

# PROPUESTA DE UNA RED DE INTERCAMBIO DE CALOR PARA UNA UNIDAD DE TOPPING APLICANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

E. CASTILLO., A. URIBE., F. AVILA

Centro de Simulación y Control de Procesos Químicos, Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia

e-mail: efcastil@uis.edu.co, auriber@andinet.com, freebad14@yahoo.com.mx

---

## RESUMEN

En este trabajo se utiliza un algoritmo de diseño que aplica los algoritmos genéticos (AG) para hacer la síntesis óptima económica de las redes de intercambio de calor (HEN) de ocho casos de estudio *grassroot* comparando las soluciones obtenidas con las publicadas en la literatura. El último caso es una unidad de Topping. En el algoritmo de diseño se implementan dos algoritmos genéticos acoplados, uno externo para buscar la estructura óptima económica y uno interno para optimizar la combinación de fracciones de división de corrientes en cada red evaluada. El algoritmo de diseño tiene la limitación de tener en cuenta un solo tipo de servicio industrial frío y un solo tipo de servicio caliente.

---

## INTRODUCCIÓN

Uno de los componentes más importantes en los sistemas de procesamiento químico es la red de intercambio de calor. Su diseño determina en gran medida la eficiencia energética del proceso. Se puede decir que en una red de intercambio de calor hay un conjunto de corrientes frías cada una a su temperatura de suministro inicial que deben ser calentadas hasta su temperatura de destino final a la cual se requieren para efectos posteriores en el proceso; por otro lado hay un conjunto de corrientes calientes cada una también a su temperatura de suministro inicial, pero esta vez deben ser enfriadas hasta su temperatura de destino final. Esto nos define que una corriente fría es toda aquella corriente del proceso que necesite ser calentada, mientras que una corriente caliente es toda aquella que necesite ser enfriada. El problema es entonces determinar la red de intercambio de calor que

lleva todas las corrientes del proceso hasta sus temperaturas de destino, minimizando los costos totales.

Para diseñar la red (síntesis) de mínimo costo total anual, se ha trabajado a través de tres líneas diferentes: Programación Matemática, Aproximaciones Termodinámicas y Técnicas de Inteligencia Artificial (IA). Dentro de las aproximaciones matemáticas hay dos metodologías de síntesis: Secuencial y Simultánea, en la primera de ellas una red óptima o cercana al óptimo debe cumplir con tres objetivos: el primero que presente mínimo consumo de servicios industriales (o máxima recuperación de energía), planteando un modelo LP (Linear Programming); el segundo que tenga mínimo número de unidades de intercambio de calor, modelo MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) y finalmente que presente mínimo costo de inversión, modelo NLP (*Non Linear Programming*). Es probable que haya conflicto entre estos objetivos, debido

a que el primero tiene precedencia sobre el segundo y el segundo sobre el tercero. De esta manera primero se determinan las redes candidatas que tengan un mínimo consumo de servicios, entre ellas aquellas que tengan mínimo número de unidades de intercambio de calor y finalmente, de estas, las que tengan un mínimo costo de inversión. Por esta razón es muy fácil que durante la optimización se encuentren óptimos locales y no se pueda escapar de ellos. Los modelos anteriores se resuelven para un valor dado de HRAT (*Heat Recovery Aproximation Temperature*), esto indica que esta debe conocerse por un procedimiento externo a la formulación del modelo. La síntesis simultánea pretende llegar a todos los objetivos a la vez y además el valor de HRAT también es un parámetro a optimizar. Su principal desventaja está en que presenta problemas de convergencia y también en algunos casos puede quedar atrapado en óptimos locales.

Del análisis de la primera y segunda ley de la termodinámica surgen el análisis exergético de procesos, la termoeconomía y las tecnologías *Pinch*. Esta última es más aplicada a la síntesis HEN. La metodología de diseño *Pinch*, primero usa el objetivo de mínimo consumo de energía, fijando los requerimientos de servicios y localizando el punto *Pinch*. Luego el problema se divide en dos subredes: una arriba (a temperaturas superiores) y la otra abajo (a temperaturas inferiores) del punto *Pinch*. Se prohíbe que se aplique servicio industrial frío en la subred superior, que se aplique servicio caliente en la inferior y que haya intercambio de calor a través del punto *Pinch* porque todas estas características aumentan el consumo de servicios industriales. Cada subred se sintetiza usando los criterios *Pinch* en las parejas cercanas a este punto y criterios del diseñador y reglas heurísticas para el resto de cada subred, por esta razón, es muy fácil que la red obtenida no sea la óptima (mínimo costo). Finalmente se realiza la evolución de la red hacia un mínimo de unidades de intercambio de calor por medio de la ruptura de ciclos y el reestablecimiento de rutas.

En este trabajo se aplica una técnica IA novedosa, los algoritmos genéticos (AG), para realizar el diseño óptimo económico de redes de intercambio de calor. Los AG's y en general los

algoritmos evolutivos (AE) son procesos iterativos y estocásticos que operan sobre un conjunto de individuos tratando de imitar la evolución dada en la naturaleza aplicando algunos principios de genética.

Cada individuo representa una solución potencial al problema que se intenta resolver. Esta solución es obtenida por medio de un mecanismo de codificación – decodificación. Inicialmente la población es generada al azar (o se pueden emplear reglas heurísticas). A cada individuo dentro de la población se le asigna una medida de que tan bueno es su desempeño con respecto al problema por medio de la función de aptitud (que está relacionada con la función objetivo). Esta medida es la información cuantitativa que el algoritmo usa para guiar la búsqueda y en unión con los operadores genéticos hacen que los individuos (posibles soluciones) evolucionen mejorando el valor de la función de aptitud.

Los AG's no se ven afectados por la diferenciabilidad o continuidad de la función objetivo; son muy útiles y surgen como alternativa a los métodos numéricos tradicionales en situaciones donde se esté modelando bajo incertidumbre porque la información es escasa e imprecisa, en casos donde no se conoce con exactitud el comportamiento de la función objetivo o en situaciones donde tiene un comportamiento ruidoso. Son resistentes a quedar atrapados en óptimos locales por que se encargan de encontrar buenas regiones y no buenos puntos dentro del espacio de búsqueda; esto gracias a que examina varios puntos (individuos) en cada iteración (generación). Entre sus desventajas tenemos que la función objetivo debe ser evaluada un gran número de veces; requiere de la sintonización de parámetros (probabilidad de cruce y de mutación, tamaño de la población y número de generaciones) y el mecanismo de codificar – decodificar las soluciones a veces no es una tarea fácil.

En este trabajo se propone un conjunto de topologías básicas para la HEN del tren de precalentamiento en una unidad de Topping. Estas topologías son el resultado de la minimización del costo total a través de un algoritmo de diseño que usa los AG's como herramienta de optimización.

**ALGORITMO DE DISEÑO**

En este trabajo se utiliza un Algoritmo de Diseño que aplica los Algoritmos Genéticos para hacer la síntesis óptima económica de las redes de intercambio de calor de ocho casos de estudio, el último de los cuales es una unidad de Topping. En el algoritmo de Diseño se implementan dos algoritmos genéticos acoplados, uno externo para hacer la búsqueda de la red de intercambio de calor óptima económica y uno interno donde se optimiza la combinación de fracciones de división de corrientes en cada red evaluada si se presenta. El algoritmo de Diseño tiene la limitación de tener en cuenta un solo tipo de servicio industrial frío y un solo tipo de servicio industrial caliente. Además solo considera división de corrientes en un máximo de dos ramas.

El Algoritmo de Diseño se muestra en la Figuras 1, 2, 3 y 4. Inicialmente se ejecuta un procedimiento para obtener el valor del  $\Delta T_{min}$  (Figura1). Luego se procede a la síntesis económica propiamente dicha (Figura 2). Los ciclos del AG externo e interno se muestran en las Figuras 3 y 4.

El algoritmo de Diseño se implementó en *MatLab 5.3™* con una interfase con Excel 97 para ingresar los datos y para obtener los resultados.

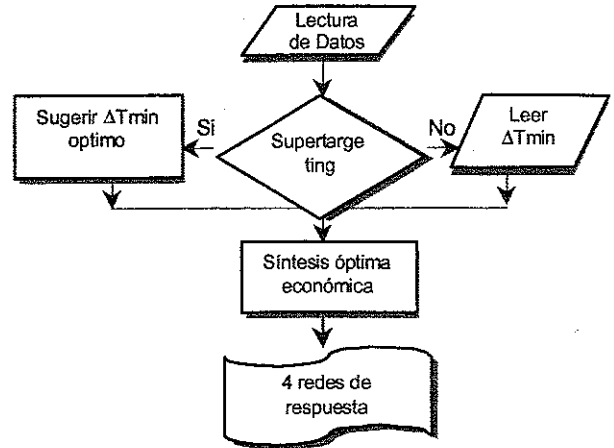


FIGURA 1. Diagrama de Flujo Global

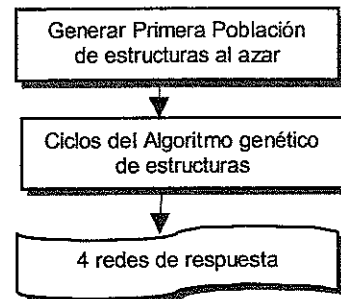


FIGURA 2. Síntesis Óptima Económica

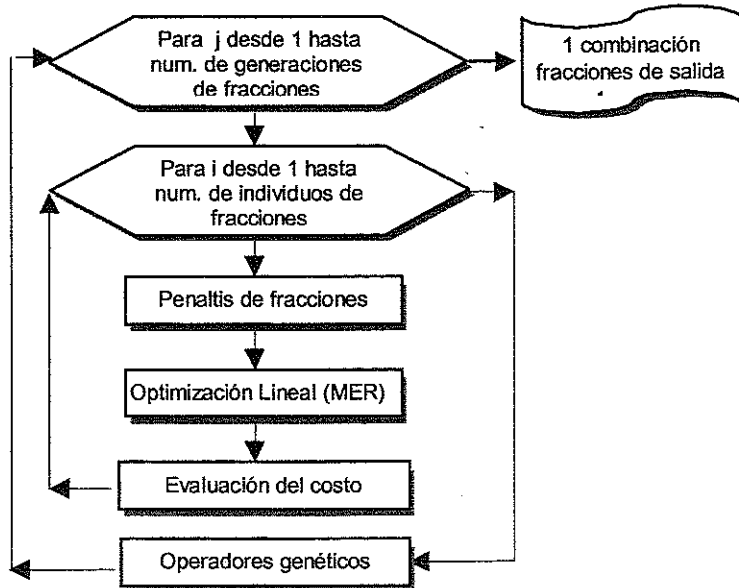


FIGURA 3. Ciclos del AG Interno

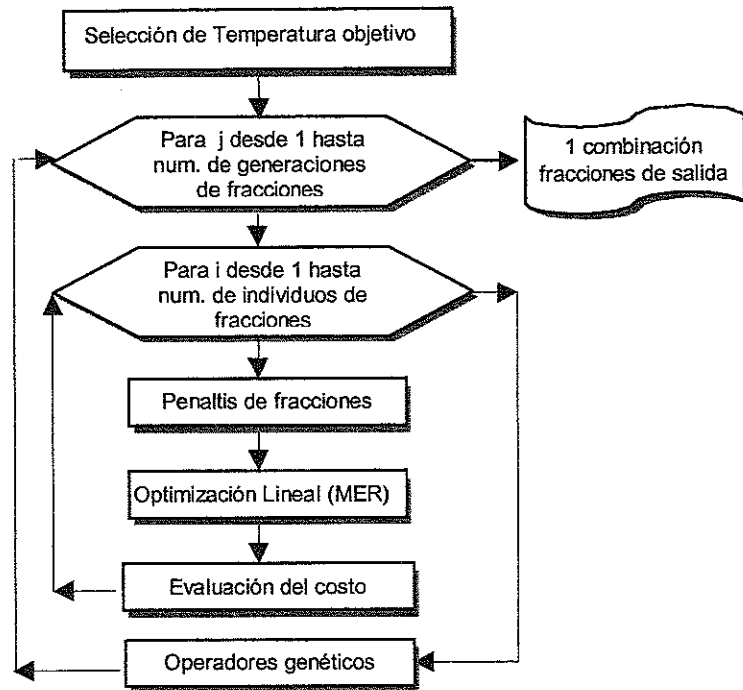


FIGURA 4. Ciclos del AG Externo

**PARÁMETROS DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS**

El desempeño del AG depende principalmente de cómo se codifican las posibles soluciones, de la evaluación de la función objetivo a partir de los individuos codificados y los parámetros que guían la evolución.

En este trabajo se utilizó la codificación propuesta por Lewin, 1998 para las estructuras de las redes de intercambio de calor. Para el AG interno se usó codificación binaria para representar los valores de división de corrientes de toda la red. La evaluación de la función objetivo (costo total anual de la red) consta de un paso intermedio que consiste en maximizar la recuperación de energía (MER), el cual es un modelo lineal (Lewin, 1998) que se resuelve con la rutina LP de *MatLab™*.

Los parámetros utilizados para esta aplicación específica se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. Parámetros del AG.

	Algoritmo Genético	
	Externo	Interno
Codificación	Entera	Binaria
Mutación variable (% generaciones)*	0.8→0.01 (25 %)	0.8→0.15 (50 %)
Tipo de Cruce	Un punto	Uniforme
Tasa de Cruce	0.60	
Tamaño Población	14	6
Número Generaciones	100	15
Selección de Padres	Torneos	Ruleta
Técnica de Reemplazo	Combinación Estado Estable – Elitismo	

\*Variación lineal durante las primeras generaciones hasta el % mostrado. Luego se mantiene constante en el valor final (Androulakis, 1991).

Una descripción sobre los parámetros anteriores se puede encontrar en Winter, CEANI Research Group, 2000.

## RESULTADOS

En seis de los ocho casos de estudio se mejoró con respecto a trabajos anteriores en los cuales se han aplicado diferentes metodologías como programación matemática, tecnologías *Pinch*, combinaciones entre ellas y también optimización estocástica. En los dos casos cuyos resultados no mejoraron, las redes de referencia con las que se comparó presentan algunas anomalías que se muestran en la Tabla 3; corrigiendo esos errores, la red de referencia tiene un costo igual (Caso 5) o mayor (caso 6) al

obtenido en este trabajo. El caso que presentó mejores resultados fue el caso 3 que además es el ejemplo de mayor número de corrientes que se trabajó

En el caso Topping (Caso 8) se presenta una disminución en el costo del 2.15% con respecto al trabajo anterior (optimización simultánea utilizando GAMS). Por una comparación más específica (Tabla 4) se puede decir que la red de este trabajo tiene mayor consumo de servicios pero un intercambiador menos así como también menor área total de intercambio de calor y entonces menores costos de capital.

**TABLA 2.** Fuentes Bibliográficas para los casos de estudio.

Caso	Referencia Bibliográfica
1	LEWIN DANIEL R, WANG HAO, OFIR SHALEV. A Generalized Method for HEN Synthesis using stochastic optimization - II. The Synthesis of Cost-Optimal Networks. Case Study B. En: <i>Comp. &amp; Chem. Eng. Great Britain</i> . Vol. 22, No. 10, 1998; p. 1395-1396
2	LEWIN DANIEL R, WANG HAO, OFIR SHALEV. A Generalized Method for HEN Synthesis using stochastic optimization - II. The Synthesis of Cost-Optimal Networks. Case Study C. En: <i>Comp. &amp; Chem. Eng. Great Britain</i> . Vol. 22, No. 10, 1998; p. 1399
3	LEWIN DANIEL R, WANG HAO, OFIR SHALEV. A Generalized Method for HEN Synthesis using stochastic optimization - II. The Synthesis of Cost-Optimal Networks. Case Study D. En: <i>Comp. &amp; Chem. Eng. Great Britain</i> . Vol. 22, No. 10, 1998; p. 1400 Propuesto primero en: SANDVIG, J., WEEL, M. Y KIRSTENSEN, K. Retrofit and Optimisation of Industrial Heat Exchanger Networks : A Complete Benchmark Problem. En: <i>Computer Chem. Engng. Great Britain</i> . Vol. 21, suppl., 1997; p. S469 - S474
4	ZHU X. Automated Design Method for Heat Exchanger Network Using Block Decomposition and Heuristic Rules. Example 1. En: <i>Comp. &amp; Chem. Eng. Great Britain</i> . Vol. 21, No. 10, 1997; p. 1100.
5	ZHU X. Automated Design Method for Heat Exchanger Network Using Block Decomposition and Heuristic Rules. Example 2. En: <i>Comp. &amp; Chem. Eng. Great Britain</i> . Vol. 21, No. 10, 1997; p. 1101.
6	ZHU X. O'NEILL B.K. A Method for Automated Heat Exchanger Network Synthesis Using Block Decomposition and Non-Linear Optimization. Case Study I. En: <i>Trans IChemE. Great Britain</i> . Vol. 73, Part A, November 1995; p. 922.
7	CASTILLO E., ACEVEDO L., REVERVERI A. Cleaner Production of Nitric Acid by Heat Transfer Optimization: A case study. En: <i>Chem. Biochem. Eng. Q.</i> Vol. 12, No.3, 1998; p. 157-165.
8	MAHECHA C, MORA M. Trabajo académico Maestría Ingeniería Química Universidad Industrial de Santander.

TABLA 3. Resultados Obtenidos para los Ocho Casos de Estudio

Caso	Corrientes de Proceso		Costo [U\$/año]		
	Frías	Calientes	Otros Trabajos	Algoritmo Genético	% Mejoría
1	5	4	2.936.000,00	2.904.385,93	1,08
2	5	5	43.751,00	43.630,59	0.28
3	10	11	160.983.694,52 [DDK/año]	137.390.374,46 [DDK/año]	17.17
4	2	2	1.600.000,00	1.594.556,55	0.34
5	2	3	46.551,00 *	49.617,06	-6.58
6	2	2	80.815,00 **	80.848.40	-0.04
7	5	6	120.034,43	113.323,06	5.60
8	3	6	25.070.000,00	24.541.086,55	2.15

\* La red óptima que Zhu presenta en este caso no cumple el  $\Delta T_{\min}$  de 36 K, puesto que hay un intercambiador con 4 K de potencial de temperatura en uno de sus extremos. Tampoco cumple el balance de energía de la corriente H2. Corrigiendo estos defectos el costo da 49.617,08 casi igual al obtenido en este trabajo

\*\* En este otro caso la red óptima de Zhu presenta *crisscross* en uno de los intercambiadores. También quebranta la restricción del  $\Delta T_{\min}$  en otro de los intercambios. Corrigiendo estos defectos se tiene un costo de 84.178,74

TABLA 4. Comparación Caso Topping con respecto a la Red de Referencia

	Red de Referencia	Red Obtenida	Cambio
Ramas (No. Divisiones)	2(2)	2(1)	- 1 división
Energía Recuperada [MMBTU/h]	299.50	266.21	-12.5%
$Q_H$ Total [MMBTU/h]	238	267.29	+10.96%
$Q_C$ Total [MMBTU/h]	213	246.27	+13.51%
Area Total [pies <sup>2</sup> ]	240 152.00	217 699.07	-10.31%
Unidades	12	11	-1 unidad
Costo Operación [MMU\$/año]	8.29	9.33	+11.14%
Costo Inversión [MMU\$/año]	16.78	15.21	-10.32%
Costo Total [MMU\$/año]	25.07	24.54	-2.15%

## CONCLUSIONES

- La mejor red que se obtuvo para el caso de estudio 8: Tren de Precalentamiento para Topping, tiene un costo de 24.541.086,55U\$/año. Esta red presenta una variación en el costo (sensibilidad) apreciable

principalmente para dos parámetros: el costo del servicio caliente y el exponente de economía de escala. Reducir el costo del servicio caliente en un 10% reduce el costo total en un 3.5%. Una reducción en el factor de economía de escala del 10% presenta una reducción del 39 % en el costo total.

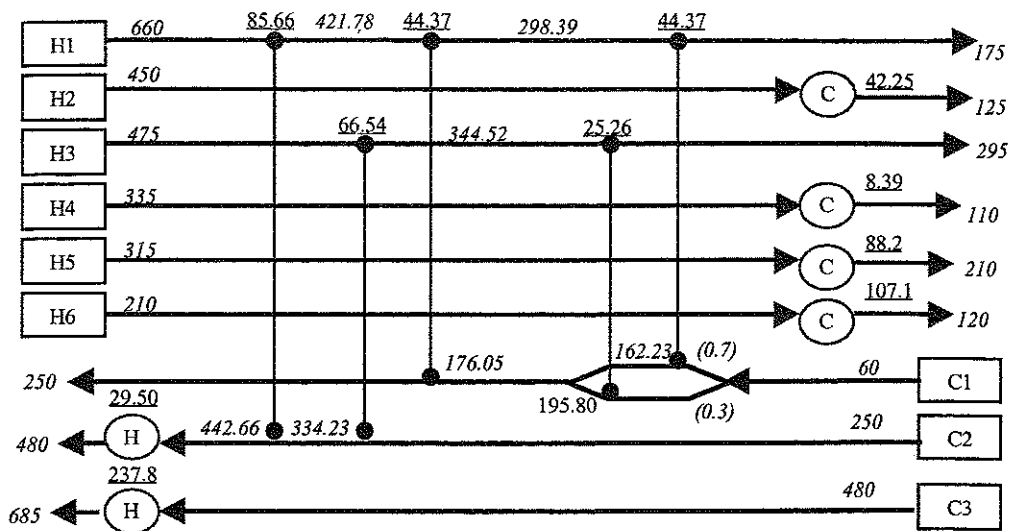


FIGURA 5. Red de Mejor Costo Caso de Estudio 8. (Temperaturas en °F)

- El Algoritmo genético propuesto se desempeña muy bien para problemas de síntesis HEN con numerosas corrientes (aproximadamente más de cinco corrientes de proceso totales) mejorando su costo notoriamente, mientras que para problemas pequeños el resultado permanece cercano al obtenido en trabajos anteriores (ver Tabla 3). El algoritmo genético y su tiempo de cómputo se justifican en problemas grandes en los cuales se mejora notablemente con respecto a trabajos anteriores.
- De las dos técnicas de selección de padres del algoritmo genético se pudo observar que la Ruleta funciona mejor cuando no se clonan los mejores individuos en la siguiente generación (Individuos élite), mientras que torneos trabaja mejor cuando se emplean individuos élite. Esto se debe a que la ruleta presenta el riesgo de ser dominada por un super individuo (óptimo local) rápidamente, riesgo que se incrementa cuando se usan individuos élite; por otro lado torneos es de carácter débil presentando la tendencia de perder buenos genes de generación en generación, el uso de individuos elite disminuye esa pérdida.
- Los parámetros obtenidos para los AGs se escogieron variando cada uno de ellos y observando su comportamiento. Por esta razón se puede concluir que los parámetros usados en esta trabajo se desempeñan bien solo en el caso de la síntesis óptima económica de redes de intercambio de calor.
- De las cuatro estrategias de reemplazo y sus combinaciones se comprobó que para la síntesis óptima económica de redes de intercambio de calor y los parámetros utilizados en este trabajo la mejor estrategia de reemplazo para el algoritmo genético es un híbrido entre el elitismo y estado estable con selección de padres por torneos y cuatro individuos élite (Tipo 2, Tabla 4). Esta estrategia fue la mejor en cinco de los ocho casos estudiados. También se obtuvieron buenos resultados con la Estrategia de reemplazo por elitismo tanto por torneos como por ruleta (Tipo 7 y 8. Tabla 4). Se obtuvieron resultados muy malos con reemplazo en estado estable, selección por ruleta sin individuos élite.
- Siempre que se utilice una ecuación de costos lineal (exponente de economía de escala igual a la unidad), es necesario tener un valor de costo fijo del intercambiador para que el Algoritmo Genético converja a redes de mínimo número de unidades. En el caso en que el costo fijo sea nulo se convergerá a redes de mínimo número de unidades solo si

el factor de economía de escala es menor que 1.

- En todos los casos la ruptura de ciclos y el reestablecimiento de rutas aumentó el costo de la red obtenida por el algoritmo genético. Esto significa que generalmente con el algoritmo genético no se requiere el diseño evolutivo posterior de la red.

## ABSTRACT

A design algorithm that applies the genetic algorithms (GA) for desing optimun synthesis of heat exchangers networks is used in this work. Eight literature examples are reviewed comparing their solutions with those of the new method. Two coupled genetic algorithms are implemented in the design algorithm.

## BIBLIOGRAFÍA

1. P. Ampudia, Diseño de mezclas solventes utilizando algoritmos genéticos, Tesis de Magister, Universidad del Valle, 74 p, Santiago de Cali, 1999.
2. I. P. Androulakis, V. A. Venkatasubramanian, Genetic algorithmic framework for process design and optimization, *Computers and Chemical Engineering*, 15 (4): 217 - 228, 1991.
3. S. Ahmad, B. Linnhoff, Cost optimum heat exchanger networks - 1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost, *Computers and Chemical Engineering*, 14 (7): 729 - 750, 1990.
4. Supertargeting: Optimum synthesis of energy management systems, *ASME Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 111: 121-130, 1989.
5. Supertargeting: Different process structures for different economics, *ASME Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 111: 131-133, 1989.
6. S. Ahmad, B. Linnhoff, R. Smith, Cost optimum heat exchanger networks - 2. Targets and design for detailed capital cost models, *Computers and Chemical Engineering*, 14 (7): 751 - 767, 1990.
7. L. Biegler, I. Grossman, A. Westerberg, *Systematic Methods of Chemical Processing Design*, Prentice-Hall, 341-386 , 527-566, 1997.
8. E. Castillo, L. Acevedo, A. Reververri, Cleaner production of nitric acid by heat transfer optimization: a case study, *Chem. Biochem. Eng. Q*, 12 (3): 157-165, 1998.
9. M. Cerrolaza, W. Annicchiarico, Algoritmos de Optimización basados en Simulación Genética, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, 45 - 66, Caracas, 1996.
10. A. R. Ciric, C. A. Floudas, Heat exchanger network synthesis without decomposition, *Computers and Chemical Engineering*, 15 (6): 385 - 396, 1991.
11. Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations, *AIChE Journal*, 32 (2): 276 - 290, 1986.
12. J. Chiou, F. Wang, Hybrid method of evolutionary algorithms for static and dynamic optimization problems with application to a fed-batch fermentation process, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 23: 1277 - 1291, 1999.
13. M. Daichendt, E. Grossmann, Preliminary screening procedure for the MINLP synthesis of process systems - II. Heat exchangers networks, *Computers and Chemical Engineering*, 18 (8): 679 - 709, 1994.
14. Enciclopedia Autodidáctica Interactiva Océano, Barcelona: MM Océano Grupo Editorial, S.A, Vol. 5: 1254-, Barcelona.
15. J. Frenzel, Genetic Algorithms, A New Breed of Optimization, *IEEE*, 21-24, Octubre 1993.
16. C. A. Floudas, A. Ciric, I. E. Grossmann, Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations, *AIChE Journal*, 32 (2): 276-290, 1986.
17. D. Golberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley Longman, Inc., 1-25, 1989.
18. T. Gundersen, L. Naess, The synthesis of cost optimal heat exchanger networks. An industrial review of state of the art, *Computers and Chemical Engineering*, 12 (6): 503 - 530, 1988.
19. S. Kirkpatrick, C. Gelatt, P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science*, 220 (4598): 671-680, 1983.
20. D. R. Lewin, H. Wang, O. Shalev, A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization - I. General framework and MER optimal synthesis,



- Computers and Chemical Engineering, 22 (10): 1503 - 1513, 1998.
21. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization - II. The synthesis of cost optimal networks, Computers and Chemical Engineering, 22 (10): 1387 - 1405, 1998.
  22. B. Linnhoff, E. Hindmarsh, The pinch design method for heat exchanger networks, Chemical Engineering Science, 38 (5): 745-763, 1983.
  23. G. Martínez, M. Sánchezllanes, Aplicación de la metodología de punto de pliegue al tren de producción de gasolina en una refinería de México, ISCAPE 2000. (1° : Enero 2000: Cartagena de Indias, Colombia), Abstracts del first international symposium on Computer Aided Process Engineering, Publicaciones UIS, Bucaramanga, 2000.
  24. Aplicación de la metodología de secuencia indirecta para acoplamiento térmico en una planta combinada como base para el análisis de punto de pliegue, ISCAPE 2000. (1° : Enero 2000: Cartagena de Indias, Colombia). Abstracts del first international symposium on Computer Aided Process Engineering, Publicaciones UIS, Bucaramanga, 2000.
  25. J. J. Martínez, Fundamentos de algoritmos genéticos. II Congreso Colombiano de Neurocomputación. (Noviembre 1997: Bogotá, Colombia), Universidad Nacional de Colombia, : 1-43, Bogotá, 1997.
  26. I. Quesada, E. Grossmann, Global optimization algorithm for heat exchanger networks, Industrial Engineering Chemical Research, Vol. 32: 487-499, 1993.
  27. S. Recalde, R. Lopez, La Gran Industria Química. Parte Combustibles, Artes Gráficas Grijelmo S.A, Vol. 6: 16-17, 21, 26-27, 1955.
  28. J. Sandvig, M. Weel, K. Kirstensen, Retrofit and optimisation of industrial heat exchanger networks: a complete benchmark problem, Computer Chemical Engineering, Vol. 21: S469-S474, Great Britain, 1997.
  29. P. Stanley, Petroleum Accounting Practices, McGraw Hill, : 404-408, New York, 1965.
  30. S. Vásquez, R. Mancilla, Retrofit design of heat exchanger networks using simple mathematical models. ISCAPE 2000. (1° : Enero 2000 : Cartagena de Indias, Colombia). Abstracts del first international symposium on Computer Aided Process Engineering, Publicaciones UIS, Bucaramanga, 2000.
  31. O. Vélez, Aplicación de los algoritmos genéticos en problemas de optimización combinatoria, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, : 172 p, Bucaramanga, 1999.
  32. G. Winter, CEANI Research Group <http://193.145.133.128/funcional/art/Documento%20Gabriel/index.htm>
  33. T. F. Yee, E. Grossmann, Z. Kravanja, Simultaneous optimization models for heat integration - I. Area and energy targeting and modeling of multi-stream exchangers, Computers and Chemical Engineering, 14 (10): 1151-1164, 1990.
  34. T. F. Yee, E. Grossmann, Simultaneous optimization models for heat integration - II. Heat exchanger network synthesis, Computers and Chemical Engineering, 14 (10): 1165-1184, 1990.
  35. J. Yen, D. Randolph, J. Liao, B. Lee, Hybrid Approach to Modeling Metabolic Systems Using Genetic Algorithm and Simplex Method, IEEE, : 277-283, 1995.
  36. X. Zhu, Automated design method for heat exchanger network using block decomposition and heuristic rules, Computers and Chemical Engineering, 21 (10): 1095 -1104, 1997.
  37. X. Zhu, B. O'Neill, A Method for Automated Heat Exchanger Network Synthesis Using Block Decomposition and Non-Linear Optimization, Trans I ChemE, 73 part A: 919-930, 1995.