible en el intervalo de temperatura  $k$ , y  $Q_{jA}^{\hat{C}}$  es la carga térmica de la corriente fría ó servicio de enfriamiento  $j \in \hat{C}_k$  requerida en el intervalo de temperatura  $k$ .

Debe notarse que en esta formulación se supone una carga térmica para el servicio de calentamiento mayor que el consumo real, siendo entonces necesario definir un calor residual  $R_{iA}$  para el servicio de calentamiento  $i$  en el último intervalo de temperatura  $k$ , que será

$$R_{iA} > 0 \quad \begin{array}{l} i \in \hat{H} \\ k = K \end{array}$$

... (D.6)

De igual manera, para el servicio de enfriamiento se supone una carga térmica mayor que el consumo real, así que es necesario definir un calor residual  $R_{Cj}$  que será

$$RC_j > 0$$

$$j \in W$$

... (D.7)

Es importante mencionar que este calor residual  $RC_j$  correspondiente al servicio de enfriamiento  $j$ , existe únicamente en el intervalo de temperatura donde termina este servicio de enfriamiento.

Además debe notarse que la formulación se desarrolla para la red completa excluyéndose la partición del punto de pliegue, permitiéndose de esta manera, la posibilidad de intercambiadores de calor que involucran corrientes que cruzan el punto de pliegue.

Para denotar la existencia de un intercambio de calor entre las corrientes  $i \in \hat{H}$  y  $j \in \hat{C}$ , se introduce la variable binaria (0-1)  $Y_{ij}$ . Se supone que cada uno de estos intercambios de calor está asociado a una unidad de intercambio de calor potencial. Puesto que el intercambio de calor total entre el par de corrientes dado es la suma de sus intercambios en los intervalos de temperatura de la red, las variables binarias se relacionan con las variables  $Q_{ijk}$  a través de las desigualdades siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{k \in SN} Q_{ijk} - U_{ij} Y_{ij} \leq 0 \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} i \in \hat{H} \\ j \in \hat{C} \end{array}$$

... (D.8a)

donde

$$U_{ij} = \min \left\{ \sum_{k \in SN} Q_{ik}^{\hat{H}}, \sum_{k \in SN} Q_{jk}^{\hat{C}} \right\}$$

... (D.8b)

corresponde al límite superior del calor que puede intercambiarse entre la corriente  $i$  y la corriente  $j$ .

Nótese que cuando las variables binarias  $Y_{ij}$  en la ecuación (D.8a) toman un valor de cero, no se intercambia

calor, pero cuando se les asigna un valor de uno, pueden intercambiar cualquier cantidad de calor que no exceda  $U_{ij}$ .

Efectuando balances de calor individuales para los conjuntos de corrientes calientes y frías en cada intervalo, e incluyendo las restricciones mencionadas anteriormente, se puede establecer el problema para determinar el mínimo consumo de servicios para un número de unidades de intercambio de calor y un acercamiento de temperaturas fijas, el cual estará dado por el siguiente modelo del transbordo de programación lineal síxta entera:

$$\text{minimizar } Z = \underbrace{\sum_{\substack{j \in C \\ j \in W}} \sum_{k \in SN} Q_{ijk}}_{t \in B \text{ (servicio de calentamiento)}} + \underbrace{\sum_{\substack{t \in H \\ t \in B}} \sum_{k \in SN} Q_{ijk}}_{j \in W \text{ (servicio de enfriamiento)}}$$

sujeto a

Restricciones correspondientes a los balances de energía:

$$\left. \begin{aligned} R_{ik} - R_{i,k-1} + \sum_{j \in \hat{C}_k} Q_{ijk} &= Q_{ik}^{\hat{H}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} t \in \hat{H}_k \\ t \in B \\ k \in SN \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} R_{ik} - R_{i,k-1} + \sum_{\substack{j \in \hat{C}_k \\ j \in W}} Q_{ijk} &= Q_{ik}^{\hat{H}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} t \in \hat{H}_k \\ t \in B \\ t \in H \\ k \in SN \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{t \in \hat{H}_k} Q_{tjk} = Q_{jk}^{\hat{C}} \\ j \in \hat{C}_k \\ j \in W \\ k \in SN \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{t \in \hat{H}_k} Q_{tjk} = Q_{jk}^{\hat{C}} \\ j \in \hat{C}_k \\ j \in W \\ j \in C \\ k \in SN \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} RC_j + \sum_{t \in \hat{H}_k} Q_{tjk} = Q_{jk}^{\hat{C}} \\ j \in \hat{C}_k \\ j \in W \\ j \in C \end{array} \right\}$$

$k$  es el intervalo de temperatura donde termina el servicio de enfriamiento  $j$ .

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{k \in SN} Q_{tjk} - U_{tj} Y_{tj} \leq 0 \\ t \in \hat{H}_k \\ j \in \hat{C}_k \\ k \in SN \end{array} \right\}$$

Restricción correspondiente al número de unidades de intercambio de calor asignadas previamente:

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{t \in \hat{H}_k} \sum_{j \in \hat{C}_k} Y_{tj} = \text{Número de unidades de intercambio de calor} \\ t \in \hat{H}_k \\ j \in \hat{C}_k \end{array} \right\}$$



**Restricciones de no negatividad:**

$$R_{t,k} \geq 0 \quad \left. \vphantom{R_{t,k}} \right\} \begin{array}{l} t \in \hat{H}_k \\ k = 1, 2, \dots, K-1 \end{array}$$

$$R_{t,k} = 0 \quad \left. \vphantom{R_{t,k}} \right\} \begin{array}{l} t \in \hat{H}_k \\ k = 0, K \end{array}$$

$$R_{t,k} \geq 0 \quad \left. \vphantom{R_{t,k}} \right\} \begin{array}{l} t \in S \\ k = K \end{array}$$

$$Q_{t,j,k} \geq 0 \quad \left. \vphantom{Q_{t,j,k}} \right\} \begin{array}{l} t \in \hat{H}_k \\ j \in \hat{C}_k \\ k \in SN \end{array}$$

$$Q_{t,j,k} = 0 \quad \left. \vphantom{Q_{t,j,k}} \right\} \begin{array}{l} t \in S \\ j \in W \\ k \in SN \end{array}$$

$$RC_j \geq 0 \quad \left. \vphantom{RC_j} \right\} j \in W$$

**Declaración de variables enteras (binarias):**

$$Y_{t,j} = 0,1 \quad \left. \vphantom{Y_{t,j}} \right\} \begin{array}{l} t \in \hat{H}_k \\ j \in \hat{C}_k \end{array}$$

La formulación hasta aquí descrita, puede utilizarse para determinar el consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento, habiéndose establecido un número de unidades de intercambio de calor en la red. Sin embargo, pueden realizarse algunos cambios a esta formulación con el propósito de determinar el consumo de servicios correspondiente al costo mínimo.

A continuación, se presentan los cambios que se requieren realizar a la formulación anterior para determinar el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento correspondientes a un costo mínimo, habiéndose establecido un número de unidades de intercambio de calor.

1. Localice todos los servicios de calentamiento y de enfriamiento en los intervalos de temperatura apropiados dependiendo de las temperaturas de entrada y salida de cada servicio. De esta manera,  $Q_{mk}^S$  es la carga térmica del servicio de calentamiento  $m$  que entra al intervalo de temperatura  $k$ . De manera similar,  $Q_{nk}^W$  es la carga térmica del servicio de enfriamiento  $n$  en el intervalo de temperatura  $k$ .

2. Asigne una carga térmica falsa a cada servicio de calentamiento y de enfriamiento. Esta carga térmica falsa se define de igual manera que en la formulación anterior.

3. El calor residual individual  $R_{ik}$  para cada servicio de calentamiento  $i$  en el último intervalo de temperatura  $k$  será:

$$R_{ik} \geq 0 \quad \left. \begin{array}{l} i \in S \\ i \in H \\ k = K \end{array} \right\}$$

4. Defina un calor residual individual  $RC_j$  para cada servicio de enfriamiento  $j$

$$RC_j \geq 0 \quad \left. \vphantom{RC_j} \right\} \quad j \in W$$

5. La nueva función objetivo se expresa en términos de los costos de cada servicio de calentamiento y de enfriamiento, teniéndose:

$$\text{minimizar } Z = \sum_{m \in B} s_m F_m^B + \sum_{n \in W} w_n F_n^W$$

donde  $s_m$  y  $w_n$  son los costos unitarios para los servicios de calentamiento y enfriamiento, y  $F_m^B$  y  $F_n^W$  son los flujos másicos para los servicios de calentamiento y enfriamiento respectivamente.

6. Incluya las siguientes restricciones correspondientes a los balances de calor para cada servicio de calentamiento:

$$\sum_{k \in SN} F_k^B \Delta h_{tk} = \sum_{\substack{j \in C_R \\ j \in W}} \sum_{k \in SN} Q_{tjk} \quad \left. \vphantom{\sum} \right\} \quad t \in B$$

7. Incluya las siguientes restricciones correspondientes a los balances de calor para cada servicio de enfriamiento:

$$\sum_{k \in SN} F_k^W \Delta h_{jk} = \sum_{\substack{t \in \hat{H}_k \\ t \in B}} \sum_{k \in SN} Q_{tjk} \quad \left. \vphantom{\sum} \right\} \quad j \in W$$

8. Es importante notar que el intercambio de calor entre cada servicio de calentamiento y enfriamiento está prohibido, así que:

$$\begin{array}{rcl}
 G_{ijk} & = & 0 \quad k \neq M \\
 Y_{ij} & = & 0 \\
 U_{ij} & = & 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{rcl} G_{ijk} \\ Y_{ij} \\ U_{ij} \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 i \neq j \\
 j \neq M
 \end{array}$$

Mediante estas modificaciones a la formulación anterior, se determina el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento, correspondiente al costo mínimo, habiéndose establecido un número de unidades de intercambio de calor.

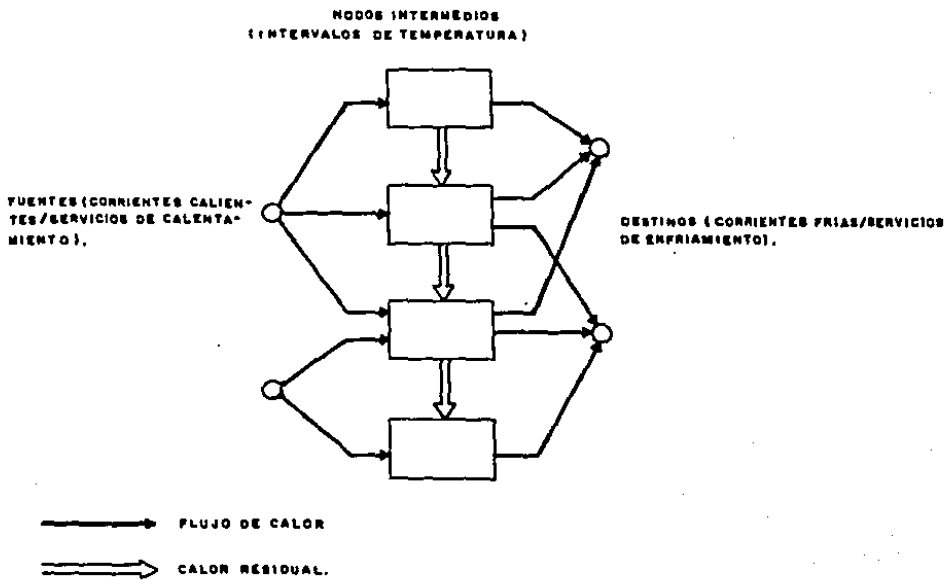
Esta formulación, ya sea con la función objetivo de consumo mínimo de servicios o la función objetivo de costo mínimo de servicios, permite evaluar el efecto de modificar el número de unidades de intercambio de calor, sobre el consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento, resultando de gran valor en el desarrollo del análisis y diseño de redes de recuperación de calor.

## APENDICE E.

### MODELO DEL TRANSBORDO.

Uno de los modelos que es ampliamente usado en el campo de la Investigación de Operaciones para resolver problemas de redes es el modelo del transbordo ( 16 y 17 ). El modelo del transbordo es una variación del problema de transporte que es ampliamente conocido, y consiste en la localización óptima de los recursos. En particular, el modelo del transporte realiza una búsqueda para determinar la red óptima para transportar una mercancía (por ejemplo, un producto) desde la fuente (por ejemplo, una planta) directamente a su destino (por ejemplo, un mercado). Por otro lado, el modelo del transbordo investiga la red óptima para enviar la misma mercancía, pero desde la fuente a nodos intermedios (por ejemplo, un almacén) y entonces a su destino.

La siguiente analogía con el modelo del transbordo puede hacerse para el problema de recuperación de calor. El calor puede considerarse como una mercancía que es enviada de las corrientes calientes a las corrientes frías a través de intervalos de temperatura que toman en cuenta las restricciones termodinámicas en la transferencia de calor. En particular, la segunda ley de la termodinámica requiere que el calor fluya únicamente desde temperaturas altas hacia temperaturas menores, y por lo tanto, estas restricciones termodinámicas deben ser consideradas en el modelo de la red. Esto puede realizarse mediante la partición del rango completo de temperaturas en intervalos de temperatura de acuerdo a las reglas propuestas por Linnhoff y Flower ( 2 ), Grises ( 9 ), y Cerda col. ( 13 ). Estos procedimientos de partición garantizan la transferencia de calor factible en cada intervalo de temperatura, dado un acercamiento de temperaturas límite ( $\Delta T_{min}$ ). De esta manera, como se muestra en la Fig. E.1, puede considerarse que el calor fluye de las corrientes calientes hacia el correspondiente intervalo de temperatura, y entonces a las corrientes frías en el mismo



**FIG. E.1 ANALOGIA DE LA RED DE RECUPERACION DE CALOR CON EL MODELO DEL TRANSBORDO.**

intervalo de temperatura, y el calor residual fluye al intervalo próximo de menor temperatura. Por lo tanto, el modelo del transbordo para la red de recuperación de calor tiene como fuente a las corrientes de proceso calientes y a los servicios de calentamiento, como nodos intermedios a los intervalos de temperatura y como destino a las corrientes frías del proceso y a los servicios de enfriamiento. El patrón de flujo de calor para cada intervalo de temperatura se muestra en la Fig. E.2 y se describe a continuación:

(a) El calor fluye a un intervalo de temperatura en particular, proveniente de todas las corrientes de proceso calientes y servicios de calentamiento cuyo rango de temperaturas incluye a este intervalo.

(b) El calor sale del intervalo de temperatura hacia las corrientes de proceso frías y los servicios de enfriamiento cuyo rango de temperaturas incluye a este intervalo.

(c) El calor sale del intervalo de temperatura hacia el intervalo próximo de menor temperatura. Este calor es el calor residual (exceso) que no puede ser utilizado en el presente intervalo, y consecuentemente tiene que fluir hacia un intervalo de menor temperatura.

(d) El calor fluye a un intervalo de temperatura en particular, proveniente del intervalo previo que está a una mayor temperatura. Este calor es el residual (exceso) que no puede ser utilizado en el intervalo de mayor temperatura.

Debe notarse que este patrón de flujo de la red es un caso especial del modelo general del transbordo ( 16 y 17 ). dado que todos los flujos de calor que provienen de las corrientes calientes hacia los intervalos de temperatura, y de los intervalos de temperatura hacia las corrientes frías son normalmente fijos. En tal caso las únicas variables en este modelo del transbordo son los flujos de calor residuales de un intervalo de temperatura hacia el intervalo próximo de

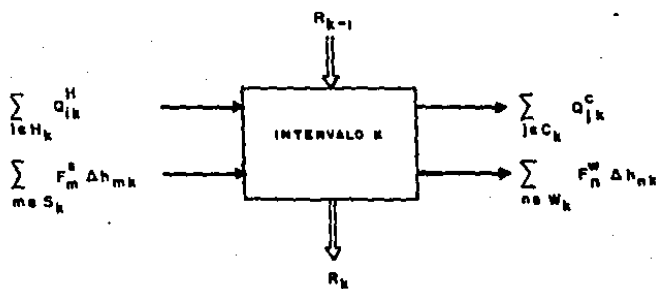


FIG. E.2 PATRON DE FLUJO DE CALOR EN CADA INTERVALO DE TEMPERATURA



menor temperatura, y los flujos de los servicios de calentamiento y enfriamiento.

Con este patrón de flujo de calor de la red, Papoulias y Grossmann (4) desarrollan una formulación matemática del modelo del transbordo con la que es posible determinar el consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento, o bien el consumo de servicios correspondiente al costo mínimo. Adicionalmente, existen diferentes formulaciones matemáticas del modelo del transbordo que pueden emplearse para la síntesis sistemática de la red de recuperación de calor. Estas otras formulaciones pueden usarse para derivar redes con número mínimo de unidades ( 4 ), y también como se presenta en este trabajo para derivar el costo mínimo de servicios para redes con un número fijo de unidades de intercambio de calor.

## APENDICE F.

### METODO DE DISEÑO DEL PUNTO DE PLIEGUE.

(REGLAS PARA ENCONTRAR UN ARREGLO POSIBLE DE LA RED DE RECUPERACION DE CALOR).

En este apéndice se presenta un método de diseño descrito por Linnhoff y Hindmarsh ( 1 ) con el que se obtiene una solución posible del problema de síntesis de la red de recuperación de calor. Una característica importante de este método es que produce diseños que emplean el mínimo de servicios con el mismo número de unidades.

Primeraente se presenta "la filosofía" del método, y posteriormente se presentan los detalles del procedimiento de cálculo, es decir, el desarrollo de "los criterios de factibilidad" que cuantifican las restricciones impuestas en el diseño por el punto de pliegue, el uso de una "regla heurística" para asegurar que el diseño es dirigido en busca del menor número de unidades posible y la solución del "problema restante" que permite tomar en consideración las restricciones del proceso y otros requerimientos.

### LA FILOSOFIA DEL METODO.

El punto de pliegue representa la región más restringida de un diseño ; despues de todo, el acercamiento de temperatura  $\Delta T_{min}$  se presenta para todas las corrientes calientes y frias en el punto de pliegue. Como resultado, el número de intercambios de calor factibles en esta región está severamente restringido. Muy a menudo existe un intercambio de calor crucial o "clave", si este intercambio de calor no se realiza, se tendrá por resultado que se transfiera calor a través del punto de pliegue y de esta manera se incremente el uso de servicios de calentamiento y enfriamiento. Por lo tanto, el método del punto de pliegue:

- ) reconoce la división del punto de pliegue
- )inicia el diseño en el punto de pliegue

desarrollándolo en forma separada en dos problemas, uno para el lado caliente y otro para el lado frío.

Este procedimiento es completamente diferente del procedimiento normal en el que intuitivamente se iniciaba el diseño en el lado caliente y se desarrollaba hacia el lado frío. Cuando un diseño se inicia en el lado caliente, las decisiones que se toman al inicio pueden conducir a que posteriormente se tomen decisiones que violen el punto de pliegue. Por otro lado, cuando el diseño se comienza en el punto de pliegue, las decisiones que se toman al inicio del diseño se realizan en la parte más restringida del problema y es menor la probabilidad de que se tengan dificultades posteriores en el diseño.

De esta manera, comenzando el diseño en el punto de pliegue se tiene la ventaja de permitir al diseñador identificar intercambios de calor "claves", u opciones en la topología en la región más restringida del diseño que está íntimamente relacionada con el mínimo consumo de servicios. Se tiene la ventaja adicional de que el diseñador siempre tendrá la opción de violar el punto de pliegue si así lo requiere, con el completo conocimiento de las penalidades en que incurrirá. Cuando un intercambio de calor se sitúa sabiendo que viola el punto de pliegue, puede establecerse rápidamente el flujo de calor a través del punto de pliegue. Este flujo de calor es equivalente al incremento final en el servicio de calentamiento y el servicio de enfriamiento.

Cuando se aleja del punto de pliegue, el diseño ya no se encuentra muy restringido dado que, comúnmente el número de opciones en los intercambios se incrementa. Este incremento en el número de opciones puede usarse con ventaja por el diseñador. Después de todo, el objetivo de diseño no es únicamente la identificación de una topología de costo óptimo sino también una que sea segura y controlable. Mediante una discriminación entre las opciones en los intercambios de calor, el diseñador puede dirigir su diseño, usando su juicio y conocimiento del proceso, hacia una red de recuperación de calor práctica, segura y controlable.

En el desarrollo del método de diseño del punto de

pliegue, se han reconocido estos beneficios. Como resultado, el método no "dice" al diseñador que intercambios de calor deben realizarse pero le informa de las opciones existentes. En el región de temperatura más restringida cercana al punto de pliegue, se identifican intercambios de calor claves usando criterios de factibilidad. Los mismos criterios informan al diseñador de cuales opciones se disponen en el punto de pliegue y si se requiere división de corrientes.

Cuando el diseño se aleja del punto de pliegue, la necesidad de emplear criterios de factibilidad disminuye y el método permite al diseñador seleccionar topologías basadas en los requerimientos del proceso.

Resumiendo, el método de diseño del punto de pliegue incorpora dos características importantes fundamentales. La primera, que reconoce al punto de pliegue como la región de temperatura más restringida. El diseño se inicia en el punto de pliegue y se desarrolla alejándose de él hacia los lados. La segunda, que permite al diseñador seleccionar entre las diferentes opciones existentes.

#### CRITERIOS DE FACTIBILIDAD EN EL PUNTO DE PLIEGUE.

La identificación de intercambios de calor "claves" en el punto de pliegue, de las opciones de diseño disponibles y de la necesidad de división de corrientes, se realiza mediante la aplicación de tres criterios de factibilidad a los datos de las corrientes que cruzan el punto de pliegue. En el desarrollo de estos criterios de factibilidad se hace referencia a los cambiadores de calor que se localizan en el punto de pliegue llamados cambiadores "pinch" ( también se los llama intercambios "pinch" ). Como se muestra en la Fig. F.1, estos cambiadores de calor presentan el acercamiento de temperatura  $\Delta T_{\min}$ , cuando menos en un lado que corresponde al punto de pliegue.

##### 1. Número de corrientes de acceso accesibles en el punto de pliegue.

El primer criterio de factibilidad se refiere al número de corrientes de proceso calientes y frías presentes en el

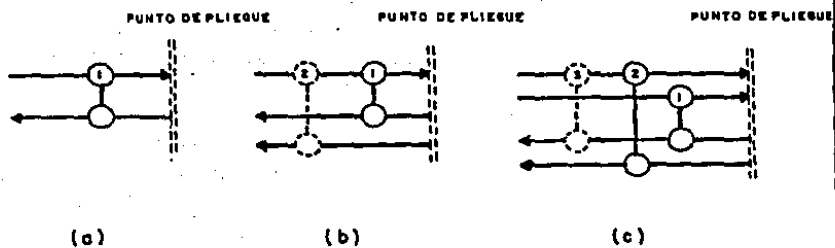


FIG. F.1 (a) UN INTERCAMBIO "PINCH".

(b) EL CAMBIADOR 2 NO ES UN INTERCAMBIO "PINCH".

(c) EL CAMBIADOR 3 NO ES UN INTERCAMBIO "PINCH".

punto de pliegue. Este número deberá ser tal que permita un arreglo de cambiadores compatible con el consumo mínimo de servicios.

Considere el diseño del lado caliente del problema que se muestra en el Fig. F.2(a). Si se empleara servicio de enfriamiento arriba del punto de pliegue se violaría el objetivo de mínimo consumo de servicios ( como se explicó en el Apéndice A de este trabajo). Por lo tanto, cada corriente caliente tiene que enfriarse hasta la temperatura del punto de pliegue mediante un intercambio con una corriente de proceso fría. Esto se intenta en la Fig. F.2(a) colocando intercambios "pinch" entre las corrientes caliente 2 y fría 4 y entre las corrientes caliente 3 y fría 5. Sin embargo, nótese, que habiéndose hecho estos intercambios la corriente caliente 1 no puede intercambiar calor con una corriente de proceso fría sin violar la restricción de acercamiento de temperaturas  $\Delta T_{\text{min}}$ . Por lo tanto, ahora se requeriría del uso de servicio de enfriamiento arriba del punto de pliegue para enfriar la corriente caliente 1 hasta la temperatura del punto de pliegue. En tales circunstancias se dice que los datos originales de las corrientes en el punto de pliegue no son compatibles con el diseño de consumo mínimo de servicios.

Cuando ocurre esta incompatibilidad, se requiere que las corrientes que se presentan en el punto de pliegue se "corrijan" mediante una división de corrientes ( véase Fig. F.2(b)). Mediante la división de una corriente fría, se crea una "ramificación", que permitirá un intercambio "pinch" con la corriente caliente 1.

Resumiendo, el número de corrientes de proceso presentes en el punto de pliegue es compatible con un diseño de mínimo consumo de servicios solo si puede encontrarse un intercambio "pinch" para cada corriente caliente. Para que esto ocurra, debe aplicarse la siguiente desigualdad:

$$NH \leq NC \quad \dots (F.1(a))$$

donde

NH es el número de corrientes calientes o ramificaciones, y  
NC es el número de corrientes frías o ramificaciones.

Puede recurrirse a la división de corrientes para asegurar

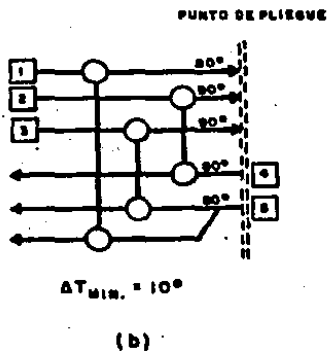
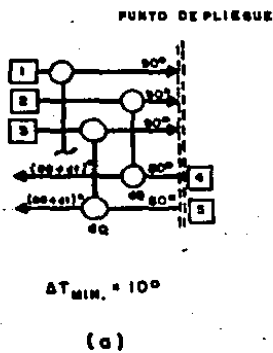


FIG. F.2 (a) EL DISEÑO DEL LADO CALIENTE NO ES FACTIBLE EN EL PUNTO DE PLIEGUE.

(b) DIVISION DE CORRIENTES EN EL PUNTO DE PLIEGUE (LADO CALIENTE).

que se cumpla esta restricción.

Para el lado frío que se localiza abajo del punto de pliegue, se aplican los argumentos contrarios al lado caliente descritos anteriormente. Para evitar el uso de servicio de calentamiento abajo del punto de pliegue, cada corriente de proceso fría debe calentarse hasta la temperatura del punto de pliegue mediante un intercambio con una corriente de proceso caliente, véase la Fig. F.3. Como resultado, se requiere un intercambio "pinch" para cada corriente de proceso fría en el punto de pliegue, y esto es posible solo si se cumple la siguiente desigualdad:

$$NH \geq NC \quad \dots (F.1(b))$$

Nuevamente, puede recurrirse a la división de corrientes para asegurar que se cumpla esta restricción.

## 2. Desigualdad de CP para intercambios de calor individuales.

El segundo criterio de factibilidad se refiere a la factibilidad de temperaturas de las corrientes. Como se muestra en la Fig. F.4, el potencial térmico (diferencia de temperaturas) en un intercambio "pinch" no puede disminuir al alejarse del punto de pliegue. Para que se cumpla esta condición se deben aplicar las siguientes desigualdades de CP en cada intercambio de calor "pinch":

- ) Intercambio "pinch" en el lado caliente  
 $CPH \leq CPC \quad \dots (F.2(a))$
- ) Intercambio "pinch" en el lado frío  
 $CPH \geq CPC \quad \dots (F.2(b))$

donde

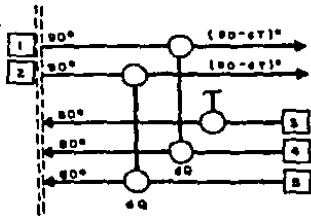
**CPH** es el producto de flujo x capacidad calorífica de una corriente de proceso caliente o ramificación de una corriente de proceso caliente, y

**CPC** es el producto de flujo x capacidad calorífica de una corriente de proceso fría o ramificación de una corriente de proceso fría.

Si se tiene una situación donde no es posible un arreglo



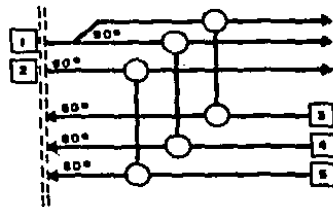
PUNTO DE PLIEGUE



$$\Delta T_{\text{MIN.}} = 10^{\circ}$$

(a)

PUNTO DE PLIEGUE

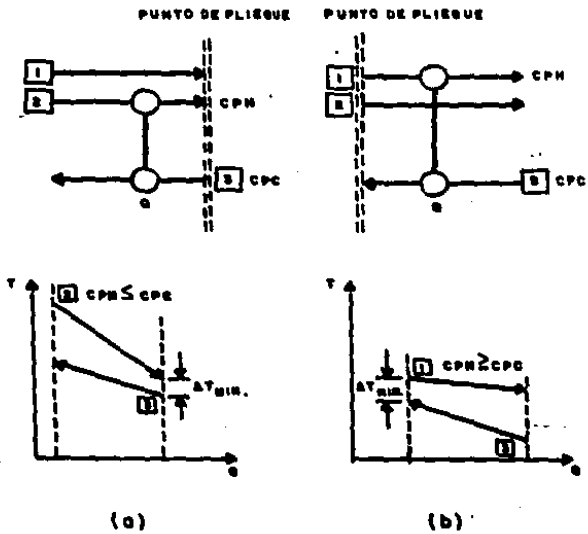


$$\Delta T_{\text{MIN.}} = 10^{\circ}$$

(b)

FIG. F.3 (a) EL DISEÑO DEL LADO FRIO NO ES FACTIBLE EN EL PUNTO DE PLIEGUE.

(b) DIVISION DE CORRIENTES EN EL PUNTO DE PLIEGUE.  
(LADO FRIO).



**FIG. F.4 (a) UN INTERCAMBIO "PINCH" FACTIBLE ARRIBA DEL PUNTO DE PLIEGUE.**  
**(b) UN INTERCAMBIO "PINCH" FACTIBLE ABAJO DEL PUNTO DE PLIEGUE.**

de intercambios que satisfagan estas desigualdades, entonces es necesario cambiar uno o mas CP's mediante la división de corrientes.

Debe notarse que las desigualdades F.2(a) y F.2(b) son aplicables únicamente en el punto de pliegue. Alejándose del punto de pliegue, el potencial térmico (diferencia de temperaturas) puede haberse incrementado lo suficiente para permitir intercambios de calor en los que los CP's de las corrientes que intercambian calor violen estas desigualdades.

### 3. Diferencia de CP.

Para entender el tercer criterio de factibilidad en el punto de pliegue, es conveniente definir la "diferencia de CP"

-> Para un intercambio "pinch" en el lado caliente  
diferencia de CP = CPC - CPH ... (F.3(a))

-> Para un intercambio "pinch" en el lado frío  
diferencia de CP = CPH - CPC ... (F.3(b))

Pueden escribirse ecuaciones similares para las diferencias en la suma total de los CP's de las corrientes frías en el punto de pliegue.

-> Inmediatamente arriba del punto de pliegue  
diferencia global de CP =  $\sum_{i}^{NC} CPC - \sum_{i}^{NH} CPH$  ... (F.4(a))

-> Inmediatamente abajo del punto de pliegue  
diferencia global de CP =  $\sum_{i}^{NH} CPH - \sum_{i}^{NC} CPC$  ... (F.4(b))

La Fig. F.5 ilustra como puede usarse el concepto de la diferencia de CP para una pronta identificación de los intercambios de calor que son factibles entre ellos mismos pero que no son compatibles con una red factible. En la Fig. F.5(a) se muestra un caso donde la suma de las diferencias de CP de los intercambios de calor "pinch" es igual a la diferencia global de CP's. Todas las corrientes en el punto

LADO CALIENTE

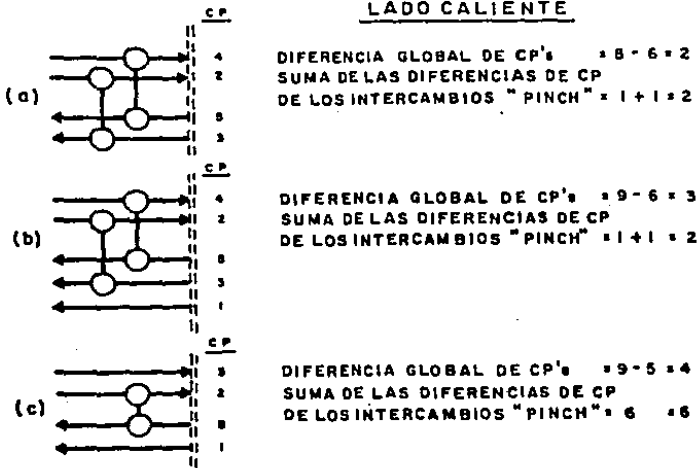


FIG. F. 5 (a) SE INVOLUCRAN TODAS LAS CORRIENTES EN LOS INTERCAMBIOS "PINCH". LA SUMA DE LAS DIFERENCIAS DE CP DE LOS INTERCAMBIOS "PINCH" ES IGUAL A LA DIFERENCIA GLOBAL DE CP's. (INTERCAMBIOS FACTIBLES).

(b) NO SE INVOLUCRAN TODAS LAS CORRIENTES EN LOS INTERCAMBIOS "PINCH". LA SUMA DE LAS DIFERENCIAS DE CP DE LOS INTERCAMBIOS "PINCH" ES MENOR QUE LA DIFERENCIA GLOBAL DE CP's. (INTERCAMBIOS FACTIBLES).

(c) EL INTERCAMBIO "PINCH" NO ES FACTIBLE BASADO EN LA DIFERENCIA GLOBAL DE CP's, YA QUE LA EXCEDE.

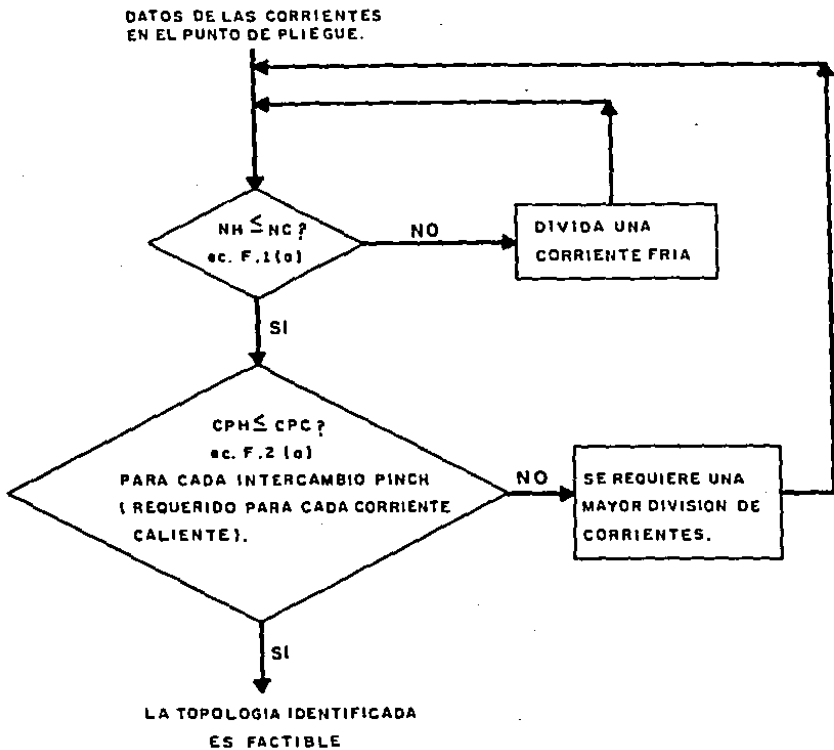
de plieque están involucradas en intercambios "pinch". La Fig. F.5(b) muestra un caso en el punto de plieque del lado caliente para un problema diferente donde la suma de las diferencias de CP de los intercambios de calor "pinch" es menor que la diferencia global de CP's. En este caso, no se involucran todas las corrientes presentes en el punto de plieque, en los intercambios "pinch". La Fig. F.5(c) muestra otro problema diferente donde la suma de las diferencias de CP de los intercambios "pinch" es mayor que la diferencia global de CP's. El intercambio "pinch" mostrado en la Fig. F.5(c) es factible por sí mismo (ya que satisface la desigualdad de la ec. F.2(a)) pero es incompatible con la diferencia global de CP's. (El intercambio "pinch" tiene una diferencia de CP de 6 mientras que el total disponible es solamente de 4.). De esta manera, manteniendo este intercambio "pinch", no es posible completar este diseño, ya que no es factible un intercambio entre las corrientes restantes caliente y fría, el cual es requerido para enfriar la corriente caliente hasta la temperatura del punto de plieque. Puede generalizarse diciendo que las diferencias de CP de todos los intercambios "pinch" debe siempre estar limitada por la diferencia global de CP.

#### LA TABLA DE VALORES DE CP.

En las Figs. F.6(a) y F.6(b) se muestra un procedimiento paso por paso para aplicar los criterios de factibilidad listados anteriormente. Siguiendo esta secuencia, el diseñador puede:

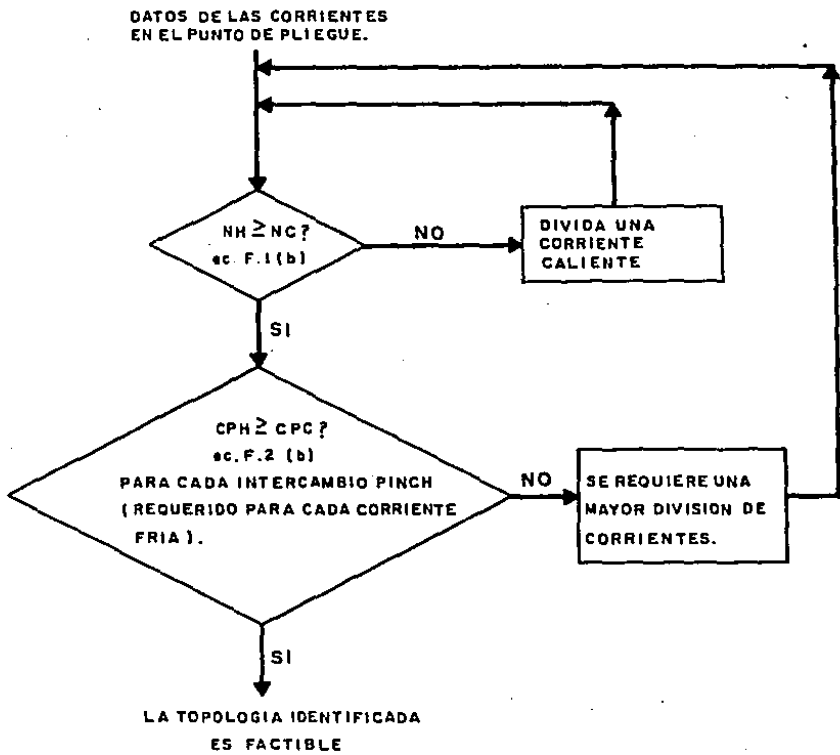
- ) Identificar intercambios de calor claves en el punto de plieque.
- ) Identificar opciones de intercambios disponibles en el punto de plieque.
- ) Identificar la necesidad de división de corrientes y generar opciones de divisiones de corrientes en el punto de plieque.

Este procedimiento es auxiliado por el uso de un nuevo concepto, la "tabla de valores de CP". En las tablas A.1 y



(a) ARRIBA DEL PUNTO DE PLIEGUE ( LADO CALIENTE )

FIG.F.6 (a) PROCEDIMIENTO DEL METODO DE DISEÑO DEL PUNTO DE PLIEGUE PARA EL LADO CALIENTE.



(b) ABAJO DEL PUNTO DE PLIEGUE ( LADO FRIO ).

FIG.F.6 (b) PROCEDIMIENTO DEL METODO DE DISEÑO DEL PUNTO DE PLIEGUE PARA EL LADO FRIO.

A.2 se muestran los datos de un problema ejemplo y los resultados de aplicar el procedimiento de cálculo de la tabla problema a este ejemplo. En las Figs. F.7 y F.8 se muestran las tablas de valores CP para los lados caliente y frío respectivamente para este problema. En estas tablas se listan separadamente y por orden numérico los valores de CP de las corrientes caliente y fría en el punto de pliegue. En la parte superior de la tabla se señalan los criterios de factibilidad apropiados, y los valores de CP que representan a las corrientes que tienen que involucrarse en el intercambio de calor en el punto de pliegue se enmarcan para dar un mayor énfasis. Un intercambio "pinch" se representa en la tabla mediante el apareamiento de los valores de CP de una corriente caliente y una corriente fría. Las divisiones de corrientes se representan escribiendo el valor de CP de las ramificaciones separadas adyacentes al valor original de CP. (véase la Fig. F.8(c)). De esta manera, el procedimiento de cálculo descrito paso por paso en la Fig. F.6 se sigue fácilmente en la tabla de valores de CP.

#### REGLA HEURÍSTICA.

Una vez que se ha seleccionado una topología en el punto de pliegue, el diseño de ambos lados caliente y frío debe continuarse de manera que los costos de capital se mantengan en un mínimo, es decir, el diseño final debe dirigirse hacia la obtención del número mínimo de unidades. Esto puede realizarse empleando una regla heurística para identificar las cargas térmicas en los cambiadores pinch.

La regla heurística resulta directamente de la ecuación que determina el mínimo número de unidades:


$$U_{\min} = N - 1 \quad \dots (F.5)$$

donde

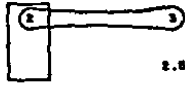
$U_{\min}$  = Mínimo número de unidades

$N$  = Número de corrientes de proceso y servicios




LADO CALIENTE	
ARRIBA DEL PUNTO DE PLIEGUE	
$NH \leq NC$	ec. F.1 (a)
$CPH \leq CPC$	ec. F.2 (a)
	
CORRIENTES CALIENTES	CORRIENTES FRIAS

(a)

LADO CALIENTE	
ARRIBA DEL PUNTO DE PLIEGUE	
$NH \leq NC$	ec. F.1 (a)
$CPH \leq CPC$	ec. F.2 (a)
	
CORRIENTES CALIENTES	CORRIENTES FRIAS

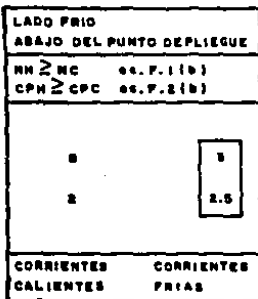
(b)

LADO CALIENTE	
ARRIBA DEL PUNTO DE PLIEGUE	
$NH \leq NC$	ec. F.1 (a)
$CPH \leq CPC$	ec. F.2 (a)
	
CORRIENTES CALIENTES	CORRIENTES FRIAS

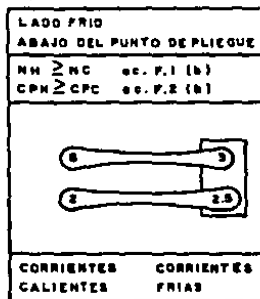
(c)

FIG. F.7 (a) LA TABLA DE VALORES DE CP PARA EL LADO CALIENTE DEL PROBLEMA EJEMPLO.

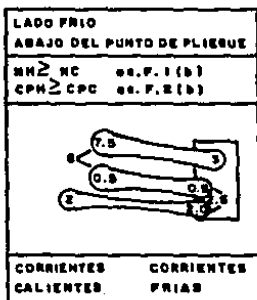
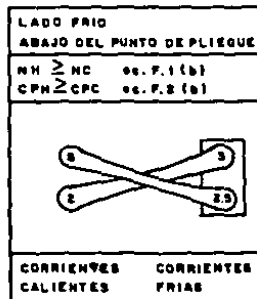
(b) y (c) INTERCAMBIOS "PINCH" FACTIBLES IDENTIFICADOS EN LA TABLA DE VALORES DE CP.



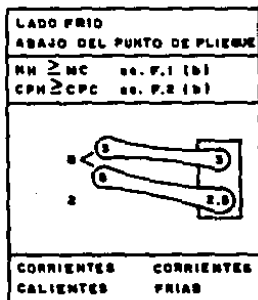
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. F.8 (a) LA TABLA DE VALORES DE CP PARA EL LADO FRIO DEL PROBLEMA EJEMPLO.

(b) TOPOLOGIAS EN EL PUNTO DE PLIEGUE QUE NO SON FACTIBLES.

(c) TOPOLOGIAS EN EL PUNTO DE PLIEGUE QUE SON FACTIBLES CON DIVISION DE DOS CORRIENTES.

(d) TOPOLOGIAS EN EL PUNTO DE PLIEGUE QUE SON FACTIBLES CON DIVISION DE UNA CORRIENTE.

Esta ecuación se satisface si cada intercambio de calor lleva a una corriente de proceso a su temperatura de salida o si agota un servicio. En este caso, se dice que el intercambio de calor "elimina" la corriente o el servicio, es decir, la corriente de proceso o el servicio no necesita considerarse más como parte de la tarea de diseño restante.

Los cambiadores "pinch" comúnmente pueden "eliminar" corrientes si se escoge una carga térmica del cambiador igual a la carga térmica menor de las dos corrientes que intercambian calor. Las desigualdades de CP de las ecs. F.2(a) y F.2(b) garantizan la posibilidad de seleccionar cargas térmicas de los cambiadores "pinch" para "eliminar" corrientes tanto como los valores de CP de las corrientes se mantengan constantes conforme varía la temperatura y tanto como los cruces de temperaturas de las corrientes fría y caliente no requieran un número de envolventes en serie excesivamente grande para un solo intercambio "pinch".

Este procedimiento de "eliminar" corrientes es "heurístico" ya que ocasionalmente puede penalizar el diseño requiriéndose incrementar el uso de servicios.

El algoritmo de la tabla problema descrito en el Apéndice A de este trabajo, puede emplearse para revisar si un intercambio "pinch" seleccionado con la regla heurística, cumple con el consumo mínimo de servicios establecido. Por ejemplo, considere el diseño del lado caliente de una red. Si se aplicara el algoritmo de la tabla problema a todas las corrientes (o partes de las corrientes) presentes en el lado caliente, se obtendría como resultado que se requiere servicio de calentamiento y no se requiere servicio de enfriamiento, es decir el lado caliente efectivamente constituye un problema de umbral donde el acercamiento de temperaturas  $\Delta T_{\text{min}}$  especificado es el valor de  $\Delta T_{\text{umbral}}$ . Ahora, considérese el caso en que se ha identificado un intercambio "pinch" y su carga térmica se determinó usando la regla heurística de "eliminar" corrientes. Existirá un "problema restante" de corrientes frías y calientes (estrictamente hablando parte de las corrientes) para el que se requiere un trabajo de diseño. Entonces, puede aplicarse

el algoritmo de la tabla problema a este problema restante, obteniéndose uno de los dos resultados siguientes:

1. El algoritmo puede calcular que no se requiera de servicio de enfriamiento para resolver el problema restante y el servicio de calentamiento calculado será el mismo que el que se haya determinado para toda la red. En este caso, el diseñador sabe que la carga térmica que asignó al intercambio "pinch" mediante la regla heurística de eliminar corrientes, no penaliza el diseño en términos de un incremento en el uso de servicios.

2. El algoritmo puede calcular que se requiera de servicio de enfriamiento para el problema restante del lado caliente y que por lo tanto, se incremente en esta proporción el servicio de calentamiento total de la red. En este caso, el diseñador sabe que la carga térmica que asignó al intercambio "pinch" mediante la regla heurística de eliminar corrientes, es incompatible con el consumo mínimo de servicios.

Esta técnica se ha llamado el análisis del problema restante por razones obvias. Es un mecanismo dependiente para comprobar las consecuencias de la aplicación de la regla heurística de eliminar corrientes. Sin embargo, debido al esfuerzo involucrado, se recomienda emplearlo únicamente en situaciones complejas para confirmar los pasos de diseño claves.

Otro problema que puede presentarse por la aplicación de la regla heurística de "eliminar corrientes", consiste en que puede presentarse cierta dificultad en la obtención de la topología de la red que cumpla con el acercamiento de temperaturas  $\Delta T_{\text{min}}$  especificado. En tales casos, el diseñador puede proceder de cualquiera de las siguientes maneras:

-) reduciendo la carga térmica del intercambio "pinch" que está afectando aunque se corra el riesgo de necesitar más unidades que el mínimo posible.

-) empleando otra topología en el punto de pliegue en la que la regla heurística de eliminar corrientes no cause que no se cumpla el acercamiento de temperaturas  $\Delta T_{\text{min}}$ .

## EL PROBLEMA RESTANTE.

De acuerdo con la filosofía del método de diseño del punto de pliegue, el diseñador tiene "libertad" de seleccionar los intercambios de calor, una vez que el potencial térmico de los intercambios no restringen las opciones en la topología.

Así, cuando el diseño se aleja del punto de pliegue, al resolver el problema restante, los intercambios se escogen indistintamente por el diseñador para satisfacer los objetivos del proceso. Por ejemplo, los equipos que emplean servicios de calentamiento y los que emplean servicios de enfriamiento, se sitúan de manera que se tenga un control directo de las temperaturas de salida de las corrientes. Es aquí donde puede realizarse un Análisis de topologías preferidas, necesidades de materiales de construcción, seguridad u otras restricciones para localizar otros intercambios de calor.

Además, la técnica de Análisis del problema restante discutida anteriormente, no está restringida a la revisión de la localización de los intercambios "pinch", sino que también puede usarse para asegurar que los intercambios que se seleccionen en el problema restante sean compatibles con el objetivo de consumo mínimo de servicios.

## RESUMEN DEL METODO DE DISEÑO DEL PUNTO DE PLIEGUE.

Este método incorpora cinco etapas importantes, que son:

-> El problema de síntesis de redes de intercambio de calor se divide en el punto de pliegue en problemas separados.

-> El diseño de estos problemas separados se inicia en el punto de pliegue y se desarrolla alejándose hacia los extremos. En el punto de pliegue, se identifican intercambios "pinch" claves, opciones de intercambios y requerimientos de división de corrientes, mediante la aplicación de los criterios de factibilidad.

-) Cuando se tienen varias opciones en el punto de pliegue, el ingeniero tiene la libertad de efectuar su selección en base a los requerimientos del proceso.

-) Las cargas térmicas de los cambiadores en el punto de pliegue, se determinan empleando la regla heurística de "eliminar" corrientes. En caso de que se tengan problemas (incremento en el uso de servicios), se puede seleccionar una topología diferente en el punto de pliegue o se puede reducir la carga térmica del intercambio que esté afectando.

-) Al alejarse del punto de pliegue se tiene, por lo general, "libertad" en la selección de los intercambios de calor. El procedimiento no determina intercambios de calor en particular sino que permite que el diseñador haga una discriminación entre las posibilidades basado en su juicio y conocimiento del proceso.

## APENDICE 8.

### EJEMPLO DE CALCULO.

En este apéndice se presenta el desarrollo completo de un ejemplo de cálculo, siguiéndose una secuencia lógica de la aplicación de los programas de cómputo y paquetes matemáticos.

La secuencia de cálculo que se presenta es la siguiente:

#### PROGRAMA DE COMPUTO I.

Se determina el consumo mínimo de servicios de calentamiento y enfriamiento.

Se determina la localización del punto de plique y se divide la red en dos regiones: lado caliente y lado frío.

Se generan los datos para la construcción de gráficas.

Se formula un problema de programación lineal mixta entera para la determinación del número mínimo de unidades de intercambio de calor del lado caliente.

Se formula un problema de programación lineal mixta entera para la determinación del número mínimo de unidades de intercambio de calor del lado frío.

#### PROGRAMA DE COMPUTO II. (Paquete Matemático).

Solución del problema de programación lineal mixta entera determinándose el número mínimo de unidades de intercambio de calor del lado caliente y la carga térmica correspondiente a cada intercambio.

Solución del problema de programación lineal mixta entera determinándose el número mínimo de unidades de intercambio de calor del lado frío y la carga térmica correspondiente a cada intercambio.

#### PROGRAMA DE COMPUTO III.

Se formula un problema de programación no lineal para la determinación de la configuración final de la subred correspondiente al lado caliente.

Impresión de un programa principal y las subrutinas CONFUN y OBJFUN en las que se encuentra comprendida la formulación del problema de programación no lineal para el lado caliente.

Se formula un problema de programación no lineal para la determinación de la configuración final de la subred correspondiente al lado frío.

Impresión de un programa principal y las subrutinas CONFUN y OBJFUN en las que se encuentra comprendida la formulación del problema de programación no lineal para el lado frío.

#### PROGRAMA DE COMPUTO IV. (Paquete Matemático).

Solución del problema de programación no lineal determinándose la configuración final de la subred correspondiente al lado caliente.

Solución del problema de programación no lineal determinándose la configuración final de la subred correspondiente al lado frío.

A continuación, se presentan los cálculos desarrollados por el programa. En cada caso, se presenta la alimentación de datos y los resultados que se generan, y se recomienda referirse al capítulo 3 de este trabajo, para un mejor entendimiento de la información requerida y la generada por cada programa.



**PROGRAMA DE COMPUTO I.**

**DATOS QUE DEBEN SER SUMINISTRADOS POR EL USUARIO PARA  
CORRER EL PROGRAMA DE COMPUTO I.**

NAB\*BVMTES3(1).DATOS30/EXT-L-L(10)

```
1  @USE 10,BVMDAT1
2  @USE 11,BVMDAT2
3  @USE 15,BVMDAT5
4  @USE 20,BVMDAT20
5  @USE 21,BVMDAT21
6  @USE 22,BVMDAT22
7  @PRT,S BVMTES3.DATOS30/EXT-L-L
8  @XQT BVNABS.PINCH53/TESIS
9  PLANTA = EXTRACCION DE AROMATICOS CON SULFOLANE
10 @SDAT1 NC=18,NCC=12,DTMIN= 30.,
11      IARCH = 2,IOPCIO = 0,NUMUNI = 00,IPRINT = 0,
12      NIPROH = 0,NHOTUT = 0,NCOLUT = 0,$END
13 @SDAT2 MCP= 317666.6667,TENT= 150.,TSAL= 120.,$END
14 @SDAT2 MCP= 420353.9323,TENT= 120.,TSAL= 233.,$END
15 @SDAT2 MCP= 339285.7143,TENT= 290.,TSAL= 150.,$END
16 @SDAT2 MCP= 49090.9091,TENT= 248.,TSAL= 193.,$END
17 @SDAT2 MCP= 1180000.0000,TENT= 193.,TSAL= 187.,$END
18 @SDAT2 MCP= 395333.3333,TENT= 370.,TSAL= 355.,$END
19 @SDAT2 MCP= 5780000.0000,TENT= 260.,TSAL= 261.,$END
20 @SDAT2 MCP= 1238000.0000,TENT= 311.,TSAL= 361.,$END
21 @SDAT2 MCP= 360000.0000,TENT= 355.,TSAL= 298.,$END
22 @SDAT2 MCP=20520000.0000,TENT= 260.,TSAL= 261.,$END
23 @SDAT2 MCP= 33333.3333,TENT= 158.,TSAL= 155.,$END
24 @SDAT2 MCP= 1376190.4760,TENT= 155.,TSAL= 134.,$END
25 @SDAT2 MCP= 5222222.2222,TENT= 134.,TSAL= 125.,$END
26 @SDAT2 MCP= 145030.0000,TENT= 125.,TSAL= 105.,$END
27 @SDAT2 MCP= 545333.3333,TENT= 295.,TSAL= 370.,$END
28 @SDAT2 MCP= 62222.2222,TENT= 105.,TSAL= 150.,$END
29 @SDAT2 MCP= 350000.0000,TENT= 298.,TSAL= 290.,$END
30 @SDAT2 MCP= 24776.1194,TENT= 187.,TSAL= 120.,$END
```

@XQT BVNABS.PINCH53/TESIS

RESULTADOS GENERADOS POR EL PROGRAMA DE COMPUTO I.

\*\*\* DATOS ALIMENTADOS AL PROGRAMA \*\*\*

PLANTA = EXTRACCION DE AROMATICOS CON SULFOLANE

NUM. CORRIENTES EN TOTAL = 13

NUM. CORRIENTES CALIENTES = 12

NUM. CORRIENTES FRIAS = 1

ACERCAMIENTO DE TEMPS. MINIMO = 30.00 GF

CORRIENTES CALIENTES

CORRIENTE NO.	MCP ( BTU/H F )	TEMP ( GF )	TSAL ( GF )	CARGA TERMICA ( BTU/H )
1	317666.67	150.00	120.00	9530000.00
2	339285.71	290.00	150.00	4750000.00
3	49090.91	245.00	173.00	2700000.00
4	1180000.00	193.00	187.00	7080000.00
5	385333.33	370.00	355.00	5779999.94
6	360000.00	355.00	298.00	27520000.00
7	33333.33	158.00	155.00	100000.00
8	1376190.47	155.00	134.00	27899999.75
9	522222.25	134.00	125.00	47000000.00
10	145000.00	125.00	105.00	2900000.00
11	350000.00	299.00	290.00	3800000.00
12	24776.12	187.00	120.00	1659999.98

CORRIENTES FRIAS

CORRIENTE NO.	MCP ( BTU/H F )	TEMP ( GF )	TSAL ( GF )	CARGA TERMICA ( BTU/H )
13	420353.98	120.00	233.00	-47499999.50
14	5780000.00	260.00	261.00	-5780000.00
15	1238000.00	311.00	361.00	-61900000.00
16	20520000.00	260.00	261.00	-20520000.00
17	545333.34	295.00	370.00	-40900000.00
18	62222.22	195.00	150.00	-2799999.97

\*\*\* RESULTADOS DE LOS CALCULOS DEL PROGRAMA \*\*\*

----- METODO DEL PUNTO DE PLIEGUE -----

PLANTA = EXTRACCION DE AROMATICOS CON SULFOLANE

ACERCAMIENTO DE TEMPS. MINIMO = 30.00 GF

SUB-INT NO.	TEMPERATURAS DE LOS SUB-INTERV. ( GF )	DEFICIT ( BTU/H )	ACUMULADO		FLUJOS DE CALOR	
			ENTRADA ( BTU/H )	SALIDA ( BTU/H )	ENTRADA ( BTU/H )	SALIDA ( BTU/H )
1	370.00	42358000.	0.	-42358000.	99999999.	57641999.
2	340.00	20970000.	-42358000.	-63328000.	57641999.	36671999.
3	325.00	19926667.	-63328000.	-83254666.	36671999.	16745333.
4	311.00	2965333.	-83254666.	-86219999.	16745333.	13780000.
5	295.00	-9720000.	-86219999.	-76499999.	13780000.	23500000.
6	268.00	23500000.	-76499999.	-99999999.	23500000.	0.
7	260.00	-7944690.	-99999999.	-92055309.	0.	7944690.
8	219.00	1759755.	-92055309.	-93814063.	7944690.	6185936.
9	163.00	-6593590.	-93814063.	-87220473.	6185936.	12779526.
10	157.00	3001361.	-87220473.	-90221834.	12779526.	9778165.
11	128.00	255543.	-90221834.	-90477377.	9778165.	9522622.
12	125.00	-6288381.	-90477377.	-84188997.	9522622.	15811002.
13	120.00	-24846166.	-84188997.	-59342832.	15811002.	40657167.
14	105.00	-1718633.	-59342832.	-57624199.	40657167.	42375800.
15	104.00	-50081985.	-57624199.	-7542214.	42375800.	92457785.
16	95.00	-4612214.	-7542214.	-2930000.	92457785.	97069999.
	75.00					

LOCALIZACION DEL PUNTO DE PLIEGUE = 260.00 GF

(REFERIDO A LAS CORRIENTES FRIAS)

CARGAS TERMICAS :

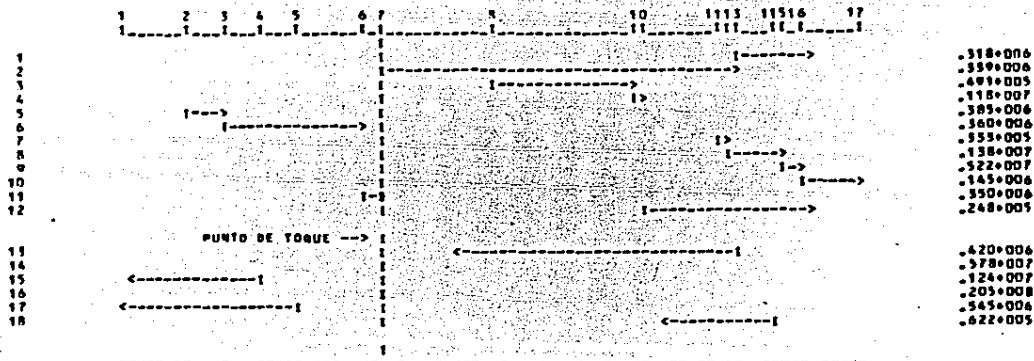
SERVICIO DE CALENTAMIENTO	=	99999999. BTU/H
SERVICIO DE ENFRIAMIENTO	=	97069999. BTU/H
RECUPERACION DE CALOR	=	79399996. BTU/H

PLANTA - EXTRACCION DE AROMATICOS CON SULFOLANE

CORRIENTE NO.

INTERVALOS DE TEMPERATURA

FCP - BTU/(H-GP)



NIVEL DE TEMPERATURA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TEMPERATURA CALIENTE	400.00	170.00	154.00	341.00	325.00	298.00	290.00	248.00	193.00	187.00
TEMPERATURA FRIA	170.00	340.00	325.00	311.00	295.00	268.00	240.00	214.00	163.00	157.00

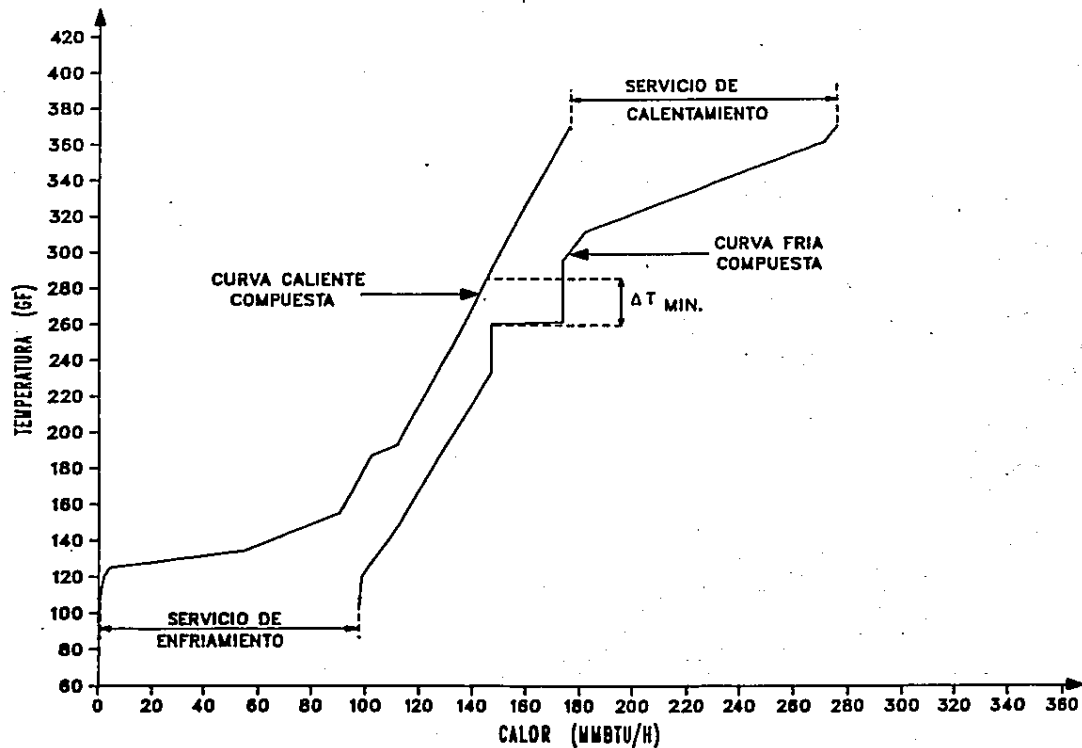
NIVEL DE TEMPERATURA	11	12	13	14	15	16	17
TEMPERATURA CALIENTE	158.00	155.00	150.00	135.00	134.00	125.00	105.00
TEMPERATURA FRIA	128.00	125.00	120.00	105.00	104.00	95.00	75.00



DATOS PARA LA CONSTRUCCION DE LA GRAFICA DE  
 CURVA DE CALOR DE LA CORRIENTE CALIENTE COMPUESTA Y  
 CURVA DE CALOR DE LA CORRIENTE FRIA COMPUESTA  
 VERSUS TEMPERATURA

QCALIENTE ( BTU/H )	TCALIENTE ( GF )	QFRIA ( RTU/H )	TFRIA ( GF )
.0	105.00	97069999.0	105.00
2175000.0	120.00	98003331.0	120.00
4612213.9	125.00	100416211.0	125.00
54694197.5	134.00	101863939.0	128.00
56412830.5	135.00	112480615.0	150.00
82192329.0	150.00	115423092.0	157.00
90893590.0	155.00	117945215.0	163.00
92085775.0	158.00	141064692.0	218.00
100095135.0	180.00	147369990.0	233.00
102643567.0	187.00	147369990.0	260.00
111759281.0	193.00	173669990.0	261.00
133119995.0	248.00	173669990.0	268.00
138209280.0	263.00	173669990.0	295.00
147369994.0	290.00	182395322.0	311.00
147719994.0	291.00	207361923.0	325.00
150169994.0	298.00	234111986.0	340.00
159889994.0	325.00	271561984.0	361.00
165649994.0	341.00	274469984.0	370.00
170689994.0	355.00	.0	.00
176469992.0	370.00	.0	.00

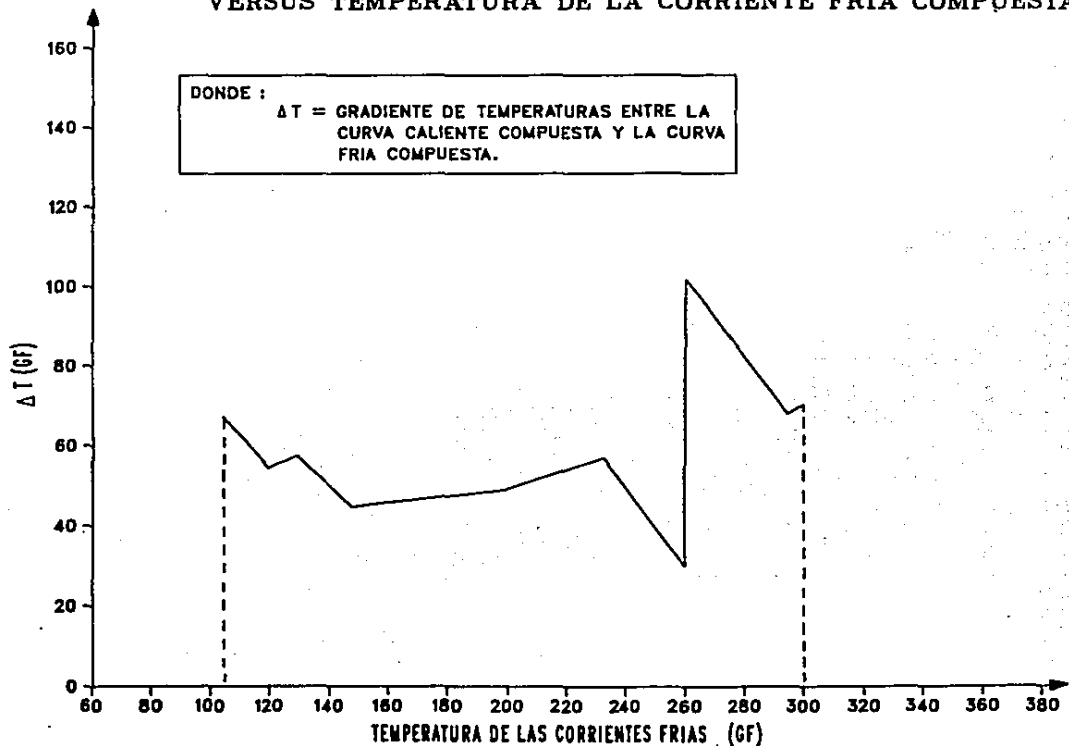
FIG.G.1 CURVA DE CALOR DE LA CORRIENTE CALIENTE COMPUESTA Y CURVA DE CALOR DE LA CORRIENTE FRIA COMPUESTA VERSUS TEMPERATURA .



**DATOS PARA LA CONSTRUCCION DE LA GRAFICA DE  
GRADIENTE DE TEMPERATURAS ENTRE LA CORRIENTE  
CALIENTE COMPUESTA Y LA CORRIENTE FRIA COMPUESTA  
VERSUS TEMPERATURA DE LA CORRIENTE FRIA COMPUESTA**

<b>TCOLD ( GF )</b>	<b>DELTAT ( GF )</b>
105.00	66.69
120.00	54.25
124.33	55.67
125.00	55.88
128.00	56.86
129.62	57.38
148.51	44.49
150.00	44.86
157.00	45.43
163.00	45.93
199.10	48.90
211.21	51.79
218.00	53.42
233.00	57.00
260.00	30.00
260.01	30.99
260.11	37.89
260.48	64.52
260.70	80.30
260.89	94.11
261.00	101.73
268.00	94.73
295.00	67.73
300.13	69.87

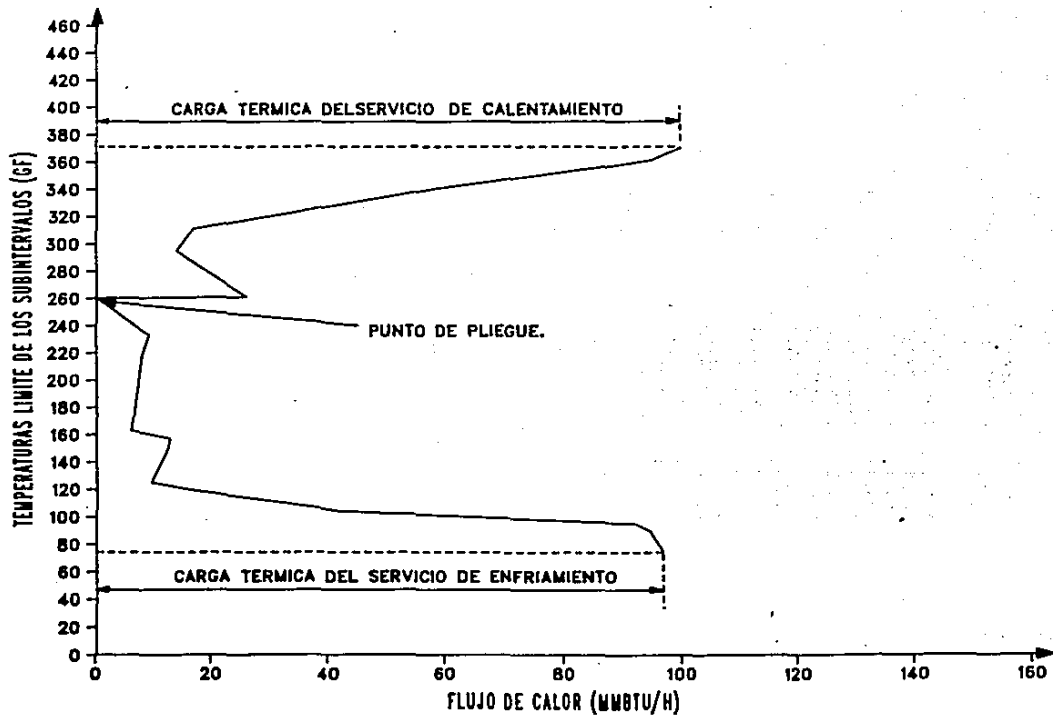
FIG.G.2 GRADIENTES DE TEMPERATURAS ENTRE LA CORRIENTE CALIENTE COMPUESTA Y LA CORRIENTE FRIA COMPUESTA VERSUS TEMPERATURA DE LA CORRIENTE FRIA COMPUESTA



**DATOS PARA LA CONSTRUCCION DE LA GRAFICA DE  
FLUJOS DE CALOR ENTRE SUBINTERVALOS DE TEMPERATURA  
VERSUS TEMPERATURAS LIMITE DE LOS SUBINTERVALOS**

TL ( GF )	HEATFI ( BTU/H )
370.00	92999999.0
361.00	95091999.0
340.00	57642000.0
325.00	36672000.0
311.00	16745333.0
295.00	13780000.0
268.00	23500000.0
261.00	25950000.0
260.00	.0
233.00	9160714.0
218.00	7944690.0
163.00	6185936.0
157.00	12779536.0
150.00	12385481.0
124.00	9778165.0
125.00	9522622.0
120.00	15811002.0
105.00	40657167.0
104.00	42375800.0
95.00	92457784.0
90.00	94894998.0
75.00	97069998.0

FIG.G.3 FLUJOS DE CALOR ENTRE SUBINTERVALOS DE TEMPERATURA VERSUS TEMPERATURAS LIMITE DE LOS SUBINTERVALOS.



**PROGRAMA DE COMPUTO II.**

**PROGRAMA DE COMPLETO II.**



**DATOS PARA EL LADO CALIENTE, REQUERIDOS POR EL PROGRAMA DE  
COMPUTO II. ESTE ARCHIVO LO GENERA EL PROGRAMA DE COMPUTO I.**

MIN Y050201 + Y050301 + Y050401 + Y050501 + Y060201 + Y060301  
 + Y060401 + Y060501 + Y110201 + Y110401 + Y130201 + Y130301 + Y130401  
 + Y130501

SUBJECT TO

2) R0502 - R0501 + Q050302 + Q050502 = 5.78  
 3) - R0502 + R0503 + Q050303 + Q050503 = 0  
 4) - R0503 + R0504 + Q050504 = 0  
 5) - R0504 + R0505 = 0  
 6) - R0505 + R0506 + Q050206 + Q050406 = 0  
 7) R0603 - R0602 + Q060303 + Q060503 = 5.04  
 8) - R0603 + R0604 + Q060504 = 5.76  
 9) - R0604 + R0605 = 9.72  
 10) - R0605 + R0606 + Q060206 + Q060406 = 0  
 11) R1106 - R1105 + Q110206 + Q110406 = 2.8  
 12) R1301 - R1300 + Q130301 + Q130501 = 100  
 13) - R1301 + R1302 + Q130302 + Q130502 = 0  
 14) - R1302 + R1303 + Q130303 + Q130503 = 0  
 15) - R1303 + R1304 + Q130504 = 0  
 16) - R1304 + R1305 = 0  
 17) - R1305 + R1306 + Q130206 + Q130406 = 0  
 18) Q050206 + Q060206 + Q110206 + Q130206 = 5.78  
 19) Q130301 = 25.998  
 20) Q050302 + Q130302 = 18.57  
 21) Q050303 + Q060303 + Q130303 = 17.332  
 22) Q050406 + Q060406 + Q110406 + Q130406 = 20.52  
 23) Q130501 = 16.36  
 24) Q050502 + Q130502 = 8.18  
 25) Q050503 + Q060503 + Q130503 = 7.63467  
 26) Q050504 + Q060504 + Q130504 = 8.72533  
 27) - 5.78 Y050201 + Q050206 <= 0  
 28) - 5.78 Y050301 + Q050302 + Q050303 <= 0  
 29) - 5.78 Y050401 + Q050406 <= 0  
 30) - 5.78 Y050501 + Q050502 + Q050503 + Q050504 <= 0  
 31) - 5.78 Y060201 + Q060206 <= 0  
 32) - 20.52 Y060301 + Q060303 <= 0  
 33) - 20.52 Y060401 + Q060406 <= 0  
 34) - 20.52 Y060501 + Q060503 + Q060504 <= 0  
 35) - 2.8 Y110201 + Q110206 <= 0  
 36) - 2.8 Y110401 + Q110406 <= 0  
 37) - 5.78 Y130201 + Q130206 <= 0  
 38) - 61.9 Y130301 + Q130301 + Q130302 + Q130303 <= 0  
 39) - 20.52 Y130401 + Q130406 <= 0  
 40) - 40.9 Y130501 + Q130501 + Q130502 + Q130503 + Q130504 <= 0  
 41) R0501 = 0  
 42) R0506 = 0  
 43) R0502 >= 0  
 44) R0503 >= 0  
 45) R0504 >= 0  
 46) R0505 >= 0  
 47) R0602 = 0  
 48) R0606 = 0  
 49) R0603 >= 0  
 50) R0604 >= 0  
 51) R0605 >= 0  
 52) R1105 = 0  
 53) R1106 = 0  
 54) R1300 = 0  
 55) R1306 = 0  
 56) R1301 >= 0

57) R1302 >= 0  
58) R1303 >= 0  
59) R1304 >= 0  
60) R1305 >= 0  
61) Q050206 >= 0  
62) Q050302 >= 0  
63) Q050303 >= 0  
64) Q050406 >= 0  
65) Q050502 >= 0  
66) Q050503 >= 0  
67) Q050504 >= 0  
68) Q060206 >= 0  
69) Q060303 >= 0  
70) Q060406 >= 0  
71) Q060503 >= 0  
72) Q060504 >= 0  
73) Q110206 >= 0  
74) Q110406 >= 0  
75) Q130206 >= 0  
76) Q130301 >= 0  
77) Q130302 >= 0  
78) Q130303 >= 0  
79) Q130406 >= 0  
80) Q130501 >= 0  
81) Q130502 >= 0  
82) Q130503 >= 0  
83) Q130504 >= 0

END  
INTE 14

**RESULTADOS DEL LADO CALIENTE GENERADOS POR EL PROGRAMA DE  
COMPUTO II.**

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 6.00000000

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
Y050201	1.000000	1.000000
Y050301	1.000000	1.000000
Y050401	.000000	1.000000
Y050501	.000000	1.000000
Y060201	.000000	1.000000
Y060301	.000000	1.000000
Y060401	1.000000	1.000000
Y060501	.000000	1.000000
Y110201	1.000000	1.000000
Y110401	.000000	1.000000
Y130201	.000000	1.000000
Y130301	1.000000	1.000000
Y130401	.000000	1.000000
Y130501	1.000000	1.000000
R0502	2.980000	.000000
R0501	.000000	.000000
R050302	2.800000	.000000
R050502	.000000	.000000
R0503	2.980000	.000000
R050303	.000000	.000000
R050503	.000000	.000000
R0504	2.980000	.000000
R050504	.000000	.000000
R0505	2.980000	.000000
R0506	.000000	.000000
R050206	2.980000	.000000
R050406	.000000	.000000
R0603	5.040000	.000000
R0602	.000000	.000000
R060303	.000000	.000000
R060503	.000000	.000000
R0604	10.800000	.000000
R060504	.000000	.000000
R0605	20.520000	.000000
R0606	.000000	.000000
R060206	.000000	.000000
R060406	20.520000	.000000
R1106	.000000	.000000
R1103	.000000	.000000
R110206	2.800000	.000000
R110406	.000000	.000000
R1301	57.642000	.000000
R1300	.000000	.000000
R130301	25.998000	.000000
R130501	16.360000	.000000
R1302	33.692000	.000000
R130302	15.770000	.000000
R130502	8.180000	.000000
R1303	8.725333	.000000
R130303	17.332000	.000000
R130503	7.634667	.000000
R1304	.000000	.000000
R130504	8.725333	.000000
R1305	.000000	.000000

R1306  
Q130206  
Q130406

.000000  
.000000  
.000000

.000000  
.000000  
.000000

RESUMEN DE RESULTADOS.

VARIABLE ENTERA QUE INDICA LA EXISTENCIA DEL INTERCAMBIO DE CALOR	INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE LAS CORRIENTES  CALIENTE Y FRIA		SUBRED LADO
Y050201	05	02	CALIENTE
Y050301	05	03	CALIENTE
Y060401	06	04	CALIENTE
Y110201	11	02	CALIENTE
Y130301	13	03	CALIENTE
Y130501	13	05	CALIENTE

NUMERO TOTAL DE INTERCAMBIOS = 6

CARGA TERMICA DE LOS INTERCAMBIOS DE CALOR EN LA SUBRED  
CORRESPONDIENTE AL LADO CALIENTE:

Q0502	=	2.98	MM BTU/HR
Q0503	=	2.80	MM BTU/HR
Q0604	=	20.52	MM BTU/HR
Q1102	=	2.80	MM BTU/HR
Q1303	=	59.10	MM BTU/HR
Q1305	=	40.90	MM BTU/HR

NOTA: LA CORRIENTE CALIENTE 13 CORRESPONDE AL SERVICIO DE  
CALENTAMIENTO.

**DATOS PARA EL LADO FRIO, REQUERIDOS POR EL PROGRAMA DE  
COMPUTO II. ESTE ARCHIVO LO GENERA EL PROGRAMA DE COMPUTO I.**



MIN Y010602 + Y010702 + Y020102 + Y020602 + Y020702 + Y030102  
 + Y030602 + Y030702 + Y040102 + Y040602 + Y040702 + Y070102 + Y070602  
 + Y070702 + Y080102 + Y080602 + Y080702 + Y090702 + Y100702 + Y120102  
 + Y120602 + Y120702

SUBJECT TO

2) R0113 - R0112 + Q010613 = 4.765  
 3) - R0113 + R0114 = 0.31767  
 4) - R0114 + R0115 = 2.859  
 5) - R0115 + R0116 + Q010716 = 1.58833  
 6) R0207 - R0206 + Q020107 = 14.25  
 7) - R0207 + R0208 + Q020108 = 18.66071  
 8) - R0208 + R0209 + Q020109 = 2.03571  
 9) - R0209 + R0210 + Q020110 + Q020610 = 9.83928  
 10) - R0210 + R0211 + Q020111 + Q020611 = 1.01786  
 11) - R0211 + R0212 + Q020112 + Q020612 = 1.69643  
 12) - R0212 + R0213 + Q020613 = 0  
 13) - R0213 + R0214 = 0  
 14) - R0214 + R0215 = 0  
 15) - R0215 + R0216 + Q020716 = 0  
 16) R0308 - R0307 + Q030108 = 2.7  
 17) - R0308 + R0309 + Q030109 = 0  
 18) - R0309 + R0310 + Q030110 + Q030610 = 0  
 19) - R0310 + R0311 + Q030111 + Q030611 = 0  
 20) - R0311 + R0312 + Q030112 + Q030612 = 0  
 21) - R0312 + R0313 + Q030613 = 0  
 22) - R0313 + R0314 = 0  
 23) - R0314 + R0315 = 0  
 24) - R0315 + R0316 + Q030716 = 0  
 25) R0409 - R0408 + Q040109 = 7.08  
 26) - R0409 + R0410 + Q040110 + Q040610 = 0  
 27) - R0410 + R0411 + Q040111 + Q040611 = 0  
 28) - R0411 + R0412 + Q040112 + Q040612 = 0  
 29) - R0412 + R0413 + Q040613 = 0  
 30) - R0413 + R0414 = 0  
 31) - R0414 + R0415 = 0  
 32) - R0415 + R0416 + Q040716 = 0  
 33) R0711 - R0710 + Q070111 + Q070611 = 0.1  
 34) - R0711 + R0712 + Q070112 + Q070612 = 0  
 35) - R0712 + R0713 + Q070613 = 0  
 36) - R0713 + R0714 = 0  
 37) - R0714 + R0715 = 0  
 38) - R0715 + R0716 + Q070716 = 0  
 39) R0812 - R0811 + Q080112 + Q080612 = 6.88095  
 40) - R0812 + R0813 + Q080613 = 20.64286  
 41) - R0813 + R0814 = 1.37619  
 42) - R0814 + R0815 = 0  
 43) - R0815 + R0816 + Q080716 = 0  
 44) R0915 - R0914 = 47  
 45) - R0915 + R0916 + Q090716 = 0  
 46) R1016 - R1015 + Q100716 = 2.9  
 47) R1210 - R1209 + Q120110 + Q120610 = 0.71851  
 48) - R1210 + R1211 + Q120111 + Q120611 = 0.07433  
 49) - R1211 + R1212 + Q120112 + Q120612 = 0.12388  
 50) - R1212 + R1213 + Q120613 = 0.37164  
 51) - R1213 + R1214 = 0.02478  
 52) - R1214 + R1215 = 0.32298  
 53) - R1215 + R1216 + Q120716 = 0.12388  
 54) Q020107 = 6.30531  
 55) Q020108 + Q030108 = 23.11947

56) Q020109 + Q030109 + Q040109 = 2.52212  
57) Q020110 + Q030110 + Q040110 + Q120110 = 12.19026  
58) Q020111 + Q030111 + Q040111 + Q070111 + Q120111 = 1.26106  
59) Q020112 + Q030112 + Q040112 + Q070112 + Q080112 + Q120112  
= 2.10177  
60) Q020610 + Q030610 + Q040610 + Q120610 = 1.36889  
61) Q020611 + Q030611 + Q040611 + Q070611 + Q120611 = 0.18667  
62) Q020612 + Q030612 + Q040612 + Q070612 + Q080612 + Q120612  
= 0.31111  
63) Q010613 + Q020613 + Q030613 + Q040613 + Q070613 + Q080613  
+ Q120613 = 0.93333  
64) Q010716 + Q020716 + Q030716 + Q040716 + Q070716 + Q080716  
+ Q090716 + Q100716 + Q120716 = 97.07  
65) - 2.8 Y010602 + Q010613 <= 0  
66) - 9.53 Y010702 + Q010716 <= 0  
67) - 47.5 Y020102 + Q020107 + Q020108 + Q020109 + Q020110 + Q020111  
+ Q020112 <= 0  
68) - 2.8 Y020602 + Q020610 + Q020611 + Q020612 + Q020613 <= 0  
69) - 47.5 Y020702 + Q020716 <= 0  
70) - 2.7 Y030102 + Q030108 + Q030109 + Q030110 + Q030111 + Q030112  
<= 0  
71) - 2.7 Y030602 + Q030610 + Q030611 + Q030612 + Q030613 <= 0  
72) - 2.7 Y030702 + Q030716 <= 0  
73) - 7.08 Y040102 + Q040109 + Q040110 + Q040111 + Q040112 <= 0  
74) - 2.8 Y040602 + Q040610 + Q040611 + Q040612 + Q040613 <= 0  
75) - 7.08 Y040702 + Q040716 <= 0  
76) - 0.1 Y070102 + Q070111 + Q070112 <= 0  
77) - 0.1 Y070602 + Q070611 + Q070612 + Q070613 <= 0  
78) - 0.1 Y070702 + Q070716 <= 0  
79) - 28.9 Y080102 + Q080112 <= 0  
80) - 2.8 Y080602 + Q080612 + Q080613 <= 0  
81) - 28.9 Y080702 + Q080716 <= 0  
82) - 47 Y090702 + Q090716 <= 0  
83) - 2.9 Y100702 + Q100716 <= 0  
84) - 1.66 Y120102 + Q120110 + Q120111 + Q120112 <= 0  
85) - 1.66 Y120602 + Q120610 + Q120611 + Q120612 + Q120613 <= 0  
86) - 1.66 Y120702 + Q120716 <= 0  
87) R0112 = 0  
88) R0116 = 0  
89) R0113 >= 0  
90) R0114 >= 0  
91) R0115 >= 0  
92) R0206 = 0  
93) R0216 = 0  
94) R0207 >= 0  
95) R0208 >= 0  
96) R0209 >= 0  
97) R0210 >= 0  
98) R0211 >= 0  
99) R0212 >= 0  
100) R0213 >= 0  
101) R0214 >= 0  
102) R0215 >= 0  
103) R0307 = 0  
104) R0316 = 0  
105) R0308 >= 0  
106) R0309 >= 0  
107) R0310 >= 0  
108) R0311 >= 0  
109) R0312 >= 0

110)	RO313	Y	0
111)	RO314	Y	0
112)	RO315	Y	0
113)	RO408	Y	0
114)	RO416	Y	0
115)	RO409	Y	0
116)	RO410	Y	0
117)	RO411	Y	0
118)	RO412	Y	0
119)	RO413	Y	0
120)	RO414	Y	0
121)	RO415	Y	0
122)	RO710	Y	0
123)	RO716	Y	0
124)	RO711	Y	0
125)	RO712	Y	0
126)	RO713	Y	0
127)	RO714	Y	0
128)	RO715	Y	0
129)	RO811	Y	0
130)	RO816	Y	0
131)	RO812	Y	0
132)	RO813	Y	0
133)	RO814	Y	0
134)	RO815	Y	0
135)	RO914	Y	0
136)	RO916	Y	0
137)	RO915	Y	0
138)	R1015	Y	0
139)	R1016	Y	0
140)	R1209	Y	0
141)	R1216	Y	0
142)	R1210	Y	0
143)	R1211	Y	0
144)	R1212	Y	0
145)	R1213	Y	0
146)	R1214	Y	0
147)	R1215	Y	0
148)	Q010613	Y	0
149)	Q010716	Y	0
150)	Q020107	Y	0
151)	Q020108	Y	0
152)	Q020109	Y	0
153)	Q020110	Y	0
154)	Q020111	Y	0
155)	Q020112	Y	0
156)	Q020610	Y	0
157)	Q020611	Y	0
158)	Q020612	Y	0
159)	Q020613	Y	0
160)	Q020716	Y	0
161)	Q030108	Y	0
162)	Q030109	Y	0
163)	Q030110	Y	0
164)	Q030111	Y	0
165)	Q030112	Y	0
166)	Q030610	Y	0
167)	Q030611	Y	0
168)	Q030612	Y	0
169)	Q030613	Y	0

170)	Q030716	>=	0
171)	Q040109	>=	0
172)	Q040110	>=	0
173)	Q040111	>=	0
174)	Q040112	>=	0
175)	Q040610	>=	0
176)	Q040611	>=	0
177)	Q040612	>=	0
178)	Q040613	>=	0
179)	Q040716	>=	0
180)	Q070111	>=	0
181)	Q070112	>=	0
182)	Q070611	>=	0
183)	Q070612	>=	0
184)	Q070613	>=	0
185)	Q070716	>=	0
186)	Q080112	>=	0
187)	Q080612	>=	0
188)	Q080613	>=	0
189)	Q080716	>=	0
190)	Q090716	>=	0
191)	Q100716	>=	0
192)	Q120110	>=	0
193)	Q120111	>=	0
194)	Q120112	>=	0
195)	Q120610	>=	0
196)	Q120611	>=	0
197)	Q120612	>=	0
198)	Q120613	>=	0
199)	Q120716	>=	0
200)	Y030602	=	1

END  
INTE 22

**RESULTADOS DEL LADO FRIO GENERADOS POR EL PROGRAMA DE  
COMPUTO II.**

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 9.0000000

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
Y010602	.000000	1.000000
Y010702	1.000000	1.000000
Y020102	1.000000	1.000000
Y020602	.000000	1.000000
Y020702	.000000	1.000000
Y030102	.000000	1.000000
Y030602	1.000000	1.000000
Y030702	.000000	1.000000
Y040102	.000000	1.000000
Y040602	.000000	1.000000
Y040702	1.000000	1.000000
Y070102	.000000	1.000000
Y070602	1.000000	1.000000
Y070702	.000000	1.000000
Y080102	.000000	1.000000
Y080602	.000000	1.000000
Y080702	1.000000	1.000000
Y090702	1.000000	1.000000
Y100702	1.000000	1.000000
Y120102	.000000	1.000000
Y120602	.000000	1.000000
Y120702	1.000000	1.000000
R0113	4.765000	.000000
R0112	.000000	.000000
R010613	.000000	.000000
R0114	5.082667	.000000
R0115	7.941667	.000000
R0116	.000000	.000000
R010716	9.530000	.000000
R0207	7.944690	.000000
R0206	.000000	.000000
R020107	6.305310	.000000
R0208	3.485935	.000000
R020108	23.119470	.000000
R0209	2.999525	.000000
R020109	2.522124	.000000
R0210	.648545	.000000
R020110	12.190260	.000000
R020610	.000000	.000000
R0211	.405340	.000000
R020111	1.261062	.000000
R020611	.000000	.000000
R0212	.000000	.000000
R020112	2.101769	.000000
R020612	.000000	.000000
R0213	.000000	.000000
R020613	.000000	.000000
R0214	.000000	.000000
R0215	.000000	.000000
R0216	.000000	.000000
R020716	.000000	.000000
R0308	2.700000	.000000
R0307	.000000	.000000
R030108	.000000	.000000

R0309	2.700000	.000000
Q030109	.000000	.000000
R0310	1.331111	.000000
Q030110	.000000	.000000
Q030610	1.368889	.000000
R0311	1.244444	.000000
Q030111	.000000	.000000
Q030611	.086667	.000000
R0312	.933333	.000000
Q030112	.000000	.000000
Q030612	.311111	.000000
R0313	.000000	.000000
Q030613	.933333	.000000
R0314	.000000	.000000
R0315	.000000	.000000
R0316	.000000	.000000
Q030716	.000000	.000000
R0409	7.080000	.000000
R0408	.000000	.000000
Q040109	.000000	.000000
R0410	7.080000	.000000
Q040110	.000000	.000000
Q040610	.000000	.000000
R0411	7.080000	.000000
Q040111	.000000	.000000
Q040611	.000000	.000000
R0412	7.080000	.000000
Q040112	.000000	.000000
Q040612	.000000	.000000
R0413	7.080000	.000000
Q040613	.000000	.000000
R0414	7.080000	.000000
R0415	7.080000	.000000
R0416	.000000	.000000
Q040716	7.080000	.000000
R0711	.000000	.000000
R0710	.000000	.000000
Q070111	.000000	.000000
Q070611	.100000	.000000
R0712	.000000	.000000
Q070112	.000000	.000000
Q070612	.000000	.000000
R0713	.000000	.000000
Q070613	.000000	.000000
R0714	.000000	.000000
R0715	.000000	.000000
R0716	.000000	.000000
Q070716	.000000	.000000
R0812	6.880952	.000000
R0811	.000000	.000000
Q080112	.000000	.000000
Q080612	.000000	.000000
R0813	27.523810	.000000
Q080613	.000000	.000000
R0814	28.900000	.000000
R0815	28.900000	.000000
R0816	.000000	.000000
Q080716	28.900000	.000000
R0915	47.000000	.000000
R0914	.000000	.000000

R0916	.000000	.000000
Q090716	47.000000	.000000
R1016	.000000	.000000
R1015	.000000	.000000
Q100716	2.900000	.000000
R1210	.718507	.000000
R1209	.000000	.000000
Q120110	.000000	.000000
Q120610	.000000	.000000
R1211	.792835	.000000
Q120111	.000000	.000000
Q120611	.000000	.000000
R1212	.916715	.000000
Q120112	.000001	.000000
Q120612	.000000	.000000
R1213	1.288357	.000000
Q120613	.000000	.000000
R1214	1.313133	.000000
R1215	1.536118	.000000
R1216	.000000	.000000
Q120716	1.659999	.000000



RESUMEN DE RESULTADOS.

VARIABLE ENTERA QUE INDICA LA EXISTENCIA DEL INTERCAMBIO DE CALOR	INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE LAS CORRIENTES CALIENTE Y FRIA		SUBRED LADO
Y010702	01	07	FRIO
Y020102	02	01	FRIO
Y030602	03	06	FRIO
Y040702	04	07	FRIO
Y070602	07	06	FRIO
Y080702	08	07	FRIO
Y090702	09	07	FRIO
Y100702	10	07	FRIO
Y120702	12	07	FRIO

NUMERO TOTAL DE INTERCAMBIOS = 9

CARGA TECNICA DE LOS INTERCAMBIOS DE CALOR EN LA SUBRED  
CORRESPONDIENTE AL LADO FRIO.

Q0107	=	9.53	MM BTU/HR
Q0201	=	47.50	MM BTU/HR
Q0306	=	2.70	MM BTU/HR
Q0407	=	7.08	MM BTU/HR
Q0706	=	0.10	MM BTU/HR
Q0807	=	28.90	MM BTU/HR
Q0907	=	47.00	MM BTU/HR
Q1007	=	2.90	MM BTU/HR
Q1207	=	1.66	MM BTU/HR

NOTA: LA CORRIENTE FRIA 07 CORRESPONDE AL SERVICIO DE ENFRIAMIENTO.

**PROGRAMA DE COMPUTO III.**

**DATOS DEL LADO CALIENTE QUE DEBEN SER SUMINISTRADOS POR EL  
LIBRARIO PARA CORRER EL PROGRAMA DE COMPUTO III.**

NAB\*BVMTES2(1).DATOS30/EXT-L-L(2)

```

1  @USE 15,BVMDAT1
2  @USE 16,BVMDAT2
3  @USE 17,BVMDAT5
4  @PRT,5 BVMTES2.DATOS30/EXT-L-L
5  @XQT BVMTABS.SUPERE
6  $DATGEN IRUN = 0, NUMUNI = 6, IARCH = 1, ILECTU = 1,
7      IOPCIO=0, LADO = 1, BIGEND= 1.0E+10,$END
8  $DAT1 MCC =14, NCF = 6, DTMIN = 30.0, TPINCH =260,$SEND
9  $DAT2 MCP= 317666.6667,TENT= 150.,TSAL= 120.,$END
10 $DAT2 MCP= 339235.7143,TENT= 370.,TSAL= 157.,$SEND
11 $DAT2 MCP= 49090.9091,TENT= 248.,TSAL= 193.,$SEND
12 $DAT2 MCP= 1180000.0000,TENT= 193.,TSAL= 187.,$SEND
13 $DAT2 MCP= 385333.3333,TENT= 370.,TSAL= 355.,$SEND
14 $DAT2 MCP= 360000.0000,TENT= 355.,TSAL= 293.,$SEND
15 $DAT2 MCP= 33333.3333,TENT= 158.,TSAL= 155.,$SEND
16 $DAT2 MCP= 1376190.4760,TENT= 155.,TSAL= 134.,$SEND
17 $DAT2 MCP= 522222.2222,TENT= 134.,TSAL= 125.,$SEND
18 $DAT2 MCP= 145000.0000,TENT= 125.,TSAL= 105.,$SEND
19 $DAT2 MCP= 350000.0000,TENT= 298.,TSAL= 290.,$SEND
20 $DAT2 MCP= 24776.1194,TENT= 187.,TSAL= 120.,$SEND
21 $DAT2 MCP=59100000.0000,TENT= 409.,TSAL= 408.,$SEND
22 $DAT2 MCP=40900000.0000,TENT= 409.,TSAL= 408.,$SEND
23 $DAT2 MCP= 420353.9823,TENT= 120.,TSAL= 233.,$SEND
24 $DAT2 MCP= 5780000.0000,TENT= 260.,TSAL= 261.,$SEND
25 $DAT2 MCP= 1238000.0000,TENT= 311.,TSAL= 361.,$SEND
26 $DAT2 MCP=20520000.0000,TENT= 260.,TSAL= 261.,$SEND
27 $DAT2 MCP= 545333.3333,TENT= 295.,TSAL= 370.,$SEND
28 $DAT2 MCP= 62222.2222,TENT= 105.,TSAL= 150.,$SEND
29 $DAT3 ICORRH = 5,ICORRC = 2, QIJ = 2980000.0, UIJ = 50.0,
30 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00,$FND
31 $DAT3 ICORRH = 5,ICORRC = 3, QIJ = 2800000.0, UIJ = 50.0,
32 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00,$END
33 $DAT3 ICORRH = 6,ICORRC = 4, QIJ = 20520000.0, UIJ = 50.0,
34 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00,$FND
35 $DAT3 ICORRH =11,ICORRC = 2, QIJ = 2800000.0, UIJ = 50.0,
36 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00,$END
37 $DAT3 ICORRH =13,ICORRC = 3, QIJ = 59100000.0, UIJ = 50.0,
38 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00,$END
39 $DAT3 ICORRH =14,ICORRC = 5, QIJ = 40900000.0, UIJ = 50.0,
40 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00,$END

```

@XQT BVMTABS.SUPERE

```

AT LINE          75: IWRITE=          6
QIJ(           5, 2) = 2980000.0
QIJ(           5, 3) = 2800000.0
QIJ(           6, 4) = 20520000.0
QIJ(          11, 2) = 2800000.0
QIJ(          13, 3) = 59100000.0
QIJ(          14, 5) = 40900000.0
QIJ(           5, 2) = 2990000.0
QIJ(           5, 3) = 2800000.0
QIJ(          11, 2) = 2800000.0
QIJ(           5, 3) = 2800000.0
QIJ(          13, 3) = 59100000.0
QIJ(           6, 4) = 20520000.0
QIJ(          14, 5) = 40900000.0
ISTRUNC          1) = 0
ISTRUNC          2) = 0
ISTRUNC          3) = 0

```

ISTRUH(	4)	=	0		
ISTRUH(	5)	=	2		
ISUPER(	1,		1, 1 )	=	2
ISUPER(	1,		2, 1 )	=	3
ISTRUH(	6)	=	1		
ISTRUH(	7)	=	0		
ISTRUH(	8)	=	0		
ISTRUH(	9)	=	0		
ISTRUH(	10)	=	0		
ISTRUH(	11)	=	1		
ISTRUH(	12)	=	0		
ISTRUH(	13)	=	1		
ISTRUH(	14)	=	1		
ISTRUC(	1)	=	0		
ISTRUC(	2)	=	2		
ISUPER(	1,		1, 2 )	=	5
ISUPER(	1,		2, 2 )	=	11
ISTRUC(	3)	=	2		
ISUPER(	2,		1, 2 )	=	5
ISUPER(	2,		2, 2 )	=	13
ISTRUC(	4)	=	1		
ISTRUC(	5)	=	1		
ISTRUC(	6)	=	0		

**RESULTADOS DEL LADO CALIENTE GENERADOS POR EL PROGRAMA  
DE COMPUTO III.**

CORRIENTE CALIENTE NO. = 5

DATOS DE LA CORRIENTE:

MCP = 385333.33  
TENT = 370.0000  
YSAL = 355.0000

\* SUPERESTRUCTURA NO. = 1 \*

NUMERO DE INTERCAMBIOS = 2

CON LAS CORRIENTES :

FRIA 2  
FRIA 3

NUMERO DE VARIABLES (X) = 14

NUMERO DE ECS. LINEALES = 8  
(BALANCES DE MATERIA)

NUMERO ECS. NO LINEALES = 5  
(BALANCES DE ENERGIA)

VARIABLES:

FLUJOS:

INICIAL = 1  
FINAL = 10

TEMPS.:

INICIAL = 11  
FINAL = 14

ECS. LINEALES:

INICIAL = 1  
FINAL = 3

ECS. NO LINEALES:

INICIAL = 1  
FINAL = 5

CORRIENTE FRIA NO. = 2

DATOS DE LA CORRIENTE:

MCP = 5780000.00  
TENT = 260.0000  
TSAL = 241.0000

\* SUPERESTRUCTURA NO. = 2 \*

NUMERO DE INTERCAMBIOS = 2

CON LAS CORRIENTES :  
CALIENTE 5  
CALIENTE 11

NUMERO DE VARIABLES (X) = 14

NUMERO DE ECS. LINEALES = 3  
(BALANCES DE MATERIA)

NUMERO ECS. NO LINEALES = 5  
(BALANCES DE ENERGIA)

VARIABLES:

FLUJOS:  
INICIAL = 15  
FINAL = 24

TEMPS.:  
INICIAL = 25  
FINAL = 28

ECS. LINEALES:

INICIAL = 9  
FINAL = 16

ECS. NO LINEALES:

INICIAL = 6  
FINAL = 10



CORRIENTE FRIA NO. = 3

DATOS DE LA CORRIENTE:

MCP = 1238000.00  
TENT = 311.0000  
TSAL = 361.0000

• SUPERESTRUCTURA NO. = 3 •

NUMERO DE INTERCAMBIOS = 2

COM LAS CORRIENTES :  
CALIENTE 5  
CALIENTE 13

NUMERO DE VARIABLES (X) = 14

NUMERO DE ECS. LINEALES = 4  
(BALANCES DE MATERIA)

NUMERO ECS. NO LINEALES = 5  
(BALANCES DE ENERGIA)

VARIABLES:

FLUJOS:

INICIAL = 29  
FINAL = 39

TEMPS.:

INICIAL = 39  
FINAL = 42

ECS. LINEALES:

INICIAL = 17  
FINAL = 24

ECS. NO LINEALES:

INICIAL = 11  
FINAL = 15

**RESUMEN FINAL DE LAS SUPERESTRUCTURAS:**

**NUM. ECS. LINEALES DEBIDAS A BALANCES DE MATERIA = 24**

**NUM. ECS. LINEALES DEBIDAS A RESTRICCIONES DE TEMP. = 4**

**NUM. DE VARIABLES EN TOTAL = 42**

**NUM. DE ECS. LINEALES EN TOTAL = 28**

**NUM. DE ECS. NO LINEALES EN TOTAL = 15**

**SUMA TOTAL = 85**

ESPACIO DE MEMORIA DISPONIBLE :

NVARI = 98      NHILA = 68      NHILB = 182

ESPACIO DE MEMORIA REQUERIDA :

NVARIA = 42      NROWA = 28      NROWB = 85

NROWC = 15      NROWF = 24      NROWST = 4

SUBROUTINAS EN FORTRAN QUE CONTIENEN LA FORMULACION DEL PROBLEMA DE PROGRAMACION NO LINEAL COMPRENDIENDO LA SUPERESTRUCTURA CUYA SOLUCION DEFINE LA CONFIGURACION FINAL DE LA SUBRED CORRESPONDIENTE AL LADO CALIENTE. ESTAS SUBROUTINAS SON GENERADAS POR EL PROGRAMA DE COMPUTO III

NAB\*BVMTES2(1)-MAIN/PRUEBA1(41)

```
1      PARAMETER NNROWA = 28, NNROWJ = 15, NNROWR = 42, NNTOT = 85
2      PARAMETER NIWORK = 270, NWORK = 14400
3
4      C
5      INTEGER I, INFORM, ITER, ITMAX, J, LIWORK, LWORK
6      INTEGER MSGLVL, N, NCLIN, NCNLN, NCTOTL
7      INTEGER NOUT, NROWA, NROWJ, NROWR, NSTATE
8      INTEGER ISTATE(NNTOT)
9      INTEGER IWORK(NIWORK)
10
11     C
12     REAL BIGBND, EPSAF, EPSMCH, RTEPS, ETA, FTOL, OBJF
13     REAL A(NNROWA,NNROWR),BL(NNTOT),BU(NNTOT),FEATOL(NNTOT)
14     REAL C(NNROWJ), CJAC(NNROWJ,NNROWR), CLAMDA(NNTOT)
15     REAL OBJGRD(NNROWR), R(NNROWR,NNROWR), X(NNROWR)
16     REAL WORK(NWORK)
17     REAL SQRT
18
19     C
20     LOGICAL COLD, ORTHOG
21
22     C
23     EXTERNAL OBJFUN, CONFUN
24
25     C
26     NAMELIST /DATOS1/ MSGLVL,RTEPS,RFTOL,EPSMCH,ETA,ITMAX,
27     * INICIA,ITOLER
28
29     C
30     NAMELIST /DATOS2/ X
31
32     C
33     NAMELIST /DATOS3/ FEATOL
34
35     C
36     NROWA = NNROWA
37     NROWJ = NNROWJ
38     NROWR = NNROWR
39     LIWORK = NIWORK
40     LWORK = NWORK
41
42     C
43     IREAD = 5
44     READ(IREAD,DATOS1)
45
46     C
47     N = NROWR
48     NCLIN = NROWA
49     NCNLN = NROWJ
50     NCTOTL = N + NCLIN + NCNLN
51
52     C
53     NOUT = 6
54     BIGBND = 10000000000.00
55
56     C
57     DO 10 I=1,NCLIN
58     DO 20 J=1,N
59     A(I,J) = 0.0
60     20 CONTINUE
61     10 CONTINUE
62
63     C
64     A( 1, 1) = -1.0
65     A( 1, 2) = -1.0
66     A( 2, 4) = 1.0
67     A( 2, 5) = -1.0
68     A( 2, 6) = -1.0
69     A( 3, 8) = 1.0
70     A( 3, 9) = -1.0
71     A( 3, 10) = -1.0
72     A( 4, 1) = 1.0
```

60	AC	4,	3)	=	-1.0
61	AC	4,	10)	=	1.0
62	AC	5,	2)	=	1.0
63	AC	5,	6)	=	1.0
64	AC	5,	7)	=	-1.0
65	AC	6,	5)	=	1.0
66	AC	6,	9)	=	1.0
67	AC	7,	3)	=	1.0
68	AC	7,	4)	=	-1.0
69	AC	8,	7)	=	1.0
70	AC	8,	8)	=	-1.0
71	AC	9,	15)	=	-1.0
72	AC	9,	16)	=	-1.0
73	AC	10,	18)	=	1.0
74	AC	10,	19)	=	-1.0
75	AC	10,	20)	=	-1.0
76	AC	11,	22)	=	1.0
77	AC	11,	23)	=	-1.0
78	AC	11,	24)	=	-1.0
79	AC	12,	15)	=	1.0
80	AC	12,	17)	=	-1.0
81	AC	12,	24)	=	1.0
82	AC	13,	16)	=	1.0
83	AC	13,	20)	=	1.0
84	AC	13,	21)	=	-1.0
85	AC	14,	19)	=	1.0
86	AC	14,	23)	=	1.0
87	AC	15,	17)	=	1.0
88	AC	15,	18)	=	-1.0
89	AC	16,	21)	=	1.0
90	AC	16,	22)	=	-1.0
91	AC	17,	29)	=	-1.0
92	AC	17,	30)	=	-1.0
93	AC	18,	32)	=	1.0
94	AC	18,	33)	=	-1.0
95	AC	18,	34)	=	-1.0
96	AC	19,	36)	=	1.0
97	AC	19,	37)	=	-1.0
98	AC	19,	38)	=	-1.0
99	AC	20,	29)	=	1.0
100	AC	20,	31)	=	-1.0
101	AC	20,	38)	=	1.0
102	AC	21,	30)	=	1.0
103	AC	21,	34)	=	1.0
104	AC	21,	35)	=	-1.0
105	AC	22,	33)	=	1.0
106	AC	22,	37)	=	1.0
107	AC	23,	31)	=	1.0
108	AC	23,	32)	=	-1.0
109	AC	24,	35)	=	1.0
110	AC	24,	36)	=	-1.0
111	AC	25,	11)	=	1.0
112	AC	25,	26)	=	-1.0
113	AC	26,	12)	=	1.0
114	AC	26,	25)	=	-1.0
115	AC	27,	13)	=	1.0
116	AC	27,	40)	=	-1.0
117	AC	28,	14)	=	1.0
118	AC	28,	39)	=	-1.0
119					

C

```

120      DO 30 J=1,N
121      X(J) = 0.0
122      30 CONTINUE
123      C
124      IF(INICIA .EQ. 0)THEN
125      C
126      X( 1) =      198.6667
127      X( 2) =      186.6667
128      X( 3) =      198.6667
129      X( 4) =      198.6667
130      X( 5) =      198.6667
131      X( 7) =      186.6667
132      X( 8) =      186.6667
133      X( 9) =      186.6667
134      X(11) =      370.0000
135      X(12) =      355.0000
136      X(13) =      370.0000
137      X(14) =      355.0000
138      X(15) =      2980.0000
139      X(16) =      2800.0000
140      X(17) =      2980.0000
141      X(18) =      2980.0000
142      X(19) =      2980.0000
143      X(21) =      2800.0000
144      X(22) =      2800.0000
145      X(23) =      2800.0000
146      X(25) =      260.0000
147      X(26) =      261.0000
148      X(27) =      260.0000
149      X(28) =      261.0000
150      X(29) =      56.0000
151      X(30) =      1182.0000
152      X(31) =      56.0000
153      X(32) =      56.0000
154      X(33) =      56.0000
155      X(35) =      1182.0000
156      X(36) =      1182.0000
157      X(37) =      1182.0000
158      X(39) =      311.0000
159      X(40) =      361.0000
160      X(41) =      311.0000
161      X(42) =      361.0000
162      C
163      ELSE
164      READ(IREAD,DATOS2)
165      END IF
166      C
167      DO 40 J=1,NCTOTL
168      BL(J) = 0.0
169      BU(J) = 0.0
170      40 CONTINUE
171      C
172      BL( 1) =      .0000
173      BU( 1) =      385.3333
174      BL( 2) =      .0000
175      BU( 2) =      385.3333
176      BL( 3) =      .0000
177      BU( 3) =      385.3333
178      BL( 4) =      .0000
179      BU( 4) =      385.3333

```

180	BL( 5) =	.0000
181	BU( 5) =	385.3333
182	BL( 6) =	.0000
183	BU( 6) =	385.3333
184	BL( 7) =	.0000
185	BU( 7) =	385.3333
186	BL( 8) =	.0000
187	BU( 8) =	385.3333
188	BL( 9) =	.0000
189	BU( 9) =	385.3333
190	BL( 10) =	.0000
191	BU( 10) =	385.3333
192	BL( 11) =	290.0000
193	BU( 11) =	370.0000
194	BL( 12) =	290.0000
195	BU( 12) =	370.0000
196	BL( 13) =	341.0000
197	BU( 13) =	370.0000
198	BL( 14) =	341.0000
199	BU( 14) =	370.0000
200	BL( 15) =	.0000
201	BU( 15) =	5780.0000
202	BL( 16) =	.0000
203	BU( 16) =	5780.0000
204	BL( 17) =	.0000
205	BU( 17) =	5780.0000
206	BL( 18) =	.0000
207	BU( 18) =	5780.0000
208	BL( 19) =	.0000
209	BU( 19) =	5780.0000
210	BL( 20) =	.0000
211	BU( 20) =	5780.0000
212	BL( 21) =	.0000
213	BU( 21) =	5780.0000
214	BL( 22) =	.0000
215	BU( 22) =	5780.0000
216	BL( 23) =	.0000
217	BU( 23) =	5780.0000
218	BL( 24) =	.0000
219	BU( 24) =	5780.0000
220	BL( 25) =	260.0000
221	BU( 25) =	340.0000
222	BL( 26) =	260.0000
223	BU( 26) =	340.0000
224	BL( 27) =	260.0000
225	BU( 27) =	260.0000
226	BL( 28) =	260.0000
227	BU( 28) =	268.0000
228	BL( 29) =	.0000
229	BU( 29) =	1238.0000
230	BL( 30) =	.0000
231	BU( 30) =	1238.0000
232	BL( 31) =	.0000
233	BU( 31) =	1238.0000
234	BL( 32) =	.0000
235	BU( 32) =	1238.0000
236	BL( 33) =	.0000
237	BU( 33) =	1238.0000
238	BL( 34) =	.0000
239	BU( 34) =	1238.0000



240	BL( 35) =	.0000
241	BU( 35) =	1238.0000
242	BL( 36) =	.0000
243	BU( 36) =	1238.0000
244	BL( 37) =	.0000
245	BU( 37) =	1238.0000
246	BL( 38) =	.0000
247	BU( 38) =	1238.0000
248	BL( 39) =	311.0000
249	BU( 39) =	340.0000
250	BL( 40) =	311.0000
251	BU( 40) =	340.0000
252	BL( 41) =	311.0000
253	BU( 41) =	378.0000
254	BL( 42) =	311.0000
255	BU( 42) =	379.0000
256	BL( 43) =	-385.3333
257	BU( 43) =	-385.3333
258	BL( 43) =	385.3333
259	BU( 48) =	385.3333
260	BL( 51) =	-5780.0000
261	BU( 51) =	-5780.0000
262	BL( 56) =	5780.0000
263	BU( 56) =	5780.0000
264	BL( 59) =	-1238.0000
265	BU( 59) =	-1238.0000
266	BL( 64) =	1238.0000
267	BU( 64) =	1238.0000
268	BL( 67) =	30.0000
269	BU( 67) =	110.0000
270	BL( 68) =	30.0000
271	BU( 68) =	110.0000
272	BL( 69) =	30.0000
273	BU( 69) =	59.0000
274	BL( 70) =	30.0000
275	BU( 70) =	59.0000
276	BL( 73) =	136793.3301
277	BU( 73) =	136793.3301
278	BL( 74) =	2980.0000
279	BU( 74) =	2980.0000
280	BL( 75) =	2800.0000
281	BU( 75) =	2800.0000
282	BL( 78) =	1508580.0000
283	BU( 78) =	1508580.0000
284	BL( 79) =	-2980.0000
285	BU( 79) =	-2980.0000
286	BL( 80) =	-2800.0000
287	BU( 80) =	-2800.0000
288	BL( 83) =	446918.0000
289	BU( 83) =	446918.0000
290	BL( 84) =	-2800.0000
291	BU( 84) =	-2800.0000
292	BL( 85) =	-59100.0000
293	BU( 85) =	-59100.0000

C

```

WRITE (NOUT, 2100)
NIMPRE = N/10
NIMPR1 = MOD(N,10)
IF(NIMPR1 .GT. 0) NIMPRE = NIMPRE + 1
DO 70 I = 1, NCLIN

```

```

300      LINF = 1
301      LSUP = 10
302      DO 72 K = 1, NIMPRE
303      IF( N .GT. LSUP) THEN
304          WRITE (NOUT, 2200) I, (A(I,J), J=LINF,LSUP)
305      ELSE
306          WRITE (NOUT, 2200) I, (A(I,J), J=LINF,N)
307      END IF
308      LINF = LINF + 10
309      LSUP = LSUP + 10
310  72 CONTINUE
311      PRINT*
312  70 CONTINUE
313
314  C      WRITE (NOUT, 2300) (BL(J), J=1,NCTOTL)
315      WRITE (NOUT, 2400) (BU(J), J=1,NCTOTL)
316      WRITE (NOUT, 2500) ( X(J), J=1,N)
317
318  C
319      NSTATE = 1
320      CALL OBJFUN( Z, N, X, OBJF, OBJGRD, NSTATE )
321
322  C      EPSAF = EPSMCH * ABS( OBJF )
323      FTOL = RTOL*EPSMCH
324
325  C      IF(ITOLER .EQ. 0) THEN
326      DO 80 J = 1, NCTOTL
327          FEATOL(J) = RTEPS
328      80 CONTINUE
329
330  C      ELSE
331      READ(IREAD,DATOS3)
332      END IF
333
334  C      COLD = .TRUE.
335      ORTHOG = .TRUE.
336
337  C      CALL NPSOL( ITMAX, MSGLVL, N,
338      *            NCLIN, NCNLM, NCTOTL, NROWA, NROWJ, NROWR,
339      *            BIGEND, EPSAF, ETA, FTOL,
340      *            A, BL, BU, FEATOL,
341      *            CONFUN, OBJFUN, COLD, ORTHOG,
342      *            INFORM, ITER, ISTATE,
343      *            C, CJAC, CLAMDA, OBJF, OBJGRD, R, X,
344      *            IWORK, LIWORK, WORK, LWORK )
345
346  C      IF (INFORM .GT. 0) GO TO 900
347      STOP
348  900 WRITE (NOUT, 3000) INFORM
349      STOP
350
351  C  2100 FORMAT(1H1, / 12H ROWS OF A.)
352      2200 FORMAT(1X, I3, 4X, 10F7.1)
353      2300 FORMAT(1H1, / 14H LOWER BOUNDS. / (1X, 10F10.2))
354      2400 FORMAT(1H1, / 14H UPPER BOUNDS. / (1X, 10F10.2))
355      2500 FORMAT(1H1, / 12H INITIAL X. / (1X, 10F10.2))
356      3000 FORMAT( / 32H NPSOL TERMINATED WITH INFORM =, I3)
357
358  C
359      END

```

MAP=BYTES2(1).CONFUN/PRUEBA1(4)

```
1      SUBROUTINE CONFUN( MODE, MCNLM, N, NROWJ, X, C, CJAC, NSTATE
2
3      C
4      INTEGER MODE, MCNLM, N, NROWJ, NSTATE
5      REAL X(N), C(NROWJ), CJAC(NROWJ,N)
6      INTEGER I, J
7
8      C
9      IF (NSTATE .EQ. 1) THEN
10     DO 120 J = 1, N
11     DO 110 I = 1, MCNLM
12     CJAC(I,J) = 0.0
13
14     110 CONTINUE
15     120 CONTINUE
16     ELSE
17     END IF
18
19     C
20     C( 1)=X( 10)+X( 14)-X( 3)+X( 11)+X( 13)= 370.00
21     CJAC( 1, 10)=+X( 14)
22     CJAC( 1, 14)=+X( 10)
23     CJAC( 1, 3)=-X( 11)
24     CJAC( 1, 11)=-X( 3)
25     CJAC( 1, 13)= 370.00
26
27     C( 2)=X( 6)+X( 12)-X( 7)+X( 13)+X( 2)= 370.00
28     CJAC( 2, 6)=+X( 12)
29     CJAC( 2, 12)=+X( 6)
30     CJAC( 2, 7)=-X( 13)
31     CJAC( 2, 13)=+X( 2)
32     CJAC( 2, 2)= 370.00
33
34     C( 3)=X( 9)+X( 14)+X( 5)+X( 12)
35     CJAC( 3, 9)=+X( 14)
36     CJAC( 3, 14)=+X( 9)
37     CJAC( 3, 5)=+X( 12)
38     CJAC( 3, 12)=+X( 5)
39
40     C( 4)=X( 3)+X( 11)-X( 4)+X( 12)
41     CJAC( 4, 3)=+X( 11)
42     CJAC( 4, 11)=+X( 3)
43     CJAC( 4, 4)=-X( 12)
44     CJAC( 4, 12)=-X( 4)
45
46     C( 5)=X( 7)+X( 13)-X( 8)+X( 14)
47     CJAC( 5, 7)=+X( 13)
48     CJAC( 5, 13)=+X( 7)
49     CJAC( 5, 8)=-X( 14)
50     CJAC( 5, 14)=-X( 8)
51
52     C( 6)=X( 24)+X( 28)-X( 17)+X( 25)+X( 15)= 260.00
53     CJAC( 6, 24)=+X( 28)
54     CJAC( 6, 28)=+X( 24)
55     CJAC( 6, 17)=-X( 25)
56     CJAC( 6, 25)=-X( 17)
57     CJAC( 6, 15)= 260.00
58
59     C( 7)=X( 20)+X( 26)-X( 21)+X( 27)+X( 16)= 260.00
60     CJAC( 7, 20)=+X( 26)
61     CJAC( 7, 26)=+X( 20)
62     CJAC( 7, 21)=-X( 27)
63     CJAC( 7, 27)=-X( 21)
64     CJAC( 7, 16)= 260.00
65
66     C( 8)=X( 23)+X( 28)+X( 19)+X( 26)
67     CJAC( 8, 23)=+X( 28)
68     CJAC( 8, 28)=+X( 23)
69     CJAC( 8, 19)=+X( 26)
70     CJAC( 8, 26)=+X( 19)
```

```

60      C( 9)=X( 17)* X( 25)-X( 18)*X( 26)
61      CJACC( 9, 17)=+X( 25)
62      CJACC( 9, 25)=+X( 17)
63      CJACC( 9, 18)=-X( 26)
64      CJACC( 9, 26)=-X( 18)
65      C( 10)=X( 21)* X( 27)-X( 22)*X( 28)
66      CJACC( 10, 21)=+X( 27)
67      CJACC( 10, 27)=+X( 21)
68      CJACC( 10, 22)=-X( 28)
69      CJACC( 10, 28)=-X( 22)
70      C( 11)=X( 38)*X( 42)-X( 31)*X( 39)+X( 29)* 311.00
71      CJACC( 11, 38)=+X( 42)
72      CJACC( 11, 42)=+X( 38)
73      CJACC( 11, 31)=-X( 39)
74      CJACC( 11, 39)=-X( 31)
75      CJACC( 11, 29)= 311.00
76      C( 12)=X( 34)*X( 40)-X( 35)*X( 41)+X( 30)* 311.00
77      CJACC( 12, 34)=+X( 40)
78      CJACC( 12, 40)=+X( 34)
79      CJACC( 12, 35)=-X( 41)
80      CJACC( 12, 41)=-X( 35)
81      CJACC( 12, 30)= 311.00
82      C( 13)=X( 37)*X( 42)+X( 33)*X( 40)
83      CJACC( 13, 37)=+X( 42)
84      CJACC( 13, 42)=+X( 37)
85      CJACC( 13, 33)=+X( 40)
86      CJACC( 13, 40)=+X( 33)
87      C( 14)=X( 31)* X( 39)-X( 32)*X( 40)
88      CJACC( 14, 31)=+X( 39)
89      CJACC( 14, 39)=+X( 31)
90      CJACC( 14, 32)=-X( 40)
91      CJACC( 14, 40)=-X( 32)
92      C( 15)=X( 35)* X( 41)-X( 36)*X( 42)
93      CJACC( 15, 35)=+X( 41)
94      CJACC( 15, 41)=+X( 35)
95      CJACC( 15, 36)=-X( 42)
96      CJACC( 15, 42)=-X( 36)
97      RETURN
98      END

```

NAB\*BVNTES2(1)\_OBJFUN/PRUEBA1(39)

```

1      SUBROUTINE OBJFUN( MODE, N, X, OBJF, OBJGRD, NSTATE )
2
3      C
4      INTEGER MODE, N, NSTATE
5      REAL OBJF
6      REAL X(N), OBJGRD(N)
7
8      C
9      REAL ARG1( 4 )
10     REAL ARG2( 4 )
11     REAL ARG3( 4 )
12     REAL ARG4( 4 )
13     REAL ARG5( 4 )
14     REAL CTE( 4 )
15     REAL C1( 4 )
16     REAL E1( 4 )
17     REAL E3( 4 )
18
19     C
20     C2 =          .6667
21     C3 =          .1667
22     C4 =         -3333
23     E2 =         -5000
24
25     C
26     C1( 1) =      1373.6100
27     E1( 1) =          .5359
28     E3( 1) = E1( 1) + 1.0
29
30     C
31     ARG1( 1) = ( 298.00-X( 28)
32     ARG2( 1) = ( 290.00-X( 27)
33     ARG3( 1) = ( 298.00-X( 28))*( 290.00-X( 27))
34     ARG4( 1) = ( 588.00
35     ARG5( 1) = C2*ARG3( 1)**E2+C3*ARG4( 1)
36     CTE( 1) = 481301.6953
37
38     C
39     C1( 2) =      1373.6100
40     E1( 2) =          .5359
41     E3( 2) = E1( 2) + 1.0
42
43     C
44     ARG1( 2) = ( 409.00-X( 42)
45     ARG2( 2) = ( 408.00-X( 41)
46     ARG3( 2) = ( 409.00-X( 42))*( 408.00-X( 41))
47     ARG4( 2) = ( 817.00
48     ARG5( 2) = C2*ARG3( 2)**E2+C3*ARG4( 2)
49     CTE( 2) = 2467056.6875
50
51     C
52     C1( 3) =      1373.6100
53     E1( 3) =          .5359
54     E3( 3) = E1( 3) + 1.0
55
56     C
57     ARG1( 3) = (X( 11)- X( 26))
58     ARG2( 3) = (X( 12)- X( 25))
59     ARG3( 3) = (X( 11)- X( 26))*(X( 12)- X( 25))
60     ARG4( 3) = (X( 11)+X( 12)-X( 26)-X( 25))
61     ARG5( 3) = C2*ARG3( 3)**E2+C3*ARG4( 3)
62     CTE( 3) = 497642.9961
63
64     C
65     C1( 4) =      1373.6100
66     E1( 4) =          .5359
67     E3( 4) = E1( 4) + 1.0
68
69     C
70     ARG1( 4) = (X( 13)- X( 40))

```

```

60 ARG2( 4) = (X( 14)- X( 39))
61 ARG3( 4) = (X( 13)- X( 40))*(X( 14)- X( 39))
62 ARG4( 4) = (X( 13)+X( 14)-X( 40)-X( 39))
63 ARG5( 4) = C2*ARG3( 4)**E2+C3*ARG4( 4)
64 CTE( 4) = 481301.6953
65
66 C
67 OBJF = CTE( 1)/ARG5( 1)**E1( 1)
68 * + CTE( 2)/ARG5( 2)**E1( 2)
69 * + CTE( 3)/ARG5( 3)**E1( 3)
70 * + CTE( 4)/ARG5( 4)**E1( 4)
71 OBJGRD( 28) = CTE( 1)*(-E1( 1))*ARG5( 1)**(-E3( 1))*
72 * (C4*ARG3( 1)**(-E2))*(-ARG2( 1))-C3)
73 C
74 OBJGRD( 27) = CTE( 1)*(-E1( 1))*ARG5( 1)**(-E3( 1))*
75 * (C4*ARG3( 1)**(-E2))*(-ARG1( 1))-C3)
76 C
77 OBJGRD( 42) = CTE( 2)*(-E1( 2))*ARG5( 2)**(-E3( 2))*
78 * (C4*ARG3( 2)**(-E2))*(-ARG2( 2))-C3)
79 C
80 OBJGRD( 41) = CTE( 2)*(-E1( 2))*ARG5( 2)**(-E3( 2))*
81 * (C4*ARG3( 2)**(-E2))*(-ARG1( 2))-C3)
82 C
83 OBJGRD( 11) = CTE( 3)*(-E1( 3))*ARG5( 3)**(-E3( 3))*
84 * (C4*ARG3( 3)**(-E2))*(+ARG2( 3))+C3)
85 C
86 OBJGRD( 12) = CTE( 3)*(-E1( 3))*ARG5( 3)**(-E3( 3))*
87 * (C4*ARG3( 3)**(-E2))*(+ARG1( 3))+C3)
88 C
89 OBJGRD( 26) = CTE( 3)*(-E1( 3))*ARG5( 3)**(-E3( 3))*
90 * (C4*ARG3( 3)**(-E2))*(-ARG2( 3))-C3)
91 C
92 OBJGRD( 25) = CTE( 3)*(-E1( 3))*ARG5( 3)**(-E3( 3))*
93 * (C4*ARG3( 3)**(-E2))*(-ARG1( 3))-C3)
94 C
95 OBJGRD( 13) = CTE( 4)*(-E1( 4))*ARG5( 4)**(-E3( 4))*
96 * (C4*ARG3( 4)**(-E2))*(+ARG2( 4))+C3)
97 C
98 OBJGRD( 14) = CTE( 4)*(-E1( 4))*ARG5( 4)**(-E3( 4))*
99 * (C4*ARG3( 4)**(-E2))*(+ARG1( 4))+C3)
100 C
101 OBJGRD( 40) = CTE( 4)*(-E1( 4))*ARG5( 4)**(-E3( 4))*
102 * (C4*ARG3( 4)**(-E2))*(-ARG2( 4))-C3)
103 C
104 OBJGRD( 39) = CTE( 4)*(-E1( 4))*ARG5( 4)**(-E3( 4))*
105 * (C4*ARG3( 4)**(-E2))*(-ARG1( 4))-C3)
106 C
107 RETURN
END

```

**DATOS DEL LADO FRIO QUE DEBEN SER SUMINISTRADOS POR EL  
USUARIO PARA CORRER EL PROGRAMA DE COMPUTO III.**

NAB=BVMTES2(1).DATOS3OC/EXT-L-L(2)

```

1  BUSE 15,BVMDAT1
2  BUSE 16,BVMDAT2
3  BUSE 17,BVMDAT5
4  @PRT-S BVMTES2.DATOS3OC/EXT-L-L
5  @XQT BVMABS.SUPERE
6  SDATGEN IRUN = 0, NUMUNI = 9, IARCH = 1, ILECTU = 1,
7  IOPCIO=0, LADO = 2, BIGBND= 1.0E+10,SEND
8  SDAT1 MCC =12, NCF =12, DTMIN = 30.0, TPINCH =260.,SEND
9  SDAT2 MCP= 317666.6667,TENT= 150.,TSAL= 120.,SEND
10 SDAT2 MCP= 339285.7143,TENT= 290.,TSAL= 150.,SEND
11 SDAT2 MCP= 49090.9091,TENT= 248.,TSAL= 193.,SEND
12 SDAT2 MCP= 118000.0000,TENT= 193.,TSAL= 187.,SEND
13 SDAT2 MCP= 385333.3333,TENT= 370.,TSAL= 355.,SEND
14 SDAT2 MCP= 360000.0000,TENT= 355.,TSAL= 298.,SEND
15 SDAT2 MCP= 33333.3333,TENT= 158.,TSAL= 155.,SEND
16 SDAT2 MCP= 1376190.4760,TENT= 155.,TSAL= 134.,SEND
17 SDAT2 MCP= 522222.2222,TENT= 134.,TSAL= 125.,SEND
18 SDAT2 MCP= 145000.0000,TENT= 125.,TSAL= 105.,SEND
19 SDAT2 MCP= 350000.0000,TENT= 298.,TSAL= 290.,SEND
20 SDAT2 MCP= 24776.1194,TENT= 187.,TSAL= 120.,SEND
21 SDAT2 MCP= 420353.9823,TENT= 120.,TSAL= 233.,SEND
22 SDAT2 MCP= 578000.0000,TENT= 260.,TSAL= 261.,SEND
23 SDAT2 MCP= 1238000.0000,TENT= 311.,TSAL= 361.,SEND
24 SDAT2 MCP=2052000.0000,TENT= 260.,TSAL= 261.,SEND
25 SDAT2 MCP= 545333.3333,TENT= 295.,TSAL= 370.,SEND
26 SDAT2 MCP= 62222.2222,TENT= 105.,TSAL= 150.,SEND
27 SDAT2 MCP= 381200.0000,TENT= 90.,TSAL= 115.,SEND
28 SDAT2 MCP= 283200.0000,TENT= 90.,TSAL= 115.,SEND
29 SDAT2 MCP= 3152000.0000,TENT=105.831,TSAL= 115.,SEND
30 SDAT2 MCP= 3152000.0000,TENT= 90.920,TSAL= 105.831,SEND
31 SDAT2 MCP= 3152000.0000,TENT= 90.000,TSAL= 90.920,SEND
32 SDAT2 MCP= 66400.0000,TENT= 90.,TSAL= 115.,SEND
33 SDAT3 ICORRH = 1,ICORRC = 7, QIJ = 9530000.0, UIJ = 50.0,
34 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00, SEND
35 SDAT3 ICORRH = 2,ICORRC = 1, QIJ = 47500000.0, UIJ = 50.0,
36 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00, SEND
37 SDAT3 ICORRH = 3,ICORRC = 6, QIJ = 2700000.0, UIJ = 50.0,
38 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00, SEND
39 SDAT3 ICORRH = 4,ICORRC = 3, QIJ = 7080000.0, UIJ = 50.0,
40 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00, SEND
41 SDAT3 ICORRH = 7,ICORRC = 6, QIJ = 100000.0, UIJ = 50.0,
42 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 00.00, SEND
43 SDAT3 ICORRH = 8,ICORRC = 9, QIJ = 28900000.0, UIJ = 50.0,
44 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 28.169, SEND
45 SDAT3 ICORRH = 9,ICORRC =10, QIJ = 47000000.0, UIJ = 50.0,
46 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 28.169, SEND
47 SDAT3 ICORRH =10,ICORRC =11, QIJ = 29000000.0, UIJ = 50.0,
48 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 15.000, SEND
49 SDAT3 ICORRH =12,ICORRC =12, QIJ = 16600000.0, UIJ = 50.0,
50 CIJ = 1373.61, BIJ = 0.5359, DTIJ = 30.000, SEND

```

@XQT BVMABS.SUPERE

```

AT LINE          75: IWRITE=          6
QIJ(             1,             7) = 9530000.0
QIJ(             2,             1) = 47500000.0
QIJ(             3,             6) = 2700000.0
QIJ(             4,             8) = 7080000.0
QIJ(             7,             6) = 100000.0

```



QIJ(	8,	9)	=	28900000.
QIJ(	9,	10)	=	47000000.
QIJ(	10,	11)	=	2900000.0
QIJ(	12,	12)	=	1660000.0
QIJ(	2,	1)	=	47500000.
QIJ(	3,	6)	=	2700000.0
QIJ(	7,	6)	=	100000.00
QIJ(	1,	7)	=	9530000.0
QIJ(	4,	8)	=	7080000.0
QIJ(	8,	9)	=	28900000.
QIJ(	9,	10)	=	47000000.
QIJ(	10,	11)	=	2900000.0
QIJ(	12,	12)	=	1660000.0
ISTRUC(	1)	=	1	
ISTRUC(	2)	=	1	
ISTRUC(	3)	=	1	
ISTRUC(	4)	=	1	
ISTRUC(	5)	=	0	
ISTRUC(	6)	=	0	
ISTRUC(	7)	=	1	
ISTRUC(	8)	=	1	
ISTRUC(	9)	=	1	
ISTRUC(	10)	=	1	
ISTRUC(	11)	=	0	
ISTRUC(	12)	=	1	
ISTRUC(	1)	=	1	
ISTRUC(	2)	=	0	
ISTRUC(	3)	=	0	
ISTRUC(	4)	=	0	
ISTRUC(	5)	=	0	
ISTRUC(	6)	=	2	
ISUPER(	1,	2 )	=	3
ISUPER(	1,	2 )	=	7
ISTRUC(	7)	=	1	
ISTRUC(	8)	=	1	
ISTRUC(	9)	=	1	
ISTRUC(	10)	=	1	
ISTRUC(	11)	=	1	
ISTRUC(	12)	=	1	

**RESULTADOS DEL LADO FRIO GENERADOS POR EL PROGRAMA  
DE COMPUTO III.**

CORRIENTE FRIA NO. = 6

DATOS DE LA CORRIENTE:

MCP = 62222.22  
TENT. = 105.0000  
TSAL = 150.0000

\* SUPERESTRUCTURA NO. = 1 \*

NUMERO DE INTERCAMBIOS = 2

COM LAS CORRIENTES :  
CALIENTE 3  
CALIENTE 7

NUMERO DE VARIABLES (X) = 14

NUMERO DE ECS. LINEALES = 8  
(BALANCES DE MATERIA)

NUMERO ECS. NO LINEALES = 5  
(BALANCES DE ENERGIA)

VARIABLES:

FLUJOS:

INICIAL = 1  
FINAL = 10

TEMPS.:

INICIAL = 11  
FINAL = 14

ECS. LINEALES:

INICIAL = 1  
FINAL = 8

ECS. NO LINEALES:

INICIAL = 1  
FINAL = 5

**RESUMEN FINAL DE LAS SUPERESTRUCTURAS:**

**NUM. ECS. LINEALES DEBIDAS A BALANCES DE MATERIA = 8**

**NUM. ECS. LINEALES DEBIDAS A RESTRICCIONES DE TEMP. = 0**

**NUM. DE VARIABLES EN TOTAL = 14**

**NUM. DE ECS. LINEALES EN TOTAL = 8**

**NUM. DE ECS. NO LINEALES EN TOTAL = 5**

**SUMA TOTAL = 27**

ESPACIO DE MEMORIA DISPONIBLE :

NVARX = 98      NHILA = 68      NHILB = 182

ESPACIO DE MEMORIA REQUERIDA :

NVARIA = 14      NROWA = 8      NROWB = 27

NROWC = 5      NROWF = 3      NROWDT = 0

SUBROUTINAS EN FORTRAN QUE CONTIENEN LA FORMULACION DEL PROBLEMA DE PROGRAMACION NO LINEAL COMPRENDIENDO LA SUPERESTRUCTURA CUYA SOLUCION DEFINE LA CONFIGURACION FINAL DE LA SUBRED CORRESPONDIENTE AL LADO FRIO. ESTAS SUBROUTINAS SON GENERADAS POR EL PROGRAMA DE COMPUTO III

WAB\*BYNTE2(1).MAIN/PRUEBA1(42)

```
1     PARAMETER NNROWA = 8, NNROWJ = 5, NNROWR = 14, NNTOT = 27
2     PARAMETER NIWORK = 270, NWORK = 14400
3
4     C
5     INTEGER I, INFORM, ITER, ITMAX, J, LIWORK, LWORK
6     INTEGER MSGLVL, N, NCLIN, NCNLN, NCTOTL
7     INTEGER HOUT, NROWA, NROWJ, NROWR, NSTATE
8     INTEGER ISTATE(NNTOT)
9     INTEGER IWORK(NIWORK)
10
11    C
12    REAL BIGBND, EPSAF, EPSMCH, RTEPS, ETA, FTOL, OJJF
13    REAL A(NNROWA,NNROWR),BL(NNTOT),BU(NNTOT),FEATOL(NNTOT)
14    REAL C(NNROWJ), CJAC(NNROWJ,NNROWR), CLAMDA(NNTOT)
15    REAL OBJGRD(NNROWR), R(NNROWR,NNROWR), X(NNROWR)
16    REAL WQRK(NWORK)
17
18    C
19    LOGICAL COLD, ORTHOG
20
21    C
22    EXTERNAL OBJFUN, CONFUN
23
24    C
25    NAMELIST /DATOS1/ MSGLVL,RTEPS,RFTOL,EPSMCH,ETA,ITMAX,
26    * INICIA,ITOLER
27
28    C
29    NAMELIST /DATOS2/ X
30
31    C
32    NAMELIST /DATOS3/ FEATOL
33
34    C
35    NROWA = NNROWA
36    NROWJ = NNROWJ
37    NROWR = NNROWR
38    LIWORK = NIWORK
39    LWORK = NWORK
40
41    C
42    IREAD = 5
43    READ(IREAD,DATOS1)
44
45    C
46    N = NROWR
47    NCLIN = NROWA
48    NCNLN = NROWJ
49    NCTOTL = N + NCLIN + NCNLN
50
51    C
52    HOUT = 6
53    BIGBND = 10000000000.00
54
55    C
56    DO 10 I=1,NCLIN
57    DO 20 J=1,N
58    A(I,J) = 0.0
59    20 CONTINUE
60    10 CONTINUE
61
62    C
63    A( 1, 1) = -1.0
64    A( 1, 2) = -1.0
65    A( 2, 4) = 1.0
66    A( 2, 5) = -1.0
67    A( 2, 6) = -1.0
68    A( 3, 8) = 1.0
69    A( 3, 9) = -1.0
70    A( 3, 10) = -1.0
71    A( 4, 1) = 1.0
```

```

60      A( 4, 3) =      -1.0
61      A( 4, 10) =       1.0
62      A( 5, 2) =       1.0
63      A( 5, 6) =       1.0
64      A( 5, 7) =      -1.0
65      A( 6, 5) =       1.0
66      A( 6, 9) =       1.0
67      A( 7, 3) =       1.0
68      A( 7, 4) =      -1.0
69      A( 8, 7) =       1.0
70      A( 8, 8) =      -1.0
71
72      C
73      DO 30 J=1,N
74      X(J) = 0.0
75      30 CONTINUE
76
77      C
78      IF(INICIA .EQ. 0)THEN
79
80      X( 1) =      60.0000
81      X( 2) =      2.2222
82      X( 3) =      60.0000
83      X( 4) =      60.0000
84      X( 5) =      60.0000
85      X( 7) =      2.2222
86      X( 8) =      2.2222
87      X( 9) =      2.2222
88      X(11) =     105.0000
89      X(12) =     150.0000
90      X(13) =     105.0000
91      X(14) =     150.0000
92
93      C
94      ELSE
95      READ(IREAD,DATOS2)
96      END IF
97
98      C
99      DO 40 J=1,NCTOTL
100     BU(J) = 0.0
101     BU(J) = 0.0
102     40 CONTINUE
103
104     C
105     BL( 1) =      .0000
106     BU( 1) =     62.2222
107     BL( 2) =      .0000
108     BU( 2) =     62.2222
109     BL( 3) =      .0000
110     BU( 3) =     62.2222
111     BL( 4) =      .0000
112     BU( 4) =     62.2222
113     BL( 5) =      .0000
114     BU( 5) =     62.2222
115     BL( 6) =      .0000
116     BU( 6) =     62.2222
117     BL( 7) =      .0000
118     BU( 7) =     62.2222
119     BL( 8) =      .0000
120     BU( 8) =     62.2222
121     BL( 9) =      .0000
122     BU( 9) =     62.2222
123     BL(10) =      .0000
124     BU(10) =     62.2222

```



```

120      BL( 11) =      105.0000
121      BU( 11) =      163.0000
122      BL( 12) =      105.0000
123      BU( 12) =      218.0000
124      BL( 13) =      105.0000
125      BU( 13) =      125.0000
126      BL( 14) =      105.0000
127      BU( 14) =      128.0000
128      BL( 15) =      -62.2222
129      BU( 15) =      -62.2222
130      BL( 20) =      62.2222
131      BU( 20) =      62.2222
132      BL( 25) =      9333.3333
133      BU( 25) =      9333.3333
134      BL( 26) =      -2700.0000
135      BU( 26) =      -2700.0000
136      BL( 27) =      -100.0000
137      BU( 27) =      -100.0000
138
139      C
140      WRITE (NOUT, 2100)
141      NIMPRE = N/10
142      NIMPR1 = MOD(N,10)
143      IF(NIMPR1 .GT. 0) NIMPRE = NIMPRE + 1
144      DO 70 I = 1, NCLIN
145      LINF = 1
146      LSUP = 10
147      DO 72 K = 1, NIMPRE
148      IF(N .GT. LSUP) THEN
149      WRITE (NOUT, 2200) I, (A(I,J), J=LINF,LSUP)
150      ELSE
151      WRITE (NOUT, 2200) I, (A(I,J), J=LINF,N)
152      END IF
153      LINF = LINF + 10
154      LSUP = LSUP + 10
155      72 CONTINUE
156      PRINT*
157      70 CONTINUE
158
159      C
160      WRITE (NOUT, 2300) (BL(J), J=1,NCTOTL)
161      WRITE (NOUT, 2400) (BU(J), J=1,NCTOTL)
162      WRITE (NOUT, 2500) (X(J), J=1,N)
163
164      C
165      NSTATE = 1
166      CALL OBJFUN( 2, N, X, OBJF, OBJGRD, NSTATE )
167
168      C
169      EPSAF = EPSMCH + ABS( OBJF )
170      FTYL = RFTOL*EPSMCH
171
172      C
173      IF(ITOLER .EQ. 0) THEN
174      DO 80 J = 1, NCTOTL
175      FEATOL(J) = RTEPS
176      80 CONTINUE
177
178      C
179      ELSE
180      READ(IREAD,DATOS3)
181      END IF
182
183      C
184      COLD = .TRUE.
185      ORTHOG = .TRUE.
186
187      C

```

```

180          CALL NPSOL( ITMAX, MSGLVL, N,
181          *           NCLIN, MCNLM, NCTOTL, NROWA, NROWJ, NROWR,
182          *           BIGBND, EPSAF, ETA, FTOL,
183          *           A, BL, BU, FEATOL,
184          *           CONFUN, OBJFUN, COLD, ORTHOG,
185          *           INFORM, ITER, ISTATE,
186          *           C, CJAC, CLAMDA, OBJF, OBJGRD, R, X,
187          *           IWORK, LIWORK, WORK, LWORK )
188
189          C
190          IF (INFORM .GT. 0) GO TO 900
191          STDP
192          900 WRITE (NOUT, 3000) INFORM
193          STOP
194
195          C
196          2100 FORMAT(1H1, / 12H ROWS OF A.)
197          2200 FORMAT(1X, I3, 4X, 10F7.1)
198          2300 FORMAT(1H1, / 14H LOWER BOUNDS. / (1X, 10F10.2))
199          2400 FORMAT(1H1, / 14H UPPER BOUNDS. / (1X, 10F10.2))
200          2500 FORMAT(1H1, / 12H INITIAL X. / (1X, 10F10.2))
201          3000 FORMAT(/ 32H NPSOL TERMINATED WITH INFORM =, I3)
202
203          C
204          END

```

```

NAB=BYNTES2(1).CONFUN/PRUEBA1(42)
1
2      C
3      INTEGER MODE, NCNLN, N, NROWJ, NSTATE
4      REAL X(N), C(NROWJ), CJAC(NROWJ,N)
5      INTEGER I, J
6
7      C
8      IF (NSTATE .EQ. 1) THEN
9      DO 120 J = 1, N
10     DO 110 I = 1, NCNLN
11     CJAC(I,J) = 0.0
12     110 CONTINUE
13     120 CONTINUE
14     ELSE
15     END IF
16
17     C
18     C( 1)=X( 10)+X( 14)-X( 3)+X( 11)+X( 1)+ 105.00
19     CJAC( 1, 10)=+X( 14)
20     CJAC( 1, 14)=+X( 10)
21     CJAC( 1, 3)=-X( 11)
22     CJAC( 1, 11)=-X( 3)
23     CJAC( 1, 1)= 105.00
24     C( 2)=X( 6)+X( 12)-X( 7)+X( 13)+X( 2)+ 105.00
25     CJAC( 2, 6)=+X( 12)
26     CJAC( 2, 12)=+X( 6)
27     CJAC( 2, 7)=-X( 13)
28     CJAC( 2, 13)=-X( 7)
29     CJAC( 2, 2)= 105.00
30     C( 3)=X( 9)+X( 14)+X( 5)+X( 12)
31     CJAC( 3, 9)=+X( 14)
32     CJAC( 3, 14)=+X( 9)
33     CJAC( 3, 5)=+X( 12)
34     CJAC( 3, 12)=+X( 5)
35     C( 4)=X( 3)+X( 11)-X( 4)+X( 12)
36     CJAC( 4, 3)=+X( 11)
37     CJAC( 4, 11)=+X( 3)
38     CJAC( 4, 4)=-X( 12)
39     CJAC( 4, 12)=-X( 4)
40     C( 5)=X( 7)+X( 13)-X( 8)+X( 14)
41     CJAC( 5, 7)=+X( 13)
42     CJAC( 5, 13)=+X( 7)
43     CJAC( 5, 8)=-X( 14)
44     CJAC( 5, 14)=-X( 8)
45     RETURN
46     END

```

\*NAB=BVMTES2(1)-OBJFUN/PRUEBA1(40)

```
1      SUBROUTINE OBJFUN( MODE, N, X, OBJF, OBJGRD, NSTATE )
2
3      C
4      INTEGER MODE, N, NSTATE
5      REAL OBJF
6      REAL X(N), OBJGRD(N)
7
8      C
9      REAL ARG1( 2)
10     REAL ARG2( 2)
11     REAL ARG3( 2)
12     REAL ARG4( 2)
13     REAL ARG5( 2)
14     REAL CTE( 2)
15     REAL C1( 2)
16     REAL E1( 2)
17     REAL E3( 2)
18
19     C2 =      .6667
20     C3 =     -1.667
21     C4 =     -3.333
22     E2 =     -5.000
23
24     C
25     C1( 1) =   1373.6100
26     E1( 1) =      .5359
27     E3( 1) = E1( 1) + 1.0
28
29     C
30     ARG1( 1) = ( 248.00-X( 12))
31     ARG2( 1) = ( 193.00-X( 11))
32     ARG3( 1) = ( 248.00-X( 12))*( 193.00-X( 11))
33     ARG4( 1) = ( 441.00      -X( 12)-X( 11))
34     ARG5( 1) = C2*ARG3( 1)**E2+C3*ARG4( 1)
35     CTE( 1) = 472012.2188
36
37     C
38     C1( 2) =   1373.6100
39     E1( 2) =      .5359
40     E3( 2) = E1( 2) + 1.0
41
42     C
43     ARG1( 2) = ( 158.00-X( 14))
44     ARG2( 2) = ( 155.00-X( 13))
45     ARG3( 2) = ( 158.00-X( 14))*( 155.00-X( 13))
46     ARG4( 2) = ( 313.00      -X( 14)-X( 13))
47     ARG5( 2) = C2*ARG3( 2)**E2+C3*ARG4( 2)
48     CTE( 2) = 80702.2061
49
50     C
51     OBJF = CTE( 1)/ARG5( 1)**E1( 1)
52     * + CTE( 2)/ARG5( 2)**E1( 2)
53     OBJGRD( 12) = CTE( 1)*(-E1( 1))*ARG5( 1)**(-E3( 1))*
54     * (C4*ARG3( 1)**(-E2))*(-ARG2( 1))-C3)
55
56     C
57     OBJGRD( 11) = CTE( 1)*(-E1( 1))*ARG5( 1)**(-E3( 1))*
58     * (C4*ARG3( 1)**(-E2))*(-ARG1( 1))-C3)
59
60     C
61     OBJGRD( 14) = CTE( 2)*(-E1( 2))*ARG5( 2)**(-E3( 2))*
62     * (C4*ARG3( 2)**(-E2))*(-ARG2( 2))-C3)
63
64     C
65     OBJGRD( 13) = CTE( 2)*(-E1( 2))*ARG5( 2)**(-E3( 2))*
66     * (C4*ARG3( 2)**(-E2))*(-ARG1( 2))-C3)
67
68     RETURN
69     END
```

**PROGRAMA DE COMPUTO IV.**

**DATOS DEL LADO CALIENTE QUE DEBEN SER SUMINISTRADOS POR EL  
USUARIO PARA CORRER EL PROGRAMA DE COMPUTO IV.**

```

NAB-BVMTES2(1).DATOS-EXTLL/PRUEBA1(10)
1  BRUN BVMNAO,N2529,NAB,S,100 , VICTOR BRIONES V  EXT 20506
2  @PRT,S BVMTES2.DATOS-EXTLL/PRUEBA1
3  @XQT TPFS.NPQPSOL
4  $DATOS1 RTEPS =0.020, RFTOL =10000.00,MSGLVL = 10, EPSMCH =1.0E-6
5  ETA = 0.70, ITHAX =200,INICIA = 1,ITOLER = 0,$END
6  $DATOS2
7      XC ( 2) =      385.3333
8      XC ( 3) =      385.3333
9      XC ( 4) =      385.3333
10     XC ( 5) =      335.3333
11     XC ( 7) =      395.3333
12     XC ( 8) =      385.3333
13     XC (10) =      385.3333
14     XC (11) =      362.0000
15     XC (12) =      355.0000
16     XC (13) =      370.0000
17     XC (14) =      362.0000
18     XC (16) =      5780.0000
19     XC (17) =      5780.0000
20     XC (18) =      5780.0000
21     XC (19) =      5780.0000
22     XC (21) =      5780.0000
23     XC (22) =      5780.0000
24     XC (24) =      5780.0000
25     XC (25) =      260.4000
26     XC (26) =      261.0000
27     XC (27) =      260.0000
28     XC (28) =      260.4000
29     XC (29) =      1238.0000
30     XC (31) =      1238.0000
31     XC (32) =      1238.0000
32     XC (34) =      1238.0000
33     XC (35) =      1238.0000
34     XC (36) =      1238.0000
35     XC (37) =      1238.0000
36     XC (39) =      311.0000
37     XC (40) =      313.2000
38     XC (41) =      313.2000
39     XC (42) =      361.0000
40
$END

```

```

@XQT TPFS.NPQPSOL

```

**RESULTADOS DEL LADO CALIENTE GENERADOS POR EL PROGRAMA DE  
COMPUTO IV.**



ROWS OF

A.

1	-1	-1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
2	.0	.0	.0	1.0	-1.0	-1.0	.0	.0	.0	.0
2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.0	-1.0	-1.0
3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
4	1	.0	-1.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.0
4	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
4	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
4	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
5	.0	1	.0	.0	.0	1	-1	.0	.0	.0
5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
6	.0	.0	.0	.0	1	.0	.0	.0	1	.0
6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
7	.0	.0	1	-1	.0	.0	.0	.0	.0	.0
7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1	-1	.0	.0
8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
9	.0	.0	.0	.0	1	-1	.0	.0	.0	.0
9	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
9	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
9	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
10	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1	-1	-1
10	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
10	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
10	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

10	.0	.0										
11	.00	.00										.00
11	.00	.00										.00
11	.00	.00										.00
11	.00	.00										.00
12	.00	.00										.00
12	.00	.00										.00
12	.00	.00										.00
12	.00	.00										.00
12	.00	.00										.00
13	.00	.00										.00
13	.00	.00										.00
13	.00	.00										.00
13	.00	.00										.00
13	.00	.00										.00
14	.00	.00										.00
14	.00	.00										.00
14	.00	.00										.00
14	.00	.00										.00
14	.00	.00										.00
15	.00	.00										.00
15	.00	.00										.00
15	.00	.00										.00
15	.00	.00										.00
15	.00	.00										.00
16	.00	.00										.00
16	.00	.00										.00
16	.00	.00										.00
16	.00	.00										.00
16	.00	.00										.00
17	.00	.00										.00
17	.00	.00										.00
17	.00	.00										.00
17	.00	.00										.00
17	.00	.00										.00
18	.00	.00										.00
18	.00	.00										.00
18	.00	.00										.00
18	.00	.00										.00
18	.00	.00										.00
19	.00	.00										.00
19	.00	.00										.00
19	.00	.00										.00
19	.00	.00										.00
19	.00	.00										.00
20	.00	.00										.00
20	.00	.00										.00
20	.00	.00										.00
20	.00	.00										.00

20	.0	.0									
21	.0	.0									
21	.0	.0									
21	.0	.0									
21	.0	.0									
22	.0	.0									
22	.0	.0									
22	.0	.0									
22	.0	.0									
22	.0	.0									
23	.0	.0									
23	.0	.0									
23	.0	.0									
23	.0	.0									
24	.0	.0									
24	.0	.0									
24	.0	.0									
24	.0	.0									
24	.0	.0									
25	.0	.0									
25	.0	.0									
25	.0	.0									
25	.0	.0									
25	.0	.0									
26	.0	.0									
26	.0	.0									
26	.0	.0									
26	.0	.0									
26	.0	.0									
27	.0	.0									
27	.0	.0									
27	.0	.0									
27	.0	.0									
27	.0	.0									
28	.0	.0									
28	.0	.0									
28	.0	.0									
28	.0	.0									
28	.0	.0									
28	.0	.0									

LOWER BOUNDS.

.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
290.00	290.00	341.00	341.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	260.00	260.00	260.00	260.00	.00	.00	.00
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	311.00	311.00	.00
311.00	311.00	-385.33	.00	.00	.00	.00	385.33	.00	.00	.00
-5780.00	.00	.00	.00	.00	5780.00	.00	.00	-1238.00	.00	.00
.00	.00	.00	1238.00	.00	.00	30.00	30.00	30.00	30.00	.00
.00	.00	136793.33	2980.00	2800.00	.00	.00	1508580.00	-2980.00	-2800.00	.00
.00	.00	446918.00	-2800.00	-59100.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00

UPPER BOUNDS.

385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33
370.00	370.00	370.00	370.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00
5780.00	5780.00	5780.00	5780.00	340.00	340.00	260.00	268.00	1238.00	1238.00
1238.00	1238.00	1238.00	1238.00	1238.00	1238.00	1238.00	1238.00	340.00	340.00
378.00	379.00	-385.33	.00	.00	.00	.00	385.33	.00	.00
-5780.00	.00	.00	.00	.00	5780.00	.00	.00	-1238.00	.00
.00	.00	.00	1238.00	.00	.00	110.00	110.00	59.00	59.00
.00	.00	136793.33	2980.00	2800.00	.00	.001509580.00	-2980.00	-2800.00	-2800.00
.00	.00	446918.00	-2800.00	-59100.00					

INITIAL	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33	385.33
362.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00	5780.00
1238.00	261.00	261.00	261.00	261.00	261.00	261.00	261.00	261.00	261.00	261.00
385.20	313.00	313.00	313.00	313.00	313.00	313.00	313.00	313.00	313.00	313.00

WORKSPACE PROVIDED IS TW (270), MC (1400),  
 TO SOLVE PROBLEM WE NEED TW (169), MC (132).

ITN	ITPM	STEP	NUMF	MERIT	RND	LC	MC	NZ	NORM G1	NORM G2	COND H	COND HZ	COND T	NORM C	RND	CONV
0	12	0	1	4.27910005	11	17	11	3	1.70003	3.01-000	1.0000	1.0000	1.0004	8.05+002	0	TTTT
1	3	1.7-000	1	4.28560005	11	17	11	3	1.70003	3.01-000	1.0000	1.0000	1.0004	6.72+002	0.9-004	TTTT
2	3	1.0+000	4	4.29110005	11	17	11	3	1.70003	3.01-000	1.0000	1.0000	1.0004	5.76+002	0.9-004	TTTT
3	3	1.0+000	5	4.28100005	11	17	11	3	1.70003	3.01-000	1.0000	1.0000	1.0004	5.76+002	0.9-004	TTTT
4	7	1.0+000	6	4.28070005	11	17	11	3	1.70003	3.01-000	1.0000	1.0000	2.0004	5.76+002	0.9-004	TTTT
5	5	1.0+000	7	4.28040005	0	18	11	4	1.70003	2.45-002	4.0004	1.0000	2.0004	2.28-002	0.9-004	TTTT

EXIT HP PHASE, INFO = 0, MAJITS = 7, NFEVAL = 7, NCFVAL = 7

VARIABLE	STATE	VALUE	LOWER BOUND	UPPER BOUND	LAGR MULTIPLIER	RESIDUAL
VARBL 1	FR	-1524165-000	.00000000	185.1554	.00000000	-1524165-000
VARBL 2	FR	185.1554	.00000000	185.1554	.00000000	.00000000
VARBL 3	FR	185.1554	.00000000	185.1554	.00000000	.00000000
VARBL 4	FR	185.1554	.00000000	185.1554	.00000000	.00000000
VARBL 5	FR	185.1554	.00000000	185.1554	.00000000	.00000000
VARBL 6	LL	.00000000	.00000000	185.1554	2.280292	.00000000
VARBL 7	UL	185.1554	.00000000	185.1554	-5.448793	.00000000
VARBL 8	FR	185.1554	.00000000	185.1554	.00000000	.00000000
VARBL 9	LL	.00000000	.00000000	185.1554	2.280292	.00000000
VARBL 10	FR	185.1554	.00000000	185.1554	.00000000	-1144-000
VARBL 11	FR	162.7316	200.0000	170.0000	.00000000	7.266
VARBL 12	FR	185.0000	200.0000	170.0000	.00000000	15.00
VARBL 13	UL	170.0000	161.0000	170.0000	-540.4549	.00000000
VARBL 14	FR	162.7316	161.0000	170.0000	.00000000	7.266
VARBL 15	LL	.00000000	.00000000	170.0000	-15.0000-001	.00000000
VARBL 16	FR	170.0000	.00000000	170.0000	.00000000	.00000000
VARBL 17	FR	170.0000	.00000000	170.0000	.00000000	.00000000
VARBL 18	FR	170.0000	.00000000	170.0000	.00000000	.00000000
VARBL 19	FR	170.0000	.00000000	170.0000	.00000000	.00000000
VARBL 20	LL	.00000000	.00000000	170.0000	.00000000	.00000000
VARBL 21	FR	170.0000	.00000000	170.0000	.00000000	.00000000
VARBL 22	FR	170.0000	.00000000	170.0000	.00000000	.00000000
VARBL 23	LL	-1473617-000	.00000000	170.0000	.00000000	-1473617-000
VARBL 24	FR	170.0000	.00000000	170.0000	.00000000	.00000000
VARBL 25	FR	200.4944	200.0000	160.0000	.00000000	-4.494
VARBL 26	FR	200.0000	200.0000	160.0000	.00000000	1.000
VARBL 27	FR	200.0000	200.0000	200.0000	1200.395	.00000000
VARBL 28	FR	200.4944	200.0000	200.0000	.00000000	-4.494
VARBL 29	FR	1238.0000	.00000000	1238.0000	.00000000	.00000000
VARBL 30	FR	-2731346-000	.00000000	1238.0000	.00000000	-2731346-000
VARBL 31	UL	1238.0000	.00000000	1238.0000	-2461739	.00000000
VARBL 32	FR	1238.0000	.00000000	1238.0000	.00000000	.00000000
VARBL 33	FR	-2731346-000	.00000000	1238.0000	.00000000	-2731346-000
VARBL 34	FR	1238.0000	.00000000	1238.0000	.00000000	.00000000
VARBL 35	UL	1238.0000	.00000000	1238.0000	-48.79094	.00000000

VARBL 16	FR	1234.000	.0000000	1234.000	.0000000	.0000
VARBL 17	FR	1234.000	.0000000	1234.000	.0000000	.0000
VARBL 18	LL	.0000000	.0000000	1234.000	102.4491	.0000
VARBL 19	FR	311.0000	311.0000	340.0000	.0000000	.0000
VARBL 40	FR	313.2617	311.0000	340.0000	.0000000	2.262
VARBL 41	FR	313.2617	311.0000	379.0000	.0000000	2.762
VARBL 42	FR	341.0000	311.0000	379.0000	.0000000	18.00

LINEAR CONSTR	STATE	VALUE	LOWER BOUND	UPPER BOUND	LAGR MULTIPLIER	RESIDUAL
LWCON 1	FR	-345.3333	-345.3333	-445.3333	.0000000	-.1744-004
LWCON 2	FR	.0000000	.0000000	.0000000	2.240292	.0000
LWCON 3	FR	-1144400-004	.0000000	.0000000	.0000000	-.1144-004
LWCON 4	FR	-2244418-004	.0000000	.0000000	.0000000	-2.249-004
LWCON 5	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000
LWCON 6	FR	345.3333	345.3333	345.3333	216.8013	.0000
LWCON 7	FR	.0000000	.0000000	.0000000	106.9544	.0000
LWCON 8	FR	.0000000	.0000000	.0000000	-271.8985	.0000
LWCON 9	FR	-5780.000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000
LWCON 10	FR	.0000000	-5780.000	-5780.000	.1174852-001	.0000
LWCON 11	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000
LWCON 12	FR	.0000000	.0000000	.0000000	-2017263-001	.0000
LWCON 13	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000
LWCON 14	FR	.0000000	.0000000	.0000000	5.364362	.0000
LWCON 15	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.1174907-001	.0000
LWCON 16	FR	5780.000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000
LWCON 17	FR	-1234.000	-1234.000	-1234.000	-5.135525	.0000
LWCON 18	FR	.0000000	.0000000	.0000000	-.6726420-002	.0000
LWCON 19	FR	.0000000	.0000000	.0000000	29.77165	.0000
LWCON 20	FR	.0000000	.0000000	.0000000	67.31065	.0000
LWCON 21	FR	.0000000	.0000000	.0000000	-64.78094	.0000
LWCON 22	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.6513544-005	.0000
LWCON 23	FR	.0000000	.0000000	.0000000	295.6508	.0000
LWCON 24	FR	.0000000	.0000000	.0000000	154.8630	.0000
LWCON 25	FR	.0000000	.0000000	.0000000	-368.8847	.0000
LWCON 26	FR	.0000000	.0000000	.0000000	223.5872	.0000
LWCON 27	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000
LWCON 28	FR	101.7536	30.00000	110.0000	.0000000	3.266
LWCON 29	FR	94.53554	30.00000	110.0000	.0000000	15.48
LWCON 30	FR	56.73329	30.00000	59.00000	.0000000	2.762
LWCON 31	FR	53.73364	30.00000	59.00000	.0000000	7.766

NONLNE CONSTR	STATE	VALUE	LOWER BOUND	UPPER BOUND	LAGR MULTIPLIER	RESIDUAL
NLCON 1	FR	-.2192074-001	.0000000	.0000000	.9928255-008	-.2193-001
NLCON 2	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000
NLCON 3	FR	116791.5	116791.5	116791.5	-.4045381	.0000
NLCON 4	FR	2980.000	2980.000	2980.000	-.2964565	.0000
NLCON 5	FR	2800.000	2800.000	2800.000	-.7495419	.0000
NLCON 6	FR	.0000000	.0000000	.0000000	-.2064543-001	.0000
NLCON 7	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000
NLCON 8	FR	1503590.	1503590.	1503590.	.1965710-001	.0000
NLCON 9	FR	-2980.000	-2980.000	-2980.000	.0000000	.0000
NLCON 10	FR	-2790.944	-2790.000	-2800.000	.0000000	-.1563-001
NLCON 11	FR	.0000000	.0000000	.0000000	-.1144140	.0000
NLCON 12	FR	-.8494236-007	.0000000	.0000000	-.1027270	-.8494-007
NLCON 13	FR	446014.0	446014.0	446014.0	-.4500760	.0000
NLCON 14	FR	-2790.946	-2800.000	-2800.000	1.021841	.0000
NLCON 15	FR	-59100.00	-59100.00	-2800.000	-.8694589	3.906-002
NLCON 16	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	-.3906-002

EXIT NP30L - OPTIMAL SOLUTION FOUND.

FIG. G.4 (A) RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SOLUCION DE LA SUPERESTRUCTURA DE LA CORRIENTE CALIENTE 5

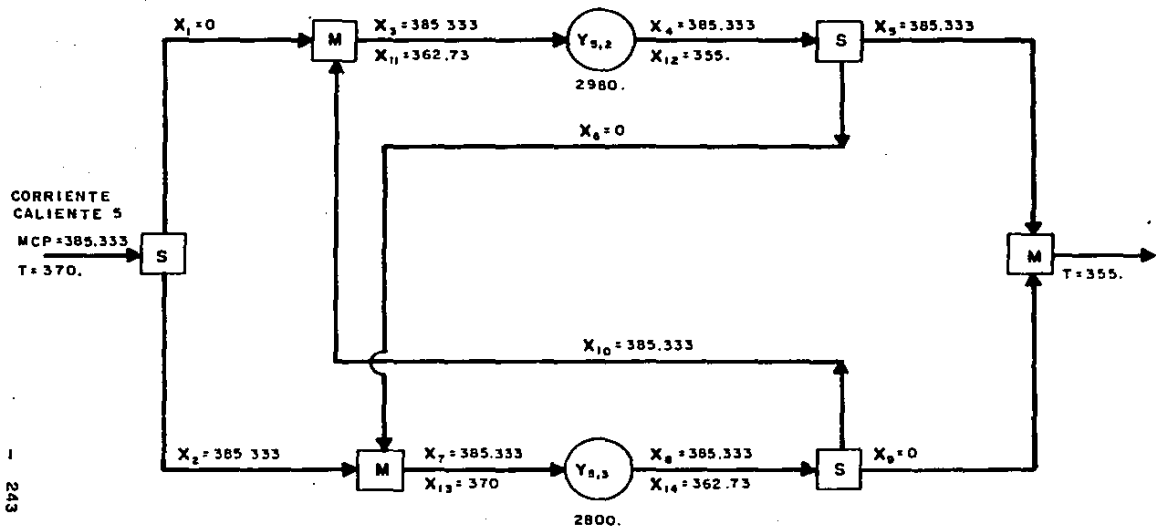




FIG. G.4 (B) RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SOLUCION DE LA SUPERESTRUCTURA DE LA CORRIENTE FRIA 2

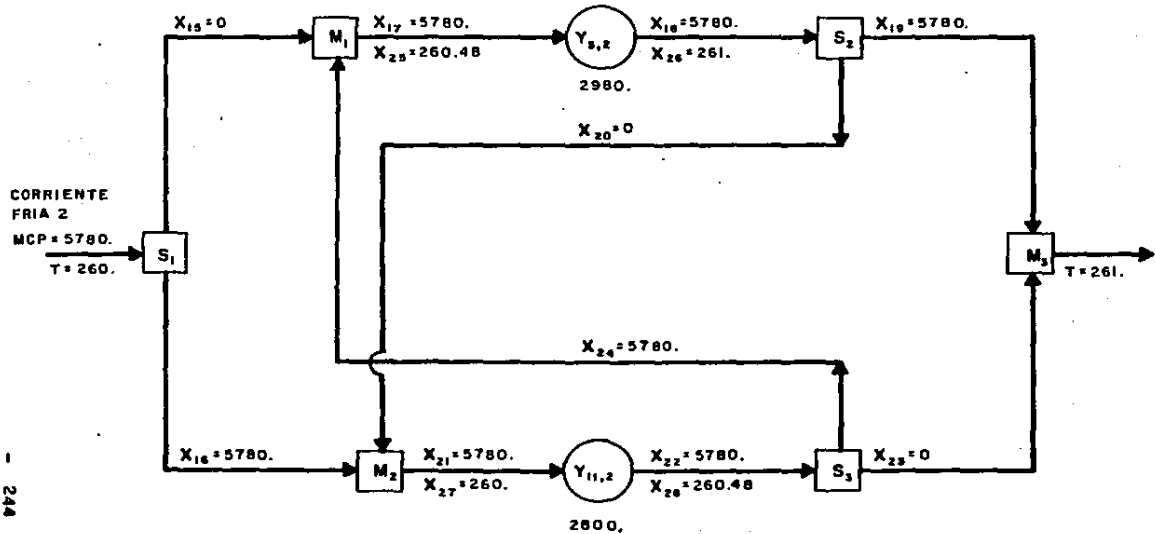
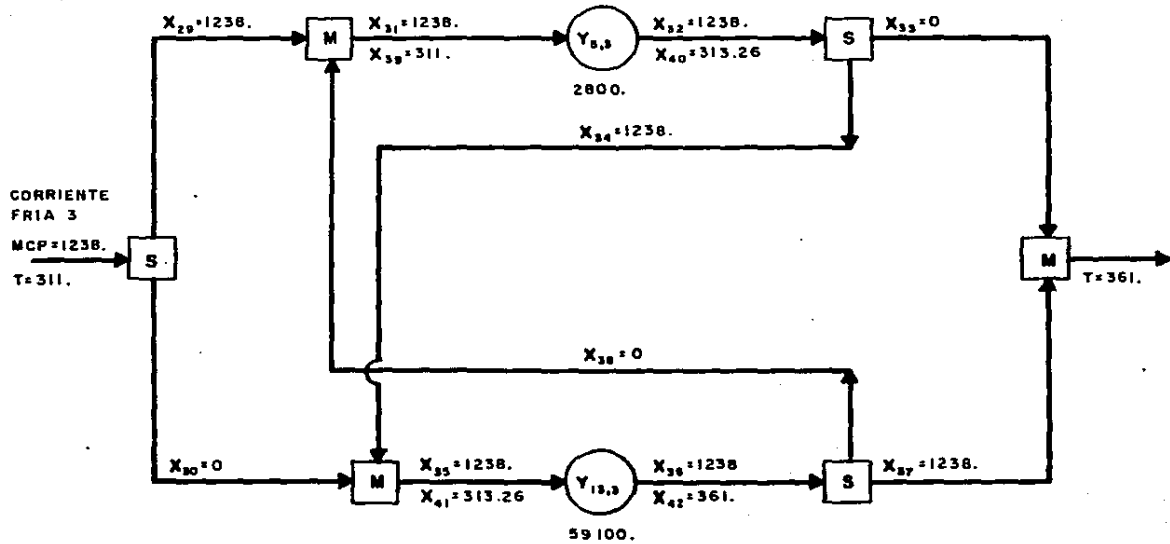


FIG. G. 4 (C) RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SOLUCION DE LA SUPERESTRUCTURA DE LA CORRIENTE FRIA 3



**DATOS DEL LADO FRIO QUE DEBEN SER SUMINISTRADOS POR EL  
USUARIO PARA CORRER EL PROGRAMA DE COMPUTO IV.**

```

NAB#BVMTESZ(1).DATOS-EXTLL/PRUEGATC(6)
1  BRUN RVMMNO,N2520,NAB,5,100 . VYCTOR BRIONES V . EXT 20506
2  @PRT.S BVMTES?.DATOS-EXTLL/PRUEGATC
3  @XQT TPFS.NPQPSOL
4  $DATOS1 RTFPS =0.070, RTOL =100000.00,MSGLVL = 10, EPSMCH =1.0E-6
5  FTA = 0.70, ITMAX =200,INICIA = 1,ITOLER = 0,SEND
6  $DATOS2
7      X( 2) =      50.0000
8      X( 3) =      50.0000
9      X( 4) =      50.0000
10     X( 5) =      50.0000
11     X( 7) =      50.0000
12     X( 8) =      50.0000
13     X(10) =      50.0000
14     X(11) =     107.000
15     X(12) =     150.000
16     X(13) =     105.000
17     X(14) =     107.000
18  SEND

```

```

@XQT TPFS.NPQPSOL

```

**RESULTADOS DEL LADO FRIO GENERADOS POR EL PROGRAMA DE  
COMPUTO IV.**

ROWS OF	A <sub>1</sub>										
1	-1.0	-1.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
2	.0	.0	.0	1.0	-1.0	-1.0	.0	.0	.0	.0	.0
2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.0	-1.0	-1.0	.0
3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
4	1.0	.0	-1.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.0
4	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
5	.0	1.0	.0	.0	.0	.0	1.0	-1.0	.0	.0	.0
5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
6	.0	.0	.0	.0	.0	1.0	.0	.0	.0	1.0	.0
6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
7	.0	.0	1.0	-1.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.0	-1.0	.0	.0
8	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

LOWER BOUNDS.

.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
105.00	105.00	105.00	105.00	-62.22	.00	.00	.00	.00	62.22
.00	.00	.00	.00	9333.33	-2700.00	-100.00			

UPPER BOUNDS.

62.22	62.22	62.22	62.22	62.22	62.22	62.22	62.22	62.22	62.22
163.00	218.00	125.00	128.00	-62.22	.00	.00	.00	.00	62.22
.00	.00	.00	.00	9333.33	-2700.00	-100.00			



INITIAL S. 50.00 50.00 50.00 50.00 .00 50.00 50.00 .00 50.00  
 .00 107.00 150.00 105.00 107.00

WORKSPACE PROVIDED IS 270) M (14400) -  
 TO SOLVE PROBLEM WE NEED 1M (55) M (4091) -

ITER STEP STEP NUMB NFRIT RND LC WC WZ NDRM G1 NDRM G2 CONN H CONN WZ CONN T NDRM C RND CONW  
 0 1 .0 1 1.1661004 4 7 3 0 1.4+002 .00 1.4000 1.4+000 2.4+002 3.46+001 .0 TFFT  
 1 0 1.0+000 2 1.1661004 4 7 3 0 1.4+002 .00 1.4000 1.4+000 2.4+002 2.20+003 .0 TFFT

EXIT NP PHASE. INFORM = 0 MAJITS = 1 NFEVAL = 2 MCFVAL = 2

VARIABLE	STATE	VALUE	LOWER ROUND	UPPER ROUND	LAGR MULTIPLIER	RESIDUAL
VARBL 1	FR	.0000000	.0000000	62.22220	.0000000	.0000
VARBL 2	FR	62.22220	.0000000	62.22220	.0000000	.0000
VARBL 3	UL	62.22220	.0000000	62.22220	-1.279200	.0000
VARBL 4	FR	62.22220	.0000000	62.22220	.0000000	.4768-006
VARBL 5	FR	62.22220	.0000000	62.22220	.0000000	.4768-006
VARBL 6	FR	.0000000	.0000000	62.22220	.0000000	.0000
VARBL 7	FR	62.22220	.0000000	62.22220	.0000000	.0000
VARBL 8	FR	62.22220	.0000000	62.22220	.0000000	.0000
VARBL 9	LL	.0000000	.0000000	62.22220	76.79163	.0000
VARBL 10	UL	62.22220	.0000000	62.22220	-1.331617	.0000
VARBL 11	FR	105.0000	105.0000	105.0000	.0000000	1.607
VARBL 12	FR	125.0000	125.0000	125.0000	.0000000	45.00
VARBL 13	LL	105.0000	105.0000	125.0000	231.0201	.0000
VARBL 14	FR	105.0000	105.0000	125.0000	.0000000	1.607

LINEAR CONSTR	STATE	VALUE	LOWER ROUND	UPPER ROUND	LAGR MULTIPLIER	RESIDUAL
LWCON 1	EQ	-62.22220	-62.22220	-62.22220	-301.2391	.0000
LWCON 2	EQ	.0000000	.0000000	.0000000	-301.2391	.0000
LWCON 3	EQ	.0000000	.0000000	.0000000	-305.8500	.0000
LWCON 4	EQ	.0000000	.0000000	.0000000	-36.99926	.0000
LWCON 5	EQ	.0000000	.0000000	.0000000	-301.2392	.0000
LWCON 6	EQ	62.22220	.0000000	62.22220	-582.6301	.4768-006
LWCON 7	EQ	.4768172-006	.0000000	.0000000	-301.2391	.4768-006
LWCON 8	FR	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000

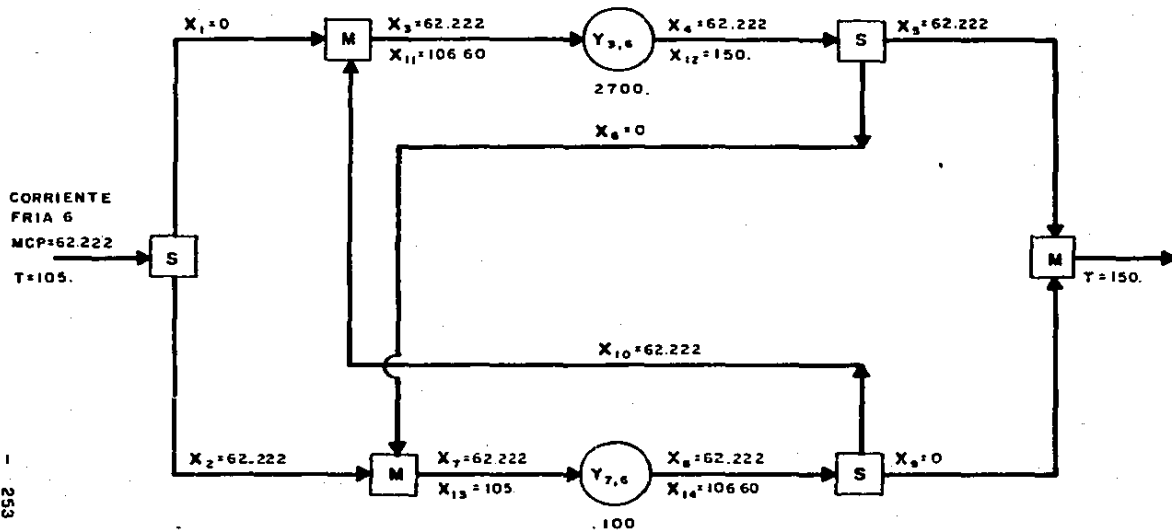
NONLND CONSTR	STATE	VALUE	LOWER ROUND	UPPER ROUND	LAGR MULTIPLIER	RESIDUAL
NLCON 1	EQ	.0000000	.0000000	.0000000	-2.040380	.0000
NLCON 2	EQ	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000
NLCON 3	EQ	933.333	933.333	933.333	1.875939	-1.221-005
NLCON 4	EQ	-2700.002	-2700.000	-2700.000	.0000000	-2.197-002
NLCON 5	EQ	-100.0000	-100.0000	-100.0000	-2.869944	.0000

EXIT NP30L - OPTIMAL SOLUTION FOUND.

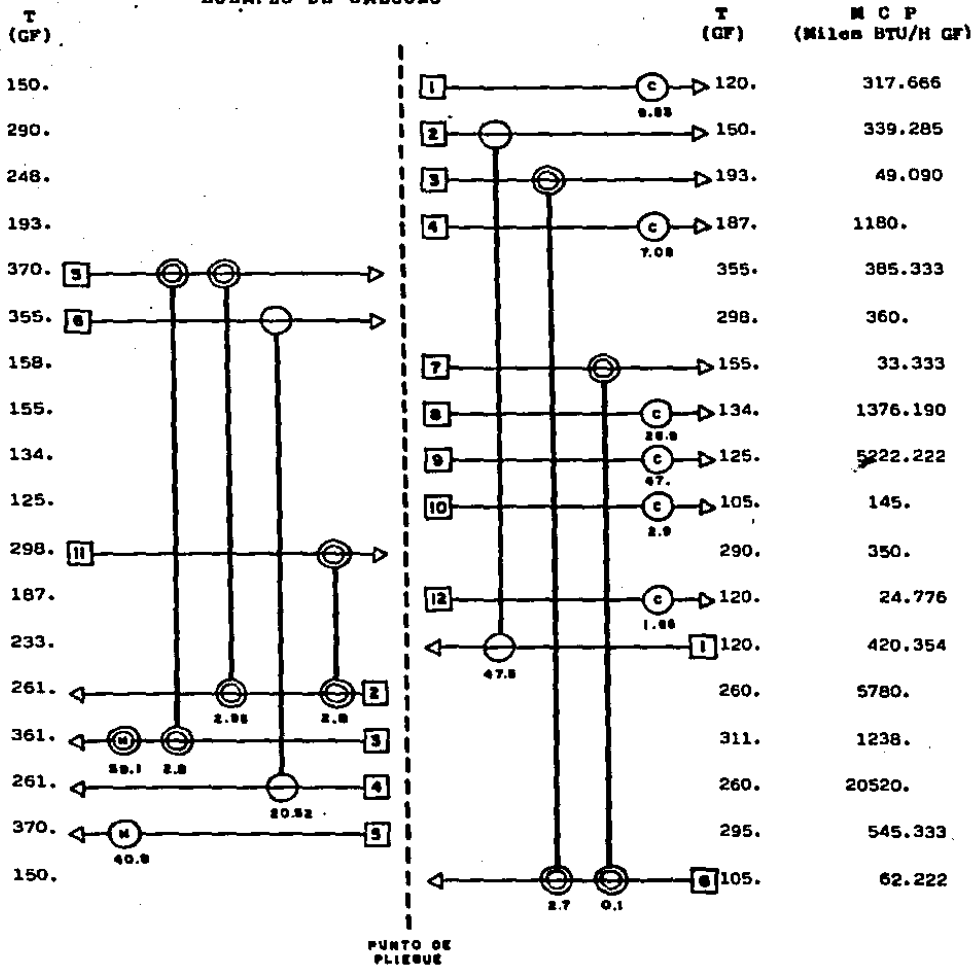
FINAL NONLINEAR OBJECTIVE VALUE = 31660.67

0002.1

FIG. G. 5 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SOLUCION DE LA SUPERESTRUCTURA DE LA CORRIENTE FRIA 6



**FIG. G.6 RED DE INTERCAMBIO DE CALOR RESULTANTE DEL EJEMPLO DE CALCULO**



CANBIADORES OBTENIDOS EN LA SOLUCION DE LAS SUPERRESTRUCTURAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- 1.- Linnhoff B. and Hindmarsh E.,  
The pinch design method for heat exchanger networks.  
*Chem. Eng. Sci.*, 38,5,745,(1983).
- 2.- Linnhoff B. and Flower J.R.,  
Synthesis of heat exchanger networks I:  
Systematic generation of energy optimal networks.  
*A.I.Ch.E.J.*, 24 633,(1978);  
*A.I.Ch.E.J.*, 24 642,(1978).
- 3.- Papoulias B. and Grossmann, I.E.,  
A structural optimization approach in process synthesis.  
Part I: Utility systems.  
*Comput. Chem. Engng.*, 7,693,(1983).
- 4.- Papoulias, B. and Grossmann, I.E.,  
A structural optimization approach in process synthesis.  
Part II: Heat recovery networks.  
*Comput. Chem. Engng.*, 7,707,(1983).
- 5.- Papoulias B. and Grossmann, I.E.,  
A structural optimization approach in process synthesis.  
Part III: Total processing systems.  
*Comput. Chem. Engng.*, 7,723,(1983).
- 6.- Floudas C.A., Ciric A.R. and Grossmann I.E.  
Automatic synthesis of optimum heat exchanger network  
configurations.  
*A.I.Ch.E.J.*, 32,2,276,(1986).
- 7.- Hohmann E.C.,  
Optimum networks for heat exchange.  
Ph.D.Thesis, University of Southern California (1971).
- 8.- Flower J. R. and Linnhoff B.,  
A Thermodynamic combinatorial approach to the design of  
optimum heat exchanger networks.  
*A.I.Ch.E.J.*, 28,1,(1980).

- 9.- Grimes L.E.,  
The synthesis and evolution of networks of heat exchanger that feature the minimum number of units.  
M.Sc. Thesis, Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh 1980.  
*Chem. Eng. Comm.*, 14,339, (1981).
- 10.- Linnhoff B.,  
Process synthesis.  
Undergraduate lecture notes, Imperial College 1980-81.
- 11.- Cerda J., Westerberg A.W., Mason D.R. and Linnhoff B.,  
*Chem. Engng Sci.*, 38,373, (1983).
- 12.- Cerda, J.,  
Transportation models for the optimal synthesis of heat exchanger networks.  
Ph.D. Thesis, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh (1980).
- 13.- Cerda J., Westerberg, A.W., Mason D. and Linnhoff, B.,  
Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis - A transportation problem.  
*Tech. Rep. DRC-06-23-81*,  
Carnegie-Mellon University, Pittsburgh (1981).
- 14.- Cerda J. and Westerberg, A.W.,  
Network flow models for heat exchanger network synthesis; Part 2. Finding minimum match solutions.  
*Tech. Rep. DRC-06-26-81*, Carnegie-Mellon.
- 15.- Cerda J. and Westerberg, A.W.,  
Network flow models for heat exchanger network synthesis; Part 3. Solutions with stream splitting and cyclic structure.  
*Tech. Rep. DRC-06-27-81*. Carnegie Mellon University, Pittsburgh (1981).
- 16.- Barfinkel R.S. and Nemhauser, G.L.,  
*Integer Programming*.  
Wiley, New York (1972).
- 17.- Hillier F.S. and Lieberman, G.J.,  
*Operations Research*.  
Holden-Day, San Francisco (1980).

- 18.- Umeda, T., Harada T. and Shiroko, K.  
A thermodynamic approach to the synthesis of heat  
integration systems in chemical processes.  
*Comput. Chem. Eng.*, 3,373,(1979).
- 19.- Duran, M.A., and Grossmann, I.E.,  
Simultaneous Optimization and Heat Integration of  
Chemical Process,  
*A.I.Ch.E.J.*, 32,123,(1986).
- 20.- Fisher, W.R., Doherty, M.F. and Douglas, J.M.,  
An evolutionary and Hierarchical Procedure for  
Optimization of Preliminary Process Designs,  
Paper 104C, AIChE ann.meet., San Francisco (Nov., 1984).
- 21.- Peterson, M.A.,  
A Replacement for the Logarithmic Mean,  
*Chem. Eng. Sci.*, 39,(11),1635 (1984).
- 22.- Bill P.E., Murray M., Saunders M.A. and Wright M.H.  
User's guide for SOL/QPSOL  
*Report SOL 83-7, Department of Operations Research,  
Stanford University, California.*
- 23.- Bill P.E., Murray M., Saunders M.A. and Wright M.H.  
User's guide for SOL/NPSOL  
*Report SOL 83-12, Department of Operations Research,  
Stanford University, California.*