

**PRIMERA PARTE.**

**SÍNTESIS DE REDES DE CAMBIADORES DE  
CALOR**

## CAPÍTULO 1

# REDES DE CAMBIADORES DE CALOR

### 1.1. INTRODUCCIÓN

En los procesos industriales, aparece frecuentemente la necesidad de calentar o enfriar fluidos que se transportan de un equipo a otro. Por ejemplo, cuando un fluido entra a un sistema lo más habitual es que se encuentre a temperatura ambiente, si ese fluido es un reactivo que debe entrar a un reactor que trabaja a una temperatura más elevada, este fluido deberá ser calentado hasta la temperatura de operación. Una vez se ha producido la reacción puede ser necesario enfriar los productos para introducirlos, por ejemplo en una columna de destilación. Generalmente todos estos intercambios de calor se llevan a cabo en equipos especiales llamados cambiadores de calor. A los fluidos a los que es necesario cambiarles la temperatura cuando van de un proceso a otro o de un equipo a otro se les llama corrientes de proceso. Cuando se tiene un cierto número de corrientes de proceso que deben ser calentadas o enfriadas surge de forma natural la idea de aprovechar el calor de algunas de estas corrientes para calentar otras, y por lo tanto enfriando las primeras, intentando utilizar al mínimo fuentes de calor y frío externas al proceso al mismo tiempo que se mantiene el coste de inversión y operación lo más bajo posible. A la configuración de qué corrientes deben intercambiar calor, en qué equipos y la configuración de dichos equipos se le llama red de cambiadores de calor (RCC).

Debido a su importancia, la síntesis de redes de cambiadores de calor es una de las ramas de la síntesis de procesos más estudiada, y como consecuencia la que presenta un mayor grado de desarrollo. Por este motivo, es posible encontrar en la literatura numerosos trabajos relacionados con la obtención de RCC óptimas. Desde el punto de vista industrial el problema de la síntesis de redes de cambiadores de calor es extremadamente complejo y podría formularse de la siguiente manera:

*Dado un conjunto de corrientes que necesitan ser enfriadas, un conjunto de corrientes que necesitan ser calentadas, uno o más servicios externos (ajenos al proceso) para calentar (i.e.*

*vapor de calefacción a diferentes presiones, aceites térmicos, etc) y para enfriar (agua, aire, ciclos de refrigeración, etc) determinar cuál es la mejor combinación de corrientes de proceso y de servicio, de tal forma que se consiga el menor consumo de energía, la utilización del menor número de equipos o en general el menor coste total del proceso.*

Desde el punto de vista de ingeniería, este problema se puede tratar como un problema de optimización que involucra la minimización del consumo de energía, proveniente de la utilización de servicios externos, así como la minimización del coste de construcción e instalación de los equipos necesarios. Es decir, se puede tratar como la minimización de una función objetivo que involucre los costes de operación relacionados fundamentalmente con los costes de energía más los costes relativos a los equipos referidos a una base común de tiempos. Estos costes pueden ser medidos cuantitativamente, aunque en ocasiones pudiera resultar difícil. Sin embargo, éstos son sólo algunos de aspectos involucrados en el problema. Existen aspectos tales como seguridad, operabilidad, flexibilidad y controlabilidad que también son importantes para el proceso y que pueden ser extremadamente difíciles de introducir en una función objetivo ya que incluyen aspectos tanto cuantitativos como cualitativos. Por otra parte, es común que aparezcan restricciones de proceso como por ejemplo intercambios prohibidos, esto es, dos corrientes a las que no se les permite intercambiar calor por diferentes motivos, ya sea por la probabilidad de contaminación por mezcla de corrientes o derrames que pudieran comprometer la calidad de alguna de ellas, por la elevada distancia física en la planta, lo que supondría costes elevados de bombeo y de tuberías, o por otras cuestiones de seguridad.

Las corrientes de proceso que necesitan ser calentadas se llaman corrientes frías, independientemente de cuales sean las temperaturas antes y después del intercambio de calor. Las corrientes que necesitan ser enfriadas, también independientemente de las temperaturas antes y después del intercambio de calor, se llaman corrientes calientes. Los servicios externos al proceso utilizados para calentar una corriente fría se llaman servicios calientes, y los utilizados para enfriar una corriente caliente de proceso se llaman servicios fríos.

El intercambio de calor entre corrientes calientes corrientes frías y servicios se lleva a cabo mediante cambiadores de calor. Los cambiadores de calor pueden ser de muy diferentes formas, sin embargo el equipo más utilizado es el cambiador de carcasa y tubos o cambiador multi-tubular debido a su construcción resistente, su flexibilidad y la facilidad de adaptación a diferentes condiciones de operación del proceso. Además de los cambiadores multi-tubulares, los cambiadores de placas son también bastante utilizados, sobre todo en la industria de alimentos. Además de estos tipos de cambiadores también se utilizan habitualmente los cambiadores compactos de flujo cruzado, aunque bastante menos que los anteriores.

Dependiendo de la función que un cambiador de calor desempeñe en el proceso se puede clasificar como un recuperador de calor, si el intercambio se produce entre dos corrientes de proceso (una caliente y otra fría). Como un calentador, si el intercambio se produce entre una corriente fría y un servicio caliente y un enfriador si el intercambio de calor tiene lugar entre una corriente caliente y un servicio frío. Podría ocurrir que durante el proceso de intercambio de calor se produjera un cambio de fase de alguna de las corrientes. Si lo que se produce es una condensación el equipo se llama condensador, cuando lo que se produce es una vaporización de alguna de las corrientes el equipo se llama hervidor o caldera. Casi todas las columnas de rectificación que aparecen en un proceso incluyen un condensador y una caldera, lo que da idea de la importancia de una integración energética adecuada para el desarrollo del proceso.

La decisión de que corrientes de proceso o de servicio deben intercambiar calor, y cómo se deben llevar a cabo dichos intercambios en un problema bastante complejo debido a su naturaleza combinatoria. Además, el número de corrientes involucradas en un proceso industrial puede ser relativamente grande, con docenas de corrientes que necesitan calentarse o enfriarse. A todo esto hay que sumar el hecho de que muchas de las propiedades físicas de los fluidos que tienen influencia directa en la transmisión de calor tales como la viscosidad, la conductividad térmica, la capacidad calorífica, o el calor específico, dependen de la temperatura y que el material utilizado en la construcción de los equipos que forman la red pueden influir fuertemente en el coste total de ésta.

A todo lo anterior hay que añadir la probabilidad de que alguna de las corrientes sufra un cambio de fase, lo que supone una dificultad añadida que complica el proceso de diseño, pues desde el punto de vista de intercambio de calor las condiciones de operación de un cambiador con fases líquida y vapor son muy diferentes. Otros factores que también deben tenerse en cuenta son la pérdida de eficacia en la transmisión de calor debido al ensuciamiento de los equipos durante su vida útil, y restricciones en las pérdidas de presión máximas en la operación de los equipos.

Debido a todos estos factores, y fundamentalmente a la importancia que las redes de cambiadores de calor ejercen en el coste global de los procesos industriales y su interdependencia con otros sectores del proceso, como por ejemplo sistemas de reacción, separación y servicios, la síntesis de redes de cambiadores de calor continúa siendo el tema más estudiado dentro del campo de la síntesis de procesos químicos. Se han publicado muchos artículos en revistas científicas y se han desarrollado numerosas tesis de doctorado sobre la síntesis de redes de cambiadores de calor. La primera revisión completa sobre este tema se publicó a finales de los 80 por Gundersen & Naess (1988). En este artículo, los autores presentaron una revisión muy completa de los métodos de síntesis disponibles hasta ese momento –muchos aspectos permanecen vigentes hoy en día-.

Según Gundersen & Naess (1988), se desarrollaron dos escuelas en la síntesis RCC. La primera utilizaba los principios termodinámicos junto con reglas heurísticas basadas en la experiencia y en el conocimiento del sistema. La utilización de estos conceptos y reglas, llevó al desarrollo de una tecnología de aplicación simple y de fácil comprensión por parte de los usuarios que se llamó *Tecnología Pinch*. Más tarde, ese nombre se amplió a Análisis Pinch dada su ampliación a otros ámbitos fuera del diseño exclusivo de redes de cambiadores de calor. Dada su potencialidad, el análisis pinch consiguió una importante difusión a nivel mundial. La red la puede diseñar el ingeniero incluso manualmente o con la ayuda de software, relativamente sencillo, de forma interactiva. La segunda escuela, intentó un desarrollo más automatizado y se basó en la utilización de técnicas modernas de optimización: programación lineal, no-lineal, entera y entera-mixta, que se llaman de forma general Programación Matemática.

En este mismo trabajo, Gundersen & Naess (1988) analizaron los diferentes métodos desde un punto de vista industrial. Así como una pequeña discusión de algunos de los paquetes de software comercial para la síntesis de RCC en la época en que fue publicado.

Más tarde, a finales de los 90 e inicio del nuevo siglo, apareció un tercer grupo de métodos: Métodos heurísticos de optimización aplicados a la síntesis de redes de cambiadores de calor. Algunas de estas técnicas incluían optimización por Algoritmos genéticos y 'Simulated Annealing'. Más recientemente se propusieron otras técnicas de optimización como la optimización por enjambres de partículas (Particle Swarm Optimization, PSO) los métodos de colonización de hormigas (Ant Colony AC). Al mismo tiempo, de forma paralela se fueron

desarrollando métodos mixtos que combinan aspectos de programación matemática, Análisis Pinch y métodos heurísticos.

A continuación se presenta un breve recorrido histórico de los trabajos publicados en el campo de síntesis de redes de cambiadores de calor.

## **1.2. BREVE RECORRIDO HISTÓRICO DE LOS TRABAJOS RELACIONADOS CON LA SÍNTESIS DE REDES DE CAMBIADORES DE CALOR**

### **PRIMEROS TRABAJOS RELACIONADOS CON LA SÍNTESIS DE REDES DE CAMBIADORES DE CALOR.**

Las primeras tentativas para la solución de problemas de síntesis de redes de cambiadores de calor estaban basadas en la transformación del problema en un modelo matemático que debía ser resuelto utilizando técnicas de análisis numérico. Sin embargo, la complejidad del problema hizo necesaria la introducción de un gran número de simplificaciones de modo que el problema matemático fuese manejable. Obviamente, dadas las importantes simplificaciones se podía cuestionar la aplicabilidad industrial de los modelos resultantes, pero incluso aceptando la validez de dichos modelos, el número de corrientes de proceso solía estar limitado a un máximo de 10 (en el mejor de los casos) lo que ya era una limitación en sí misma.

De acuerdo con Gundersen & Naess (1988), hasta el momento de publicación de su revisión se habían publicado cerca de 200 trabajos sobre la síntesis de RCC –desde luego es imposible nombrarlos todos aquí, así que se incluirán sólo los más relevantes a juicio de los autores de este texto-, de los cuales casi la mitad se publicaron en los cuatro años anteriores a la publicación de dicho trabajo. El primer trabajo que hace referencia a la síntesis de redes de cambiadores de calor como un problema de diseño se debió a Broeck (1944), sin embargo no fue hasta la década de 1960 cuando se reconoció el verdadero impacto que las RCC podían tener en el proceso. Los primeros autores que retomaron la síntesis de RCC fueron Westbrook (1961) utilizando programación dinámica y Hwa (1965) que consideró la síntesis como un problema de programación separable y fue el primero en considerar la síntesis de la red desde el principio y no sólo como una modificación del proceso. No obstante, los verdaderos pioneros en esta área fueron Rudd y colaboradores en la Universidad de Wisconsin [Rudd (1968), Masso & Rudd (1969), Lee et al. (1970)] y Hohmann, que desarrolló su trabajo junto con Lockhart en California y que obtuvo sus resultados en el desarrollo de su tesis doctoral. Hohmann (1971). Hohmann fue el primero en introducir el criterio de consumo mínimo de servicios en la síntesis de la red. Además propuso también una regla para la determinación del número mínimo de cambiadores de calor en una red. Curiosamente, el trabajo de Hohmann tuvo poco reconocimiento en la época, quizás porque en aquellos momentos se trabajaba con métodos matemáticos exclusivamente, para los cuales su trabajo ‘no era suficiente contribución’. Sin embargo, los conceptos introducidos por él fueron posteriormente muy aprovechados en el desarrollo del análisis pinch, que será desarrollado en profundidad en los capítulos siguientes. Además de Hohmann diferentes autores propusieron diferentes métodos para la síntesis de RCC. Quizás cabría destacar entre estos trabajos pioneros los siguientes:

Masso & Rudd (1969) utilizaron un método heurístico para el desarrollo de un programa de cálculo para la síntesis de procesos con aplicaciones en RCC e hicieron la primera definición formal del problema de síntesis de RCC.

Kesler & Parker (1969) utilizaron una técnica basada en la división de corrientes de proceso en pequeños elementos de flujo de calor, que los autores llamaron *exchanlets*. A través de estos

elementos de igual tamaño se permitían transferencias de calor entre corrientes lo que disminuía las dificultades del problema original.

Lee et al. (1970) Aplicaron la técnica de ramificación y acotamiento –ampliamente utilizada en programación lineal y no lineal con variables enteras-. El procedimiento consiste en dos operaciones básicas, la ramificación que divide el espacio de soluciones del problema en dos sub-espacios y el acotamiento que corresponde a una posible solución del problema y por lo tanto fija una cota al máximo (mínimo) valor que puede tomar la función objetivo. La idea es hacer una búsqueda rigurosa en todo el espacio de alternativas visitando solamente una parte de las soluciones.

Kobayashi et al. (1971) perfeccionaron el trabajo de Kesler & Parker (1969), introduciendo el diagrama de contenido de calor para permitir división de corrientes y redes cíclicas. Este diagrama fue fundamental para la estructuración de los conceptos desarrollados en la Tecnología Pinch.

En ese mismo año, Nishida et al. (1971) propusieron un método gráfico para obtener la estructura óptima de la red, proponiendo reglas para la obtención de la mejor red posible. El criterio de optimización era la minimización del área total de intercambio de calor. Sin embargo, el método era extremadamente trabajoso e impreciso.

Menzies & Johnson (1972) utilizaron la misma técnica desarrollada por Lee et al. (1970) – Ramificación y acotamiento- para la optimización de RCC. Nuevamente el método tropezaba con la complejidad de aplicación de la técnica.

McGilliard & Westerberg (1972) presentaron el primer trabajo que incorporaba análisis de sensibilidad en el diseño de la red.

Por su parte, Pho & Lapidus (1973) aplicaron al problema de síntesis de RCC un método de enumeración parcial a partir de la generación de una matriz para la estructura de la red.

Los trabajos de Umeda et al. (1978) Linnhoff & Flower (1978a, 1978b) Fueron los primeros en identificar la relación del punto de pinch con las posibilidades de recuperación de calor y junto con el trabajo de Hohmann (1971) establecieron las bases para el desarrollo de la Tecnología Pinch que se desarrollaría durante la década de 1980

Debido a la importancia del diseño adecuado de redes de cambiadores de calor comenzaron a aparecer algunas revisiones sobre RCC. Hendry et al. (1973) fueron los primeros en presentar una revisión bibliográfica sobre síntesis de procesos. El problema de la síntesis de RCC se abordó como un subproblema homogéneo de la síntesis de procesos cuyas grandes dificultades, citadas por los autores, eran la naturaleza combinatoria de los intercambios de calor y el secuenciamiento de los equipos. Otras revisiones importantes fueron presentadas por Hlavacek (1978) y Nishida et al. (1981).

Hlavacek (1978) llevó a cabo una revisión de los trabajos publicados hasta ese momento sobre síntesis de procesos, considerando el problema de la síntesis de redes de cambiadores de calor como una parte de esta incluyendo la simulación dinámica y el estado no estacionario en la síntesis de procesos.

Nishida et al. (1981) presentaron un excelente trabajo de revisión en el área de síntesis de procesos. La síntesis de RCC fue considerada, como siempre, una sub-tarea de la síntesis de procesos, siendo sin embargo, la más desarrollada entre ellas.

Aunque Gundersen & Naess (1988) habían apuntado, en esos primeros años importantes de desarrollo, la existencia de dos escuelas, la que utiliza conceptos termodinámicos y que culminará con el Análisis Pinch, y la que utiliza programación matemática, aparecieron algunos otros métodos basados sólo en reglas heurísticas. En este texto, estos métodos no serán llamados Métodos Heurísticos, sino simplemente Métodos Basados en Reglas Heurísticas. Esta distinción se hace para evitar confusión con los métodos de optimización no determinista, que se llamarán heurísticos. Esta distinción quedará clara y bien explicada en capítulos posteriores. Entre estos métodos se encuentra el propuesto por Ponton & Donaldson (1974). Por su facilidad de implementación se utilizó bastante en la década de 1970 y por ese motivo se presentará con mayor detalle en los capítulos siguientes.

### **1.3. DESARROLLO DE LAS REDES DE CAMBIADORES DE CALOR.**

La década de 1980 supone el máximo desarrollo de la síntesis de redes de cambiadores de calor, es durante esta década durante la cual se desarrolla completamente el concepto de Pinch y la tecnología pinch, que fue, sin ninguna duda uno de los grandes avances de la Ingeniería química en las últimas décadas. Durante esta época y en muchos aspectos hasta nuestros días, continúa manteniéndose cierta diferencia entre los métodos de diseño basados en conceptos termodinámicos y reglas heurísticas y los basados en programación matemática. Pero, ya en esta década comienzan aparecer trabajos que intentan aprovechar lo mejor de ambas escuelas, de tal forma que se combinan los métodos termodinámicos con las técnicas avanzadas de optimización de la programación matemática. A la hora de clasificar los diferentes métodos de síntesis de redes de cambiadores de calor es más conveniente clasificarlos en métodos secuenciales y métodos simultáneos. El análisis pinch, tal cual se desarrolló originalmente estaría ubicado dentro de los métodos secuenciales.

### **1.4. MÉTODOS SECUENCIALES.**

Los métodos de síntesis secuencial utilizan la estrategia de dividir el problema en una serie de sub-problemas para reducir la complejidad computacional de éste. Cada uno de estos sub-problemas tiene un objetivo diferente, comenzando con aquellos objetivos que tienen un mayor impacto en el coste total anual de la red (que a su vez será el objetivo final). Normalmente esto se consigue con los tres problemas siguientes, donde el objetivo obtenido en cada problema se fija en los siguientes: (a) mínimo coste/uso de servicios externos; (b) mínimo número de unidades en la red; (c) mínimo área/coste de inversión en la red. La síntesis secuencial no garantiza el diseño de una red con mínimo coste total anualizado, debido a su naturaleza secuencial que no es capaz de tener en cuenta los diferentes compromisos entre los distintos objetivos (por ejemplo, quizás el coste de servicios no sea siempre el coste dominante), pero en cualquier caso garantiza una buena red de cambiadores de calor.

Dentro de los métodos secuenciales se pueden distinguir las escuelas aparecidas en los años 60 y 70, de tal manera que entre los métodos basados fundamentalmente en conceptos termodinámicos está el Método de Diseño de Pinch –sin ninguna duda el que más impacto ha tenido- desarrollado por el grupo de Linnhoff: Linnhoff & Hindmarsh (1983); Linnhoff & Ahmad (1990); Ahmad et al. (1990); Linnhoff (1993); los métodos de temperatura dual Colbert (1982); Trivedi et al. (1989); ó los métodos de pseudo-pinch, Rev & Fonyo (1986a, 1986b).

La síntesis secuencial vía programación matemática también resuelve los tres sub-problemas en que se divide el diseño de la red, pero ahora utilizando técnicas rigurosas de optimización. El primer problema: determinación del consumo mínimo de servicios (o bien mínimo coste de servicios) se plantea como un problema lineal (LP del inglés *Linear Programming*) en forma de problema de transporte Cerda et al. (1983) o bien como un problema de trasbordo Papoulias & Grossmann (1983) que permiten además incluir restricciones adicionales para la transferencia de energía entre corrientes. Una vez que se ha obtenido el objetivo de determinar los mínimos servicios el problema se divide en subredes, separadas por el punto de pinch. El objetivo es entonces minimizar el número de cambiadores de calor necesarios. Este problema se puede resolver como un problema de tipo MILP (del inglés *Mixed Integer Linear Programming*), que sin embargo suele no tener solución única. Gundersen & Grossmann (1990) desarrollaron un modelo que consideraba la transmisión vertical de calor para determinar qué configuraciones podría llevar a menores costes de área. Finalmente, la forma en que los intercambios de calor se deben llevar a cabo (serie, paralelo, en qué orden, con o sin división de corrientes), es decir el diseño final de la red, se puede resolver como un NLP (del inglés *Non Linear Programming*) utilizando una superestructura para determinar el mínimo coste de inversión, Floudas et al. (1986). Todos estos modelos se estudiarán con detalle en capítulos posteriores.

## 1.5. MÉTODOS SIMULTÁNEOS

El objetivo de los métodos de síntesis de RCC utilizando métodos simultáneos es evitar la descomposición en sub-problemas y diseñar la red directamente teniendo en cuenta todas las posibles contribuciones de coste y operación. Prácticamente todos los modelos simultáneos formulan una superestructura (un diagrama que incluye todas las posibles alternativas) y modelan el problema como un MINLP (del inglés *Mixed Integer Non Linear Programming*). El desarrollo de los modelos simultáneos va pues paralelo al desarrollo de técnicas matemáticas que permiten resolver estos problemas y por lo tanto en muchas ocasiones incluyen simplificaciones que tienden a hacer el problema numérico resultante más fácilmente resoluble. Sin embargo, en contra de lo que pudiera parecer, no son modelos “ciegos” en el sentido de que no tienen en cuenta criterios termodinámicos sino que, muchos de ellos introducen conceptos directamente relacionados con la tecnología pinch.

Quizás el primer modelo simultáneo para la síntesis de RCC fue propuesto por Yuan et al. (1989). La superestructura desarrollada en este trabajo tiene el inconveniente de que no permite división ni mezcla de corrientes.

Floudas & Ciric (1989), desarrollaron una superestructura que permitía determinar los intercambios entre corrientes y la red con mínimo coste de forma simultánea combinando el modelo de trasbordo de Papoulias & Grossmann (1983) con la superestructura de Floudas et al. (1986). Este modelo fue posteriormente extendido para incluir también de forma simultánea los costes debidos a los servicios sin tener que utilizar el concepto de intervalo de temperatura Ciric & Floudas (1991). Éste es el primer modelo completo que permite el diseño de una red de cambiadores de calor sin ningún tipo de descomposición y no incluye simplificaciones.

Sin embargo, probablemente el modelo simultáneo que más aceptación ha tenido ha sido el desarrollado por Yee & Grossmann (1990). Este modelo plantea una superestructura por etapas previamente presentada por Yee et al. (1990), en la cual en cada etapa se postula el posible intercambio de calor entre todos los pares posibles de corrientes calientes y frías. El modelo supone que al final de cada etapa la mezcla de corrientes es isoterma. La superestructura elimina algunas alternativas (por ejemplo, el bypass de corrientes) pero

consigue un modelo con sólo restricciones lineales, si bien la función objetivo permanece no lineal. Daichendt & Grossmann (1994a, 1994b) desarrollaron un procedimiento preliminar que permite establecer límites en el objetivo de este MINLP para reducir el esfuerzo computacional. Todos estos modelos también serán estudiados con detalle en capítulos posteriores.

Una excelente revisión del estado del arte en 1994 se puede encontrar en Jezowski (1994a, 1994b).

Desde finales de la década de 1990 hasta ahora, no han aparecido mejoras conceptuales realmente importantes, pero sí se ha puesto gran interés y esfuerzo en aplicar y mejorar diferentes técnicas numéricas y aumentar el grado de detalle y el tipo de problemas que se pueden abordar, presentar ejemplos y aplicaciones industriales, etc. El número de artículos publicados en revistas científicas ha aumentado y parece seguir dicha tendencia. Está fuera del alcance de este capítulo hacer una revisión rigurosa de todos estos avances, algunos de los cuales serán comentados en capítulos posteriores, sin embargo una excelente y reciente revisión ha sido llevada a cabo por Furman & Sahinidis (2002).

Antes de terminar este capítulo, sin embargo conviene resaltar el hecho de que hoy en día la síntesis de redes de cambiadores de calor no es un tema cerrado ni mucho menos. Recientemente Furman & Sahinidis (2001), mostraron que la síntesis de redes de cambiadores de calor es un problema "NP-Hard" en el peor de los sentidos posibles, esto significa que no es posible encontrar un algoritmo que pueda resolver el problema en un tiempo que crezca de forma polinómica con el número de corrientes implicadas (o lo que es lo mismo el tiempo necesario para resolver un problema podría crecer de forma factorial con el tamaño del problema). Algunos de los aspectos todavía no resueltos son los siguientes [Furman & Sahinidis (2002)]:

1. No existe un método que permita determinar la calidad de las soluciones obtenidas por los diferentes métodos heurísticos y sus variantes (como el Diseño Pinch). Por ejemplo, no se sabe si existe alguna técnica de descomposición que garantice que la red obtenida está dentro de un rango determinado del óptimo verdadero o si por el contrario la solución está a órdenes de magnitud de la mejor solución posible.
2. Dado el carácter NP-Hard de los diseños rigurosos, existe la necesidad de desarrollar algoritmos aproximados que funcionen en tiempo polinomial y que puedan, de forma rigurosa garantizar cierta calidad en la solución.
3. A pesar de los recientes avances en los métodos numéricos de optimización todavía es difícil garantizar buenas soluciones, excepto para problemas de tamaño relativamente pequeño. Es necesario desarrollar algoritmos de optimización global más eficientes.
4. La inclusión de los métodos de diseño de RCC se suelen hacer de forma secuencial y 'a parte' del resto del proceso. Sin embargo, se ha demostrado que el diseño simultáneo de la red de cambiadores de calor y del resto del proceso puede llevar a reducciones de coste muy considerables.

## REFERENCIAS

- Ahmad, S., B. Linnhoff and R. Smith. Cost Optimum Heat Exchanger Networks2. Targets and Design for Detailed Capital Cost Models. Computers & Chemical Engineering 14 (7): 751-767. (1990)

- Broeck, T. Economic Selection of Exchanger Sizes. *Industrial & Engineering Chemistry* 36 (1): 64-67. (1944)
- Cerda, J., A. W. Westerberg, D. Mason and B. Linnhoff. Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis -A transportation problem. *Chemical Engineering Science* (38): 373. (1983)
- Ciric, A. R. and C. A. Floudas. Heat Exchanger Network synthesis without decomposition. *Computers & Chemical Engineering* 15: 385. (1991)
- Colbert, R. W. Industrial Heat Exchange Networks. *Chemical Engineering Progress* 78 (7): 47-54. (1982)
- Daichendt, M. M. and I. E. Grossmann. A Preliminary Screening Procedure for MINLP Heat Exchanger Network Synthesis Using Aggregated Models. *Chemical Engineering Research & Design* 72 (A): 357-363. (1994a)
- Daichendt, M. M. and I. E. Grossmann. Preliminary screening procedure for the MINLP synthesis of process systems II. Heat exchanger network. *Computers & Chemical Engineering* 18: 679. (1994b)
- Floudas, C. A. and A. R. Ciric. Strategies for overcoming uncertainties in heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering* 13 (10): 1133. (1989)
- Floudas, C. A., A. R. Ciric and I. E. Grossmann. Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations. *AIChE Journal* 32: 276. (1986)
- Furman, K. C. and N. V. Sahinidis. Computational complexity of heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering* 25 (9-10): 1371. (2001)
- Furman, K. C. and N. V. Sahinidis. A Critical Review and Annotated Bibliography for Heat Exchanger Network Synthesis in the 20th Century. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 41 (10): 2335-2370. (2002)
- Gundersen, T. and I. E. Grossmann. Improved optimization strategies for automated heat exchanger network synthesis through physical insights. *Computers & Chemical Engineering* 16 (6): 503. (1990)
- Gundersen, T. and L. Naess. The synthesis of cost optimal heat exchanger networks: An industrial review of the state of the art. *Computers & Chemical Engineering* 12 (6): 503. (1988)
- Hendry, J. E., D. F. Rudd and J. D. Seader. Synthesis in the Design of Chemical Process. *AIChE Journal* 19 (1): 1-15. (1973)
- Hlavacek, V. Synthesis in the design of chemical processes. *Computers & Chemical Engineering* 2: 67-75. (1978)
- Hohmann, E. C. (1971). Optimum networks for heat exchange. Los Angeles, University of Southern.
- Hwa, C. S. (1965). Mathematical Formulation and Optimization of Heat Exchanger Network Using Separable Programming. Aiche International Chemical Engineering Symposium Series.
- Jezowski, J. 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. (1994a)
- Jezowski, J. 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. (1994b)

- Kesler, M. G. and R. O. Parker (1969). Optimal networks of heat exchange. Chemical Engineering Progress Symposium Series.
- Kobayashi, S., T. Umeda and A. Ichikawa. Synthesis of optimal heat exchange systems. An approach by the optimal assignment problem in Linear Programming. Chemical Engineering Science 26: 1367-1380. (1971)
- Lee, K. F., A. H. Masso and D. F. Rudd. Branch and Bound Synthesis of Integrated process design. Industrial & Engineering Chemical Fundamentals 9: 48-58. (1970)
- Linnhoff, B. Pinch Analysis A State-of-the-Art Overview. Chemical Engineering Research & Design 71 (A): 503-522. (1993)
- Linnhoff, B. and S. Ahmad. Cost Optimum Heat Exchanger Networks. 1. Minimum Energy and Capital using simple models for capital cost. Computers & Chemical Engineering 14 (7): 729-750. (1990)
- Linnhoff, B. and J. R. Flower. Synthesis of Heat Exchanger Networks. I Systematic generation of optimal networks. AIChE Journal 24 (4): 633-642. (1978a)
- Linnhoff, B. and J. R. Flower. Synthesis of Heat Exchanger Networks. II Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality. AIChE Journal 24 (4): 642-654. (1978b)
- Linnhoff, B. and E. Hindmarsh. The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks. Chemical Engineering Science 38 (5): 754-763. (1983)
- Masso, A. H. and D. F. Rudd. The synthesis of system design: II. Heuristic structuring. AIChE Journal 15: 10-17. (1969)
- McGilliard, R. L. and A. W. Westerberg. Structural Sensitivity Analysis in Design Synthesis. Chemical engineering Journal 4: 127-138. (1972)
- Menzies, M. A. and A. I. Johnson. Synthesis of optimal energy recovery networks using discrete methods. Canadian Journal Of Chemical Engineering 50: 290-296. (1972)
- Nishida, N., S. Kobayashi and A. Ichikawa. Optimal Synthesis of Heat Exchange Systems. Necessary conditions for heat minimum transfer area and their application to systems synthesis. Chemical Engineering Science 26: 1841-1856. (1971)
- Nishida, N., G. Stephanopoulos and A. W. Westerberg. A review of Process Synthesis. AIChE Journal 27 (3): 321-351. (1981)
- Papoulias, S. A. and I. E. Grossmann. A structural optimization approach in process synthesis. Part II: Heat recovery networks. Computers & Chemical Engineering (7): 707. (1983)
- Pho, T. K. and L. Lapidus. Topics in Computer Aided Design II. Synthesis of optimal heat exchanger networks by tree searching algorithms. AIChE Journal 19: 1182-1189. (1973)
- Ponton, J. W. and R. A. B. Donaldson. A fast method for the synthesis of heat exchanger networks. Chemical Engineering Science 29: 2375-2377. (1974)
- Rev, E. and Z. Fonyo. Additional Pinch Phenomena Providing Improved Synthesis of Heat Exchange Networks. Hungarian Journal of Industrial Chemistry 14: 181-201. (1986a)
- Rev, E. and Z. Fonyo. Hidden and Pseudo Pinch Phenomena and Relaxation in the Synthesis of Heat-Exchange Networks. Computers & Chemical Engineering 10 (6): 601-607. (1986b)
- Rudd, D. F. The synthesis of systems design: I. Elementary decomposition theory. AIChE Journal 14: 343-349. (1968)

Trivedi, K. K., B. K. O'Neill and J. R. Roach. Synthesis of Heat Exchanger Networks Featuring Multiple Pinch Points. *Computers & Chemical Engineering* 13 (3): 291-294. (1989)

Umeda, T., J. Itoh and K. Shiroko. Heat exchange system synthesis. *AIChE Journal* 74 (7): 70-76. (1978)

Westbrook, G. T. Use this method to size each stage for best operation. *Hydrocarbon Processing Petroleum Refining*. 40: 201-206. (1961)

Yee, T. F. and I. E. Grossmann. Simultaneous optimization models for heat integration II. Heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering* 14 (10): 1165-1184. (1990)

Yee, T. F., I. E. Grossmann and Z. Kravanja. Simultaneous optimization models for heat integration I. Area and energy targeting and modeling of multi-stream exchangers. *Computers & Chemical Engineering* 14 (10): 1151-1164. (1990)

Yuan, X., L. Pibouleau and S. Domenech. Experiments in process synthesis via Mixed Integer Programming. *Chemical Engineering Process*. 25 (2): 99-116. (1989)