



SÍNTESIS DE DISEÑOS ALTERNATIVOS EN LA RECONFIGURACIÓN DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR

SYNTHESIS OF ALTERNATIVE DESIGNS IN THE RETROFIT OF HEAT EXCHANGER NETWORKS

D.A. Mejía-Suárez¹, J.M. Zamora-Mata^{1*}, M. Serna-González², R. Lugo-Leyte¹ y J.M. Ponce-Ortega²

¹Departamento de Ing. de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Av. San Rafael Atláxco # 186, Col. La Vicentina, México, D.F., 09340, México.

²Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mújica S/N, Ciudad Universitaria, Edificio M. Morelia, Mich., 58060, México.

Recibido 10 de Septiembre 2009; Aceptado 10 de Marzo 2010

Resumen

En este trabajo se presenta un modelo de programación mixta-entera no lineal para la reconfiguración simultánea de redes de intercambio de calor, RIC, considerando de forma simultánea: (i) la reubicación y la modificación de equipos de intercambio de calor disponibles; (ii) equipos de intercambio de calor adicionales, (iii) la topología de la RIC; (iv) los costos de servicios y (v) los costos de inversión. Adicionalmente, la formulación del modelo toma en cuenta los costos de reconexión de los equipos re-utilizados para favorecer la generación de soluciones con pocos cambios de reconexión. La superestructura de red de Yee y Grossmann (1990) es empleada en este trabajo. Esta superestructura introduce características redundantes que dan lugar a problemas combinatorios importantes, aún para casos de reconfiguración de tamaño moderado. Por otra parte, debido a que el modelo desarrollado presenta propiedades no convexas, una metodología no determinista de solución puede converger a una solución sub-óptima. Este artículo también describe una metodología para facilitar la búsqueda de buenas soluciones alternativas, de tal modo que el diseñador tenga diversas opciones a considerar y, además del costo total anualizado, puedan tomarse en cuenta otras características de la red en la selección final del diseño de reconfiguración.

Palabras clave: redes de intercambio de calor, reconfiguración de RIC, diseño simultáneo y optimización, integración térmica, uso eficiente de energía y recuperación de calor.

Abstract

This work proposes a Mixed-Integer Nonlinear Programming model for the simultaneous retrofit of heat exchanger networks, HEN, which takes into account: (i) the placement, modification and reassignment of existing exchangers, (ii) additional exchangers, (iii) HEN topology, (iv) utility costs and (v) investment costs. In addition, the model formulation incorporates re-piping costs that account to limit the number of reassignments of the available equipments. The network superstructure proposed by Yee and Grossmann (1990) is considered in this paper. This superstructure introduces redundant characteristics which involves important combinatorial problems even for small instances of the retrofit problem. On the other hand, since the developed model involves nonconvex terms, a nondeterministic solution methodology can converge to a suboptimal point. A methodology to facilitate the search for good alternative solutions is described also in this work, so the designer will have diverse options to consider and, besides the total annualized cost, different network features can be taking into account in the final selection of the retrofit design.

Keywords: heat exchanger networks, HENs retrofit, simultaneous design and optimization, thermal integration, efficient use of energy and heat recovery.

*Corresponding author. E-mail: jmzm@xanum.uam.mx
Tel. (55) 58-04-64-86

1. Introducción

La integración térmica de procesos es un análisis técnico y económico, que tiene el objetivo de lograr un mejor aprovechamiento de la energía en los procesos industriales, lo que ha incentivado una significativa investigación en esta área, debido a los múltiples retos que la industria moderna debe afrontar en el corto plazo en cuanto a materia energética y ambiental se refiere, bajo los escenarios económicos y políticos que prevalecen. En años recientes, los costos del petróleo han experimentado incrementos históricos, por lo que la factura energética sigue siendo un rubro significativo de los costos de operación de las plantas industriales. Además, el mejor aprovechamiento de la energía en procesos industriales redundará directamente en la disminución de gases de combustión que son emitidos al ambiente. Por todo lo anterior, es evidente que el diseño óptimo de nuevas redes de intercambio de calor, RIC, sigue siendo un problema importante de la ingeniería de procesos. Desde las primeras contribuciones para sistematizar el proceso de diseño de RIC (e.g., Ten Broeck, 1944; Westbrook, 1961; Hwa, 1965; Masso y Rudd, 1969) la mayor parte de las investigaciones desarrolladas en la integración térmica de procesos ha sido enfocada a la síntesis de nuevas RIC, y de manera significativa ha sido menos favorecida la cantidad de contribuciones realizadas al tema de reajuste o reconfiguración de RIC (e.g., Gundersen y col., 1988; Jezowski, 1994a,b; Furman y Shahinidis, 2002); sin embargo, la mayoría de los proyectos en la práctica industrial no tiene que ver necesariamente con nuevos diseños. De hecho, la experiencia ha mostrado que aproximadamente el 70% de los proyectos industriales realizados a principios de los años noventa tuvieron que ver con la reconfiguración de plantas existentes (Shokoya, 1992).

Se pueden considerar dos enfoques principales para la síntesis y la reconfiguración de RIC (e.g., Nishida y col., 1981; Jezowski, 1994b): los métodos secuenciales de diseño y los métodos de diseño simultáneo. Los métodos secuenciales de diseño proceden en etapas, en las cuales se van determinando gradualmente los valores de las variables de decisión del problema de síntesis. Un trabajo interesante bajo este enfoque es el propuesto por Yee y Grossmann (1991). Estos autores proponen un método de reconfiguración de tipo secuencial que se subdivide en dos grupos de procedimientos. En un primer grupo, se deben tomar decisiones a priori sobre algunas de las variables de diseño, tal como el nivel de recuperación de

energía a través del HRAT (“*Heart Recovery Approach Temperature*”). Seguidamente, mediante el empleo de métodos heurísticos de diseño, se realiza un análisis preliminar de tipo paramétrico sobre el problema de reconfiguración a tratar, donde, para distintos valores de HRAT, se estiman varios escenarios de diseño con diferentes costos totales anualizados. En una segunda etapa, se define una superestructura que depende de los resultados obtenidos en el análisis paramétrico. Con base a la superestructura generada, se plantea un modelo MINLP no convexo que se resuelve con técnicas de programación matemática para definir una solución del diseño de reconfiguración. Una de las ventajas del método de Yee y Grossmann (1991) es que puede estimarse el número máximo de equipos que están involucrados en la reconfiguración y con ello se disminuye la redundancia de los equipos que participan en la superestructura, desde la etapa del análisis paramétrico. Además, el modelo matemático toma en cuenta la posibilidad del mezclado entre distintas corrientes de proceso o sus divisiones, donde el mezclado puede ser no isotérmico. Sin embargo, lo anterior conlleva a que el modelo presente múltiples variables de flujo que generan expresiones en los balances de energía con términos bilineales que son no convexos y que limitan el garantizar soluciones óptimas al modelo de reconfiguración. Por otra parte, debe tomarse en consideración que el trabajo de Yee y Grossmann (1991) no distingue entre diferentes tipos de reconexión de los equipos re-empleados, y para problemas de larga escala demanda un esfuerzo significativo de cómputo.

Los métodos de diseño simultáneo atienden al problema de síntesis como una tarea de optimización de un modelo matemático que toma en cuenta, de forma simultánea, a todos los elementos de decisión. El modelo matemático involucra una función objetivo a minimizar sujeta a restricciones y mediante el empleo de técnicas de optimización se generan diseños óptimos. Es limitada la cantidad de trabajos que abordan la reconfiguración bajo un enfoque de diseño simultáneo (e.g. Ma y col., 1998 y 2000; Sorsak y Kravanja, 2004). El trabajo aquí propuesto hace empleo de un modelo matemático que considera de forma simultánea a todos los elementos de decisión para la reconfiguración de RIC, y se tiene como antecedentes al trabajo de Yee y Grossmann (1990) y al trabajo de Ma y col. (2000). El trabajo de Yee y Grossmann (1990) atiende la síntesis de nuevas RIC y es ampliamente conocido en la literatura especializada. El trabajo de Ma y col. (2000) trata la reconfiguración de RIC, extendiendo el

modelo SYNHEAT y la superestructura de Yee y Grossmann (1990). En el trabajo de Ma y col. (2000) se hacen dos valiosas contribuciones que se describen a continuación. Una contribución del trabajo de Ma y col. (2000) consiste en proponer un modelo matemático de tipo mixto-entero no lineal, MINLP, que considera de forma simultánea al costo total anualizado que es compuesto por los costos de los servicios y los costos de inversión; la definición de la topología de la RIC; y el reemplazo de los equipos. Otra contribución importante de Ma y col. (2000) es la propuesta de un método para resolver el modelo matemático que se desarrolla en dos fases: (i) en una primera fase, se relaja y simplifica el modelo original MINLP a un modelo de tipo mixto-entero lineal, MILP. El objeto principal de la primera fase es determinar una propuesta para la configuración de los encuentros térmicos en la reconfiguración de una RIC bajo simplificaciones. (ii) En una segunda fase se resuelve el modelo MINLP original, sin ninguna relajación o simplificación, excepto que se aprovecha la información de la topología que se obtiene en la primera fase. El objetivo principal de la segunda fase es determinar la reconfiguración óptima de una RIC, con base a una topología obtenida en la primera fase.

En el tema de reconfiguración de RIC no es nuevo el concepto de proponer una metodología que se desarrolle en dos fases; Ciric y Fluodas (1989) fueron los primeros en proponer un esquema de este tipo bajo un enfoque de diseño secuencial. La metodología propuesta en el trabajo de Ma y col. (2000) también descompone el problema de optimización para facilitar su solución, pero el mérito radica en proponer un modelo matemático donde son considerados simultáneamente los costos de operación, los costos de inversión y las características de configuración de la RIC, aún cuando en cada fase sea necesario realizar simplificaciones. Sin embargo, Ma y col. (2000) describen en su trabajo una estrategia para resolver el modelo matemático, misma que se ve limitada para generar diversas soluciones bajo sus condiciones de convergencia. Lo anterior se debe a que son excluidos algunos diseños factibles, incluso con menores costos anualizados, cuando estos diseños no cumplen con las condiciones de paro establecidas en el trabajo de Ma y col. (2000). La metodología de reconfiguración que aquí se presenta propone una estrategia con la meta de generar y comparar múltiples buenas soluciones factibles y así investigar distintos diseños con menores costos. Más aún, lo anterior puede conducir a un beneficio destacado: la posi-

bilidad de elegir entre varios diseños de reconfiguración que permitan el considerar a otros factores además de los económicos para definir el diseño más conveniente.

A diferencia del modelo matemático propuesto por Ma y col. (2000), el modelo matemático que aquí se propone toma en cuenta distintos casos de interconexión para el reemplazo de cada equipo de transferencia de calor existente, como son los casos de dos, de uno, o sin cambios en su interconexión, en relación a las corrientes que eran operadas antes de la reconfiguración. Cada una de las situaciones anteriores tiene asociada un costo particular, lo cual es considerado en el modelo matemático para generar y evaluar diseños de RIC que involucren menores cantidades de cambios en las reconexiones de los equipos reemplazados. Esta característica es deseable debido a múltiples razones prácticas, concernientes a la seguridad, la instrumentación, el control y la operación, además de las limitaciones físicas que implica la distribución de tuberías o la reubicación de equipos.

Generalmente, a fin de simplificar el problema de reconfiguración de RIC, los trabajos previos, que emplean modelos donde participan simultáneamente los elementos de decisión, presentan la simplificación de sólo considerar los costos variables, dependientes del tamaño del equipo, cuando es necesario complementar el área aprovechable de un equipo disponible (e.g. Ma y col., 1998 y 2000; Sorsak y Kravanja, 2004). En estos trabajos se suele hacer la simplificación de ignorar los cargos fijos correspondientes a la instalación de un equipo nuevo cuando se complementa el área de un equipo disponible para satisfacer los requerimientos de un encuentro térmico. Sin embargo, esta simplificación puede conducir a diseños con múltiples requerimientos de nuevos equipos con tamaños poco significativos, debido a que en la formulación del modelo no se involucran los costos fijos correspondientes a la instalación de los nuevos equipos requeridos para complementar el área de un equipo disponible. Esta deficiencia puede generar diseños poco prácticos. A diferencia del trabajo de Ma y col. (2000) y del trabajo de Sorsak y Kravanja (2004), aquí son tomados en cuenta los cargos fijos para cualquier equipo nuevo requerido, de esta manera se penaliza el empleo de equipos nuevos con tamaños poco significativos e inferiores a los recomendados por las prácticas de diseño. Lo anterior conduce a diseños de reconfiguración que involucren menores cantidades de equipos nuevos. Esta situación es deseable en la práctica debido a que involucra menores modificaciones en la reconfiguración de RIC existentes.

La organización del material que se presenta a continuación es la siguiente: en la segunda sección se definen los objetivos, las suposiciones y las simplificaciones que se consideran en la metodología de reconfiguración que se presenta. La descripción del modelo matemático, y del método para resolver dicho modelo, se hace en las secciones tres y cuatro, respectivamente. En la quinta sección se presentan los resultados obtenidos para dos casos de estudio, mientras que en la sexta sección se presentan las conclusiones del presente trabajo.

2. Descripción del problema

En este trabajo se presenta una metodología para la reconfiguración de RIC, como una tarea de optimización de un modelo matemático que toma en cuenta de forma simultánea a todos los elementos de decisión, con el propósito de desarrollar un conjunto de buenos diseños alternativos que buscan minimizar el costo total anualizado de la red. En dicha metodología se penaliza con cargos fijos la instalación de equipos nuevos, y la adición de área a intercambiadores de calor disponibles. Así mismo, se incluyen costos de reconexión para los equipos disponibles que sean reasignados a diferentes corrientes de proceso o servicios auxiliares. Para la reconfiguración de RIC, esta metodología debe proporcionar los siguientes elementos de decisión: (i) el costo total anualizado, que se compone de los costos de inversión y de operación; (ii) un buen conjunto de topologías alternativas para la reconfiguración de la RIC, indicando los encuentros térmicos y el tipo de equipo requerido, ya sea nuevo o reemplado; (iii) el tipo de cambio en la reconexión de los equipos reemplados; y (iv) las características para cada encuentro térmico, como son los flujos másicos, las cargas térmicas, las temperaturas de operación y el área de transferencia requerida.

Para la especificación del problema de reconfiguración abordado, se requiere de los siguientes elementos de información: (i) un conjunto de corrientes calientes de proceso, HP, y un conjunto de corrientes frías de proceso, CP. (ii) Para cada una de las corrientes anteriores, se requieren los valores representativos y constantes de sus propiedades a condiciones nominales del proceso, como: temperaturas iniciales y finales, flujo másico, capacidad calorífica, coeficientes de película para la transferencia de calor. (iii) Un conjunto de servicios de calentamiento, HU, y un conjunto de servicios de enfriamiento, CU, con sus correspondientes temperaturas y valores representativos para los coeficientes de película para la transferencia

de calor, además de su respectiva información de costos. (iv) La descripción del conjunto de equipos disponibles de transferencia de calor de coraza y tubos, así como el arreglo que guardan estos equipos en la topología original de la RIC que va a ser reconfigurada. (v) Información de los costos de inversión, tales como los costos fijos por la instalación de equipos, los costos variables dependientes del tamaño del equipo y los costos estimados para la reconexión de un equipo con uno o dos cambios en las corrientes operadas.

En esta metodología se realizan las siguientes suposiciones y simplificaciones: (i) para cada uno de los encuentros térmicos que ocurren en una corriente son considerados valores constantes para la capacidad calorífica y el coeficiente de película de transferencia de calor; (ii) El costo de los equipos de transferencia de calor es determinado por una expresión lineal compuesta por cargos fijos independientes del tamaño del equipo y por cargos variables dependientes de la magnitud del área de transferencia, además, ambos costos corresponden a un tipo particular de equipo de coraza y tubos. (iii) Los equipos de transferencia se consideran de propiedades homogéneas de construcción, excepto en sus dimensiones, con una elevada conductividad térmica del material de construcción de los tubos, además se consideran en operación completamente a contracorriente y sin cambios de fase.

3. Modelo matemático P

El modelo matemático que se propone en este trabajo, P, para determinar soluciones óptimas al problema de reconfiguración, hace empleo de la superestructura de Yee y Grossmann (1990); esta superestructura es un arreglo redundante de los posibles encuentros térmicos entre las corrientes calientes de proceso, las corrientes frías de proceso y los servicios de calentamiento y de enfriamiento, tal y como se muestra en la Fig. 1. La superestructura de Yee y Grossmann (1990) se organiza en un número de etapas que, asignado de manera heurística, corresponde al número mayor de las corrientes calientes o de las corrientes frías de proceso involucradas. Por simplicidad se supone: (i) que los servicios auxiliares son localizados en los extremos de la secuencia de etapas de la superestructura; (ii) que se realiza un mezclado isotérmico de las divisiones de corrientes de proceso que ocurren en una etapa antes de pasar a una etapa contigua. Dado que la búsqueda de soluciones óptimas locales y globales para el modelo P representa una tarea sumamente compleja, aquí se propone abordar la reconfiguración

a través de la búsqueda de diseños factibles que procuren minimizar la función de costo total anualizado del modelo P.

Modelo P

Función objetivo

Minimizar

$$\begin{aligned}
 c_{TA} = & \text{CCU} \sum_{i \in HP} qcu_i + \text{CHU} \sum_{j \in CP} qhu_j \\
 & + \sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} \text{CF}_{ij} w_{ijk} + \sum_{i \in HP} \text{CF}_{i,CU} wcu_i \\
 & + \sum_{j \in CP} \text{CF}_{HU,j} whu_j + \sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} \text{CV}_{ij} (A_{ijk}^N) \\
 & + \sum_{i \in HP} \text{CV}_{i,CU} (A_{cu_i}^N) + \sum_{j \in CP} \text{CV}_{HU,j} (A_{hu_j}^N) \\
 & + \sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} \text{CRS}_{ij} u_{ijk} + \sum_{i \in HP} \text{CRS}_{i,CU} ucu_i \\
 & + \sum_{j \in CP} \text{CRS}_{HU,j} uhu_j + \sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} \text{CRD}_{ij} v_{ijk} \\
 & + \sum_{i \in HP} \text{CRD}_{i,CU} vcu_i + \sum_{j \in CP} \text{CRD}_{HU,j} vhu_j
 \end{aligned} \tag{1}$$

Restricciones

Balance global de energía por corriente

$$(\text{TIN}_i - \text{TOUT}_i) F_i = \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} q_{ijk} + qcu_i \quad i \in HP \tag{2}$$

$$(\text{TOUT}_j - \text{TIN}_j) F_j = \sum_{i \in HP} \sum_{k \in ST} q_{ijk} + qhu_j \quad j \in CP \tag{3}$$

Balance de calor por etapa

$$(t_{i,k} - t_{i,k+1}) F_i = \sum_{j \in CP} q_{ijk} \quad i \in HP \text{ y } k \in ST \tag{4}$$

$$(t_{j,k} - t_{j,k+1}) F_j = \sum_{i \in HP} q_{ijk} \quad j \in CP \text{ y } k \in ST \tag{5}$$

Asignación de temperaturas de entrada a la superestructura

$$\text{TIN}_i = t_{i,1} \quad i \in HP \tag{6}$$

$$\text{TIN}_j = t_{j,\text{NOK}+1} \quad j \in CP \tag{7}$$

Decremento monótonico de temperaturas

$$t_{i,k} \geq t_{i,k+1} \quad i \in HP, \quad k \in ST \tag{8}$$

$$t_{j,k} \geq t_{j,k+1} \quad j \in CP, \quad k \in ST \tag{9}$$

$$\text{TOUT}_i \leq t_{i,\text{NOK}+1} \quad i \in HP \tag{10}$$

$$\text{TOUT}_j \geq t_{j,1} \quad j \in CP \tag{11}$$

Cargas de los servicios de calentamiento y enfriamiento

$$(t_{i,\text{NOK}+1} - \text{TOUT}_i) F_i = qcu_i \quad i \in HP \tag{12}$$

$$(\text{TOUT}_j - t_{j,1}) F_j = qhu_j \quad j \in CP \tag{13}$$

Restricciones lógicas

$$q_{ijk} - \Omega z_{ijk} \leq 0 \quad i \in HP, \quad j \in CP, \quad k \in ST \tag{14}$$

$$qcu_i - \Omega zcu_i \leq 0 \quad i \in HP \tag{15}$$

$$qhu_j - \Omega zhu_j \leq 0 \quad j \in CP \tag{16}$$

$$dt_{ijk} \leq t_{i,k} - t_{j,k} + \Gamma(1 - z_{ijk}) \quad i \in HP, \quad j \in CP, \quad k \in ST \tag{17}$$

$$dt_{ijk+1} \leq t_{i,k+1} - t_{j,k+1} + \Gamma(1 - z_{ijk}) \quad i \in HP, \quad j \in CP, \quad k \in ST \tag{18}$$

$$dtcu_i \leq t_{i,\text{NOK}+1} - \text{TOUT}_{CU} + \Gamma(1 - zcu_i) \quad i \in HP \tag{19}$$

$$dthuj \leq \text{TOUT}_{HU} - t_{j,1} + \Gamma(1 - zhu_j) \quad j \in CP \tag{20}$$

Restricciones para delimitar el reemplazo de equipos en una sola posición

$$\sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} y_{ijk}^{mno} + \sum_{i \in HP} y_i^{mno} + \sum_{j \in CP} y_j^{mno} \leq 1 \quad (m, n, o) \in E_p$$

$$\sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} y_{ijk}^m + \sum_{i \in HP} y_i^m + \sum_{j \in CP} y_j^m \leq 1 \quad m \in E_c \tag{21}$$

$$\sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} y_{ijk}^n + \sum_{i \in HP} y_i^n + \sum_{j \in CP} y_j^n \leq 1 \quad n \in E_h$$

Restricciones para definir el tipo de reemplazo de los equipos disponibles en cuanto a la reconexión de sus corrientes de operación.

- Para determinar el caso del reemplazo de equipos con una reconexión que involucra un sólo cambio de corrientes.

$$\sum_{(m,n,o) \in U_{PP}} y_{ijk}^{mno} + \sum_{m \in U_{CP}} y_{ijk}^m + \sum_{n \in U_{HP}} y_{ijk}^n \leq u_{ijk} \quad i \in HP, \quad j \in CP, \quad k \in ST \tag{22}$$

$$\sum_{(m,n,o) \in U_{PC}} y_i^{mno} + \sum_{m \in U_{CC}} y_i^m \leq ucu_i, \quad i \in HP$$

$$\sum_{(m,n,o) \in U_{PH}} y_j^{mno} + \sum_{n \in U_{HH}} y_j^n \leq uhu_j, \quad j \in CP$$

Donde los conjuntos de índices quedan definidos por:

$$\begin{aligned}
 U_{PP} &= \{(m, n, o) : (m = i) \vee (n = j), \\
 &\quad (m, n, o) \in E_p, i \in HP, j \in CP\} \\
 U_{CP} &= \{m : (m = i), m \in E_c, i \in HP\} \\
 U_{HP} &= \{n : (n = j), n \in E_h, j \in CP\} \\
 U_{PH} &= \{(m, n, o) : (n = j), (m, n, o) \in E_p, j \in CP\} \\
 U_{HH} &= \{n : (n \neq j), n \in E_h, j \in CP\} \\
 U_{PC} &= \{(m, n, o) : (m = i), (m, n, o) \in E_p, i \in HP\} \\
 U_{CC} &= \{m : (m \neq i), m \in E_c, i \in HP\}
 \end{aligned}$$

- Para determinar el caso del reemplazo de equipos con una reconexión que involucra dos cambios de corrientes.

$$\begin{aligned}
 \sum_{(m,n,o) \in D_{PP}} y_{ijk}^{mno} + \sum_{m \in D_{CP}} y_{ijk}^m + \sum_{n \in D_{HP}} y_{ijk}^n &\leq v_{ijk} \\
 i \in HP, j \in CP, k \in ST \\
 \sum_{(m,n,o) \in D_{PC}} y_i^{mno} + \sum_{n \in HP} y_i^n &\leq v_{cu_i}, i \in HP \quad (23) \\
 \sum_{(m,n,o) \in D_{PH}} y_j^{mno} + \sum_{m \in CP} y_j^m &\leq v_{hu_j}, j \in CP
 \end{aligned}$$

Donde los conjuntos de índices quedan definidos por:

$$\begin{aligned}
 D_{PP} &= \{(m, n, o) : (m \neq i) \wedge (n \neq j) \\
 &\quad, (m, n, o) \in E_p, i \in HP, j \in CP\} \\
 D_{CP} &= \{m : (m \neq i), m \in E_c, i \in HP\} \\
 D_{HP} &= \{n : (n \neq j), n \in E_h, j \in CP\} \\
 D_{PH} &= \{(m, n, o) : (n \neq j), (m, n, o) \in E_p, j \in CP\} \\
 D_{PC} &= \{(m, n, o) : (m \neq i), (m, n, o) \in E_p, i \in HP\}
 \end{aligned}$$

Restricciones para definir el número de instalaciones de nuevos equipos.

$$\begin{aligned}
 w_{ijk} \geq z_{ijk} - \sum_{(m,n,o) \in E_p} y_{ijk}^{mno} - \sum_{m \in E_c} y_{ijk}^m - \sum_{n \in E_h} y_{ijk}^n \\
 i \in HP, j \in CP, k \in ST
 \end{aligned}$$

Restricciones para definir el área requerida por encuentro térmico en el modelo P.

$$\begin{aligned}
 A_{i,j,k} \geq q_{i,j,k} \times \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \times \left(\frac{1}{0.5 \times (dt_{i,j,k}^{0.3275} + dt_{i,j,k+1}^{0.3275} + \Delta)} \right)^{3.05344} \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \\
 Acu_i \geq q_{cu_i} \times \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_{CU}} \right) \times \left(\frac{1}{0.5 \times ((t_{i,NOK+1} - TOUT_{CU})^{0.3275} + (TOUT_i - TIN_{CU})^{0.3275} + \Delta)} \right)^{3.05344} \\
 i \in HP \\
 Ahu_j \geq q_{hu_j} \times \left(\frac{1}{H_{HU}} + \frac{1}{H_j} \right) \times \left(\frac{1}{0.5 \times ((TIN_{HU} - TOUT_j)^{0.3275} + (TOUT_{HU} - t_{j,1})^{0.3275} + \Delta)} \right)^{3.05344} \\
 j \in CP \quad (28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_{cu_i} \geq z_{cu_i} - \sum_{(m,n,o) \in E_p} y_i^{mno} - \sum_{m \in E_c} y_i^m - \sum_{n \in E_h} y_i^n \\
 i \in HP \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_{hu_j} \geq z_{hu_j} - \sum_{(m,n,o) \in E_p} y_j^{mno} - \sum_{m \in E_c} y_j^m - \sum_{n \in E_h} y_j^n \\
 j \in CP
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{ijk}^N \geq \Phi w_{ijk} \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \\
 Acu_i^N \geq \Phi_{CU} w_{cu_i} \quad i \in HP \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Ahu_j^N \geq \Phi_{HU} w_{hu_j} \quad j \in CP \\
 A_{ijk}^N \leq \Psi w_{ijk} \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \\
 Acu_i^N \leq \Psi_{CU} w_{cu_i} \quad i \in HP \quad (26) \\
 Ahu_j^N \leq \Psi_{HU} w_{hu_j} \quad j \in CP
 \end{aligned}$$

Restricciones para definir el área de los equipos reemplazados por encuentro térmico.

$$\begin{aligned}
 A_{ijk}^R \leq \sum_{(m,n,o) \in E_p} y_{ijk}^{mno} \cdot A_{m,n,o}^E \\
 + \sum_{m \in E_c} y_{ijk}^m \cdot A_m^E + \sum_{n \in E_h} y_{ijk}^n \cdot A_n^E \\
 i \in HP, j \in CP, k \in ST
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Acu_i^R \leq \sum_{(m,n,o) \in E_p} y_i^{mno} \cdot Acu_{m,n,o}^E \quad (27) \\
 + \sum_{m \in E_c} y_i^m \cdot Acu_m^E + \sum_{n \in E_h} y_i^n \cdot Acu_n^E \\
 i \in HP
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Ahu_j^R \leq \sum_{(m,n,o) \in E_p} y_j^{mno} \cdot Ahu_{m,n,o}^E \\
 + \sum_{m \in E_c} y_j^m \cdot Ahu_m^E + \sum_{n \in E_h} y_j^n \cdot Ahu_n^E \\
 j \in CP
 \end{aligned}$$

Restricciones para definir el área nueva requerida por encuentro térmico.

$$\begin{aligned} A_{ijk}^N &\geq A_{ijk} - A_{ijk}^R \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \\ Acu_i^N &\geq Acu_i - Acu_i^R \quad i \in HP \\ Ahu_j^N &\geq Ahu_j - Ahu_j^R \quad j \in CP \end{aligned} \quad (29)$$

Condiciones de integridad.

$$\begin{aligned} y_{ijk}^{mno}, y_{ijk}^m, y_{ijk}^n, y_i^{mno}, y_i^m, y_i^n, y_j^{mno}, y_j^m, y_j^n &= 0, 1 \\ (m,n,o) \in E_P, m \in E_C, n \in E_h, \\ i \in HP, j \in CP, k \in ST \\ z_{ijk}, zcu_i, zhu_j &= 0, 1 \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \end{aligned} \quad (30)$$

Límites.

$$\begin{aligned} A_{ijk}^R, Acu_i^R, Ahu_j^R, A_{ijk}^N, Acu_i^N, Ahu_j^N, A_{ijk}, \\ Acu_i, Ahu_j &\geq 0 \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \\ dt_{ijk}, dt_{ijk+1}, dth_{uj}, dtcu_i &\geq EMAT \\ i \in HP, j \in CP, k \in ST \\ q_{ijk}, qcu_i, qhu_j &\geq 0 \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \\ TOUT_i \leq t_{i,k} \leq TIN_i \quad i \in HP, k \in ST \\ TIN_j \leq t_{j,k} \leq TOUT_j \quad j \in CP, k \in ST \\ 0 \leq u_{ijk}, ucu_i, uhu_j &\leq 1 \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \\ 0 \leq v_{ijk}, vcu_i, vhu_j &\leq 1 \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \\ 0 \leq w_{ijk}, wcu_i, whu_j &\leq 1 \quad i \in HP, j \in CP, k \in ST \end{aligned} \quad (31)$$

Observaciones generales del modelo P.

- i) Las primeras restricciones del modelo matemático, representadas por las expresiones (2) a la (20), corresponden al trabajo de Yee y Grossmann (1990) que se desarrolló para la síntesis de RIC.
- ii) Las restricciones planteadas por las expresiones (21) a la (27) y la (29), atienden a las características que definen el reemplazo de los equipos disponibles, de las cuales, las expresiones (21), (24) y (27) se deben a Ma y col. (2000), mientras que las expresiones (22), (23), (25), (26) y (29), así como la función objetivo (1), son propuestas en el presente trabajo.
- iii) Las restricciones presentadas en (28) definen al área requerida por encuentro térmico mediante el empleo de una aproximación para determinar la diferencia media logarítmica de temperaturas. Esta aproximación es tomada del trabajo de Ma y col. (2000) con el propósito de comparar los resultados reportados por Ma y col. (2000) con los aquí obtenidos.

- iv) Los costos de los equipos de transferencia de calor son comúnmente estimados por una función no lineal en términos del área del equipo, A , del tipo $CF + CV(A)^\beta$ (e.g., Guthrie, 1969), sin embargo en la función objetivo se emplea una aproximación lineal, $CF + CV A$. Esta aproximación lineal se puede obtener para un intervalo de valores representativos del área, tomando en cuenta los valores de las áreas de los equipos disponibles en operación.
- v) Las restricciones en (21) condicionan el posible reemplazo de un equipo disponible, definido por los superíndices de las variables discretas, y , a una sola posición de la red, definida por los subíndices de las mismas variables. Mientras que en las restricciones en (22) y en (23) se determina si el reemplazo de los equipos disponibles involucran uno o dos cambios en la reconexión del equipo empleado. Lo anterior se realiza mediante el conteo de las variables discretas que definen al reemplazo, y , tales que tengan un valor igual a uno y que cumplan las condiciones descritas en estas restricciones.
- vi) Al considerar en la función objetivo (1) los costos para diferentes casos de reconexión de los equipos disponibles, según se definen en (22) y (23), el modelo matemático puede conducir a soluciones factibles que involucren menores cambios en la reconexión, lo que genera beneficios técnicos, además de los económicos, tales como: disminuir el número de modificaciones en el sistema de tuberías de proceso y de servicios, y con ello, puede ser requerido un número menor de movimientos de equipos. Por otra parte, debe notarse que las variables que definen los diferentes casos de reemplazo, u_{ijk} , ucu_i , uhu_j , v_{ijk} , vcu_i y vhu_j , son definidas como variables continuas acotadas entre cero y uno, con el propósito de no incrementar innecesariamente el problema combinatorio involucrado en el modelo P.
- vii) Las expresiones en (24) toman en cuenta el requerimiento de un equipo de transferencia de calor en una posición particular de la red, esto cuando las variables binarias z , toman valores igual a uno; y también consideran el reemplazo de los equipos disponibles, cuando las variables binarias toman valores igual a uno. Si es requerido un equipo de transferencia y no se reemplaza alguno disponible, la correspondiente variable toma

el valor de la unidad. Estas restricciones relacionan *de forma directa* la condición de requerir la instalación de un equipo nuevo sólo si existe un encuentro térmico en el que no sea reemplazado algún equipo disponible, sin embargo, estas expresiones no contemplan la posibilidad de que el área de los equipos reemplazados sea insuficiente para atender el encuentro térmico involucrado, como en la mayoría de los trabajos que atienden a la reconfiguración de RIC mediante técnicas de optimización. Por ende, es que se propone el empleo adicional de las expresiones en (25) y (26) que relacionan de forma indirecta la definición de una instalación nueva en términos del área nueva requerida para un encuentro térmico particular. Entonces, podría parecer redundante el empleo de las expresiones en (24), sin embargo, se ha observado en la práctica que la presencia de dichas restricciones en el modelo matemático conduce a encontrar en un número menor de iteraciones las mejores soluciones que la metodología puede generar para el caso de estudio abordado, mismas que se describen en la quinta sección de este trabajo. En la ausencia de las restricciones en (24) se ha observado que es requerido un mayor número de iteraciones para encontrar las citadas soluciones. Además, el empleo de las expresiones en (24) permite definir como variables continuas, acotadas entre cero y uno, a las variables que definen la instalación de nuevos equipos, w_{ijk} , wcu_i y whu_j , con el propósito de no incrementar innecesariamente el problema combinatorio involucrado en el modelo P.

viii) En la mayoría de los trabajos que atienden la reconfiguración de RIC mediante técnicas de optimización se pueden involucrar resultados donde aparecen instalaciones de equipos nuevos con cantidades de área de transferencia poco considerables, debido a que en los modelos matemáticos no se establece una penalización económica adecuada para regular todos los costos fijos realmente involucrados. Esta situación es importante, ya que tales soluciones pueden estar significativamente alejadas de algunas prácticas de diseño (e.g., Kern, 1950, Guthrie, 1969; Taborek, 1983; TEMA, 1999; Peters y Thimerhaus, 2003), por razones técnicas y económicas. Las expresiones en (25) y (26) contribuyen a regular la cantidad del área nueva para los encuentros térmicos

que así lo requirieran.

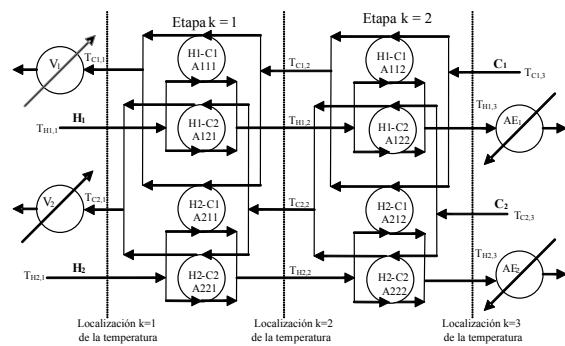


Fig. 1: Superestructura de Yee y Grossmann (1990) de dos etapas, para dos corrientes calientes, H1, H2, y dos corrientes frías, C1, C2.

ix) Es importante destacar que las expresiones en (30) son los únicos elementos no lineales del modelo matemático P.

4. Propuesta metodológica para la solución del modelo P

La obtención de soluciones óptimas para la síntesis de nuevas RIC bajo un esquema de diseño simultáneo es una tarea computacionalmente compleja (e.g., Furman y Sahinidis, 2001). La solución rigurosa del problema de reconfiguración es aún más difícil debido a que los modelos matemáticos asociados involucran un número de variables binarias considerablemente mayor al número de dichas variables en modelos para la síntesis. La cantidad de variables de tipo binario que participan en un modelo matemático de reconfiguración origina problemas combinatorios que, aún para problemas que incluyen un número relativamente pequeño de equipos y corrientes de proceso, son muy difíciles de abordar con las herramientas matemáticas y el software disponibles hoy en día. Adicionalmente, los modelos matemáticos definidos para la síntesis y reconfiguración simultánea de RIC incorporan funciones no convexas, como las incluidas en (28), que complican mucho la determinación de soluciones óptimas globales.

Antes de presentar la estrategia heurística de solución que en este trabajo se propone para el modelo P, se considera oportuno examinar con más detalle las dificultades que se deben afrontar para resolver este modelo con las técnicas de optimización MINLP disponibles. En particular, se comentará con relación a la técnica de aproximaciones exteriores OA, desarrollada inicialmente por Durán y Grossmann (1986 a y b)

para problemas MINLP convexos. Dicha técnica fue extendida posteriormente por Kocis y Grossmann (1987), OA/ER, quienes propusieron estrategias de relajación de igualdades para intentar la solución de problemas MINLP no convexos. El enfoque de solución de aproximaciones exteriores fue enriquecido también por Viswanathan y Grossmann (1990) con el uso de funciones de penalización OA/ER/AP, que relajan el problema maestro de las aproximaciones exteriores con variables de holgura, en un intento por evitar que las linearizaciones de funciones no convexas terminen eliminando soluciones factibles en problemas MINLP no convexos. Esta última técnica está implementada en el software DICOPT++, disponible en el ambiente de modelado GAMS (Brooke *y col.*, 1998).

Para garantizar optimalidad global, el algoritmo de aproximaciones exteriores OA/ER/AP requiere que el problema MINLP a resolver esté sujeto a las siguientes condiciones esenciales: (i) las variables binarias del problema deben participar de manera lineal en el modelo; (ii) Las funciones donde participan variables continuas deben contar con derivadas parciales continuas; (iii) La función objetivo y las restricciones del modelo deben cumplir con ciertas propiedades de convexidad (Viswanathan y Grossmann, 1990). La estrategia general de los algoritmos de aproximaciones exteriores consiste en resolver una secuencia alternativa de dos clases de subproblemas, una de tipo no lineal, NLP, y otra de tipo mixto-entero lineal, MILP, según se describe a continuación. Una solución de un subproblema NLP provee una cota superior para la solución del problema de minimización MINLP, mientras que la solución de un subproblema MILP entrega una cota inferior rigurosa en el caso de que el problema MINLP que se resuelva sea convexo. En cada iteración, para definir el problema NLP a resolver, la parte binaria del problema MINLP se fija en un punto particular del espacio binario. Una solución óptima del subproblema NLP determina un punto factible en el espacio continuo que es utilizado para generar aproximaciones lineales de las funciones no lineales presentes en el problema original; dichas linearizaciones se agregan al conjunto de restricciones que definen al problema maestro MILP. Para evitar el evaluar más de una vez un punto particular del espacio discreto, se adiciona también un corte entero en cada iteración. Todas las aproximaciones lineales del problema original generadas hasta cierta iteración, junto con sus respectivos cortes enteros, se emplean para definir el subproblema de subestimación MILP. La parte binaria de una solución

óptima que se obtiene para el subproblema MILP en una iteración define un nuevo punto en el espacio discreto que será empleado para resolver un nuevo subproblema NLP. De este modo se origina un proceso iterativo hasta que el valor de la cota inferior, dada por un subproblema MILP, supera al valor de la mejor cota superior obtenida de los subproblemas NLP. (e.g. Duran y Grossmann, 1986; Kocis y Grossmann, 1987; Viswanathan y Grossmann, 1990). Si las citadas condiciones de convexidad del modelo que se resuelve son satisfechas, el subproblema MILP subestima rigurosamente en cada iteración el valor de la función objetivo, y sobreestima la región factible del problema MINLP. Entonces, a medida que avanzan las iteraciones y se agregan linearizaciones, la solución del subproblema MILP se acerca más a la solución del problema MINLP. En resumen, para la solución de problemas MINLP convexos sobre un espacio de solución discreto finito, el proceso iterativo de aproximaciones exteriores garantiza la convergencia a una solución óptima global en un número finito de iteraciones. Hasta cierto tamaño de los modelos MINLP convexos, la práctica reportada en la literatura ha demostrado que estos algoritmos pueden ser eficientes para manejar las dificultades de enumeración involucradas en el proceso de optimización.

A pesar de las ventajas y propiedades mencionadas, los algoritmos basados en aproximaciones exteriores tienen una limitación práctica en la cantidad de variables binarias que participan en los modelos que se resuelven, esto fundamentalmente debido a los problemas combinatorios implicados para resolver los subproblemas MILP, y debido a que el tamaño que los subproblemas MILP crece rápidamente a niveles intratables cuando la solución del problema requiere un número grande de iteraciones. Adicionalmente, estos algoritmos tienen complicaciones inherentes a la presencia de características no convexas en los modelos MINLP. Una dificultad importante, debida a las características no convexas de los modelos, es que las soluciones de los subproblemas NLP pueden quedar atrapadas en soluciones óptimas locales. Otra dificultad relevante consiste en que las aproximaciones lineales que se van incorporando a los subproblemas MILP pueden originar cortes indeseados a la región factible en el espacio discreto, lo que conlleva a la posibilidad de eliminación de soluciones óptimas globales del problema MINLP. En otras palabras, en ausencia de las propiedades de convexidad referidas, el proceso iterativo de solución de los algoritmos de aproximaciones exteriores no garantiza la conver-

gencia a soluciones óptimas globales, ni locales del problema MINLP. Al utilizar un código como DICOPT++ para abordar la solución de un MINLP no convexo, lo más que podría aseverarse es entonces que la solución que reporta dicho código corresponde a un punto de Karush-Kuhn-Tucker del problema NLP que resulta de relajar la parte discreta del MINLP no convexo, o corresponde a un punto de Karush-Kuhn-Tucker del NLP asociado a un vector binario particular generado por la solución de un problema maestro MILP durante la ejecución de la técnica de aproximaciones exteriores.

Teniendo en cuenta las anteriores complicaciones y el hecho de que el modelo P es un modelo MINLP no convexo que puede involucrar un número importante de variables binarias, se presenta a continuación la descripción de una metodología heurística en tres etapas que busca determinar un conjunto de buenas soluciones alternativas para el problema de reconfiguración.

Primera etapa

En esta etapa se considera al modelo matemático P (CAT^l, \hat{Y}) de tipo MILP que se obtiene a partir del modelo original P, atendiendo a dos simplificaciones. (i) La primera simplificación es el empleo del parámetro CAT^l (por sus siglas en inglés de “Constant Approach Temperature”), propuesto por Ma y col. (2000), para sustituirlo en lugar de todas las fuerzas motrices para la transferencia de calor que participan en las expresiones en (30) para una iteración particular del método propuesto, l , dando lugar con ello al uso de las expresiones en (32) en lugar de las expresiones en (28). Lo anterior conduce a reducir el modelo P de tipo MINLP a uno P (CAT^l, \hat{Y}) de tipo MILP más simple de resolver. (ii) La segunda simplificación consiste en relajar todas las variables binarias que definen el reemplazo de los equipos disponibles, Y , a un vector de variables continuas acotadas entre uno y cero, \hat{Y} , con el propósito de disminuir significativamente el problema combinatorio que se enfrenta en el problema de reconfiguración a un grado similar al involucrado en el problema de síntesis de nuevas RIC. Una vez inicializado o actualizado el parámetro CAT^l se resuelve el modelo matemático P (CAT^l, \hat{Y}) de tipo MILP, mediante el empleo de una variante del algoritmo de ramificación y corte (e.g., Stubbs y Mehrotra, 1999) que resuelve una serie de subproblemas lineales, LP; tal algoritmo está disponible en el programa CPLEX dentro del sistema de modelado GAMS (Brooke y col., 1998). Como producto de esta etapa se desea definir al vector de variables binarias que definen la topología de la RIC, Z^l , que corresponde a la solución del modelo P (CAT^l, \hat{Y})

para un valor particular de CAT .

$$\begin{aligned} A_{ijk} &\geq q_{ijk} \times \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \times \left(\frac{1}{CAT} \right) \quad (i, j, k) \in M_p \\ A_i &\geq q_{cu_i} \times \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_{CU}} \right) \times \left(\frac{1}{CAT} \right) \quad i \in M_c \quad (32) \\ A_j &\geq q_{hu_j} \times \left(\frac{1}{H_{HU}} + \frac{1}{H_j} \right) \times \left(\frac{1}{CAT} \right) \quad j \in M_h \end{aligned}$$

Segunda etapa

En esta etapa se considera al modelo matemático P(Z_F^l), de tipo MINLP no convexo, que se obtiene a partir del modelo P al fijar todas las variables que definen la topología de la red, empleando el vector Z_F^l , cuyos valores dependen de la topología obtenida en la última solución de la *primera etapa*, Z^l . Sin otra simplificación adicional, en esta etapa se procede a resolver el modelo matemático MINLP no convexo P(Z_F^l). Para esta etapa se emplea el algoritmo de aproximaciones exteriores con relajación de igualdades y aumento de penalizaciones, OA/ER/AP (Viswanathan y Grossmann, 1990); tal algoritmo está disponible en el programa DICOPT2x-c dentro del sistema de modelado GAMS (Brooke y col., 1998). La presencia de funciones no convexas en el modelo P(Z_F^l) impide el garantizar que la solución generada en esta etapa sea una solución óptima. Por lo anteriormente expuesto, una solución obtenida en esta etapa representa una solución factible para los modelos P(Z_F^l) y P. Es posible aseverar que una solución obtenida en esta etapa corresponde a un punto de Karush-Kuhn-Tucker asociado al NLP que se obtiene al fijar la parte binaria del modelo P con la topología dada por Z_F^l ; estas simplificaciones permiten hacer más tratable el problema de reconfiguración, y facilitan el desarrollo de buenos diseños alternativos con el empleo de técnicas de optimización disponibles para modelos MILP y MINLP. Para terminar esta segunda etapa, se calcula el promedio de todas las diferencias de temperaturas que participan en los encuentros térmicos de la solución de la *etapa*, AAT^l (por sus siglas en inglés de “Average Approach Temperature”), para una iteración particular, l , del método aquí propuesto.

Tercera etapa

Se evalúan los resultados obtenidos y las condiciones de paro, por cada iteración de las dos anteriores etapas, observando los dos objetivos siguientes: (i) determinar cuál de las soluciones generadas hasta el momento presenta el menor costo total anualizado, c_{TA}^* , y (ii) evaluar las dos condiciones para establecer la terminación de los procedimientos para la generación de diseños alternativos para la reconfiguración. Una condición de

$$AAT^l = \frac{\sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} z_{ijk} dt_{ijk} + \sum_{i \in HP} zcu_i dtcu_i + \sum_{j \in CP} zhu_j dthu_j}{\sum_{i \in HP} \sum_{j \in CP} \sum_{k \in ST} z_{ijk} + \sum_{i \in HP} zcu_i + \sum_{j \in CP} zhu_j} \quad (33)$$

pero es que el número de iteraciones, l , exceda a un valor preestablecido, σ . Otra de las condiciones de paro consiste en que la diferencia entre los valores de CAT^l y AAT^l sea menor a un valor preestablecido, λ , debido a que se utiliza el valor de AAT^l para actualizar el nuevo valor de CAT que será empleado en una siguiente iteración, CAT^{l+1} , y si esta última condición de paro se satisface implica que los valores de CAT^l y CAT^{l+1} serían muy similares, originando que en la nueva iteración, $l+1$, se obtengan resultados muy parecidos, o incluso idénticos, a los obtenidos en la última iteración, l . Lo anterior implica que se ha consumido todo el potencial de cambio del método propuesto para continuar la generación de soluciones distintas.

El método que aquí se propone sirve para obtener buenas soluciones alternativas para la reconfiguración de RIC bajo un esquema de diseño simultáneo. A continuación se describe este método con mayor detalle, ver Fig. 2.

Método heurístico para la solución del Modelo P

Paso 1. Inicialización.

Con base en la información requerida en la Sección 2, se recaudan los datos necesarios para definir a los parámetros del modelo P. En cuanto al valor inicial para el parámetro AAT^0 , se hace una estimación a partir de la información disponible de la RIC en operación, mediante el cálculo del promedio de las diferencias de temperaturas que participan en los encuentros térmicos de la RIC. Seguidamente, se inicializa con un valor grande para el parámetro c_{TA}^* , que representa el costo total anualizado de la mejor solución encontrada hasta el momento, y que es descrita por el vector S^* . Para concluir este paso, se inicializa con cero un contador de iteración, $l = 0$.

Paso 2. Actualización de parámetros.

Se incrementa en una unidad al contador de iteración, $l = l + 1$. Además, el parámetro CAT^l se actualiza con el último valor calculado en el Paso 5 del promedio de todas las diferencias de temperaturas, AAT^{l-1} ; o bien, si se trata de la primera iteración se emplea el valor de AAT^0 que se estimó en el Paso 1.

Paso 3. Optimización del modelo $P(CAT^l, \hat{Y})$ de tipo MILP.

Para una iteración l , se resuelve el modelo matemático $P(CAT^l, \hat{Y})$. De esta etapa se obtiene una solución óptima en relación a una topología tentativa para la red, Z^l .

Paso 4. Optimización del modelo $P(Z_F^l)$ de tipo MINLP.

Para una iteración l , se asigna $Z_F^l = Z^l$ y se resuelve el modelo matemático $P(Z_F^l)$. En esta se busca determinar una buena solución para el problema de reconfiguración, con un costo total anualizado c_{TA}^l . La solución obtenida queda capturada en un vector de solución S^l que contiene los valores de todas las variables del modelo P.

Paso 5. Cálculo de AAT^l .

Con base a la solución obtenida en el Paso 4 para la iteración l , se calcula el promedio de todas las diferencias de temperaturas que participan en todos los encuentros térmicos, z_{ijk} , zcu_i , zhu_j , dt_{ijk} , $dteu_i$ y $dthu_j$ mediante la expresión (33).

Paso 6. Evaluación de la solución alternativa.

Sea c_{TA}^* el menor costo total anualizado encontrado durante el desarrollo de todas las iteraciones realizadas que está asociado a una buena solución alternativa para el modelo P, que está descrita por el vector S^* . Si $c_{TA}^l < c_{TA}^*$ se sustituye el valor de c_{TA}^* con el valor de c_{TA}^l , y se sustituyen los elementos del vector S^* con los elementos de S^l , de lo contrario se continua con el Paso 7.

Paso 7. Evaluación de las condiciones de paro.

Este algoritmo reanuda en el Paso 2 hasta que: (i) los valores de AAT^{l-1} y AAT^l sean muy próximos en un rango preestablecido, $|AAT^{l-1} - AAT^l| \leq \lambda$; (ii) sean ejecutadas hasta una cantidad de iteraciones preestablecidas, σ . Si es cumplida alguna de las dos anteriores condiciones se concluye con el Paso 8.

Paso 8. Conclusión.

La mejor solución factible que se obtiene del algoritmo propuesto, correspondiente a cierto valor inicial AAT^0 , queda descrita por el vector S^* , que origina un costo total anualizado con un valor igual a c_{TA}^* .

Algunas de las características más importantes del método heurístico aquí propuesto se describen a continuación.

- i) El método propuesto permite reducir en cierta medida los problemas combinatorios y las características no convexas que son involucradas en la solución del modelo P. El modelo P es resuelto mediante iteraciones que involucran resolver modelos menos complejos, el modelo $P(CAT^l, \hat{Y})$ de tipo MILP y el modelo $P(Z_F^l)$ de tipo MINLP con valores previamente fijados para las variables que definen la topología de la RIC.
- ii) El método es planteado para desarrollar más de una buena solución y seleccionar la más económica. Sin embargo, es posible llevar registro de un cierto número de las mejores soluciones para que al final el diseñador pueda seleccionar una solución con base a otros criterios además de los económicos.
- iii) El método guarda una dependencia considerable del manejo del parámetro CAT. Se ha observado que para distintos valores de inicialización, AAT^0 , se pueden obtener distintos resultados finales. Esta situación es ventajosa, debido a que con la variación de inicialización de un sólo parámetro es posible explorar distintos conjuntos de diseños factibles para la reconfiguración. Por ejemplo, una vez agotado el potencial de cambio del método, $|AAT^{l-1} - AAT^l| < \lambda$, que corresponde para un valor particular de AAT^0 se puede reanudar fácilmente el desarrollo de nuevas soluciones con tan sólo proponer otro nuevo valor para AAT^0 y así reiniciar la metodología. Lo anterior hace más robusto al método para evitar la posibilidad de quedarse atrapado en un conjunto limitado de soluciones factibles.
- iv) Se ha observado que la segunda etapa del método, MINLP, enfrenta mayores dificultades en los procedimientos de optimización que la primera etapa, MILP. Por lo anterior, no es extraño encontrar que para un arreglo topológico, Z^l , obtenido en la

primera etapa, no sea posible desarrollar una solución factible para el modelo $P(Z_F^l)$ en la segunda etapa, para una iteración particular, l . Sin embargo, con base a la mejor solución no entera generada en la segunda etapa se estima un nuevo valor de AAT mediante la expresión en (33). Con el nuevo valor de AAT se puede proseguir la investigación de nuevas soluciones reanudando en la primera etapa del método de solución propuesto.

- v) En este trabajo se hace la suposición de mezclado isotérmico para simplificar el modelo matemático y su solución. Sin embargo, esta suposición puede excluir soluciones factibles que podrían exhibir menores costos totales anualizados. Una estrategia para enfrentar parcialmente esta dificultad es propuesta por Yee y Grossmann (1990) para la síntesis de RIC. La anterior estrategia podría ser extendida a la reconfiguración como se describe a continuación. Para alguna de las soluciones alternativas de reconfiguración, se determina la presencia de subdivisiones de corrientes. Si hay la presencia de subdivisiones, se podría formular un subproblema de optimización, donde se fija el arreglo de la RIC y el reemplazo de los equipos. De este modo, se tendrían fijos y determinados los valores de todas las variables discretas que participan en el problema original y el subproblema resultante sería de tipo NLP. La formulación y la solución de este subproblema NLP sería para determinar los flujos en las divisiones de corrientes de proceso sin la condición de mezclado isotérmico, además, se esperaría obtener el valor del resto de las variables de diseño de tipo continuo mediante técnicas de programación matemática para problemas de tipo NLP. Por otra parte, como ya se mencionó en la sección de Introducción, Yee y Grossmann (1991) proponen un método de reconfiguración que además de considerar el mezclado no isotérmico, también considera el mezclado entre distintas corrientes de proceso y con ello, en forma más general, toma en cuenta diversas interconexiones entre los equipos de transferencia de calor; sin embargo, en la formulación del modelo matemático que proponen Yee y Grossmann (1991) se involucran términos bilineales.

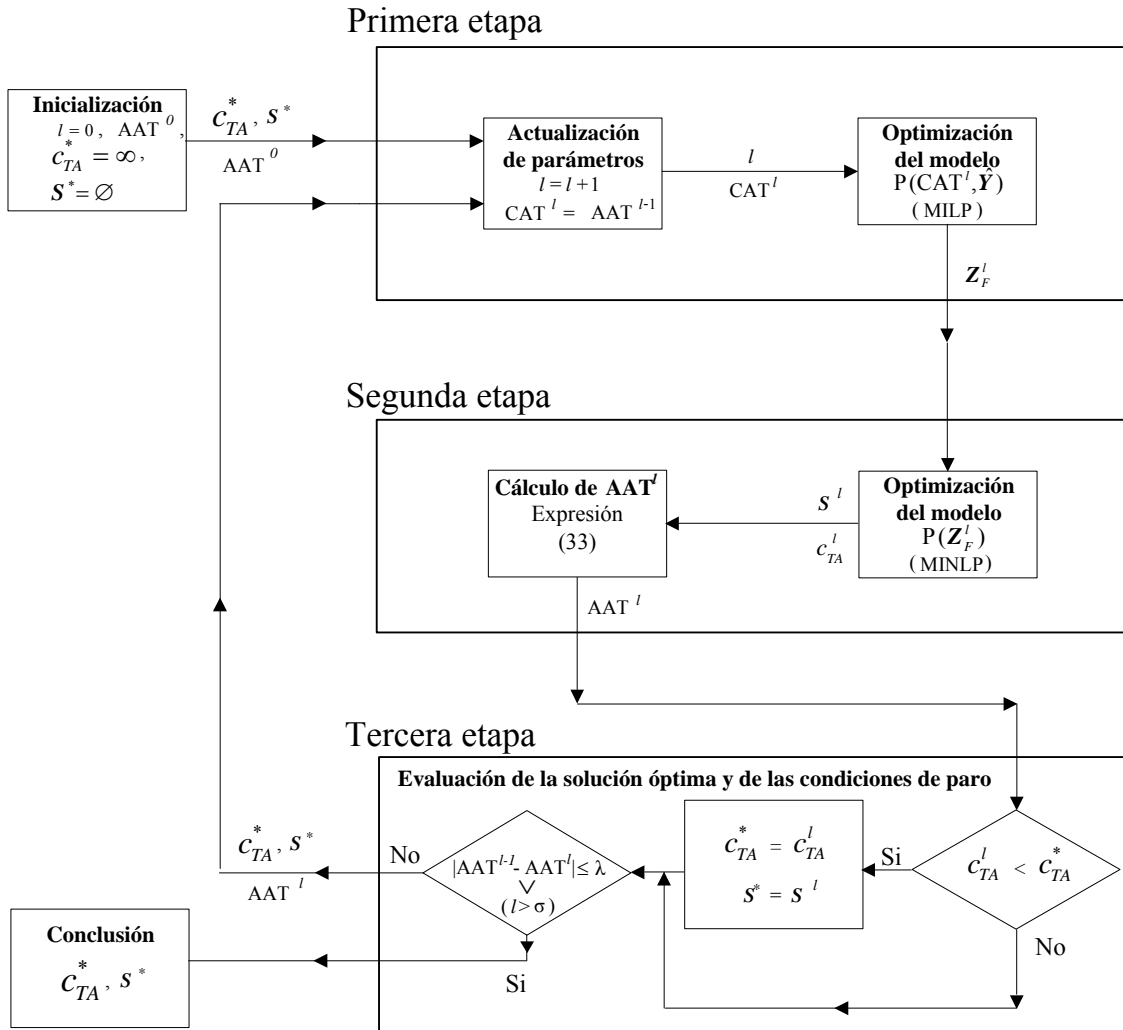


Fig. 2: Algoritmo para la obtención de buenas soluciones alternativas en la reconfiguración de RIC, bajo un esquema de diseño simultáneo.

5. Casos de estudio

A diferencia de trabajos previos, aquí se toman en cuenta: (i) los cargos fijos al incrementar la cantidad de área de transferencia que es proporcionada por un equipo disponible; (ii) los distintos casos para la reconexión de los equipos; (iii) el generar buenas soluciones alternativas antes de seleccionar la más económica y (iv) la obtención de estas soluciones alternativas de reconfiguración se hace con el empleo de un modelo matemático que toma en cuenta, de forma simultánea, a todos los elementos de decisión. En esta sección se considera el problema de reconfiguración de la RIC que se presenta en el diagrama de malla de la Fig. 3. En esta RIC son requeridos 360 kW de servicios

de calentamiento y 800 kW de servicios de enfriamiento. Soluciones a este problema de reconfiguración han sido publicadas por: Yee y Grossmann (1987), Ciric y Floudas (1990) y Ma y col. (2000). Cada uno de los tres anteriores trabajos emplea distintas formas de evaluar los costos y sólo en el último trabajo se atiende al citado problema bajo un enfoque de diseño simultáneo. Por lo tanto, se decidió examinar la solución reportada por Ma y col. (2000), que se muestra en la Fig. 4, para realizar una comparación adecuada de los resultados aquí obtenidos. En la Fig. 5 se muestra el significado de los símbolos gráficos aquí utilizados para la reconfiguración. La información de costos que emplean Ma y col. (2000) se incluye en las Tablas 1 y 2 junto con los datos de las corrientes

Tabla 1 Datos de las corrientes de la RIC a reconfigurar.

Corriente	T^{in} (K)	T^{out} (K)	F (kW/K)	H (kW/K m ²)	Costo (\$/kW · año)
H1	500	350	10	1.6	—
H2	450	350	12	1.6	—
H3	400	320	8	1.6	—
C1	300	480	9	1.6	—
C2	340	420	10	1.6	—
C3	340	400	8	1.6	—
Servicios de calentamiento	540	540	—	1.6	80
Servicios de enfriamiento	300	320	—	1.6	80

Tabla 2. Datos económicos para los costos de inversión.

Costos de inversión				
Área adicional en equipos disponibles (\$/m ² ·año)	Área para equipos nuevos (\$/m ² ·año)	Costo fijo de equipos nuevos (\$/equipo·año)	Reemplazo con un cambio de corriente (\$/equipo·año)	Reemplazo con dos cambios de corrientes (\$/equipo·año)
300·A	300·A	4000	400	800

de proceso involucradas en el problema de estudio, Fig. 3. Tomando en cuenta la anterior información de costos, el diseño base del caso de estudio tiene un costo de operación anualizado de \$44,800 dólares. Para realizar una comparación razonable de los resultados presentados en la Fig. 4 y los resultados obtenidos en el presente trabajo es necesario analizar el problema bajo dos condiciones distintas:

- Caso A) Realizando la simplificación de no considerar los cargos fijos que involucra la adición de nueva área de transferencia a los encuentros térmicos atendidos por equipos disponibles, tal y como Ma y col. (2000) lo realizan.
- Caso B) Considerando los anteriores cargos fijos, esto es, sin realizar simplificaciones adicionales a las descritas en la Sección 2.

El escenario que origina el Caso A permite hacer una comparación justa respecto a las condiciones empleadas en la obtención de la solución mostrada en la Fig. 4, mientras que el escenario concerniente para el Caso B origina condiciones muy distintas. Es importante señalar que Ma y col. (2000) no consideran los costos involucrados por distintos tipos de reconexión en su modelo matemático, ni tampoco en su metodología, sin embargo Ma y col. (2000) hacen contabilidad de tales costos en su solución, descrita en la Fig. 4. Lo anterior permite y justifica la comparación de resultados bajo la simplificación que es prevista en el Caso A.

La metodología de solución propuesta considera un valor de inicialización para AAT^0 y un

número máximo de iteraciones del método, σ , ver la Fig. 2. En cada iteración, l , se tiene el objetivo de generar un diseño factible alternativo como solución al problema de reconfiguración, si la topología asociada para AAT^l permite obtener una solución factible. Para el caso de estudio que es atendido en la presente sección se consideran 80 iteraciones, $\sigma = 80$, para cada valor de AAT^0 seleccionado, además se considera $\lambda = 0.01$ para la condición de paro $|AAT^{l-1} - AAT^l| \leq \lambda$. Tomando en cuenta la simplificación que es prevista en el Caso A, se reportan los resultados obtenidos para $AAT^0 = 20K$. Para el escenario previsto en el Caso B se reportan los resultados obtenidos para tres distintos valores de AAT^0 , 10 K, 20 K y 30 K.

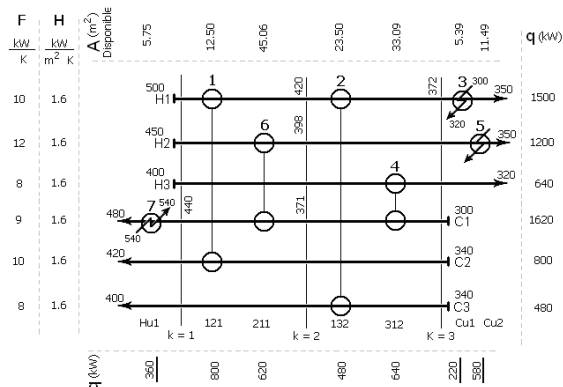


Fig. 3: Esquema del problema de reconfiguración propuesto originalmente por Yee y Grossmann (1987), con un costo de operación anualizado de \$44,800.00 dólares.

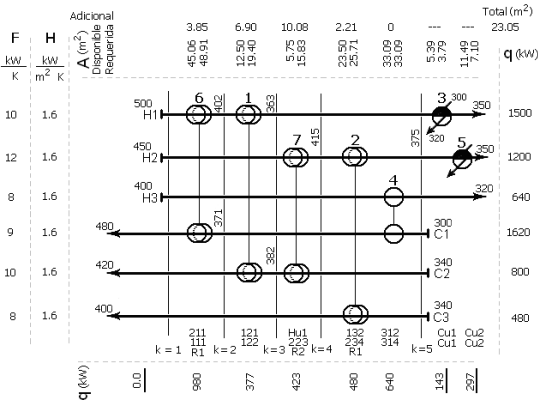


Fig. 4: Solución de Ma y col. (2000) para el Caso A, con un costo total anualizado de \$17,300 dólares.

	Reemplado con idéntica área	Reemplado con menor área	Equipo nuevo	Reemplado con mayor área
Equipo de enfriamiento				
Equipo de calentamiento				
Equipo de proceso				

Fig. 5: Nomenclatura de los símbolos gráficos empleados en los diagramas de malla para las soluciones de reconfiguración de RIC.

El problema de estudio se codificó en el sistema comercial de modelado GAMS (Brooke y col., 1998) y para su solución se involucran 376 variables continuas y 1806 variables discretas. La ejecución de ochenta iteraciones del método requiere un promedio de 340 segundos, en una computadora Pentium IV a 2.0 MHz, con 1 GB de memoria RAM, con un disco duro tipo IDE-ATA y bajo el sistema operativo Windows XP.

5.1. Resultados para el Caso A.

Para el Caso A, el diseño propuesto por Ma y col. (2000) tiene un costo total anualizado de \$17,300 dólares, Fig. 4, mientras que el mejor diseño obtenido por la metodología aquí propuesta, Fig. 6, tiene un costo de \$16,380 dólares. En la Tabla 3 se describen y se comparan distintos conceptos económicos que definen los costos de operación y de inversión, donde los conceptos considerados son los siguientes: (i) los costos de servicios de enfriamiento y calentamiento; (ii) los costos variables de inversión dependientes del área nueva instalada; (iii) los costos fijos de inversión relacionados

con el número de equipos nuevos que son instalados en forma independiente; (iv) los costos fijos de inversión relacionados con el número de cambios de reconexión de los equipos reemplazados; y (v) el costo total anualizado de cada diseño. A continuación se hacen las siguientes observaciones de los resultados mostrados en la Tabla 3 y las figs. 4 y 6 para el Caso A:

- i) Tanto el diseño presentado por Ma y col. (2000), como el diseño desarrollado en este trabajo logran una máxima recuperación de calor, requiriéndose solamente servicios de enfriamiento por 440 kW, con un costo asociado de \$8,800 dólares. Por ende, en ambos diseños se logra un ahorro en los costos anualizados de operación de \$40,000 dólares, el cual representa el ochenta y tres por ciento de disminución de los costos de operación originales.
- ii) El diseño mostrado en la Fig. 4 requiere de una inversión de \$8,500 dólares, mientras que en el diseño aquí propuesto se requiere de una inversión de \$7,800 dólares. Tomando en cuenta el ahorro alcanzado en el costo anualizado de operación, se determina que el periodo de recuperación de la inversión es de 0.21 años para el diseño mostrado en la Fig. 4, mientras que para el diseño aquí propuesto se requiere de un periodo de recuperación de 0.19 años.
- iii) El diseño mostrado en la Fig. 4 requiere de 23.05 m² de nueva área mientras que en el diseño aquí propuesto, Fig. 6, se requiere de una menor cantidad de área, 18.55 m².
- iv) El diseño que se presenta en la Fig. 4 hace un menor aprovechamiento del área en operación al subemplazar los equipos disponibles, tal como es el caso de los equipos marcados con los números 3 y 5 en la Fig. 4. En el mejor diseño generado por la metodología aquí propuesta, Fig. 6, se hace un mejor uso del área disponible.
- v) El diseño descrito en la Fig. 4 requiere de cuatro cambios de reconexión para el reemplazo de los equipos disponibles: dos cambios simples (indicados con la abreviatura R1) para los equipos 6 y 2, y un cambio doble (indicados con la abreviatura R2) para el equipo 7. En el diseño aquí propuesto, Fig. 6, se requiere de tres cambios simples en la reconexión de los equipos disponibles señalados con los números 2, 5 y 6.

Tabla 3. Comparación general de los resultados económicos para el diseño de Ma y col. (2000) y para el mejor diseño aquí generado, bajo la simplificación prevista para el Caso A.

	Costos de servicios			Costos de inversión anualizado			Total (\$/año)	
	Servicios de enfriamiento	Servicios de calentamiento	Subtotal (\$/año)	Área nueva (m ²)	Costo fijo de equipos nuevos	Reemplazo con un solo cambio de re-conexión		Reemplazo con dos cambios de re-conexión
Precio	20 (\$/kW año)	80 (\$/kW año)	300 (\$/m ²)	0 (\$/equipo)	400 (\$/equipo)	800 (\$/equipo)		
Ma y col. (2000) Fig.4	Can-tidad (kW) Im- porte (\$/año)	440 8,800	0 0	23 6,900	0 (\$)	2 800	1 800	8,500 17,300
Este tra- bajo bajo Caso A, Fig.6	Can- tidad (kW) Im- porte (\$/año)	440 8,800	0 0	18.6 5,580	0 (\$)	3 1,200	1 800	7,580 16,380

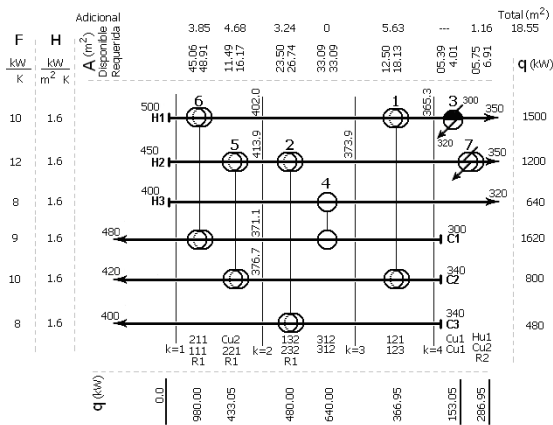


Fig. 6. Solución de la metodología propuesta para el Caso A, con un costo total anualizado de \$16,380 dólares.

vi) Ambos diseños requieren incrementar el área de varios equipos disponibles en cantidades poco significativas. Este resultado se obtiene debido a que no son considerados los cargos fijos de inversión involucrados. Es evidente que, para propósitos prácticos, ambos diseños son poco convenientes tomando en cuenta la fabricación, la instalación y la operación de múltiples equipos y con áreas de tamaños poco significativos.

5.2. Resultados para el Caso B.

En el Caso B se consideran los cargos fijos involucrados en la instalación de los equipos nuevos que complementan el área disponible de los equipos

reemplazados. Bajo las condiciones del Caso B se explota el potencial de la metodología de reconfiguración desarrollada en este trabajo. La Fig. 7 corresponde al diseño más económico obtenido con un costo total anualizado de \$24,730 dólares. Este diseño se obtuvo empleando el valor de 10 y 20 K para AAT°. Adicionalmente se reportan otros dos diseños alternativos en las figs. 8 y 9. El diseño de reconfiguración de la Figura 8 tiene con un costo total anualizado de \$25,090 dólares, y fue obtenido con un valor de 30 K para AAT°; mientras que el diseño en la Fig. 9 tiene un costo total anualizado de \$25,530 dólares, obtenido con 10 K para AAT°. La Tabla 4 presenta un cuadro comparativo de los diseños mostrados en las figs. 7, 8 y 9. Adicionalmente, en la Tabla 5 se enlistan los costos de los veinte mejores diseños de reconfiguración obtenidos con la ejecución de la metodología propuesta a partir de los tres valores de inicialización utilizados para AAT°; en dicha tabla se subrayan los costos asociados a los tres mejores diseños. En la Tabla 6 se presenta la evolución del costo total anualizado asociado a las mejores soluciones obtenidas para el Caso B. Dicha tabla muestra que los mejores diseños se obtuvieron en las iteraciones 36, 48 y 18 para los valores de inicialización de AAT° de 10, 20 y 30 K, respectivamente, la Fig. 10 ilustra el comportamiento observado. Con base a los resultados reportados en las Tablas 4, 5 y 6, y en las figs. 7 a la 10, se elaboran las siguientes observaciones.

i) Los tres mejores diseños desarrollados para el Caso B, figs. 7, 8 y 9, logran una comple-

Tabla 4. Comparación de los resultados económicos para las tres mejores diseños para el Caso B, generados al emplear valores de AAT° de 10, 20 y 30 K.

	Costos de servicios			Costos de inversión anualizado				Subtotal ($F_{RC}=1$) (\$/año)	Total (\$/año)	
	Servicios de enfriamiento	Servicios de calentamiento	Subtotal (\$/año)	Área nueva (m^2)	Costo fijo de equipos nuevos (\$)	Reemplazo con un solo cambio de re-conexión (equipos)	Reemplazo con dos cambios de re-conexión (equipos)			
Precio	20 $\left(\frac{\$}{kW \cdot \text{año}}\right)$	80 $\left(\frac{\$}{kW \cdot \text{año}}\right)$		300 $\left(\frac{\$}{m^2}\right)$	4000 $\left(\frac{\$}{\text{equipo}}\right)$	400 $\left(\frac{\$}{\text{equipo}}\right)$	800 $\left(\frac{\$}{\text{equipo}}\right)$			
AAT°	Can-	440	0	33.1	1	3	1			
10 y 20K	tidad (kW)	(kW)	(kW)	(m^2)	(equipos)	(equipos)	(equipos)			
Fig.7	Im-	8,800	0	<u>8,800</u>	9,930	4,000	1,200	800	<u>15,930</u>	24,730
	porte (\$/año)	(\$/año)	(\$/año)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)		
AAT°	Can-	440	0	38.3	1	2	1			
30K	tidad (kW)	(kW)	(kW)	(m^2)	(equipos)	(equipos)	(equipos)			
Fig.8	Im-	8,800	0	<u>8,800</u>	11,490	4,000	800	0 (\$)	<u>16,290</u>	25,090
	porte (\$/año)	(\$/año)	(\$/año)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)		
AAT°	Can-	440	0	33.1	1	1	3			
10K	tidad (kW)	(kW)	(kW)	(m^2)	(equipos)	(equipos)	(equipos)			
Fig.9	Im-	8,800	0	<u>8,800</u>	9,930	4,000	400	2,400	<u>16,730</u>	25,530
	porte (\$/año)	(\$/año)	(\$/año)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)		

ta recuperación de calor, requiriendo solamente servicios de enfriamiento por 440 kW. Esto representa, con relación al diseño base, un ahorro en los costos de operación por \$40,000 dólares por año.

- ii) Los diseños mostrados en las figs. 7, 8 y 9 requieren de una inversión de \$15,930 dólares/año, \$16,290 dólares/año y \$16,730 dólares/año, respectivamente. Tomando en cuenta el ahorro de \$36,000 dólares/año alcanzado en los costos de operación, el periodo de recuperación de la inversión en los tres diseños presentados es menor a medio año.
- iii) Según se muestra en la Tabla 6, los diseños más económicos entre los generados por la metodología aquí propuesta involucran un costo total anualizado de \$24,730 dólares, que se obtienen para valores de 10 K y 20 K para AAT°. Mientras que para un valor de 30 K de AAT° se obtiene un diseño con un costo total anualizado de \$25,090 dólares. Entonces, para el caso de estudio atendido se observa que la metodología propuesta es robusta para distintos valores de AAT°.

- iv) En los diseños mostrados en las figs. 7, 8 y 9, el área adicional requerida es instalada en un sólo equipo nuevo, evitándose así la instalación de múltiples equipos nuevos con tamaños poco significativos.
- v) Para los diseños mostrados en las figs. 7, 8 y 9, se hace un menor aprovechamiento del área disponible de los equipos reemplazados, esto en comparación con los diseños mostrados en las figs. 4 y 6 para el Caso A. Lo anterior conlleva en el Caso B a mayores requerimientos de área nueva con su respectivo costo de inversión. Sin embargo, este resultado se justifica con base a la conveniencia de renunciar al reemplazo de una cierta cantidad del área disponible, favoreciendo la disminución de los cargos fijos por \$4,000 dólares/año, que serían involucrados al complementar el área de los equipos reemplazados.
- vi) Para el caso de estudio atendido, se observa en la Tabla 6 y en la Fig. 10 que se generan soluciones con un costo total anualizado cercano al mejor obtenido desde la vigésima iteración.

Tabla 5. Lista en orden ascendente del costo total anualizado para veinte diseños alternativos para el Caso B, generados al emplear valores de AAT° de 10, 20 y 30 K.

Número de diseño	AAT°					
	10 K		20 K		30 K	
	Iteración <i>l</i>	<i>c</i> ' _{TA}	Iteración <i>l</i>	<i>c</i> ' _{TA}	Iteración <i>l</i>	<i>c</i> ' _{TA}
1	36	24,730 (Fig. 7)	48	24,730 (Fig. 7)	18	25,090 (Fig. 8)
2	8	25,530 (Fig. 9)	16	27,287	47	25,130
3	10	25,530	26	27,287	72	25,130
4	12	25,530	36	27,287	41	25,530
5	24	27,287	47	28,679	51	28,080
6	2	28,679	30	29,629	76	28,080
7	35	28,679	4	29,837	65	29,064
8	32	29,978	44	29,978	24	29,629
9	52	29,978	64	29,978	2	29,978
10	53	29,978	65	29,978	19	29,978
11	30	30,553	42	30,553	14	30,553
12	40	30,553	52	30,553	9	30,873
13	21	31,660	10	30,748	58	31,439
14	46	31,727	33	31,660	66	31,660
15	22	32,404	58	31,727	23	32,004
16	9	32,463	34	32,404	25	32,004
17	11	32,463	9	32,463	50	32,112
18	42	32,463	15	32,463	75	32,112
19	37	32,540	54	32,463	8	32,198
20	17	34,173	49	32,540	16	32,198

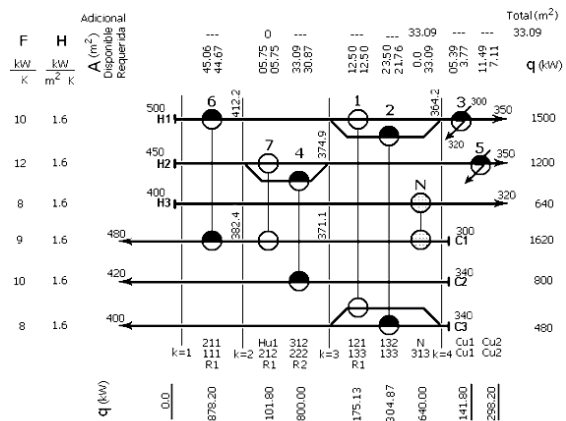


Fig. 7: La mejor solución de la metodología aquí propuesta para el Caso B empleando los valores iniciales de AAT de 10 y 20 K, con un costo total anualizado de \$24,730 dólares.

vii) Es interesante observar que el modelo matemático aquí propuesto permite el reemplazo de más de un equipo disponible para atender un encuentro térmico particular. Tal es el caso del reemplazo que se hace de dos equipos indicados con los números 1 y 2 en el diseño presentado en la Fig. 7.

viii) Los diseños en las figs. 7 y 9 requieren ambos la misma cantidad de área nueva, 33.09

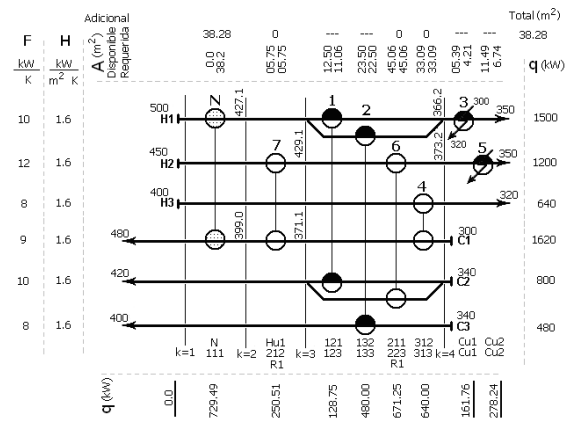


Fig. 8: La segunda mejor solución de la metodología aquí propuesta para el Caso B empleando un valor inicial de AAT = 30 K, con un costo total anualizado de \$25,090 dólares.

m². Sin embargo, el diseño de la Fig. 7 es más económico debido a que requiere menos reconexiones para la reutilización de equipos.

ix) El costo total anualizado de \$25,090 dólares del diseño mostrado en la Fig. 8, es un 1.46% más caro que el costo del mejor diseño que se muestra en la Fig. 7. Sin embargo, al analizar el diseño correspondiente de la Fig.

Tabla 6. Relación del costo total anualizado para las soluciones más económicas que son generadas para el Caso B dentro de distintos rangos de iteraciones, σ , mediante el empleo de valores de AAT° de 10, 20 y 30 K.

Límite de iteraciones realizadas: σ	AAT°					
	10 K		20 K		30 K	
	Iteración l	c_{TA}^l	Iteración l	c_{TA}^l	Iteración l	c_{TA}^l
5	2	28,679	4	29,837	2	29,978
10	8	25,530	4	29,837	2	29,978
15	8	25,530	4	29,837	2	29,978
20	8	25,530	16	27,287	18	25,090
25	8	25,530	16	27,287	18	25,090
30	8	25,530	16	27,287	18	25,090
35	8	25,530	16	27,287	18	25,090
40	36	24,730	16	27,287	18	25,090
45	36	24,730	16	27,287	18	25,090
50	36	24,730	48	24,730	18	25,090
55	36	24,730	48	24,730	18	25,090
60	36	24,730	48	24,730	18	25,090
65	36	24,730	48	24,730	18	25,090
70	36	24,730	48	24,730	18	25,090
75	36	24,730	48	24,730	18	25,090
80	36	24,730	48	24,730	18	25,090

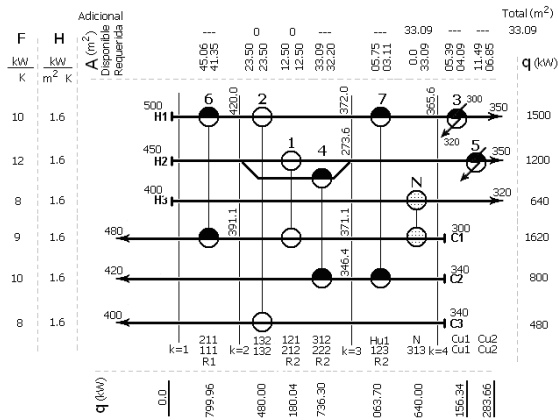


Fig. 9: La tercera mejor solución de la metodología aquí propuesta para el Caso B empleando un valor inicial de AAT =10 K, con un costo total anualizado de \$25,530 dólares.

8 se observa que la reconfiguración se da con la adición de un sólo equipo nuevo y con dos reconexiones simples en dos equipos. Lo anterior implica pocos cambios en los procedimientos de operación y de control para el proceso ya reajustado. Estas condiciones pudieran compensar el ahorro extra que se lograría con la implementación del diseño más económico, el cual también requiere de

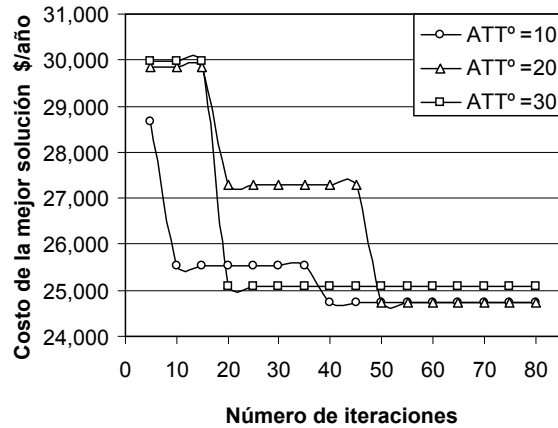


Fig. 10: Comparación del costo total anualizado para las mejores soluciones obtenidas para el Caso B, para distintas cantidades de iteraciones, σ , y para los valores de AAT° de 10, 20 y 30 K.

un equipo nuevo, pero tres reconexiones simples y una doble.

Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto un modelo matemático para la reconfiguración de redes de intercambio de calor y un método iterativo para

su solución. El modelo matemático es de tipo MINLP y toma en cuenta de forma simultánea a todos los elementos de decisión involucrados. En el modelo se consideran distintos casos de reconexión de los equipos disponibles para la transferencia de calor y se atienden con detalle los cargos fijos de los equipos nuevos que son requeridos. Estas consideraciones conducen a soluciones que presentan un número pequeño de modificaciones en la interconexión de los equipos reemplazados, además de que estos diseños involucran la instalación de una cantidad menor de equipos nuevos, dando por resultado soluciones de reconfiguración con costos de inversión relativamente bajos.

El modelo matemático desarrollado presenta propiedades no convexas, además de que su solución puede involucrar problemas combinatorios importantes. En consecuencia, se ha propuesto aquí un método de solución heurístico que busca obtener buenas soluciones con el empleo de técnicas de programación matemática para problemas MILP y MINLP. Este método tiene como objetivo el generar múltiples soluciones de reconfiguración para ampliar el espectro en la elección de las mejores soluciones, pudiendo tomar en cuenta a otros factores de diseño, además del costo total anualizado.

Para dos casos del problema de estudio abordado se elaboraron diseños alternativos que logran prescindir del empleo de servicios de calentamiento. Al mismo tiempo, las soluciones presentadas exhiben pocos cambios de reconfiguración con relación al arreglo original de la red. Además, los diseños alternativos generados presentan menores costos de inversión y menores costos totales anualizados, en comparación con otras soluciones reportadas previamente en la literatura especializada.

Agradecimientos

Los autores de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo agradecen los apoyos financieros que les proporciona la Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a través del Proyecto 20.1; D. A. Mejía Suárez agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo financiero otorgado.

Nomenclatura

Índices

<i>cu</i>	servicio de enfriamiento; (-)
<i>hu</i>	servicio de calentamiento; (-)
<i>i</i>	corriente caliente de proceso en la RIC después de la reconfiguración; (-)
<i>j</i>	corriente fría de proceso en la RIC después de la reconfiguración; (-)
<i>k</i>	índice para las etapas en la superestructura 1,...,NOK, y para las localidades temperatura 1,..., NOK+1 en la RIC después de la reconfiguración; (-)
<i>l</i>	índice para indicar el número de iteración, 1,2,..., σ ; (-)
<i>m</i>	corriente caliente de proceso en la RIC antes de la reconfiguración; (-)
<i>n</i>	corriente fría de proceso en la RIC antes de la reconfiguración; (-)
<i>o</i>	índice para las etapas en la superestructura 1,...,NOK, en la RIC antes de la reconfiguración; (-)

Conjuntos

<i>CP</i>	$\{j \mid j \text{ es una corriente fría de proceso}\}; (-)$
<i>CU</i>	servicios de enfriamiento; (-)
<i>E_c</i>	$\{(m) : (m) \text{ corresponde a un encuentro térmico con el servicio externo de enfriamiento en la RIC antes de la reconfiguración}\}; (-)$
<i>E_h</i>	$\{(n) : (n) \text{ corresponde a un encuentro térmico con el servicio externo de calentamiento en la RIC antes de la reconfiguración}\}; (-)$
<i>E_p</i>	$\{(m, n, o) : (m, n, o) \text{ corresponde a un encuentro térmico entre corrientes de proceso en la RIC antes de la reconfiguración}\}; (-)$
<i>HP</i>	$\{i \mid i \text{ es una corriente caliente de proceso}\}; (-)$
<i>HU</i>	servicios de calentamiento; (-)
<i>ST</i>	$\{k \mid k \text{ es una etapa en la superestructura, } k = 1, \dots, \text{NOK}\}; (-)$

Parámetros

<i>AAT^l</i>	promedio de todas las diferencias de temperaturas que participan en todos los encuentros térmicos de una buena solución del modelo $P(Z_F^l)$, para una iteración <i>l</i> , K
<i>Acu_m^E</i>	área disponible de servicios de enfriamiento en la corriente <i>m</i> , m ²
<i>Ahu_n^E</i>	área disponible de servicios de calentamiento en la corriente <i>n</i> , m ²
<i>A_{mno}^E</i>	área disponible de proceso en un encuentro térmico entre las corrientes <i>m</i> y <i>n</i> , en la etapa <i>o</i> , m ²

CAT ^l	diferencia de temperaturas constante empleado en el modelo P(CAT ^l , \hat{Y}) para una iteración <i>l</i> , K	H _{<i>j</i>}	coeficiente de película para la transferencia de calor de una corriente fría de proceso <i>j</i> , cuyo valor es considerado constante, W/m ² K
CCU	costo unitario de servicios de enfriamiento, \$/W año	H _{CU}	coeficiente de película para la transferencia de calor del servicio de enfriamiento, cuyo valor es considerado constante, W/m ² K
CF _{<i>ij</i>}	costo fijo por equipo de intercambio de calor en proceso, \$/año	H _{HU}	coeficiente de película para la transferencia de calor del servicio de calentamiento, cuyo valor es considerado constante, W/m ² K
CF _{<i>i, CU</i>}	costo fijo por equipo de intercambio de calor en servicio de enfriamiento, \$/año	NOK	número total de etapas de la superestructura, (-)
CF _{HU,<i>j</i>}	costo fijo por equipo de intercambio de calor en servicio de calentamiento, \$/año	TIN _{<i>i</i>}	temperatura de entrada de una corriente caliente de proceso <i>i</i> , K
CHU	costo unitario de servicios de calentamiento, \$/W año	TIN _{<i>j</i>}	temperatura de entrada de una corriente fría de proceso <i>j</i> , K
CRS _{<i>ij</i>}	costo fijo por el reemplazo con cambio de reconexión simple en proceso, \$/año	TIN _{CU}	temperatura de entrada del servicio de enfriamiento, K
CRS _{<i>i, CU</i>}	costo fijo por el reemplazo con cambio de reconexión simple en servicio de enfriamiento, \$/año	TIN _{HU}	temperatura de entrada del servicio de calentamiento, K
CRS _{HU,<i>j</i>}	costo fijo por el reemplazo con cambio de reconexión simple en servicio de calentamiento, \$/año	TOU _{<i>i</i>}	temperatura de salida de una corriente caliente de proceso <i>i</i> , K
CRD _{<i>ij</i>}	costo fijo por el reemplazo con cambio de reconexión doble en proceso, \$/año	TOU _{<i>j</i>}	temperatura de salida de una corriente fría de proceso <i>j</i> , K
CRD _{<i>i, CU</i>}	costo fijo por el reemplazo con cambio de reconexión doble en servicio de enfriamiento, \$/año	TOU _{CU}	temperatura de salida del servicio de enfriamiento, K
CRD _{HU,<i>j</i>}	costo fijo por el reemplazo con cambio de reconexión doble en servicio de calentamiento, \$/año	TOU _{HU}	temperatura de salida del servicio de calentamiento, K
CV _{<i>ij</i>}	costo por unidad de área de transferencia en proceso, \$/m ² año	Z _{cu_{<i>i</i>}}	parámetros binarios que fijan la existencia de un encuentro térmico de la corriente caliente <i>i</i> con el servicio de enfriamiento, (-)
CV _{<i>i, CU</i>}	costo por unidad de área de transferencia en servicios de enfriamiento, \$/m ² año	Z _{hu_{<i>j</i>}}	parámetros binarios que fijan la existencia de un encuentro térmico de la corriente fría <i>j</i> con el servicio de calentamiento, (-)
CV _{HU,<i>j</i>}	costo por unidad de área de transferencia en servicios de calentamiento, \$/m ² año	Z _{<i>ijk</i>}	parámetros binarios que fijan la existencia de un encuentro térmico entre las corrientes <i>i</i> y <i>j</i> en la etapa <i>k</i> , (-)
EMAT	límite inferior para las diferencias de temperatura en cualquier encuentro térmico, K	Z _{F^l}	vector de parámetros binarios que fijan la topología en la solución del modelo P(Z _{F^l}) correspondiente a la iteración <i>l</i> : {Z _{cu_{<i>i</i>}} , Z _{cu_{<i>j</i>}} , Z _{<i>ijk</i>} : <i>i</i> ∈ HP, <i>j</i> ∈ CP, <i>k</i> ∈ ST}, (-)
F _{AC}	factor empleado para calcular los costos del capital de forma anualizada, considerando cargos por financiamiento, 1/año	Γ	límite superior para las diferencias de temperatura de un encuentro térmico, K
F _{<i>i</i>}	producto de la capacidad calorífica y del flujo másico de una corriente caliente de proceso <i>i</i> , W/K	Δ	parámetro que representa una diferencia de temperaturas con valor pequeño y determinado, empleado para evitar singularidades, K
F _{<i>j</i>}	producto de la capacidad calorífica y del flujo másico de una corriente fría de proceso <i>j</i> , W/K	λ	margen de tolerancia para las diferencias entre CAT ^l y AAT ^l , K
H _{<i>i</i>}	coeficiente de película para la transferencia de calor de una corriente caliente de proceso <i>i</i> , cuyo valor es considerado constante, W/m ² K		

σ	límite superior para el número de iteraciones, (-)	q_{ijk}	intercambio de calor en el encuentro térmico entre las corrientes i y j en la etapa k , W
Φ	límite inferior para el área de transferencia en equipos de proceso, m ²	q_{cu_i}	intercambio de calor en el encuentro de la corriente caliente i con el servicio de enfriamiento, W
Φ_{CU}	límite inferior para el área de transferencia en equipos de enfriamiento, m ²	q_{hu_j}	intercambio de calor en el encuentro de la corriente fría j con el servicio de calentamiento, W
Φ_{HU}	límite inferior para el área de transferencia en equipos de calentamiento, m ²	S^l	vector compuesto por las variables que definen una buena solución del modelo P(CAT ^l , \hat{Y}) en a la iteración l , (-)
Ψ	límite superior para el área de transferencia en equipos de proceso, m ²	S^*	vector compuesto por las variables que definen una buena solución del modelo P(CAT ^l , \hat{Y}) con el menor valor del costo total anualizado, c_{TA}^* , en el desarrollo de todas las iteraciones realizadas: 1, 2,..., l , (-)
Ψ_{CU}	límite superior para el área de transferencia en equipos de enfriamiento, m ²		
Ψ_{HU}	límite superior para el área de transferencia en equipos de calentamiento, m ²		
Ω	límite superior para el intercambio de calor en equipos de transferencia, W		
<i>Variables continuas y positivas.</i>			
A_{ijk}	área solicitada para un encuentro térmico de proceso entre las corrientes i y j en la etapa k , m ²	t_{ik}	temperatura de la corriente caliente i al final de la etapa k , K
Acu_i	área solicitada para un encuentro térmico de servicio de enfriamiento en la corriente i , m ²	t_{jk}	temperatura de la corriente fría j al final de la etapa k , K
Ahu_i	área solicitada para un encuentro térmico de servicio de calentamiento en la corriente j , m ²	u_{ijk}	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reacondo de un equipo con un sólo cambio de corrientes en proceso, entre las corrientes i y j en la etapa k , (-)
A_{ijk}^N	área adicional requerida para un encuentro térmico de proceso entre las corrientes i y j en la etapa k , m ²	ucu_i	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reacondo de un equipo con un sólo cambio de corrientes de un equipo en el servicio de enfriamiento de la corriente i , (-)
Acu_i^N	área adicional requerida para un encuentro térmico de servicio de enfriamiento en la corriente i , m ²	uhu_j	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reacondo de un equipo con un sólo cambio de corrientes de un equipo en el servicio de calentamiento de la corriente j , (-)
Ahu_j^N	área adicional requerida para un encuentro térmico de servicio de calentamiento en la corriente j , m ²	v_{ijk}	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reacondo de un equipo con dos cambios de corrientes de un equipo en proceso, entre las corrientes i y j en la etapa k , (-)
A_{ijk}^R	área reemplada en un encuentro térmico de proceso entre las corrientes i y j en la etapa k , m ²	v_{cu_i}	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reacondo de un equipo con dos cambios de corrientes de un equipo en el servicio de enfriamiento de la corriente i , (-)
Acu_i^R	área reemplada en un encuentro térmico de servicio de enfriamiento en la corriente i , m ²	v_{hu_j}	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reacondo de un equipo con dos cambios de corrientes de un equipo en el servicio de calentamiento de la corriente j , (-)
Ahu_j^R	área reemplada en un encuentro térmico de servicio de calentamiento en la corriente j , m ²	w_{ijk}	variables acotadas entre 0 y 1 que definen una nueva instalación de un equipo de proceso entre las corrientes i y j en la etapa k , (-)
c_{TA}	costo total anualizado, \$/año		
dt_{ijk}	diferencia de temperaturas en el encuentro térmico entre las corrientes i y j en la etapa k , K		
$dteu_i$	diferencia de temperaturas en el encuentro térmico de la corriente caliente i con el servicio de enfriamiento, K		
$dthu_j$	diferencia de temperaturas en el encuentro térmico de la corriente fría j con el servicio de calentamiento, K		

wcu_i	variables acotadas entre 0 y 1 que definen una nueva instalación de un equipo de enfriamiento en la corriente i , (-)	<i>Variables binarias</i>	
whu_j	variables acotadas entre 0 y 1 que definen una nueva instalación de un equipo de calentamiento en la corriente j , (-)	y_{ijk}^{mno}	variables binarias que definen el reemplazo de un equipo, de proceso, entre las corrientes n y m en la etapa o , a proceso, entre las corrientes i y j en la etapa k ,(-)
\hat{y}_{ijk}^{mno}	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reemplazo de un equipo, de proceso, entre las corrientes n y m en la etapa o , a proceso, entre las corrientes i y j en la etapa k , (-)	y_i^{mno}	variables binarias que definen el reemplazo de un equipo, de proceso, entre las corrientes n y m en la etapa o , al servicio de enfriamiento en la corriente i ,(-)
\hat{y}_i^{mno}	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reemplazo de un equipo, de proceso, entre las corrientes n y m en la etapa o , al servicio de enfriamiento en la corriente i , (-)	y_j^{mno}	variables binarias que definen el reemplazo de un equipo, de proceso, entre las corrientes n y m en la etapa o , al servicio de calentamiento en la corriente j ,(-)
\hat{y}_j^{mno}	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reemplazo de un equipo, de proceso, entre las corrientes n y m en la etapa o , al servicio de calentamiento en la corriente j , (-)	y_{ijk}^n	variables binarias que definen el reemplazo de un equipo de enfriamiento, de la corriente n , a proceso, entre las corrientes i y j en la etapa k ,(-)
\hat{y}_{ijk}^n	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reemplazo de un equipo de enfriamiento, de la corriente n a proceso, entre las corrientes i y j en la etapa k , (-)	y_i^n	variables binarias que definen el reemplazo de un equipo de enfriamiento, de la corriente n , al servicio de enfriamiento en la corriente i ,(-)
\hat{y}_i^n	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reemplazo de un equipo de enfriamiento, de la corriente n al servicio de enfriamiento en la corriente i , (-)	y_j^n	variables binarias que definen el reemplazo de un equipo de enfriamiento, de la corriente n , al servicio de calentamiento en la corriente j ,(-)
\hat{y}_j^n	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reemplazo de un equipo de enfriamiento, de la corriente n al servicio de calentamiento en la corriente j , (-)	y_{ijk}^m	variables binarias que definen el reemplazo de un equipo de calentamiento, de la corriente n , a proceso, entre las corrientes i y j en la etapa k ,(-)
\hat{y}_{ijk}^m	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reemplazo de un equipo de calentamiento, de la corriente m a proceso, entre las corrientes i y j en la etapa k , (-)	y_i^m	variables binarias que definen el reemplazo de un equipo de calentamiento, de la corriente n , al servicio de calentamiento en la corriente i ,(-)
\hat{y}_i^m	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reemplazo de un equipo de calentamiento, de la corriente m al servicio de enfriamiento en la corriente i , (-)	y_j^m	variables binarias que definen el reemplazo de un equipo de calentamiento, de la corriente n , al servicio de calentamiento en la corriente j ,(-)
\hat{y}_j^m	variables acotadas entre 0 y 1 que definen el reemplazo de un equipo de calentamiento, de la corriente m al servicio de enfriamiento en la corriente j , (-)	Y	vector de variables binarias que definen el reemplazo de equipos disponibles: $\{y_{ijk}^{mno}, y_i^{mno}, y_j^{mno}, y_{ijk}^m, y_i^m, y_j^m, y_{ijk}^n, y_i^n, y_j^n: (m, n, o) \in E_p, m \in E_c, n \in E_h, i \in HP, j \in CP, k \in ST\}$, (-)
\hat{Y}	vector de variables continuas acotadas entre uno y cero para definir de forma relajada el reemplazo de equipos disponibles: $\{\hat{y}_{ijk}^{mno}, \hat{y}_i^{mno}, \hat{y}_j^{mno}, \hat{y}_{ijk}^m, \hat{y}_i^m, \hat{y}_j^m, \hat{y}_{ijk}^n, \hat{y}_i^n, \hat{y}_j^n: (m, n, o) \in E_p, m \in E_c, n \in E_h, i \in HP, j \in CP, k \in ST\}$, (-)	z_{ijk}	variables binarias que denotan la existencia de un encuentro térmico entre las corrientes i y j en la etapa k , (-)
		zcu_i	variables binarias que denotan la existencia de un encuentro térmico de la corriente caliente i con el servicio de enfriamiento, (-)
		zhu_j	variables binarias que denotan la existencia de un encuentro térmico de la corriente fría j con el servicio de calentamiento, (-)

Z^l vector de variables binarias que definen la topología de la solución óptima del modelo $P(\text{CAT}^l, \hat{Y})$ correspondiente a la iteración l : $\{z_{ijk}, zcu_i, zhu_j: i \in HP, j \in CP, k \in ST\}$, (-)

Referencias

- Brooke, A., Kendrick, D.; Meeraus, A., Raman, R. (1998). *GAMS-A User's Guide*. Washington, D.C., USA. (www.gams.com).
- Ciric, A. R. y Floudas, C.A.. (1989). A Retrofit Approach for Heat Exchanger Networks. *Computers and Chemical Engineering* 13 (6), 703-715.
- Ciric, A. R. y Floudas, C.A.(1990). A Mixed Integer Nonlinear Programming Model for Retrofitting Heat Exchanger Networks. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 29 (2), 239-251.
- Duran, M.A. y Grossmann, I.E. (1986a). An Outer-Approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs. *Mathematical Programming* 36, 307-339.
- Duran, M.A. y Grossmann, I.E. (1986b). A mixed-integer nonlinear programming algorithm for process systems synthesis. *AIChE Journal* 32(4), 592-606.
- Furman, K.C. y Sahinidis, N.K. (2001). Computational complexity of heat exchanger network synthesis. *Computers Chemical Engineering* 25, 1371-1390.
- Furman, K.C. y Sahinidis, N.K. (2002). A critical review and annotated bibliography for heat exchanger network synthesis in the 20th century. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 41, 2335-2370.
- Gundersen, T. y Naess, L. (1988). The Synthesis of Cost Optimal Heat Exchanger Networks. *Computers Chemical Engineering* 12 (6), 503-530.
- Guthrie, K.M. (1969). Capital Cost Estimating. *Chemical Engineering* 24, 114-142
- Hwa, C.S. (1965). Mathematical formulation and optimization of heat exchanger networks using separable programming. *AIChE-Journal Chemical Engineering Symposium Series* 4, 101-106.
- Jezowski, J. (1994a). Heat Exchanger Network Grassroot and Retrofit Design. The Review of the State-of-the-Art: Part I. Heat Exchanger Network Targeting and Insight Based Methods of Synthesis. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry* 22, 279-294.
- Jezowski, J. (1994b). Heat Exchanger Network Grassroot and Retrofit Design. The Review of the State-of-the-Art: Part II. Heat Exchanger Network Synthesis by Mathematical Methods and Approaches for Retrofit Design. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry* 22, 295-308.
- Kocis, M.A. y Grossmann, I.E. (1987). Relaxation strategy for the structural optimization of process flow sheets. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 26(9), 1869-1880.
- Kern, D.Q. (1950). *Process heat transfer*. McGraw-Hill. New York.
- Ma, R., Yee, T.F. y Hui C.W. (1998). A Simultaneously Method for Heat Exchanger Network Retrofit, En: *Proceedings of de First Conference on Process Integration, Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES'98)*, Praha, Czech Republic, 23-28 August.
- Ma, L.K., Yee, T.F. y Hui, W.C. (2000). Constant approach Temperature Model for HEN Retrofit. *Applied Thermal Engineering* 20, 1505-1533.
- Masso, A.H. y Rudd, D.F. (1969). The synthesis of system designs - II Heuristics structuring. *AIChE Journal* 15, 10-17.
- Nishida, N., Stephanopoulos, G. y Westerberg, A.G. (1981). A review of process synthesis. *AIChE Journal* 27, 321-351.
- Papoulias, S.A. y Grossmann, I.E. (1983). A structural optimization approach in process synthesis -II Heat recovery networks. *Computers Chemical Engineering* 7, 707-721.
- Peters, M. S., Thimerhaus, K. D. y West, R.E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill. New York.
- Shokoya, C.G. (1992). *Retrofit of Heat-exchanger Networks for Debottlenecking and Energy Savings*. Ph.D. Dissertation, University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, UK.

- Sorsak, A. y Kravanja, Z. (2004). MINLP retrofit of heat exchanger networks comprising different exchanger types. *Computers Chemical Engineering* 28, 235-251.
- Stubbs, R. y Mehrotra, S. (1999). A Branch-and-cut method for 0-1 mixed convex programming. *Mathematical Programming* 86 (3), 515-532.
- Taborek, J. (1983). Shell and tube heat exchangers: Single phase flow. En: *Heat exchanger design handbook*. Hemisphere Publishing Corp. Section 3.3. USA.
- TEMA (1999). *Standards of Tubular Heat Exchanger Manufactures Association* (8th ed.). Tubular Heat Exchanger Manufactures Association. New York, USA.
- Ten Broeck, H. (1944). Economic selection of exchanger sizes. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 36(1), 64-67.
- Westbrook, G.T. (1961). Use this method to size each stage for best operation. *Hydrocarbon Process and Petroleum Refinement* 40, 201-206.
- Viswanathan, J. y Grossmann I.E. (1990). A combined penalty function and outer-approximation method for MINLP optimization. *Computers Chemical Engineering* 14, 769-782.
- Yee, T.F. y Grossmann, I.E. (1987). Optimization Model for Structural Modifications in the Retrofit of Heat Exchanger Networks. En: *Proceedings of the First International Conference on FOCAPO*; Elsevier Science. Pp 653-662. New York, USA.
- Yee, T.F. y Grossmann, I.E. (1990). Simultaneous optimization models for heat integration - II. Heat exchanger networks synthesis. *Computers Chemical Engineering* 14, 1165-1184.
- Yee, T.F. y Grossmann, I.E. (1991). A screening and optimization approach for the retrofit of heat exchanger Networks. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 30, 146-163.