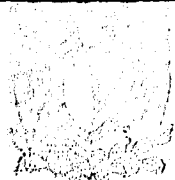


104
2eg.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMEN DE PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

**INTEGRACION TERMICA DEL TREN DE
PRECALENTAMIENTO DE CRUDO DE LA
PLANTA COMBINADA No. 1 DE LA REFINERIA
DE TULA HIDALGO .**

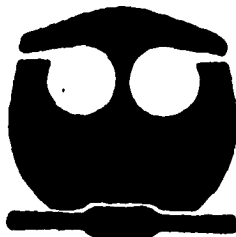
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A I

JUAN DANIEL PACHO CARRILLO



MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

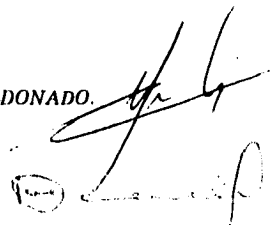
JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: PROF. CARLOS ESCOBAR TOLEDO.
VOCAL: PROF. MANUEL VAZQUEZ ISLAS.
SECRETARIO: PROF. CELESTINO MONTIEL MALDONADO.
1^{ER}. SUPLENTE PROF. JOSE AGUSTÍN TEXTA MENA
2^{DO}. SUPLENTE PROF. RICARDO PEREZ CAMACHO

Lugar donde se desarrolló el tema: Laboratorio de cómputo, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química UNAM.

Asesor del tema: M. EN C. CELESTINO MONTIEL MALDONADO.

Sustentante: JUAN DANIEL PACHO CARRILLO.

Handwritten signatures of the assessor and the student. The assessor's signature is at the top right, and the student's signature is below it, with a circular stamp to the left.

A Rosa María... La más hermosa de las flores.



A quien fue mi mejor maestro amigo y compañero durante todos mis estudios y de quien he recibido las cosas más valiosas en mi vida. Con mi eterna gratitud.



A quien hizo suyos mis logros y estuvo siempre detrás de mí animándome, corrigiéndome y dirigiéndome, gracias a su paciencia y tenacidad he podido terminar este ciclo. Este logro es suyo.



A las personas que siempre estuvieron dispuestas a ayudarme no importando si necesitaba un laboratorio de cómputo o un muñeco para mi avión.



A Mimi, por su alegría.



A todos aquellos que luchan por un país más justo y más libre.

INDICE

<input type="checkbox"/> Capítulo I: Generalidades	1
<i>Alcance del trabajo</i>	<i>1</i>
<i>Planteamiento de objetivos</i>	<i>3</i>
<i>Estructura del trabajo</i>	<i>4</i>
<i>El método del punto de pliegue para</i> <i>diseño de redes de intercambio térmico</i>	<i>6</i>
<i>Antecedentes Históricos</i>	<i>6</i>
<i>Características Generales</i>	<i>8</i>
<i>Significado del punto de pliegue</i>	<i>14</i>
<i>Reglas de combinación</i>	<i>15</i>
<i>Descripción del proceso a evaluar</i>	<i>19</i>
<i>Análisis de configuración de la red</i>	<i>24</i>
<input type="checkbox"/> Capítulo II: Análisis primario	28
<i>Generación y uso de curvas compuestas</i>	<i>29</i>
<i>Uso e importancia de la curva compuesta</i>	<i>30</i>
<i>Gran curva compuesta</i>	<i>32</i>
<i>Uso del supertarget</i>	<i>36</i>
<i>Creación de documentos en supertarget</i>	<i>39</i>
<i>Edición de corrientes</i>	<i>39</i>
<i>Especificación de valores</i>	<i>41</i>
<i>Análisis térmico de la red en configuración actual</i>	<i>43</i>
<i>Curvas compuestas a 9°F</i>	<i>47</i>
<i>Reporte energético a 9°F</i>	<i>51</i>
<input type="checkbox"/> Capítulo III: Análisis por Nuevo Diseño y Reajuste	52
<i>Optimización via objetivos globales</i>	<i>54</i>
<i>Optimización via reajuste</i>	<i>57</i>
<i>Cálculo de áreas</i>	<i>57</i>
<i>Elección del DT_{min}</i>	<i>61</i>
<i>Procedimiento de reajuste de la red</i>	<i>66</i>
<i>Descripción de los análisis realizados</i>	<i>68</i>
<i>Análisis via Nuevo Diseño</i>	<i>68</i>
<i>Análisis por reajuste</i>	<i>72</i>
<input type="checkbox"/> Capítulo IV: Análisis de resultados	78
<i>Resultados del análisis primario</i>	<i>78</i>
<i>Análisis del nuevo diseño</i>	<i>80</i>
<i>Análisis de la red en configuración actual</i>	<i>81</i>
<i>Análisis del reajuste</i>	<i>85</i>

□ Capítulo V: Consideraciones finales	92
<i>Desarrollo del diseño final de la red</i>	93
<i>Curva compuesta del sistema final</i>	99
<i>Gran curva compuesta del sistema final</i>	100
<i>Reporte energético</i>	101
<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	102
<i>Bibliografía</i>	106
<i>Anexo I</i>	109
<i>Anexo II</i>	115

INTRODUCCIÓN

En sus orígenes, en la década de los setentas, el método de pinch surge como una herramienta útil en el diseño de redes de intercambio térmico y como una respuesta a la crisis energética de esos años, sin embargo conforme se fué aplicando a un número mayor de procesos el uso de esta herramienta mejoró y se diversificó, hasta llegar a ser una de las más confiables con las que se cuenta hoy en día para la integración térmica de procesos.

El presente trabajo tiene como objetivo la aplicación de esta tecnología a redes de intercambio de calor existentes, es decir, no se intenta partir de una idea para transformarla en un nuevo proceso, sino de un proceso existente que se considera no utiliza sus recursos energéticos adecuadamente y por lo tanto es susceptible de ser mejorado. Este enfoque es conocido en diseño de procesos como reajuste o retrofit.

En múltiples aplicaciones se ha mencionado que procesos existentes al ser analizados y mejorados con este método han alcanzado ahorros de un 30% en sus consumos de energía y por lo tanto una importante reducción en sus costos de operación; aún en procesos que se habían sometido previamente a optimización^{1,7,8}.¹⁰. Lo anterior se aplicará en la planta combinada No. 1 de la refinería de PEMEX en Tula hidalgo.

Si se logra tal ahorro, el análisis podría extenderse a otras plantas de la refinería que en conjunto pueden también ser mejoradas; ello reviste especial interés debido a la necesidad de PEMEX de hacer más eficientes sus procesos en el nuevo entorno comercial.

CAPITULO PRIMERO:

GENERALIDADES.



ALCANCE DEL TRABAJO

Previo a la aplicación de cualquier análisis se establecerán los alcances del proyecto con el fin de no incursionar en aspectos externos que le resten claridad y le den una extensión excesiva.

En México no es desconocida la aplicación del método de punto de pliegue a plantas de proceso similares a la que se desea trabajar, de hecho existen artículos en diversas publicaciones que presentan análisis hechos a algunas plantas de PEMEX ²¹, sin embargo, el enfoque que se dará será el de reajuste, que como se describirá en su momento es un procedimiento de reutilización de equipos existentes en una planta a la que es aplicado un análisis de punto de pliegue pero bajo los lineamientos y criterios que el reajuste exige.

Por otro lado no se pretende generar un proyecto que permita su aplicación inmediata, pues obviamente una modificación de tales dimensiones requiere de un análisis exhaustivo con datos financieros y económicos que para los alcances de este proyecto no se consideran.

Se pretende exponer la necesidad de que este tipo de análisis se realice en una planta de la industria petrolera, pues en base a múltiples trabajos previos se ha demostrado que los consumos de servicios en estas plantas son muy susceptibles de ser mejorados y por lo tanto de ofrecer la posibilidad de ahorros substanciales que mucha falta hacen a la industria petrolera del país; por ello dentro de las metas de esta tesis se encuentra el aplicar el método de reajuste a la planta citada y proponer mejoras que permitan alcanzar un ahorro superior al 25% en los costos de operación .

Por otro lado se harán comparaciones en los enfoque de reajuste y objetivos globales con el fin de señalar las diferencias que existen en la aplicación de ambos procedimientos sobre el mismo proceso y con ello demostrar como podría aplicarse

el enfoque de objetivos globales a un diseño nuevo y por lo tanto cómo debió ser construida la red.

Debe señalarse que no se considera dentro de los alcances del estudio la generación de un arreglo de equipos que cumpla con las condiciones de mínimo número de unidades pues para ello se requeriría contar con datos específicos en cuanto a situación física disponibilidad de espacio y de criterios de reutilización de área (generalmente establecidos por la dirección de la planta), lo que representa en sí un nuevo estudio; por lo tanto solo se propondrá un arreglo que alcance mínimo consumo de energía y que permita visualizar las modificaciones principales que deban hacerse a la red.

PLANTEAMIENTO DE OBJETIVOS.

Previo al inicio del trabajo, es necesario especificar los criterios en que se basarán las decisiones que haya que tomar y de esta manera se eliminen inconsistencias en la aplicación del método.

Dentro de la información básica, previa a un trabajo de reajuste u objetivos globales debe conocerse la situación económica del lugar en donde se va a implementar la modificación, por ello se recurrió a los datos de servicios que maneja PEMEX para comercio interno, así mismo se utilizaron modelos de cálculos de costos e interés semejantes a los que se han utilizado para otras evaluaciones de este tipo, consultando publicaciones relacionadas ^{7,8}.

Uno de los criterios básicos del reajuste es el límite de inversión, generalmente este criterio es dictado por la directiva de la compañía que pretende mejorar su planta. Debido a la naturaleza de este trabajo no es posible contar con un valor obtenido de tal fuente, por ello se decidió utilizar como patrón el monto fijado en un estudio similar en Inglaterra para una refinería de una capacidad de 100 000 BPD, y se adecuará al caso estudiado. Para el estudio mencionado se fijó una inversión límite de 4.9 millones de dólares, tomando en cuenta que la refinería a estudiar es de 150 000 BPD y que en México las condiciones económicas son diferentes se hará una estimación del tipo factor de potencia aplicado a la relación costo capacidad. Para tal efecto se obtuvieron los índices NELSON - FERRAR para la industria del petróleo correspondientes a los años 1987 (año de implementación del estudio en Inglaterra), y 1994, esto con el fin de considerar las variaciones de los costos a través del tiempo, también se consultó el valor del factor de potencia para una planta como la estudiada ²⁹, con lo que se hizo un estimado de inversión que resultó de la siguiente manera:

Índice de costos 19861090

índice de costos 1994.....1380

factor de potencia0.9

Estimado de inversión8.68 millones de dólares.

El valor previsto por este método, puede tener un +/- 25 % de error, por lo tanto tomando en cuenta la situación económica del país se tomará el límite inferior, quedando el estimado de la inversión en 6.51 millones de dólares y en caso de ser posible se buscará reducir al máximo tal inversión .

Para la selección de la tasa de interés se recurrió al valor usado para operaciones de financiamiento através de organismos internacionales, representado por la tasa LIBOR, que para la fecha del estudio se situó en 6.0625% a 12 meses. (fuente: " EL FINANCIERO")²⁸

Dada las necesidades del país respecto al alto costo del dinero, y a los problemas de liquidez que todas las empresas enfrentan se fijó un periodo de recuperación no mayor a 18 meses.

Para el área se buscará utilizar al máximo la existente y en caso de requerir área extra se usará la que sea necesaria dentro de los límites establecidos en el monto de la inversión.

En el caso de necesitarse hacer alguna decisión sobre condiciones no especificadas en este capítulo se procederá a seleccionar las condiciones que más favorezcan al proyecto, pero siempre especificando las bases de la decisión.

ESTRUCTURA DEL ANÁLISIS.

Para un manejo más sencillo de la información de esta tesis se presenta la forma en que se estructurará el análisis.

En el primer capítulo se exponen generalidades del trabajo.

En el segundo capítulo se presentarán los conceptos básicos del método y el uso y significado de las curvas primarias, posteriormente se describirá el proceso que se evaluará y acto seguido se le aplicará el análisis básico previamente expuesto a la planta en cuestión.

En el capítulo tercero se explicarán los fundamentos del análisis por objetivos globales y se aplicarán al proceso buscando establecer las condiciones en las que se debería haber diseñado la red, para que desde un principio utilizara sus recursos de forma adecuada. Posteriormente se abordará el análisis de reajuste y se aplicarán sus criterios a la red existente, por último se generarán los documentos que permitan especificar las condiciones para la readaptación de la red.

En el capítulo cuarto se hará el análisis de los documentos generados en cada una de las evaluaciones anteriores, se hará un diagnóstico de las combinaciones de corrientes y en general de la configuración de la red existente y se expondrán los resultados finales, es decir las propuestas de mejora a la planta.

En el capítulo quinto se presentará una propuesta de configuración óptima de la red y los documentos que la describan, por último se harán conclusiones y recomendaciones.

EL MÉTODO DE PINCHI PARA DISEÑO DE REDES DE INTERCAMBIO TÉRMICO

☒ ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Durante mucho tiempo los procesos químicos tenían por objetivo el alcanzar un nivel de producción determinado sin tomar en cuenta el nivel consumo de servicios ya que el uso de recursos naturales no estaba reglamentado y su costo era mínimo.

Con el aumento en el número de fabricas en una misma zona y su consecuente demanda de servicios, el consumo de los mismos empezó a ser reglamentado con el fin de satisfacer las demandas de la creciente industria.

Posteriormente el deterioro ambiental que produjo la utilización inadecuada de recursos naturales aunado a procesos que no contaban con tecnologías limpias impulsaron las primeras legislaciones en materia ambiental con el objetivo de regular el uso de agua y restringir emisiones de desechos contaminantes al ambiente.

Con el aumento del comercio mundial se produjeron varios conflictos de orden económico, que exigieron a la compañías mejorar precio y calidad en sus productos con el fin de poder permanecer en los mercados. Por ello se creó la necesidad de estudiar el procedimiento por el cual se obtenía algún bien y detectar posibilidades de mejorarlo, para así reducir los costos de manufactura, cumplir con los lineamientos ambientales y ofrecer mejores precios.

Para la industria química las condiciones de producción cambiaron notablemente cuando a principios de los setentas el mundo árabe anuncio aumentos en el precio del petróleo que ocasionó, para todas las empresas, la necesidad de reducir su consumo y aún más economizarlo.

Así múltiples centros de investigación se dieron a la tarea de formular nuevos métodos de optimización de procesos, tendientes a disminuir el consumo de servicios en base a la mejora del método de manufactura.

Durante los trabajos realizados por Umeda y colaboradores y Linhoff y colaboradores durante mediados de los setentas, se encontró que al realizar un balance de energía cuidadoso a un grupo de corrientes frías y calientes pertenecientes a un proceso y expresar gráficamente dicho balance, se encontraba una región crítica en el transporte de calor que dividía al proceso en dos áreas de características definidas.¹

Este fenómeno fue ampliamente estudiado y reportado en diversos artículos entre 1975 y 1978 que fué cuando se dió el nombre con que se conoce a esa región particular, que es el punto de pliegue o por su nombre en inglés *pinch*.

Aún que se conoció la existencia de tal punto desde mediados de 1978 no fué sino hasta 1983 que Linhoff y Hindmarsh publicaron "*The Pinch Design Method For Heat Exchanger Networks*"¹ que se dió uso a esta característica como método de optimización. Posteriormente el uso de la herramienta se diversificó y se difundió de tal forma que en la actualidad es uno de los más utilizados.

A diferencia de otros métodos en que la solución se obtiene del uso de herramientas de programación implementadas en computadoras ofrecen mínima flexibilidad en la selección de objetivos, el método de pinch permite una interactividad con el proceso que lo hace versátil y atractivo, ya que su aplicación no se limita a encontrar arreglos de redes de cambiadores sino que se ha extendido a sistemas de destilación, bombas de calor, cogeneración, hornos, procesos por lotes, etc. además de que contempla objetivos no energéticos como costos, inversiones, operabilidad, tratamiento de residuos y emisiones.¹²

El método, aunque no deja de ser causa de controversia, ha encontrado buena aceptación debido a que el diseñador puede mantener el control del proceso seleccionando objetivos, considerando la operabilidad de los cambios y así dirigir el diseño no solo hacia una eficiencia termodinámica sino también hacia una funcionabilidad que lo haga industrialmente aceptable.

☒ CARACTERÍSTICAS GENERALES.

La red de intercambio térmico de un proceso es un aspecto clave en el diseño del mismo, generalmente de 20 - 30% de reducción en consumo de energía unido a ahorros de capital pueden ser alcanzados optimizando esta sección del proceso. La tarea consiste en colocar intercambiadores de calor para calentar y enfriar procesos desde determinadas condiciones de suministro hasta las condiciones de temperatura requeridas. El objetivo es la minimización de los costos totales a través de la disminución de costos de inversión y de operación expresados en gastos anuales.

El desarrollo de métodos para lograr esta meta empezó a ser caso de estudio desde principios de los años setentas, pero para principios de los ochentas dos descubrimientos en el campo cambiaron radicalmente la forma de concebir el problema: La temperatura del punto de pliegue (pinch) y el desempeño de los objetivos en el diseño de la red.

- ◆ La temperatura del punto de pliegue representa un cuello de botella en el transporte de energía de la red.

- ◆ Los objetivos generales de la red permiten sentar las bases del diseño con anterioridad a su desarrollo, esto es, al determinar desde un principio los objetivos de área mínima, mínimo consumo de servicios y mínimo número de unidades, el

diseñador puede iniciar su trabajo con la confianza de que se acerca aun diseño óptimo.

✗ LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE PLIEGUE.

Para la localización del punto de pliegue se hará uso de algunos valores que se presentan en la tabla 1.1 y que contienen los datos indispensables para la realización de esta tarea (estos datos fueron creados específicamente para ilustrar el método y no necesariamente representan un caso real). Una vez que se han identificado las corrientes que tomarán parte en la red de intercambio, es necesario conocer los datos de capacidad calorífica (Cp), flujo másico (W), y temperaturas de suministro (Ts) y objetivo (Tt). De los datos anteriores se desprende la clasificación de las corrientes en frías y calientes , donde las corrientes frías son aquellas que requieren calentarse, ($T_s < T_t$) , y las corrientes calientes son las que deben ser enfriadas para cumplir con las condiciones del proceso ($T_s > T_t$).

Corriente tipo	WCp	T _s	T _t
1 fría	2.0	20	135
2 fría	4.0	80	140
3 caliente	1.5	150	30
4 caliente	3.0	170	60

Tabla 1.1

La aplicación de la metodología pinch dividirá al sistema en dos regiones de características determinadas que deberán cumplir ciertas condiciones en el uso de energía para garantizar su máxima recuperación y por lo tanto su mínimo consumo.

Para encontrar el punto de pliegue debe de seguirse el siguiente algoritmo:

> Seleccionar un ΔT_{\min} para la red.- Este valor es el máximo acercamiento entre dos corrientes que vayan a intercambiar calor , y se aplicará al diseño de todos los equipos de la red.

> Construir una tabla de temperaturas corregidas .- En esta tabla se ordenan de forma decreciente todas las temperaturas de las corrientes agrupando en calientes y frías, de tal manera que si se tienen dos corrientes calientes se tendrán cuatro temperaturas ordenadas (2 Tt y 2 Ts). Se hace lo mismo con las temperaturas frías pero a estas se les sumara el valor del ΔT_{\min} . Una vez hecho lo anterior se ordena nuevamente en forma descendente considerando tanto a corrientes calientes como frías. Como segundo paso se repite la secuencia solo que ahora se

•Ordenamiento de corrientes frías								
140	135	80	20	(Corrientes frías)				
160	140	50	20	(Corrientes calientes - ΔT_{\min})				
140	140	140	135	80	50	20	20	ordenamiento 1
•Ordenamiento de corrientes calientes								
170	150	60	30	(Corrientes calientes)				
150	145	90	30	(Corrientes frías + ΔT_{\min})				
170	150	150	145	90	60	30	30	ordenamiento 2

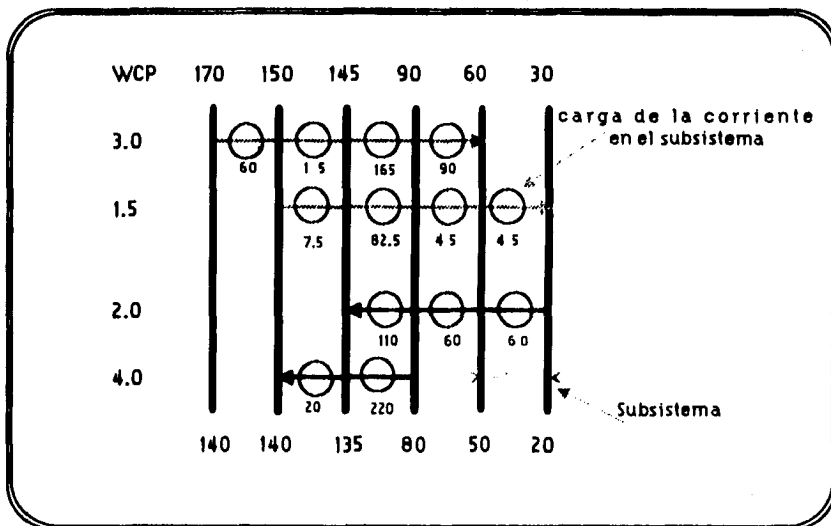
les restará el valor del ΔT_{\min} a las corrientes calientes en tanto que las corrientes frías permanecerán sin cambio, tras lo cual se procederá nuevamente a ordenar temperaturas.

tabla 1.2

> En el ordenamiento anterior se verifica que no se excedan los límites de uno y otro tipo de corrientes; estos límites son los valores máximos y mínimos que

resultan después del ordenamiento de las temperaturas de cada grupo de corrientes, así cuando se agrupan todas las temperaturas, si existiera alguna que excediera estos límites deberá ser remplazada por el límite correspondiente. Lo anterior se verifica para cada uno de los dos ordenamientos. Es importante señalar que si en el ordenamiento existen dos corrientes de igual valor ($\Delta T_{min} = 0$) no se considerará una de ellas.

> El ordenamiento hecho determina los subsistemas, que corresponden a los



intervalos de temperatura. Para su mejor visualización debe reproducirse estos datos en un diagrama que permita la colocación de las corrientes en el, identificando las temperaturas suministro y objetivo, como se indica en el esquema siguiente.

fig.1.1

$$\sum Q_{jccal} - \sum Q_{jcfria} = Q_{subi}$$

➤ Para cada subintervalo se calcula la carga de calor de cada corriente realizando el producto $WCp \Delta T$ del intervalo. Para obtener la carga total del subsistema se suman todas las cargas de las corrientes que existan en el.

➤ Una vez hecho este cálculo, se obtiene el flujo de calor de un subsistema al siguiente, que se conoce como cascada. La cascada nos permite conocer los requerimientos totales de servicios y particularmente la localización del punto de pliegue.

Para obtener los resultados mencionados, se adiciona una cantidad de calor a la primera etapa de la cascada de manera que se obtenga en un subsistema un flujo de calor igual a cero o muy cercano a cero.

Para el caso que se maneja se tiene

$\Sigma Q_{jcc} - \Sigma Q_{jcf}$
60
2.5
-82.5
75
-15

* se adiciona $Q^*=20$ y se obtiene:

$\Sigma Q_{si} + \Sigma Q_{si+1}$
20
80
82.5

➤ Para cada subintervalo se calcula la carga de calor de cada corriente realizando el producto $WCp \Delta T$ del intervalo. Para obtener la carga total del subsistema se suman todas las cargas de las corrientes que existan en el.

➤ Una vez hecho este cálculo, se obtiene el flujo de calor de un subsistema al siguiente, que se conoce como cascada. La cascada nos permite conocer los requerimientos totales de servicios y particularmente la localización del punto de pliegue.

Para obtener los resultados mencionados, se adiciona una cantidad de calor a la primera etapa de la cascada de manera que se obtenga en un subsistema un flujo de calor igual a cero o muy cercano a cero.

Para el caso que se maneja se tiene

$\Sigma Q_{jcc} - \Sigma Q_{jcf}$
60
2.5
-82.5
75
-15

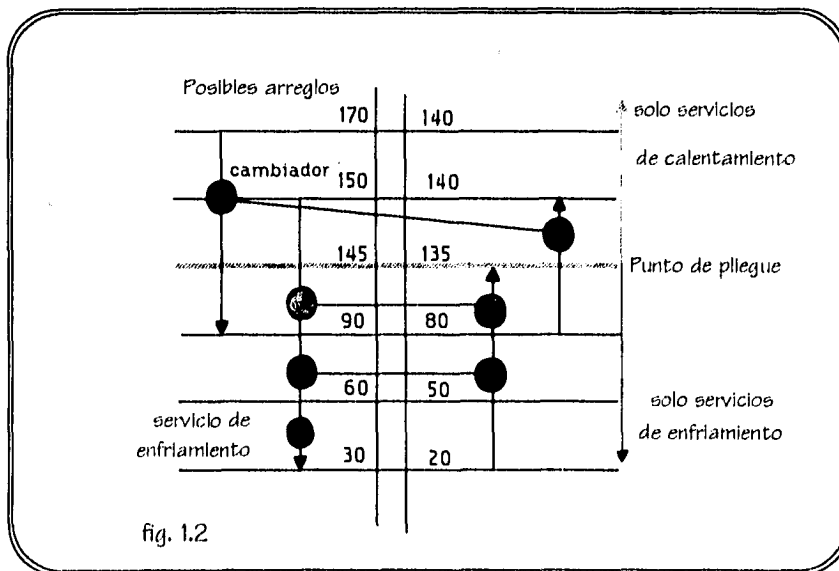
* se adiciona $Q^*=20$ y se obtiene:

$\Sigma Q_{si} + \Sigma Q_{si+1}$
20
80
82.5

0
75
60

➤ De lo anterior se obtiene que el pinch se localiza en $T = 145^\circ\text{F}$ para las corrientes calientes y a $T = 135^\circ\text{F}$ para las corrientes frías, Además se observa que el mínimo requerimiento de servicios de calentamiento es 20 y el mínimo requerimiento de servicios de enfriamiento es 60.

Para el manejo más sencillo de estos datos se recomienda utilizar el diagrama de red¹, esta herramienta permite visualizar mejor el punto de pliegue, las zonas en que se divide el problema, los acoplamientos de temperatura, valores de C_p en el pinch, número y tipo de corrientes y representar divisiones de corrientes, entre otras cosas. En la figura 1.2 se presenta un diagrama de red para el ejemplo seguido.



SIGNIFICADO DEL PUNTO DE PLIEGUE.

Como ya se ha mencionado la localización del punto de pliegue es de especial importancia en el diseño de una red de intercambio térmico, porque nos determina los límites de la zona más restringida del proceso, donde se encuentran combinaciones de corrientes que resultan cruciales y que si no son bien establecidas se corre el riesgo de transferir calor através del pinch.

El punto de pliegue divide al sistema en dos problemas independientes donde la existencia de criterios específicos bien determinados permiten aproximarse más rápidamente al diseño final, sin correr el riesgo de cometer errores que obliguen a repetir el diseño, ya que se parte de la zona más restringida y se avanza hacia las zonas que ofrecen mayor flexibilidad, así el número de restricciones topológicas se reduce y el diseño resulta más sencillo, de igual forma el diseñador puede utilizar su experiencia eligiendo las combinaciones más adecuadas en vía de un diseño más seguro y controlable.

En las zonas que es dividido el sistema, una zona representa un receptor de calor en tanto que la otra es un productor de calor; por lo tanto el transferir calor entre estas dos zonas resultaría en una doble penalización: aumento de servicios en ambos lados del pinch

Para el mejor entendimiento de las características del método, Hindmarsh y Linhoff^{1,25} recomiendan tener en cuenta los siguientes criterios:

- ◆ No transferir calor através del punto de pliegue.
- ◆ No utilizar servicios de enfriamiento arriba del punto de pliegue.
- ◆ No utilizar servicios de calentamiento abajo del punto de pliegue.

Para asegurar el logro de mínimo consumo de servicios (MER) debe de cumplirse dos grupos de condiciones:

- Número de corrientes y ramificaciones.

- Desigualdades de Cp para combinaciones individuales.
- Diferencia de capacidades caloríficas.

Las condiciones anteriores establecen las bases para la solución del problema en la zona de conflicto y determinan si un diseño es susceptible de alcanzar el MER, por lo tanto se debe verificar una vez localizado el punto de pliegue que:

◆ La población de corrientes calientes en el pinch es compatible con el MER si para cada combinación en el pinch hay una corriente caliente.

$$NCC \leq NCF$$

donde NCC y NCF representan el número de corrientes o ramificaciones.

Los argumentos inversos aplican para la zona fría. Para evitar servicios extra de calentamiento debe existir una combinación para cada corriente fría.

$$NCC \geq NCF$$

Si no es posible alcanzar estas condiciones será necesario hacer divisiones de corrientes recordando que NCC y NCF representan el número de corrientes o ramificaciones.

◆ El segundo criterio es concerniente con la temperatura en las combinaciones de corrientes alrededor del punto de pliegue, donde no es posible que la fuerza motriz, ΔT_{\min} , disminuya. Para que esta condición sea cumplida, las siguientes inecuaciones del CP deben ser llevadas a cabo:

- ▶ Para la zona caliente $WCpCC \leq WCpCF$
- ▶ Para la zona fría $WCpCC \geq WCpCF$

donde el WCp es el producto capacidad calorífica - flujo másico para cada corriente o ramificación.

Si un arreglo de combinaciones que cumplan estas condiciones no es posible, es necesario modificar uno o más WCp a través de división de corrientes.

Debe notarse que las desigualdades solo aplican en el punto de pliegue, lejos de la zona puede aumentarse lo suficiente para permitir arreglos en los cuales se violen tales condiciones.

◆ El tercer punto corresponde a la diferencia en capacidades caloríficas. Para comprender mejor este concepto es necesario definir ΔC_p :

Para la zona arriba del pinch:

$$\Delta C_p = C_p cc - C_p cf$$

Para la zona abajo del pinch:

$$\Delta C_p = C_p cf - C_p cc$$

Ecuaciones similares pueden ser escritas para la suma global del CP de las corrientes calientes y frías:

Arriba del pinch:

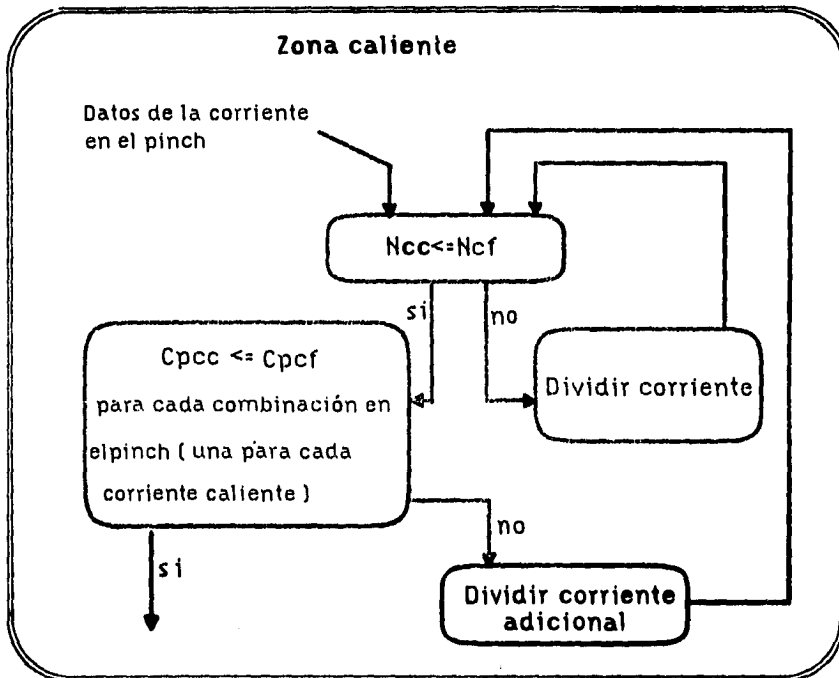
$$\sum_{NC}^1 C_p cf - \sum_{NC}^1 C_p cc$$

Abajo del pinch:

$$\Delta C_{p global} = \sum_{NC}^1 C_p cc - \sum_{NC}^1 C_p cf$$

La utilidad de las ecuaciones anteriores reside en la posibilidad de identificar combinaciones de corrientes que pueden ser factibles entre si pero no son compatibles con la red entera, esto es, el ΔC_p individual puede ser igual o menor al valor del ΔC_p global, pero si resulta mayor a la diferencia de Cp global, esa combinación impediría alcanzar un arreglo adecuado.

El algoritmo de aplicación de estos criterios se muestran en las figuras siguientes.

fig. 1.4 Fuente ^{1, 25}

Con la aplicación de los procedimientos descritos se asegura un diseño de buenas características térmicas; el diseño deberá irse adecuando a las necesidades del proceso conforme se avance alejándose del punto de pliegue.

En el siguiente esquema se resumen los pasos básicos del método.

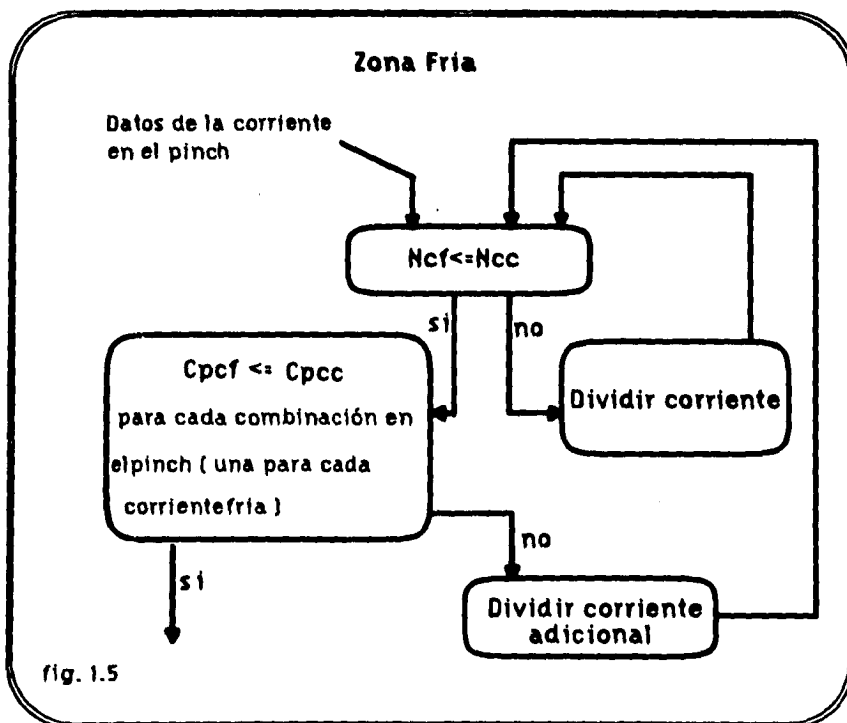
- ☑ Determinar el punto de pliegue y determinar las dos zonas del sistema.
- ☑ Considerar ambas secciones por separado, empezar el diseño partiendo del punto de pliegue y desarrollar el diseño alejándose de el, aplicando los criterios de factibilidad
- ☑ Cuando existan varias opciones el diseñador es libre de adecuar las combinaciones a las necesidades del proceso.

☑ Establecer las cargas de los cambiadores teniendo en cuenta el número mínimo de unidades.

En el último punto se hace énfasis en otro factor del método de pinch: la consideración de los objetivos económicos, que involucran tanto a los servicios del proceso (costos fijos), como a la inversión en equipo (costos variables).

Dentro de este aspecto existen diferentes formas de abordar el tema; una es el diseño de todos los equipos de la red (nuevo diseño) y otra la adaptación de equipos existentes a una red que se desea mejorar (reajuste).

Como ya se mencionó, en este trabajo se pretende aplicar la segunda orientación. En el capítulo siguiente se describen los aspectos fundamentales de este procedimiento, así como el uso de conceptos de los objetivos globales en el cumplimiento de las metas generales de diseño



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En las secciones anteriores se presentaron los principios básicos del método del punto de pliegue; ahora se aplicarán tales principios al proceso base del estudio.

Para poder aplicar este análisis fundamental a una planta de gran tamaño, como es la que se desea analizar, debe hacerse una consideración detallada de equipos y corrientes que puedan incluirse en la red de intercambio térmico, para no omitir alguno o hacer consideraciones erróneas en cuanto a establecimiento de objetivos o selección de servicios.

El proceso que se analizará corresponde a la planta combinada No. 1 de la refinería Miguel Hidalgo que se encuentra en Tula Hgo. La planta es de tecnología IMP y fué construida junto con toda la refinería en 1976.

La configuración de la planta es similar a cualquier otra planta de destilación atmosférica y de vacío, por ello al describir el proceso se pondrá énfasis en los equipos involucrados en el intercambio de energía más que en la configuración de la misma.

La planta tiene una capacidad de 150 000 barriles por día, procesa crudo tipo istmo de 32° API y en ocasiones mezcla de crudo Istmo - Poza Rica.

Se carga una corriente de crudo a 67 °F y se envía a precalentamiento contra recirculaciones de la torre y productos de destilación, la corriente se divide en dos partes de igual flujo antes de entrar al tren de precalentamiento.

La primera parte de la corriente intercambia calor con los equipos A donde se tiene la siguiente configuración:

EQUIPO NO.	FLUIDO TUBOS	FLUIDO ENVOLVENTE
EA-101	CRUDO	NAFTA PESADA
EA-102A	CRUDO	QUEROSINA

EA-103A	CRUDO	GOLP
EA-104A	CRUDO	GOLV
EA-105A	CRUDO	REFLUJO GOLP
EA-106A	GOPP	CRUDO
EA-107A	CRUDO	GOPV
EA-108A	RESIDUO DE	CRUDO

La segunda parte de la corriente se envía a calentamiento através de los cambiadores *B* que tienen los siguientes arreglos:

EQUIPO NO.	FLUIDO TUBOS	FLUIDO ENVOLVENTE
EA-102B	CRUDO	QUEROSINA
EA-103A	CRUDO	GOLP
EA-104A	CRUDO	GOLV
EA-107C	CRUDO	GOPV
EA-105A	CRUDO	REFLUJO GOLP
EA-106A	GOPP	CRUDO
EA-107A	CRUDO	GOPV
EA-108A	RESIDUO DE VACIO	CRUDO

Tablas 1.3 y 1.4

Las corrientes se unen al salir de los equipos 108 A y B que poseen una temperatura de 505°F y 414°F respectivamente, después de mezclarse alcanzan una temperatura de 446°F.

La corriente unificada se introduce a la despuntadora DA-101. Por los fondos de este equipo se obtiene una mezcla de hidrocarburos pesados que se envían a

calentamiento a fuego directo en el horno BA-101, el producto del domo que consiste en nafta ligera y gases combustibles se envía a los condensadores de nafta de despunte y posteriormente a acumuladores en límite de baterías.

La corriente que se introduce en el horno eleva su temperatura de 446 a 682 °F y posteriormente se envía a destilación atmosférica en la torre DA-102.

Como producto de la destilación se obtiene nafta ligera por el domo, como productos laterales nafta pesada, querosina, gasóleo ligero y gasóleo pesado primario y por los fondos de la torre se obtiene residuo pesado que se envía a la sección de destilación al vacío.

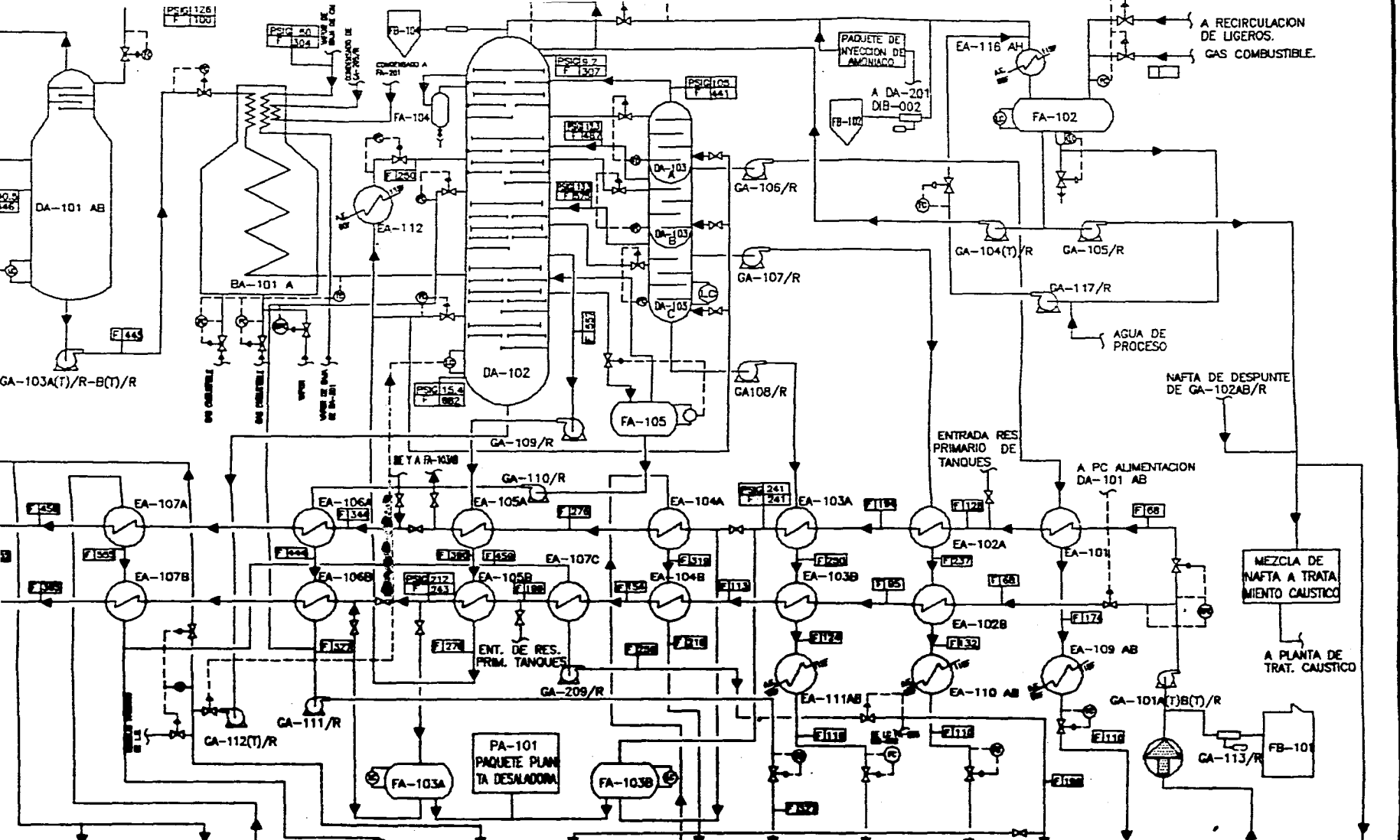
Los productos intercambian calor con la carga de crudo y luego son acondicionados através de servicios de enfriamiento que los llevan a su temperatura final de 110°F.

La corriente de residuo pesado es llevada a calentamiento al horno BA-201 donde se eleva su temperatura de 650 a 725°F. La corriente una vez precalentada se introduce a la torre de vacío DA-202 donde se obtienen como productos gasóleo ligero de vacío, gasóleo pesado de vacío y residuo pesado de vacío que junto con el GOPP se envían a la sección de desintegración catalítica.

De esta sección de la planta se utilizan recirculaciones y corrientes de productos para intercambiar calor en los equipos EA-104 A/B, EA-108 A/B y EA 107.

Como servicios de calentamiento se utiliza gas combustible y para enfriamiento se utiliza agua de 90°F.

Los diagramas de flujo de proceso se anexan a continuación. Dichos diagramas fueron generados en base a los proporcionados por PEMEX e incluyen todas las modificaciones hechas a la planta, es decir representan el sistema tal y como está configurado en la actualidad. figuras 1.6 y 1.7



DOR AD 2	RESIDUO AV RV A ALMACE- NAMIENTO	RESIDUO PRIMARIO A AL MACENAMIENTO	G.O.P. "AV" GA-202 DIB-002	REFLUJO PESA- DO "AV" A EA-203 AB	RESIDUO PESA- DO A CALENTA- DOR BA-201	MEZCLA DE GASOLEO A AL MACENAMIENTO	GOL AV DE GA-203 Y A EA-201 AB	GOP PRIMARIO A DESINTEGRA- CION CATALITICA	GOL PRIMARIO A ALMACENA- MIENTO	QUEROSINA A ALMACENA- MIENTO.	GOP "AV" A DESINT. CA- TALITICA	NAFTA PESA- DA A ALMA- CENAMIENTO	CRUDO DE CAR- GA DE LIMITE DE BATERIAS	MEZCLA DE NAFT- AS A HIDROGE- NULACION
04	GA-112 (T)/R	GA-111/R	GA-111/R	FA-103 AB	GA-209/R	FA-105	GA-107/R	GA-108/R	GA-101A(T)B(T)/R	GA-113/R	GA-113/R	GA-113/R	GA-113/R	GA-117/R
R DE	BOMBA DE FONDOS DE TORRE ATMOSFERICA 3000GPM; ΔP=230 psi	BOMBA DE PRODUCTO GASOLEO PESADO PRIMARIO 210GPM ΔP=130psi	BOMBA DE PRODUCTO GASOLEO PESADO PRIMARIO 210GPM ΔP=130psi	DESALADORAS DE CRUDO ID=10'02" TI=05'0"	BOMBA DE GOP DE NV. 685 GPM ΔP=40psi	TANQUE DE GOP. ID=7'0" TI=15'0"	BOMBA PRODUCTO GOLP 500GPM ΔP=90 psi	BOMBA DE CARGA DE CRUDO 2400GPM; ΔP=350psi	BOMBA DE INYECCION DESCALIFICANTE 40GPM; ΔP=30psi	BOMBA DE INYECCION DESCALIFICANTE 40GPM; ΔP=30psi	BOMBA DE INYECCION DESCALIFICANTE 40GPM; ΔP=30psi	BOMBA DE INYECCION DESCALIFICANTE 40GPM; ΔP=30psi	BOMBA DE INYECCION DESCALIFICANTE 40GPM; ΔP=30psi	BOMBA DE INYECCION DESCALIFICANTE 40GPM; ΔP=30psi

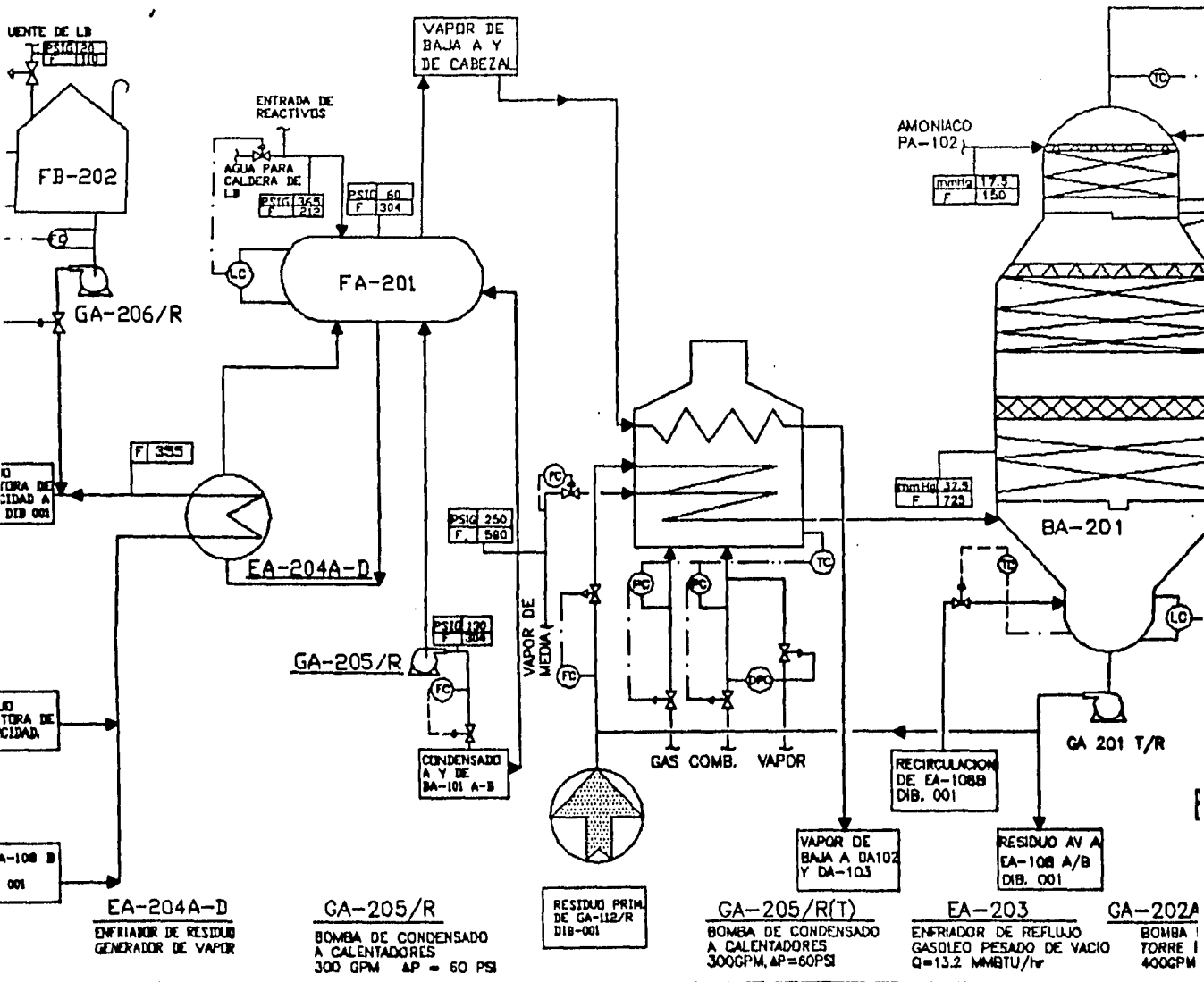


U. N. A. M.
FACULTAD DE QUIMICA

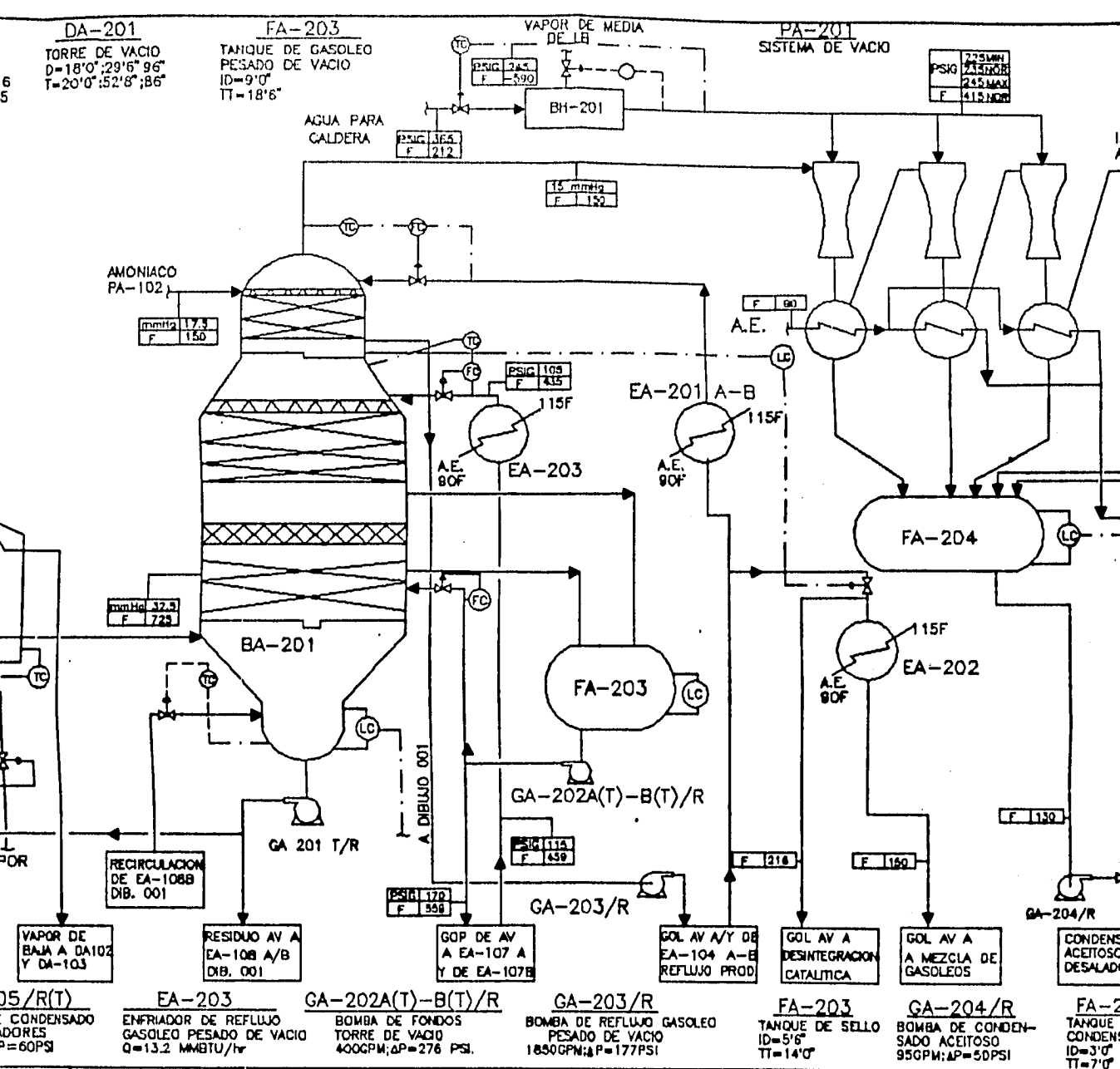
PLANTA DE DESTILACION
COMBINADA No.2
PETROLEOS MEXICANOS

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO
SECCION DESTILACION ATMOSFERICA
DIBUJO: STN ESCALA ENERO 1966

3-202 MOLDE DE LIENTE = 6' 0" = 8' 0"	GA-206/R BOMBA DE DILUYENTE 330GPM AP=300PSI	FA-201 TANQUE DE CONDENSADO ID = 8'0" TT = 17'0"	BA-201 CALENTADOR DE CRUDO REDUCIDO OHC = 79.4x1.16 = 92.16 QV = 1.882x1.25 = 2.35 BAJA PRESION.	DA-201 TORRE DE VACIO D=18'0";29'6" 96" T=20'0";52'8";86"	FA-203 TANQUE DE GASOLEO PESADO DE VACIO ID=9'0" TT=18'6"
--	--	---	--	---	--



U. N. A.
FACULTAD DE QU



DA-201
TORRE DE VACIO
D=18'0"; 29'6" 96"
T=20'0"; 52'8"; 86"

FA-203
TANQUE DE GASOLEO
PESADO DE VACIO
ID=9'0"
TT=18'6"

VAPOR DE MEDIA
DE LB

PA-201
SISTEMA DE VACIO

728MM
PSIG
245MM
F
415MM

PSIG
365
F
212

15 mmHg
F
152

mmHg
17.3
F
150

F
90

mmHg
32.3
F
722

PSIG
109
F
415

PSIG
170
F
358

PSIG
114
F
459

F
130

F
150

F
216

CONDENSADO
DOROS
P=60PSI

EA-203
ENFRIADOR DE REFLUJO
GASOLEO PESADO DE VACIO
Q=13.2 MMBTU/hr

GA-202A(T)-B(T)/R
BOMBA DE FONDOS
TORRE DE VACIO
400GPM; ΔP=276 PSI

GA-203/R
BOMBA DE REFLUJO GASOLEO
PESADO DE VACIO
1850GPM; ΔP=177PSI

FA-203
TANQUE DE SELLO
ID=5'6"
TT=14'0"

GA-204/R
BOMBA DE CONDENSADO
ACEITOSO
95GPM; ΔP=50PSI

FA-204
TANQUE DE VACIO
ID=3'0"
TT=7'0"

U. N. A. M.
FACULTAD DE QUIMICA

PLANTA DE DESTILACION
COMBINADA No.2
PETROLEOS MEXICANOS
TULA, HGO. MEXICO

DIAGRAMA DE FLUJO D
SECCION DE DESTILACION
DISEÑO:
JUAN DANIEL PACHO CARRILLO
SIN ESCA

FIG

ANÁLISIS DE LA CONFIGURACION DE LA RED

Una vez que se consideraron los equipos y corrientes que podían involucrarse en sistema de intercambio de energía; se dió inicio a la evaluación de la red de cambiadores y equipos auxiliares. Como puede observarse en la descripción del proceso, solo el tren de precalentamiento de crudo de la sección de destilación atmosférica puede considerarse que recupera energía, pues las demás corrientes son acondicionadas con el uso de servicios. Tras el estudio de los planos de la planta^{19,20}. Las corrientes consideradas de interés resultaron:

<u>Corriente No.</u>	<u>tipo</u>	<u>Nombre</u>	<u>Ts</u>	<u>Tt</u>
1	fría	Carga de crudo	68	505
2	fría	Carga de crudo B	68	414
3	fría	Crudo a despunte	445	682
4	fría	Carga crudo reducido	650	725
5	caliente	Nafta pesada	429	110
6	caliente	Querosina	470	110
7	caliente	Gasóleo ligero primario	554	110
8	caliente	Gasóleo ligero alto vacío	415	120
9	caliente	reflujo Gasóleo ligero prim..	557	250
10	caliente	Gasóleo pesado primario	611	327
11	caliente	Gasóleo pesado alto vacío	555	459
12	caliente	Residuo de alto vacío	680	526
13	caliente	Producto de domo	307	100
14	caliente	GOPAV a desint. catalítica	459	256
15	caliente	Nafta de despunte	347	100

Una vez identificadas las corrientes involucradas en la red se procedió a analizar los equipos que intercambiaban calor a fin de identificar el ΔT_{min} al que

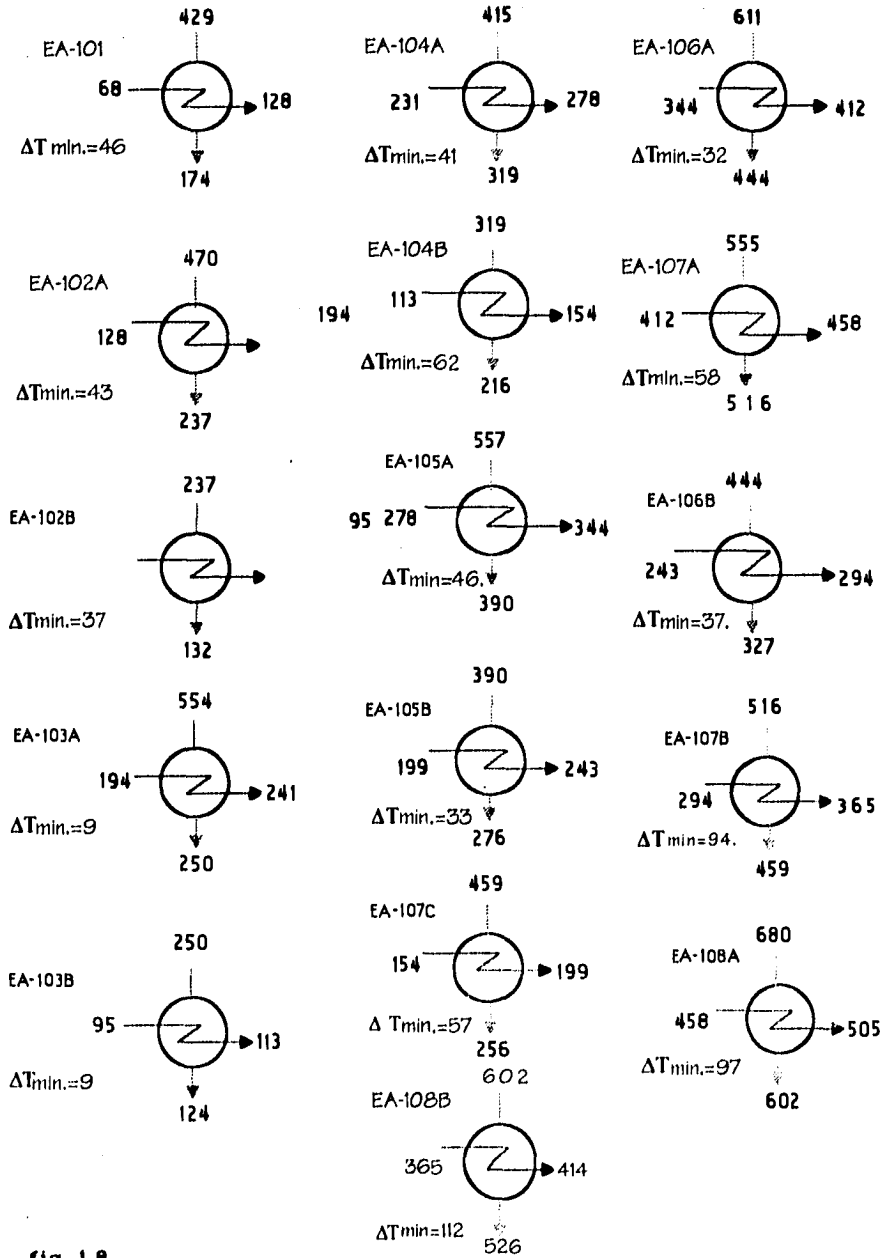


fig. 1.8

la red fué diseñada.

De las configuraciones de los equipos mostradas en la figura 1.8 puede observarse que los mínimos acercamientos se dan en los equipos EA-103 A y EA-103 B donde el ΔT_{\min} es de 9°F para ambos casos y la máxima diferencia entre temperaturas es de 112°F que se da en el cambiador EA-108B, con ello se concluye que la red fué construida a 9°F; esta será la temperatura a la que se haga el análisis de energía.

Respecto a los consumos de servicios que se describen en el diagrama de flujo de proceso, se puede ver que los equipos involucrados son los siguientes:

<u>Equipo</u>	<u>Servicio</u>	<u>Carga</u>
EA-109	Enf. de nafta	6.7 MMBTU/hr
EA-110	Enf. de querosina	2.3 "
EA-111	Enf. de prod. GOLP	1.0 "
EA-112	Enf. de reflujo GOLP	4.8 "
EA-115	Cond. Nafta despunte	73.0 "
EA-116	Cond. Prod. Domo	234.1 "
EA-201	Enf. reflujo GOLV	7.363 "
EA-203	Enf. reflujo GOPV	13.314 "
EA-204	generador de vapor	65.82 "
EA-202	enf. de prod. GOLV	6.047 "
total servicios de enfriamiento:		418.452 MMBTU/hr
<u>Equipo</u>	<u>tipo</u>	<u>carga</u>
BA-101 AB	Calentador crudo despuntado	155.550 MMBTU/hr
BA-201	Calentador crudo reducido	60.975 "
total servicios de calentamiento:		216.525 MMBTU/hr

De la tabla anterior se obtiene que el consumo de servicios de enfriamiento es de 418 452 269 BTU/hr y solo los condensadores de nafta, *que no intervienen en la red*, consumen la mitad de tal carga.

Para los servicios de calentamiento se observa que ascienden a 216 525 000 BTU/hr.

Con los datos de flujo másico, Cp y temperaturas obtenidos de las hojas de datos de operación de la planta ²³ se procedió a la aplicación del método de pinch utilizando el programa de cómputo SUPERTARGET™, desarrollado por la compañía LINHOFF-MARCH® en el Reino Unido y que se encuentra disponible en el laboratorio de cómputo del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química.

Antes de presentar el proceso de aplicación del método al sistema en cuestión se presentará una breve introducción al uso del programa.

CAPITULO SEGUNDO:

ANÁLISIS PRIMARIO

GENERACIÓN Y USO DE CURVAS COMPUESTAS

Entre las herramientas que han hecho del método de pinch un recurso atractivo, se encuentran las curvas compuestas.

Estas curvas son una representación de las características del sistema y son generados con los mismos elementos con que se desarrollan los cálculos básicos del método, es decir número y tipo de corrientes, Cp, Flujo másico, y temperaturas fuente y objetivo. Su generación es muy simple pero su significado e importancia es sobresaliente.

☒ CURVAS COMPUESTAS

Para explicar la obtención de las curvas compuestas (CC) se utilizarán los datos de la tabla siguiente:

Corriente	WCp	Ts	Ti	Q
1 caliente	0.3	300	80	66
2 caliente	0.45	200	40	72
1 fría	0.4	40	180	56
2 fría	0.6	140	280	84

Tabla 2.1

Con los elementos descritos se procede a calcular la carga térmica de las corrientes para cada subintervalo, la división de los intervalos se realiza de igual forma a la descrita en la sección previa.

Como se trata de una gráfica compuesta se pretende incluir en cada subintervalo el calor conjunto de las corrientes que existan en el, por ello para

calcular el calor de cada subintervalo se procede a realizar el producto $WCp (Tt - Ts)$ considerando que para cada subintervalo el valor del WCp será igual a la suma del WCp de todas las corrientes del mismo tipo que existan en el.

• Corrientes calientes

<u>Intervalo de temperatura</u>	<u>WCP</u>	<u>Calor producido</u>
(40 - 80)	0.45	18
(80 - 200)	0.75	90
(200 - 300)	0.30	30

• Corrientes frías

<u>Intervalo de temperatura</u>	<u>WCP</u>	<u>Calor producido</u>
(40 - 140)	0.40	40
(140 - 180)	1.00	40
(180 - 280)	0.60	60

Con estos valores se procede a construir la CC, utilizando ejes coordenados, dándole valores de temperatura a las abscisas y entalpía a las ordenadas.

Los valores de calor producido se sitúan tomando como origen el punto anterior situado. Los puntos generados se unen por líneas rectas separando corrientes frías de calientes.

Para el caso descrito, la gráfica tiene la siguiente forma que se presenta en la fig 2.1

∞ USOS E IMPORTANCIA DE LA CURVA COMPUESTA.

Este esquema es de gran utilidad, pues permite visualizar con facilidad la situación del punto de pliegue (zona de mayor acercamiento entre curvas), el valor

de los servicios mínimos tanto de calentamiento como de enfriamiento (distancia entre los puntos finales e iniciales de las curvas), la localización de las zonas en las que se dividirá el problema (fuente y receptor), etc.

Además de la ventaja de poder visualizar el sistema , puede utilizarse la gráfica para conocer las variaciones que sufriría el mismo si se utilizara un valor diferente de ΔT_{min} , o conocer las condiciones del sistema que corresponderían a valores específicos de servicios de calentamiento o enfriamiento.

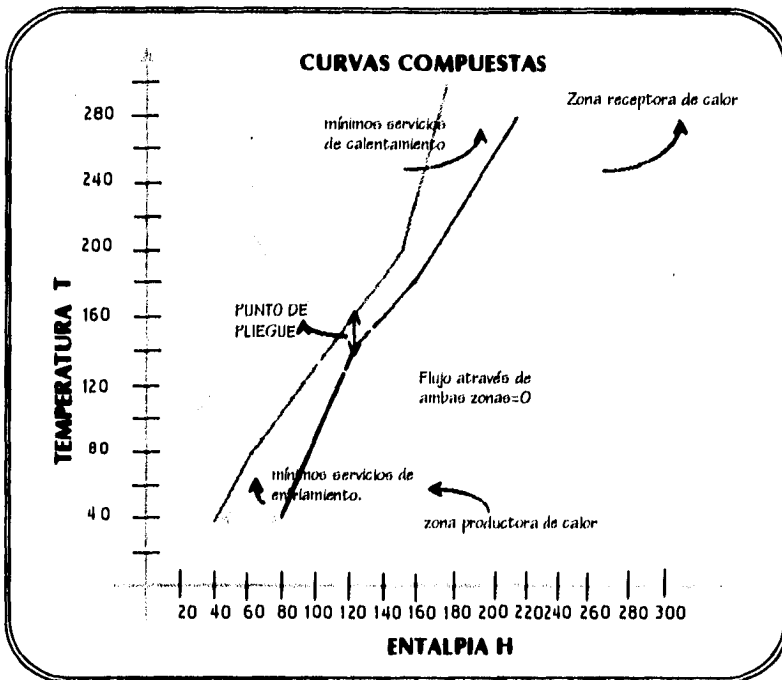


fig. 2.1

Para realizar estas acciones solo basta desplazar una de las curvas hacia arriba o hacia abajo, según se quiera aumentar o disminuir el ΔT_{min} , o desplazar las curvas hacia la derecha o izquierda según se desee fijar un consumo de servicios.

De esta manera la especificación de objetivos es una tarea más sencilla, pues con una sola herramienta se puede decidir sobre la estructura del sistema sin necesidad de utilizar cálculos extras.

Las cualidades de estas gráficas se han extendido al análisis de sistemas completos, facilitando la localización de equipos mal situados y uso inadecuado de servicios.

Así las CC no solo proporcionan un análisis de la situación actual del proceso sino también ayudan al diseñador a formular la acción correctiva. Ejemplos de la afirmación anterior pueden ser encontrados en diversas publicaciones.^{12,24}

Por otro lado existe otro elemento gráfico que puede ser de gran utilidad en la selección de servicios y otras características del sistema, este elemento es la gran curva compuesta.

☒ GRAN CURVA COMPUESTA

La gran curva compuesta (GCC) nos facilita la búsqueda de recuperación de energía y la elección correcta de servicios.

Por lo general, un número de diferentes servicios a diferentes niveles de temperaturas se encuentran disponibles al inicio de un diseño; la gran curva compuesta ayuda al diseñador a seleccionar el servicio correcto para cada caso ya sea solo o combinado con algún otro.

La GCC presenta el perfil horizontal de la separación entre las curvas compuestas generadas para un determinado valor de ΔT_{\min} . Su construcción involucra el transformar la separación de las curvas compuestas hacia un diagrama vertical y trazar su separación horizontal.

Para ejemplificar el trazado de este gráfico se utilizarán los valores de las curvas compuestas utilizando el mismo ejemplo citado.

En primer lugar debe tenerse en cuenta que la gran curva compuesta se obtiene a partir de los perfiles de las curvas compuestas, por ello antes de intentar trabajar sobre la GCC debe haberse generado las CC.

En base a un estudio de la separación existente entre la curva compuesta fría y la caliente, se inicia la construcción. En primer lugar se toma el valor absoluto de la separación horizontal de las curvas en donde cambian de dirección. Para el caso que se ha estudiado se tiene:

Temperatura	Entalpía
40	32.5
80	30.0
140	10
180	20
200	25
300	47.5

Tabla 2.2

Con estos valores se procede a situar los puntos en un eje coordenado entalpía vs temperatura fig 2.2; así para una temperatura de 40 unidades se tendrá una separación horizontal de 32.5 entre el eje de temperatura y el perfil de la curva.

Se sitúan todos los puntos y se unen por líneas rectas obteniéndose el perfil que se presenta en la fig. 2.3. En la siguiente figura se presenta la forma en que se obtuvieron los valores que se presentaron en la tabla 2.2 (Nótese que no se presenta con la escala justa, simplemente se especifican los puntos considerados, haciendo una ampliación en la escala para su mejor visualización)

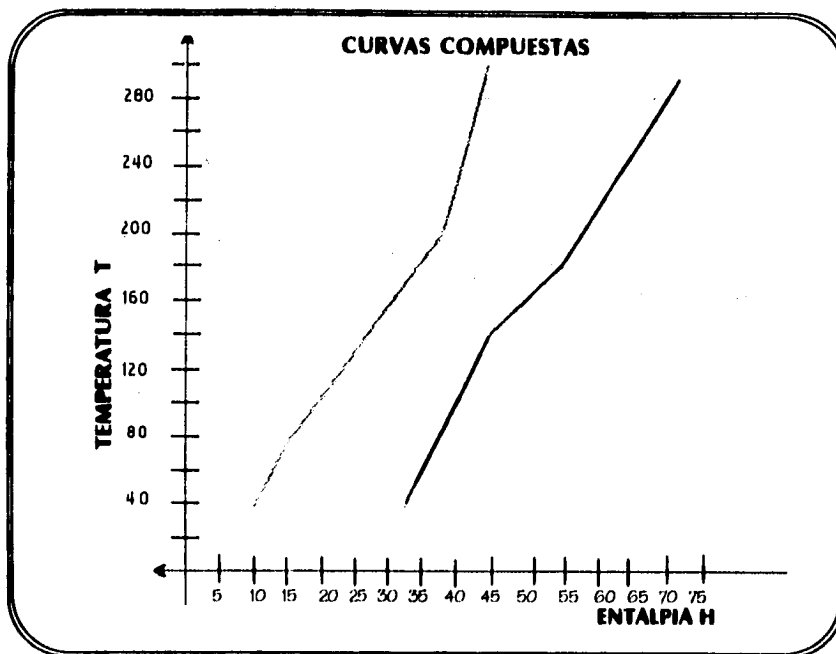


fig. 2.2

La gráfica 2.3 muestra una de las cualidades de la gran curva compuesta que es la localización de zonas donde se deben situar servicios (separación entre inicio y fin de la curva y el eje de la temperatura) y zonas en las que el proceso permite recuperaciones de calor através del uso de cambiadores proceso a proceso.

A través del uso de esta curva, también puede situarse correctamente equipos clave de un proceso, de forma que se reduzca al máximo el uso de servicios o incluso eliminarlos al situar el equipo en una zona en que el sistema puede satisfacer sus requerimientos de calor; así el método de pinch nos proporciona la posibilidad, através del buen uso de estas curvas, de mejorar un proceso más allá de la recuperación de energía.

Con el desarrollo del método se han ido encontrando más cualidades de estas curvas y se han generado otras, de tal forma que para casos específicos como ciclos de potencia o minimización de residuos el uso de dichas curvas es de vital importancia, a lo largo de este trabajo se explicará el uso de otras curvas específicamente para el proceso manejado.

A continuación se presenta la gran curva compuesta para el ejemplo seguido:

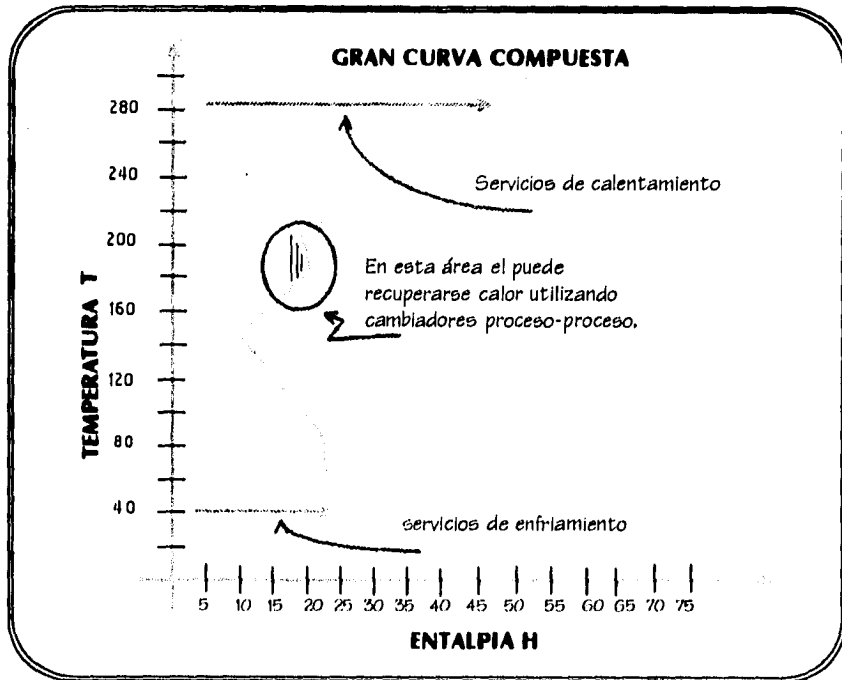


fig. 2.3

USO DEL SUPERTARGET

En la sección anterior se presentaron los principios del punto de pliegue, así mismo se mencionó la necesidad de implementar tales procedimientos en un programa de cómputo, pues debido a la naturaleza del método es necesario repetir varias veces el mismo cálculo, de forma que el uso de un instrumento de cómputo resulta bastante útil.

Existen en el mercado múltiples paquetes que utilizan principios del punto de pliegue: (ADVENT, HEXTRAN, etc.), y por lo tanto eran susceptibles de ser utilizados en el desarrollo de este trabajo; sin embargo se seleccionó el paquete SUPERTARGET por haber sido desarrollado por los creadores del método así como por contar con varias herramientas específicas de la orientación que se le pretendía dar al análisis, al mismo tiempo el paquete se encontraba disponible y su uso reflejaría una evaluación del problema con un tipo de herramienta diferente a las que se han utilizado en otras ocasiones en trabajos anteriores relacionados.

Para introducirnos en la descripción del uso del SUPERTARGET se irán presentando los puntos básicos y posteriormente las herramientas que el programa ofrece para el logro del objetivo planteado. Es necesario mencionar que en este capítulo no se pretende hacer un manual de uso condensado del SUPERTARGET, sino presentar la forma en que se utilizó el software en la solución del problema.

☒ CONSIDERACIONES GENERALES.

La versión utilizada del Supertarget fué la 3.0 para windows , (la más reciente).

Los requerimientos de hardware para el manejo de este paquete son los siguientes:

- 1.- Unidad de proceso IBM PC-AT o compatible con un mínimo de 6 MB de RAM.
- 2.- Procesador 80386 con coprocesador matemático o superior.
- 3.- Espacio en disco duro de 8 MB.
- 4.- Monitor VGA color o superior.
- 5.- Hard lock suministrado por la compañía Linhoff March.

Los requerimientos de software son:

- 1.- Ambiente gráfico windows 3.1 o superior
- 2.- Sistema operativo MS-DOS 5.0 o superior.

La impresión de los reportes generados puede realizarse en cualquier impresora compatible con windows.

Como se mencionó el programa que compone al SUPERTARGET corre bajo ambiente windows y por lo tanto presenta todas las características de cualquier programa de su tipo. El paquete es muy similar en su uso y cualidades a una hoja de cálculo así que si se está familiarizado con tales paquetes el uso de SUPERTARGET se facilita notablemente.

Para iniciar el trabajo en este programa debe haberse primero cargado windows y posteriormente elegirse el icono supertarget que aparece en el grupo de trabajo correspondiente (pinch tech.), debe asegurarse que se encuentre instalada la llave de seguridad antes de iniciar el programa.

☒ ARQUITECTURA DEL PROGRAMA.

Una vez iniciado el programa se presenta una barra de menú que permite el acceso a las funciones del SUPERTARGET.

Los submenús de interés para este trabajo se describen a continuación:

◆ *File menú.*

Este menú permite al usuario manejar las operaciones de archivo y especificar preferencias de impresión.

◆ *Edit menú.*

En este menú se tiene acceso a las funciones de edición de datos de corrientes de proceso y servicio, de costos, de datos del proyecto y de unidades.

◆ *Point menú.*

El menú point proporciona funciones para analizar la interacción entre un conjunto de zonas consumidoras de calor y los servicios disponibles, en un ΔT_{\min} fijado.

◆ *New menú.*

En este menú se presentan las funciones que son utilizadas para la localización del valor óptimo de un nuevo diseño. Aquí se pueden considerar requerimientos de servicios y área de intercambio para un amplio rango de ΔT_{\min} .

◆ *Retrofit menú.*

El menú reajuste proporciona las funciones esenciales de un análisis de este tipo, considerando reducciones de energía y área para diferentes valores de recuperación de capital, ΔT_{\min} e inversión.

◆ *Network menú.*

Este menú se utiliza cuando se necesita desarrollar el diseño de una red, evaluar redes existentes o hacer modificaciones en ellas. También se cuenta en este menú la posibilidad de generar el diagrama de red para un sistema.

✕ CREACIÓN DE DOCUMENTOS EN SUPERTARGET.

Para iniciar cualquier trabajo en SUPERTARGET debe el usuario familiarizarse con las acciones necesarias para la creación de nuevos documentos.

Una vez que se ha iniciado el programa debe introducirse la información que permita manejar el nuevo documento y establecer las unidades de trabajo.

En el menú editar (Edit) debe seleccionarse la opción datos del proyecto (project data) y proporcionar los datos de nombre del proyecto, subtítulo del proyecto, temperatura ambiente a utilizar, eficiencia mecánica de los equipos etc. Esto con el fin de una mejor administración del programa, ya que con seguridad se crearán varios archivos relacionados a un mismo proyecto.

Una vez hecho lo anterior es necesario especificar las unidades de trabajo pues de no hacerlo así el programa trabajará con unidades por omisión, que seguramente no corresponderán con las que se cuentan. Para especificar unidades, en el menú editar debe seleccionarse la opción unidades y especificar aquellas unidades y nomenclatura a utilizar. El programa despliega una caja de diálogo que contiene todas la unidades disponibles para cada aspecto de trabajo, (Temperatura entalpía, costos, coeficientes de transferencia de calor, etc.). para cambiar la selección de unidades debe abrirse la lista disponible pulsando la flecha que se encuentra a la derecha de cada opción; un menú colgante permitirá hacer la selección.

Con la realización de estas especificaciones puede iniciarse la edición de valores.

✕ EDICIÓN DE CORRIENTES.

Para iniciar la introducción de valores debe seleccionarse la opción editar corrientes del menú editar; una vez hecho esto se despliega una caja de diálogo que permite la especificación de datos.

Para especificar una corriente basta darle un nombre y las temperaturas de entrada y salida, automáticamente el programa definirá a la corriente como fría o caliente; debe además darse el valor del coeficiente de transferencia de calor y la carga de calor de la corriente o el producto W_{cp} pues el programa calcula el faltante al introducir uno de los dos.

En caso de que se cuente con corrientes de cp variable, debe especificarse segmentos que mantengan cp variable en el rango de temperaturas adecuado. Esto se especifica en el mismo submenú de editar corrientes, con la opción editar segmentos.

Adicionalmente el programa requiere de las condiciones de costos; esto solo se especifica dando el número de la ecuación de costos a considerar: Este número debe corresponder con el especificado en la opción costos del menú editar.

Una vez hecho esto puede iniciarse el análisis recordando que las especificaciones de costos y servicios deberán hacerse de acuerdo a las necesidades del diseño.

En la sección subsecuente se presenta el análisis primario hecho al sistema y la curvas generadas.

ESPECIFICACIÓN DE VALORES.

Como se mencionó en la sección anterior, para iniciar cualquier trabajo en SUPERTARGET es recomendable especificar las unidades de trabajo para que no exista la posibilidad de errores por inconsistencia, para ello en el menú Editar unidades, se especificaron unidades inglesas (en las que se tenían todos los datos). Las unidades quedaron como sigue:

<i>Temperatura</i>	<i>°F</i>
<i>Calor</i>	<i>MMBTU/hr</i>
<i>Área</i>	<i>Ft²</i>
<i>Costos Anuales</i>	<i>\$(·yr· MMBTU/hr)</i>
<i>Coefficientes de transferencia de calor</i>	<i>BTU/Lb·hr·°F</i>

Tabla 2.1

En segundo lugar se especificaron los datos del proyecto. Se desarrollaron varios archivos que contenían diferentes tipos de análisis algunos por nuevo diseño, otros por reajuste y otros que contenían las características de la red.

En el menú Editar corrientes, se hizo la especificación de datos. Se introdujeron los valores de las corrientes dividiéndolas en segmentos de Cp constante para los cuales se calculó el htc individual. En el anexo 1 se describe detalladamente la forma en que se calcularon los coeficientes de transferencia de calor. La tabla 2.4 contiene los valores especificados para cada corriente.

Para el caso de los servicios se editaron las características del agua de enfriamiento y el gas combustible. Los valores de htc se tomaron de tablas de valores recomendados, (producidas por el IMP para casos de equipos similares). Estos valores se encuentran en el anexo 2.

También se editaron los valores de costo para cada servicio utilizando los datos obtenidos de los precios interorganismos proporcionados por PEMEX, estos valores se

compararon con los usados para evaluaciones de plantas similares para economías parecidas a la Mexicana ^{7,8} encontrándose consistencia en ellos.

En editar costos se especificó el método a utilizar en la evaluación económica así como la tasa de interés, el tiempo de vida del proyecto y los costos de los servicios además de las ecuaciones para el cálculo del costo de área.

los valores quedaron como sigue:

<i>Método económico:</i>	<i>Valor Presente Neto VPN</i>
<i>Tiempo de vida (lifetime):</i>	<i>10 años</i>
<i>Tasa de interés :</i>	<i>6.0625 anual</i>
<i>Costo servicios:</i>	
<i>enfriamiento:</i>	<i>3516 \$/yr(MMBTU/hr)</i>
<i>calentamiento:</i>	<i>46117 \$/yr(MMBTU/hr)</i>

Tabla 2.2

El programa permite seleccionar un modelo económico para realizar la evaluación económica; el método seleccionado fue el de Valor Presente Neto que fué manejado mediante la siguiente ecuación:

$$VPN = E_{tot} + CC$$

$$VPN = CC + CE_{anual} \times \frac{[(i+1)^n - 1]}{i \cdot (i+1)^n}$$

Donde :

VPN = C_{tot} (costo total).

CC = Costo area instalada.

CE = Costo energía por año.

n = Periodo de amortización.

i = Tasa de interés.

Tal como se especifica en el reporte de costos se seleccionó una ecuación de cálculo de gasto en área para equipos de servicio de alta , baja temperatura, y para el cálculo de costos de equipos de servicios.

SUPERTARGET utiliza ecuaciones de costos para el área del tipo:

Existiendo la posibilidad de definir diferentes valores para cada coeficiente.

$$\text{Costo} = A + [B * (\text{area}^C)]$$

Por ejemplo, un cambiador de calor en particular podría tener un alto costo de instalación pero bajo costo de material, en tanto algún otro podría presentar el caso contrario. Típicamente el coeficiente A corresponde a los costos de instalación, el coeficiente B al costo por unidad de área y el C al factor de potencia que comúnmente tiene valores alrededor de 0.8 para equipos de acero al carbón en configuración 1 - 2.

Las leyes de costos, (como se definen en SUPERTARGET) pueden ser asignadas a segmentos particulares de corrientes, donde las condiciones de temperatura así lo requieran.

Las especificaciones de costos se establecieron como sigue:

<i>Ecuación</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>alta temperatura</i>	70000	2312.5	0.83
<i>baja temperatura</i>	50000	1900	0.83
<i>servicios</i>		0.25	0.10

Tabla 2.3

De esta manera ya se contaba con el sistema listo para iniciar los análisis.

El primer análisis consistió solo en la evaluación del estado de la red.

ANÁLISIS TÉRMICO DE LA RED EN CONFIGURACIÓN ACTUAL.

Para conocer el estado del sistema se procedió a analizarlo con las herramientas básicas del punto de pliegue.

En el menú *point* se definió el $\Delta T_{\min} = 9 \text{ }^\circ\text{F}$ ya que como se mencionó en el análisis de la red existente este fué el ΔT_{\min} de diseño. Una vez especificado este valor se generaron las curvas compuestas y la gran curva compuesta.

La generación de estas curvas se hace en el menú *point - curvas compuestas*. Estas pueden ser ajustadas a los límites definidos por el usuario, así como resaltar puntos de interés, analizar los datos que conforman el gráfico etc. La curva compuesta para el sistema original se presentan en la gráfica 2.1, en tanto que la gráfica 2.2 representa las curvas compuestas resultantes del sistema en el que ya se consideraron las corrientes extras (producto de domo y nafta de despunte).

Para el caso de la gran curva compuesta se sigue el mismo procedimiento anterior cambiando la orden en el submenú *point - GCC*. Los gráficos 2.3 y 2.4 representan la gran curva compuesta del sistema original y el que considera corrientes extras.

En la tabla 2.5 se encuentra el reporte que SUPERTARGET produce en la opción reporte energético , y permite observar todas las condiciones energéticas obtenidas tras la aplicación del método, como son temperatura del punto de pliegue, consumo de servicios, corrientes relacionadas con el punto de pliegue, etc.

Con todas estas herramientas puede apreciarse con facilidad defectos en la configuración de la red existente y hacerse las primeras estimaciones de ahorro de energía. En el capítulo cuarto se hacen los análisis de los documentos generados.

ESPECIFICACIÓN DE CORRIENTES

DATOS DE ENTRADA PARA SUPERTARGET®

Stream	Name	Supply Temp.	Target Temp.	Enthalpy Change	MCP	HTC	DT	Cap Cst Low
		[F]	[F]	(2)	(1)	(3)	[F]	
1 C	crudo	68.00	414.00	180.6				
1.1		68.00	95.00	11.9	4.403E+5	4.92E+1		1
1.2		95.00	113.00	8.161417	4.545E+5	8.27E+1		1
1.3		113.00	154.00	19.2	4.692E+5	9.76E+1		1
1.4		154.00	199.00	22.1	4.909E+5	1.13E+2		1
1.5		199.00	243.00	22.4	5.089E+5	1.54E+2		1
1.6		243.00	294.00	27.3	5.359E+5	1.66E+2		1
1.7		294.00	365.00	40.2	5.668E+5	1.75E+2		2
1.8		365.00	414.00	29.2	5.959E+5	2.13E+2		2
2 C	crudo B	68.00	505.00	239.4				
2.1		68.00	128.00	26.8	4.460E+5	5.37E+1		1
2.2		128.00	194.00	31.7	4.798E+5	9.84E+1		1
2.3		194.00	241.00	23.9	5.075E+5	1.52E+2		1
2.4		241.00	278.00	19.5	5.283E+5	1.61E+2		1
2.5		278.00	344.00	38.3	5.799E+5	1.71E+2		1
2.6		344.00	412.00	40.7	5.978E+5	2.08E+2		1
2.7		412.00	458.00	28.8	6.210E+5	1.92E+2		2
2.8		458.00	505.00	30.1	6.413E+5	2.58E+2		2
3 H	nafta pesada 1	429.00	110.00	33.7				
3.1		429.00	174.00	27.1	1.082E+5	9.47E+1		1
3.2		174.00	110.00	6.660664	1.041E+5	9.97E+1		3
4 H	querosina	470.00	110.00	45.7				
4.1		470.00	237.00	31.4	1.349E+5	1.07E+2		1
4.2		237.00	132.00	11.9	1.138E+5	4.63E+1		1
4.3		132.00	110.00	2.311871	1.051E+5	2.82E+1		3
5 H	golp	554.00	110.00	32.8				
5.1		554.00	250.00	23.8	7.832E+4	4.14E+1		1
5.2		250.00	124.00	8.119957	6.444E+4	9.60000		1
5.3		124.00	110.00	8.349E-1	5.983E+4	1.14E+1		3
6 H	golav	415.00	120.00	46.0				
6.1		415.00	319.00	19.6	2.038E+5	5.56E+1		2
6.2		319.00	216.00	19.1	1.854E+5	1.24E+1		1
6.3		216.00	120.00	7.363433	7.670E+4	1.83E+1		3

TABLA 2.4

ESPECIFICACIÓN DE CORRIENTES

DATOS DE ENTRADA PARA SUPERTARGET[®]

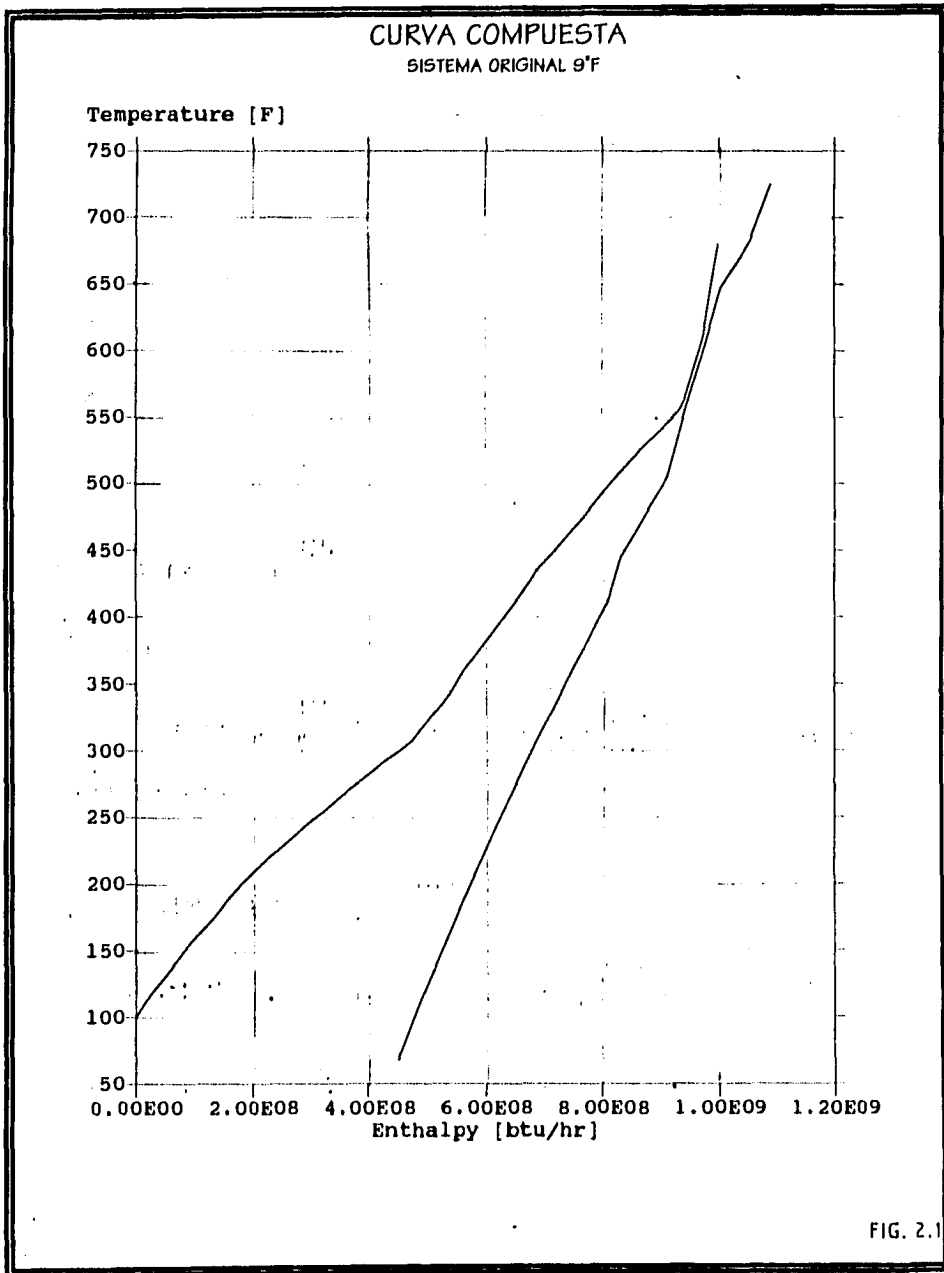
7 H	golp (ref)	557.00	250.00	64.2				
7.1		557.00	390.00	37.0	2.218E+5	1.74E+2		2
7.2		390.00	276.00	22.4	1.962E+5	1.35E+2		1
7.3		276.00	250.00	4.762497	1.839E+5	1.73E+2		3
8 H	gopp	611.00	200.00	74.0				
8.1		611.00	444.00	40.5	2.425E+5	1.99E+2		3
8.2		444.00	327.00	27.2	2.322E+5	5.32E+1		2
8.3		327.00	200.00	6.335775	4.989E+4	8.40000		1
9 H	gopav	555.00	435.00	81.5				
9.1		555.00	516.00	28.3	7.268E+5	3.08E+2		2
9.2		516.00	459.00	39.9	6.996E+5	2.93E+2		2
9.3		459.00	435.00	13.3	5.546E+5	4.18E+2		2
10 H	gpav a fcc	459.00	256.00	22.2	1.093E+5	1.09E+1		2
11 H	glav a mezcla	216.00	150.00	6.047812	9.163E+4	8.00000		1
12 H	residuo av	660.00	526.00	59.2				
12.1		660.00	602.00	30.2	3.871E+5	1.30E+2		3
12.2		602.00	526.00	29.0	3.813E+5	8.32E+1		3
13 H	ref red. vsc.	582.00	362.00	65.6	3.291E+5	2.65E+1		2
14 C	carga BA-101	445.00	682.00	155.6	6.563E+5	4.75E+2		3
15 C	carga BA-201	647.00	725.00	61.0	7.817E+5	2.99E+2		3
16 H	nafta despunte	347.00	100.00	73.0	2.955E+5	2.54E+2		1
17 H	prod domo	307.00	100.00	49.0	2.387E+5	8.02E+1		1

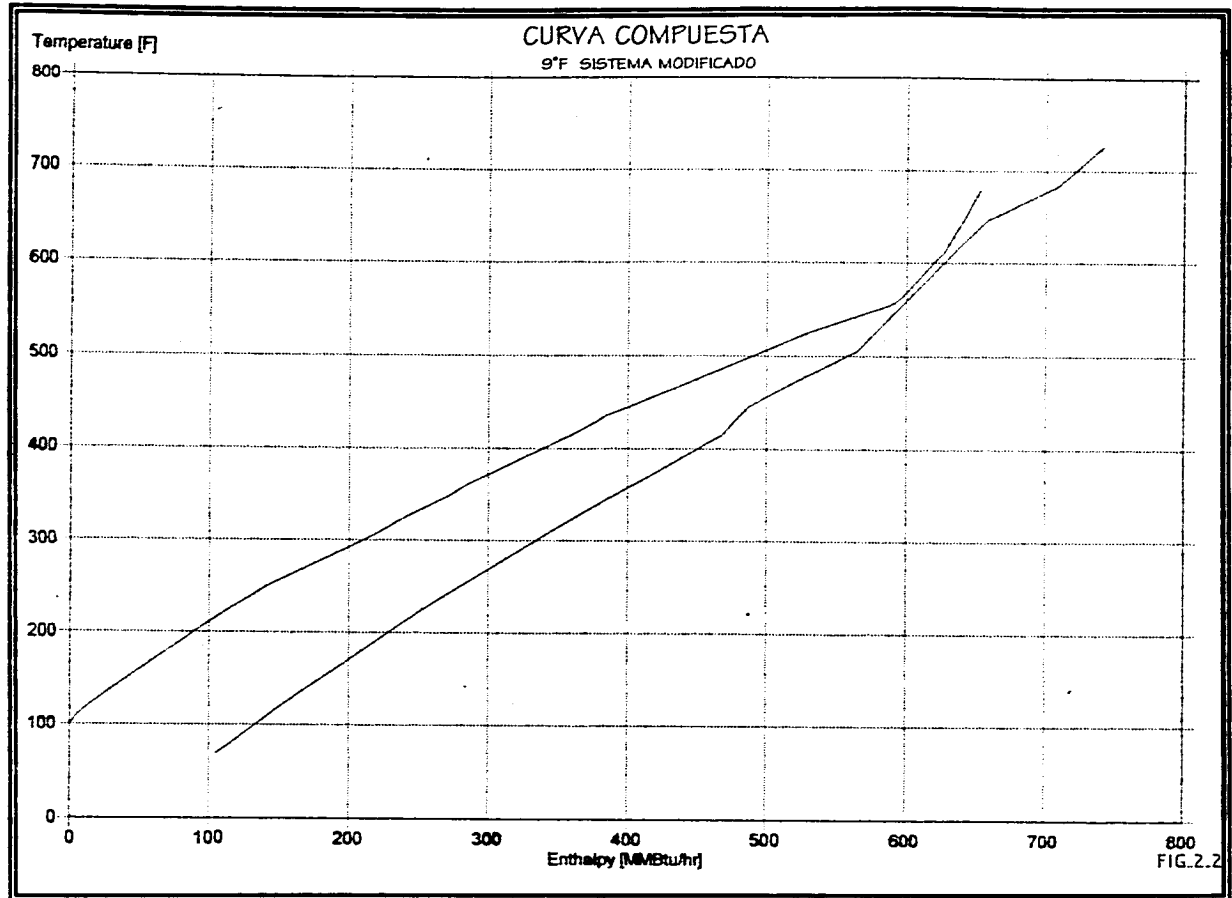
(1) Units of CP are [Btu/(h.F)]

(2) Units of Enthalpy are [MMBtu/hr]

(3) Units of HTC are [Btu/(hr.(^oF))]

TABLA 2.4





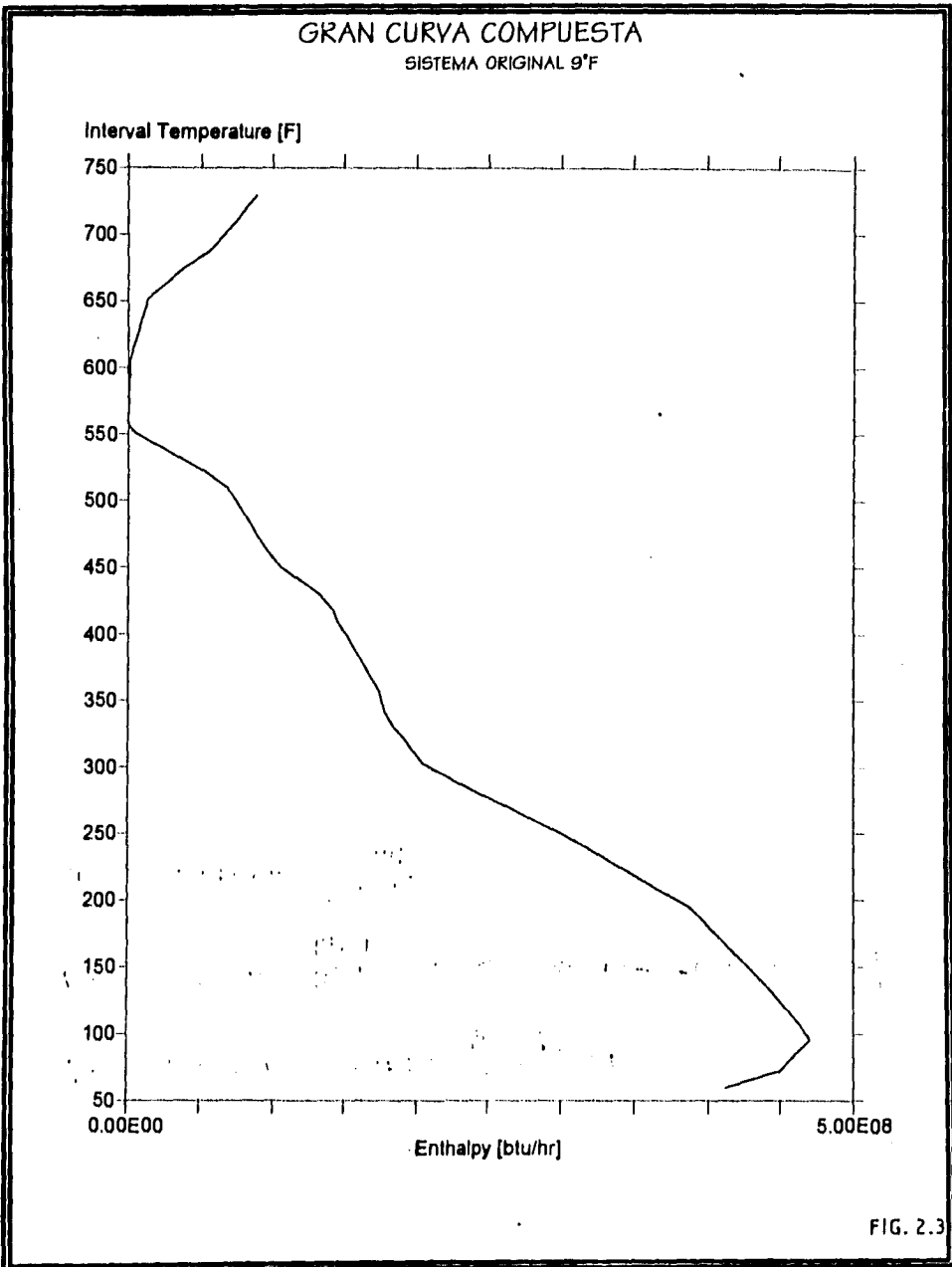


FIG. 2.3

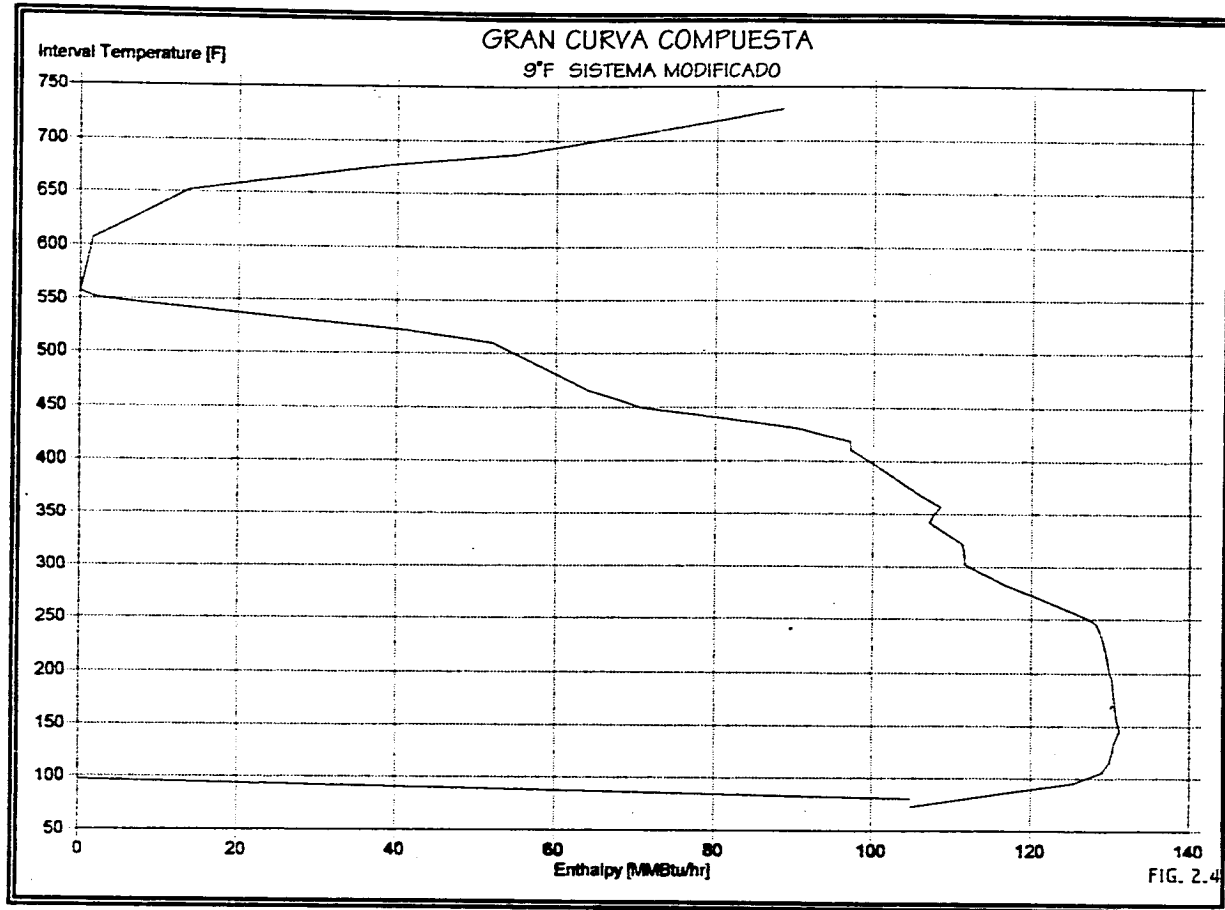


FIG. 2.4

REPORTE ENERGÉTICO
9°F SISTEMA CORREGIDO

<input type="checkbox"/>	CONSUMO MÍNIMO DE SERVICIOS DE CALENTAMIENTO	88.3 MMBTU/HR
<input type="checkbox"/>	CONSUMO MÍNIMO DE SERVICIOS DE ENFRIAMIENTO	104.9 MMBTU/HR
<input type="checkbox"/>	COSTO TOTAL DE LA ENERGÍA POR AÑO	11.697 MM\$/AÑO
♦	COSTO DE SERVICIOS DE CALENTAMIENTO	10.817 MM\$/AÑO
♦	COSTO DE SERVICIOS DE ENFRIAMIENTO	880 208 \$/AÑO
<input type="checkbox"/>	PUNTO DE PLIEGUE EXISTENTE A	557.5 °F
♦	TEMPERATURA DE PUNTO DE PLIEGUE PARA LA CORRIENTE CALIENTE	562°F
♦	TEMPERATURA DE PUNTO DE PLIEGUE PARA LA CORRIENTE FRIA	553°F
<input type="checkbox"/>	PUNTO DE PLIEGUE CAUSADO POR LA CORRIENTE:	
♦	13.1 CALIENTE REFLUJO REDUCTORA DE VISCOSIDAD	
<input type="checkbox"/>	PUNTO DE PLIEGUE CRUZADO POR LAS CORRIENTES:	
♦	8.1 CALIENTE GOPP	
♦	12.2 CALIENTE RESIDUO DE ALTO VACÍO	
♦	13.1 CALIENTE REFLUJO REDUCTORA DE VISCOSIDAD	
♦	14.1 FRIA CARGA DE BA-101	
<input type="checkbox"/>	EXISTEN DOS PUNTOS DE PLIEGUE EN LOS SERVICIOS	
♦	INTERVALO 2995.5°F	
	CAUSADO POR GAS COMBUSTIBLE	
♦	INTERVALO 72°F	
	CAUSADO POR CORRIENTES:	
	1.1 CARGA DE CRUDO Y AGUA DE ENFRIAMIENTO.	

TABLA 2.5

CAPÍTULO TERCERO:

ANÁLISIS POR NUEVO DISEÑO Y REAJUSTE

OPTIMIZACIÓN VÍA NUEVO DISEÑO Y REAJUSTE

Cuando se considera que un proceso no utiliza sus recursos económicos de forma adecuada, es necesario hacer una evaluación que nos informe de la cantidad de energía que se consume así como del arreglo general de las corrientes de proceso, con la finalidad de poder decidir si realmente es necesario modificar el proceso.

En un principio estas evaluaciones se realizaban por medios heurísticos, posteriormente se utilizaron simuladores de proceso para identificar puntos factibles de optimizar, pero sin tomar en cuenta limitaciones que la tecnología del punto de pliegue establece; de esa forma las optimizaciones se limitaban a reducir consumo de servicios sin atacar realmente el problema que causaba el exceso gasto de energía, pues no eran identificados los equipos que violaban estos principios.

Con el desarrollo de la tecnología pinch se desarrollaron diversos algoritmos que resultaron en el cumplimiento de objetivos económicos mucho más rigurosos que introdujeron un cambio en los procedimientos de optimización de plantas existentes. En este campo algunos trabajos notables fueron realizados por Tjaan Tjoe y Bodo Linhoff en el UMIST^{2,3,4}.

Antes de iniciar el análisis del método y su aplicación en el presente trabajo, es necesario abordar el concepto de objetivos globales, que facilita la selección del ΔT_{\min} para el inicio del diseño.

OBJETIVOS GLOBALES

El concepto de objetivos globales esencialmente optimiza sistemas energéticos con anterioridad a su diseño. El concepto ofrece optimizaciones globales costo - capital y permite comparar el papel de los objetivos de energía y costos con anterioridad al inicio del diseño y escoger la relación óptima entre ellos para un sistema, dependiendo de las influencias externas debidas a la disponibilidad de materias primas o situación económica del lugar donde se valla a construir la planta en cuestión.

Una vez que se tienen los costos por unidad de superficie, servicios, interés , tiempo de recuperación de la inversión etc., Se puede predecir el costo total de la red, sin tener que realizar varios diseños, y analizar los costos totales como una función del ΔT_{\min} de esta forma se tendrán los datos óptimos de una red que no se ha diseñado, es decir conociendo los límites de recuperación de energía , el valor del ΔT_{\min} y el área a utilizar, se procede a desarrollar el diseño con la seguridad de que tendrá las mejores características posibles, así solo se desarrollarán algunos diseños de entre un gran número posible de ellos.

Con lo anterior se destaca la necesidad de adaptar el diseño a la economía del lugar donde se construirá, pues los costos variarán de una región a otra aún para una misma planta, pudiéndose encontrar diferentes valores de ΔT_{\min} para un mismo diseño que se construya en dos lugares diferentes y por lo tanto condiciones de diseño muy diversas.^{5,6}

Para ilustrar las facilidades que ofrece el objetivos globales se utilizarán las gráficas de las figuras 3.1 y 3.2.

Para construir la gráfica 3.1 (costos de energía -capital vs ΔT_{\min}) se requiere conocer el tipo y precio de los servicios a utilizar y através de la aplicación del

método de pinch determinar para cada ΔT_{min} el consumo energético, así para cada ΔT_{min} se podrá calcular el costo de operación haciendo el producto:

$$\text{Costos de operación} = \Sigma \text{Consumo servicios} \times \text{Costo servicios}$$

Debe recordarse que el cálculo del costo de los servicios se hizo en base al tipo y temperatura de los mismos.

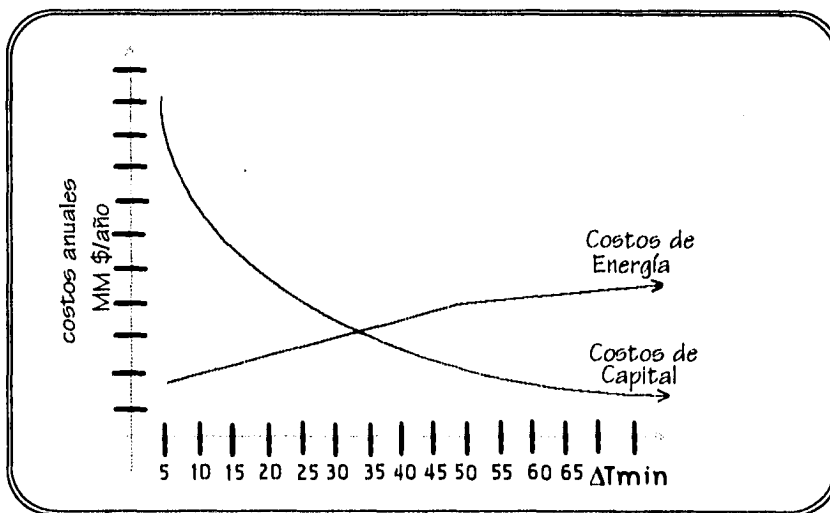


Fig. 3.1

De la misma forma que se obtuvieron los costos de energía se calcularon los costos de capital para el mismo rango de ΔT_{min} . Ello se obtiene considerando ecuaciones de inversión de capital para el aumento de área, que consideren interés anual y en general todos los factores económicos de la inversión. Tras conocer el área requerida por el sistema se aplican las ecuaciones económicas seleccionadas y se obtienen los valores de capital para cada ΔT_{min} del estudio, con ello se puede generar la línea costo capital que se presenta en la gráfica 3.1

El gráfico 3.2 (costos totales vs ΔT_{\min}) se compone de la suma de los valores de los dos gráficos anteriores, esto se logra sumando el monto del consumo de energía y de capital para cada valor de ΔT_{\min} .

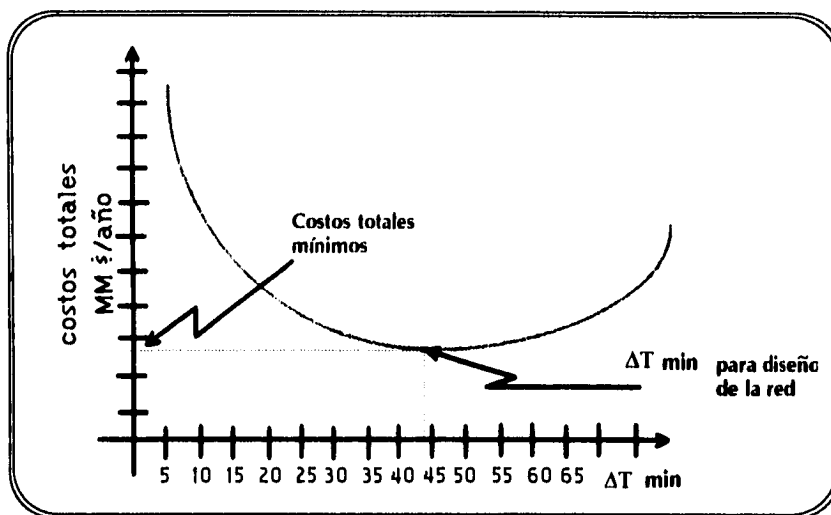


Fig. 3.2

Finalmente en dicha gráfica la selección del ΔT_{\min} es una tarea sencilla pues el valor que se busca corresponde al punto mínimo de la gráfica. Este valor sin embargo solo es adecuado para un nuevo diseño.

Con el valor del acercamiento encontrado se procede a diseñar la red con la confianza de que el arreglo tendrá la características tanto de costo mínimo como de óptima utilización de recursos, además realizando un diseño minucioso se podría disminuir aún más la utilización de área con su consecuente reducción de costos.

La afirmación anterior puede comprenderse mejor si se recuerda que la evaluación de área requerida para cada ΔT_{\min} se hace através de un cálculo simplificado y no utilizando un método riguroso. En el siguiente sección se presenta una explicación más amplia de estas condiciones.

REAJUSTE

Para ilustrar la aplicación de este método es necesario retomar algunos de los datos generados por objetivos globales, como los valores de área, costo de capital, costo de energía y consumos energéticos para una variedad de ΔT_{\min} .

Con los datos mencionados se generan una serie de gráficas que permitirán seleccionar el ΔT_{\min} adecuado para las condiciones de la red existente.

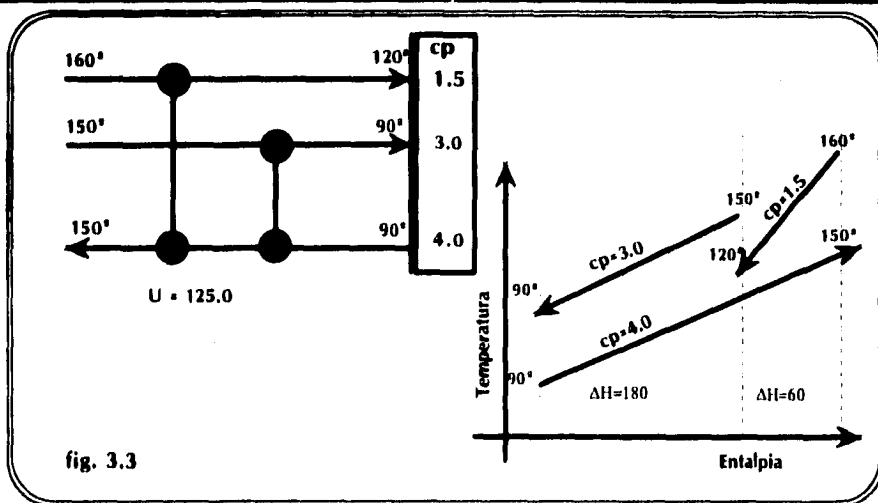
En primer lugar deben generarse las gráficas ΔT_{\min} vs energía consumida y área requerida vs ΔT_{\min} , esto con el fin de poder apreciar las consecuencias de utilizar menos área o más servicios respecto al valor del acercamiento en los equipos. y sobre todo se necesitan estas gráficas como referencia para una tercera que es la gráfica Área - Energía que nos permitirá conocer la ruta de optimización.

Para la generación de la primera gráfica es necesario abordar con detenimiento la forma en que se deben hacer las estimaciones de área a utilizar para cada ΔT_{\min} .

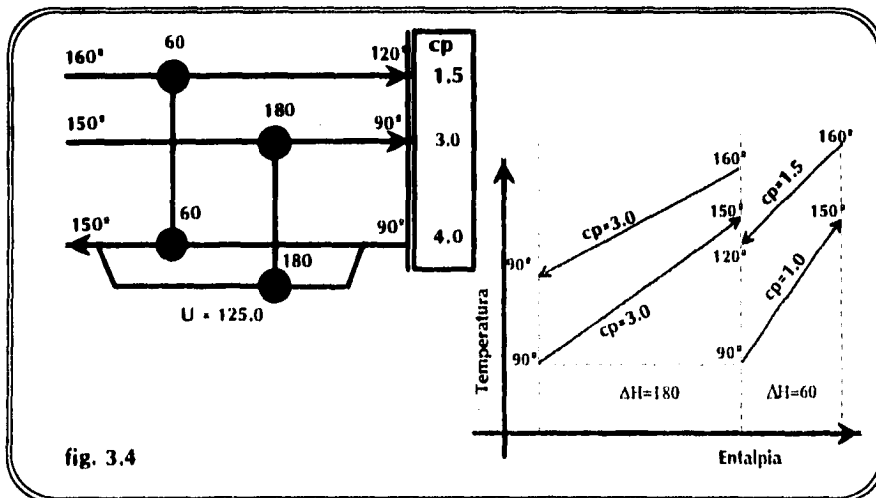
✕ CALCULO DE ÁREA.

Una característica básica de las redes de intercambio térmico es la interrelación entre energía y costos de inversión. En una red el valor del ΔT_{\min} determina el máximo calor recuperable y con esto los requerimientos máximos de servicios externos. Conforme el ΔT_{\min} aumenta, la demanda de servicios aumenta pero el área global de intercambio de calor disminuye. Sin embargo esta relación puede variar al modificarse las condiciones en que las corrientes de la red se encuentren forzadas a intercambiar energía, aquí los coeficientes globales de transferencia de calor tienen un desempeño importante.

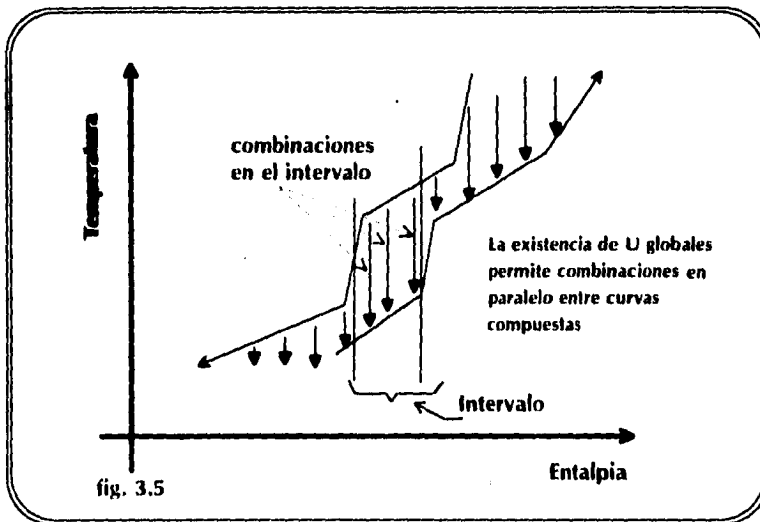
Si nos referimos a la figura 3.3 encontramos a dos corrientes calientes que intercambian calor con una fría. Si se asumiera que los coeficientes de transferencia para los cambiadores poseen el mismo valor y operan a contracorriente, entonces la red tendría un área de 88m^2 .



En la figura 3.4 se muestra la misma red pero se han procurado mejorar las combinaciones en base a división de corrientes y arreglos contracorriente que utilizan mejor las diferencias de temperatura. El resultado es una red con un área global de 84m^2 .

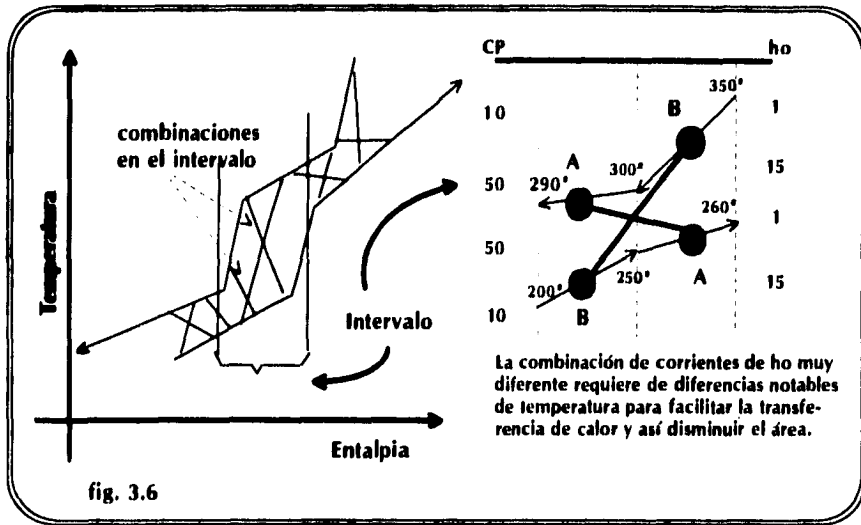


En la siguiente figura del ejemplo (fig. 3.5) se hace extensivo a las curvas compuestas de un sistema dado. Ahí el intercambio de calor a contracorriente aparece como líneas verticales entre las dos curvas. Si se diera el mismo tratamiento que al ejemplo anterior se tendría entonces una aproximación confiable para el mínimo requerimiento de área.



Si por el contrario tuviéramos necesidad de combinaciones de corrientes que poseyeran valores muy diferentes de coeficientes de transferencia de calor, entonces el caso anteriormente citado no sería completamente válido, ya que este tipo de combinaciones requerirían de ΔT_{\min} mayores para poder compensar las dificultades de intercambio que supondrían las diferencias en tales coeficientes y por lo tanto el uso de combinaciones cruzadas. fig. 3.6

En este caso solo un estudio detallado de las condiciones de la red permitirían conocer el área requerida, pero ya que se busca un cálculo aproximado que permita realizar estimaciones con anterioridad al diseño es necesario contar con otras herramientas.



A través de introducir una serie de consideraciones y mejoras a este análisis S. Ahmad y B. Linhoff ^(7,18) obtuvieron una ecuación que permite estimar los requerimientos de área para un ΔT_{min} dado. La expresión que obtuvieron fué la siguiente:

$$A_{min} = \sum_j^{int} (1/\Delta T_{LMTD j}) \sum_j^{corriente} (q_j/h_j)_j$$

Esta ecuación permite hacer estimaciones con precisión aceptable, y aunque no deja de ser una aproximación ha probado su validez aún para casos donde la diferencia en el coeficiente global de transferencia de calor entre corrientes sea n (hasta de un orden de magnitud), y por lo tanto se requiera de combinaciones no paralelas donde ha presentado errores máximos del 15%.

Una vez que se ha obtenido la estimación de área se puede calcular el monto de la inversión y con ello el perfil de la gráfica área vs ΔT_{min} .

Para completar la información requerida debe construirse la gráfica energía vs ΔT_{min} , este gráfico es sencillo de obtener utilizando los resultados producidos al

aplicar el método de pinch al sistema, tal y como se expuso en el capítulo 2. La gráfica combinada presenta el siguiente perfil :

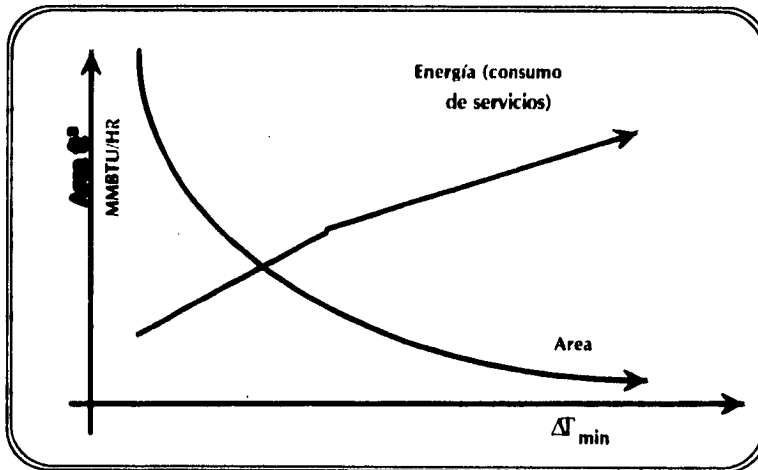


fig. 3.7

Con la ayuda de este gráfico la tarea de analizar la relación área - energía, indispensable para la elección del ΔT_{\min} , se simplifica.

Con la combinación de los valores anteriores puede finalmente construirse la gráfica área - energía.

✕ ELECCIÓN DEL ΔT_{\min} .

La curva generada muestra la relación área - energía que existiría para un intervalo de diseño que utiliza diferentes valores de ΔT_{\min} . Cualquier punto sobre la curva garantiza, que siguiendo el método de ajuste, el diseño se dirige hacia mínimos consumos de energía para un área dada.

Así se podrá decidir sobre la dirección de la optimización, es decir, la utilización de un área de intercambio grande y un bajo consumo de servicios, o el

caso contrario de una inversión menor en área pero con mayor consumo de servicios, según se ajuste a las necesidades del diseño.

En el gráfico 3.8 se muestran los puntos A, B y C que resultan de interés.

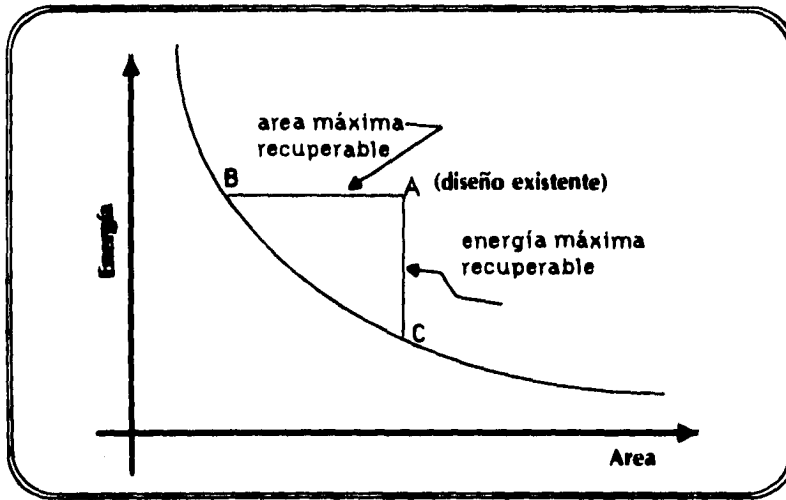
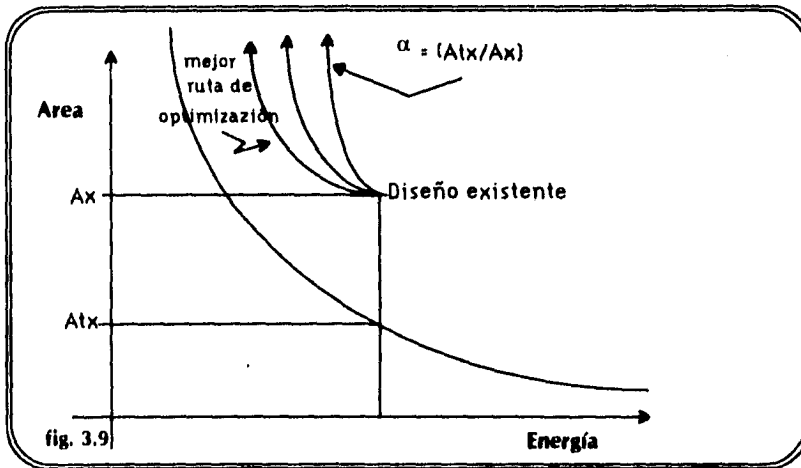


fig. 3.8

El punto A representa las condiciones de una red existente de características no óptimas que se desea mejorar. Para este caso se tienen dos rutas de optimización a seguir, la primera es el ajuste del consumo mínimo de energía conservando el área existente, representado con el punto C, en tanto la segunda es el ajuste de la red al área mínima conservando el mismo consumo de energía, que se representa por el punto B.

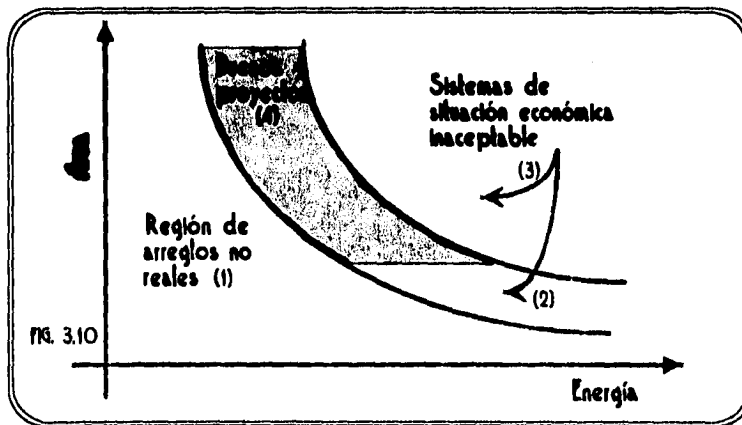
El segundo método es más adecuado para un nuevo diseño, además resulta inapropiado desechar área por la que ya se ha pagado, por ello a través del reajuste se buscará minimizar el consumo de servicios reutilizando al máximo el área existente (primer método).

Para el caso que se estudiará se tienen entonces diversas posibilidades en las rutas de optimización, todas ellas en la misma dirección pero con resultados



dependientes de la buena aplicación del método de readaptación y la experiencia del diseñador. Generalmente se utiliza la ruta que utilice el menor ΔT_{min} .

Para la mejor elección de la ruta de optimización se recomienda utilizar el concepto eficiencia de área α que es igual al cociente del área mínima y el área existente, $\alpha = (A_{min} / A_{exist})$.



El valor de α debe esperarse menor a la unidad para proyectos prácticos, pues un valor igual a la unidad indicaría solo combinaciones paralelas. Así cuanto más bajo sea el valor de α cuanto más pobre la utilización de área y más severas las combinaciones cruzadas. Para ilustrar mejor las facilidades introducidas por α se presenta el gráfico 3.10.

La curva anterior fue generada asumiendo que alfa se mantiene constante a lo largo de todo el intervalo de energía, es decir se conserva la misma utilización de área actual, de tal manera que se crea una región bien delimitada en donde se puede esperar exista un buen reajuste.

El límite fijado por la curva área - energía no puede ser traspasado ya que un punto en la región uno representaría la existencia de un sistema que poseyera un alfa mayor a uno.

En la región marcada por el número dos, se ha limitado la trayectoria de la mejora, debido a lo inaceptable de desechar área por la que ya se pagó, ello obliga a buscar trayectorias arriba del punto de inversión previo.

Con el establecimiento del límite fijado por una alfa dada, se asegura que cuando menos el diseño tendrá una reutilización de área igual a la existente de forma que cualquier trayectoria seleccionada dentro de la región factible (4) representa ya una mejora. Así el uso de un valor de alfa proporciona la seguridad que la trayectoria de la optimización va en el sentido correcto.

Como a la trayectoria no queda definida y para que la elección no quede en el uso de la experiencia, pueden utilizarse las relaciones de inversión vs ahorro anual para hacer la elección final.

Para eliminar esta incertidumbre se ha presentado la utilización de gráficas de ahorro vs inversión^{2,3} (fig. 3.11). Con estas gráficas puede utilizarse datos que se

El valor de α debe esperarse menor a la unidad para proyectos prácticos, pues un valor igual a la unidad indicaría solo combinaciones paralelas. Así cuanto más bajo sea el valor de α cuanto más pobre la utilización de área y más severas las combinaciones cruzadas. Para ilustrar mejor las facilidades introducidas por α se presenta el gráfico 3.10.

La curva anterior fue generada asumiendo que alfa se mantiene constante a lo largo de todo el intervalo de energía, es decir se conserva la misma utilización de área actual, de tal manera que se crea una región bien delimitada en donde se puede esperar exista un buen reajuste.

El límite fijado por la curva área - energía no puede ser traspasado ya que un punto en la región uno representaría la existencia de un sistema que poseyera un alfa mayor a uno.

En la región marcada por el número dos, se ha limitado la trayectoria de la mejora, debido a lo inaceptable de desechar área por la que ya se pagó, ello obliga a buscar trayectorias arriba del punto de inversión previo.

Con el establecimiento del límite fijado por una alfa dada, se asegura que cuando menos el diseño tendrá una reutilización de área igual a la existente de forma que cualquier trayectoria seleccionada dentro de la región factible (4) representa ya una mejora. Así el uso de un valor de alfa proporciona la seguridad que la trayectoria de la optimización va en el sentido correcto.

Como a la trayectoria no queda definida y para que la elección no quede en el uso de la experiencia, pueden utilizarse las relaciones de inversión vs ahorro anual para hacer la elección final.

Para eliminar esta incertidumbre se ha presentado la utilización de gráficas de ahorro vs inversión^{2,3} (fig. 3.11). Con estas gráficas puede utilizarse datos que se

hallan fijado como valores de diseño, es decir especificando el tiempo límite de recuperación de la inversión se podrá finalmente seleccionar el ΔT_{\min} .

En la gráfica 3.11 se ilustran los valores de ΔT_{\min} que pueden ser obtenidos. Contando con los valores de área y su costo, así como los valores de ahorro de energía y su correspondiente reducción en capital.

La gráfica permite observar que para un periodo de recuperación de un año se alcanza un valor x_2 de ahorro al utilizar una inversión y_2 , en tanto que para un periodo mayor de tiempo se requerirá de una inversión mayor pero el ahorro es también substancialmente mayor, para ambos casos el valor de ΔT_{\min} es diferente.

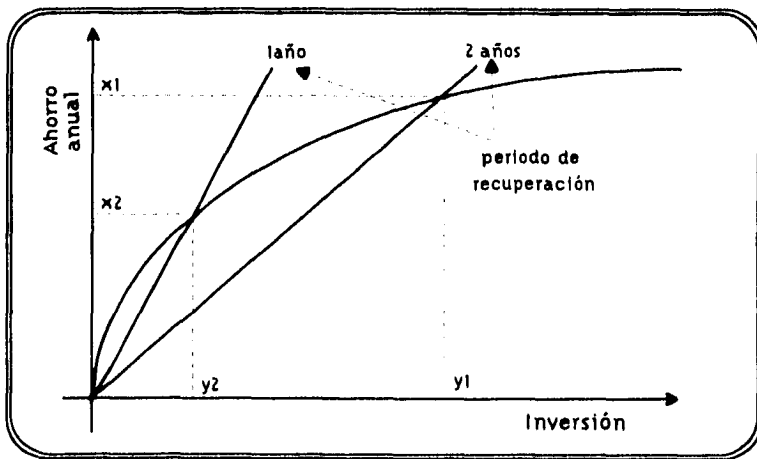


fig. 3.11

De esta forma se tienen objetivos bien definidos con anterioridad al diseño. que pueden ser adaptados a las condiciones que prevalezcan en el lugar donde se desee modificar el proceso.

Debido a que este tipo de evaluación se llevó a cabo de acuerdo a parámetros económicos muy diferentes a los que imperan en nuestro país; se considerará además de los parámetros descritos el costo de oportunidad, es decir " el valor del sacrificio de asignar un bien, un servicio o el capital a un uso alternativo, respecto del que se ha elegido". Para ello se expondrá el ahorro que la compañía podría tener al implementar estas mejoras expresadas en barriles de petróleo equivalentes esto con el fin de demostrar que no solo se ahorraría energía sino que se podría obtener un beneficio adicional si lo que se deja de consumir en servicios se pudiera utilizar comercialmente en el ámbito nacional o internacional, especialmente en el caso de gas natural que en gran cantidad se importa en algunas zonas del país.

Así se expresará el ahorro energético en términos de gas ahorrado y su equivalente en barriles de petróleo; de esta forma las condiciones que ofrezcan mayores ahorros de combustible se estudiarán con mayor detenimiento y finalmente con referencia a los métodos descritos se seleccionará el ΔT_{\min} final.

Habiéndose seleccionado el ΔT_{\min} para la red, solo restará hacer una aplicación en forma evolutiva de las reglas del diseño de redes de intercambio térmico específicamente para trabajos de reajuste, pues si solo se procediera a realizar el diseño por inspección se correría el riesgo de complicar mucho el diseño y no alcanzar los objetivos fijados. A continuación se enuncia el método de diseño que debe seguirse.

✕ PROCEDIMIENTO DE REAJUSTE DE LA RED

Este método fue desarrollado por Tjaan Tjoe y Bodo Linhoff en UMIST en 1986 ^{2,3}

Dicho procedimiento requiere gran interacción; más que ser aplicado mecánicamente, requiere del juicio del diseñador que definirá en gran medida el desarrollo del diseño, además de ser factible de utilizar en cálculos manuales, a n para los casos más complejos.

El algoritmo se describe a continuación:

■ *Identificar cambiadores que cruzan el punto de pliegue.*- Dibujar el sistema en un diagrama de red, utilizando el ΔT_{\min} seleccionado, y localizar equipos que violan el pinch.

■ *Eliminar cambiadores que cruzan el punto de pliegue.*- Sin perder de vista las cargas de cada equipo remover tales unidades.

■ *Completar la red.*- Situar nuevos cambiadores y donde sea posible reutilizar los existentes removidos en el paso anterior, estos cambiadores buscarán el acondicionamiento de las corrientes y absorber el calor excedente producido por la eliminación de equipos.

■ *Realizar mejoras evolutivamente.*- Utilizar las compatibilidades existentes con la red vía ciclos y trayectorias, reutilizando el área disponible al máximo

Un ciclo es una conexión cerrada de corrientes y cambiadores, que inicia y termina en el mismo punto de la red.

Una trayectoria es una conexión, de dos servicios, a través de corrientes y cambiadores.

A través de la mejora de estas características de la red puede irse adaptando el sistema a la máxima reutilización de área conservando un mínimo consumo de servicios. Algunas sugerencias y modificaciones al método se han publicado por diversos grupos de investigadores en Estados Unidos y Australia, que si bien no introducen puntos novedosos, si permiten decidir más fácilmente en una situación ambigua que pueda presentarse. ⁹

Finalmente debe señalarse que elegir el ΔT_{\min} adecuado es vital para el inicio del diseño, pues la elección de otro ΔT_{\min} resulta en un sistema completamente diferente con requerimientos diferentes.

DESCRIPCIÓN DE ANÁLISIS REALIZADOS

Una vez expuestos los fundamentos en los que se basan los estudios principales se expone la forma en que se realizaron utilizando el programa SUPERTARGET.

⊗ ANÁLISIS VÍA DISEÑO NUEVO.

Con el fin de conocer el ΔT_{\min} al cual debería construirse la red si se tratara de un diseño nuevo, se utilizaron las opciones que SUPERTARGET ofrece a través del menú *Diseño Nuevo*, esto con el objetivo de contar con herramientas extras en el análisis de resultados y mejorar la evaluación final.

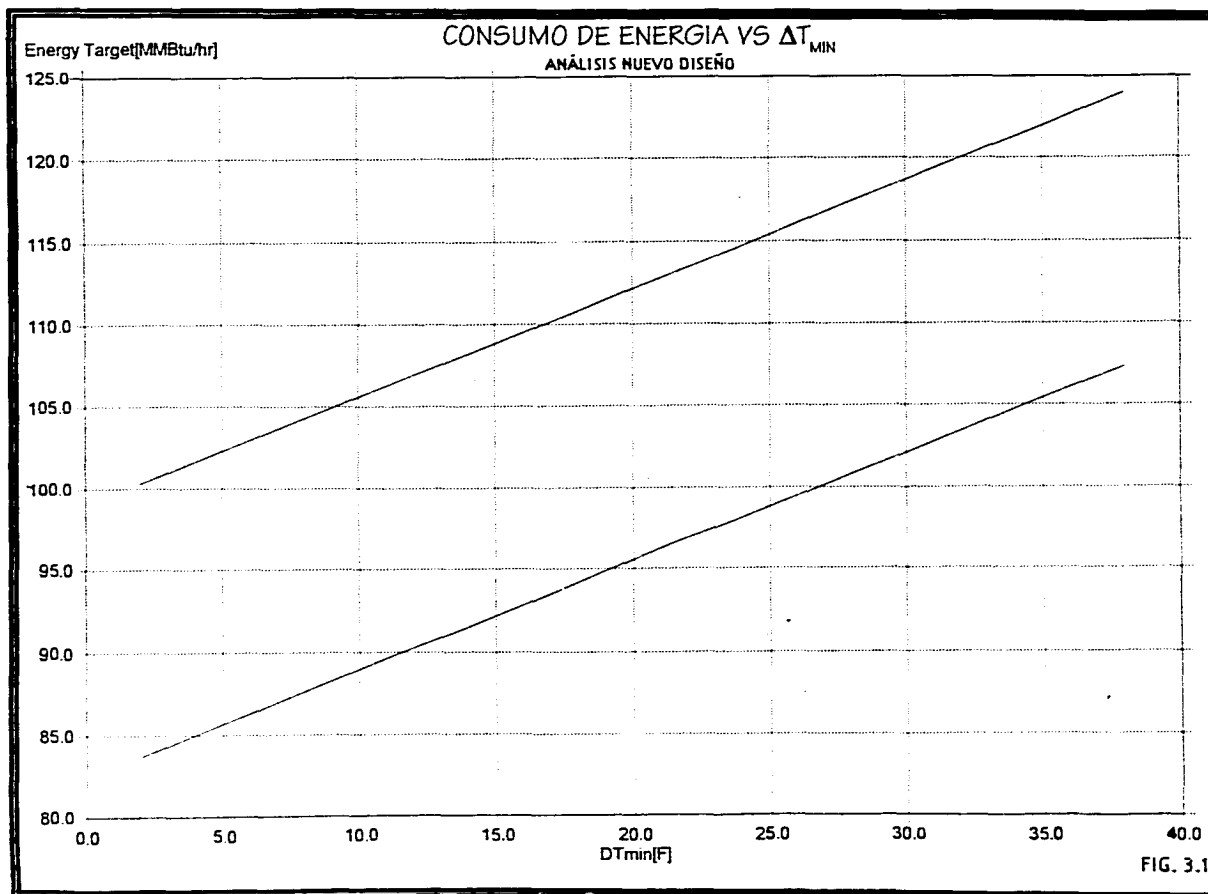
En este menú se debe primero especificar el intervalo de ΔT_{\min} en el cual se va a realizar la evaluación. Este intervalo está limitado por la disponibilidad de servicios tanto de enfriamiento como de calentamiento, en el sentido que deben estar lo suficientemente calientes o fríos para poder responder a la demanda energética, se requiere también que estén bien situados, por ello es necesario se haga este análisis posteriormente a la evaluación del sistema hecho en el menú *point*.

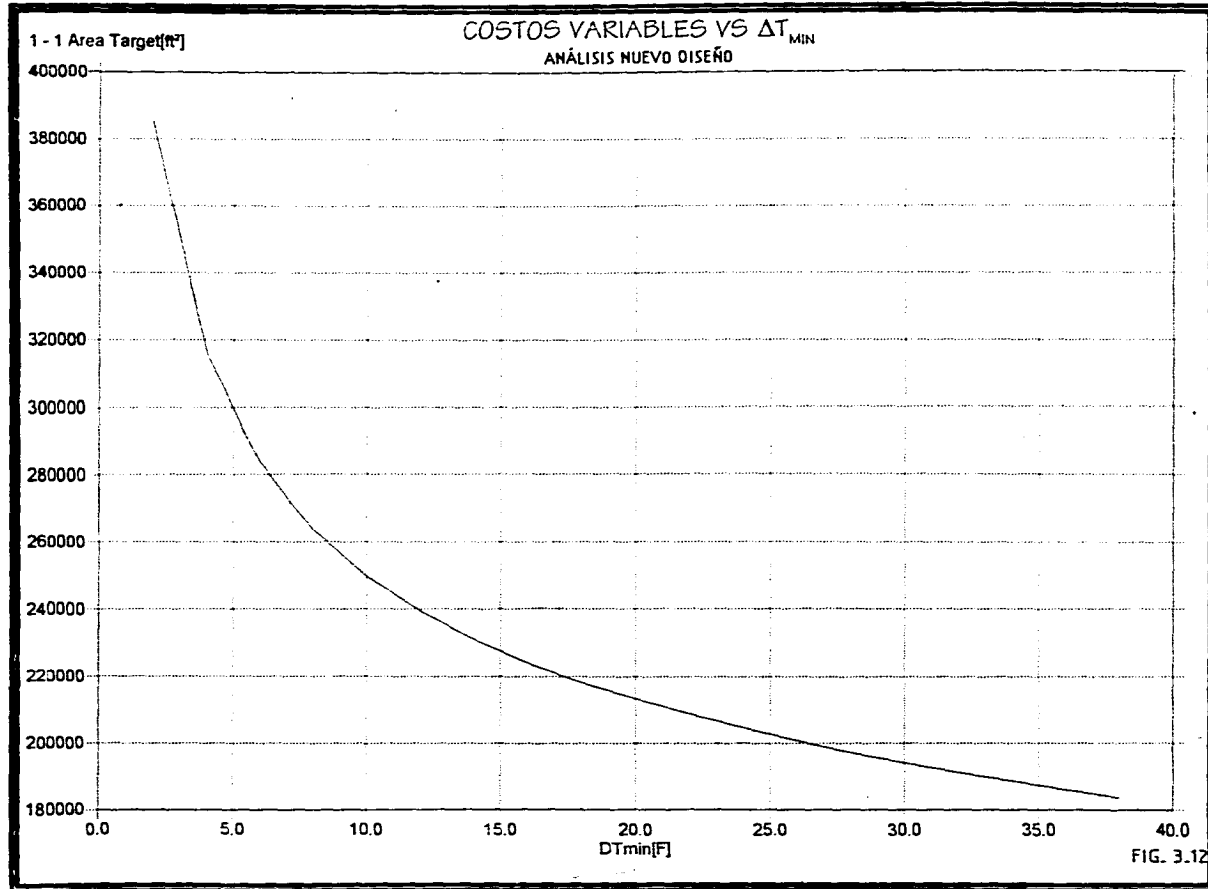
Para especificar el intervalo deseado se asigna en la opción *fixar intervalo* ΔT_{\min} . La aplicación de este comando permite establecer la temperatura de inicio y término de los cálculos así como el tamaño del incremento. Una vez hecho lo anterior se inician los cálculos que permiten la generación de los diagramas.

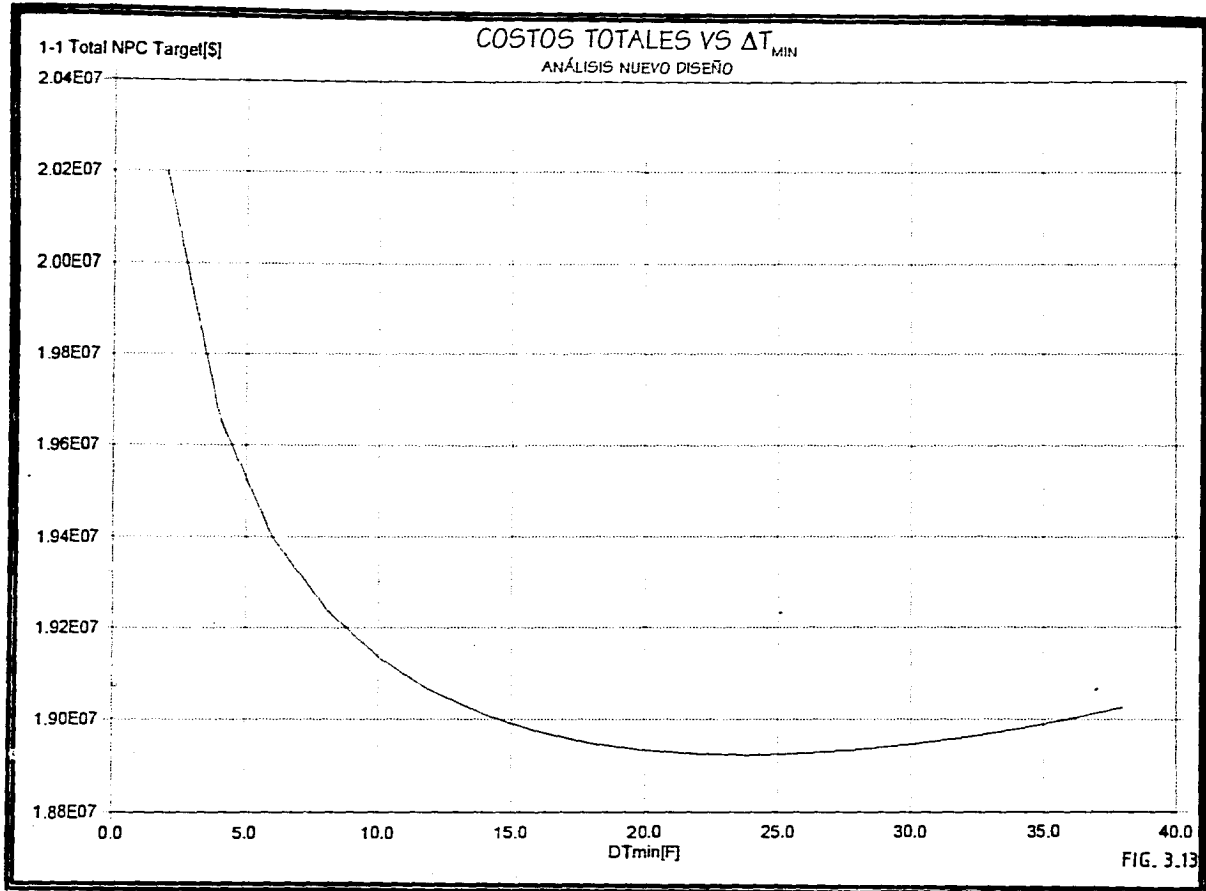
Para apreciar mejor los resultados, SUPERTARGET permite crear una serie de gráficos que ilustran la situación del nuevo diseño. Utilizando el recuadro de

opciones que se presenta al seleccionar diagramas de nuevo diseño en el mismo menú, se pueden generar tres gráficos de forma simultánea y así comparar relaciones diversas al mismo tiempo.

Para el caso de estudio se produjeron los diagramas correspondientes a , energía vs ΔT_{min} (fig. 3.11) Costos variables vs ΔT_{min} (fig. 3.12), y ΔT_{min} vs Costos totales (fig. 3.13), todos entre un intervalo de 1 a 40 °F, que fué el límite permitido por los servicios. Todos estos gráficos aportaron diferentes valores que son analizados en el capítulo siguiente







ANÁLISIS POR REAJUSTE.

Para este análisis se utilizaron los comandos que SUPERTARGET ofrece en el menú reajuste.

En primer lugar se seleccionó el método de optimización a seguir, es decir se estudió la posibilidad de seguir la trayectoria producida por el uso de un valor de alfa constante o seguir la ruta trazada por un alfa variable (gráfica 3.9). Para poder decidir sobre este caso se hizo una evaluación primaria de la red utilizando alfa constante, pues se requería saber el nivel de utilización del área existente ya que si existiera un valor bajo de alfa tomar una trayectoria de valor constante sería erróneo.

A través del primer análisis, se obtuvo que la utilización de área era algo baja, al rededor del 45 %, por ello y siguiendo las recomendaciones de Linhoff y Tjoe² se decidió utilizar una trayectoria de alfa variable.

Una vez seleccionada la trayectoria a seguir se pueden iniciar los cálculos, para ello se especifica el intervalo de temperatura en que se llevará a cabo la evaluación. La especificación anterior se realizó en el submenú fijar intervalo ΔT_{\min} seleccionando un intervalo de temperaturas de 5 a 50 °F con un incremento de 1 °F.

Posteriormente fué necesario especificar los valores de alfa que se desea se utilicen para los cálculos, pueden especificarse hasta tres valores y en caso de no especificarse valor alguno SUPERTARGET utiliza el valor existente de alfa.

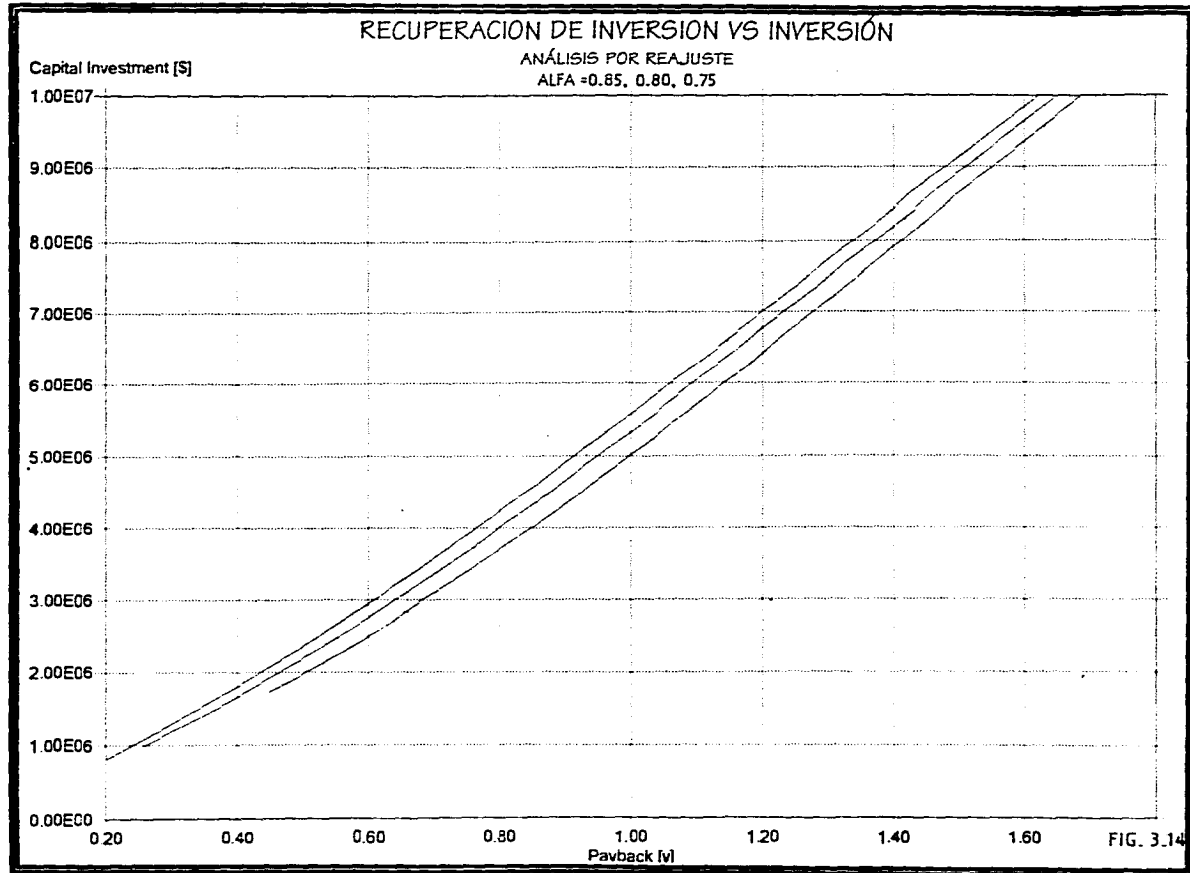
En este mismo recuadro deben especificarse los costos de los servicios tanto de calentamiento como de enfriamiento, con el fin de poder calcular el ahorro anual al reducirse sus consumos.

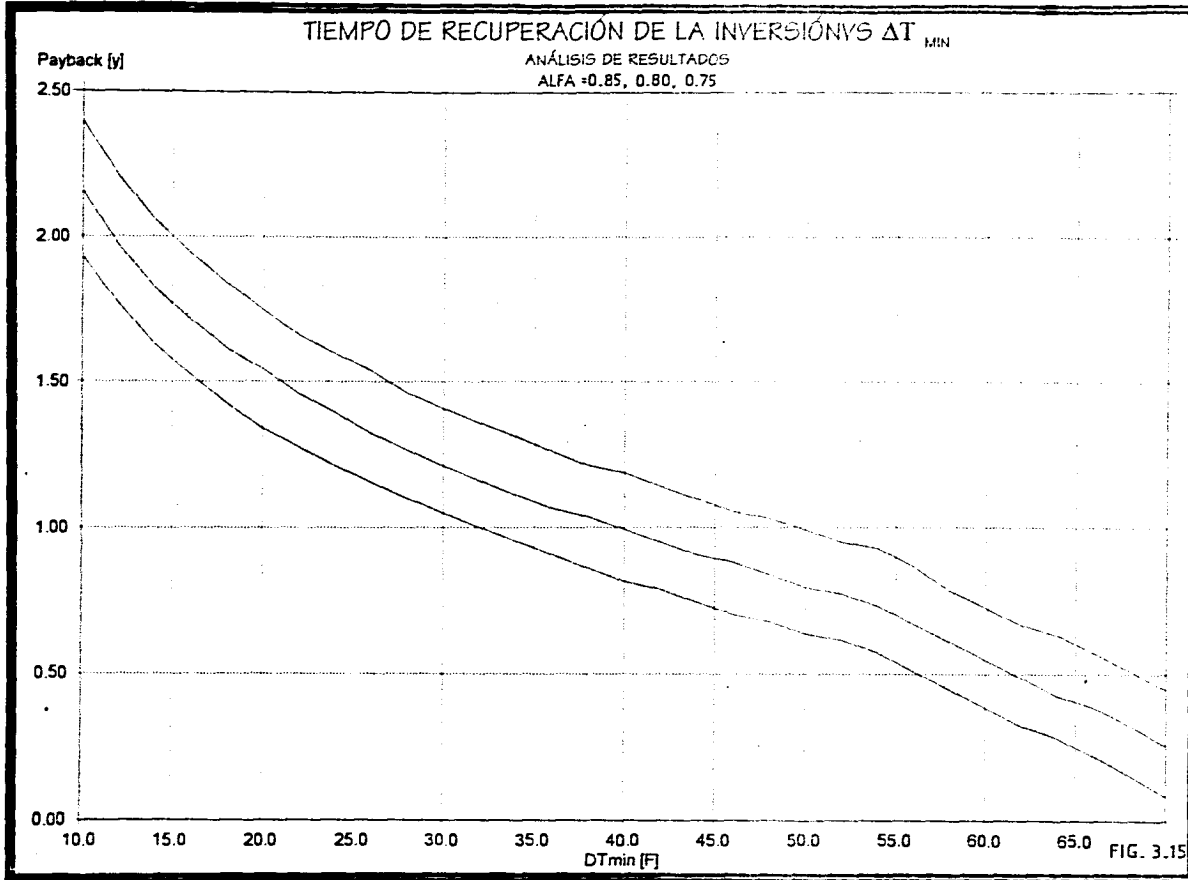
Para el caso del área se necesita especificar el promedio de área por unidad que se dispone y el total de área disponible, con estos valores se calculan las condiciones de uso de área.

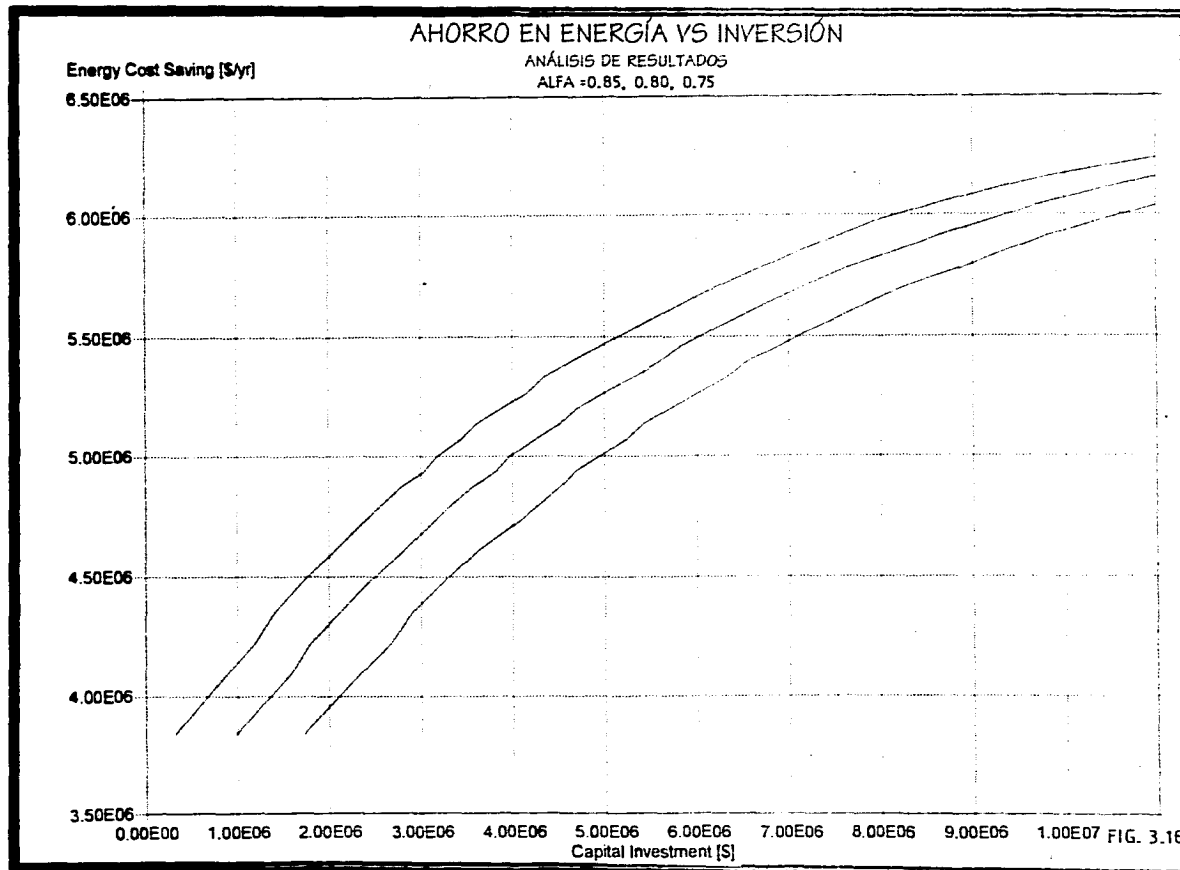
Los valores especificados fueron los siguientes:

<i>Método de reajuste</i>	<i>alfa variable.</i>
<i>Valores para alfa</i>	<i>0.85, 0.80, 0.75</i>
<i>Costo de serv. calent.</i>	<i>46 117\$/yr (MMBTU/hr)</i>
<i>Costo de serv. enf.</i>	<i>3516 \$/yr(MMBTU/hr)</i>
<i>Area/shell</i>	<i>4300 FT²</i>
<i>Área disponible</i>	<i>110 000 FT²</i>
<i>Consumo servicios de calentamiento</i>	<i>216 (MMBTU/hr)</i>

Una vez hecha esta especificación se puede elegir, entre un menú de opciones, los gráficos que se quiere generar con el fin de poder seleccionar el ΔT_{\min} final. Para este análisis se crearon los gráficos de Recuperación de la inversión vs Inversión (fig. 3.14) , recuperación de la inversión vs ΔT_{\min} , (fig. 3.15), e inversión vs ahorro de energía (fig. 3.16).







CAPÍTULO CUARTO:

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

☒ RESULTADOS DEL ANÁLISIS PRIMARIO.

La información más importante que se deriva de la aplicación de los principios básicos del punto de pliegue es la situación energética del sistema, que permite conocer el nivel de utilización de recursos y con ello prever los posibles ahorros de servicios con su consecuente reducción en los costos de operación de la planta.

Entre los documentos generados; como ya se mencionó se encuentran las curvas compuestas y los reportes energéticos.

Observando la curva compuesta construida con datos que no incluyen las corrientes de producto de domo de la torre fraccionadora y de la despuntadora de naftas (como el sistema fué diseñado en un principio), se puede notar que el sistema original tiene un consumo excesivo de servicios de enfriamiento, revelado por la gran separación entre las secciones finales de las curvas (gráfica 2.4); así mismo se puede observar que el consumo de servicios de calentamiento, a pesar de ser mejor utilizados, sobrepasa el consumo mínimo que el método de punto de pliegue predice.

Se encuentra que el punto de pliegue se da a 557.5 °F. Los consumos de servicios predichos a través de la aplicación de este método son 88.315 MMBTU/hr para el calentamiento (contra los 216.525 MMBTU/hr que consume actualmente), y de 410.3 MMBTU/hr para enfriamiento, con ello puede estimarse que; si la red vuelve a construirse a $\Delta T_{\min} = 9$ °F, se tendría una disminución del 59.25% solo en servicios de calentamiento.

Observando la gran curva compuesta correspondiente al sistema original (gráfica 2.6) se puede ver que solo hay una pequeña área de la curva capaz de suplir la demanda energética del proceso vía intercambio proceso - proceso, esta área se encuentra en la parte final de la curva (abajo del pinch), e indica la

existencia de una fuente de calor en plena zona fría de manera que deberá tomarse en cuenta para las combinaciones en el diseño final.

Como ya se mencionó, en el sistema original se tienen dos corrientes de gran carga térmica que son llevados a sus temperaturas objetivo utilizando solo servicios de enfriamiento, con la consecuencia en el aumento de servicios, por ello se integraron estas corrientes a la red de intercambio.

Para conocer las mejoras introducidas deben analizarse las curvas correspondientes al sistema modificado.

Como se nota en la gráfica 2.5, al integrar las dos corrientes de los domos de las torres se produce una reducción muy significativa en el consumo de servicios de enfriamiento, indicado por la reducción en la separación de las curvas en su parte inferior; en tanto que los servicios de calentamiento permanecen al mismo nivel.

Con la introducción de las corrientes a la estructura de la red se produce un decremento sustancial en el consumo energético globales, pues como ya se mencionó anteriormente la reducción en servicios de calentamiento es de 59.25%, en tanto que se reducen los servicios de enfriamiento en 74.9%, todo esto si la red volviera a diseñarse a 9°F.

En el reporte energético, (Tabla 2.3), puede observarse la existencia de tres puntos de pliegue, pero dos de ellos ocurren para los servicios, de hecho el único punto de pliegue de interés es el que ya se ha descrito.

Al analizar el reporte del problema (Tabla 2.4), encontramos que al rededor del punto de pliegue se encuentran zonas restringidas en cuanto a disponibilidad de energía se refiere, pues en cada uno de esos subsistemas se transfieren cargas pequeñas de calor, esto nos indica que el diseño de la red final deberá realizarse en forma cuidadosa y posiblemente se requieran divisiones de corrientes.

Para poder analizar los datos con los que se hicieron los análisis, en la tabla 2.5 se presentan los valores de todas las corrientes correspondientes a

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

temperaturas, cargas térmicas, coeficientes de transferencia y capacidades caloríficas.

☒ ANÁLISIS DEL NUEVO DISEÑO.

Para conocer la situación del sistema para el caso de un diseño nuevo se produjeron las gráficas 3.11 a 3.13. En ellas se tiene la oportunidad de evaluar las relaciones de costo para un amplio rango de ΔT_{\min} así como las condiciones de energía para cada situación.

En el gráfico 3.11 se observa una disminución del costo de área al aumentar el ΔT_{\min} . Esta situación es muy pronunciada en el rango de 5 a 25 °F, pero para ΔT_{\min} mayores, la disminución de los costos de área respecto a la diferencia de temperaturas es mucho menor, esto es lógico, pues se necesita menos área de intercambio para alcanzar la diferencia de temperatura entre las corrientes que salen de cada equipo, sin embargo puede preverse que para ΔT_{\min} mayores a 50 °F la razón de cambio se acercará rápidamente a cero.

El gráfico 3.12 se observa un aumento en proporción directa entre el ΔT_{\min} y el consumo de energía, tendencia que se conserva en toda la gráfica y concuerda con los valores obtenidos en el análisis anterior para 9°F. Debe señalarse que la línea superior corresponde con los servicios de enfriamiento y la inferior con los de calentamiento.

Finalmente el gráfico 3.13 presenta la curva costos totales contra ΔT_{\min} . En esta gráfica podemos observar que existe un mínimo para 24.5°F y 18.9 millones de dólares por año. Este valor corresponde al ΔT_{\min} a que debería ser construida una red nueva. Ello propone que la red que existe debió ser concebida con un ΔT_{\min} bastante mayor al que posee en la actualidad.

ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN DE LA RED.

Para conocer el estado de la red de intercambio de calor, se generó un nuevo archivo en que se introdujeron los datos de todas las unidades que se consideraron en el análisis de la red existente. (gráfica 4.1)

A través de la gráfica generada y de la aplicación del punto de pliegue a la misma, se encontró que no se guardaba un arreglo adecuado entre las unidades.

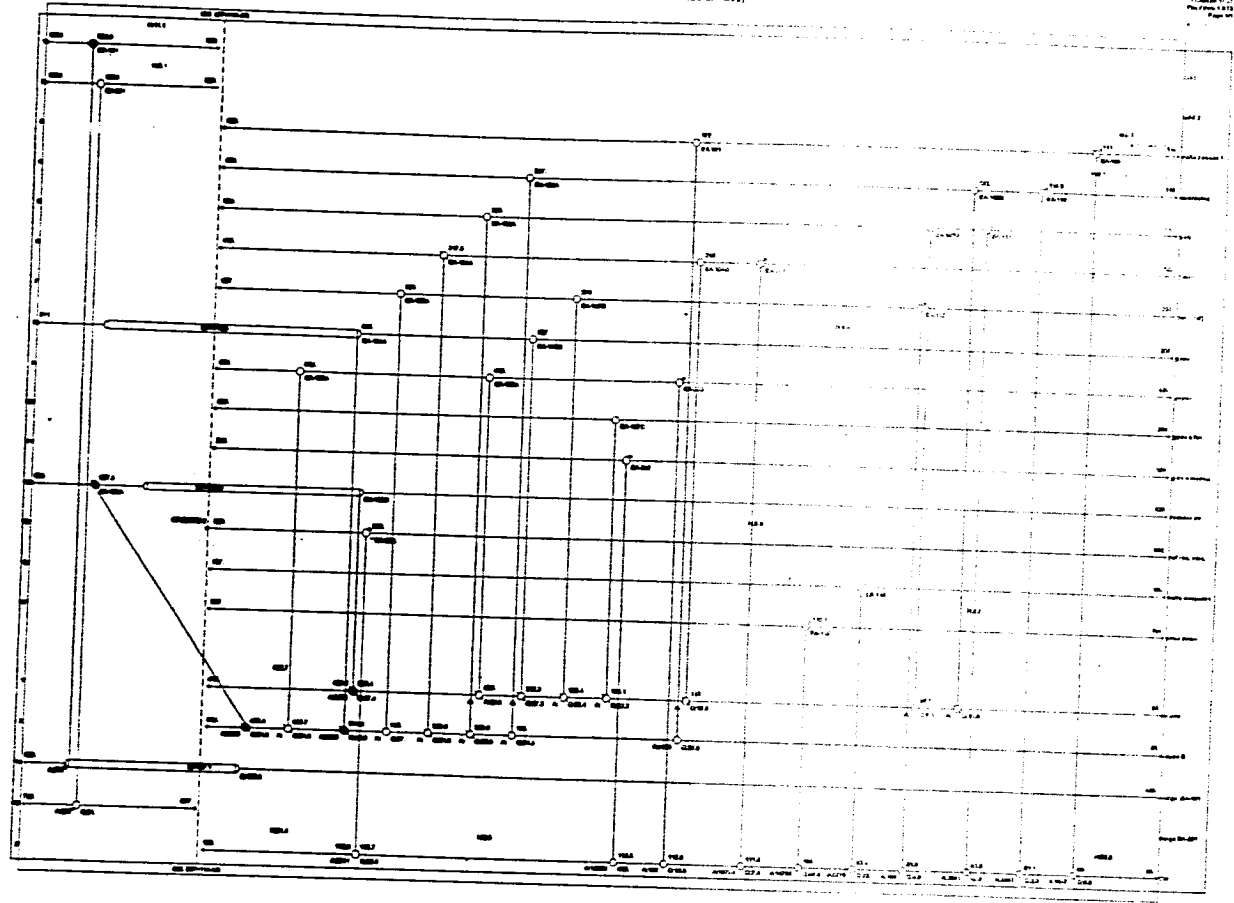
En este análisis se pudo reconocer que hay equipos que violan el punto de pliegue como son el EA-106A, EA-108A, EA-108B, y el BA-101. En el gráfico 4.2 se presentan las cargas de estos equipos que violan el pinch.

Debe notarse que la generación de la red se realizó utilizando los valores de temperatura, masa y capacidad calorífica con los que se analizó toda la red, con ello SUPERTARGET solo generó los valores de área de intercambio de calor que resultaron (en la mayoría de los casos), suficientemente cercanos a los valores con que se contaba. Estos resultados no concordaron con los reales para todos los casos ya que como se ha mencionado casi todas las unidades de la red cuentan con la misma área sin importar su carga, ello reviste interés especial en el caso de los equipos EA-103B y EA-106A que manejan 8.181 MMBTU/hr y 40.230 MMBTU/hr respectivamente. Como se puede ver es ilógico que ambos cambiadores usen la misma área al manejar una diferencia de cargas tan grande, estas irregularidades se tomarán en cuenta para el diseño del arreglo final donde se necesitará hacer un mejor uso del área de intercambio. En la tabla 4.1 se pueden observar los valores obtenidos en el cálculo de las áreas.

11-2000-11-2
11-2000-11-2
11-2000-11-2

Diagram of the system

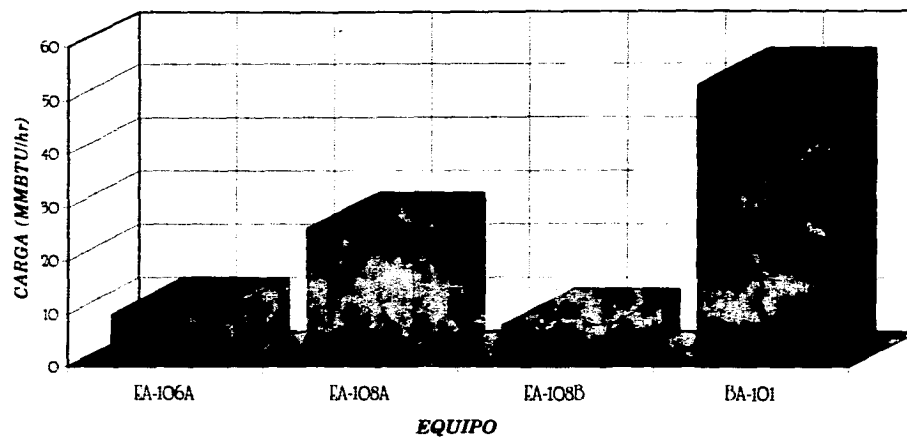
11-2000-11-2
11-2000-11-2
11-2000-11-2



REPORTE DE CALCULO DE CAMBIADORES DE CALOR									
No	Name	Duty	A12/A11	Shls/Ft	Spec	OHTC	Branch	Tin	Tout
1	EA-101	26.8	4488.13	1	T1,T3,T4	3.43E+1	nafta pesada 1	429.00	177.02
			4130.94	0.920			crudo B	68.00	128.00
2	EA-102A	31.4	3738.45	1	T1,T2,T3	5.13E+1	querosina	470.00	237.00
			3407.31	0.911			crudo B	126.00	193.53
3	EA-102B	11.9	5405.17	1	T1,T2,T3	2.39E+1	querosina	237.00	132.00
			5115.44	0.946			crudo	68.00	95.12
4	EA-103A	23.8	5695.15	1	T1,T2,T3	3.24E+1	golp	554.00	250.00
			4886.37	0.860			crudo B	193.53	240.47
5	EA-103B	8.119957	13875.30	2	T1,T2,T3	8.60152	golp	250.00	124.00
			13592.21	0.980			crudo	95.12	112.99
6	EA-104A	19.8	5097.24	1	T1,T3,T4	3.97E+1	golav	415.00	317.64
			4792.40	0.940			crudo B	240.47	278.00
7	EA-104B	18.8	13168.08	2	T1,T2,T3	1.10E+1	golav	317.64	216.00
			13036.88	0.990			crudo	112.99	153.14
8	EA-105A	37.0	2946.38	1	T1,T2,T3	8.63E+1	golp (ref)	557.00	390.00
			2717.54	0.922			crudo B	278.00	341.87
9	EA-107C	22.2	13343.48	2	T1,T2,T3	9.83550	gopav a fcc	459.00	256.00
			13162.01	0.986			crudo	153.14	198.38
10	EA-105B	22.4	3103.33	1	T1,T2,T3	7.16E+1	golp (ref)	390.00	276.00
			2865.66	0.923			crudo	188.38	242.26
11	EA-106B	27.2	6241.47	1	T1,T2,T3	4.13E+1	gopp	444.00	327.00
			5730.06	0.918			crudo	242.28	292.99
12	EA-107A	28.3	2394.68	1	T1,T2,T3	1.18E+2	gopav	555.00	516.00
			2325.79	0.971			crudo B	409.67	455.40
13	EA-107B	39.9	2354.01	1	T1,T2,T3	1.09E+2	gopav	518.00	459.00
			2290.40	0.973			crudo	292.99	363.42
14	BA-201	61.0	286.05	1	T1,T3,T4	2.49E+2	GAS 2	2500.00	1000.00
			277.64	0.971			carga BA-201	647.00	725.00
15	EA-109	6.882776	1647.17	1	T1,T3,T4	9.13E+1	nafta pesada 1	177.02	110.95
			1636.71	0.994			CW	90.00	91.10
16	EA-110	2.254988	2861.27	1	T1,T2,T3	2.75E+1	querosina	132.00	110.54
			2656.66	0.988			CW	91.10	91.46
17	EA-111	8.349E-1	2981.43	1	T1,T2,T3	1.13E+1	golp	124.00	110.00
			2979.90	0.999			CW	91.46	91.59
18	EA-112	4.782497	167.52	1	T1,T2,T3	1.49E+2	golp (ref)	276.00	250.00
			167.50	1.000			CW	91.59	92.38
19	EA-115	73.0	5375.15	2	T1,T2,T3	2.08E+2	nafta despunte	347.00	100.00
			5208.56	0.969			CW	92.38	104.02
20	EA-116	48.5	14703.03	3	T1,T3,T4	5.71E+1	prod domo	307.00	110.66
			14566.49	0.991			CW	104.02	111.45
21	EA-201	7.363433	10790.31	2	T1,T2,T3	1.80E+1	golav	216.00	120.00
			10752.27	0.996			CW	111.45	112.63
22	EA-203	13.3	131.94	1	T1,T2,T3	3.03E+2	gopav	459.00	435.00
			131.93	1.000			CW	112.63	114.75
23	EA-202	6.047612	12251.70	2	T1,T2,T3	7.94224	glav a mezcla	216.00	150.00
			12243.15	0.999			CW	114.75	115.72
24	EA-204	65.5	3810.94	0	T1,T2,T3	0	ref rad. visc.	562.00	363.00
			3810.94	1.000			CW	115.72	116.58
25	EA-106A	40.5	3039.24	1	T1,T2,T3	1.01E+2	gopp	611.00	444.00
			2740.20	0.902			crudo B	341.87	409.67
26	EA-108A	31.6	2485.09	1	T1,T3,T4	8.38E+1	residuo av	680.00	597.90
			2396.49	0.972			crudo B	455.40	505.00
27	EA-106B	27.4	2671.50	1	T1,T2,T3	5.97E+1	residuo av	597.90	526.00
			2622.61	0.982			crudo	363.42	409.50
28	BA-101	155.6	374.70	1	T1,T3,T4	3.61E+2	GAS	3000.00	992.90
			351.57	0.938			carga BA-101	445.00	682.00

TABLA 4.1

CAMBIADORES QUE CRUZAN EL PUNTO DE PLIEGUE A 32°F



ANÁLISIS DEL REAJUSTE.

Através de la aplicación de las herramientas que el SUPERTARGET ofrece para este tipo de análisis se llegó a las condiciones energéticas que debe guardar la red para su diseño final, a continuación se expone la forma en que se alcanzaron tales resultados.

Como se mencionó en el capítulo precedente, se generaron diversas gráficas para poder comparar las relaciones de inversión, ahorro, recuperación de la inversión y ΔT_{\min} que ocurrían para las condiciones de la red existente.

Los resultados que se obtuvieron luego de los primeros cálculos, indicaron que la red tenía una utilización baja de área (45 %), por ello se decidió usar un modelo de alfa variable ^{2,3}.

Al aplicar el modelo seleccionado se encontró que para las condiciones económicas existentes había periodos de recuperación de inversión que iban desde 2.5 años hasta 2 meses, en tanto que la inversión requerida se encontraba entre 1.0 y 15 millones de dólares (gráfica 3.15).

Para poder hacer la decisión final, se buscaron los datos de inversión y ahorro para periodos de recuperación de entre 10 meses y 1.5 años; una vez hecho esto en el gráfico correspondiente se trazaron las líneas que se formaban al localizar estos valores, con ello se tuvo información completa de relaciones costo - energía reinantes (gráfica 4.3)

En base a lo expuesto en el planteamiento de objetivos, se buscaron inversiones que no sobrepasaran los 6 millones de dólares, y sin embargo ofrecieran un ahorro atractivo en el consumo de energía.

Otro punto que intervino en la decisión final fué la reutilización de la red, pues tal y como se planteó se debía utilizar al máximo recursos existentes, pero siempre dentro de condiciones razonables, por ello solo se realizaron cálculos utilizando alfas de entre 0.85 y 0.7 pues considerar condiciones de utilización de área menores resultaría en una mejora poco significativa de la red.

Al observar los valores se encuentra que existe un gran número de opciones capaces de cumplir con los límites impuestos (tabla 4.2).

Primero se observó la proporción que guardaban entre el monto de la inversión y el ahorro anual en energía con el fin de observar qué valores producían un mayor ahorro con una menor inversión, sin embargo todos los conjunto de valores presentaron una proporción similar de forma que cuanto más se invierte más se ahorra y solo varía el tiempo de recuperación de capital. Es de notar que el grupo de valores pertenecientes a un alfa de 0.80 dieron las menores relaciones, es decir fueron menos atractivos.

Como segundo criterio se procedió a analizar el ahorro en energía. En este aspecto obviamente los mayores ahorros se dieron para el alfa de 0.85 pues al utilizar mejor el área disponible se requiere de una inversión menor en superficie de intercambio.

Debido a que se seguía contando con un gran número de posibilidades se recurrió al uso de la gráfica propuesta por Linhoff y Tjoe² mismo que se presenta en la figura 4.3. En este gráfico se marcaron los límites establecidos al principio del estudio para inversión y tiempo de recuperación encontrándose que el parámetro limitante era la inversión pues la mayoría de los periodos de recuperación estaban muy por debajo del límite.

Si se considera que la compañía al fijar el monto de la inversión está dispuesta a hacer un gasto de esa magnitud entonces el resultado del estudio se establecería sobre las condiciones que ofrezcan el mayor ahorro energético con la inversión más cercana al límite. Bajo este criterio destaca un par de valores que poseen la misma alfa y periodo de recuperación de capital prácticamente igual, para un grupo de valores se tiene una inversión de 5.935 millones de dólares para un ahorro anual de 5.653 millones, en tanto que para el segundo grupo la inversión es de 5.589 millones de dólares para un ahorro anual de 5.588 millones; como se puede observar la diferencia en inversión es de 346 mil dólares en tanto que el

ahorro presenta una diferencia de solo 65 mil dólares anuales. Aunque se tienen periodos de recuperación de capital muy similares debe tenerse en cuenta que el estudio solo considera costos de instalación de cambiadores y no involucra una estimación rigurosa de gastos por concepto de cambios en la estructura de la red como son tuberías extra, válvulas y demás aspectos relacionados, de tal forma que dejar un margen por debajo de la inversión para estos puntos puede resultar interesante, además la diferencia en reducción de consumo de energía es al rededor de 1MMBTU/hr que si bien es considerable no es extraordinario. En base a todo lo descrito se selecciona el segundo grupo de valores que se presenta finalmente en la tabla siguiente:

ΔT_{min}	32°F
Inversión	\$ 5 589 000.00
Periodo	
Recuperación	1.0 años (360 dias)
Ahorro anual	5 588 100.00 \$/año
Aumento área	60 356 ft²
Consumo servicios:	
calentamiento	103.57 MMBTU/hr
enfriamiento	116.4 MMBTU/hr

tabla 4.2

Tal y como se expuso en la descripción del método de reajuste se expresará el ahorro de combustible en términos de barriles equivalentes de petróleo.

Del reporte de actividades de PEMEX correspondiente a 1994 se encuentra que el volumen de transferencia de gas natural de Gas y Petroquímica a Refinación fué

de 111 MMpcd con un valor de N\$274 millones lo que representa un costo de 2.47 N\$/ft³ tomando el caso de los servicios de calentamiento se encuentra que la reducción sería de 113 MMBTU/hr.

Considerando que el potencial calorífico del gas es de 10103 Kcal/m³ o 1135.5 BTU/ft³ los 113 MMBTU/hr representarían dejar de consumir 94 865.7 ft³/hr que expresado en años sería 831.023x10⁶ ft³; en base al precio obtenido del reporte de actividades el valor de esta inversión sería de 2,044.3x10⁹ N\$/año que en dólares representa: 603.2 x10⁶ \$/ año. Todo esto si se expresa en barriles equivalentes de petróleo resulta en 166 205 bl/año que al precio actual de 18.33 \$/bl representa 3.046x10⁶ \$/año

El ahorro anterior solo representa la reducción en consumo de gas natural, para el caso del agua tenemos que la reducción es de 300.552 MMBTU/hr que representa una reducción en costos de 1 056 740.8 N\$/año o 310 806.1x10⁶ \$/año.

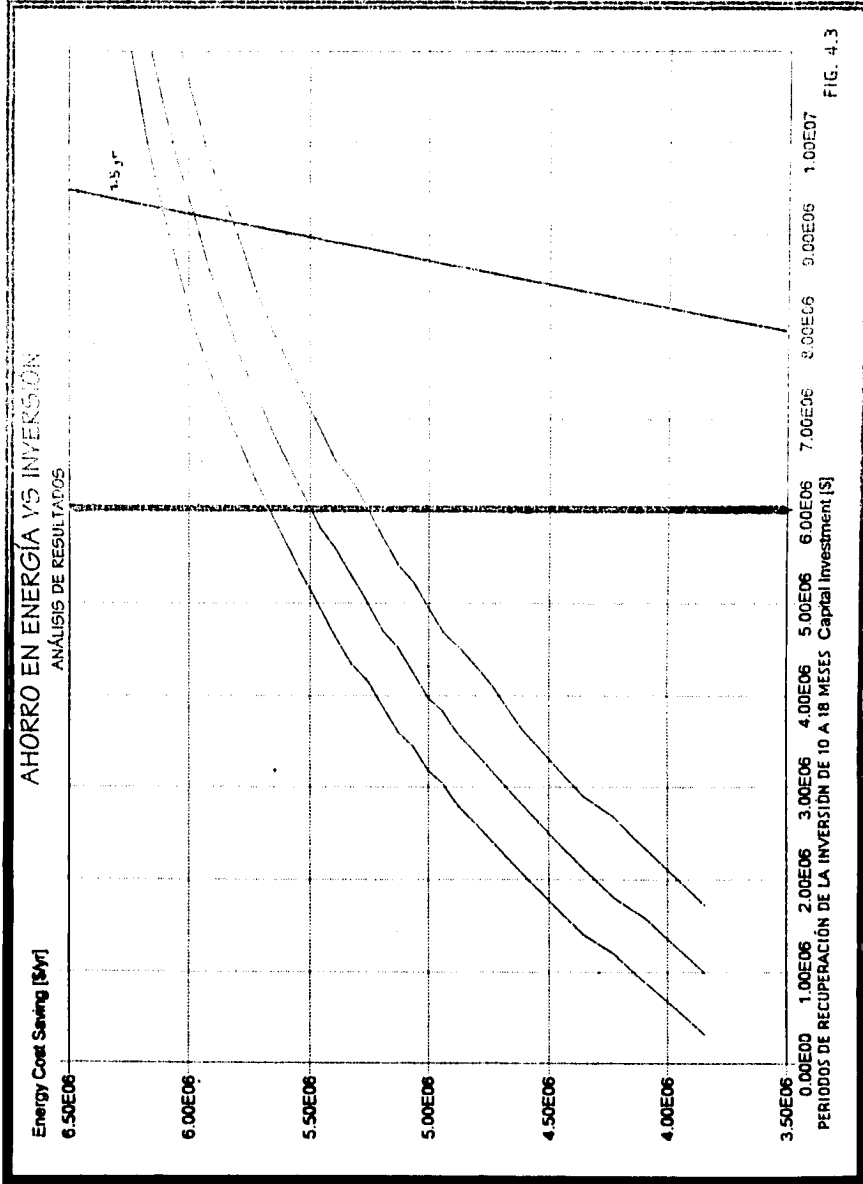
Como se puede observar al analizarse desde diversos puntos de vista el proyecto representa una oportunidad que debe ser tomada en cuenta ya que no solo se trata de un ahorro de energía sino en la posibilidad de producir recursos que pueden ser empleados en muy diversas formas.

de 111 MMpcd con un valor de N\$274 millones lo que representa un costo de 2.47 N\$/ft³ tomando el caso de los servicios de calentamiento se encuentra que la reducción sería de 113 MMBTU/hr.

Considerando que el potencial calorífico del gas es de 10103 Kcal/m³ o 1135.5 BTU/ft³ los 113 MMBTU/hr representarían dejar de consumir 94 865.7 ft³/hr que expresado en años sería 831.023x10⁶ ft³; en base al precio obtenido del reporte de actividades el valor de esta inversión sería de 2,044.3x10⁹ N\$/año que en dólares representa: 603.2 x10⁶ \$/ año. Todo esto si se expresa en barriles equivalentes de petróleo resulta en 166 205 bl/año que al precio actual de 18.33 \$/bl representa 3.046x10⁶ \$/año

El ahorro anterior solo representa la reducción en consumo de gas natural, para el caso del agua tenemos que la reducción es de 300.552 MMBTU/hr que representa una reducción en costos de 1 056 740.8 N\$/año o 310 806.1x10⁶ \$/año.

Como se puede observar al analizarse desde diversos puntos de vista el proyecto representa una oportunidad que debe ser tomada en cuenta ya que no solo se trata de un ahorro de energía sino en la posibilidad de producir recursos que pueden ser empleados en muy diversas formas.



REPORTE DE BÚSQUEDA POR REAJUSTE

DATOS DE LA RED EXISTENTE:

ALFA :0.464

SERVICIOS DE CALENTAMIENTO- 216.5 MMBTU/hr

ÁREA: 110000FT²

ÁREA /UNIDAD- 4000 FT²

COSTO SERVICIOS DE CALENTAMIENTO -46117.0 [\$(AÑO·(MMBTU/hr))]

COSTO SERVICIOS DE ENFRIAMIENTO - 3515.0 [\$(AÑO·(MMBTU/hr))]

DT (F)	En.Reduc. (1)	Inc.Area (R ²)	Saving (\$/yr)	Invest (\$)	Payback (a)	Incr.PB (a)
Alpha = .750						
10.00	127.0	165254.30	6.3048E+6	1.5119E+7	2.40	20.72
12.00	125.7	150894.00	6.2398E+6	1.3769E+7	2.21	18.31
14.00	124.4	139358.30	6.1745E+6	1.2706E+7	2.06	12.81
18.00	123.1	129736.80	6.1093E+6	1.1872E+7	1.94	11.44
18.00	121.8	121484.50	6.0442E+6	1.1127E+7	1.84	10.41
20.00	120.5	114255.10	5.9790E+6	1.0449E+7	1.75	9.62
22.00	119.2	107816.50	5.9139E+6	9.8224E+6	1.66	7.41
24.00	117.9	102004.80	5.8487E+6	9.3398E+6	1.60	6.90
26.00	116.5	96702.59	5.7836E+6	8.8903E+6	1.54	6.05
26.00	115.2	91621.35	5.7184E+6	8.3658E+6	1.46	6.12
30.00	113.9	87264.95	5.6533E+6	7.9672E+6	1.41	5.82
32.00	112.6	83070.89	5.5881E+6	7.5883E+6	1.36	5.55
34.00	111.3	78107.82	5.5230E+6	7.2265E+6	1.31	5.33
36.00	110.0	73372.81	5.4578E+6	6.8798E+6	1.26	5.12
38.00	108.7	71038.88	5.3927E+6	6.5457E+6	1.21	3.37
40.00	107.3	66483.15	5.3275E+6	6.3260E+6	1.19	4.76
42.00	106.0	62267.13	5.2623E+6	6.0145E+6	1.14	4.64
44.00	104.7	62236.50	5.1972E+6	5.7125E+6	1.10	4.49
46.00	103.4	59333.02	5.1320E+6	5.4200E+6	1.06	2.80
48.00	102.1	56549.39	5.0669E+6	5.2374E+6	1.03	4.25
50.00	100.8	53876.48	5.0017E+6	4.9604E+6	9.92E-1	4.15
52.00	99.5	51308.34	4.9366E+6	4.6898E+6	9.50E-1	2.49
54.00	98.1	48748.20	4.8692E+6	4.5217E+6	9.29E-1	3.18
56.00	95.5	44108.59	4.7404E+6	4.1153E+6	8.68E-1	3.80
58.00	92.9	39751.95	4.6115E+6	3.6262E+6	7.68E-1	2.87
60.00	90.3	35668.34	4.4827E+6	3.2595E+6	7.26E-1	2.70
62.00	87.7	31917.33	4.3539E+6	2.9085E+6	6.68E-1	1.82
Alpha = .800						
12.00	125.7	134588.10	6.2398E+6	1.2292E+7	1.97	15.58
14.00	124.4	123773.40	6.1745E+6	1.1277E+7	1.83	12.20
16.00	123.1	114753.20	6.1093E+6	1.0481E+7	1.72	10.92
18.00	121.8	107016.70	6.0442E+6	9.7702E+6	1.62	8.38
20.00	120.5	100239.20	5.9790E+6	9.2241E+6	1.54	9.21
22.00	119.2	94202.98	5.9139E+6	8.8243E+6	1.46	7.05
24.00	117.9	88754.53	5.8487E+6	8.1652E+6	1.40	8.14
26.00	116.5	83783.87	5.7836E+6	7.8348E+6	1.32	6.17
28.00	115.2	79207.52	5.7184E+6	7.2330E+6	1.26	5.83
30.00	113.9	74964.02	5.6533E+6	6.6528E+6	1.21	5.55
32.00	112.6	71003.77	5.5881E+6	6.4912E+6	1.18	5.30
34.00	111.3	67266.87	5.5230E+6	6.1456E+6	1.11	5.09
36.00	110.0	63767.11	5.4578E+6	5.8139E+6	1.07	3.33

TABLA 4.3

REPORTE DE BÚSQUEDA POR REAJUSTE

DATOS DE LA RED EXISTENTE:

ALFA :8.464

SERVICIOS DE CALENTAMIENTO- 216.5 MMBTU/hr

ÁREA: 110000FT²

ÁREA /UNIDAD- 4000 FT²

COSTO SERVICIOS DE CALENTAMIENTO-46117.0 \$(/AÑO-(MMBTU/hr))

COSTO SERVICIOS DE ENFRIAMIENTO - 3515.0 \$(/AÑO-(MMBTU/hr))

DT	En.Reduc.	Inc.Area	Saving	Invest	Payback	Incr.PB
(F)	(t)	(M)	(\$/yr)	(\$)	(a)	(a)
38.00	108.7	60473.78	5.3927E+8	5.5887E+8	1.04	4.73
40.00	107.3	57327.86	5.3275E+8	5.2888E+8	9.93E-1	4.58
42.00	108.0	54331.68	5.2823E+8	4.9902E+8	9.48E-1	4.45
44.00	104.7	51471.72	5.1872E+8	4.7008E+8	9.04E-1	2.74
48.00	103.4	48749.71	5.1320E+8	4.5220E+8	8.81E-1	4.19
48.00	102.1	48140.05	5.0889E+8	4.2491E+8	8.39E-1	4.09
50.00	100.8	43834.20	5.0017E+8	3.9827E+8	7.98E-1	2.43
52.00	99.5	41224.89	4.9388E+8	3.8248E+8	7.75E-1	3.84
54.00	98.1	38824.58	4.8892E+8	3.5855E+8	7.32E-1	3.00
56.00	95.5	34476.80	4.7404E+8	3.1784E+8	6.71E-1	2.87
58.00	92.9	30392.48	4.6115E+8	2.8888E+8	6.09E-1	2.74
60.00	90.3	26584.07	4.4827E+8	2.4558E+8	5.48E-1	2.58
62.00	87.7	23047.49	4.3539E+8	2.1231E+8	4.88E-1	2.49
64.00	85.1	19708.57	4.2251E+8	1.8020E+8	4.27E-1	1.85
68.00	82.5	18500.05	4.0983E+8	1.5893E+8	3.88E-1	2.38
68.00	78.9	13372.04	3.9875E+8	1.2830E+8	3.23E-1	2.31
70.00	77.3	10377.85	3.8388E+8	985851.80	2.57E-1	0

Alpha = .850

10.00	127.0	132871.40	6.3048E+8	1.2180E+7	1.93	17.45
12.00	125.7	120200.60	6.2398E+8	1.1043E+7	1.77	14.94
14.00	124.4	110022.00	6.1745E+8	1.0069E+7	1.63	11.87
18.00	123.1	101532.50	6.1093E+8	9.3089E+6	1.52	10.48
18.00	121.8	94251.00	6.0442E+8	8.6274E+6	1.43	9.56
20.00	120.5	87872.17	5.9790E+8	8.0048E+6	1.34	7.28
22.00	119.2	82191.05	5.9139E+8	7.5308E+6	1.27	6.73
24.00	117.8	77083.09	5.8487E+8	7.0928E+6	1.21	8.28
26.00	116.5	72384.83	5.7838E+8	6.6838E+6	1.18	5.90
28.00	115.2	68077.68	5.7184E+8	6.2993E+6	1.10	5.59
30.00	113.9	64083.78	5.6533E+8	5.9354E+6	1.05	5.32
32.00	112.6	60356.48	5.5881E+8	5.5890E+6	1.00	5.08
34.00	111.3	56859.93	5.5230E+8	5.2579E+6	9.52E-1	4.88
36.00	110.0	53584.34	5.4578E+8	4.9399E+6	9.05E-1	4.70
38.00	108.7	50445.89	5.3927E+8	4.6335E+6	8.59E-1	4.55
40.00	107.3	47485.12	5.3275E+8	4.3372E+6	8.14E-1	2.84
42.00	108.0	44685.11	5.2823E+8	4.1521E+6	7.89E-1	4.27
44.00	104.7	41973.38	5.1972E+8	3.8739E+6	7.45E-1	4.14
46.00	103.4	39411.48	5.1320E+8	3.6039E+6	7.02E-1	2.48
48.00	102.1	36955.34	5.0689E+8	3.4425E+6	6.79E-1	3.93
50.00	100.8	34586.89	5.0017E+8	3.1863E+6	6.37E-1	2.30
52.00	99.5	32329.12	4.9388E+8	3.0386E+6	6.15E-1	3.70
54.00	98.1	30070.17	4.8892E+8	2.7874E+6	5.72E-1	2.88
56.00	95.5	25978.17	4.7404E+8	2.4170E+6	5.10E-1	2.75
58.00	92.9	22134.07	4.6115E+8	2.0629E+6	4.47E-1	2.93
60.00	90.3	18530.88	4.4827E+8	1.7248E+6	3.85E-1	2.47
62.00	87.7	15221.17	4.3539E+8	1.4059E+6	3.23E-1	1.84
64.00	85.1	12078.77	4.2251E+8	1.1952E+6	2.83E-1	2.32

TABLA 4.3

CAPITULO QUINTO:

CONSIDERACIONES FINALES:

DISEÑO FINAL

Una vez que se obtuvieron las condiciones finales para el diseño de la red, se generaron los documentos que describen térmicamente al sistema, como son las curvas compuestas la gran curva compuesta y el reporte energético. Estos documentos se presentan en los gráficos 5.1 y 5.2 y en la tabla 5.1

Conociendo las condiciones anteriores solo resta proponer un arreglo probable entre las corrientes de proceso, que permita conceptualizar el estado de una nueva red que cumpla con las condiciones predichas a través de la aplicación del método. Partiendo del diagrama de malla original, se irán presentando las modificaciones hechas a la red con el objetivo de alcanzar el consumo de servicios especificado sin buscar obtener el diseño correspondiente al número mínimo de unidades. Por ello en el desarrollo de este capítulo se presentarán las acciones que se tomaron para eliminar las unidades que cruzaban el punto de pliegue y corregir los defectos en los procesos de enfriamiento o calentamiento que se producían en la red.

☒ DESARROLLO DEL NUEVO DISEÑO.

Como se puede observar en el diagrama original, las unidades que transferían calor a través del pinch eran:

EA - 106A, EA - 108A, EA - 108B y BA - 101.

El diseño se inició por la parte superior al pinch. Como primer paso se procedió a eliminar la unidad BA-201 y reacomodar la corriente en dos secciones, pues siguiendo las reglas de combinación presentadas en el primer capítulo, es indispensable igualar el número de corrientes frías y calientes sobre el punto de pliegue; así se dividió la corriente en una proporción de 42 y 58% para poderse combinar con las secciones de residuo de alto vacío y gasóleo pesado primario (GOPP) situadas por arriba del pinch, Posteriormente se situaron 2 equipos para acondicionar la corriente de carga hasta una temperatura cercana a los 600°F, en

tanto que la corriente se une e intercambia calor nuevamente con el residuo de vacío para ser introducida al horno BA-101 previo a destilación atmosférica, este equipo se reutiliza pero asignándole una carga mucho menor. Con ello se da por terminado el diseño por arriba del punto de pliegue, la figura 5.3 presenta la configuración final propuesta para esta zona.

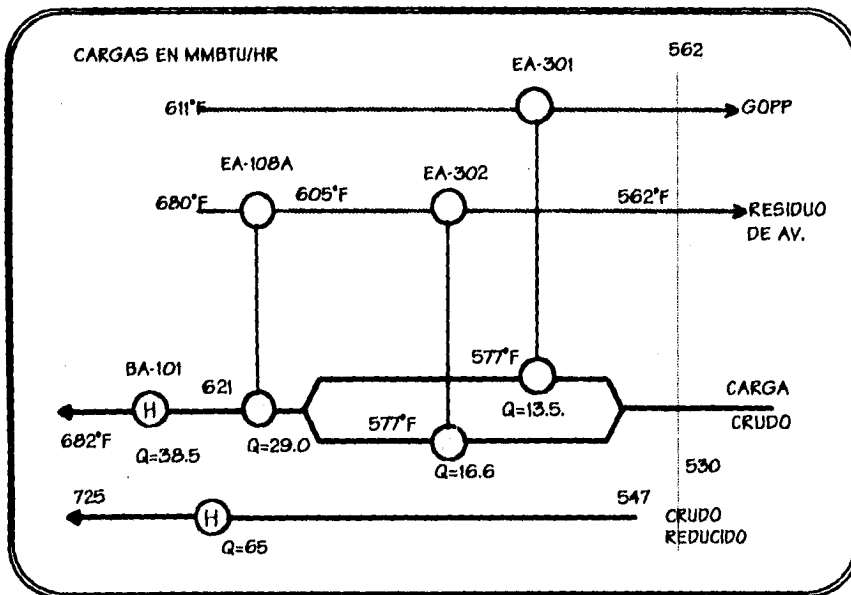


fig.5.3

Para la zona inferior al punto de pliegue el reajuste resulta complicado pues la configuración existente se contrapone a casi todos los principios del método así, adecuarla a una forma óptima involucra modificar profundamente su estructura. Las corrientes de crudo A y B que son llevadas hasta 414 y 505°F y luego mezcladas para dar lugar a la corriente de carga a torre despuntadora serán llevadas ahora hasta 530°F y así evitar pérdidas de calor por mezclado a tan diferentes

temperaturas. Para el logro de este objetivo se sugiere reutilizar las unidades EA-106 A y EA-108 B e incluir la corriente de reflujo de la reductora de viscosidad así como las corrientes de nafta de despunte y producto de domo de destilación.

La corriente de crudo B es acondicionada por intercambio de calor con las corrientes de gasóleo pesado de vacío, gasóleo ligero primario y reflujo de la reductora de viscosidad que calientan al crudo desde 346°F hasta 530°F através de 4 unidades que son reutilizadas y reubicadas.

Debido a que no se cuenta con fracciones de suficiente capacidad calorífica para intercambiar calor con la otra corriente de crudo, es necesario hacer una división de tal corriente, de forma que se cumpla con la desigualdad que para el Wcp propone el método, así se decide una división de proporción 60 - 40 que permita mayor posibilidad de combinación; de modo que se puedan utilizar las corrientes de gasóleo pesado primario, residuo de vacío, reflujo de la reductora de viscosidad, y reflujo de gasóleo ligero primario, que de esa manera cuentan con un producto Wcp similar a la corriente de crudo con que cambian calor.

En la figura siguiente se presentan las modificaciones hechas a la red, (en la primera parte del diseño en la zona inferior al pinch). Este arreglo parte del punto de pliegue y continúa hasta llegar cercanos los 300°F en ambas corrientes de crudo.

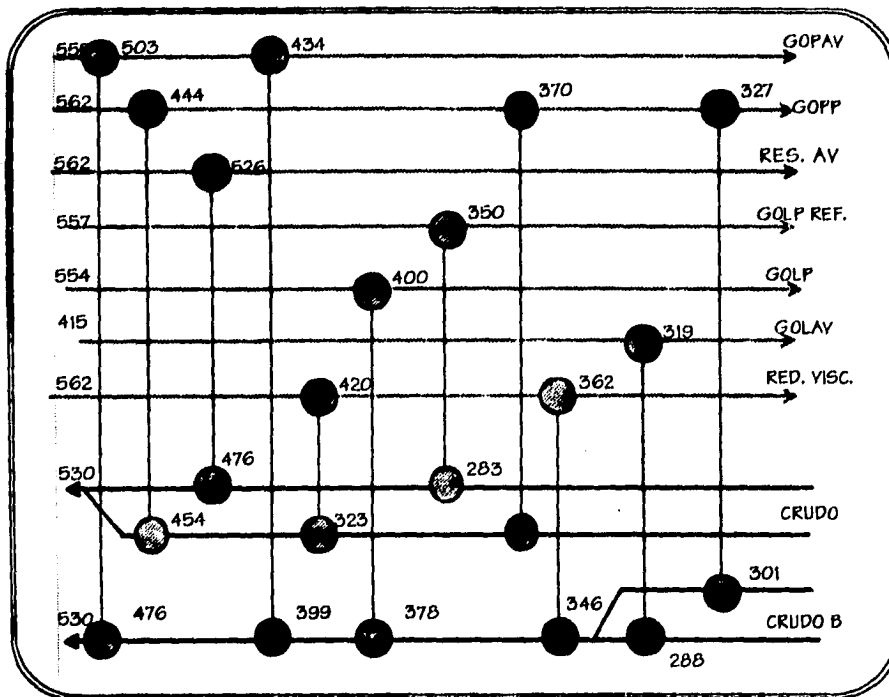


fig. 5.4

La segunda parte del diseño debajo al pinch involucra el acondicionamiento de los productos de destilación y las corrientes laterales por intercambio de calor con las corrientes de crudo llevándolas desde su temperatura de carga (68°F) hasta cercanos los 300°F.

En esta sección se involucra el producto de domo y la nafta de despunte así como todas las corrientes que en el diseño original fueron utilizadas con el mismo fin, así reutilizando casi todos los cambiadores existentes se calienta el petróleo crudo y acondicionan las corrientes efluentes. El uso de enfriadores se reduce así

como su carga logrando la disminución predicha en consumo de agua de enfriamiento.

Para realizar las combinaciones se requiere nuevamente dividir la corriente de crudo en ambas ramas de forma que exista el número adecuado de ramificaciones que faciliten combinaciones. Haciendo un análisis de las masas de crudo y las corrientes disponibles para calentarlo se hicieron divisiones del 50 % en las ramas antes divididas, de forma que quedaron 2 corrientes con el 20% de la masa original y 2 con el 30%, en tanto se dividió la sección de crudo B que antes se la asignara el 45% de la masa , a la mitad así se tuvieron dos nuevas corrientes con el 22.5% de la masa.

En la evolución del diseño resulta sobresaliente la inclusión de las corrientes de domo y nafta de despunte que reducen significativamente el consumo de servicios y son parte importante en el calentamiento. también es de notar la reducción en el número de enfriadores debida a un mejor uso de los recursos energéticos de algunas corrientes.

En el esquema 5.5 se presentan los ajustes , en un diagrama de red que incluye la parte restante del sistema en su configuración final.

Con dicho diagrama la última parte del problema queda resuelta y el trabajo se da por finalizado.

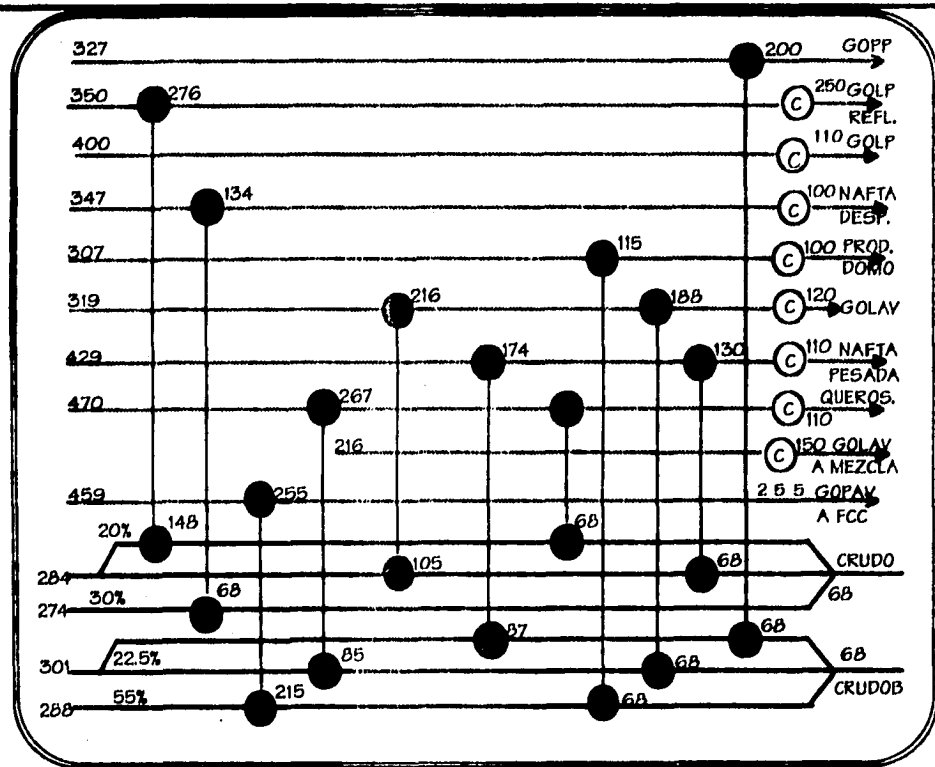


fig. 5.5

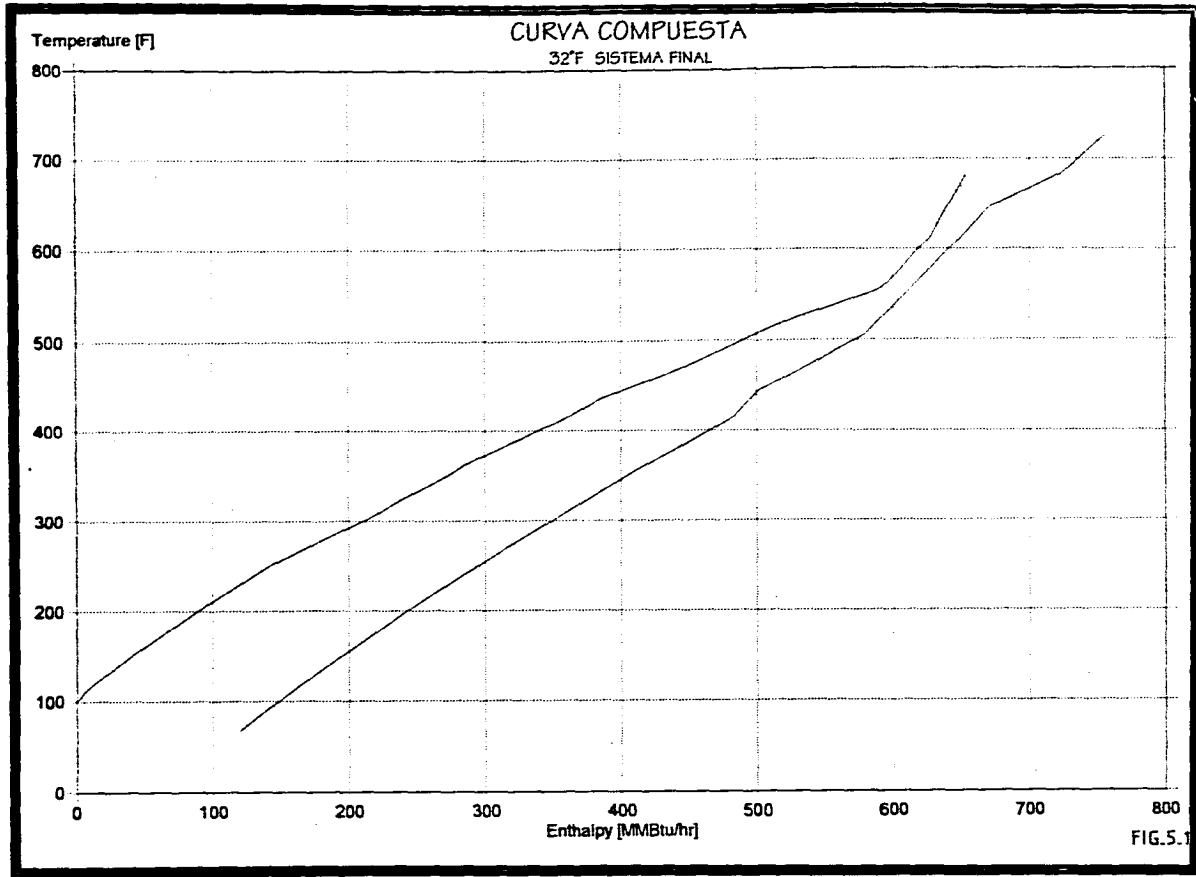


FIG.5.1

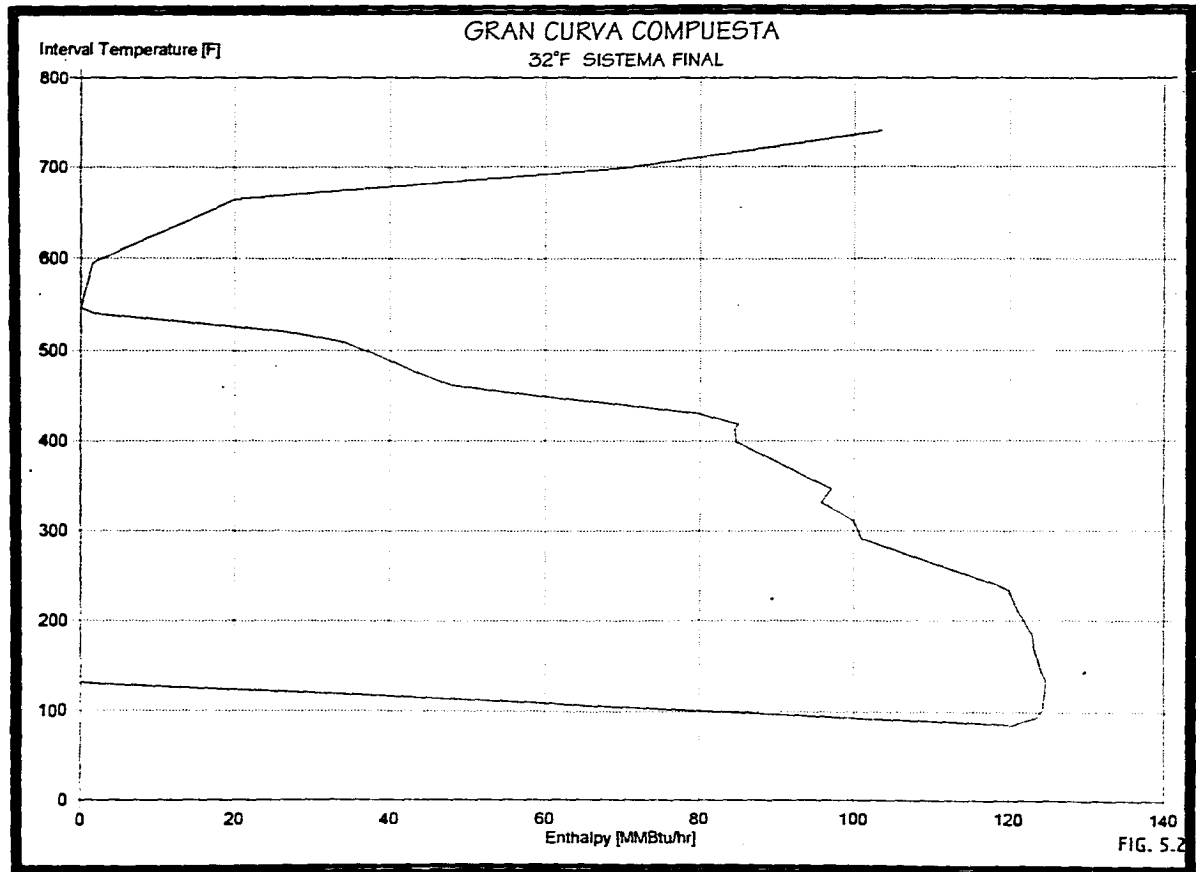


FIG. 5.2

REPORTE ENERGÉTICO

32°F SISTEMA FINAL

<input type="checkbox"/>	CONSUMO MÍNIMO DE SERVICIOS DE CALENTAMIENTO	103.57MMBTU/HR
<input type="checkbox"/>	CONSUMO MÍNIMO DE SERVICIOS DE ENFRIAMIENTO	117.4 MMBTU/HR
<input type="checkbox"/>	COSTO TOTAL DE LA ENERGÍA POR AÑO	3.4931 MM\$/AÑO
♦	COSTO DE SERVICIOS DE CALENTAMIENTO	4.7962 MM\$/AÑO
♦	COSTO DE SERVICIOS DE ENFRIAMIENTO	469486.7\$/AÑO
<input type="checkbox"/>	PUNTO DE PLIEGUE EXISTENTE A	546.0°F
♦	TEMPERATURA DE PUNTO DE PLIEGUE PARA LA CORRIENTE CALIENTE	562°F
♦	TEMPERATURA DE PUNTO DE PLIEGUE PARA LA CORRIENTE FRIA	530°F
<input type="checkbox"/>	PUNTO DE PLIEGUE CAUSADO POR LA CORRIENTE:	
♦	13.1 CALIENTE REFLUJO REDUCTORA DE VISCOSIDAD	
<input type="checkbox"/>	PUNTO DE PLIEGUE CRUZADO POR LAS CORRIENTES:	
♦	8.1 CALIENTE GOPP	
♦	12.2 CALIENTE RESIDUO DE ALTO VACÍO	
♦	13.1 CALIENTE REFLUJO REDUCTORA DE VISCOSIDAD	
♦	14.1 FRIA CARGA DE BA-101	
<input type="checkbox"/>	EXISTEN DOS PUNTOS DE PLIEGUE EN LOS SERVICIOS	
♦	INTERVALO 2986.0°F	
	CAUSADO POR GAS COMBUSTIBLE	
♦	INTERVALO 82°F	
	CAUSADO POR CORRIENTES:	
	1.1 CARGA DE CRUDO Y AGUA DE ENFRIAMIETO	

TABLA 5.2

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A través del trabajo desarrollado se llegaron a las siguientes conclusiones:

El sistema no utiliza sus recursos energéticos de forma adecuada y por lo tanto es susceptible de ser mejorado.

La aplicación de los principios del punto de pliegue predican un ahorro cercano al 100% en el consumo de energía ; esto en caso de implementarse las modificaciones sugeridas.

La red debe modificarse y adaptarse para funcionar con un ΔT_{\min} de 32 °F, que es el que garantiza los mayores beneficios económicos.

En caso de que la red fuera a construirse nuevamente en el mismo lugar debería diseñarse para un ΔT_{\min} de 24.5 °F en vez de los 9 °F a los que se encuentra actualmente.

El análisis hecho considera solo gastos por concepto de área de intercambio instalada y no contempla algún gasto extra por concepto de nuevas tuberías, válvulas, controles etc. por lo que si estas modificaciones se llevaran a cabo sería conveniente considerar estos aspectos, estudios que contemplan este tipo de gastos en trabajos de reajuste estan reportados en la literatura.²⁶ También si se desean hacer las modificaciones planteadas sería muy conveniente analizar nuevas configuraciones en la red a fin de adaptarse al espacio disponible.

La refinería debe ser un centro de utilidad y no un consumidor intensivo de energía por ello debe considerarse seriamente el hecho de mejorar la configuración de la red pues como se ha demostrado consume más energía de lo que debería, además tras los arreglos hechos, anualmente se podría disponer de una cantidad considerable de dinero que se podría utilizar en mantenimiento o en diversos estudios de mejora que permitieran hacer la planta más eficiente, por ello si se

considera la oportunidad que representa el ahorro en términos de barriles de petróleo los arreglos no pueden ser pasados por alto.

El análisis hecho solo consideró a la planta de destilación atmosférica como sistema aislado, pero si se realizara este análisis contemplando varias plantas de la refinería a la vez podrían aumentar notablemente las reducciones en los consumos de servicios; este tipo de análisis conocido como PLANTA COMPLETA (*Total Site*), se ha aplicado en diversas industrias al rededor del mundo presentando ahorros energéticos al rededor del 30% aún para plantas previamente optimizadas, y considerando la posibilidad que PEMEX tiene para realizar estos análisis, el asunto se presenta como una buena oportunidad de mejorar la eficiencia de sus procesos.

Es importante señalar que la utilización de área en la red existente es muy deficiente, pues como ya se mencionó se utilizan áreas de intercambio iguales para cambiadores que manejan cargas con diferencias de 32 millones de BTU/hr, esto, considero es un grave error de criterio en el diseño, pues aunque se contara con cambiadores disponibles al inicio del diseño, no pueden someterse al mismo servicio, pues se corre el riesgo de que no se transfiera el calor requerido, sobre todo en el caso de cargas grandes, o en el menor de los casos se esté desperdiciando una gran área de intercambio que está de más decir es un gasto muy fuerte.

Como se señaló en su oportunidad la utilización de área original era de 45 % y esto considerando que los cambiadores operaran de forma adecuada, ya que en el caso de que llevaran algún tiempo sin mantenimiento (como aveces ocurre), el ensuciamiento del cambiador aumentaría la resistencia al intercambio disminuyendo la eficiencia de la transferencia de calor.

Debe considerarse que al hacer evaluación de reutilización de área, se piensa en el área disponible como un total de superficie y no como unidades aisladas de determinadas características que no pueden adaptarse a cualquier servicio, de esta

forma, la readaptación de las unidades a nuevos servicios con seguridad requerirá de inversiones extras en equipos, pues como ya se señaló en el análisis de resultados, existen cambiadores que requieren un área mayor a la que se dispone por unidad, por lo que tendrían que utilizarse cambiadores asociados en serie o paralelo a fin de satisfacer las cargas y respetar los límites de ΔT_{\min} que la configuración óptima establece; y no se podría conservar el arreglo de un cambiador por servicio con la consecuente necesidad de más unidades y su efecto en la operabilidad de la planta, es decir, no solo es adaptar unidades existentes a servicios, sino ver que cumplan con los requerimientos de energía especificados, lo que involucra modificar el arreglo físico de los equipos, porque donde anteriormente existía un cambiador (cumpliendo o no con su servicio), en ocasiones se necesitarán dos o más de las unidades disponibles (varios cambiadores en el mismo sitio), con esto la construcción de la nueva red representará problemas de espacio, cosa que no puede preverse con la aplicación de estos principios de forma que las estimaciones de inversión pueden verse incrementadas al momento de iniciar los trabajos de readaptación.

En vista de este problema solo se presentó un posible arreglo de corrientes que asegurara el alcance de los objetivos energéticos sin considerar los problemas antes mencionados, pues no se contaba con datos que pudieran ayudar a seleccionar combinaciones factibles respecto a espacio y operabilidad; por ello sería un error pensar que ese es el arreglo final, es más, sería muy conveniente que en el caso de llevarse a cabo estas modificaciones, el diseño final de la red se haga con planos de localización de equipo, y datos que permitieran analizar las oportunidades de espacio para poder hacer decisiones correctas en cuanto a emplazamiento de equipos en un espacio dado de la planta.

Por último debe notarse que para cualquier reducción que se haga en el consumo de servicios se está ayudando a mejorar las condiciones ambientales del lugar, ya que el agua que se utiliza para enfriamiento proviene del ecosistema local y al entrar en el proceso sufre cambios en sus condiciones que pueden impedir su reincorporación al lugar donde fueron tomados, por ello cuanto menos agua se tome de la fuente natural menor será el daño al medio ambiente. Lo mismo ocurre para el gas combustible que aunque puede considerarse que produce combustiones bastante limpias no deja de producir algunos residuos de cuidado sobre todo por la concentración de azufre que pueda llevar, por lo que una reducción en su consumo es una reducción en las emisiones a la atmósfera y un aumento, aunque sea ligero, en la calidad del aire que respiren las personas del lugar.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Linhoff, B and Hindmarsh, E " The Pinch Design Metod of Heat Exchanger Networks ", Chemical Engineering Science, vol 38, No.5, pp 745-763, 1983 .
- 2.- Tjoe, T. N. and Linhoff, B " Heat Exchanger Networks Retrofits " IChemE Annual Research Meeting, Bath, April 1984.
- 3.- Tjoe, T. N. and Linhoff, B " Using Pinch Technology for Process Retrofit " Chem Engng, pp 47 - 60 April 28 1986.
- 4.- Linhoff, B and Witherell, W D " Pinch Technology Guides Retrofit ", Oil & gas Journal, pp 54 -65 , 7 april 1986.
- 5.- Ahmad, S and Linhoff, B " SUPERTARGETING: Optimum Syntesis of Energy Management Systems ", Transactions of the ASME, jurnal of Energy Resources Technology, vol 111, No. 3, pp 131-136 september 1989.
- 6.- Ahmad, S and Linhoff, B " SUPERTARGETING: Diferent Process Structures for Diferent Economics ", Transactions of the ASME, jurnal of EnergyResources Technology, vol 111, No. 3, pp 131-136 september 1989.
- 7.- Linhoff, B and Ahmad, S " Cost Optimum Heat Exchanger Networks -1. Minimum Energy and Capital Using Simple Models for Capital Cost ", Computers & Chem Engng, vol 14, No 7, pp 751 - 767 1990.
- 8.- Smith, R Linhoff, B and Ahmad, S " Cost Optimum Heat Exchanger Networks -2. Targets and Design for Detailed Capital Cost Models ", Computers Chem Engng, vol 14, No 7, pp 751 - 767 1990.
- 9.- Trivedi, K K O'Neill " Systematic Energy Relaxation in MER Heat Exchanger Networks " Computers Chem Engng, vol 14 No 6 pp 601 - 611, 1990.
- 10.- Linhoff, B and Polley, G " Stepping Beyond the Pinch " The Chem Eng, pp 25 - 32 February 1988.

- 11.- Cerda, J Westerberg, A W , Mason, D and Linhoff, B " Minimum Utility Usage in Constrained Heat Exchanger Networks - A Transportation Problem ", Chemical Engineering Science, vol 38, No 3, pp 373 - 38, 1983.
- 12.- Linhoff, b " Pinch Analysis A State - of - the Art Overview ", Trans IChemE, vol 71, No A5, pp 503 - 522, september 1993.
- 13.- SuperTarget for Windows version 3.0, User Guide Linhoff-March Pinch Technology Software.
- 14.- Linhoff, B and Flower, J " Síntesis of Heat Exchanger Networks part I: Sistematic Generation of Energy Optimal Networks" AIChE J, vol 24 No. 4 pp 633 - 642, 1978
- 15.- Linhoff, B and Flower, J " Síntesis of Heat Exchanger Networks part II: Evolutionary Generation of Networks with Various Criteria of optimality" AIChE J, vol 24 No. 4 pp 642 - 654, 1978
- 16.- Kern, D Q " Process Heat Transfer " Edit Mc Grawhill, 1th edition, USA 1954.
- 17.- Smith & Van Ness " Introducción a la Termodinámica en la Ingeniería Química " 4 a edición Mc Grawhill México 1989
- 18.- Ludwig, E E " Applied Process Design For Chemical and Petrochemical Plants" vol 3, Gulf Publishing Co. 2nd Edit Huston, Texas USA 1984.
- 19.- PEMEX Diagrama de Flujo de Proceso Seccion de Destilación Atmosférica I Tula, Hgo. Dib. No.-N-1045-00011.
- 20.- PEMEX Diagrama de Flujo de Proceso Seccion de Destilación Atmosférica I Tula, Hgo. Dib. No.-N-1045-00012.
- 21.- Bazua, E " Uso Eficiente y Ahorro de Energía" Revista del IMIQ abril 1987

- 22.- IMP " Libro de Proyecto, Refinería de Tula Hgo. Sector Planta Combinada 1".
- 23.- PEMEX, Subdirección de Refinación, Refinería Miguel Hidalgo, Hojas de datos de operación; correspondientes al 30 de Marzo de 1993.
- 24.- Linhoff, B and Polley, G " General Process Improvements Through Pinch Technology " , Chemical Engineering Progress pp 51 - 58 June 1988.
- 25.- Linhoff, B , D.W. Townsend et al. " A user guide on process integration for the efficient use of energy" 1st edition, 247 pp, The institution of Chemical Engineers, England 1984.
- 26.- Carlsson A., Franck P., "Design Better Heat Exchanger Network Retrofits" Chemical Engineering Progress vol 88 No. 3 ,pp 87 - 96 March 1993.
- 27.- I. E. Grossman , Yee T.F. " A Screening and Optimization Approach for the Retrofit of Heat Exchanger Networks.", Ind. Eng. Chem. Res., 30, pp 146 - 162, (1991).
- 28.- Rogelio Cardenas "El Financiero" año XIV No. 3710 México D.F. publicación Diaria.
- 29.- Peters M. S., Timmerhaus K. D., "Plant Design and Economics for Chemical Engineers" 4th Edition, Mc Graw-Hill Singapore 1991 pp 909.

ANEXO 1

☒ CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Como se mencionó en el capítulo tercero, aunque la consideración de coeficientes de transferencia de calor uniformes en el rango de temperaturas utilizado, proporciona la facilidad de combinación directa de corrientes usando la curva compuesta y la consecuente área mínima de intercambio, no puede aplicarse a diseños reales pues corresponde a una simplificación; debido a ello el cálculo riguroso de los coeficientes de transferencia de calor para cada corriente reviste un interés especial, pues como se ha mencionado la variación de estos coeficientes produce un aumento en el área de intercambio, es decir la modificación de uno de los objetivos principales.

En base a lo anterior se procedió al cálculo de tales coeficientes utilizando para ello el siguiente mecanismo.

☒ CÁLCULO DE COEFICIENTES

Antes de iniciar los cálculos se procedió a analizar las características de las corrientes del proceso con el fin de seleccionar la ecuación adecuada.

A excepción de los servicios, las corrientes son en su totalidad fracciones de petróleo que intercambian calor en rangos de temperatura muy variables, en equipos de tubo y coraza a flujo en contracorriente, en arreglos de 1-2 y 1-4; cabe mencionar que para la mayoría de los equipos se utilizaron, en el diseño original, cambiadores iguales sin importar la carga del mismo.

Tras el análisis de estos factores, se consideró adecuado utilizar la ecuación de Sieder y Tate, que fué desarrollada precisamente utilizando fracciones de petróleo en tubos horizontales y verticales.

La ecuación se aplicará según sea el valor del número de Reynolds, pues presenta diferente forma para flujo laminar y turbulento

$$\frac{h_{iD}}{k} = 1.86 \left[\left(\frac{DG}{\mu} \right) \left(\frac{C_{Ph}}{k} \right) \left(\frac{D}{L} \right) \right]^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_{\infty}} \right)^{0.14} \quad \text{para } Re < 2100$$

$$\frac{h_{iD}}{k} = 0.027 \left(\frac{DG}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C_{Ph}}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_{\infty}} \right)^{0.14} \quad \text{para } Re > 10000$$

donde

$$Gt = \frac{Wt}{aft}$$

$$aft = \frac{af}{\text{tubo}} \left(\frac{\text{No. tubos}}{\text{No. pasos}} \right)$$

Considerando que algunas corrientes tengan un número de Reynolds en la zona de transición se usará la gráfica que para tal efecto, Sieder y Tate presentan en el artículo: " *Heat Transfer And Pressure Drop of Liquids in Tubes* " Ind. Eng. Chem. 28, 1429 (1936).

Para la evaluación de los coeficientes de transferencia para fluidos en el envolvente se utilizará la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$\frac{h_{oD}}{k} = 0.36 \left(\frac{d_o G_s}{\mu} \right)^{0.55} \left(\frac{C_{Ps}}{k} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu}{\mu_{\infty}} \right)^{0.14}$$

Donde:

$$G_s = \frac{W_s}{a_f s}$$

$$a_f s = \frac{D_o \times C \times \beta}{N_p s \times P_t \times 144}$$

De : diámetro del envolvente.

C : Claro.

β : espaciamiento de mamparas.

Pt : pitch.

Nps : pasos por envolvente.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo:

Los valores corresponden a la corriente de crudo que se introduce al cambiador

EA-101 por el lado de los tubos.

El valor de Jh para el Re que se tiene es 10.2. La tabla establece que el valor de

Jh es igual a:

$$Jh = h_i \frac{D}{k} \left(\frac{Cp\mu}{k} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{-0.14}$$

despejando el coeficiente de transferencia se obtiene:

$$h_i = Jh \frac{k}{D} \left(\frac{Cp\mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{0.14}$$

sustituyendo valores se encuentra que:

$$h_i = 10.2 * 0.07645 / 0.0651 * 58.3^{1/3} * (\mu/\mu_0)^{0.14}$$

$$h_i = 46.4 * (\mu/\mu_0)^{0.14}$$

evaluando la viscosidad a la temperatura de la pared se tiene que $\mu_0 = 3.3$ con lo que

finalmente el coeficiente de transferencia resulta:

$$h_i = 46.4 * (9.4/3.3)^{0.14}$$

$$h_i = 53.7 \text{ BTU/hr Ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Para facilitar el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor de todas las corrientes se programaron las ecuaciones necesarias en una hoja de cálculo y se obtuvieron los valores correspondientes, es necesario señalar que todos los datos necesarios se obtuvieron de las hojas de equipo del libro de proyecto de la planta combinada 1 de la refinería de Tula²² y de los libros de E. Ludwig y D. Kern^{16,18}

A continuación se tabulan los datos que se obtuvieron :

corriente	Te	Tc	Tm	Cp	μ	k	Pr	Q (lb/hr)	af	G (Lb/hr ft ²)	Re	ho
crudo	68	95	81,5	0,47	10,35	0.07675	62,7	945.938	0,73	1.304.467,2	3.396	49,2
	95	113	104	0,48	7,5	0.07610	47,4	945.938	0,73	1.304.467,2	4.684	82,7
	113	154	133,5	0,5	5,8	0.07540	38,2	945.938	0,73	1.304.467,2	6.056	97,6
	154	199	176,5	0,52	4,13	0.07440	28,8	945.938	0,73	1.304.467,2	8.516	113
	199	243	221	0,54	3,14	0.07340	23	945.938	0,73	1.304.467,2	11.205	153,7
	243	294	268,5	0,57	2,43	0.07225	19,1	945.938	0,73	1.304.467,2	18.301	186,1

ANEXO I

corriente	T _e	T _t	T _m	C _p	μ	k	Pr	Q (lb/hr)	af	G (Lb/hr ft ²)	Re	h _o
	294	365	329.5	0.6	1.84	0.07075	15.5	945.938	0.73	1304467.2	19.143	174.5
	365	414	389.5	0.65	1.42	0.06930	13.3	945.938	0.73	1304467.2	31.317	212.8
crudo B	68	128	98	0.47	9.46	0.07645	58.3	945.938	0.73	1304467.2	3.713	53.7
	128	194	161	0.51	5.07	0.07490	34.3	945.938	0.73	1304467.2	6.928	98.4
	194	241	217.5	0.54	3.33	0.07355	24.3	945.938	0.73	1304467.2	10.565	151.7
	241	278	259.5	0.56	2.61	0.07260	20.1	945.938	0.73	1304467.2	13.459	160.7
	278	344	311	0.6	2.06	0.07140	17.2	945.938	0.73	1304467.2	17.052	170.8
	344	412	378	0.63	1.55	0.06975	14	945.938	0.73	1304467.2	28.783	207.9
	412	458	435	0.66	1.24	0.06840	11.9	945.938	0.73	1304467.2	28.443	191.6
	458	505	481.5	0.68	1.06	0.06730	10.7	945.938	0.73	1304467.2	41.933	225.5
nafta p	429	174	301.5	0.6	0.56	0.07655	4.4	177.000	0.9	196.666.7	11.877	94.7
	174	110	142	0.59	0.74	0.07805	5.6	177.000	0.73	244.086.5	11.207	99.7
queroelina	470	237	353.5	0.62	0.58	0.07225	5	216.670	0.9	240.744.4	14.126	107
	237	132	184.5	0.53	1.37	0.07600	9.5	216.670	0.9	240.744.4	5.991	46.3
	132	110	121	0.49	2.03	0.07740	12.7	216.670	0.54	400.006.2	4.065	28.2
golp	554	250	402	0.64	0.65	0.06925	5.9	123.338	0.9	137.042.2	7.238	41.4
	250	124	187	0.52	1.95	0.07410	13.7	123.338	0.9	137.042.2	2.398	9.6
	124	110	117	0.48	3.39	0.07580	21.6	123.338	0.54	227.700.9	2.293	11.4
gopp	611	444	527.5	0.62	0.38	0.06665	3.5	389.534	0.9	432.815.6	39.294	198.7
	444	327	385.5	0.62	2.43	0.06905	21.8	389.534	0.9	432.815.6	6.072	53.2
	327	200	263.5	0.55	1.31	0.07160	10.2	49.888	0.54	92.100.9	2.395	8.4
golp(ref)	557	390	473.5	0.67	0.4	0.06750	4	330.534	0.9	367.260	31.068	174.3
	390	276	333	0.59	0.69	0.07085	5.7	330.534	0.9	367.260	18.291	135

ANEXO I

corriente	Ts	Tt	Tm	Cp	μ	k	Pr	Q (lb/hr)	af	G (Lb/hr ft ²)	Re	ho
	276	250	263	0,56	0,95	0,07245	7,3	330.534	0,54	610.216,6	21.944	172,9
golav	415	319	367	0,6	1,66	.06605	14,6	340.234	0,9	378.037,8	7.787	55,8
	319	216	267,5	0,55	4,47	0,07025	34,7	340.234	0,9	378.037,8	2.883	12,4
	216	120	168	0,49	15,13	0,07210	103,3	340.234	0,54	628.124,3	1.416	18,3
glav(mezc)	216	150	183	0,49	14,22	0,07205	97,5	185.493	0,9	206.103,3	494	8
gop av a fcc	459	256	357,5	0,57	3,25	0,06605	28,2	190.940	0,9	212.155,6	2.226	10,9
gopav	555	516	535,5	0,67	0,81	0,06240	8,7	1.087.169	0,9	1.207.965,6	50.559	308,4
	516	459	487,5	0,64	0,91	0,06340	9,2	1.087.169	0,9	1.207.965,6	45.403	292,7
	459	435	447	0,62	1	0,06425	9,6	1.087.169	0,54	2.007.081,2	68.389	418
residuo av	680	602	641	0,63	2,25	0,07105	20,1	610.541	0,9	678.378,9	10.278	129,6
	602	526	564	0,62	3,51	0,07265	30,1	610.541	0,9	678.378,9	6.598	83,2
ref. red.viec	562	362	462	0,59	7,08	0,06275	66,8	565.521	0,9	628.356,7	3.026	26,5
carga BA-101	445	721	583	0,65	0,3	0,06400	3	873.137	0,76	1.148.864,5	130.553	474,6
carga BA-201	647	745	696	0,63	0,8	0,05600	9	981.243	0,76	1.291.109,2	55.019	299,2
nafta deep	347	100	223,5	0,54	0,38	0,09300	2,2	257.662	0,55	470.723	42.679	253,5
prod domo	307	100	203,5	0,48	0,86	0,08670	4,7	107.330	0,54	198.147,7	7.901	60,2

ANEXO II

VALORES DE h_o RECOMENDADOS

FLUIDO	COEFICIENTE INDIVIDUAL (MMBTU/HR)	SERVICIO
HIDROCARBUROS LIGEROS	250	INTERCAMBIADOR - CONDENSADOR
AROMÁTICOS	2.000	INTERCAMBIADOR - CONDENSADOR
VAPOR DE DOMOS	140	INTERCAMBIADOR - CONDENSADOR
HIDROCARBUROS PESADOS A VACÍO	55	INTERCAMBIADOR - CONDENSADOR
GASÓLEO LIGERO	65	INTERCAMBIADOR - CONDENSADOR
AGUA	1.000	CONDENSADORES
AGUA DE ENFRIAMIENTO	1.100	CONDENSADORES - ENFRIADORES

FUENTE: IMP, COEFICIENTE TÍPICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR