

**COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN
AVANZADA EN SÍNTESIS ÓPTIMA DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR**

CARLOS EDUARDO GARCÍA SÁNCHEZ

ZAMIR SÁNCHEZ CASTRO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2007

**COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN
AVANZADA EN SÍNTESIS ÓPTIMA DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR**

CARLOS EDUARDO GARCÍA SÁNCHEZ

ZAMIR SÁNCHEZ CASTRO

**Proyecto de Grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

PhD. EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2007

CONTENIDO

	Pág
1. INTRODUCCIÓN	1
2. CONCEPTOS TEÓRICOS	4
2.1. Descripción del problema	4
2.2. Ecuaciones básicas	4
2.3. Métodos de <i>HENS</i>	6
2.3.1. Síntesis secuencial	6
2.3.2. Síntesis simultánea	8
2.4. Fundamentos del recocido simulado	8
2.5. Aplicación del recocido simulado a la <i>HENS</i>	11
3. DESARROLLO DEL PROGRAMA	14
3.1. Almacenamiento de las variables	14
3.2. El recocido externo	16
3.3. El recocido interno	17
3.4. Sintonización de los parámetros del método	18
3.4.1. Temperatura inicial del recocido externo	18
3.4.2. Temperatura inicial del recocido interno	19
3.4.3. Parámetros alfa	19
3.5. Simplificaciones del programa	21
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	22

4.1. Caso de estudio 1	22
4.2. Caso de estudio 2	24
4.3. Caso de estudio 3	25
4.4. Caso de estudio 4	28
4.5. Caso de estudio 5	29
4.6. Caso de estudio 6	30
4.7. Caso de estudio 7	31
5. CONCLUSIONES	34
6. BIBLIOGRAFÍA	36
7. ANEXOS	38

LISTA DE FIGURAS

	Pág
FIGURA 1. Clasificación de los métodos HENS	6
FIGURA 2. Esquema del funcionamiento del recocido simulado	9
FIGURA 3. Comportamiento de la temperatura del recocido en función de α	10
FIGURA 4. Esquema de aplicación del recocido simulado a la HENS	12
FIGURA 5. Esquema del recocido interno	17
FIGURA 6. Comportamiento del óptimo para diferentes Tsa iniciales externas (caso de estudio 3)	18
FIGURA 7. Comportamiento del óptimo para diferentes Tsa iniciales externas (caso de estudio 4)	19
FIGURA 8. Comportamiento del óptimo para diferentes valores de alfa (caso de estudio 3)	20
FIGURA 9. Comportamiento del óptimo para diferentes valores de alfa (caso de estudio 4)	20
FIGURA 10. Mejor red obtenida para el caso de estudio 1	23
FIGURA 11. Mejor red obtenida para el caso de estudio 2	25
FIGURA 12. Mejor red obtenida para el caso de estudio 3	27
FIGURA 13. Mejor red obtenida para el caso de estudio 4	29
FIGURA 14. Mejor red obtenida para el caso de estudio 5	30
FIGURA 15. Mejor red obtenida para el caso de estudio 6	31
FIGURA 16. Mejor red obtenida para el caso de estudio 7	33

LISTA DE TABLAS

	Pág
TABLA B1. Efectos de la temperatura inicial de recocido externo para el caso de estudio 3	42
TABLA B2. Efectos de la temperatura inicial de recocido externo para el caso de estudio 4	42
TABLA B3. Efectos de la temperatura inicial de recocido interno para el caso de estudio 3	42
TABLA B4. Efectos del alfa para el caso de estudio 3	43
TABLA B5. Efectos del alfa para el caso de estudio 4	43
TABLA C1. Datos caso de estudio 1	44
TABLA C2. Datos caso de estudio 2	45
TABLA C3. Datos caso de estudio 3	46
TABLA C4. Datos caso de estudio 4	47
TABLA C5. Datos caso de estudio 5	48
TABLA C6. Datos caso de estudio 6	49
TABLA C7. Datos caso de estudio 7	50

LISTA DE ANEXOS

	Pág
A. Descripción del programa <i>HENSSA</i>	38
B. Tablas de resultados de los experimentos de sintonización de los parámetros del método	42
C. Tablas de datos de los casos de estudio	44

RESUMEN

TÍTULO: COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN AVANZADA EN SÍNTESIS ÓPTIMA DE REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR *

AUTORES: GARCÍA SÁNCHEZ, Carlos Eduardo y SÁNCHEZ CASTRO, Zamir **

PALABRAS CLAVE: Síntesis de redes de intercambio de calor, recocido simulado, algoritmos genéticos.

DESCRIPCIÓN: En el presente trabajo se analiza el comportamiento relativo de los algoritmos genéticos (*genetic algorithms, GA*) y del recocido simulado (*simulated annealing, SA*) aplicados al problema de síntesis de redes de intercambio de calor, por medio de la comparación de los resultados obtenidos, de la variabilidad de las respuestas y del tiempo de convergencia a través de casos de estudio.

Se usó un programa de *GA* ya existente y se diseñó uno utilizando *SA*, el cual resuelve tanto la optimización de la topología como la de cada estructura por dicho método. Para asegurar una adecuada comparación, los dos programas se ejecutaron en el mismo computador y con las mismas restricciones. Se usaron siete casos de estudio, de los cuales se obtuvo un mejor resultado con el programa de *SA* en tres.

Se determinó que el programa de *SA* presenta mejor desempeño que el de *GA* en síntesis de redes pequeñas. El programa de *SA* usa menores tiempos de cómputo que el de *GA*, y ambos muestran una alta variabilidad en sus respuestas debido al carácter estocástico de los dos métodos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Ingeniería Química, Ph.D. Edgar Fernando Castillo Monroy.

ABSTRACT

TITLE: COMPARISON OF THE PERFORMANCE OF ADVANCED OPTIMIZATION ALGORITHMS IN OPTIMAL SYNTHESIS OF HEAT EXCHANGER NETWORKS*

AUTHORS: GARCÍA SÁNCHEZ, Carlos Eduardo and SÁNCHEZ CASTRO, Zamir**

KEYWORDS: Heat exchanger network synthesis, simulated annealing, genetic algorithms.

DESCRIPTION: In the present work it is analyzed the relative behavior of the genetic algorithms (GA) and of the simulated annealing (SA) applied to the problem of heat exchanger network synthesis, by means of the comparison of the obtained results, the variability of the answers and the time of convergence through cases of study.

An already existing program of GA was used and one was designed using SA, which solves so much the optimization of the topology like the one of each structure by this method. In order to assure a suitable comparison, both programs were executed in the same computer and with the same restrictions. Seven cases of study were used, from which a better result with the program of SA in three was obtained.

It was determined that the SA program presents better performance than the one of GA in synthesis of small networks. The SA program uses less time of calculation that the one of GA, and both show a high variability in their answers due to the stochastic character of these methods.

* Degree Project

** Faculty of Physicochemical Engineerings, Chemical Engineering, PhD. Edgar Fernando Castillo Monroy

1. INTRODUCCIÓN

La síntesis de redes de intercambio de calor (*Heat Exchanger Network Synthesis, HENS*) es un importante campo de la ingeniería de procesos y ha sido objeto de intenso estudio durante los últimos 40 años. Este interés investigativo fue acelerado inicialmente por las ventajas económicas que trae la integración energética, y logró su consolidación a finales de los ochenta gracias a los avances en los algoritmos de optimización y en el *hardware* de los computadores^[10].

El problema clásico de *HENS* consiste en desarrollar una red de intercambio de calor cuyo costo total (inversión inicial más costos operativos) sea mínimo; las variables con que se trabaja en el problema son las capacidades caloríficas y flujos de las corrientes que se desea integrar, información de los servicios industriales disponibles (temperatura de ingreso, temperatura de salida, costos) y datos sobre los costos de los intercambiadores^[16]. Este problema se ha encarado usando gran cantidad de aproximaciones diferentes tanto en el modelamiento como en la técnica de solución.

La historia de la síntesis de redes de intercambio de calor comienza en 1944, con la publicación por parte de Ten Broeck^[18] del primer artículo relacionado con este tema. Algunos avances y descubrimientos fundamentales en el desarrollo de la *HENS* son los siguientes:

- Durante los años sesenta, comienza la aplicación de la programación matemática al problema y por primera vez se usa una superestructura; a fines de esta década Masso y Rudd^[16] presentan la primera definición formal del problema de *HENS*.

- Los años setenta trajeron consigo el descubrimiento de que las curvas compuestas permitían el cálculo del mínimo uso de servicios, que contribuiría en gran parte a que en 1978 se lograra la identificación del punto *pinch* por parte de Umeda *et. al.*^[20], y Linnhoff y Flower^[14].
- En el año 1982 aparece el DTAM (*Dual Temperature Approach Method*) propuesto por Colbert^[6]. Un año después, Linnhoff y Hindmarsh^[15] proponen el Método de Diseño *Pinch* (*Pinch Design Method*, PDM), mientras Cerda *et. al.*^[5] efectúan una formulación matemática del problema usando el modelo del transporte. En 1984 se presenta el primer artículo donde se mejoran redes existentes (*retrofit*), y en 1986 Tjoe y Linnhoff^[19] presentan un método para hacerlo usando un método basado en el *pinch*. Este mismo año se desarrolla el primer método de *supertargeting* y Floudas *et. al.*^[8] presentan el MAGNETS, que es el primer método de síntesis de redes de intercambio totalmente automático. En 1989 Dolan *et. al.*^[7] usan por primera vez el recocido simulado en la *HENS*.
- Los años 1989, 1990 y 1991 presenciaron las primeras formulaciones simultáneas completas del problema de síntesis de redes de intercambio de calor. Entre 1990 y 2000, se publicaron anualmente entre 17 y 30 artículos sobre redes de intercambio de calor, y desde entonces la cantidad de publicaciones ha tendido a mantenerse en esos niveles.

La síntesis de redes de intercambio de calor sigue siendo un campo activo, dado que a pesar de la gran cantidad de trabajo dedicado a este campo aún quedan muchas áreas por mejorar. Por ejemplo, no se han integrado completamente los conceptos de *HENS* con otros conceptos de síntesis de procesos, hace falta una formulación realmente completa del problema *HENS* (esto es, sin ninguna simplificación), y hay una gran deuda de resultados analíticos en este campo^[10].

En este trabajo, se ha decidido atacar el problema usando una técnica de optimización estocástica llamada recocido simulado (*Simulated Annealing*, SA) y

comparar su desempeño en la síntesis de redes de intercambio de calor contra el algoritmo genético (*Genetic Algorithm, GA*), otra técnica de computación evolutiva. Como muestra del desempeño del algoritmo genético se ha seleccionado un programa desarrollado por Fredy Avila y Ariel Uribe^[2], y para lograr que la comparación sea significativa se ha creado un programa de *HENS* por recocido simulado con las mismas restricciones de aquel. La comparación se efectúa por medio de casos de estudio, y se analiza el comportamiento relativo de los dos métodos en cuanto a tiempo de convergencia, óptimo obtenido y variabilidad de la respuesta obtenida. El código escrito para este trabajo realiza la síntesis en forma simultánea, haciendo también la optimización de cada estructura generada usando recocido simulado, mecanismo al que no se había recurrido en ninguno de los trabajos de *HENS* publicados a la fecha. En estos trabajos previos, la optimización de las estructuras se ha realizado por métodos de programación no lineal (NLP) o por métodos de programación mixta entera lineal (MILP).

2. CONCEPTOS TEÓRICOS

2.1. Descripción del problema

El problema de síntesis de redes de intercambio de calor se define de la siguiente manera^[16]:

Teniendo un conjunto de corrientes “calientes” (a las cuales se les debe disminuir la temperatura), un conjunto de corrientes “frías” (a las cuales se les debe aumentar la temperatura), las capacidades caloríficas y flujos de cada una de las corrientes, los servicios disponibles, sus temperaturas y costos, y datos sobre costos de intercambiadores, se debe desarrollar una red de intercambio de calor cuyo costo total (inversión más costos operativos) sea el menor posible.

La importancia de la síntesis de redes de intercambio de calor radica en que estas redes conllevan una mayor rentabilidad en el proceso, una menor cantidad de gases contaminantes descargados a la atmósfera, una reducción de las descargas térmicas a la atmósfera o a las corrientes de agua, y un menor uso de agua.

2.2. Ecuaciones básicas

Como ya se ha mencionado, existen múltiples modelamientos matemáticos del problema de *HENS*^[9]. Sin embargo, hay unas cuantas ecuaciones que son usadas en todos los métodos, teniendo sólo variaciones dependiendo de las simplificaciones asumidas. Asumiendo capacidades caloríficas constantes en las corrientes del proceso y en los servicios, ausencia de cambio de fase tanto en las corrientes como en los servicios, aislamiento perfecto en las tuberías, mezclado isotérmico, intercambiadores en contracorriente, coeficiente convectivo de transferencia de calor constante para cada corriente, factores de ensuciamiento

despreciables y resistencia de la pared de los intercambiadores también despreciable (este conjunto de simplificaciones es muy común, y es el que se ha usado en el desarrollo del programa de recocido simulado), estas ecuaciones quedan de la siguiente forma^[12]:

- Transferencia de energía de una corriente:

$$Q = Cp * (T_f - T_i)$$

Donde Cp representa el producto del flujo por la capacidad calorífica, T_f es la temperatura luego de la transferencia, T_i es la temperatura antes de la transferencia y un signo positivo de Q indica ganancia de energía.

- Ecuación de diseño de intercambiadores:

$$Q = U * A * \Delta T_{ML}$$

Donde U es el coeficiente global del intercambiador, A es el área de intercambio y ΔT_{ML} es la media logarítmica de temperatura de las corrientes que intercambian calor.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_C} + \frac{1}{h_H} \qquad \Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

En las anteriores expresiones, h_C y h_H son los coeficientes de transferencia convectivos de las corrientes fría y caliente respectivamente, y ΔT_1 y ΔT_2 son las diferencias de temperatura entre corrientes en cada uno de los terminales del intercambiador.

- Ecuación de costo de intercambiadores:

$$C_{int} = k_1 + k_2 * A^{k_3}$$

A es el área de intercambio y las constantes k₁, k₂ y k₃ ajustan la ecuación. La suma del costo de los intercambiadores equivale a la inversión fija inicial.

- Costos totales (inversión más operación) anualizados:

$$C = C_{serv} + \left(\left(\sum C_{intj} \right) * \left(\frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \right)$$

Esta es la función objetivo que será minimizada. La vida útil de la planta es n (en años), e i es la tasa de interés (en fracción, no en porcentaje). C_{serv} es el costo anual de los servicios industriales y C_{intj} es el costo del intercambiador j .

Además de las anteriores ecuaciones, también se usa implícitamente la segunda ley de la termodinámica, pues no se puede permitir que resulten apareamientos en los cuales le transfiera energía una corriente de menor temperatura a otra de mayor temperatura.

2.3. Métodos de *HENS*

A grandes rasgos, se puede clasificar los métodos usados para resolver el problema de *HENS* en métodos de solución secuencial y métodos de solución simultánea (Figura 1)^[10].

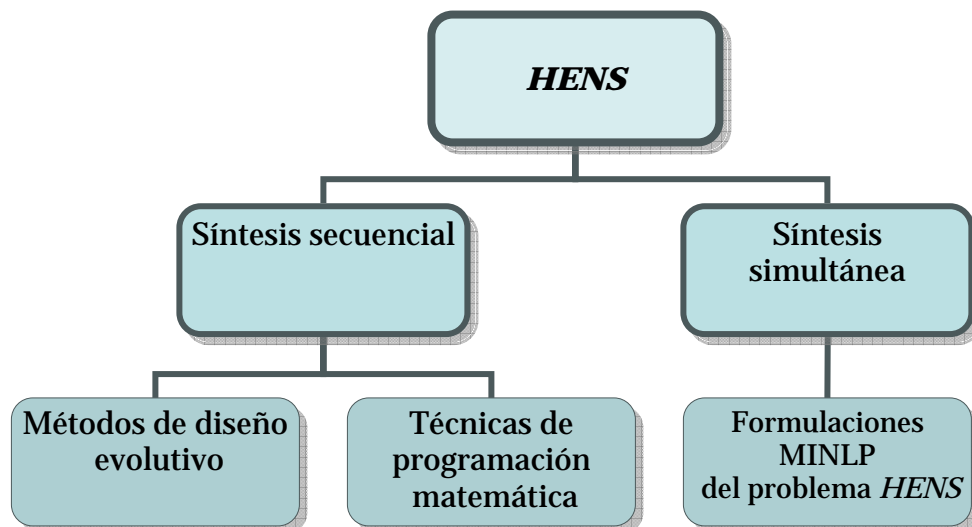


FIGURA 1. Clasificación de los métodos *HENS*

2.3.1. Síntesis secuencial:

En esta aproximación, se divide el problema en subproblemas objetivo para lograr disminuir los requerimientos computacionales. Estos subproblemas se resuelven secuencialmente en orden de importancia decreciente (según reglas heurísticas) respecto al costo total de la red. Normalmente el problema se divide en tres: Menor costo de servicios o uso de éstos, mínimo número de intercambiadores y menor costo de capital o uso de área de intercambio. Heurísticamente, esto implica encontrar la mínima área de intercambio sujeta al mínimo número de intercambiadores sujeta al mínimo uso de servicios. Usando la síntesis secuencial no es posible garantizar el hallazgo de la red con el menor costo anual.

- Métodos de diseño evolutivo: Son todos los métodos basados en la teoría del *pinch*. La tecnología *pinch* aparea el exceso de energía de las corrientes calientes y frías a través de las curvas compuestas (*composite curves*) en un diagrama T-H. Usando aquellas curvas, se hallan los cuellos de botella para transferencia de calor y estos puntos se llaman puntos *pinch*. Luego se generan redes en cada uno de los intervalos de temperatura delimitados por los puntos *pinch* (no se debe transferir calor a través de estos puntos), y se procede a optimizar cada una de estas redes usando una serie de reglas heurísticas. La teoría *pinch* fue por muchos años la estrategia de elección para la *HENS*, pero con las mejoras computacionales su uso ha disminuido. Sin embargo, sigue siendo una buena alternativa para resolver manualmente problemas pequeños. Además, como sustenta sus reglas en las leyes termodinámicas, también se usa con fines académicos.

- Técnicas de programación matemática: Se resuelven los 3 problemas secuencialmente de forma que parte de la solución de un problema se convierte en parámetro del siguiente. La minimización de uso de servicios se puede resolver usando programación lineal (LP), aunque algunos autores han usado *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) o

Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) para permitir restricciones estructurales adicionales. Posteriormente se halla el mínimo número de unidades (para el mínimo uso de servicios ya calculado) y por último se halla la distribución de cargas calóricas que dan el mínimo costo total, lo cual se ha hecho usando MILP o programación no lineal (NLP).

2.3.2. Síntesis simultánea:

La meta de la síntesis simultánea es encontrar la red óptima sin descomponer el problema. Estos métodos usan básicamente formulaciones MINLP del problema, sujetas a varias simplificaciones para facilitar la solución de estos complejos modelos.

En esta categoría se incluyen las técnicas de computación evolutiva como los algoritmos genéticos y el recocido simulado, pues trabajan directamente con la topología de la red, generándola y eligiendo movimientos de búsqueda de acuerdo a las reglas de cada método.

2.4. Fundamentos del recocido simulado

El recocido simulado hace parte de una rama de técnicas de optimización cuya aparición ha sido relativamente reciente: La computación evolutiva, llamada así porque sus reglas de funcionamiento están basadas en fenómenos naturales. Este método se ha difundido ampliamente entre distintas aplicaciones, entre las que se encuentran el problema del vendedor viajero, programación de procesos *batch* consecutivos, síntesis de redes de intercambio de calor, diseño preliminar de plantas no continuas, síntesis de secuencias de separación, síntesis de redes de reactores y diseño óptimo de intercambiadores de calor^[3].

El recocido simulado imita el fenómeno del enfriamiento de los metales fundidos para constituir un procedimiento de búsqueda, observando que en el enfriamiento el sistema va cambiando su configuración atómica minimizando progresivamente su energía interna^[11]. El método comienza en una solución factible, realiza

cambios aleatorios en las variables a optimizar y luego decide si el anterior cambio (lo que se conoce como movimiento) es aceptado como nuevo punto base o no. La nueva configuración se acepta o rechaza de acuerdo con un criterio de aceptación probabilístico; se permite cierta posibilidad de aceptar un movimiento que empeore el valor de la función objetivo para evitar que la función quede atrapada en un mínimo local. El método continúa realizando movimientos, los cuales progresivamente son menos bruscos, simulando de esta forma el proceso de enfriamiento. En la figura 2 se muestra el funcionamiento del método para el caso de una maximización con una sola variable x , llamando x' a la nueva variable generada, $Z(x)$ a la función objetivo y $P(\Delta Z)$ a la probabilidad de aceptación del movimiento. El ciclo mostrado se repite hasta que se cumpla el criterio de parada.

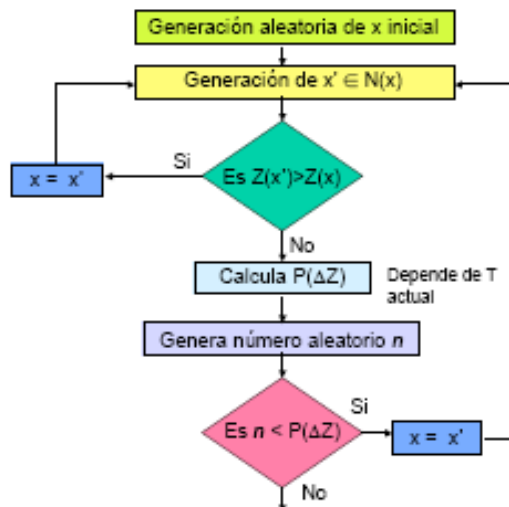


FIGURA 2. Esquema del funcionamiento del recocido simulado

Por la concepción del método, el principal parámetro de éste se llama temperatura (o pseudotemperatura) del recocido simulado T_{sa} . De este parámetro se hacen depender tanto la distancia máxima que se puede mover la variable elegida aleatoriamente en un movimiento como la posibilidad de elección de un movimiento que empeore el valor de la función objetivo. La disminución progresiva de la pseudotemperatura a medida que avanza el método es llamada

programación de temperatura, y la forma más usual de hacerlo es de una forma exponencial, usando la llamada **programación de Kirkpatrick** que consiste en la aplicación de la siguiente ecuación^[11]:

$$T_{sa}^{k+1} = \alpha T_{sa}^k$$

En la anterior expresión, k y $k+1$ son dos movimientos consecutivos, T_{sa} es la pseudotemperatura del recocido y α es un parámetro (con valor entre 0 y 1; se recomienda que esté entre 0,8 y 0,99) que determina la velocidad de enfriamiento; cuanto más grande sea α más lento será el enfriamiento del método^[1]. Un buen enfriamiento es crítico para el buen desempeño del recocido; si aquél es muy rápido se obtienen malos resultados y si es muy lento se obtienen tiempos de cómputo exagerados^[7]. En la figura 3 se muestra el comportamiento de la pseudotemperatura para varios α , manteniendo constante la pseudotemperatura inicial en un valor de 1000.

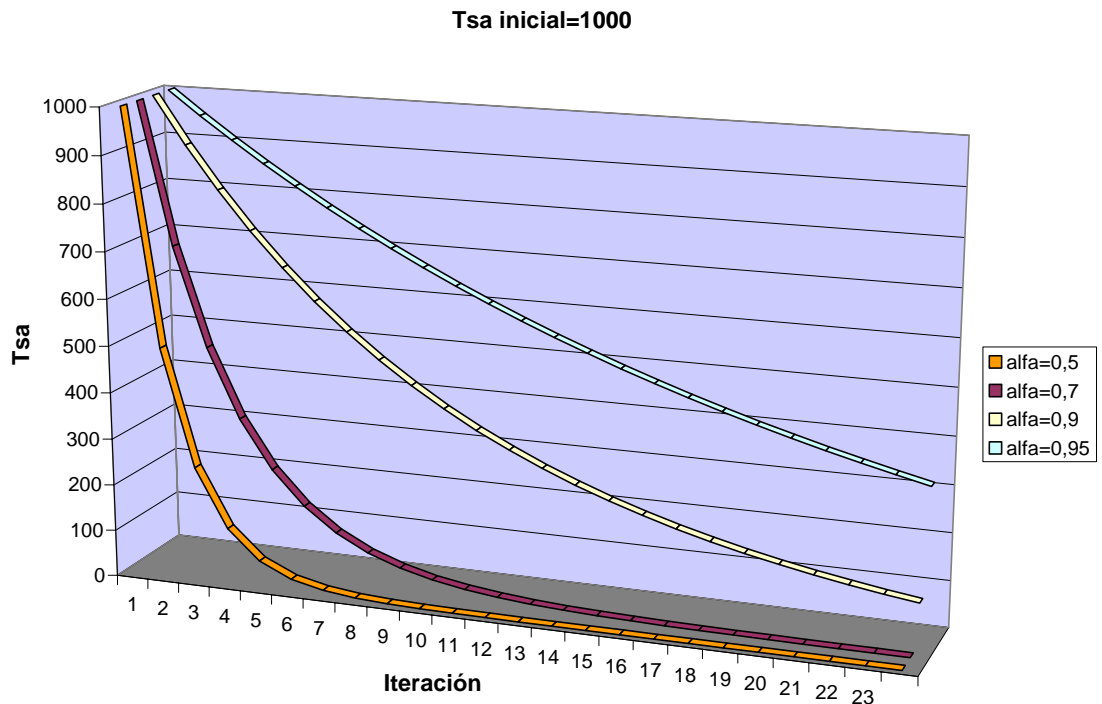


FIGURA 3. Comportamiento de la temperatura del recocido en función de α .

Otro parámetro fundamental del método es la **temperatura inicial del recocido**, que es simplemente la pseudotemperatura con la cual se trabaja en la primera decisión y a partir de la cual se lleva a cabo el enfriamiento^[11]. Al igual que la programación de temperatura, influye en el tiempo de cómputo y en la eficacia del método. Por otro lado, está la pseudotemperatura final del recocido que determina el criterio de parada y también influye en el número de iteraciones. Esta pseudotemperatura final debe tender a 0, aunque un valor cercano a 1 funciona bien^[1].

Existen dos métodos principales para determinar la **probabilidad de aceptación de movimientos**: el método Metropolis y el procedimiento de Glauber. De estos métodos el más usado es el primero, que consiste en aceptar todos los movimientos que mejoren el valor de la función objetivo, y someter los movimientos que empeoran el valor a una decisión probabilística usando una función de Boltzmann. Lo anterior se resume en las siguientes expresiones (para el caso de una minimización; F es la función objetivo)^[7]:

$$\Delta F \leq 0 \Rightarrow p = 1$$

$$\Delta F > 0 \Rightarrow p = \exp\left(\frac{-\Delta F}{T_{sa}}\right)$$

De esta forma, a medida que avanza el método la probabilidad de aceptar movimientos que empeoren el valor de la función objetivo disminuye pues la pseudotemperatura de recocido va disminuyendo.

2.5. Aplicación del recocido simulado a la *HENS*

En el caso de la síntesis de redes de intercambio de calor, se crea un problema maestro, que trabaja con la topología de la red, y uno esclavo, que optimiza cada estructura generada. En la figura 4 se muestra un esquema del funcionamiento

general del recocido simulado en su aplicación a la síntesis de redes de intercambio de calor^[1].

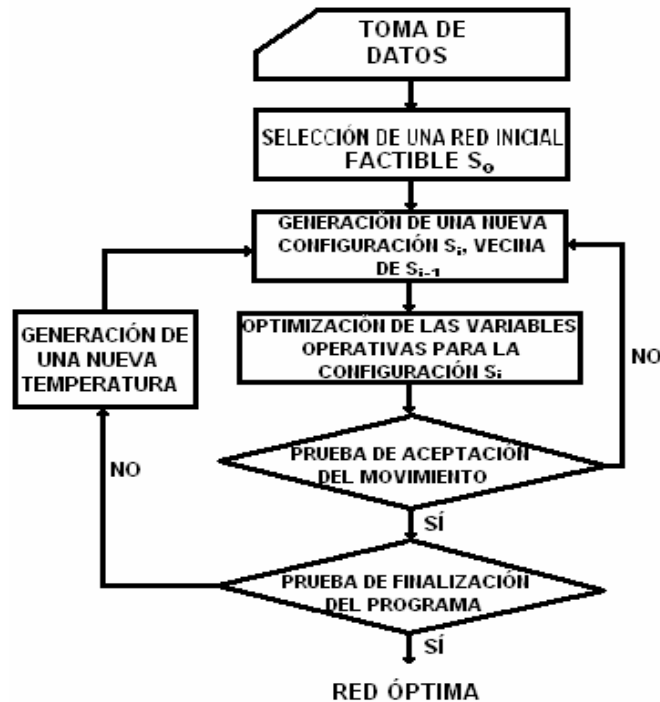


FIGURA 4. Esquema de aplicación del recocido simulado a la HENS

Para aplicar el recocido simulado a este problema, la generación de cada nueva configuración se hace por medio de la adición o sustracción de un intercambiador entre un par de corrientes al azar, en una posición también aleatoria. El método permite trabajar también con divisores de corriente (*splitters*) si se permite que los intercambiadores agregados generen dichos elementos; en el presente trabajo cada aparición de un *splitter* genera automáticamente un mezclador después, permitiendo así un máximo de división de corrientes en 2 ramas.

Luego de la generación de una nueva topología, se maximiza la recuperación de energía para tal estructura y se comprueba que la estructura resultante sea factible; si cumple los requisitos termodinámicos se procede a calcular el costo de la red. Se compara este valor con el costo de la última red aceptada; si el costo de la nueva red es menor, se acepta el movimiento tomando como base la topología

recién creada para la siguiente búsqueda y si el costo es mayor, se calcula el valor de la función de Boltzmann, se genera un número aleatorio entre 0 y 1 y si este número es menor que el valor de la función, el movimiento se acepta. En el caso de que el movimiento sea aceptado, se procede a cambiar el valor de la pseudotemperatura del recocido usando la programación de temperatura y se comprueba el cumplimiento del criterio de parada. Si no se cumple el criterio se repite el ciclo; en caso contrario se obtiene la solución.

3. DESARROLLO DEL PROGRAMA

Como ya se mencionó, la síntesis de redes de intercambio se fracciona en un problema maestro (topología) y uno esclavo (optimización de estructuras) para aplicarle ciertos métodos de optimización, entre ellos el recocido simulado. Las aplicaciones encontradas en la literatura usan al recocido simulado para encargarse del problema maestro y algún otro método para resolver el problema esclavo. En el presente trabajo, se han resuelto los dos problemas usando el recocido simulado; de aquí en adelante se llamará *recocido externo* o *recocido superior* al encargado del problema maestro y *recocido interno* al algoritmo que resuelve el problema esclavo.

El programa ha sido escrito en *VisualBasic for Excel*TM. Se eligió este entorno porque *Excel*TM es un programa ampliamente conocido y resulta interesante hacer la optimización de la síntesis de redes de intercambio en un software tan común, mostrando en cierto modo lo que es posible hacer con programas de fácil consecución. A continuación se describe el funcionamiento interno del programa; para una descripción de su manejo y entorno se remite al lector a los anexos.

3.1. Almacenamiento de las variables

La representación del problema en el programa se hace totalmente por medio de matrices y vectores. En matrices se almacenan los datos de las corrientes, la topología de la red, las transferencias entre corrientes, las temperaturas de salida de los intercambiadores y las áreas de los intercambiadores; y existen múltiples vectores auxiliares que guardan las necesidades de servicios de las corrientes, la cantidad de apareamientos de cada corriente, entre otras cosas. Las matrices más

importantes para el funcionamiento del programa son las siguientes (N_{COLD} es el número de corrientes frías y N_{HOT} es el número de corrientes calientes):

- Apareos: Matriz de dimensiones $N_{\text{COLD}} \times N_{\text{HOT}}$. Almacena la cantidad de apareamientos existentes entre cada par de corrientes, hasta un máximo de 4 (en la práctica, es poco probable que una buena estructura contenga más de 2 apareamientos entre algún par de corrientes, pero se decidió darle libertad de búsqueda al algoritmo).
- OrdenC y OrdenH: Matrices tridimensionales de dimensiones $N_{\text{COLD}} \times 2 \times N_{\text{HOT}} \times 2$ y $N_{\text{HOT}} \times 2 \times N_{\text{COLD}} \times 2$, respectivamente. Guardan en qué orden se encuentran los apareamientos desde el punto de vista de cada corriente; en el caso de OrdenC cada fila representa una corriente fría, y al avanzar por una fila se encuentran las corrientes calientes con las cuales está apareada la corriente fría, en orden de temperatura ascendente de la corriente fría. El segundo “piso” se usa en el caso de existir una división de corriente, pues en esa situación se considera que hay dos corrientes diferentes apareadas en la misma posición con la corriente en consideración. De forma similar funciona OrdenH.
- Calores: Matriz tridimensional de dimensiones $N_{\text{COLD}} \times N_{\text{HOT}} \times 4$. Almacena el calor transferido en cada apareamiento, funcionando de manera similar a la matriz Apareos. Los 4 “pisos” de la tercera dimensión de la matriz se usan para permitir el almacenamiento de las energías transferidas en los diferentes apareamientos del mismo par de corrientes, en caso de haber más de uno.
- TemperaturaC y TemperaturaH: Matrices de dimensiones similares a OrdenC y OrdenH, almacenan las temperaturas de las corrientes a la salida del apareamiento correspondiente en las matrices OrdenC y OrdenH.
- AreaInter: Matriz de dimensiones similares a OrdenC, almacena el área del intercambiador correspondiente al apareamiento ubicado en la misma posición en la matriz OrdenC.

3.2. El recocido externo

Tras la toma de datos, el programa genera una primera solución factible. Esta primera solución es el caso en el que toda la transferencia se realiza con los servicios industriales; esto es, el caso en que no hay apareamientos entre corrientes. Se calcula el costo de esta primera solución. Luego se realiza el primer movimiento; un movimiento consiste en seleccionar al azar una corriente caliente y una corriente fría (seleccionar una posición en la matriz Apareos), y después elegir aleatoriamente si se agregará o quitará un intercambio entre las corrientes seleccionadas (naturalmente, si no hay apareamientos entre estas corrientes la única opción es agregar un intercambiador). Posteriormente se elige al azar en qué posición se agrega el intercambiador que se adiciona (en caso de que se agregue un apareamiento) o qué intercambiador entre las corrientes seleccionadas se quita (en caso de que se sustraiga un apareamiento). Lo anterior se hace en las matrices OrdenC y OrdenH.

Luego de realizado el movimiento, el recocido interno optimiza la estructura actual y revisa que la estructura sea factible. Tras esta optimización, se calcula el costo de la red y se compara con el costo de la red anterior y dependiendo de esto se acepta o rechaza la estructura actual. El método de aceptación es el método Metropolis, por consiguiente si la estructura actual tiene menor costo que la anterior tiene una probabilidad de 1 de ser aceptado y si su costo es mayor tiene una probabilidad de aceptación de acuerdo a la función de Boltzmann.

Si un movimiento es aceptado, se reemplazan las variables almacenadas por las variables de la estructura actual convirtiéndose de esta manera en el nuevo punto base desde el cual se generará la siguiente estructura. Adicionalmente, se disminuye la temperatura del recocido externo de acuerdo a la programación de temperatura y se comprueba el criterio de parada (que la temperatura del recocido externo sea igual o menor a 1, o 100 movimientos sin aceptar ninguna estructura). Si no se cumple el criterio, se genera una nueva estructura.

3.3. El recocido interno

Para llevar a cabo la optimización de las estructuras por medio del recocido simulado, se decidió asumir el enfoque de la máxima recuperación de energía; el recocido interno genera inicialmente un conjunto aleatorio de calores transferidos entre las corrientes apareadas en la estructura actual. Luego procede a elegir al azar un apareamiento existente y decide aleatoriamente si agrega o quita calor y en qué cantidad. Tras esto comprueba que se cumplan los requerimientos energéticos de las corrientes. Si se cumplen, se decide si se acepta el movimiento o no, siendo aquí la recuperación de energía el criterio de selección en el método Metropolis. En la figura 5 se representa el funcionamiento del recocido interno.

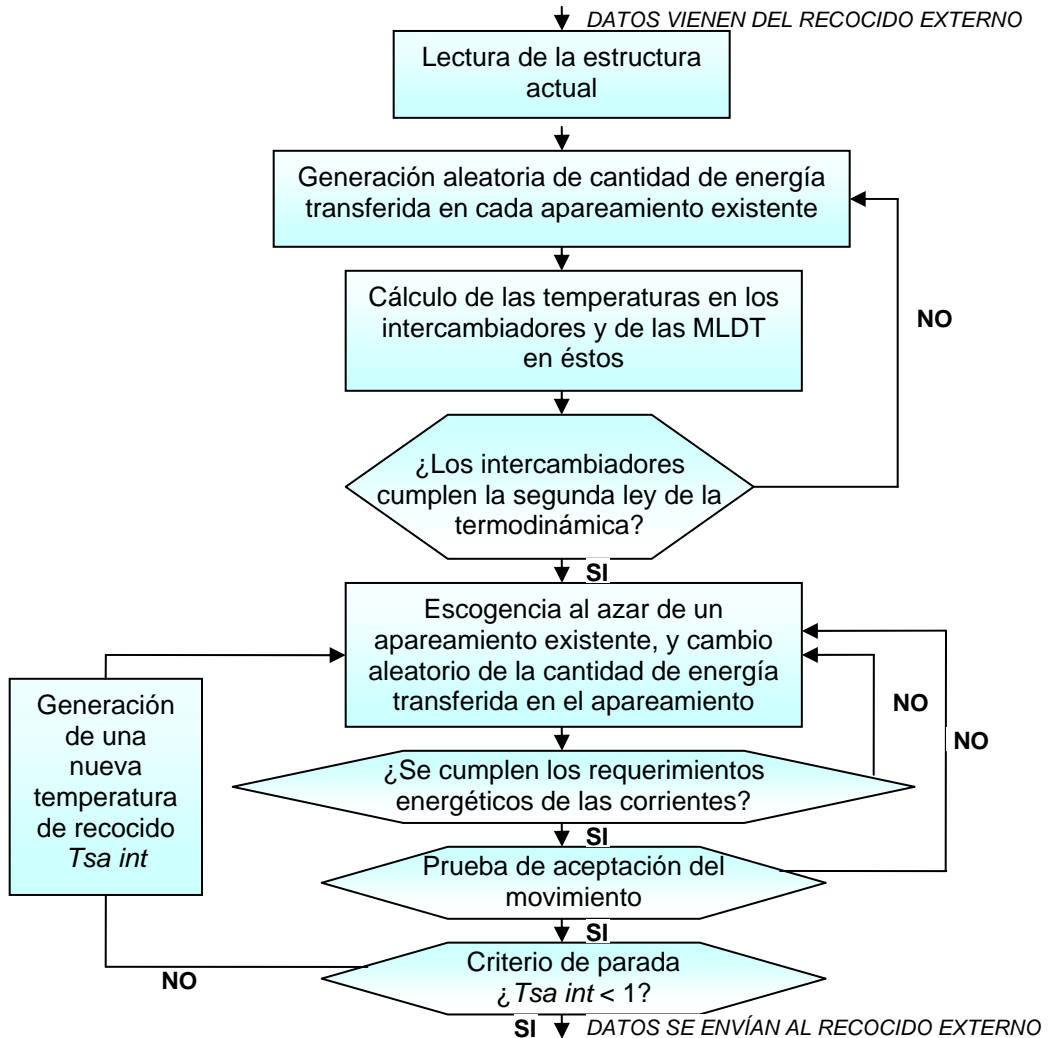


FIGURA 5. Esquema del recocido interno

3.4. Sintonización de los parámetros del método

Para llevar a cabo la sintonización del método, se realizaron experimentos iniciales con los casos de estudio 3 y 4, analizando en cada uno de éstos el comportamiento del óptimo y del tiempo de convergencia respecto a cambios en uno de los tres conjuntos de parámetros manteniendo los otros constantes. Los conjuntos fueron temperatura inicial del recocido externo, temperatura inicial del recocido interno y factor alfa (usando el mismo factor alfa en los dos recocidos). Esta información fue usada para guiar la elección de los parámetros en cada caso de estudio, los cuales, sin embargo, fueron ejecutados con varios conjuntos de parámetros.

3.4.1. Temperatura inicial del recocido externo:

Con el caso de estudio 3 se realizaron 4 experimentos con distintos valores de la temperatura inicial externa, manteniendo en 0,99 los factores alfa y en 3000 la temperatura interna. Los datos obtenidos se muestran en la tabla B1. La relación entre el óptimo y la temperatura inicial externa se muestra en la fig. 6.

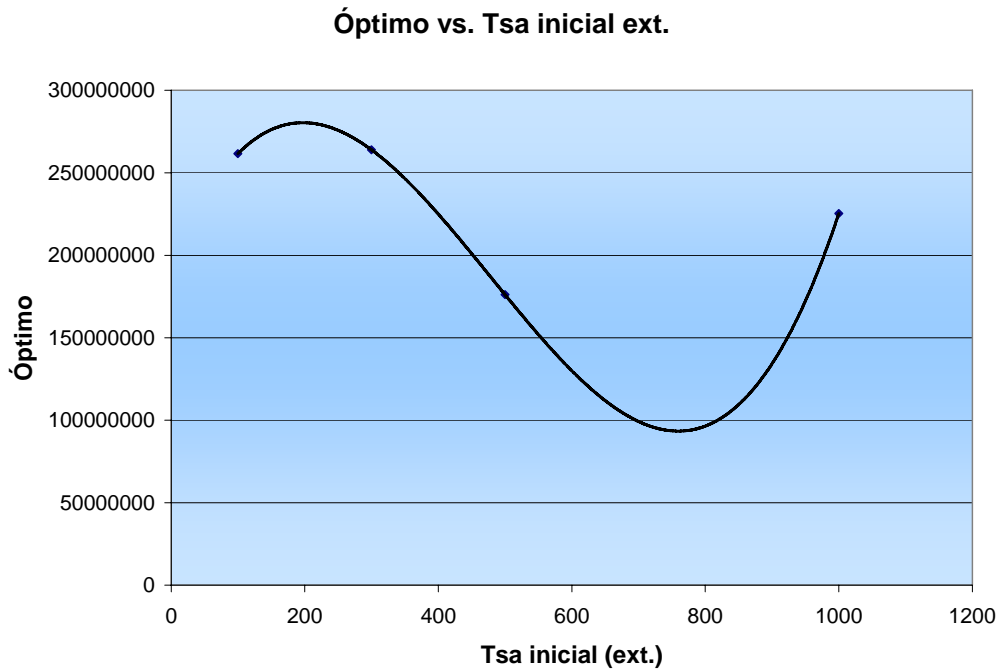


FIGURA 6. Comportamiento del óptimo para diferentes Tsa iniciales externas (caso 3)

Con el caso de estudio 4 se realizaron 4 experimentos manteniendo constantes los alfas en 0,99 y la temperatura inicial del recocido interno en 1000. Los datos obtenidos se encuentran en la tabla B2, y la gráfica que muestra el óptimo en función de la temperatura inicial de recocido externa para este caso se muestra en la figura 7:

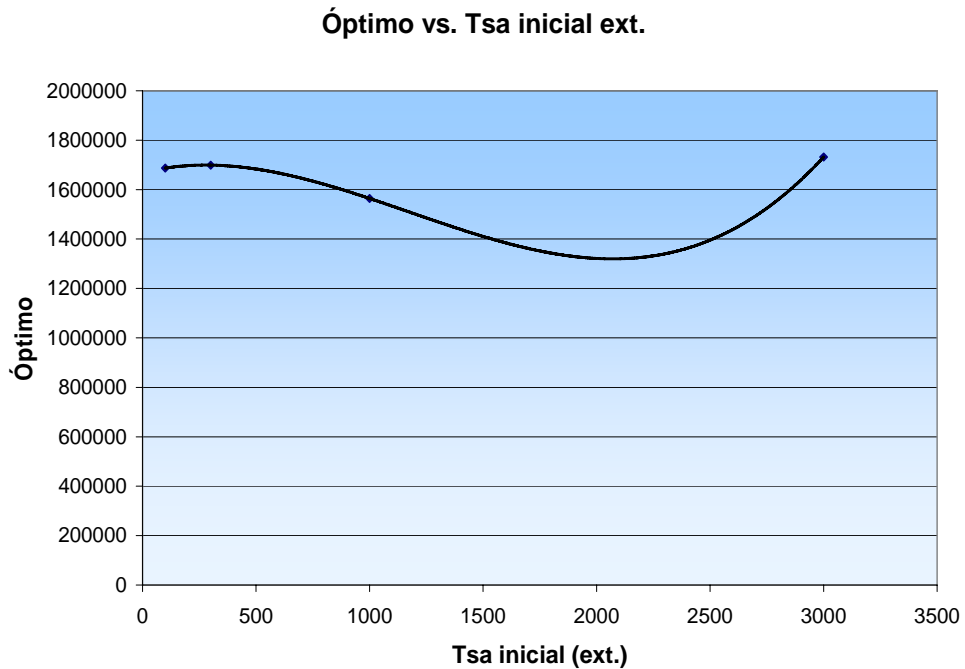


FIGURA 7. Comportamiento del óptimo para diferentes Tsa iniciales externas (caso 4)

3.4.2. Temperatura inicial del recocido interno:

Se realizó la experimentación usando el caso de estudio 3. Se determinó que en este caso funcionaba mejor una temperatura inicial interna cercana a 1000. Se realizaron 2 experimentos con los alfas en 0,99 y la temperatura inicial externa en 500. Los datos obtenidos se muestran en la tabla B3.

3.4.3. Parámetros alfa:

Con el caso 3, se usaron temperaturas de recocido iniciales interna de 3000 y externa de 500, realizándose 4 experimentos. Los datos se presentan en la tabla B4. La relación entre el óptimo y los alfas se muestra en la figura 8.

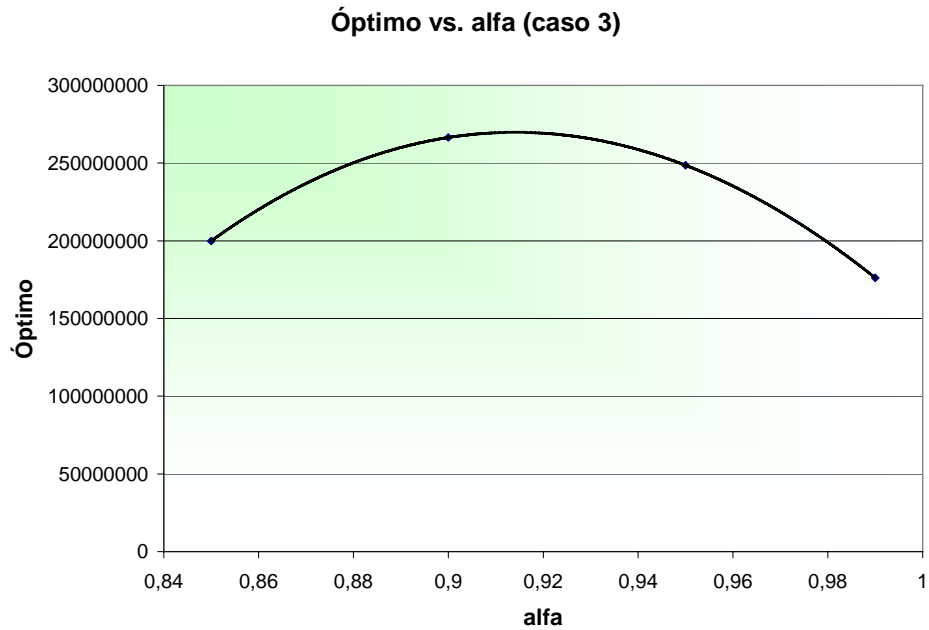


FIGURA 8. Comportamiento del óptimo para diferentes valores de alfa (caso de estudio 3)

Para el caso de estudio 4 se mantuvo la temperatura inicial de recocido interno en 2000 y la temperatura inicial de recocido externo en 1000. Se realizaron 4 experimentos con diferentes valores de alfa. Los datos se presentan tabulados en la tabla B5, y gráficamente en la figura 9.

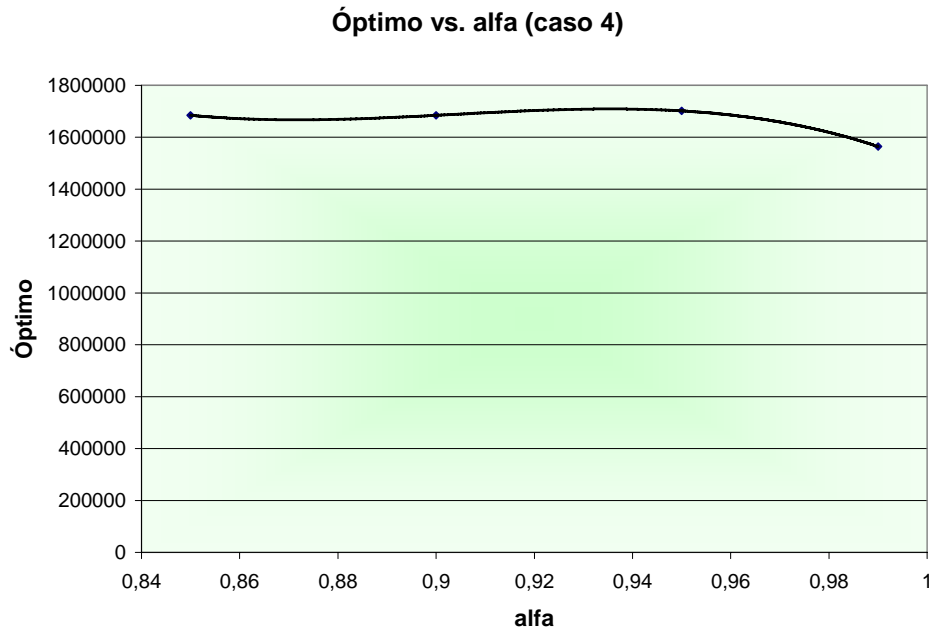


FIGURA 9. Comportamiento del óptimo para diferentes valores de alfa (caso de estudio 4)

Los anteriores experimentos muestran que en el caso del alfa existe una región media de mejor desempeño para el método. En el caso de las temperaturas iniciales, la relación depende mucho de las topologías, y éstas del problema en particular. Parece ser que lo que causa tanta variabilidad en las respuestas del caso de estudio 3 son los grandes delta de función objetivo entre movimientos, del orden de $1 \cdot 10^6$ U\$/año, frente a casos más estables como el caso 4, en el que los deltas de función objetivo son del orden de $1 \cdot 10^3$ U\$/año.

3.5. Simplificaciones del programa

Para poder comparar el recocido simulado y los algoritmos genéticos, el programa desarrollado en el presente trabajo cuenta con las mismas simplificaciones que el programa realizado por Uribe y Avila. Esas restricciones son las siguientes:

- Capacidades caloríficas constantes en las corrientes de proceso
- Capacidades caloríficas constantes en los servicios
- Un solo tipo de servicio de calentamiento
- Un solo tipo de servicio de enfriamiento
- Ausencia de cambio de fase, tanto en las corrientes como en los servicios industriales
- Aislamiento perfecto en las tuberías
- Mezclado isotérmico
- Intercambiadores en contracorriente
- Coeficiente de transferencia de calor convectivo constante para cada corriente
- Resistencia de la pared de los intercambiadores despreciable
- División de corrientes máximo en dos ramas
- Una sola ecuación de costos para intercambiadores (excepto en el caso de estudio 7, en el cual se usaron dos ecuaciones de costos)

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se presentan los resultados de 7 casos de estudio a los que se les aplicó el algoritmo del recocido simulado, usando el método de Metrópoli para escoger los movimientos, tanto para el algoritmo interno como para el externo, y la programación de temperatura de Kirkpatrick.

Para sintonizar los parámetros del método (alfa y la temperatura inicial del recocido) se analizaron varias posibilidades para cada método y se tomó la combinación que mostrara el mejor desempeño con el menor tiempo de cómputo. Para la comparación del tiempo de cómputo, los dos programas fueron ejecutados en el mismo computador, con procesador de 3000 MHz (AMD 64 bits) y 512 MB de memoria RAM. Se pudo determinar que el tiempo de cómputo del programa de algoritmos genéticos puede llegar a ser 10 veces mayor que el tiempo requerido por el programa de recocido simulado.

4.1. CASO DE ESTUDIO 1^[13]

Tomado de 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: Comp. & Chem. Eng. Great Britain. Vol. 22, No. 10, 1998; p. 1395-1396.*

En la tabla C1 (ver anexos) se muestran los datos para este caso de estudio.

En este caso se obtuvo una media de 3128810,942 U\$/año con una desviación estándar de 65277,13 U\$/año y un tiempo promedio de corrida de 113 minutos. El factor alfa que mejor se ajustó fue de 0,9 para los dos recocidos y las temperaturas iniciales fueron 1000 tanto para el superior como para el interno.

Los resultados obtenidos por el recocido simulado, son mayores en un 4,7% respecto a la respuesta presentada por Ariel Uribe y Fredy Ávila en el 2001^[2], y 3,5% mayores a la respuesta presentada en el artículo del cual se extrajo el caso de estudio. La presente red óptima tiene 17 unidades de intercambio involucrando calentadores y enfriadores, con un área total de 17605,5 m² (2,4% menor), Qh de 26,15 MW (10% mayor) y Qc de 34,07 MW (8,1% mayor). Los costos de la mejor red obtenida se presentan a continuación:

Inversión (U\$/yr)	Costo Servicios(U\$/yr)	Costos Totales (U\$/yr)
1266385	1773696	3040081

En la figura 10 se representa la mejor red obtenida para el presente caso de estudio.

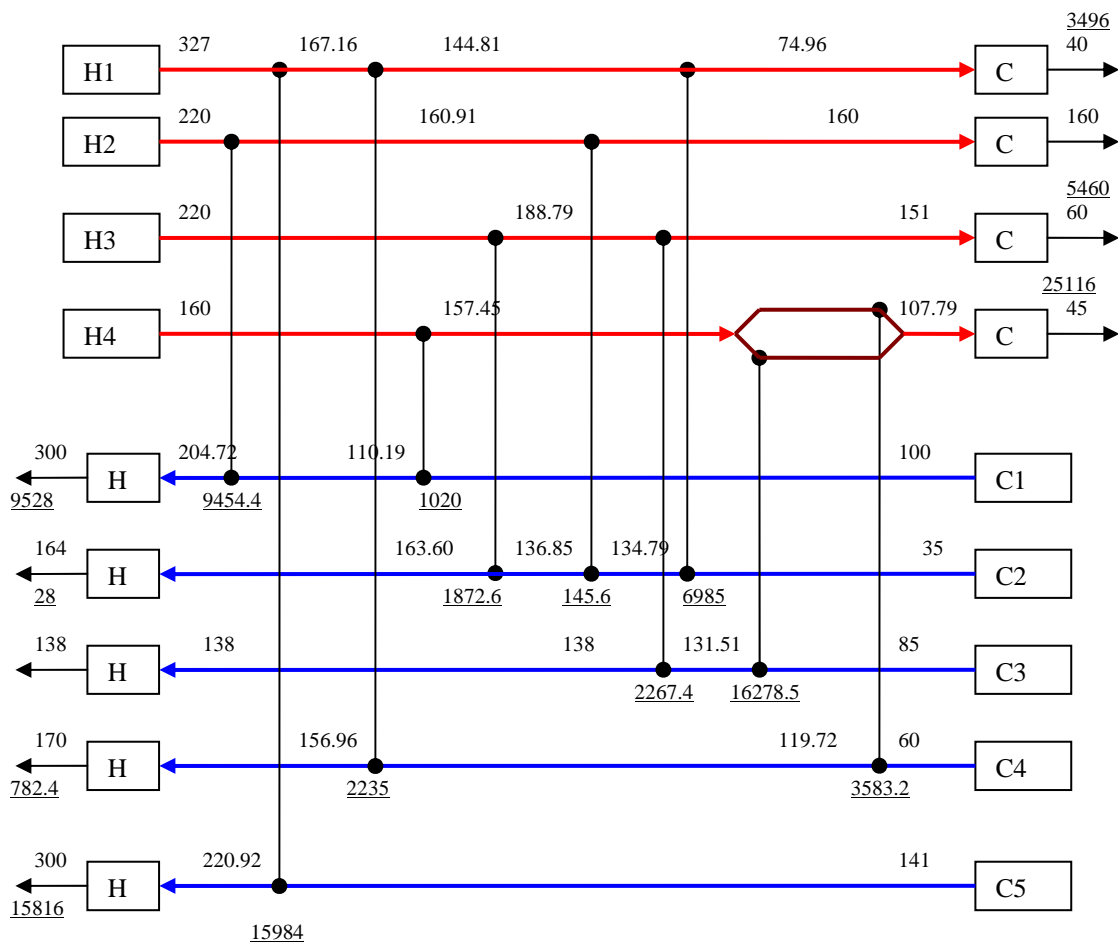


FIGURA 10. Mejor red obtenida para el caso de estudio 1

4.2. CASO DE ESTUDIO 2^[13]

Tomado de 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: Comp. & Chem. Eng. Great Britain. Vol. 22, No. 10, 1998; p. 1399.*

En la tabla C2 (ver anexos) se resumen los datos del presente caso de estudio.

Para este caso de estudio se obtuvo una media de 46372,34 U\$/año, con una desviaron estándar de 703,45 U\$/año y un tiempo promedio de corrida de 44 minutos. El factor alfa que mejor se ajustó fue el de 0,99 tanto para el algoritmo interno como externo, con temperaturas iniciales de recocido superior de 1000 y de 2000 para el interno.

La red óptima del programa desarrollado es 4% más costosa comparada con la obtenida por Ariel Uribe y Fredy Avila en el 2001^[2], y 3,9% más cara que la mejor red obtenida en el artículo original. La red óptima obtenida consta de 16 unidades de intercambio incluyendo los enfriadores, no necesita calentamiento, y tiene un área total de 326,87 m² (27,8% mayor) y Qc de 1884,39 KW (0,29% mayor). Los costos de la mejor red del presente trabajo son los siguientes:

Inversión (U\$/yr)	Costo Servicios (U\$/yr)	Costos Totales (U\$/yr)
11241,64	34145,14	45386,78

En la figura 11 se presenta la mejor red obtenida por el programa de recocido para este caso de estudio.

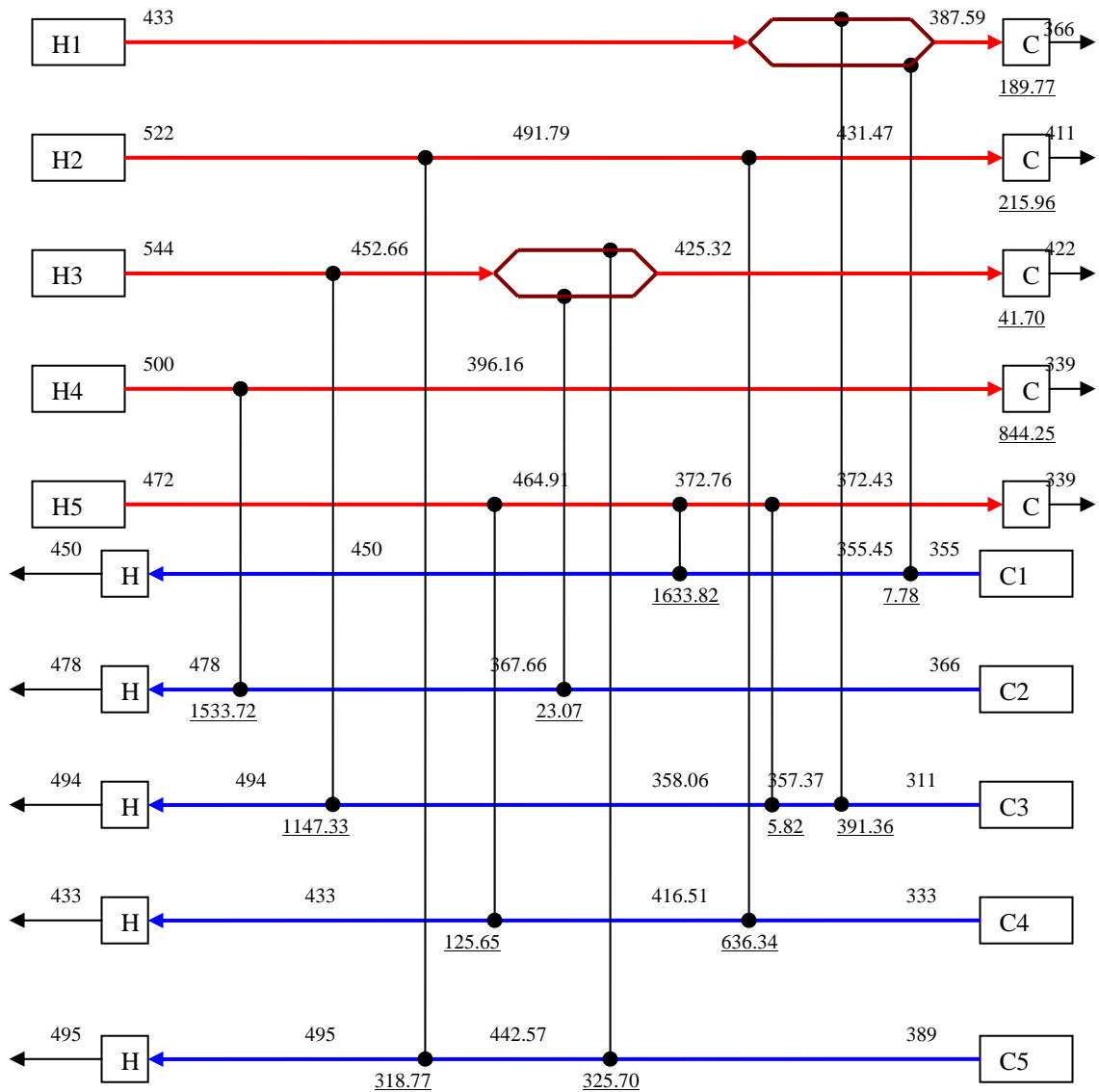


FIGURA 11. Mejor red obtenida para el caso de estudio 2

4.3. CASO DE ESTUDIO 3^{[13],[17]}

Tomado de 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: Comp. & Chem. Eng. Great Britain. Vol. 22, No. 10, 1998; p. 1400.*

Propuesto primero en SANDVIG, J., WEEL, M. Y KIRSTENSEN, K. *Retrofit and Optimization of Industrial Heat Exchanger Networks: A Complete Benchmark Problem.* En: *Computer Chem. Eng. Great Britain.* Vol. 21, suppl., 1997; p. S469 - S474.

En la tabla C3 (ver anexos) se resumen las condiciones del presente caso de estudio.

Para este caso de estudio se obtuvo una media de 189137622,1 U\$/año, con una desviación estándar de 9490145,96 U\$/año y un tiempo promedio de corrida de 25 minutos. El factor alfa que mejor se ajustó fue de 0,99 para el recocido externo y 0,99 para el interno, con temperaturas iniciales superior de 500 e interna de 3000.

La mejor red hallada por el programa de recocido presenta costos superiores en un 28,2% al mejor resultado del programa de Ariel Uribe y Fredy Avila en el 2001^[2], y 11% mayores a la respuesta de Lewin *et al.* El resultado del trabajo presente muestra un área total de 16283,95 m² (15,1% menor), con 14 unidades de intercambio y Qh de 54020,64 KW (27,2 mayor), y Qc de 29314,87 KW (64,6% mayor) aunque en este caso el servicio de enfriamiento no tiene costo. Los costos de la mejor red obtenida por el programa desarrollado son los siguientes:

Inversión (U\$/yr)	Costo Servicios (U\$/yr)	Costos Totales (U\$/yr)
10857679,48	165303158,4	176160837,9

En la figura 12 se representa la red que tiene los costos recién mencionados.

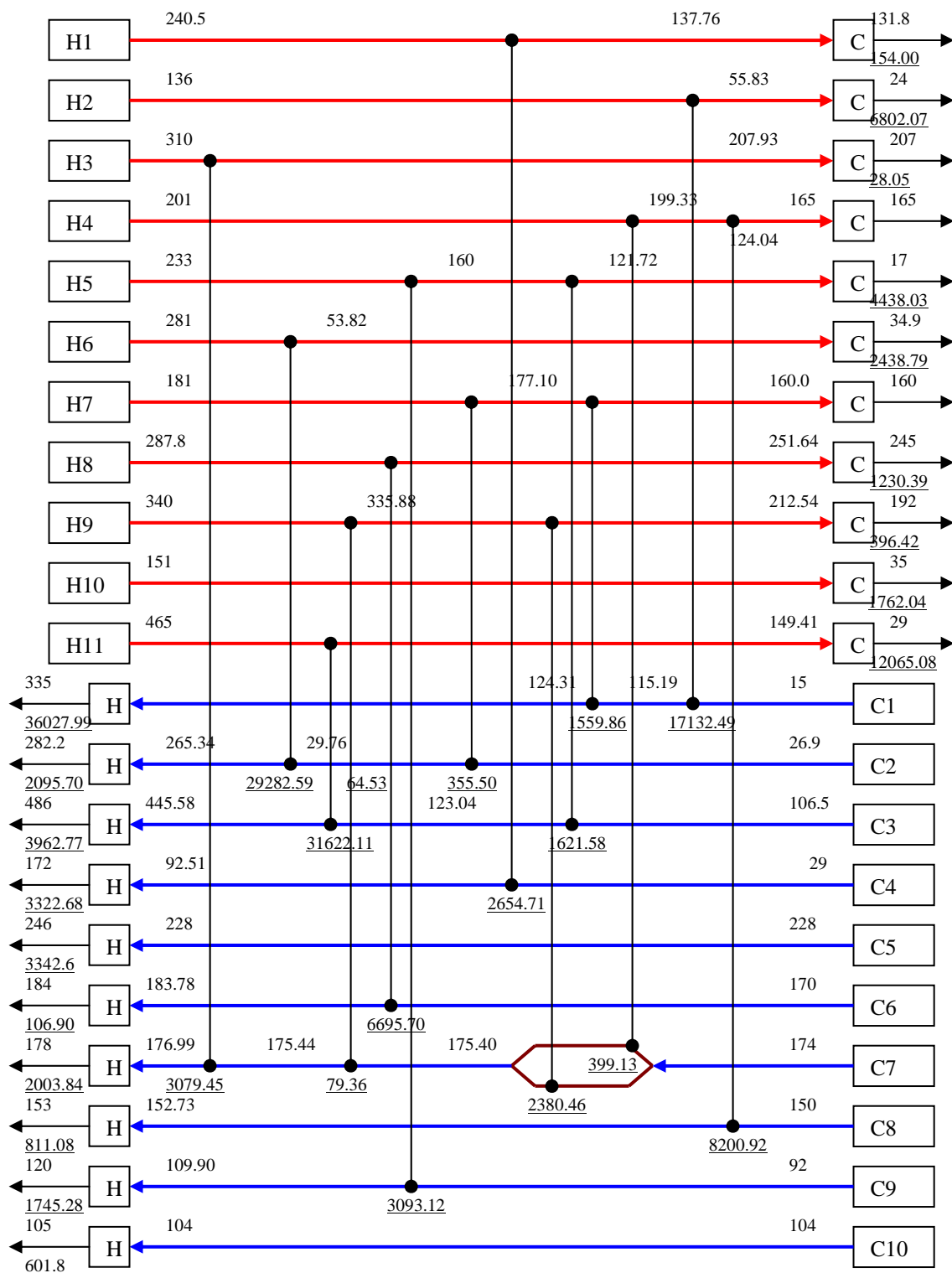


FIGURA 12. Mejor red obtenida para el caso de estudio 3

4.4. CASO DE ESTUDIO 4^[21]

Tomado de ZHU X. *Automated Design Method for Heat Exchanger Network Using Block Decomposition and Heuristic Rules. Example 1.* *En: Comp. & Chem. Eng. Great Britain. Vol. 21, No. 10, 1997; p. 1100.*

En la tabla C4 (ver anexos) se resumen los datos del caso de estudio presente.

Para este caso se obtuvo una media de 1644662,974 U\$/año, una desviación estándar de 56908,03 U\$/año, tardando en promedio 16 minutos la ejecución del programa. El factor alfa que mejor se ajustó fue de 0,99 tanto para el recocido interno como para el externo, con temperaturas iniciales externa de 1000 e interna de 2000.

El mejor resultado hallado es 1,9% menor al obtenido por el programa de Uribe y Ávila en el 2001 utilizando algoritmos genéticos^[2], y 2,3% mejor que la red presentada por Zhu. La red óptima tiene 7 unidades de intercambio incluyendo calentadores y enfriadores con un área total de 19380,65 m² (0,82% más bajo), Qh 6999 KW (0,44% menor) y Qc 4467 (10,84% mayor). La mejor red obtenida tiene los siguientes costos:

Inversión (U\$/yr)	Costo Servicios (U\$/yr)	Costos Totales (U\$/yr)
749632,501	814560	1564192,501

En la figura 13 se representa la mejor red obtenida por el programa de recocido simulado en este caso de estudio.

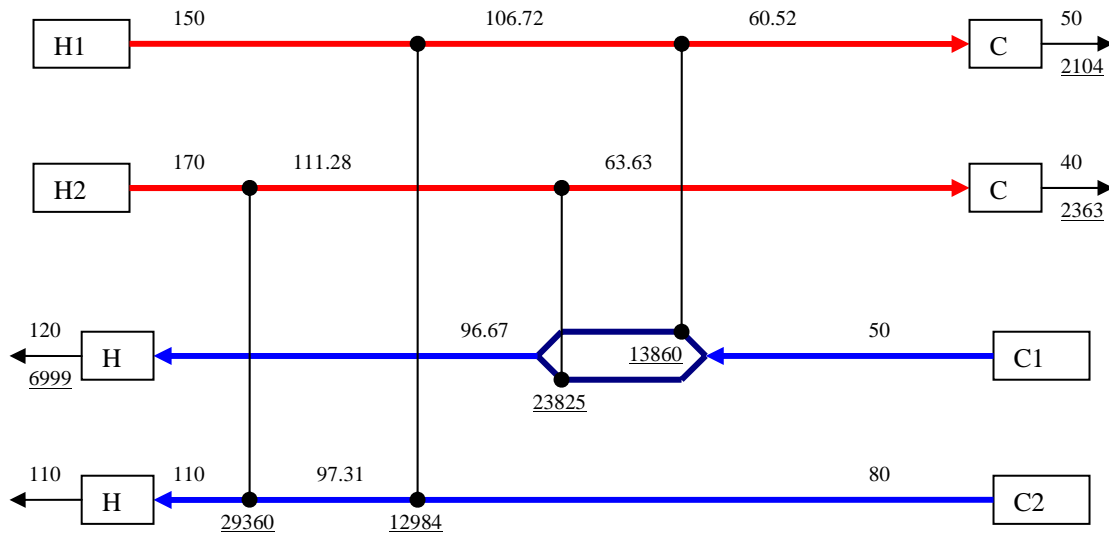


FIGURA 13. Mejor red obtenida para el caso de estudio 4

4.5. CASO DE ESTUDIO 5^[21]

Tomado de ZHU X. *Automated Design Method for Heat Exchanger Network Using Block Decomposition and Heuristic Rules. Example 2.* *En: Comp. & Chem. Eng. Great Britain. Vol. 21, No. 10, 1997; p. 1101.*

En la tabla C5 se presentan los datos del caso de estudio número 5.

Para este se obtuvo una media de 49308,28 U\$/año, una desviación estándar de 484,18 U\$/año, con un tiempo de corrida promedio de 7 minutos. El factor alfa que mejor se ajustó fue de 0,99, tanto para el algoritmo interno como externo, la temperatura superior fue de 100 y la interna de 2000.

El mejor resultado obtenido fue 1,6% menor al costo hallado por Uribe y Avila^[21]; la mejor red del trabajo actual presenta un área total de 240,28 m² (4,8 % menor) con 7 unidades de intercambio incluyendo calentadores y enfriadores. Qh de 187,62 KW (0,6% mayor) y Qc de 166,72 KW (0,6% mayor). Aunque la presente

red tiene un mayor costo de servicios, es más económica por que necesita menor área de intercambio.

En la figura 14 se muestra la mejor red obtenida en el trabajo presente para este caso de estudio.

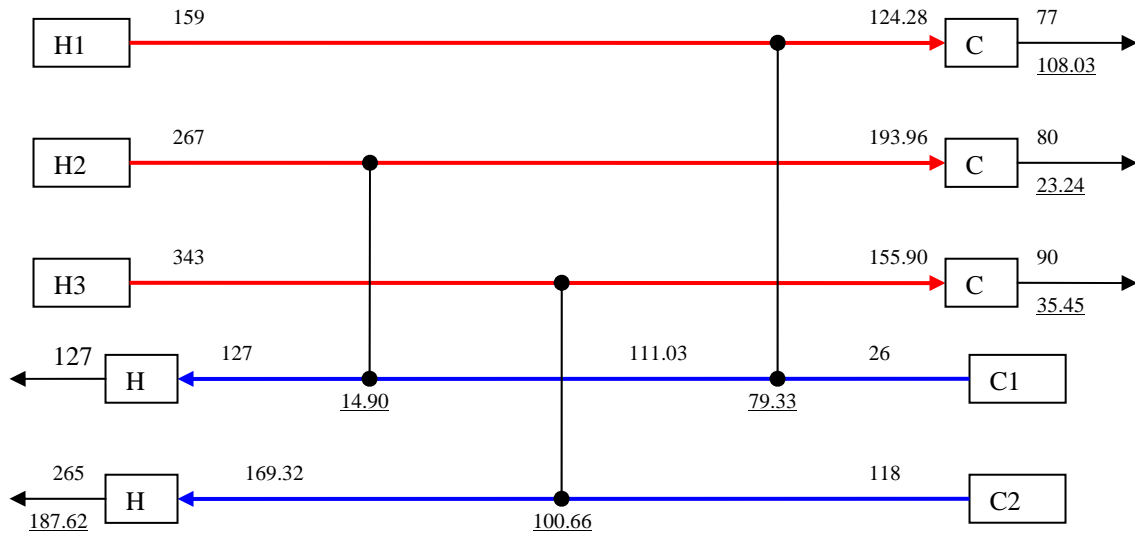


FIGURA 14. Mejor red obtenida para el caso de estudio 5

4.6. CASO DE ESTUDIO 6^[22]

Tomado de 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: Trans IChemE. Great Britain. 73(A), November 1995; p. 922.*

En la tabla C6 (ver anexos) se resumen los datos para este caso de estudio.

Para este caso se obtuvo una media de 86344,24 U\$/año, con una desviación estándar de 3227,39 U\$/año, y un tiempo promedio de corrida de 12 minutos. El factor alfa que mejor se ajustó fue el de 0,99 tanto para el algoritmo interno como externo, las temperaturas iniciales fueron 500 para el externo y 2000 para el interno.

La red encontrada es 1,3% más costosa que la encontrada por Uribe y Ávila en el 2001^[2]; la red obtenida presenta un área total de 404,85 m² (11,8 % menor) con 7 unidades de intercambio incluyendo calentadores y enfriadores, un Qh de 32,2 KW y Qc de 432,9 KW. Los costos de la mejor red obtenida son:

Inversión (U\$/yr)	Costo Servicios (U\$/yr)	Costos Totales (U\$/yr)
70704,60	11234	81938,6

En la figura 15 se encuentra representada la mejor red obtenida, a la cual corresponden los costos recién mencionados.

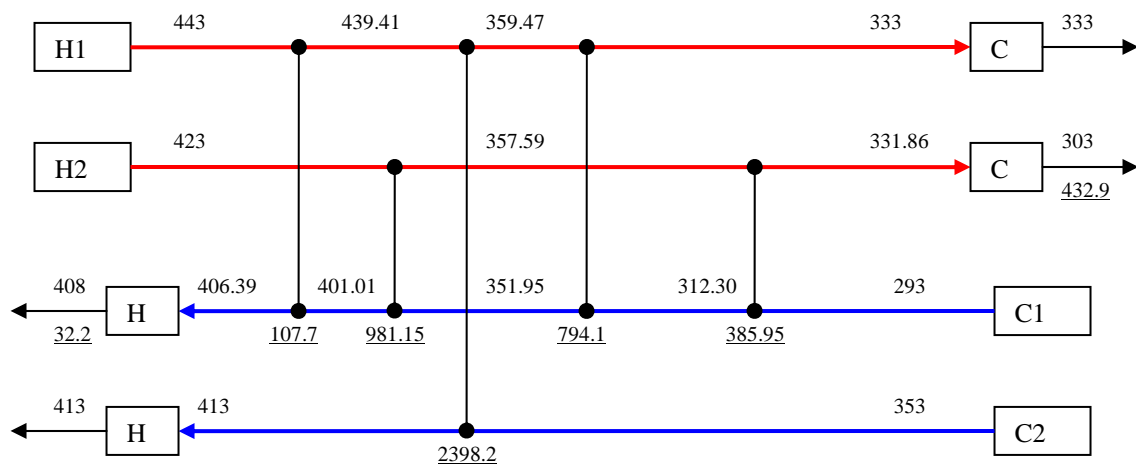


FIGURA 15. Mejor red obtenida para el caso de estudio 6

4.7. CASO DE ESTUDIO 7^[4]

Tomado de CASTILLO E., ACEVEDO L., REVERVERI A. *Cleaner Production of Nitric Acid by Heat Transfer Optimization: A case study.* En: Chem. Biochem. Eng. Q. Vol. 12, No.3, 1998; p. 157-165.

En la tabla C7 (ver anexos) se encuentran los datos de este caso de estudio.

Para este caso de estudio se obtuvo una media de 113792,41 U\$/año, con una desviación estándar de 257,55 U\$/año, y un tiempo promedio de corrida de 7 minutos. El factor alfa que mejor se ajustó a este caso fue de 0,99 tanto para el algoritmo interno como externo, la temperatura inicial superior fue de 700 y la interna de 2000.

La mejor red obtenida por Uribe Ariel y Fredy Avila declara un área total de 66,61 m² [2], pero en realidad el área total de esa red es de 68,51 m² incluyendo enfriadores, con un costo real de 113765,68 U\$/año. No es posible comparar la red contra la respuesta del artículo de Castillo *et al.* porque en el artículo original no se permitieron divisiones de corriente así que las condiciones son diferentes. La red óptima del presente trabajo presenta un costo 1,51% menor al realmente obtenido por Ariel Uribe y Fredy Avila en el 2001. La mejor red obtenida en el presente trabajo contiene un área total de 65,65 m² (1,4% menor) y Qc de 1222,73 KW (7,62% menor) y sus costos se presentan a continuación:

Inversión (U\$/yr)	Costo Servicios (U\$/yr)	Costos Totales (U\$/yr)
93706,22	18340,95	112047,17

En la figura 16 se representa gráficamente la mejor red obtenida para el presente caso de estudio.

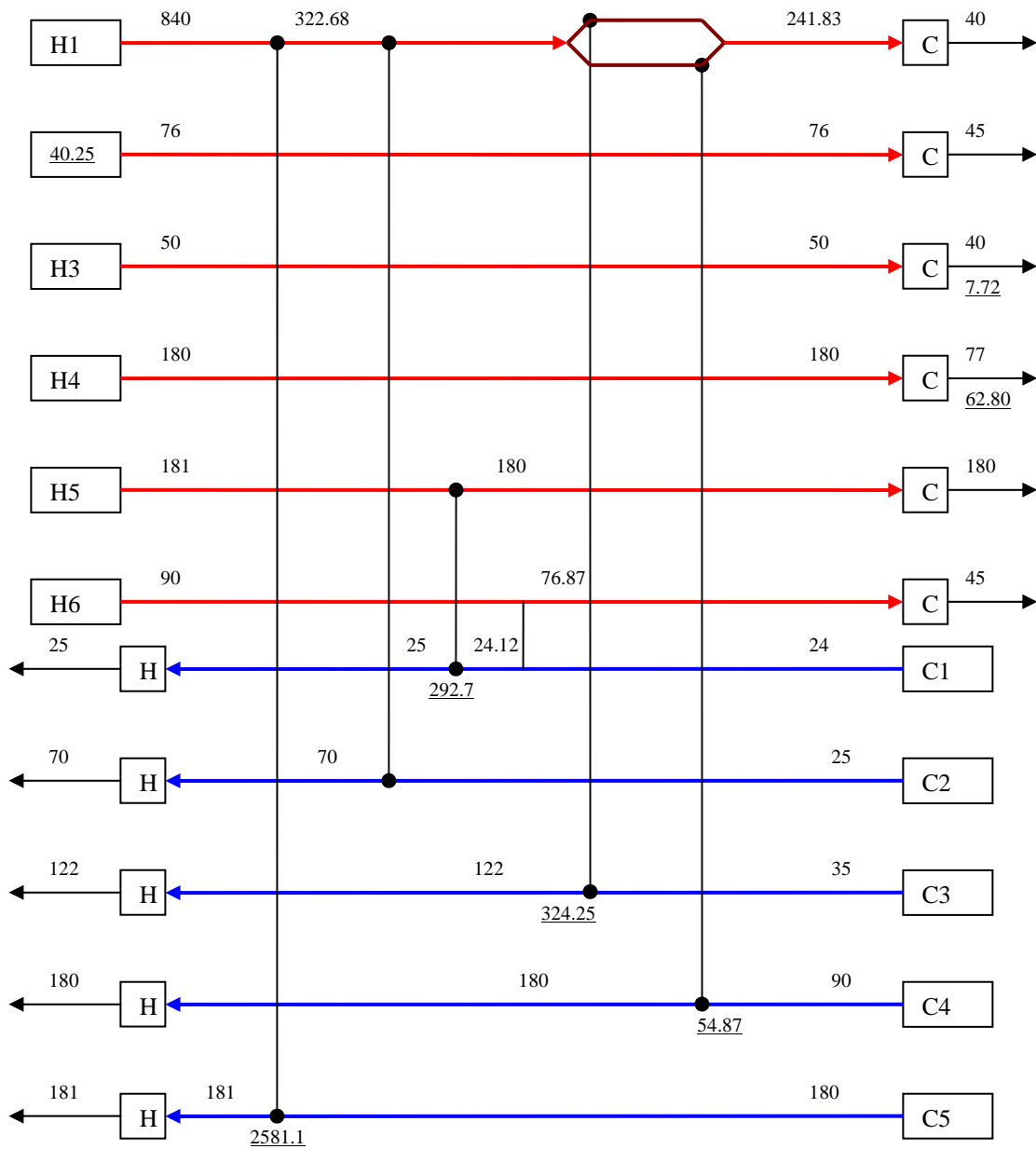


FIGURA 16. Mejor red obtenida para el caso de estudio 7

5. CONCLUSIONES

- Se ha logrado desarrollar un programa para hacer síntesis de redes de intercambio de calor muy amigable para el usuario, pues consiste en un único archivo que corre en un *software* ampliamente difundido y conocido como es *Excel*TM, lo que genera que el entorno sea familiar y que su uso sea sencillo. El programa ha mostrado un excelente desempeño en problemas *HENS* pequeños (hasta de 5 corrientes calientes y 5 corrientes frías) y un desempeño bueno en problemas más grandes, y su ejecución es mucho más rápida que otros programas diseñados para el mismo fin. En ocasiones, se presenta una alta variabilidad entre las respuestas obtenidas, pero este comportamiento es inherente al recocido simulado y a las demás técnicas estocásticas, por lo cual se recomienda realizar la corrida del programa con varias repeticiones para obtener los mejores resultados posibles.
- Respecto a los parámetros del programa, el carácter estocástico del método y el tipo de problema hacen que sea imposible establecer una relación analítica entre las funciones objetivos o la cantidad de variables y los parámetros del método. Sin embargo, para el programa desarrollado se ha evidenciado que para problemas pequeños funciona muy bien valores α de 0,95, y para problemas mayores los α deben valer 0,99; la temperatura inicial del recocido externo puede tomar valores entre 100 y 700 para problemas cuya función objetivo sea del orden de $1 \cdot 10^6$, y valores superiores a 1000 para los demás casos; y la temperatura del recocido interno debe estar entre 1000 y 4000, recomendándose usar valores altos

pues para gran parte de los problemas el resultado obtenido tiene una alta sensibilidad respecto al desempeño del recocido interno.

- De acuerdo a lo que muestra la comparación del programa desarrollado en el presente trabajo y el programa desarrollado por Avila y Uribe, con las restricciones asumidas se ha encontrado que el recocido simulado halla mejores respuestas que los algoritmos genéticos para problemas pequeños, pero estos últimos obtienen mejores resultados en los problemas de mayor tamaño. El programa de recocido simulado escrito para el presente trabajo tiene ventajas sobre el programa de algoritmos genéticos en tiempos de cómputo y en facilidad de uso, y ambos programas presentan una variabilidad similar, muy alta, en los resultados dados siendo esto inevitable a causa de las características de los métodos usados.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ATHIER G. *et al.* Synthesis Of Heat-Exchanger Network By Simulated Annealing And NLP Procedures. En: *AIChE Journal*; Nov 1997; 43, p. 11
- [2] AVILA DÍAZ, F. B.; URIBE RODRÍGUEZ, A. Propuesta De Una Red De Intercambio De Calor Para Topping Usando Algoritmos Genéticos. Trabajo de grado (Ingeniería Química). UIS, Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga, 2001.
- [3] BAVU, B. V. Evolutionary Computation - At a Glance. <http://citeseer.ist.psu.edu/661550.html>
- [4] CASTILLO E., ACEVEDO L., REVERVERI A. Cleaner Production Of Nitric Acid By Heat Transfer Optimization: A Case Study. En: *Chem. Biochem. Eng. Q*, 1998, 12 (3); p. 157-165.
- [5] CERDA, J.; WESTERBERG, A. W. Synthesizing Heat Exchanger Networks Having Restricted Stream/Stream Matches Using Transportation Problem Formulations. En: *Chem. Eng. Sci.* 1983, 38 (10), p. 1723-1740.
- [6] COLBERT, R. W. Industrial Heat Exchange Networks. En: *Chem. Eng. Prog.* 1982, 78 (7), p. 47-54.
- [7] DOLAN, W. B.; CUMMINGS, P. T.; VAN, M. D. Process Optimization Via Simulated Annealing: Application To Network Design. En: *AIChE J.* 1989, 35 (5), p. 725-736.
- [8] FLOUDAS, C. A.; CIRIC, A. R.; GROSSMANN, I. E. Automatic Synthesis Of Optimum Heat Exchanger Network Configurations. En: *AIChE J.* 1986, 32 (2), p. 276-290.
- [9] FRANGOPOULOS, C. A. Methods Of Energy Systems Optimization. Gliwice, Polonia, 2003.
- [10] FURMAN, K. C.; SAHINIDIS, N.V. A Critical Review And Annotated Bibliography For Heat Exchanger Network Synthesis In The 20th Century. En: *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002, 41, p. 2335-2370
- [11] KIRKPATRICK, S.; GELATT JR., C. D.; VECCHI, M. P. Optimization By Simulated Annealing. En: *Science*, 1983, 220, p. 4598

[12] LEWIN, D. R.; WANG, H.; OFIR, S. A Generalized Method For Hen Synthesis Using Stochastic Optimization - I. General Framework And Mer Optimal Synthesis. En: *Computers and Chem. Eng.* 1998, 22 (10); p. 1503 - 1513.

[13] _____ A Generalized Method For HEN Synthesis Using Stochastic Optimization - II. The Synthesis Of Cost-Optimal Networks. En: *Comp. & Chem. Eng. Great Britain*, 1998, 22 (10), p. 1395-1396.

[14] LINNHOFF, B.; FLOWER, J. R. Synthesis Of Heat Exchanger Networks - I. Systematic Generation Of Energy Optimal Networks. En: *AIChE J.* 1978, 24 (4), p. 633-642.

[15] LINNHOFF, B.; HINDMARSH, E. The Pinch Design Method For Heat Exchanger Networks. En: *Chem. Eng. Sci.* 1983, 38 (5), p. 745-763.

[16] MASSO, A. H.; RUDD, D. F. The Synthesis Of System Designs-II. Heuristic Structuring. En: *AIChE J.* 1969, 15 (1), 10-17.

[17] SANDVIG, J., WEEL, M. Y KIRSTENSEN, K. Retrofit And Optimization Of Industrial Heat Exchanger Networks: A Complete Benchmark Problem. En: *Computer Chem. Eng. Great Britain*. Vol. 21, suppl., 1997; p. S469 - S474.

[18] TEN BROECK, H. Economic Selection Of Exchanger Sizes. En: *Ind. Eng. Chem.* 1944, 36 (1), p. 64-67.

[19] TJOE, T. N.; LINNHOFF, B. Using Pinch Technology For Process Retrofit. En: *Chem. Eng.* 1986, 93 (4), p. 47-60.

[20] UMEDA, T.; ITOH, J.; SHIROKO, K. Heat Exchange System Synthesis. En: *Chem. Eng. Prog.* 1978, 74 (7), p. 70-76.

[21] ZHU X. Automated Design Method For Heat Exchanger Network Using Block Decomposition And Heuristic Rules. En: *Comp. & Chem. Eng. Great Britain*. 1997, 21 (10); p. 1100.

[22] ZHU X.; O'NEILL B.K. A Method For Automated Heat Exchanger Network Synthesis Using Block Decomposition And Non-Linear Optimization. En: *Trans IChemE. Great Britain*. 1995, 73, Part A; p. 922.

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA HENSSA

El programa ha sido desarrollado en *VisualBasic for Excel*TM, fue escrito en *Microsoft Office Excel 2003*TM y tiene un tamaño aproximado de 431 KB; fue creado íntegramente por los autores del presente trabajo. Consta de 4 hojas de cálculo (“Instrucciones”, “Datos de Entrada”, “Desarrollo” y “Resultado”) y un módulo de procedimientos de *VisualBasic*. El programa se activa mediante un botón de comando presente en la hoja “Datos de Entrada”. Al programa se le bautizó *HENSSA*, siendo esto la unión de las siglas en inglés de “síntesis de redes de intercambio de calor” (*HENS*) y “recocido simulado” (*SA*).

- Hoja “Instrucciones”

En esta hoja se presentan las instrucciones de uso del programa. Su único objetivo es servir como guía para el usuario.

INSTRUCCIONES DE USO HENSSA	
	<ol style="list-style-type: none">1. Llene los datos requeridos de las corrientes, así como los datos de las tablas "Datos Económicos", "Costos de Intercambiadores" y "Datos Varios". El programa puede manejar hasta 21 corrientes calientes y 21 corrientes frías; obviamente no es necesario que se llenen totalmente las tablas de las corrientes, pero sí se necesita que las corrientes que se vayan a declarar se anoten en las primeras filas de las tablas y que sus datos estén completos. No es necesario llenar las celdas verdes en las tablas de las corrientes.2. Introduzca los valores que desee usar para los parámetros del método. Como aproximación inicial, use valores α de 0,95 para problemas pequeños y de 0,99 para problemas grandes; temperaturas iniciales externas de entre 400 y 2000 y temperaturas iniciales internas de entre 1000 y 4000.3. Pulse el botón naranja "Ejecutar" para iniciar el programa. A continuación aparecen dos cajas de texto en las que se solicita que se introduzca el número de corrientes calientes y el número de corrientes frías.4. Mientras el programa está trabajando, muestra otra hoja de cálculo en la cual se puede ver el progreso del método a través de las temperaturas externa e interna del recocido simulado, así como el costo de la última estructura aceptada.5. Finalmente, muestra los resultados en una hoja diferente, llamada "Resultado". En ella presenta la matriz Apareos, que corresponde al número de apareamientos entre cada pareja de corriente caliente (columnas) y frías (filas). También muestra las matrices OrdenC y OrdenH que representan el orden de los distintos apareamientos para las corrientes frías y calientes respectivamente; las corrientes frías (calientes) se representan en filas y los números que aparecen son las corrientes calientes (frías) en orden de temperatura ascendente (descendente); y las matrices TemperaturaC y TemperaturaH que muestran las temperaturas de salida de los intercambiadores correspondientes a la misma posición en las matrices OrdenC y OrdenH, respectivamente. Posteriormente se encuentra la matriz Arealter que corresponde a las áreas de los intercambiadores de los apareamientos entre corrientes (con la misma organización que la matriz OrdenC), luego están los vectores con las áreas de los intercambiadores de los apareamientos con los servicios y por último se

Apariencia de la primera hoja de cálculo, “Instrucciones”

- Hoja “Datos de Entrada”

Como se lee en “Instrucciones”, es en esta hoja en la que se introducen todos los datos del problema: mC_p , h , T_{in} y T_{out} de cada una de las corrientes involucradas, temperaturas y h para los servicios industriales, datos económicos y HRAT. También deben introducirse valores para los parámetros del método. Se decidió realizar la toma de datos a través de tablas porque resulta mucho más cómodo que hacerlo por medio de cajas. En el desarrollo del programa siempre se tuvo presente la búsqueda de la sencillez y la funcionalidad, sacrificando algo de estética en pro de estos objetivos.

Para ejecutar el programa, luego de introducir los datos se pulsa el vistoso botón “Ejecutar”. Al hacer esto, aparecen 2 cajas de mensaje en las que se solicita la introducción del número de corrientes calientes y frías que se van a usar. Si se escribe un número menor que la cantidad de corrientes anotadas en las tablas, el programa tomará las primeras corrientes que encuentre en la tabla, barriéndola de arriba hacia abajo.

DATOS DE CORRIENTES CALIENTES						
Stream #	mC_p (KW/K)	h (KW/m ² K)	T_{in} (°C)	T_{out} (°C)	Q (KW)	A_{max} (m ²)
1	200	200	150	50		
2	100	200	170	40		
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						

DATOS DE CORRIENTES FRÍAS						
Stream #	mC_p (KW/K)	h (KW/m ² K)	T_{in} (°C)	T_{out} (°C)	Q (KW)	A_{max} (m ²)
1	300	200	50	120		
2	500	200	80	110		
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						

EJECUTAR

DATOS ECONÓMICOS	
Tasa de oportunidad (%)	10
Valor servicio caliente (\$/KJ)	110
Valor servicio frío (\$/KJ)	10
Tiempo vida proyecto (años)	6

COSTOS DE INTERCAMBIADORES	
Constante A de costo	30800
Constante B de costo	750
Exponente de costo	0.81

DATOS VARIOS	
ΔT_{min} (K) [HRAT]	10
T_{in} enfriamiento (°C)	20
T_{out} enfriamiento (°C)	40
T_{in} calentamiento (°C)	180
T_{out} calentamiento (°C)	180
h calentamiento (KW/m ² K)	200
h enfriamiento (KW/m ² K)	200

PSEUDOTEMPERATURAS INICIALES	
Recocido externo	700
Recocido interno	1000

PARÁMETROS α	
Recocido externo	0.95
Recocido interno	0.95

La ecuación de costo de los intercambiadores es la siguiente:
Costo = A • B • (Área)^{Exponente}

Aspecto de tablas de introducción de datos en la hoja “Datos de Entrada”

- Hoja “Desarrollo”

Esta hoja se muestra mientras el programa lleva a cabo la resolución del problema. Muestra el costo de la red resultante si todo el enfriamiento y calentamiento es efectuado por los servicios industriales en la casilla marcada como “Costo peor red (U\$/año)”, las temperaturas actuales de recocido externo e interno, el calor recuperado en cada paso del recocido interno y el valor de la última red aceptada por el programa (no necesariamente es la mejor que ha encontrado, sino el último punto base). Esto se muestra para poder ver de alguna manera el progreso del método, aunque como se sabe el hallazgo de la respuesta a un problema *HENS* para este programa puede estar entre los 10 y los 60 minutos, o incluso más para problemas más grandes que los estudiados en el presente libro.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										

Vista de la tercera hoja de cálculo, “Desarrollo”

- Hoja “Resultado”

En esta hoja se presenta el resultado, por medio de las matrices Apareos, OrdenC, OrdenH, TemperaturaC, TemperaturaH, ArealInter, y los vectores de las áreas de los intercambiadores con los servicios industriales. También se muestra el costo de la inversión inicial, el costo de los servicios y el costo total, todos anualizados. A continuación se muestra la presentación de una respuesta.

MATRIZ DE APAREAMIENTOS				
	1	2	3	4
1	2	1	0	0
2	0	1	1	1
3	0	1	3	0

MATRIZ DE ORDEN DE CORRIENTES FRIAS									
PRIMER PISO					SEGUNDO PISO				
1	1	1	2	0	1	0	0	0	0
2	2	3	4	0	2	0	0	0	0
3	3	3	3	2	3	0	0	0	0

MATRIZ DE ORDEN DE CORRIENTES CALIENTES									
PRIMER PISO					SEGUNDO PISO				
1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
2	2	3	1	2	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	2	0	0	0	0
4	2	0	0	4	0	0	0	0	0

MATRIZ DE TEMPERATURA DE CORRIENTES FRIAS (°C)									
PRIMER PISO					SEGUNDO PISO				
1	70,9484119	105,357542	116,819156	0	1	0	0	0	0
2	50,379366	71,0287798	109,989772	0	2	0	0	0	0
3	56,529227	70,9484119	122,952516	117,057608	3	0	0	0	0

MATRIZ DE TEMPERATURA DE LAS CORRIENTES CALIENTES (°C)									
PRIMER PISO					SEGUNDO PISO				
1	98,3863068	66,9636917	0	1	0	0	0	0	0
2	168,103165	167,149353	132,764511	2	0	0	0	0	0
3	129,218262	129,218262	103,101357	3	129,218262	0	0	0	0
4	164,559235	0	0	4	0	0	0	0	0

MATRIZ DE AREAS DE INTERCAMBIADORES (m2)									
PRIMER PISO					SEGUNDO PISO				
1	2,88509965	2,92056203	0,91171187	0	1	0	0	0	0
2	0,01840511	0,00460265	0,33276111	0	2	0	0	0	0
3	0,4495239	0	1,22147095	0,0200637	3	0	0	0	0

AREAS INTERCAMBIO SERV. CALENTAMIENTO		AREAS INTERCAMBIO SERV. ENFRIAMIENTO	
1	0,15496977	1	1,19232357
2	0	2	1,95605719
3	4,58595037	3	0,05080608
		4	3,01819491

Servicios (U:	2296065,2
Inversión (U:	435041,375
Costo Total:	2731106,5

Vista de la cuarta hoja, “Resultado”, mostrando una respuesta

**ANEXO B. TABLAS DE RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DE
SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL MÉTODO**

Temperatura Inicial	Optimo (U\$/Año)	Tiempo De Convergencia (min)
100	261651341,5	30
300	263956220,2	40
500	176160837,9	25
1000	225286305,5	42

TABLA B1. Efectos de la temperatura inicial de recocido externo para el caso de estudio 3

Temperatura Inicial	Optimo (U\$/año)	Tiempo De Convergencia (min)
100	1687112,82	20
300	1699013,575	14
1000	1564192,501	23
3000	1731854,629	16

TABLA B2. Efectos de la temperatura inicial de recocido externo para el caso de estudio 4

Temperatura Inicial	Optimo (U\$/año)	Tiempo De Convergencia (min)
1000	205038531,2	15
10000	189122593,4	60

TABLA B3. Efectos de la temperatura inicial de recocido interno para el caso de estudio 3

Alfa	Optimo (\$/año)	Tiempo De Convergencia (min)
0,85	199899626,3	20
0,9	266444086,8	20
0,95	248588348,8	45
0,99	176160837,9	25

TABLA B4. Efectos de los factores alfa para el caso de estudio 3

Alfa	Optimo (U\$/año)	Tiempo De Convergencia (min)
0,85	1684627,64	16
0,9	1684332,07	20
0,95	1701453,808	16
0,99	1564192,501	13

TABLA B5. Efectos de los factores alfa para el caso de estudio 4

ANEXO C. TABLAS DE DATOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Datos Generales				
Mejor Costo Literatura [U\$/años]	2.936*10 ⁶			
HRAT [°C]	10			
Costos				
Intercambiadores * [U\$/vida útil], (S en m ²)	10000+350*			
Vida útil de la planta [años]	5			
Tasa de interés [%]	0			
Servicio Caliente $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Hot Oil)	60			
Servicio Frío $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Cooling Water)	6			
Datos Cp				
STREAM	T ^S [°C]	T ^T [°C]	Cp[KW/K]	H [KW/M ² K]
H1	327	40	100	0.50
H2	220	160	160	0.40
H3	220	60	60	0.14
H4	160	45	400	0.30
C1	100	300	100	0.35
C2	35	164	70	0.70
C3	85	138	350	0.50
C4	60	170	60	0.14
C5	141	300	200	0.60
Hot Oil	330	250		0.50
Water	15	30		0.50
* Incluyendo Enfriadores y Calentadores				

TABLA C1. Datos del caso de estudio 1

Datos Generales				
Mejor Costo Literatura [U\$/años]		43751		
HRAT [K]		10		
Costos				
Intercambiadores * [U\$/vida útil] , (S en m ²)		$145.63 * S^{0.6}$		
Vida útil de la planta [años]		1		
Tasa de interés [%]		0		
Servicio Caliente $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Steam)		37.64		
Servicio Frío $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Water)		18.12		
Datos Cp				
STREAM	T ^s [K]	T ^T [K]	Cp[KW/K]	H [KW/m ² K]
H1	433	366	8.79	1.704
H2	522	411	10.55	1.704
H3	544	422	12.56	1.704
H4	500	339	14.77	1.704
H5	472	339	17.73	1.704
C1	355	450	17.28	1.704
C2	366	478	13.90	1.704
C3	311	494	8.44	1.704
C4	333	433	7.62	1.704
C5	389	495	6.08	1.704
Steam	509	509		3.408
Water	311	355		1.704

* Incluyendo Enfriadores y Calentadores

TABLA C2. Datos del caso de estudio 2

Datos Generales				
Mejor Costo Literatura [U\$ /año]	160.983.694,52			
HRAT [°C]	15			
Costos				
Intercambiadores* [U\$/vida útil] , (S en m ²)	713943.86 + 0514.71*S ^{0.71}			
Vida útil de la planta [años]	1			
Tasa de interés [%]	0			
Servicio Caliente $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Steam)	3060			
Servicio Frío $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Water)	0			
Datos Cp				
STREAM	T ^S [°C]	T ^T [°C]	Cp[KW/K]	H [KW/M ² K]
H1	240.5	131.8	25.84	0.3258
H2	136.0	24.0	213.70	0.3440
H3	310.0	207.0	30.17	0.1030
H4	201.0	165.0	239.00	0.3540
H5	233.0	17.0	42.38	1.3500
H6	281.0	34.9	128.90	0.7424
H7	181.0	160.0	91.22	0.6230
H8	287.8	245.0	185.30	0.4420
H9	340.0	192.0	19.30	0.0600
H10	151.0	35.0	15.19	0.3000
H11	465.0	29.0	100.20	0.5500
C1	15.0	335.0	171.0	0.3506
C2	26.9	282.2	124.30	0.7455
C3	106.5	486.0	98.04	0.4120
C4	29.0	172.0	41.80	1.3500
C5	228.0	246.0	185.7	1.0340
C6	170.0	184.0	485.90	1.0440
C7	174.0	178.0	1984.00	0.4420
C8	150.0	153.0	3004.00	0.9370
C9	92.0	120.0	172.80	0.6230
C10	104.0	105.0	601.80	1.3760
Steam	502	500		0.5000
Water	1	5		0.5000
* Sin incluir Calentadores y Enfriadores, estos tienen costo nulo				

TABLA C3. Datos del caso de estudio 3

Datos Generales				
Mejor Costo Literatura [U\$ /años]		1.60*10 ⁶		
HRAT [°C]		10		
Costos				
Intercambiadores * [U\$/vida útil] , (S en m ²)		30800 + 750*S ^{0.81}		
Vida útil de la planta [años]		6		
Tasa de interés anual [%]		10		
Servicio Caliente $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Steam)		110		
Servicio Frío $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Water)		10		
Datos Cp				
STREAM	T ^S [°C]	T ^T [°C]	Cp[KW/K]	H [KW/m ² K]
H1	150	50	200	200
H2	170	40	100	200
C1	50	120	300	200
C2	80	110	500	200
Steam	180	180		200
Water	20	40		200

* Incluyendo Enfriadores y Calentadores

TABLA C4. Datos del caso de estudio 4

Datos Generales				
Mejor Costo Literatura [U\$ /años]		46551		
HRAT [K]		36		
Costos				
Intercambiadores * [U\$/vida útil] , (S en m ²)		3800 + 750*S ^{0.83}		
Vida útil de la planta [años]		6		
Tasa de interés anual [%]		10		
Servicio Caliente $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Steam)		110		
Servicio Frío $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Water)		10		
Datos CP				
STREAM	T ^S [°C]	T ^T [°C]	CP[KW/K]	H [KW/M ² K]
H1	159	77	2.285	100
H2	267	80	0.204	40
H3	343	90	0.538	500
C1	26	127	0.933	10
C2	118	265	1.961	500
Steam	300	300		50
Water	20	60		200

* Incluyendo Enfriadores y Calentadores

TABLA C5. Datos del caso de estudio 5

Datos Generales				
Mejor Costo Literatura [U\$ /años]		80815		
HRAT [K]		5.6		
Costos				
Intercambiadores de proceso y enfriadores. [U\$/vida útil] , (S en m ²)		1000*S ^{0.6}		
Calentadores [U\$/vida útil] , (S en m ²)		1200*S ^{0.6}		
Vida útil de la planta [años]		1		
Tasa de interés anual [%]		0		
Servicio Caliente $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Steam)		80		
Servicio Frío $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Water)		20		
Datos Cp				
Stream	T ^S [°C]	T ^T [°C]	Cp[KW/K]	H [KW/m ² K]
H1	443	333	30	1.6
H2	423	303	15	1.6
C1	293	408	20	1.6
C2	353	413	40	1.6
Steam	450	450		4.8
Water	293	313		1.6

TABLA C6. Datos del caso de estudio 6

Datos Generales				
HRAT [K]				45
Costos				
Intercambiadores de proceso y enfriadores. [U\$/vida útil] , (S en m ²)				30800+1644* S ^{0.81}
Calentadores [U\$/vida útil] , (S en m ²)				30800+1200* S ^{0.81}
Vida útil de la planta [años]				6
Tasa de interés anual [%]				10
Servicio Caliente $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Steam)				110
Servicio Frío $\left[\frac{U\$}{kW * año} \right]$ (Water)				15
Datos Cp				
Stream	T ^S [°C]	T ^T [°C]	Cp[KW/K]	H [KW/m ² K]
H1	840	40	4.9894	1.5
H2	76	45	4.684	1.5
H3	50	40	0.772	1.5
H4	180	77	0.6097	1.5
H5	180	181	292.7	0.8
H6	90	45	3.066	1.5
C1	24	25	329.8	0.8
C2	25	70	0.5383	1.5
C3	35	122	3.727	1.5
C4	90	180	0.6097	1.5
C5	180	181	2581.1	0.8
Steam	230	230		1.5
Water	20	40		0.8

TABLA C7. Datos del caso de estudio 7