

### SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR UTILIZANDO ANÁLISE PINCH, TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA E SIMULATED ANNEALING

#### Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani

Departamento de Engenharia Química - Universidade Estadual de Maringá Av. Colombo, 5790, CEP: 87020-900 Maringá – PR – Brasil Telefone: (44) 261-4746 – Fax: (44) 263-3440 – E-mail: <u>ravag@deq.uem.br</u>

#### Patrícia Aparecida Polli Douglas Castilho Mariani

**Resumo** – Um programa computacional para a síntese de redes de trocadores de calor com custo mínimo de investimento e máxima recuperação energética foi desenvolvido. A metodologia empregada para a obtenção de uma rede ótima divide-se em três partes. A primeira consiste em identificar o(s) Ponto(s) de Estrangulamento Energético (PEE) e determinar o consumo mínimo de utilidades e o número mínimo de unidades através do algoritmo da Tabela do Problema, da Análise *Pinch*, em conjunto com a solução do modelo de transbordo aplicado aos problemas de Programação Linear (PL) e Programação Linear Mista com Inteiros (PLIM). Na segunda etapa, uma superestrutura de rede é proposta, baseada nos resultados obtidos na primeira fase. Esta superestrutura é otimizada na terceira etapa, pela aplicação do método de otimização combinatorial *Simulated Annealing* ao problema de Programação Não Linear (PNL) que descreve a superestrutura. Avaliou-se a aplicabilidade do programa comparando-se os resultados obtidos com exemplos da literatura, demonstrando a eficiência do programa na obtenção automática de configurações ótimas de rede. *Palavras chave* – Redes de Trocadores de Calor, Otimização, *Simulated Annealing* 

*Abstract* – This work presents a methodology for the synthesis of heat exchanger networks with minimum investment cost and maximum energy recovery. The methodology proposed is divided in three steps. Firstly the minimum utility consumption, the pinch points and the minimum number of heat recovery units are determined by using the Problem Table from the Pinch Analysis, jointly with the solution of the linear programming transshipment model and the mixed integer linear programming transshipment model. Then, a superstructure described by a nonlinear programming formulation is derived for each sub network, based on the first stage solution. Finally, this superstructure is optimized by using *Simulated Annealing*. A case was studied, and results shown its efficiency in automatically generation of optimal heat exchanger network configurations. *Keywords* – Heat Exchanger Networks, Optimization, *Simulated Annealing*.

**Keywords** – Heat Exchanger Networks, Optimization, Simulated Annealin

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de recuperação de calor sempre despertaram interesse entre os estudos de síntese de processos químicos. Todavia, somente após a primeira crise do petróleo, no início dos anos setenta, houve um aumento considerável nas buscas por novas alternativas de plantas industriais que minimizassem cada vez mais a utilização de energia proveniente da queima de combustíveis. Tal minimização é obtida através da integração energética de processos, realizada por redes de trocadores de calor, de forma a reduzir a quantidade de utilidades empregadas no resfriamento e aquecimento das correntes do processo.

Para obtenção de redes com consumo mínimo de energia e número mínimo de trocadores de calor, desenvolveram-se duas linhas principais de pesquisas: a primeira, conhecida por Análise *Pinch*, utiliza conceitos termodinâmicos, e a segunda é baseada no emprego de métodos de programação matemática. Um dos maiores problemas encontrados na síntese de redes está em sua natureza combinatorial, pois para um dado número de correntes existe uma grande quantidade de configurações



possíveis. Contudo, o número de configurações que satisfazem o critério de consumo mínimo de utilidades é geralmente muito menor que o número total de configurações possíveis e a satisfação desta restrição implica na obtenção de uma rede com custo mínimo de utilidades para uma determinada variação mínima de temperatura.

Neste trabalho, tem-se como objetivos a construção de redes de trocadores de calor (RTC) ótimas com máxima recuperação de energia, consumo mínimo de utilidades e número mínimo de trocadores de calor, seguida da otimização desta rede para um custo mínimo de investimento através da aplicação da técnica de *Simulated Annealing* (SA). Foram empregados conceitos da Análise *Pinch* para a identificação do(s) Ponto(s) de Estrangulamento Energético (PEE) e do consumo mínimo de utilidades. Também foram utilizadas técnicas de Programação Linear (PL) e Programação Linear Inteira Mista (PLIM). O problema de programação linear inteira mista (PLIM), gerado após a aplicação do modelo de transbordo, é resolvido pela aplicação dos métodos *Simplex* e *Branch and Bound*. A obtenção da configuração ótima da rede, a partir da superestrutura gerada, se dá pela aplicação do método SA de otimização combinatorial. A função objetivo (custo mínimo de investimento) é uma equação não linear, consistindo esta etapa de um problema do tipo PNL.

### 2. ANÁLISE *PINCH*.

A aplicação da Análise *Pinch* pode ser dividida em três etapas. A primeira, a definição de metas ou pré-análise, envolve a determinação do consumo mínimo de utilidades, do número mínimo de trocadores de calor, da área mínima de troca térmica e do custo global anual mínimo. A etapa seguinte é a síntese da rede, onde os cruzamentos entre as correntes e o sequenciamento dos trocadores são definidos. A terceira etapa é a evolução da rede, para que ao final da aplicação da análise, seja obtida uma rede de trocadores de calor otimizada. Esta metodologia fornece resultados bastante satisfatórios, como pode ser observado nos trabalhos de RAVAGNANI (1994), CARDOSO (1999) e, RAVAGNANI *et al.* (2003).

A determinação do consumo mínimo de utilidades e a posição do(s) PEE(s) é feita empregando-se o algoritmo da Tabela do Problema, de acordo com SMITH (1995), partindo-se de um valor de  $\Delta T_{min}$  pré-fixado. O PEE consiste em um gargalo do ponto de vista de recuperação de energia. Conhecido o(s) PEE(s), o problema pode ser dividido em duas regiões com balanços energéticos independentes. Na região acima do PEE são requeridos apenas processos de trocas e de aquecimento por meio de utilidades quentes e na região abaixo do PEE são necessários apenas processos de troca e de resfriamento por utilidades frias.

Como estas regiões têm balanços térmicos independentes, suas características devem ser obedecidas para que não ocorra um acréscimo de utilidades além da quantidade mínima prédeterminada. Alguns problemas de integração energética podem apresentar mais de um ponto de estrangulamento energético.

#### **3. MODELO DE TRANSBORDO**

Amplamente usado na Pesquisa Operacional para a solução de problemas, pode ser aplicado à de síntese de RTC. O Modelo de Transbordo é uma variação do modelo de Transporte, e trata da alocação ótima de recursos. De um modo geral, o Modelo de Transporte busca determinar a rota ótima para o transporte de um produto da fonte (fábrica) diretamente ao destino (mercado). Por sua vez, o modelo de Transbordo, visa determinar a rota ótima para o transporte das mesmas mercadorias, porém conduzindo-as da fonte para nós intermediários (depósitos) e daí aos seus destinos.

PAPOULIAS e GROSSMANN (1983) propuseram, para o problema da recuperação de calor, a seguinte analogia: considere-se que o calor seja uma mercadoria a ser transportada das correntes quentes (fontes) para as correntes frias (destinos) através de intervalos de temperatura (depósitos) que levam em conta as restrições termodinâmicas na transferência de calor. A segunda Lei da Termodinâmica requer que o calor flua somente de temperaturas mais elevadas para temperaturas mais baixas. Portanto, esta restriçõo termodinâmica deve ser considerada na modelagem da rede, o que é feito dividindo-se o intervalo total de temperaturas das correntes em intervalos menores. Estes



procedimentos de divisão por intervalos garantem a transferência viável de calor em cada intervalo da rede, considerando uma diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{min}$ ) entre as correntes quentes e frias. Deste modo, considera-se que o calor flui das correntes quentes para o intervalo de temperatura correspondente e daí para as correntes frias do mesmo intervalo, e o excedente de calor não utilizado neste intervalo, fica disponível para ser aproveitado no intervalo seguinte, como mostrado na Figura 1. Portanto, no modelo de transbordo para o problema de redes de trocadores de calor, as correntes e utilidades quentes correspondem às fontes, os intervalos de temperatura correspondem aos nós intermediários (depósitos), e as correntes e utilidades frias correspondem aos destinos.

Então, o modelo do fluxo de calor diz que um determinado intervalo:

- Recebe calor proveniente de todas as correntes e utilidades quentes, cujas faixas de temperatura o incluam.
- Fornece calor para todas as correntes e utilidades frias, cujas faixas de temperatura o incluam.
- Fornece calor para o intervalo inferior seguinte. Este é o calor residual (excesso) não utilizado no intervalo e que, conseqüentemente, tem que fluir para o intervalo de temperaturas mais baixas.

Recebe calor residual (excesso) proveniente do intervalo anterior, que está a uma temperatura superior à sua.

O modelo aqui apresentado é um caso especial do modelo geral de transbordo, já que uma vez estabelecidos os intervalos de temperatura, o calor que flui das correntes quentes para os intervalos e destes para as correntes frias é fixo. Neste caso, as únicas variáveis do modelo são as taxas de calor residual entre os intervalos e as vazões de utilidades quentes e frias ou as taxas de calor das utilidades quentes e frias. Existem diferentes formulações matemáticas do modelo de transbordo que podem ser empregadas na síntese sistemática de redes de recuperação de calor.

# 4. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

A formulação aqui empregada foi apresentada por FLOUDAS *et al.* (1986), e visa a obtenção de estruturas de rede com custo mínimo de investimento, a partir de uma superestrutura gerada de forma a englobar as diferentes configurações possíveis para cada sub-rede. As informações necessárias para a derivação da formulação PNL para cada sub-rede são provenientes da solução das etapas anteriores e envolve os seguintes itens:

- Dados das correntes do processo: para cada corrente do processo, são conhecidos os valores de CP (produto da vazão pela capacidade calorífica), as temperaturas de entrada (T<sup>IN</sup>) e de saída (T<sup>OUT</sup>) e os coeficientes de troca térmica.
- *Dados das correntes de utilidades*: para cada utilidade quente são conhecidas a temperatura e a variação de entalpia e para cada utilidade fria, as temperaturas de entrada e de saída e o valor de CP. Os coeficientes de troca térmica de cada tipo de utilidade são conhecidos e as cargas térmicas totais são fornecidas pela Tabela do Problema.
- Combinações de correntes para troca térmica: a solução do modelo de transbordo para uma dada sub-rede informará quais combinações ocorrem para as correntes do processo e utilidades. O conjunto de combinações é descrito por:

 $MA = \{(i,j) | a \text{ corrente/utilidade quente } i \text{ troca calor com a corrente/utilidade fria } j, i \in HT, j \in CT \}$ (1)

Em que HT = (H) U (UQ) e CT = (C) U (UF). O modelo de transbordo PLIM fornece também informações sobre o calor trocado para cada combinação (i, j)  $\in$  MA. A partir destas informações, uma superestrutura é derivada para cada sub-rede.

Na derivação da formulação matemática PNL, todas as correntes do processo e de utilidades serão denotadas pelo índice comum,

$$HCT = (HT) \cup (CT) = (k) \tag{2}$$

A superestrutura para cada corrente  $k \in HCT$  envolve um conjunto de correntes *l*, denotadas pelo conjunto de índices  $N_k = \{l\}$ . Cada corrente *l* está associada às variáveis  $CP_l^k$  (capacidade



térmica) e  $t_l^k$  (temperatura). A superestrutura de cada corrente k, envolve divisores e misturadores de correntes, identificados pelos índices  $S_k = \{s\} \in M_k = \{m\}$ , respectivamente. O divisor  $s^0 \in S_k$  indica o ponto inicial e  $m^0 \in M_k$  indica o ponto final da superestrutura da corrente k. A relação dos conjuntos de divisores e misturadores com as correntes de entrada e saída são dados por:



Figura 1: Modelo de Transbordo para Redes de Trocadores de Calor.

$$S_{k}^{IN}(s) = \{s/s \in N_{k} \text{ } e \text{ entrada de } s\}$$

$$S_{k}^{OUT}(s) = \{s/s \in N_{k} \text{ } e \text{ saida de } s\}$$

$$M_{k}^{IN}(m) = \{m/m \in N_{k} \text{ } e \text{ entrada de } m\}$$

$$M_{k}^{OUT}(m) = \{m/m \in N_{k} \text{ } e \text{ saida de } m\}$$

$$(3)$$

O conjunto de trocadores de calor corresponde às combinações previstas pelo conjunto MA. As correntes de entrada e saída para cada trocador são dadas por:

 $E_{ij}^{HIN} = \{n \mid n \in N_i \text{ é a entrada da corrente quente } i \text{ para a unidade } (i, j) \in MA\}$   $E_{ij}^{HOUT} = \{p \mid p \in N_i \text{ é a saída da corrente quente } i \text{ da unidade } (i, j) \in MA\}$   $E_{ij}^{CIN} = \{q \mid q \in N_j \text{ é a entrada da corrente fria } j \text{ para a unidade } (i, j) \in MA\}$   $E_{ij}^{COUT} = \{r \mid r \in N_j \text{ é a saída da corrente fria } j \text{ da unidade } (i, j) \in MA\}$   $E_{ij}^{COUT} = \{r \mid r \in N_j \text{ é a saída da corrente fria } j \text{ da unidade } (i, j) \in MA\}$ (4)

Definidos os conjuntos e as variáveis que descrevem a superestrutura total para uma dada subrede, as seguintes restrições são aplicadas:



1. Balanço material para os divisores de corrente:

$$\sum_{l \in S_k^{(N)}(s)} CP_l^k - \sum_{l \in S_k^{OUT}(s)} CP_l^k = 0 \qquad s \in S_k \quad k \in HCT$$
(5)

2. Balanço material para os misturadores de corrente:

$$\sum_{l \in M_k^{IN}(m)} CP_l^k - \sum_{l \in M_k^{OUT}(m)} CP_l^k = 0 \quad m \in M_k \quad k \in HCT$$
(6)

3. Balanço energético para misturadores:

$$\sum_{l \in M_k^{DN}(m)} CP_l^k t_l^k - \sum_{l \in M_k^{OUT}(m)} CP_l^k t_l^k = 0 \quad m \in M_k \quad k \in HCT$$

$$\tag{7}$$

4. Balanços energéticos dos trocadores de calor:

$$\begin{array}{ll}
Q_{ij} - CP_l^i \left( t_n^i - t_p^i \right) = 0 & n \in E_{ij}^{HIN} & p \in E_{ij}^{HOT} & i \notin UQ \\
Q_{ij} - CP_l^i \Delta H_i^H = 0 & n \in E_{ij}^{HIN} & p \in E_{ij}^{HOUT} & i \in UQ \\
Q_{ij} - CP_l^j \left( t_q^j - t_r^j \right) = 0 & q \in E_{ij}^{COUT} & r \in E_{ij}^{CIN} & j \notin UF \\
Q_{ij} - CP_l^j \Delta H_j^C = 0 & q \in E_{ij}^{COUT} & r \in E_{ij}^{CIN} & j \in UF \\
\end{array}$$

$$(8)$$

5. Restrições para a diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{min}$ ):

6. Especificações para CP:

$$CP_l^k = F_k \cdot Cp_k \quad l \in S_k^{IN}(s^0) \quad k \in (H) \cup (C)$$
(10)

em que, 
$$F_k = \{F_i, i \in H, F_j, j \in C\}$$

7. Especificações das temperaturas de entrada e de saída:

$$t_l^k = T_k^{IN} \quad l \in S_k^{IN} \left( s^0 \right)$$

$$t_l^k = T_k^{OUT} \quad l \in M_k^{OUT} \left( m^0 \right)$$

$$k \in HCT$$

$$(11)$$

em que:

$$\begin{array}{l} T_k^{IN} = \{ \ T_i^{IN}, \ i \in H; \ T_j^{IN}, \ j \in C; \ T_i^{HIN}, \ i \in UQ; \ T_i^{CIN}, \ j \in UF \} \\ T_k^{OUT} = \{ T_i^{OUT}, \ i \in H; \ T_j^{OUT}, \ j \in C; \ T_i^{HOUT}, \ i \in UQ; \ T_i^{COUT}, \ j \in UF \} \end{array}$$

8. Igualdade de temperatura para as entradas e saídas dos divisores de corrente:

$$t_l^k = t_p^k \begin{cases} l \in S_k^{IN}(s), & p \in S_k^{OUT}(s) \\ s \in S_k, & k \in HCT \end{cases}$$
(12)

9. Restrições de não negatividade:



$$CP_l^k \ge 0 \quad l \in N_k, \quad k \in HCT \tag{13}$$

Finalmente, as áreas para cada trocador, considerando-se equipamentos com passo simples, podem ser expressas em função da carga térmica  $Q_{ij}$  e das temperaturas das correntes, isto é,

$$A_{ij} = Q_{ij} U_{ij}^{-1} (MLDT)_{ij}^{-1}$$
(14)

em que  $U_{ij}$  é o coeficiente global de troca térmica e  $(MLDT)_{ij}$  é a média logarítmica das diferenças de temperatura para cada trocador  $(i, j) \in MA$ . Para equipamentos com múltiplas passagens pelo casco ou pelos tubos, então inclui-se o fator de correção para a diferença de temperaturas,  $F_T$ , calculado a partir da equação:

$$F_{T} = \frac{\sqrt{R^{2} + 1} \cdot \ln\left(\frac{1 - Y}{1 - R \cdot Y}\right)}{\left(R - 1\right) \cdot \ln\left(\frac{2 - Y \cdot \left(R + 1 - \sqrt{R^{2} + 1}\right)}{2 - Y \cdot \left(R + 1 + \sqrt{R^{2} + 1}\right)}\right)}$$
(15)

em que:

$$Y = \left[1 - \left(\frac{1 - R \cdot P}{1 - P}\right)^{\frac{1}{NS}}\right] / \left[R - \left(\frac{1 - R \cdot P}{1 - P}\right)^{\frac{1}{NS}}\right]$$
(16)

$$R = \frac{\Delta T_{COLD}}{\Delta T_{HOT}} \tag{17}$$

$$P = \frac{\Delta T_{HOT}}{\Delta T_{INLET}}$$
(18)

com:

$$\Delta T_{HOT} = T_i^{IN} - T_J^{out} \tag{19}$$

$$\Delta T_{COLD} = T_i^{OUT} - T_J^{IN} \tag{20}$$

$$\Delta T_{INLET} = T_i^{IN} - T_J^{IN} \tag{21}$$

A equação de projeto para os trocadores de calor com passo múltiplo nos tubos tem a forma:  $A_{ij} = Q_{ij}U_{ij}^{-1}F_T^{-1}(MLDT)_{ij}^{-1}$ (22)

Assim, a função objetivo para a minimização do custo de investimento é dada por:

$$\min \sum_{(i,j)\in MA} (a_{ij} + c_{ij} A_{ij}^{b_{ij}})$$
(23)

com  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  e  $c_{ij}$  sendo coeficientes de custo, e  $A_{ij}$  a área de troca térmica para o trocador (i, j). Quando  $c_{ij}$  assume valores diferentes de 1, a função objetivo na equação (23), sujeita às restrições definidas pelas equações de (5) a (13), define um problema de programação não-linear, no qual as variáveis a serem otimizadas são  $CP_l^k$  e  $t_l^k$ . Para a determinação da solução ótima para o problema PNL, a rede de trocadores de calor com custo mínimo de investimento será obtida através da aplicação da técnica de *Simulated Annealing* para cada sub-rede. Cada configuração, em particular, será definida pelas vazões não nulas, as quais indicarão as interconexões requeridas pelas unidades de troca térmica.



### 5. SIMULATED ANNEALING

A minimização de uma função objetivo que apresente vários máximos e mínimos locais, requer um algoritmo que permita aumentos no valor da função objetivo para sair de um mínimo local. Dentre os procedimentos propostos que seguem esta linha de pensamento, o *Simulated Annealing (SA)* tem se mostrado o mais eficiente. Este nome é derivado do *annealing* físico (tratamento térmico), processo empregado em Metalurgia e que consiste no resfriamento gradual de um metal fundido até a obtenção do estado cristalino (mínimo global da energia termodinâmica).

O algoritmo *SA* é um método de busca local, proposto por METROPOLIS *et al.* (1953). KIRKPATRICK *et al.* (1983) estenderam o método de otimização termodinâmica de METROPOLIS para o problema de otimização combinatorial. Na analogia matemática, o estado do sistema termodinâmico corresponde à solução atual do problema combinatório; a equação de energia para o sistema termodinâmico é a função objetivo e o estado de referência é análogo ao mínimo global da função. A maior dificuldade na implementação do algoritmo é o fato de não haver parâmetro análogo à temperatura no problema combinatório. Sugere-se portanto a introdução de uma temperatura artificial ao procedimento *SA*, a temperatura de *annealing*,  $T_{sa}$ . A temperatura é gradualmente reduzida e ao final do processo ela é praticamente nula. Neste ponto, o sistema encontra-se dentro de uma região de atração para o mínimo global (ou em um dos mínimos globais, se existir mais de um, ou seja, em caso de degeneração). O desafio é encontrar um dimensionamento de *annealing* que reduza, o mais rápido possível, o valor do parâmetro  $T_{sa}$ , garantindo-se a obtenção de um ótimo global como resultado.

# 6. DESENVOLVIMENTO

Na primeira fase do trabalho foram empregados conceitos de Análise *Pinch*, para a determinação do consumo mínimo de utilidades e dos PEEs do processo. Localizado(s) o(s) PEE(s), a escala total de temperaturas foi divida em subredes, para as quais foram determinadas configurações com número mínimo de equipamentos de troca térmica, através da solução de um problema de programação linear inteira mista (PLIM). Como resultado deste problema, são fornecidas várias configurações de rede para cada uma das sub-redes em que o problema principal foi anteriormente dividido.

A seguir, uma superestrutura é derivada para cada sub-rede, englobando todas as configurações obtidas a partir da solução da etapa anterior. Esta superestrutura considera divisão, mistura e o desvio de correntes, permitindo arranjos em série e em paralelo para as unidades de troca térmica. Esta superestrutura é gerada para cada uma das correntes presentes em cada sub-rede, e as configurações a serem analisadas são definidas pelas vazões não nulas dos ramos das correntes. A configuração ótima é obtida aplicando-se SA para a otimização combinatorial. Como resultado final, o programa fornece uma rede ótima de trocadores de calor com consumo mínimo de utilidades, nú04 Tc0ando-s9( 85 T



C2	4,0	180	240	1,5
UF		30	80	1,5
UQ		280	279	1,5

Aplicando-se os conceitos de Análise *Pinch*, tem-se uma demanda de 50kW de utilidade quente e 60kW de utilidade fria. Foi encontrado um PEE, situado em 190°C para as correntes quentes e 180°C para as correntes frias. O problema foi dividido em duas sub-redes, acima e abaixo do PEE.

A partir das configurações viáveis fornecidas para cada sub-rede através da solução do problema PLIM, foram derivadas as superestruturas a serem otimizadas, representadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Na solução deste caso foram realizadas vinte alterações de  $T_{sa}$ , considerando trinta atualizações da configuração de rede. O valor inicial de  $T_{sa}$  foi 200 US\$/ano e tomou-se  $\alpha$  igual a 0,90. A rede ótima é composta de sete equipamentos (cinco trocadores de calor, um aquecedor e um resfriador), apresentados na Tabela 2. Nesta tabela, T representa os trocadores de calor e U os aquecedores e resfriadores. Os coeficientes de troca térmica de todas as correntes são iguais, portanto o valor de  $U_{ij}$  será de 0,75 kW/m<sup>2</sup>°C para todos os trocadores. Todos os equipamentos de troca térmica foram considerados como sendo do tipo 1-1. Para o cálculo do custo de investimento da rede ótima, foi empregada a equação:

$$C_{ii} = 3000 \cdot A_{ii}^{1/2} \quad \text{US}\$ / ano, \quad A = m^2$$
 (26)

Para o cálculo do custo das utilidades, admitiu-se o custo da utilidade quente igual a 110,0 US\$/kWano e da utilidade fria igual a 12,2 US\$/kWano.

Trocador	Correntes	Q (kW)	$A_{ij}(m^2)$	Custo (US\$/ano)
T1	H1 – C1	20	1,001	3.001,50
T2	H1 – C2	190	15,218	11.703,08
Т3	H2 – C1	90	7,330	8.122,19
T5	H1 – C1	30	3,244	5.403,33
T6	H2 – C1	90	7,330	8.122,19
U1	H1 – UF	60	0,700	2.509,98
U4	UQ - C2	50	1,465	3.631,12

Tabela 2: Trocadores de calor da rede ótima

Aplicando-se a técnica *SA*, encontrou-se uma rede com área total de troca térmica igual a  $36,288 \text{ m}^2$  e custo total de investimento de 42.493,27 US/ano. O custo total das utilidades foi de 6.232,00 US/ano, o que equivale a um custo total de 48.725,27 US/ano. A configuração ótima da rede é apresentada na figura 8. Para a mesma configuração ótima, o modelo de AHMAD (1985) obteve um custo capital de 43.327,54 US/ano, correspondente a uma área de  $37,518 \text{ m}^2$ . A demanda de utilidades em ambos os trabalhos foi a mesma e o custo total da rede ótima de AHMAD (1985) foi de 49.560,00 US/ano.

As configurações obtidas em ambos os trabalhos são idênticas, todavia observa-se uma diferença de custos gerada pela consideração de trocadores de calor com passo duplo nos tubos, elevando o custo da rede de AHMAD (1985). A Tabela 3 apresenta os dados para os equipamentos de troca térmica segundo AHMAD (1985) e a Tabela 4 compara os resultados deste trabalho com os obtidos por AHMAD (1985).

Trocador	F <sub>T</sub>	$Q_{ij}$ (kW)	$A_{ij}(m^2)$	Custo (US\$/ano)
T1		20	1,002	3.003,00
T2	0,986	190	15,412	11.777,44
Т3	0,984	90	7,450	8.188,41

Tabela 3: Dados dos equipamentos de troca térmica segundo AHMAD (19985).



T5	0,803	30	4,039	6.029,18
T6	0,984	90	7,450	8.188,41
U1		60	0,700	2.509,98
U4		50	1,465	3.631,12

	Este trabalho	AHMAD (1985)	Desvio (%)
Área total de troca térmica (m <sup>2</sup> )	36,288	37,518	1,66
Custo total de investimento (US\$/ano)	42.493,27	43.327,54	1,49
Custo total de utilidades (US\$/ano)	6.232,00	6.232,00	0,00
Custo total (US\$/ano)	48.725,27	49.600,00	1,10



Figura 2. Superestrutura das correntes para a sub-rede 2

#### 8. CONCLUSÕES

A utilização de SA mostrou-se um método eficiente para a obtenção de configurações ótimas de redes de trocadores de calor, além de ser de fácil aplicação. O fato de o método admitir que sejam consideradas configurações com custos mais elevados que as anteriores é de grande importância, pois permite que a solução se desloque de um ótimo local até o ótimo global. Devido à sua natureza estocástica, o método pode gerar várias redes ótimas distintas variando-se a configuração inicial do método, cabendo ao usuário decidir dentre elas qual a melhor.

Quanto à derivação da superestrutura das correntes, esta considera as configurações resultantes dos problemas PL e PLIM, bem como a possibilidade de divisão, mistura e *bypass* de correntes. Portanto, uma superestrutura bem definida permite tanto a obtenção automática de configurações mais comuns com arranjos em série e/ou paralelo dos equipamentos de troca térmica, quanto de configurações não usuais envolvendo *bypass* de correntes, conforme a exigência das correntes do processo. Esta é uma característica de grande importância, uma vez que a grande maioria dos métodos para a síntese de RTC existentes não é capaz de empregar este recurso. Assim, muitos processos poderiam ser melhorados ao se considerar o desvio de parte de uma corrente para um ponto após um trocador pelo qual ela passaria com toda a sua vazão.

A utilização de algoritmos baseados na aplicação dos conceitos da Análise *Pinch* e de PLIM para a localização do(s) PEE(es) e o cálculo das demandas de utilidades e do número mínimo de



equipamentos permitem a determinação rápida e automática das melhores alternativas de configuração dentre todas as possíveis. Os resultados obtidos geralmente estão bem próximos da realidade. Além disso, tais algoritmos são bastante versáteis, podendo ser adaptados a diversos tipos de problemas através da inclusão e/ou modificação de conjuntos de hipóteses e considerações.

O modelo proposto realizou todas as operações necessárias para a determinação da configuração ótima de redes para os caso estudado. A implementação computacional não é muito complicada, e o tempo de execução do programa desenvolvido é pequeno, havendo geração praticamente instantânea de resultados. O tempo de execução varia de acordo com a quantidade de alterações de  $T_{sa}$  a serem realizadas e de configurações a serem analisadas a cada alteração.



Figura 3: Superestrutura das correntes para a sub-rede 1

# 9. REFERÊNCIAS

- AHMAD, S., 1985, *Heat Exchanger Networks: Cost Trade-Offs in Energy and Capital*, Ph.D. Thesis, UMIST, Manchester, UK.
- CARDOSO, R., 1999, Integração energética da Etapa de Separação do Solvente do Processo de Extração do Óleo de Soja. Tese de M.Sc., PEQ/UEM, Maringá, PR, Brasil.



- FLOUDAS, C. A., CIRIC A. R., and GROSSMANN, I. E., 1986, "Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations", *AIChE Journal*, v. 32, n. 2 (Feb), pp. 276-290.
- KIRKPATRICK, S., GELLAT, JR., C. D. and VECCHI, M. P., 1983, "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, v. 220, n. 4598 (May), pp. 671 680.
- METROPOLIS, N., ROSENBLUTH, A. W., ROSENBLUTH, M. N., et al., 1953, "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines", *The Journal of Chemical Physics*, v. 21, n. 6 (Jun), pp. 1087 1092.
- PAPOULIAS, S. A. and GROSSMANN, I. E., 1983, "A Structural Optimization Approach in Process Synthesis – II: Heat Recovery Networks", *Computers & Chemical Engineering*, v.7, n. 6, pp. 707-721.
- RAVAGNANI, M. A. S. S., 1994, *Projeto e Otimização de Redes de Trocadores de Calor*, Tese de D.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- RAVAGNANI, M. A. S. S., SILVA, A. P. e ANDRADE, A. L. Detailed Equipment Design in Heat Exchanger Networks Synthesis and Optimization. *Applied Thermal Analysis*, v. 23, pp. 141 151, 2003.
- SMITH, R., 1995, Chemical Process Design. New York, McGraw-Hill, Inc.



Figura 4: Configuração ótima de rede