BUSQUEDA JERARQUICAMENTE ORDENADA DE REDES DE INTERCAMBIO TERMICO EN UN ARBOL COMPLETO DE POSIBILIDADES

Agustín F. Navarro, Omar A. Iglesias
Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata, 48 y 115 (1900) La Plata, Argentina.

RESUMEN

La síntesis de redes de intercambio térmico, a través de métodos de caracter combinatorial, trae asociado el desarrollo de estructuras tipo 'árbol' en el cual conviven todos los sistemas posibles. Dado que el aumento de la dimensionalidad del problema a tratar incide en su expansión es que se hace necesario orientar adecuadamente la búsqueda de las mejores soluciones. En este trabajo, el diseño de esta estrategia se basa en: primero, evitar transitar por caminos que conduzcan a soluciones ya analizadas o repetidas, para ello se realizó un estudio dirigido a sistemas no interactuantes que detecta el subárbol que interesa desarrollar; y segundo, dentro de la zona permitida por el paso anterior se va en busca de las redes que habiendo comenzado a formarse evidencian cumplir no solo con un criterio puramente económico, sino con otro que apunta a asegurar su flexibilidad operativa. Esto último a través de un estudio de grados de libertad de los mismos.

ABSTRACT

Synthesis of thermal exchange networks , by combination method, carries out tree-type structures development where all possible systems are found. Since the problem dimension increase to be dealt with have to do with its expansion, it is necessary to direct the search right to the best possible solutions. We first based the strategy design of this study so as to avoid going through already analysed or repeated solutions, in order to achieve this study directed to non-interactive systems that identify the subtree that is intented to be developed was carried out; and second, within the permitted area by the previous path, we search the networks that are being formed and which show to comply with a purely economic criterion but also with another one that intends to ensure its operative flexibility. This last criterion was performed by means of a study based on its freedom degree.

INTRODUCCION

En general, en los problemas que se plantean de integración energética, los sistemas que van a ser sometidos a dicho tratamiento se encuentran no estructurados, o sea no tienen un esquema asociado que indique los intercambios que se deben realizar y además no balanceados térmicamente. Esto último debido a que la cantidad de calor que necesitan las corrientes frías no coincide con la que pueden aportar las calientes, ello motiva la necesidad de incorporar servicios auxiliares de calentamiento y/o enfriamiento. Razones de índole económica indican que esta incorporación debiera hacerse en las cantidades mínimas posibles que logren el balanceo térmico.

Si bien para abordar el primer tópico distinguiremos entre corrientes originales y servicios, para tratar el tema de la flexibilidad tomaremos a estos últimos, y en forma adecuada, como corrientes adicionales. Definiremos, entonces, para cualquiera de ellas, los siguientes parámetros:

$$\alpha_{ij} = \sum_{k=1}^{j} \sigma_{ik} \qquad ; \qquad \Omega_{ij} = \sum_{k=j}^{t} \sigma_{ij} \qquad (1)$$

siendo $\sigma_{ij} = W_i \, Cp_i \, [\, T_{j-1} - T_j] \quad ; \quad [\, T_{j-1}, T_j \,] \subset [\, T_{si}, T_{ei}] \qquad (2)$

el aporte de la corriente i en el intervalo j, limitado por las temperaturas T_{j-1} y T_j, siendo esta última el extremo inferior del intervalo. T_{si} - T_{ei} son las temperaturas de entrada y salida de la corriente. Se conviene además que el aporte de las corrientes frías es positivo, el de las calientes negativo y nulo si el intervalo considerado cae fuera del rango entrada/salida especificado para esa corriente. De las definiciones efectuadas so observa que :

$$\alpha_{ij} + \Omega_{i(j+1)} = \alpha_{it} = \Omega_{i0} \quad \text{y además} \quad \alpha_j \leq 0 \ \forall j \ ; \ \Omega_j \geq 0 \ \forall j \ ; \ \alpha_t = \Omega_0 = 0 \quad (3)$$

por estar el sistema perfectamente balanceado.

La idea del procedimiento es la aplicación reiterada del Método de los Intervalos de Temperatura de Linnhoff y Flower [2]. de manera que partiendo de un sistema perfectamente balanceado, mediante la asignación de intercambios entre corrientes sea posible reducir la complejidad del sistema original en sucesivas etapas hasta que resten solo problemas de solución inmediata; todo ello sin que se requieran aportes adicionales de servicios. Dada la naturaleza combinatorial del algoritmo que implica la aparición de situaciones comprendidas en una estructura tipo árbol, es que se hace necesario desarrollar solo una parte de la misma, no solo por la dimensionalidad que puede llegar a tener sino por contener un alto porcentaje de información repetida.

El desarrollo que sigue se basa en propuestas de intercambio entre corrientes no interactuantes, es decir la situación que resulta de combinarlas es independiente del orden en el cual ellas fueron seleccionadas. En caso contrario, se habla de propuestas interactuantes. Puede resultar, sin embargo, que en la práctica los sistemas presenten características de ambos tipos, de todos modos, el presente estudio será un buen indicador de las zonás a explorar.

PLANTEO DEL PROBLEMA DEL DESARROLLO ARBOREO

Consideraremos un conjunto de corrientes de proceso compuestas por i calientes y j frías, siendo el número total de ellas Nc y Nf respectivamente; de ellas se sabe que están o no balanceadas térmicamente pero que no están estructuradas. Si el caso es que no se balancean térmicamente, se supondrá que se cuenta con un número Nuc de servicios externos de calentamiento y Nuf servicios externos de enfriamiento, aunque en la práctica lo más probable es contar con agua de enfriamiento y vapor de agua a uno o más niveles térmicos.

ECUACION PROPUESTA A DOS NIVELES

Con las consideraciones hechas en el párrafo anterior, en el segundo nivel del desarrollo de la estructura arbórea se observa, por simple problema combinatorial, que el número de alternativas totales esta dada por la siguente relación:

$$NTA = (\, Nc + Nuc \,)*(\, Nf + Nuf \,)*(\, Nc + Nuc - 1 \,)*(\, Nf + Nuf - 1 \,) \qquad (4)$$

de este total, una mitad es repetición exacta de la otra; difieren solamente en el orden de aparición de las propuestas. Luego, el conjunto de interés es el siguiente:

$$NNTA = 0{,}5 \; NTA \qquad (5)$$

En el caso particular de redes existe una prohibición natural de intercambio entre servicios, lo que origina que todas las alternativas que surjan de estas combinaciones queden excluidas de todo análisis. El número de ellas es :

$$NAUT = (\, Nuc + Nuf - 1 \,)*(\, Nc + Nuc - 1 \,)*(\, Nf + Nuf - 1 \,) \qquad (6)$$

De aquí, el número de alternativas independientes calculadas NAI_c será:

$$NAI_c = NNTA - NAUT \tag{7}$$

Reordenando

$$NAI_c = (Nc + Nuc - 1) * (Nf + Nuf - 1) * [0{,}5 (Nc + Nuc) * (Nf + Nuf) - Nuc - Nuf + 1)] \tag{8}$$

La ecuación anterior permite ciertas simplificaciones:

a- necesidad de un servicio de calentamiento y uno de enfriamiento($Nuc=Nuf=1$):

$$NAI_c = Nc * Nf * [0{,}5 (Nc + 1) * (Nf + 1) - 1] \tag{9}$$

b- necesidad de un servicio de calefacción :

$$NAI_c = 0{,}5 \; Nc * Nf * (Nc + 1) * (Nf - 1) \tag{10}$$

c- necesidad de un servicio de enfriamiento:

$$NAI_c = 0{,}5 \; Nc * Nf * (Nc - 1) * (Nf - 1) \tag{11}$$

d- sin necesidad de servicios:

$$NAI_c = (Nc - 1) * (Nf - 1) * [(0{,}5 \; Nc * Nf) + 1] \tag{12}$$

La ecuación propuesta para determinar el número de alternativas que sabemos conducirán a a la obtención de redes originales, es una herramienta útil aun cuando esté pensada para aplicarla hasta los nodos de segundo nivel. No olvidemos que la eliminación de los mismos en los primeros pasos del crecimiento del árbol es de fundamental importancia para desechar rápidamente el origen de aquellos subárboles que mostrarán información ya obtenida por otro camino. El corte de ramas desde su origen es un elemento clave para evitar una expansión desmesurada del mismo.

En general, se observa que existe un nivel, estrictamente inferior al último , donde es posible hablar de alternativas originales; a partir de éste solo se podrá tomar una decisión. Este nivel se calcula en base al número de corrientes presentes en el sistema, de la siguiente forma:

$$\text{Nivel de } NAI_c = Nc \text{ ó } Nf \qquad \text{si} \quad | Nc - Nf | = 0 \tag{13}$$

$$\text{Nivel de } NAI_c = Nf - 1 \qquad \text{si} \quad | Nc - Nf | > 0 \;\; y \;\; Nf < Nc \tag{14}$$

$$\text{Nivel de } NAI_c = Nc - 1 \qquad \text{si} \quad | Nc - Nf | > 0 \;\; y \;\; Nf > Nc \tag{15}$$

UTILIZACION DE LA ECUACION

Se probaron sistemas con distinto número de corrientes de procesos y la necesidad de uno o dos servicios auxiliares. Se comparó el número de alternativas totales desarrolladas con el valor obtenido calculando NAI_c.

La Tabla I muestra los resultados obtenidos. En ella es posible observar la reducción significativa que se logra del número de alternativas a analizar, las cuales resultan ser en todos los casos menores o iguales a la mitad del total de posibilidades generadas.

EXTENSION DEL ESTUDIO AL ULTIMO NIVEL DEL DESARROLLO DEL ARBOL

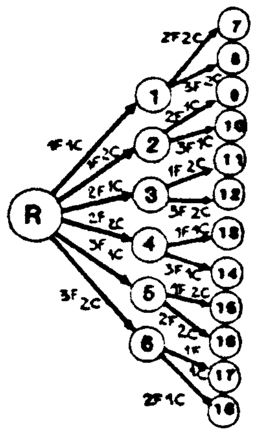
Con el análisis del desarrollo completo del árbol se trata de determinar las características fundamentales que muestra su crecimiento y cercar de esta manera la zona particular en que focalizaremos la búsqueda.

Para permitir visualizar con detalle la forma en que se iban desarrollando las ramas de un árbol particular y poder sacar conclusiones, se propusieron una serie de ejemplos de menor a mayor complejidad, de los cuales se transcribe uno solamente, el que a pesar de su simplicidad da una idea clara de las zonas de repetición.

Caso	Ctes.Cal.	Ctes.Frias	Serv.Cal.	Serv.Frio	NAT	NAI_c
1	2	1	-	1	4	2
2	2	1	1	1	12	4
3	2	2	1	-	12	6
	3	1	-	1	12	6
4	2	2	1	1	36	14
	3	1	1	1	24	9
5	3	2	-	1	36	18
	3	2	1	-	24	12
	4	1	-	1	24	12
6	3	2	1	1	72	30
	4	1	1	1	40	16
7	3	3	1	-	72	36
	4	2	-	1	72	36
	4	2	1	-	40	20
	5	1	-	1	40	20
8	3	3	1	1	144	63
	4	2	1	1	120	52
	4	1	1	1	60	25
9	5	2	1	-	60	30
	4	3	1	-	120	60
	3	4	1	-	144	72

Comparación de alternativas. Tabla I

Consideremos el caso de un sistema compuesto por tres corrientes de proceso: dos frias y una caliente, y dos servicios: uno de calentamiento y otro de enfriamiento, (1F-2F-3F / 1C 2C o su equivalente 1F-2F / 1C-2C-3C). Realizando las distintas propuestas de intercambio se abre un abanico de posibilidades como se muestra en la Figura 1. Para este ejemplo, se observa que las ramas que parten de los nodos de primer nivel deberían estar presentes en forma simultánea (nodos vinculantes).

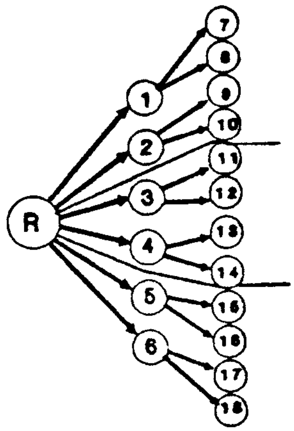


Composición de Ramas		Repetición de Ramas
R - 1 - 7	=	R - 4 - 13
R - 1 - 8	=	R - 6 - 17
R - 2 - 9	=	R - 3 - 11
R - 2 - 10	=	R - 5 - 15
R - 3 - 12	=	R - 6 - 18
R - 4 - 14	=	R - 5 - 19
R - 6 - 17		
R - 3 - 11		
R - 5 - 15		
R - 6 - 18		
R - 5 - 19		

Figura 1: Desarrollo combinatorial para un problema de 3 corrientes/2 servicios
Composición de Ramas y repeticiones.

A simple vista se observa que el árbol se desarrolló segun dos zonas, de las cuales la inferior es fiel reflejo de la superior (o viceversa) siempre y cuando mantengamos la propiedad de no interacción entre las propuestas de intercambio.

Es posible hablar, y de hecho se verifica en cualquier otro caso, de una expansión del Árbol segun ramas pertenecientes a diferentes 'Grupos'. En el ejemplo que analizamos son tres los grupos. Ver Figura 2.



Grupo I
2 Ramas principales.

Grupo II
2 Ramas principales.

Grupo III
2 Ramas principales.

Figura 2: Grupos en que se desarrolla el Árbol para un problema de 3 corr./2 serv.

Otras aclaraciones para el ejemplo son las siguientes:
1- como estamos en el caso de necesitar dos servicios, la primera combinación del primer grupo queda excluida.
2- la segunda combinación del primer grupo debe estar, ya que se refiere a un servicio y una corriente.
3- del segundo grupo solo deben aparecer los componentes inferiores de las dos ramas principales.
4- del tercer grupo no deben aparecer ninguna.

Luego el subárbol útil para analizar es el que sigue:

R - 2 - 9
R - 2 - 10
R - 3 - 12
R - 4 - 14

Si el caso no fuera de dos servicios sino solamente de uno se incorporarían también las ramas : R - 1 - 7 y R - 1 - 8. Haciendo un análisis enteramente similar para un problema de 5 corrientes y 1 servicio (o 4 y 2) se llega a que el subárbol útil es el siguiente:

R - 1 - 10 - 46
R - 1 - 11 - 47
R - 2 - 14 - 50
R - 2 - 15 - 51
R - 3 - 18 - 54
R - 3 - 19 - 55

CONCLUSIONES DEL DESARROLLO GLOBAL

En todos los casos probados fue posible observar que:
a- El número de Nodos de Primer nivel generados es igual a:

$$NPN = (Nc + Nuc)*(Nf + Nuf) \qquad (16)$$

b- El número de Ramas que componen cada nodo de Primer nivel es :

$$CNPN = (Nc + Nuc - 1)*(Nf + Nuf - 1) \qquad (17)$$

c- El número de Grupos en que se dividen los Nodos de Primer nivel es:

$$GNPN = Nc + Nuc \quad o \quad GNPN = Nf + Nuf \qquad (18)$$

segun que la combinatoria empiece con las corrientes calientes o frías.
d- El número de componentes de cada grupo es igual a :

$$CGNPN = NPN / GNPN \qquad (19)$$

e- El número de Grupos (o subgrupos) en los que se dividen los componentes de GNPN

$$NGGNPN = CNPN / CNPN (GNPN - 1) \qquad (20)$$

f- El número de componentes de cada grupo es igual a:

$$NCGGNPN = CNPN / (GNPN - 1) = CNPN / NGGNPN \qquad (21)$$

La forma en que se deben ir desarrollando las ramas para evitar repetición es la siguiente: el Grupo 1 se desarrolla TODO (si existen dos servicios se excluye el primer componente); el Grupo 2 se desarrolla todo MENOS el subgrupo UNO; el Grupo 3 se desarrolla todo MENOS los subgrupos UNO,DOS;... el grupo n se desarrolla todo MENOS los subgrupos UNO,DOS,TRES,...,N-1;...el grupo N se desarrolla todo MENOS los subgrupos UNO, DOS, TRES,...,NGGNPN o sea NADA. En forma resumida el procedimiento sería componer la Raiz o sistema balanceado a integrar, obtener los nodos de primer nivel a través de las diferentes combinaciones, calcular el número de grupos y el número de componentes de cada grupo desarrollando solo el primero. A partir de éstos encontrar los nodos sucesores al segundo nivel ,para cada uno de ellos obtener sus descendientes y los grupos en que ellos se dividen, generando solo el primer grupo correspondiente a cada nodo padre. Repetir el procedimiento para el tercer nivel. Continuar hasta el nivel n en que se desarrolle una rama o nodo por cada nodo en estudio en en el nivel n-1. Este nivel n será el último que alcance el árbol.

Finalmente es posible calcular el número de alternativas no repetidas a través de:

con la necesidad de un servicio : $NAI_c = (Nf + Nuf)!$ (22)

$NAI_c = (Nc + Nuc)!$ (23)

con la necesidad de dos servicios: $NAI_c = (Nf + Nuf)! - (Nf + Nuf - 1)!$ (24)

$NAI_c = (Nc + Nuc)! - (Nc + Nuc - 1)!$ (25)

CONSIDERACIONES PRELIMINARES PARA LA BUSQUEDA DE REDES EN LA REGION SELECCIONADA

La base del procedimiento es una extensión de un trabajo anterior: ARMITe o 'Aplicación Reiterada del Método de los Intervalos de Temperatura' basado en el método propuesto por Linnhoff & Flower. En este caso se buscó el sintetizado de redes de intercambio térmico a través de un desarrollo arbóreo, pero buscando aquella red que minimizara una función objetivo económica.

En el nuevo enfoque se introduce un criterio de flexibilidad operativa como supercriterio en la generación de posibles esquemas, dado la escasa utilidad que puede presentar una red óptima desde un punto de vista económico incapaz de dar cumplimiento, en la práctica, a las especificaciones planteadas.

FLEXIBILIDAD OPERATIVA DE UNA RED

Grossman define la flexibilidad como 'un atributo del diseño, representativo de la capacidad del mismo de tolerar y ajustarse a variaciones que se pueden verificar durante la operación'. En términos estrictamente matemáticos, esta capacidad presupone un número de grados de libertad no negativos en el conjunto de ecuaciones que representan el comportamiento operativo de un sistema, donde el esquema de proceso y el tamaño de los equipos están totalmente definidos.

Se debe tener en cuenta que en una red existente hay variables no modificables como pueden ser las áreas de intercambio y por otro lado valores que se han considerado datos en el momento del diseño pueden sufrir cambios durante la operación como las temperaturas de las corrientes. Todo esto indica que en el nuevo planteo hay un menor número de variables capaces de ser fijadas y por ende una mayor exigencia respecto al caso de diseño puro.

GRADOS DE LIBERTAD DE UNA RED COMO CRITERIO DE FLEXIBILIDAD

En forma matemática se podría decir que un número de grados de libertad negativos en el sistema, se traduciría en la imposibilidad de cumplir con las especificaciones planteadas.

En la definición de un intercambio, dentro de una red, las temperaturas de las corrientes estarán fijas en la medida que constituyan entradas-salidas del sistema; respecto al caudal, solo si la corriente original ha sido subdividida será un valor desconocido, restando determinar el grado de fraccionamiento binario (uno por cada división realizada). Respecto a los servicios auxiliares lo único fijo es la temperatura a la que se los dispone, el caudal que se va a utilizar de ellos está libre lo mismo que la temperatura de salida. En consecuencia en cada intercambio que se realice con un medio auxiliar se requeriría la fijación de un valor sobre esa corriente (generalmente el caudal).

Lo anteriormente expresado puede ser extendido a una parte del esquema global. La fórmula siguiente, que resume la relación funcional entre los distintos prámetros, puede ser utilizada para calcular los grados de libertad de un subesquema dado:

$$GL_s = N_{corr} + N_{div} + I_{sa} - \sum T_{esp} \quad (26)$$

N_{corr} = Número de corrientes presentes en el subesquema
N_{div} = Número de divisiones binarias presentes totales
I_{sa} = Número de intercambios con servicios auxiliares
$\sum T_{esp}$ = Número total de temperaturas de corrientes de proceso especificadas

En la Figura 3 se muestra un sector de una red de intercambio donde se encuentran involucradas dos corrientes de proceso, indicadas con 1 y 2 y un intercambio con un servicio auxiliar A. En el caso de la corriente 1 se ha tratado de indicar que dicha corriente aun no ha alcanzado el valor final. Por lo tanto N_{corr} vale 2, N_{div} es nulo (no hay divisores), I_{sa} es igual a 1 y $\sum T_{esp}$ vale 3 (las entradas de 1 y 2 y la salida de esta última).Luego GL_s es cero.

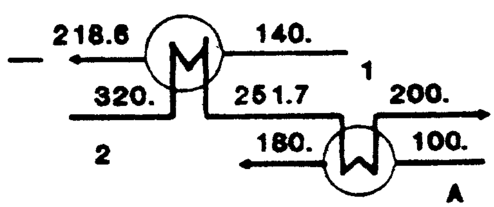


Figura 3

La aplicación del criterio de flexibilidad expuesto, al problema de síntesis de redes de intercambio térmico puede resumirse como sigue: ' Basta para invalidar un paso en la síntesis el que, como consecuencia del mismo, en el sistema parcial resultante se registre un número negativo de grados de libertad . Deberá tenerse en cuenta, sin embargo, que siempre es posible en un momento dado del proceso de síntesis instrumentar un paso que resulte en una subestructura con grados de libertad positivos. Bastará con dividir el número necesario de corrientes de forma tal de incrementar el término N_{div} y equilibrar de este modo la ecuación correspondiente.

TIPOS DE INTERCAMBIOS POSIBLES

La naturaleza combinatorial del procedimiento ARMITe implica la elección de dos corrientes para transferirse calor mutuamente; pero esto, no siempre será posible si se ha de respetar el criterio de flexibilidad. En determinadas circunstancias habrá que recurrir a la división de corrrientes, como se expresó anteriormente.La división más simple es el `by pass´ (ver Figura 4), donde se debe cumplir:

$$Tic = Tec - \frac{Q}{r\ Wc} \geq Tef + \delta \tag{27}$$

siendo:

$$r \geq \frac{Q\ /\ Wc}{Tec - (\ Tef + \delta\ )} \qquad \text{si se dividió la caliente} \tag{28}$$

$$r \geq \frac{Q\ /\ Wf}{Tec - (\ Tef + \delta\ )} \qquad \text{si se dividió la fría} \tag{29}$$

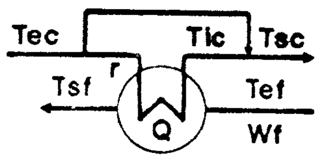


Figura 4: División con by pass

Otro circunstancia donde se plantea la división de corrientes es el caso de que en el sistema aun no estructurado exista una corriente de un tipo (caliente o fría) y las restantes del otro tipo (frías o calientes). En este caso la solucón inmediata será la de subdividir la única corriente en tantas partes como sea necesario y proceder al intercambio. Dado que se ha de respetar la aproximación mínima prefijada, existen una serie de condiciones sobre el fraccionamiento.

Supongamos que en el sistema remanente haya una corriente caliente y n frías. La partición exige definir n-1 fracciones r_i para dividir a Wc. A la salida de cada equipo la subcorriente caliente i habrá disminuido su temperatura hasta el nivel T_{si} donde, por la razón expuesta al considerar el by pass, deberá cumplirse que

$$r_i \geq \frac{Q/Wc}{Tec - (\ Tef + \delta\ )} \qquad i = 1,\ldots, n-1 \tag{30}$$

siendo

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{Qi}{Tec - (Tefi + \delta)} \leq Wc \tag{31}$$

Expresiones análogas se pueden obtener para una corriente fría y n calientes.

RELACIONES FUNDAMENTALES PARA EL INTERCAMBIO CALORICO

En la Figura 5 se ha esquematizado el caso básico que es la división binaria de una corriente tomando como estructura de representación la matriz de intervalos de temperaturas. Con C1 a C3 se ha indicado las corrientes involucradas en el intercambio y con R la totalidad de las restantes. Si el intercambio se efectúa por porciones calientes , el sector comprometido en el mismo es el que se encuentra a la izquierda de la figura (hasta k1 en C1, l1 en C2 y m1 en C3). Si en cambio se realiza por porciones frías el sector es el de la derecha limitado por k2,l2 y m2. En ambos casos el sector no comprometido se agrega al representado por R para constituir el sistema remanente. La fila C1 corresponde a una corriente caliente, la C3 a una fría y la C2 , en cambio, representará a una u otra segun el caso (1 fría /2 calientes o viceversa).

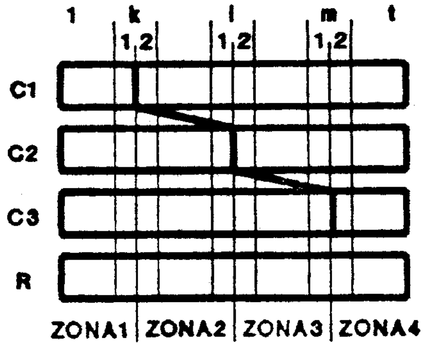


Figura 5: División binaria de una corriente

Tomando como base la figura citada y a través de un planteo matemático del problema, se pueden obtener las relaciones que deben guardar los calores intercambiados por las tres corrientes, manteniendo un consumo mínimo de servicios auxiliares y cumpliendo con la condición de flexibilidad operativa.

Las conclusiones para el caso de intercambio por porciones calientes, pueden resumirse en lo siguiente:
1- Deben respetarse los siguientes límites para el calor transferido por la corriente C1 (Q_{C1}), dentro de la zona de la matriz de intervalo donde C1 transfiere:

$$Q_{C1} \leq \min \left[-\alpha_{C1t} \; ; \; -[(1-\lambda_1)\, \alpha_{C1(k-1)} + \lambda_1\, \alpha_{C1k}] \right] \qquad (32)$$

siendo

$$\lambda_1 \leq \frac{-\alpha_{Rk-1}}{\alpha_{Rk} - \alpha_{Rk-1}} \quad \text{si} \quad \alpha_{Rk} > 0 \qquad \lambda_1 \leq \frac{-f_{1(k-1)}}{f_{1k} - f_{1(k-1)}} \quad \text{si} \quad f_{1k} = \sum_{i=1}^{3} \alpha_{Cik} > 0 \qquad (33)$$

donde la zona 1 queda limitada, en principio, por el intervalo en el que α_{C1} se hace constante o α_R toma valor positivo. Fuera de esta zona la transferencia de C1 se ve restringida por

$$\max f_{3j} \leq Q_{C1} \leq \min \left[-f_{2j} \text{ si } \alpha_{Rj} > 0 \right] \qquad (34)$$

La zona de la matriz donde esto debe verificarse está limitada por el segundo término de la desigualdad anterior, es decir que si $\alpha_{21} + Q_{C1} > 0$ deberá considerarse

$$\lambda_2 \leq \frac{-[f_{2(l-1)} + Q_{C1}]}{f_{2l} - f_{2(l-1)}} \qquad (35)$$

y será

$$Q_{C2} \leq \left| (1-\lambda_2)\, \alpha_{2(l-1)} + \lambda_2\, \alpha_{C2l} \right| \qquad (36)$$

Por último traspasada la zona 2, deberá ser $Q_{C3} \leq \min f_{4j}$. (37)

Debe tenerse en cuenta que cuando C2 y C3 sean del mismo tipo, lo anterior no especifica cual de las corrientes de proceso es una u otra, con lo cual en el análisis deberá intentarse con ambas. Expresiones análogas se pueden obtener para el intecambio por porciones fria, tomando en lugar de α valores de Ω. Así para la zona 4, que es donde se produce la totalidad de la transferencia de la corriente C3, zona limitada por el intervalo donde Ω_{C3} se hace constante o Ω_{3} negativo será

$$Q_{C3} \leq \min [\, \Omega_{C3l} \,;\, [\, (1-\lambda_1)\, \Omega_{C3(m+1)} + \lambda_1\, \Omega_{C3m} \,]] \tag{38}$$

$$\lambda_1 \leq \frac{\Omega_{3(m+1)}}{\Omega_{3(m+1)} - \Omega_{3m}} \quad \text{si} \quad \Omega_{3m} < 0 \qquad \lambda_1 \leq \frac{q_{1(m+1)}}{q_{1(m+1)} - q_{1m}} \quad \text{si} \quad q_{1m} = \sum_{i=1}^{3} \Omega_{Cim} < 0 \tag{39}$$

fuera de esa zona, la transferencia de C3 se ve restringida por

$$\max \; -q_{3j} \leq Q_{C3} \leq \min [\, q_{2j} \;\; \text{si} \; \Omega_{3j} < 0 \,] \tag{40}$$

siendo

$$q_{2j} = \sum_{3,\,C3} \Omega_{ij} \quad ; \quad q_{3j} = \sum_{1,2} \Omega_{ij} \tag{41}$$

La zona 3 encuentra un limite para aquellos casos en que $Q_{C3} > q_{21}$ y siendo

$$\lambda_2 \leq \frac{q_{2(l+1)} - Q_{C3}}{q_{2(l+1)} - q_{2l}} \quad \text{debe ser} \quad Q_{C2} \leq \left|\, (1-\lambda_2)\, \Omega_{C2(l+1)} + \lambda_2\, \Omega_{C2l} \,\right| \tag{42}$$

Por último para la zona 2 se debe verificar que $Q_{C1} \leq \min [\, q_{4j} = \Omega_j^{n} - \Omega_{C1j} \,]$ (43)

Lo expuesto para división binaria de una corriente intercambiando con otras dos incluye el caso de intercambio entre dos corrientes sin partición y se deberá operar sobre Q_{C1} y Q_{C3} .

CONCLUSIONES

Mediante el desarrollo expuesto es posible reducir notablemente el árbol útil de exploración de las posibles soluciones del problema, sea que la decisión se tome en los primeros niveles del crecimiento, por dudas en la no interacción de las propuestas de intercambio, o por el contrario se tome considerando el nivel final del crecimiento. Ubicada la zona de búsqueda se podrá ir en la dirección de encontrar con certeza, un conjunto de redes de intercambio térmico que ofrezcan flexibilidad desde un punto de vista operativo y guiados por el cálculo de los grados de libertad de los sistemas en formación.

REFERENCIAS

1. Pho T.K. & Lapidus L. Topics in Computer-Aided-Design: Part II Synthesis of Optimal Heat Exchanger Networks by Tree Searching Algoritms. AIChE J. Vol 19, (1973) p. 1182.
2. Linnhoff B. & Flower J.R. Synthesis of Heat Exchanger Networks, Part I Systematic Generation of Energy Optimal Network. AIChE J. Vol 24 (1978) p. 633.