

Automatización y optimización del diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza mediante el método de Taborek

Automatization and optimization of shell and tube heat exchangers design using the method of Taborek

Maida Bárbara Reyes-Rodríguez^I, Jorge-Laureano Moya-Rodríguez^I,
Oscar-Miguel Cruz-Fonticiella^I, Eduardo-Miguel Fírvida-Donéstevez^I,
José-Alberto Velázquez-Pérez^{II}

I. Universidad Central de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Villa Clara. Cuba
Correo electrónico: maidab@uclv.edu.cu

II. Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica-Eléctrica. Xalapa. Veracruz. México

Recibido: 31 de agosto de 2013 18 de diciembre de 2013

Resumen

Los intercambiadores de calor del tipo de coraza y tubo constituyen la parte más importante de los equipos de transferencia de calor sin combustión en las plantas de procesos químicos. Existen en la literatura numerosos métodos para el diseño de Intercambiadores de calor de tubo y coraza. Entre los más conocidos se encuentran el Método de Kern, el Método de Bell Delaware, el Método de Tinker, el Método de Wills and Johnston y el Método de Taborek. El presente trabajo tiene como objetivo describir y automatizar el método de Taborek. Se realiza además la optimización del Costo del Intercambiador de Calor mediante el método de Recocido Simulado y el método de los algoritmos genéticos. Se puede concluir que la optimización por ambos métodos arroja resultados similares, disminuyendo apreciablemente el costo del intercambiador optimizado.

Palabras claves: optimización, intercambiadores de calor, método de Taborek, algoritmos genéticos.

Abstract

Shell and tube heat exchangers are the most important equipment for heat transfer without combustion in plants of chemical processes. There are many methods for designing shell and tube heat exchangers in literature. Among the most known are the Kern's Method, the Method of Bell Delaware, the Method of Tinker, the Method of Wills and Johnston and the Method of Taborek. The objective of this paper is to describe and automate the Taborek's method. It is also realized and optimization of the heat exchanger cost using the genetic algorithm and Simulated Annealing. It can be concluded that the optimization using both methods conduces to similar results, diminishing considerably the optimized exchanger cost.

Key words: optimization, Heat Exchangers, Taborek, Genetic Algorithms.

Introducción

Los intercambiadores de calor (ICs) están presentes en la mayoría de los sistemas térmicos complejos de las industrias y representan el vehículo más ampliamente usado para la transferencia de calor en las aplicaciones de los procesos industriales [1]. Ellos son seleccionados para servicios tales como: enfriamiento de líquidos o gases, procesos donde se condensen vapores de refrigerantes o condensación de vapor de agua, procesos de evaporación de refrigerantes agua u otros líquidos; procesos de extracción de calor y calentamiento regenerativo del agua de alimentación a calderas; para la recuperación del calor en efluentes gaseosos y líquidos residuales calientes, para el enfriamiento de aire y aceite de lubricación en compresores, turbinas y motores, mediante camisas de enfriamiento y muchas otras aplicaciones industriales [2].

En los últimos años se vienen realizando diversas investigaciones con respecto a estos equipos. Zahid H. [3] desarrolló un nomograma muy sencillo para evaluar el coeficiente de transferencia de calor en intercambiadores de calor de tubo y coraza. Este método es muy práctico, pero realmente no tiene grandes aportes desde el punto de vista científico y por otra parte solamente se puede obtener el coeficiente de transferencia de calor en el lado de la coraza. Vera García *et al* [4] desarrollaron un modelo simplificado para el estudio de intercambiadores de calor de tubo y coraza. A pesar de su simplicidad, el modelo demuestra ser útil para el diseño preliminar de intercambiadores de calor de tubo y coraza que trabajan en los sistemas de refrigeración completos y complejos. Simin Wang, JianWen y, Yanzhong Li [5] realizaron un estudio experimental para mejorar la transferencia de calor en intercambiadores de calor de tubo y coraza.

Con el fin de aumentar la transferencia de calor se mejoró la configuración de un intercambiador de calor de tubo y coraza a través de la instalación de sellos en el lado de la coraza. Las holguras entre las placas de los deflectores y la cáscara son bloqueadas por los sellos, lo que disminuye con eficacia el flujo de cortocircuito (bypass) en el lado de la cáscara.

Jiang feng Guo, Ming tian Xu, y Lin Cheng [6] en el año 2009 aplicaron un nuevo concepto denominado "número del campo sinérgico" para realizar la optimización de intercambiadores de calor de tubo y coraza de deflectores segmentados. Este concepto lleva implícito dentro de sí varios criterios de optimización. En este caso los autores tomaron el campo de velocidad y el flujo de calor y usaron el método de los algoritmos genéticos para resolver el problema de la optimización.

Para analizar la transferencia de calor en el lado de la coraza utilizaron el método de Bell Delaware. Este trabajo tiene el mérito de introducir un nuevo concepto para optimizar intercambiadores de calor, sin embargo no profundiza en otros criterios de optimización y usa uno de los métodos más antiguos para calcular la transferencia de calor en el lado de la coraza. David Butterworth [7] en el año 2001 introdujo en el diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza la influencia de la temperatura local y de la velocidad en el grado de ensuciamiento o incrustamiento. El autor señala que la resistencia al ensuciamiento se considera por la mayoría de los diseñadores como una constante, lo cual es erróneo. No se abordan aspectos de optimización ni de métodos de cálculo.

M. Fesanghary, E. Damangir e I. Soleimani [8] utilizan el método de análisis de la sensibilidad global mediante un algoritmo armónico de búsqueda para realizar la optimización de intercambiadores de calor de tubo y coraza. Éste es un método metaheurístico de búsqueda de solución de un problema. Utilizan el método de Bell Delaware y optimizan tanto el costo de inversión como de operación. Los autores plantean que este método de búsqueda de la solución es más efectivo que el de los algoritmos genéticos. V.K. Patel y R.V. Rao [9] plantean que los intercambiadores de calor de tubo y coraza (ICs) son el tipo más común en los procesos industriales. Además, mencionan que la minimización del costo de estos equipos es un objetivo clave para diseñadores y usuarios. Debido a la construcción y funcionamiento de dichos equipos, el diseño de los mismos involucra procesos complejos para la selección de parámetros geométricos y de operación. Destacan que el enfoque tradicional de diseño de estos equipos involucra la valoración de diferentes geometrías de los mismos, para identificar aquellas que satisfagan una capacidad calorífica dada y un conjunto de restricciones geométricas y de operación.

El objetivo del presente trabajo es explicar y automatizar el método de Taborek y se realizará la optimización de los intercambiadores de calor de tubo y coraza, minimizando el costo a través de los algoritmos genéticos y el recocido simulado

Métodos y Materiales

Entre los métodos más utilizados para el diseño térmico de intercambiadores de calor de tubo y coraza se pueden citar los siguientes: Método de Donohue, Método de Tinker, Método de Kern, Método de Bell-Delaware, Método de Wills and Jonhston, etc.

En todos los métodos siempre se parte del dato de la cantidad de calor a transferir o de la diferencia de temperaturas deseadas, así como de las propiedades de los líquidos o gases que intervienen en el proceso. En general los pasos de los diferentes métodos se pueden resumir en el diagrama de la figura 1.

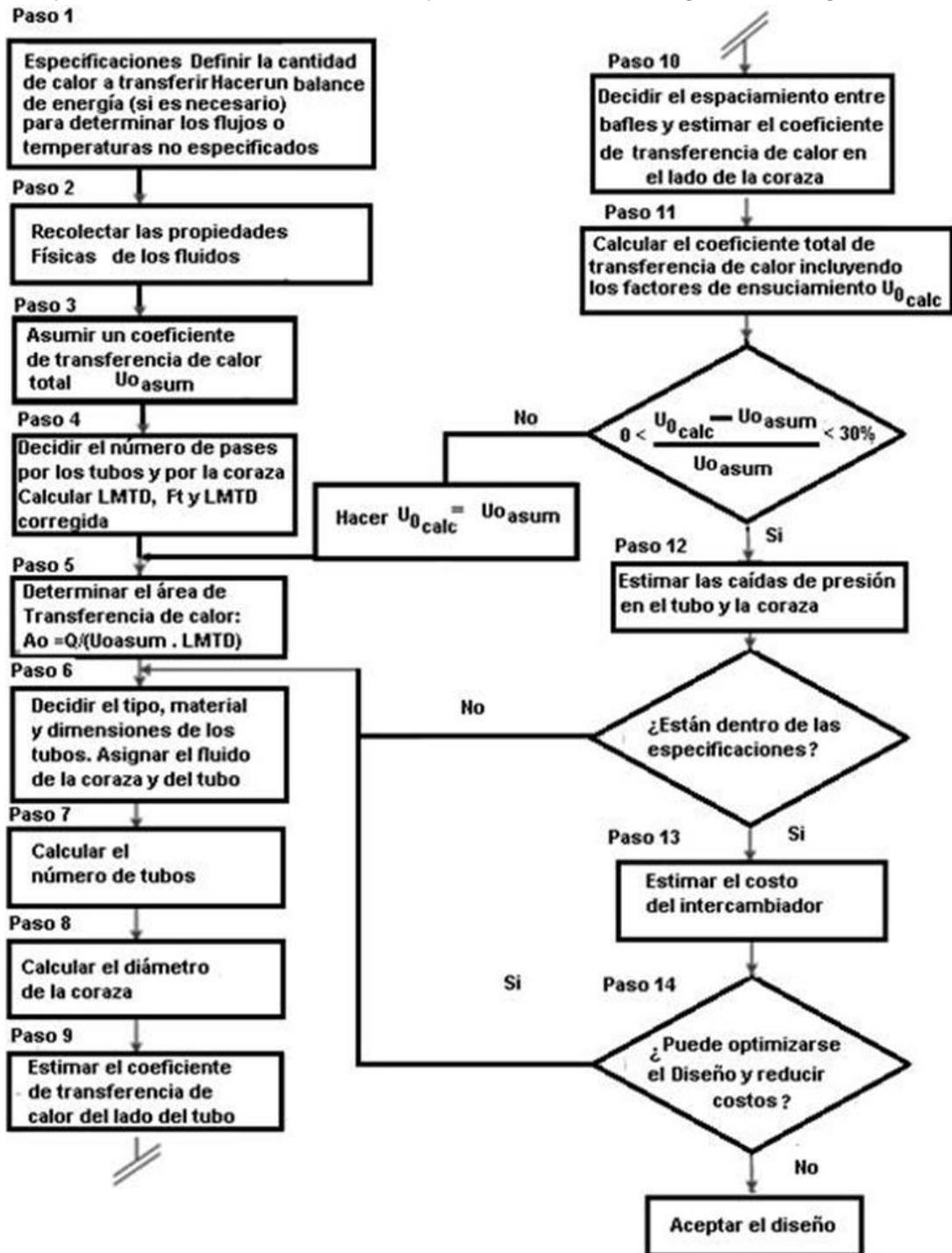


Fig. 1. Diagrama de bloque para el cálculo de un intercambiador de calor

Método de Taborek

Uno de los métodos más actuales e importantes para el cálculo de intercambiadores de calor de tubo y coraza es el de Taborek. La versión de Taborek del método de Delaware es probablemente el método más exacto, más confiable y completo disponible en la literatura. El método predice tanto los coeficientes de transferencia de calor como las caídas de presión en función de la geometría del haz de tubos y su descripción dimensional.

El flujo monofásico de líquidos y gases sobre paquetes de tubos es un proceso importante de la transferencia de calor confrontado en numerosas aplicaciones de intercambiadores de calor. En contraste con la transferencia de calor dentro de los tubos, el flujo en el lado de la coraza es particularmente complejo debido a los muchos factores geométricos implicados y las muchas trayectorias posibles del fluido.

La teoría básica del flujo monofásico en el lado de la coraza en intercambiadores de calor del TIPO E se presenta a continuación de acuerdo a lo establecido por Taborek [10, 11]

Procedimiento para el diseño y cálculo de un intercambiador de calor de tubo y coraza mediante el método de Taborek

Taborek realmente no hace ningún aporte en los cálculos por el lado del tubo, ya que no se diferencia del método de Kern o del método de Delaware. Este método solamente se diferencia en los cálculos por el lado de la coraza.

Antes de comenzar el cálculo, las condiciones de proceso requeridas para ambos fluidos son:

- Temperaturas de entrada y salida
- Flujos máxicos
- Capacidades caloríficas
- Conductividades térmicas
- Densidades
- Viscosidades
- Factores de obstrucción o ensuciamiento
- Número de años de vida de la instalación
- Tasa de descuento anual
- Costo de la energía eléctrica
- Horas de trabajo al año
- Factores de obstrucción o ensuciamiento

Pasos a seguir para el ejecutar el procedimiento

1. Cálculo de la carga térmica (Q)
2. Determinación de la temperatura media logarítmica LMTD
3. Determinación aproximada del coeficiente global de transferencia de calor
4. Cálculo del área máxima provisional perpendicular al flujo
5. Cálculo del área total del tubo
6. Definición de la geometría del haz de tubos y de la coraza
7. Cálculo del número de tubos
8. Análisis de la corriente de Transferencia de calor de un intercambiador de calor de tubo y coraza con deflectores
9. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza para un fluido monofásico:
10. Cálculo del factor de corrección de corte del deflector J_C
11. Cálculo del factor de corrección del Bypass por el haz de tubos (JB)
12. Cálculo del factor de corrección de desigualdad de espaciamiento entre deflectores
13. Cálculo del factor de corrección de Flujo Laminar (JR)
14. Cálculo del factor de corrección de la viscosidad en la pared (J_μ)
15. Cálculo del coeficiente ideal de transferencia de calor en un banco de tubos (α_I)
16. Análisis de corrientes de caída de presión en el lado del tubo y de la coraza en un intercambiador de calor con deflectores
17. Cálculo de la caída de presión total (Δp total) en el lado de la coraza, excluyendo las boquillas o platos de choque
18. Cálculo de la caída de presión en todos los compartimentos centrales del deflector ($N_b - 1$)

19. Cálculo de la caída de presión y la velocidad másica en todas las zonas de ventana Nb para flujo turbulento ($Re > 100$)
20. Cálculo de la caída de presión Δp_e en las dos zonas extremas o finales del paquete de tubos
21. Cálculo del costo total del intercambiador de calor

Observaciones sobre el costo total del intercambiador

El costo total C_{tot} incluye la inversión de capital (C_i), el costo de la energía (C_e), el costo de operación anual (C_o) y el costo total de descuento de operación de (C_{oD}) [12]

$$C_{total} = C_{inversión} + C_{operación}$$

Adoptando la correlación de Hall [13], el capital de inversión C_i se calcula en función del área superficial del intercambiador:

$$C_{inversión} = a_1 + a_2 A_o^{a_3}$$

Donde, $a_1 = 8000$, $a_2 = 259,2$ y $a_3 = 0,93$ para el intercambiador hecho de acero inoxidable tanto para la coraza como para los tubos. El descuento de costo total de operación en relación con potencia de bombeo para superar las pérdidas por fricción se calcula de las siguientes ecuaciones:

$$C_o = P C_E H$$

$$C_{oD} = \sum_{k=1}^{ny} \frac{C_o}{(1+i)^k}$$

C_E es el costo de la energía eléctrica en \$/kW h, i la tasa de descuento anual, ny el número de años de vida de la instalación, H las horas de trabajo al año.

Resultados y Discusión

Validación del procedimiento

Para validar el procedimiento desarrollado se aplicó al mismo al estudio de un caso resuelto de manera manual en la literatura consultada [14], que expresa lo siguiente:

Diseñar un intercambiador para un condensado secundario de un condensador de metanol de 95 °C a 40 °C. El rango o razón de flujo del metanol es de 100,000 kg/h. Se utilizará agua salobre como refrigerante con una elevación de temperatura de 25 °C a 40 °C.

En dicho caso solamente se considerará el diseño térmico. El refrigerante es corrosivo, por tanto se asignará al lado del tubo.

Los datos generales del problema son los siguientes:

- Capacidad Calorífica del Metanol o calor específico = 2,84 kJ/kg °C
- Capacidad Calorífica del Agua o calor específico = 4,2 kJ/kg °C
- $m_h = 100,000$ Kg/h
- $T_{hi} = 95$ °C
- $T_{ho} = 40$ °C
- $T_{ci} = 25$ °C
- $T_{co} = 40$ °C

Automatización del diseño y optimización de intercambiadores de calor por el método de Taborek mediante el software MATLAB

Dicho procedimiento fue implementado en MATLAB y los resultados obtenidos comparados con el caso resuelto manualmente ya señalado por el método de Kern [14]. En la figura 2 se muestra la pantalla para introducir los datos al programa en MATLAB.

En la tabla 1 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos manualmente y los obtenidos mediante la automatización.

Tabla 1. Comparación de resultados del ejemplo resuelto en la literatura con el procedimiento automatizado

	Automatizado	Literatura
Coeficiente global de transferencia de calor U [W/m^2C]	613	615
Diámetro exterior del tubo do [mm]	20	20
Diámetro interior de la coraza Ds [mm]	891,181	894
Área provisional de transferencia de calor A [m^2]	276.345	278
Área deflujo transversal As [m^2]	0,032	0,032
Área total del tubo At [m^2]	0,3034	0,303
Espaciamiento entre deflectores Lbc [mm]	356	356
Número de deflectores Nb	13	13
Número de tubos Ntt	918	918
Coeficiente de transferencia de calor en el lado del tubo ht [W/m^2C]	3773,693	3812
Coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza hc [W/m^2C]	1520,043	1573
Área real de transferencia de calor Ao [m^2]	284,055	296
Caída de presión del lado del tubo $deltapt$ [Pa]	6936,957	7200
Caída de presión total del lado de la coraza $delta p cor$ [Pa]	66541	68000
Costo Total $Ctot$ [\$]	53122.723	----

Optimización del costo de los intercambiadores

La optimización es una rama de las matemáticas aplicadas que consiste en la recolección de principios y métodos usados para solucionar problemas cuantitativos de muchas disciplinas como física, biología, ingeniería y economía para obtener la solución óptima. Los métodos de optimización se pueden clasificar en tres tipos:

- 1- Métodos analíticos (uso del cálculo diferencial, este es insuficiente para problemas no lineales)
- 2- Métodos numéricos (se emplean los algoritmos) y otros métodos como es el caso de los métodos gráficos
- 3- Métodos experimentales y estudio de casos

El uso de la palabra optimización en MatLab se refiere al proceso de búsqueda del mínimo o máximo de una función, denominada comúnmente función objetivo (*también conocida como función de error*). En la mayoría de las funciones de optimización de MatLab, se requiere la definición de una función (m) que compute la función objetivo a optimizar. Es decir, la función objetivo realiza una serie de cálculos, que el usuario define y devuelve como parámetro de salida un escalar que será el valor que se pretende minimizar o maximizar. Por tanto el objetivo fundamental en todos los métodos de optimización en esencia es obtener, con el menor número posible de evaluaciones de la función objetivo, una representación adecuada de la misma que permita determinar la ubicación del punto óptimo [15]

Algoritmos Genéticos

El Algoritmo Genético (AG) es un modelo de aprendizaje que debe su comportamiento a una metáfora de algunos de los mecanismos de la evolución que se observan en la naturaleza (como la reproducción sexual y el principio de la supervivencia del más apto), son métodos adaptativos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros.

A grandes rasgos, un algoritmo genético consiste en una población de soluciones codificadas de forma similar a cromosomas. Cada uno de estos cromosomas tendrá asociado un ajuste o valor de bondad que cuantifica su validez como solución del problema. En función de este valor se le darán más o menos oportunidades de reproducción. Además, con cierta probabilidad se realizarán mutaciones de estos cromosomas.

Funcionamiento de un algoritmo genético básico

Un algoritmo genético puede presentar diversas variaciones, dependiendo de cómo se aplican los operadores genéticos (cruzamiento, mutación), de cómo se realiza la selección y de cómo se decide el reemplazo de los individuos para formar la nueva población. En general, el pseudocódigo consiste de los siguientes pasos:

- **Inicialización:** Se genera aleatoriamente la población inicial, que está constituida por un conjunto de cromosomas los cuales representan las posibles soluciones del problema. En caso de no hacerlo aleatoriamente, es importante garantizar que dentro de la población inicial, se tenga la diversidad estructural de estas soluciones para tener una representación de la mayor parte de la población posible o al menos evitar la convergencia prematura.
- **Evaluación:** A cada uno de los cromosomas de esta población se aplicará la función de aptitud para saber cómo de "buena" es la solución que se está codificando.
- **Condición de término:** El AG se deberá detener cuando se alcance la solución óptima, pero ésta generalmente se desconoce, por lo que se deben utilizar otros criterios de detención. Normalmente se usan dos criterios: correr el AG un número máximo de iteraciones (generaciones) o detenerlo cuando no haya cambios en la población. Mientras no se cumpla la condición de término se hace lo siguiente:
 - **Selección:** Después de saber la aptitud de cada cromosoma se procede a elegir los cromosomas que serán cruzados en la siguiente generación. Los cromosomas con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de ser seleccionados.
 - **Recombinación o Cruzamiento:** La recombinación es el principal operador genético, representa la reproducción sexual, opera sobre dos cromosomas a la vez para generar dos descendientes donde se combinan las características de ambos cromosomas padres.
 - **Mutación:** Modifica al azar parte del cromosoma de los individuos, y permite alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual.
 - **Reemplazo:** Una vez aplicados los operadores genéticos, se seleccionan los mejores individuos para conformar la población de la generación siguiente.

La figura 2 muestra la estructura básica de un algoritmo genético



Fig. 2. Diagrama de flujo de la estructura base de un algoritmo genético

Para optimizar por algoritmo genético, se declara como función objetivo el costo total. Se decidió usar como variables independientes para la aplicación del procedimiento las siguientes:

- Lt- longitud de los tubos en m con frontera de 2-6 m
- d_o- diámetro exterior de los tubos en mm, con frontera de 12-50 mm
- Lbc - el espaciamiento entre deflectores, con frontera de 200-500 mm

El procedimiento desarrollado en MATLAB permite tomar otras variables y aumentar el número de variables independientes a más de tres, es decir a todas las que desee el usuario

En la figura 3 se observa la pantalla en MATLAB para la optimización del costo mediante algoritmos genéticos y en la figura 4 la pantalla del proceso y de resultados.

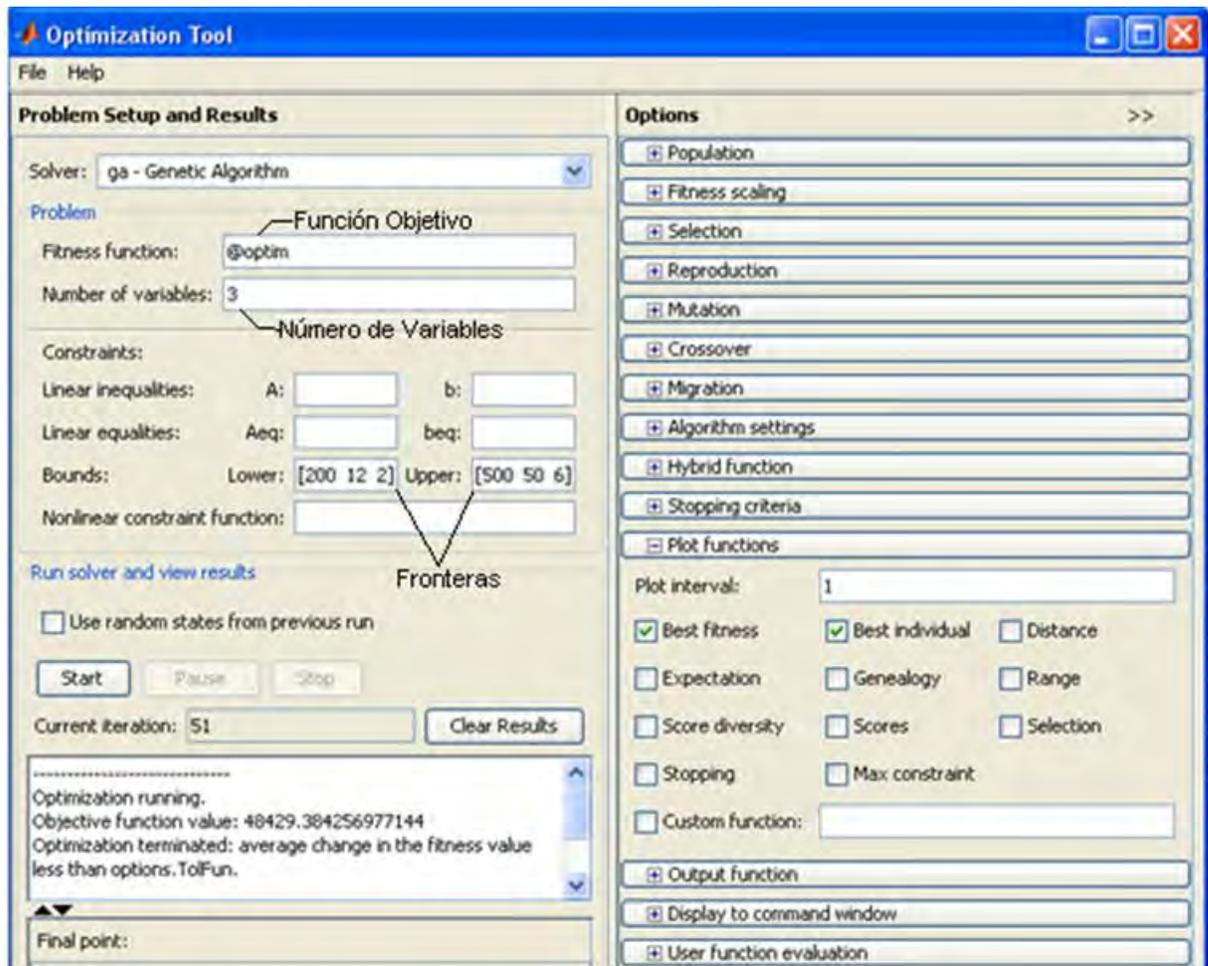


Fig. 3. Pantalla de optimización mediante Algoritmos Genéticos en MATLAB

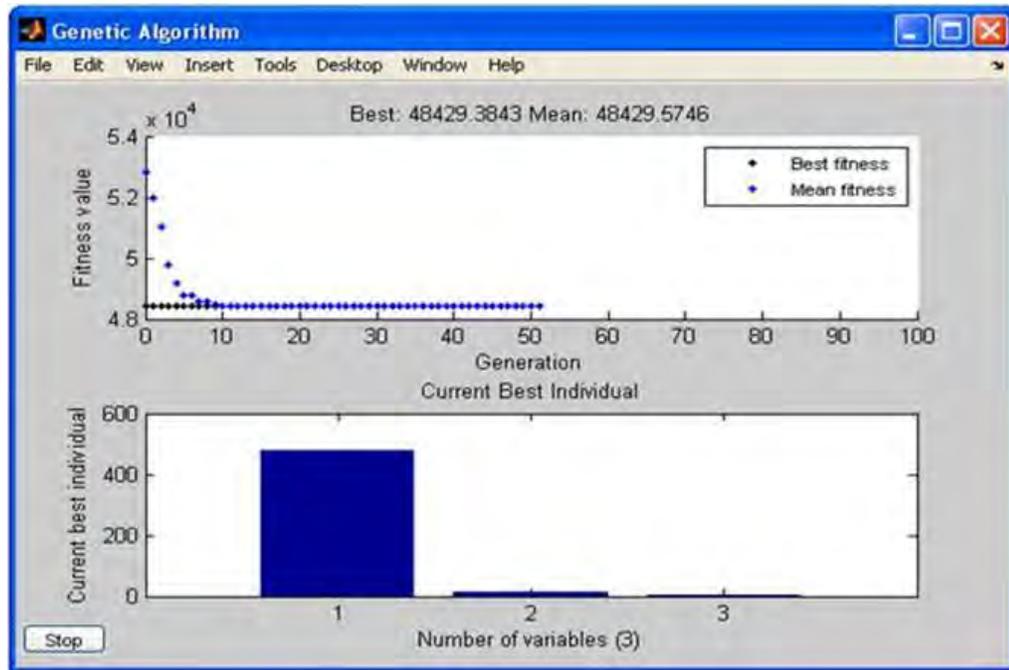


Fig. 4. Gráfica del valor de la función y mejores valores de las variables

En la tabla 2 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos de manera automatizada y los resultados óptimos obtenidos a través de los algoritmos genéticos.

Tabla 2. Comparación de resultados de los métodos automatizado y optimizado por Algoritmos Genéticos

	Optimizado	Automatizado
Coefficiente global de transferencia de calor U [$W/m^{20}C$]	613	613
Diámetro exterior del tubo do [mm]	16	20
Diámetro interior de la coraza Ds [mm]	890	891.1816
Área de flujo transversal As [m2]	0,030	0,032
Área total del tubo At [m2]	0.296	0,3034
Espaciamiento entre deflectores Lbc [mm]	310	356
Número de deflectores Nb	12	13
Número de tubos Ntt	898	918
Coefficiente de transferencia de calor en el lado del tubo ht [$W/m^{20}C$]	3383.052	3773.693
Coefficiente de transferencia de calor del lado de la coraza hc [$W/m^{20}C$]	1645.149	1520.0438
Área real de transferencia de calor Ao [m2]	254.5816	284.055
Caída de presión del lado del tubo $deltapt$ [Pa]	6879.076	6936.957
Caída de presión total del lado de la coraza $deltapcor$ [Pa]	63226	66541
Costo Total $Ctot$ [\$]	48429.661	53122.723

Recocido simulado

El Recocido simulado es un método heurístico que puede resolver problemas de optimización sin restricciones y con restricciones de frontera. Este método modela el proceso físico de calentamiento de un material y como luego va decreciendo lentamente la temperatura para disminuir los defectos, minimizando así la energía del sistema. En cada iteración del algoritmo por Recocido simulado un nuevo punto al azar es generalizado. La distancia entre el nuevo punto y el actual o el alcance de la búsqueda está basada en una probabilidad de distribución con una escala proporcional a la temperatura. El algoritmo acepta todos los nuevos puntos que reduzcan el objetivo, hasta converger a un mínimo.

Para optimizar por Recocido Simulado, se declara como función objetivo el costo total, las variables que intervienen en el mismo, se especifica el punto de inicio y las fronteras de estas variables. Ver figura 5. Se tomaron como variables y sus fronteras las mismas que en el caso de los algoritmos genéticos para poder

realizar una comparación. En la figura 6 se muestra la pantalla con la gráfica de la función y los mejores valores de las variables.

En los métodos de optimización utilizados las gráficas que se trazan muestran el valor de la función y el mejor punto facilitando la visualización de los resultados de la optimización. En ambos casos, la primera es una gráfica lineal y la segunda una gráfica de barras, el gráfico va mostrando los resultados de cada iteración durante la corrida del programa que optimiza el diseño hasta que el finalmente se estabiliza en el mejor valor cuando la función objetivo se mantiene constante.

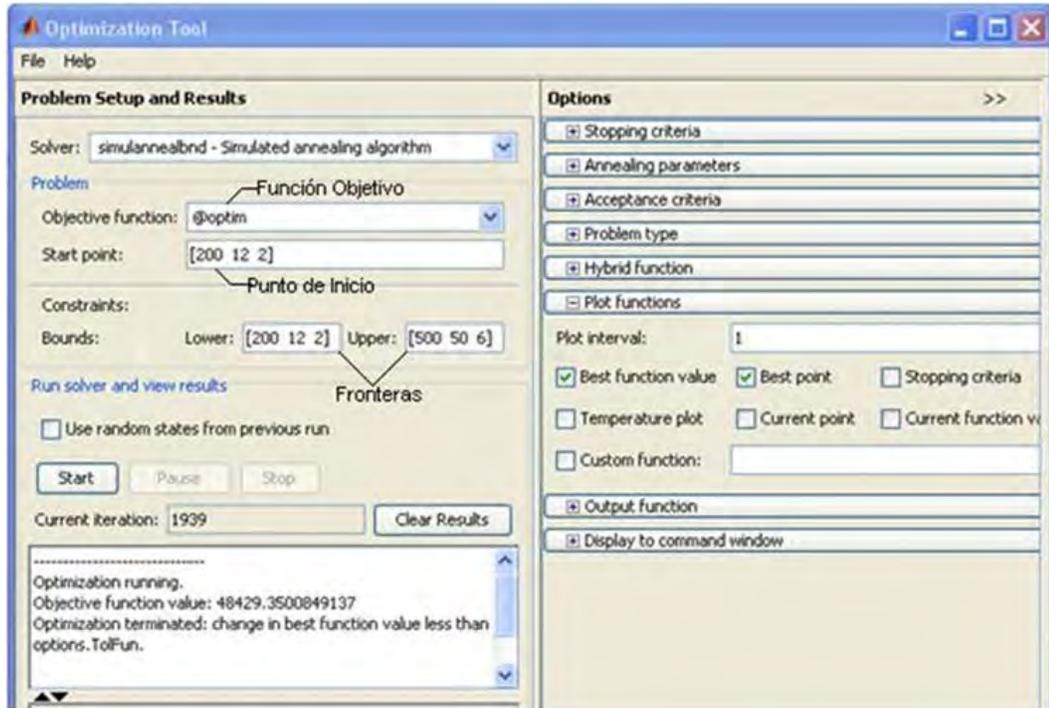


Figura 5. Pantalla de optimización de Recocido Simulado

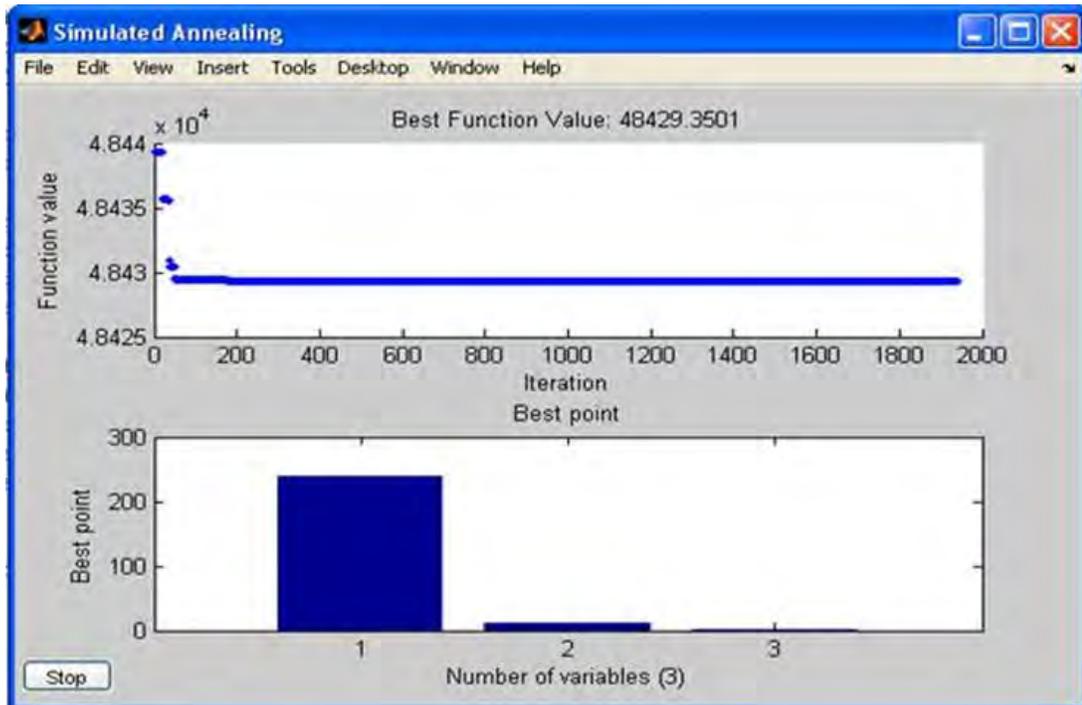


Figura 6. Gráfica del valor de la función y mejores valores de las variables

Comparación de los resultados de la optimización por el método Recocido Simulado y el Algoritmo Genético

En la tabla 3 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos mediante la optimización con algoritmos genéticos y la optimización con recocido simulado.

Tabla 3. Comparación de los resultados de la optimización por el método de recocido simulado y el algoritmo genético

Recocido Simulado		Algoritmo Genético
Coefficiente global de transferencia de calor U [W/m ² °C]	613	613
Diámetro exterior del tubo do [mm]	16	16
Diámetro interior de la coraza Ds [mm]	890	890
Área deflujo transversal As [m ²]	0,030	0,030
Área total del tubo At [m ²]	0,297	0.296
Espaciamiento entre deflectores Lbc [mm]	309	310
Número de deflectores Nb	12	12
Número de tubos Ntt	899	898
Coefficiente de transferencia de calor en el lado del tubo ht [W/m ² °C]	3323.106	3383.052
Coefficiente de transferencia de calor del lado de la coraza hc [W/m ² °C]	1637.667	1645.149
Área real de transferencia de calor Ao [m ²]	254.5804	254.5816
Caída de presión del lado del tubo deltapt [Pa]	2879.2084	6879.076
Caída de presión total del lado de la coraza delta p total [Pa]	63322	63226
Costo Total Ctot [\$]	48429.497	48429.661

Conclusiones

Diversos autores han desarrollado múltiples métodos de cálculo para el diseño de intercambiadores de calor, diferenciándose en los cálculos del lado de la carcasa.

De todos los métodos los más usados son el método Bell-Delaware y el método de Taborek. A diferencia de otros métodos, el método de Taborek predice tanto los coeficientes de transferencia de calor como las caídas de presión en función de la geometría del haz de tubo y su descripción dimensional.

A partir de diseño y uso del procedimiento propuesto y su aplicación mediante el MATLAB se logró optimizar el costo del intercambiador de calor mediante el método de Taborek y usando Algoritmo Genético y Recocido Simulado.

Los resultados obtenidos de la automatización y la optimización muestran que el comportamiento del intercambiador de calor mejora considerablemente después del proceso de optimización.

Se puede apreciar como disminuye el área real de transferencia de calor garantizando una disminución de \$ 4693 del costo total. La optimización por algoritmo Genético muestra resultados similares a la del Recocido Simulado, disminuyendo ambos el costo total con una diferencia entre ellos del 0.0004 %.

Referencias

1. Arzu Sencan, S., Bayram, K. y Ulas, K.. "Design and economic optimization of shell and tube heat exchangers using Artificial Bee Colony (ABC) algorithm". *Energy Conversion and Management*. 2011, vol. 52, p. 3356–3362. ISSN 0196-8904.
2. Amin, H., Mojtaba, H. y Ali N. "A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using imperialist competitive algorithm (ICA) from economic point of view". *Energy Conversion and Management*. 2013, vol. 67, p. 66–74. ISSN 0196-8904.
3. Zahid, H. A.. "A new chart method for evaluating single-phase shell side heat transfer coefficient in a single segmental shell and tube heat exchanger" *Applied Thermal Engineering*. 2005, n° 25, p. 2412–2420. ISSN 1359-4311.

4. Vera-García, F., García-Cascales, J.R., González-Maciá, J. *et al.* "A simplified model for shell-and-tubes heat exchangers: Practical application". *Applied Thermal Engineering*. 2010, nº 30 (2010) p. 1231–1241. ISSN 1359-4311
5. Simin, W., Jian, W. y Yanzhong, L. "An experimental investigation of heat transfer enhancement for a shell-and-tube heat exchanger". *Applied Thermal Engineering* 2009, nº 29, p. 2433–2438. ISSN 1359-4311
6. Jiangfeng, G., Mingtian, X. y Lin, C. "The application of field synergy number in shell-and-tube heat exchanger optimization design". *Applied Energy* 2009, nº 86, p. 2079–2087. ISSN: 0306-2619
7. Butterworth, D. "Design of shell-and-tube heat exchangers when the fouling depends on local temperature and velocity". *Applied Thermal Engineering*. 2002, nº 22, p. 789–801. ISSN 1359-4311
8. Fesanghary, M., Damangir, E. y Soleimani, I. "Design optimization of shell and tube heat exchangers using global sensitivity analysis and harmony search algorithm". *Applied Thermal Engineering* 2009, nº 29 p. 1026–1031. ISSN 1359-4311
9. Patel, V.K. y Rao, R.V. "Design optimization of shell-and-tube heat exchanger using particle swarm optimization technique". *Applied Thermal Engineering*. 2010, vol. 30, p. 1417-1425. ISSN 1359-4311.
10. Taborek, J. *Recommended method: principles and limitations, in Heat Exchanger Design Handbook.*, HEDH, New York, USA: Begell House, 2002. ISBN 9781567001822.
11. Taborek, J. "Industrial heat exchanger design practices", En: *Boiler Evaporators, and Condenser*. New York, USA: Wiley. 1991. ISBN 978-0471621706
12. Caputo, A. C., Pelagagge, P. M. y Salini, P. "Heat exchanger design based on economic optimisation". *Applied Thermal Engineering*. 2008, vol. 28, nº 10, p. 1151–1159. ISSN 1359-4311.
13. Hadidi, A. y Nazari, Al. "Design and economic optimization of shell-and-tube heat exchangers using biogeography-based (BBO) algorithm". *Applied Thermal Engineering*. 2013, vol. 51, p. 1263 -1272. ISSN 1359-4311
14. Sinnott, R. K. *Chemical Engineering Design*. Fourth edition. London, England: Coulson & Richardson's. 2005. ISBN 9780080492551.
15. Ghiasi, H., Pasini, D. y Lessard, L.. "A non-dominated sorting hybrid algorithm for multi-objective optimization of engineering problems". *Engineering Optimization*. 2011, vol. 43, nº. 1, p. 39–59. ISSN 0305-215X.