
Método do Enxame de Partículas Aplicado à Síntese de Redes de Trocadores de Calor

Aline Priscila da Silva, Evaristo Chalbaud Biscaia Junior
e Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani*

Resumo: Neste Capítulo é apresentado uma metodologia para realizar a síntese de redes de trocadores com custo mínimo de investimento. Este é um problema descrito por um modelo de natureza altamente combinatória, não-linear e não-convexa. A sistemática proposta se utiliza de um modelo de otimização baseado em superestruturas, cuja solução é obtida com a aplicação do método do enxame de partículas. A aplicabilidade e eficiência dessa sistemática foram avaliadas por meio do estudo de exemplos da literatura e também de um caso real de grande dimensão.

Palavras-chave: Síntese de redes de trocadores de calor, otimização, Enxame de partículas, Modelo de superestrutura.

Abstract: *In this Chapter, a methodology was developed aiming to synthesize heat exchanger networks with the minimum global cost. This optimization problem is clearly nonlinear, nonconvex and highly combinatorial. The proposed methodology uses a model based on stagewise superstructures, whose solution is obtained by applying Particle Swarm Optimization. The performance of the method was evaluated solving a benchmark example, as well as a real high-dimensional problem.*

Keywords: *Heat exchanger network synthesis, Optimization, Particle swarm optimization, Superstructure model.*

Conteúdo

1	Introdução	108
2	Integração Energética de Processos	108
2.1	Métodos sequenciais	109
2.2	Métodos simultâneos	109
3	Otimização e Método do Enxame de Partículas	109
3.1	O método do enxame de partículas	110
4	Síntese De Redes de Trocadores de Calor	110
4.1	Definição do problema	110
4.2	Algoritmo proposto	112
4.3	Variáveis e função objetivo	113
5	Aplicações	114
5.1	Exemplo 01	114
5.2	Exemplo 02	115
6	Comentários e Conclusão	116

*Autor para contato: ravag@deq.uem.br

1. Introdução

Atualmente, um dos problemas que os engenheiros e pesquisadores em síntese de processos químicos mais enfrentam é o consumo excessivo de energia nas plantas de processamento. Uma das maneiras de minimizar o consumo de energia é aproveitar o excesso de calor proveniente das correntes que se deseja resfriar para suprir a necessidade das correntes que se deseja aquecer. Essa necessidade de aquecimento/resfriamento são feitos, normalmente, por meio de utilidades quentes e frias, respectivamente. Uma rede de trocadores de calor tem por objetivo a realização destas tarefas de aquecimento e resfriamento por meio da integração energética das correntes de processo, de forma a reduzir a quantidade de utilidades empregadas.

Essencialmente, a tarefa de síntese de redes de trocadores de calor consiste em encontrar uma sequência de troca de calor em que pares de correntes (quente e fria) são combinadas, tal que a rede seja ótima em relação ao custo. A grande complexidade do problema está na sua natureza combinatorial, já que para um dado número de correntes existe uma grande quantidade de configurações possíveis. Além disso, esse é também um problema altamente não-linear e não-convexo. Essas características do problema trazem dificuldades computacionais para sua solução, sendo principalmente elevados tempos computacionais e/ou dificuldade em se encontrar regiões viáveis, com soluções ótimas.

Por esse motivo, muitos trabalhos abordando a síntese de redes de trocadores de calor vem sendo desenvolvidos para tentar sanar essas dificuldades. Eles são classificados em dois grupos principais: os métodos sequenciais e os métodos simultâneos.

Os métodos sequenciais consistem na decomposição do problema em uma série de subproblemas, com o objetivo de reduzir o esforço computacional na solução. É importante ressaltar que essa divisão não garante a síntese de uma rede com o custo total mínimo, uma vez que o resultado final será a soma de todos os subresultados ótimos, o que não necessariamente fornece uma rede global ótima.

Já os métodos simultâneos baseiam-se na definição de superestruturas para a síntese da rede de trocadores de calor. O problema é formulado e resolvido em uma única etapa. Portanto, para um dado espaço de soluções, definido pela superestrutura, é possível obter-se uma solução ótima ou muito próxima da ótima.

A vantagem da possibilidade de obtenção de um ótimo global por essa técnica nem sempre é abordada devido aos modelos possuírem não convexidades. Portanto, diversos modelos com simplificações nas superestruturas foram criados.

Apesar das não convexidades e conseqüente dificuldade em se obter boas soluções para os modelos de superestruturas dos métodos simultâneos, neste Capítulo é apresentada uma metodologia para o projeto ótimo de redes de trocadores de calor. Este é formulado como um problema de otimização e resolvido pelo método não determinístico do enxame de partículas. Conjuntamente, a formulação do problema e a escolha do método de otimização, justificam-se pela necessidade de resolver o problema em sua forma original, isto é, sem simplificações, bem como que os elevados esforços computacionais não fossem impedimento para a convergências do problema.

2. Integração Energética de Processos

Os processos industriais, na maioria dos casos, apresentam correntes que necessitam de aquecimento ou de resfriamento ao passarem de uma etapa do processo para a seguinte. Estas correntes são denominadas correntes frias, quando precisam ser aquecidas, ou correntes quentes, quando devem ser resfriadas.

O aquecimento ou resfriamento de uma corrente é feito por meio de equipamentos chamados trocadores de calor, os quais recuperam energia entre as correntes do processo, transferindo o calor excedente das correntes quentes para as correntes frias. Além dos trocadores de calor, existem os equipamentos que fazem uso de energia externa ao processo, que são denominados resfriadores ou aquecedores, conforme realizem o resfriamento ou o aquecimento das correntes. A transferência de calor realizada por estes dois últimos equipamentos ocorre mediante o emprego de correntes auxiliares denominadas utilidades, as quais fornecem (utilidade quente) ou retiram (utilidade fria) energia do sistema, de acordo com a necessidade da corrente em questão.

Realizar a integração energética de um processo significa utilizar primeiro o calor disponível nas correntes quentes para aquecer as correntes frias e, então, se ainda houver necessidade, empregar utilidades para o resfriamento ou o aquecimento de correntes até as temperaturas exigidas pelo processo. O conjunto desses equipamentos é chamado *Rede de Trocadores de Calor*.

Na tentativa de encontrar uma solução satisfatória para o problema da síntese de redes de trocadores de calor com consumo mínimo de energia e custo capital mínimo, vários trabalhos empregando diferentes métodos para a solução do problema foram desenvolvidos, conforme mostra [Ravagnani & Caballero \(2012\)](#). Esses trabalhos, são classificados em duas linhas básicas de estudo: as técnicas sequenciais e as técnicas simultâneas.

2.1 Métodos sequenciais

A abordagem sequencial, utilizando conceitos termodinâmicos e regras heurísticas, foi iniciada na tese de doutorado de [Hohmann \(1971\)](#), que desenvolveu o conhecido algoritmo da tabela do problema ou método da cascata de energia. Este procedimento foi a primeira forma rigorosa de cálculo do consumo mínimo de utilidades antes mesmo da síntese da rede.

No fim da década de 70, através do trabalho de [Linnhoff & Flower \(1978\)](#), a *Análise Pinch* surgiu como a solução para o problema de otimização energética, propondo-se a oferecer ferramentas simples e práticas que apresentavam, de forma gráfica, conclusões rápidas sobre a necessidade energética mínima e a quantidade ótima de trocadores de calor para um dado processo industrial. Esta é uma das técnicas mais antigas e mais difundidas para o desenvolvimento de trabalhos em síntese de redes de trocadores de calor.

Ao longo das décadas de 1980 e 1990 os princípios fundamentais da *Análise Pinch* foram enriquecidos com inúmeras outras técnicas e conceitos, que expandiram o poder de análise e determinação de alvos a outros sistemas e processos ([Linnhoff & Hindmarsh, 1983](#); [Tjoe & Linnhoff, 1986](#); [Linnhoff, 1993](#); [Ravagnani, 1994](#)).

Os trabalhos mesclando métodos sequenciais e métodos híbridos de otimização começaram a aparecer com [Lewin et al. \(1998\)](#). Em seguida vieram [Lakshmanan & Fraga \(2002\)](#), [Ravagnani et al. \(2005\)](#) e [Silva et al. \(2005\)](#).

Com o passar do tempo, os trabalhos abordando os métodos sequenciais têm ficado mais escassos dando cada vez mais espaço aos trabalhos abordando os métodos simultâneos. Alguns dos últimos trabalhos encontrados mostram novas abordagens empregando as tradicionais ferramentas da *Análise Pinch* em [Salama \(2009\)](#), [Castier \(2012\)](#) e [Sieniutycz & Jezowski \(2013\)](#).

2.2 Métodos simultâneos

Em paralelo ao desenvolvimento da *Análise Pinch*, ao longo das décadas de 1980 e 1990 surgiram implementações que reproduziram os conceitos inerentes ao pinch em formulações matemáticas, envolvendo problemas de otimização do tipo linear, não linear, linear inteiro misto e não linear inteiro, conforme descreve [Floudas \(1995\)](#).

Devido aos avanços obtidos pelos algoritmos de otimização matemática aliados ao rápido desenvolvimento de computadores que viabilizaram a solução da síntese via técnicas simultâneas, a pesquisa relacionada à síntese de redes de trocadores de calor teve um forte crescimento em sua produção entre o final da década de 1980 e o início da década de 1990, conforme [Floudas & Ciric \(1989\)](#).

[Yee & Grossmann \(1990\)](#) propuseram um dos modelos de superestrutura baseado em estágios mais utilizados para resolver o problema de síntese. Muitos trabalhos foram propostos utilizando esse modelo, associado às mais diversas técnicas para solução do problema de otimização ([Zamora & Grossmann, 1998](#); [Mizutani et al., 2003](#); [Silva et al., 2010](#)).

A linha dos métodos simultâneos associados a técnicas não-determinísticas de otimização vem crescendo significativamente com o passar dos anos. Alguns dos trabalhos nesse segmento são [Nielsen et al. \(1996\)](#), [Yu et al. \(2000\)](#) e [Silva et al. \(2008\)](#).

Os trabalhos mais recentes em síntese de redes de trocadores de calor pelo método simultâneo tendem a fazer uma abordagem no sentido de modificar ou simplificar os modelos anteriormente apresentados, ou ainda propor novos métodos de resolução desses modelos, com o intuito de tornar os resultados mais próximos da realidade ou facilitar a obtenção dos mesmos. Alguns deles podem ser vistos em [Alwi & Manan \(2010\)](#), [Bogataj & Kravanja \(2012\)](#) e [Ravagnani & Silva \(2012\)](#).

3. Otimização e Método do Exame de Partículas

Em uma definição simples, um método de otimização consiste em encontrar a melhor solução para problemas em que a qualidade de sua resposta pode ser medida por um número. Estes problemas aparecem em praticamente todas as áreas do conhecimento e a quantidade de ferramentas disponíveis para auxiliar nesta tarefa é quase tão grande quanto o número de aplicações.

Para resolver um problema deste tipo, é preciso considerar dois componentes. O *espaço de busca*, no qual são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema, e a *função objetivo*, que é uma função matemática que associa cada ponto no espaço de soluções a um número real, possibilitando avaliar os membros do espaço de busca.

A questão fundamental está no fato de que nem sempre o *ótimo* é encontrado facilmente. É necessário um processo sistemático de busca. Um procedimento iterativo de cálculos que, passo a passo, de candidato a candidato, seja possível ir melhorando a seleção até que o valor ótimo seja encontrado, ou até que se esteja satisfeito. Esse procedimento nada mais é do que um método de otimização descrito por um algoritmo. A construção de bons algoritmos é uma das principais etapas da otimização.

A partir da década de 1950, por meio de analogias com a natureza, foram criados vários algoritmos não-determinísticos na tentativa de simular fenômenos biológicos. Estes algoritmos, chamados *Métodos de Otimização Natural*, têm alguns aspectos em comum. O mais marcante é seu caráter aleatório, na tentativa de simular o acaso que parece governar processos distintos na natureza, desde a evolução das espécies até o comportamento social dos animais. Além disso, esses métodos apresentam vantagens de fácil implementação e não requerem continuidade na definição do problema.

3.1 O método do enxame de partículas

O método do enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization*, muito conhecido por PSO) foi introduzido por Kennedy & Eberhart (1995) e explora a analogia com o comportamento social de animais, como enxames, cardumes ou bandos de pássaros. Neste, verifica-se que o comportamento do grupo é influenciado pela experiência individual acumulada por cada indivíduo, bem como pela experiência acumulada pelo grupo. Matematicamente, cada indivíduo do bando é considerado um ponto do espaço de busca. Cada um desses pontos é um candidato à solução do problema. A direção de busca em uma iteração é determinada por meio da ponderação entre a experiência daquela solução e da melhor solução já encontrada pelo grupo (metaforicamente, a solução líder).

O termo *partícula* é usado para se referir a cada um dos indivíduos do grupo. O termo *enxame* se refere ao grupo de indivíduos. No algoritmo do método do enxame de partículas cada candidato à solução do problema corresponde a um ponto no espaço de busca. Essas soluções, ou partículas, têm associadas um valor que é avaliado individualmente e que indica a adequação da partícula como solução do problema. Além disso, essas partículas têm também associadas uma velocidade que define a direção de seu movimento. Cada partícula modifica sua velocidade levando em conta a sua melhor posição e também a melhor posição do grupo, levando este, ao longo do tempo, a alcançar seu objetivo.

Na sistemática desenvolvida foi utilizado o método do enxame de partículas seguindo a metodologia proposta por Vieira & Biscaia Jr. (2002). A velocidade que define a direção do movimento das partículas é atualizada em cada iteração por meio da Equação 1 e as partículas por meio da Equação 2.

Os principais parâmetros para o método são as ponderações entre as experiências individual e coletiva c_1 e c_2 e o fator de inércia w . O fator de inércia é empregado para controlar o impacto da história prévia de velocidade na velocidade atual. Um maior valor de w favorece a exploração global, enquanto um peso de inércia menor tende a facilitar a exploração local. Seleção satisfatória de w fornece, então, um equilíbrio entre capacidade de exploração global e local.

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i^k - x_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{global}^k - x_i^k) \quad (1)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2)$$

onde k é a iteração, x_i e v_i são, respectivamente, vetores da posição e velocidade da partícula i , w é o peso de inércia, c_1 e c_2 são duas constantes, r_1 e r_2 são dois vetores contendo números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo $[0, 1]$, p_i é a posição com o melhor valor da função objetivo que a partícula i já encontrou e p_{global} é a posição do melhor valor encontrado por todo o conjunto de partículas.

4. Síntese De Redes de Trocadores de Calor

4.1 Definição do problema

Dado um conjunto de correntes quentes e frias, a síntese de redes de trocadores de calor visa encontrar a melhor combinação de pares de correntes quentes e frias, tal que a economia de energia seja máxima

e o custo global seja mínimo. Para tal é necessário que se conheça as temperaturas de entrada e saída, vazões e propriedades físicas das correntes. Além disso, é necessário que se conheça os parâmetros de custo das utilidades quente e fria e custos relacionados à área de troca térmica.

Nesta proposta, um método para a síntese de redes de trocadores de calor usando o método do enxame de partículas foi desenvolvido. O método baseia-se no modelo de superestrutura similar ao apresentado por Yee & Grossmann (1990). A Figura 1 apresenta um exemplo da superestrutura usada neste método, para um conjunto de três correntes quentes e três correntes frias. A definição de uma superestrutura envolve possibilidades (flexibilidade) de sequências de trocas em série, trocas em paralelo, bypass, além da otimização das vazões e temperaturas das correntes intermediárias, com o objetivo de minimizar o custo das unidades de troca térmica.

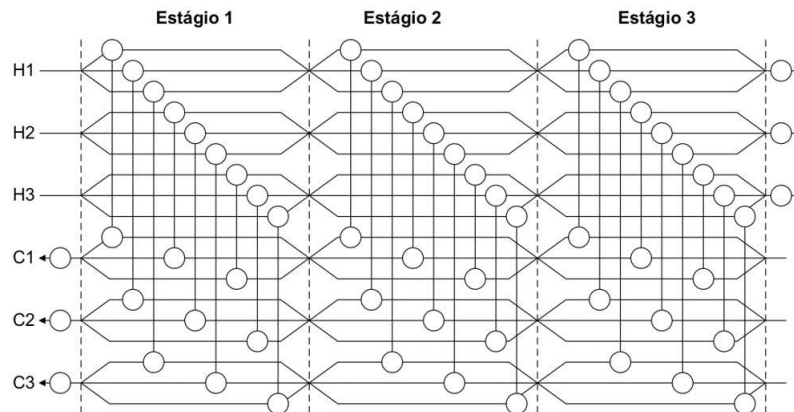


Figura 1. Superestrutura usada, baseada em Yee & Grossmann (1990).

Para criar esta superestrutura, deve-se inicialmente determinar o número de estágios que ela vai ter. O número máximo de estágios da superestrutura é o maior valor entre o número de correntes quentes e o número de correntes frias do processo em questão.

No primeiro estágio, divide-se as correntes de forma que seja possível que todas as correntes quentes troquem calor com todas as correntes frias. Em seguida, são alocados trocadores de calor em todos os ramos das correntes, formando pares de ramos de correntes quente e fria. Após os trocadores de calor do primeiro estágio, são colocados nós de junção que recebem os diversos ramos de cada corrente. Com os ramos das correntes novamente unidos, um novo estágio se inicia, exatamente como o primeiro.

O problema de otimização passa a ser encontrar o número de estágios da superestrutura, as vazões de cada ramo dessas correntes que se dividem, bem como o calor trocado em cada trocador de calor, de forma a minimizar o custo dos trocadores envolvidos, respeitando-se os balanços materiais e energéticos. Uma das diferenças da metodologia desenvolvida neste trabalho para aquela proposta por Yee & Grossmann (1990), e posteriormente amplamente usada por vários trabalhos, entre eles o de Mizutani et al. (2003), está no fato de incluir o número de estágios como uma variável a ser otimizada. No trabalho de Yee & Grossmann (1990) este é um parâmetro fixo, definido previamente.

Assim, uma função objetivo para minimização do custo total da rede é proposta e os custos a serem minimizados são os custos de utilidade empregados na rede de trocadores de calor e o custo referente aos equipamentos de troca térmica.

A área de troca térmica A é obtida considerando os trocadores de calor do tipo contracorrente, sendo calculada pela Equação 3. Esta é outra grande diferença do trabalho de Yee & Grossmann (1990) e de todos que trabalharam nessa linha utilizando os métodos tradicionais para resolver os problemas de otimização. Para evitar problemas de convergência e/ou não linearidades, é comum encontrar o uso de aproximações para calcular a área. Neste trabalho, essas aproximações não são consideradas.

Na Equação 3 está presente o termo $MLDT$. Este é outro aspecto que pode levar a problemas de não linearidades sendo, com grande frequência, simplificado e substituído pela média aritmética de temperatura.

$$A = \frac{Q}{U \cdot MLDT} \quad (3)$$

onde Q é o calor trocado no trocador de calor, U é o coeficiente de transferência de calor e $MLDT$ é a média logarítmica de temperatura.

As restrições do problema de otimização são as restrições termodinâmicas das trocas térmicas. Isso significa que em todos os trocadores de calor da rede, as temperatura das correntes quentes devem sempre ser maiores do que as temperaturas das correntes frias. As Equações 4 a 7 mostram o problema de otimização com a função objetivo e suas restrições.

$$\text{Mimimizar: } C_{total} = C_{area} + C_{utilidade} \quad (4)$$

$$\text{Sujeito a: } (T_h^{in})_k > (T_c^{out})_k \\ (T_h^{out})_k > (T_c^{in})_k$$

$$C_{area} = \sum_k aa_1 \cdot (A_k)^{aa_2} \quad (5)$$

$$C_{utilidade} = C_{HU} \cdot HU + C_{CU} \cdot CU \quad (6)$$

$$k^{max} = N \cdot ncq \cdot ncf \quad (7)$$

$$k = 1, \dots, \text{número de equipamentos}$$

onde C_{total} , C_{area} e $C_{utilidade}$ são os custos referentes a rede de trocadores de calor, área de troca térmica e utilidades, respectivamente. T^{in} e T^{out} são as temperaturas de entrada e saída do trocador de calor, os índices h e c representam as correntes quente e fria, aa_1 e aa_2 são parâmetros constantes para o cálculo do custo da área, C_{HU} e C_{CU} são os custo referente às utilidades quente e fria, HU e CU é o total de utilidade quente e fria consumido na rede de trocadores de calor, k^{max} é o número máximo de equipamentos de troca térmica a ser usado na rede, N é o número de estágios, ncq é o número de correntes quentes e ncf é o número de correntes frias.

4.2 Algoritmo proposto

No problema de síntese de redes de trocadores de calor ótimas, quatro variáveis são geradas aleatoriamente no início da otimização, sendo modificadas a cada iteração pelas Equações 1 e 2. Cada partícula é formada pelas seguintes variáveis manipuladas: fração de divisão da vazão das correntes quentes, fração de divisão da vazão das correntes frias, número de estágios e calor trocado pelos trocadores de calor.

Após a geração da partícula, a área de cada trocador de calor da rede é calculada, bem como a quantidade de utilidades quente e fria necessária para suprir a rede. Isso é feito para todas as partículas, seja ela solução do problema ou não. O valor da Função Objetivo (custo global da rede) é obtido e caso a partícula não seja solução do problema (alguma restrição desrespeitada), a função objetivo é penalizada.

A Equação 8 é usada para calcular as temperaturas de saída das correntes quente e fria de cada trocador de calor.

$$Q = CP_h \cdot \Delta T_h = CP_c \cdot \Delta T_c \quad (8)$$

Um algoritmo seguindo o método do enxame de partículas foi proposto para resolver o problema de otimização. O algoritmo é baseado nos seguintes passos:

i Entrada de Dados

- Critério de parada: número máximo de iterações;
- Número de partículas na população (Npt);
- c_1 , c_2 e w ;
- Valores máximo e mínimo das variáveis;
- Dados das correntes quentes e frias, dados de custo de área e das utilidades;

ii Geração aleatória das partículas iniciais

Não há critério algum para essa geração, a não ser os limites das variáveis. A geração é feita de forma aleatória.

- Fração de divisão das correntes quentes [0,1];

- Fração de divisão das correntes frias $[0,1]$;
- Número de estágios $[1,N]$, N é o máximo valor entre o número de correntes quentes e o número de correntes frias;
- Calor trocado pelos trocadores $[0,Q_{max}]$;

iii Avaliação da função objetivo

Com as variáveis geradas no passo anterior, calcula-se:

- A temperatura de saída das correntes quente e fria para cada trocador de calor [Equação 8];
- A área de troca térmica [Equação 3];
- Função objetivo [Equações 4 a 7];

iv Verificar as restrições para todas as partículas iniciais

Com as temperaturas calculadas é possível verificar se algum trocador de calor da rede desrespeita a restrição de temperatura. Se houver alguma restrição não satisfeita, a partícula é penalizada.

v Início do método do enxame de partículas

Atualizar as variáveis das partículas com as Equações 1 e 2. Reavaliar a função objetivo para os valores atualizados das variáveis, verificar as restrições e verificar qual das partículas possui o valor ótimo atual (passo iii e iv).

vi Repetir o passo v até o critério de parada ser satisfeito (número de iterações).

Durante a implementação do algoritmo é importante notar que todas as restrições são sempre testadas. Quando uma restrição não é satisfeita, a partícula é penalizada. A penalização é feita somando-se um valor muito alto a função objetivo. Desse modo, a partícula é naturalmente descartada.

O valor de Q_{max} é definido como sendo o maior valor do calor que uma corrente quente de processo, quente ou fria, possa trocar.

Nas aplicações práticas são usadas as taxas de sucesso para avaliar o desempenho do algoritmo. O algoritmo é executado 50 vezes e toda as vezes em que o resultado obtido for igual ou melhor que a execução anterior, contabiliza-se um sucesso.

4.3 Variáveis e função objetivo

Um problema extraído de Ahmad (1985) é apresentado para ilustrar os primeiros passos do algoritmo proposto de forma a exemplificar como são constituídas as partículas e como é verificado se a solução respeita ou não as restrições.

Passo 1: Entrada de dados

Dados das correntes quentes e frias, dados de custo de área e utilidades. A Tabela 1 mostra os dados para o caso de Ahmad (1985).

Tabela 1. Dados das correntes e de custo.

Correntes	T^{in} ($^{\circ}C$)	T^{out} ($^{\circ}C$)	CP ($kW/^{\circ}C$)	h ($kW/m^2/^{\circ}C$)
H1	300	80	0,30	0,40
H2	200	40	0,45	0,40
C1	40	180	0,40	0,40
C2	140	280	0,60	0,40
UQ	400	399		0,40
UF	10	11		0,40

Custo de área: $300 \cdot A^{0,5}$, A em m^2 .

Custo da utilidade quente: 110 \$/kW ano.

Custo da utilidade fria: 12,2 \$/kW ano.

Passo 2: Geração aleatória das partículas iniciais

Dois exemplos de partículas aleatórias são apresentados na Tabela 2.

Passo 3: Cálculo da função objetivo

As Figuras 2 e 3 apresentam as redes de trocadores de calor calculadas para as partículas j e l , respectivamente.

Passo 4: Análise das restrições

Tabela 2. Exemplos de partículas iniciais aleatórias.

Partícula j				Partícula l			
Estágio 1		Estágio 2		Estágio 1		Estágio 2	
Q1	0,0	Q5	22,40	Q1	0,0	Q5	20,43
Q2	33,70	Q6	0,0	Q2	18,16	Q6	0,0
Q3	14,10	Q7	0,0	Q3	0,0	Q7	31,27
Q4	0,0	Q8	35,30	Q4	22,10	Q8	0,0
FSH1	0,090	FSH1	0,900	FSH1	0,350	FSH1	0,633
FSH2	0,707	FSH2	0,324	FSH2	0,129	FSH2	1,000
FSC1	0,645	FSC1	0,830	FSC1	1,000	FSC1	0,263
FSC2	0,918	FSC2	0,880	FSC2	0,270	FSC2	0,000

$j, l \in i/i = 1..N_{pt}$

FSH e FSC é a fração de divisão das correntes quente e fria, respectivamente

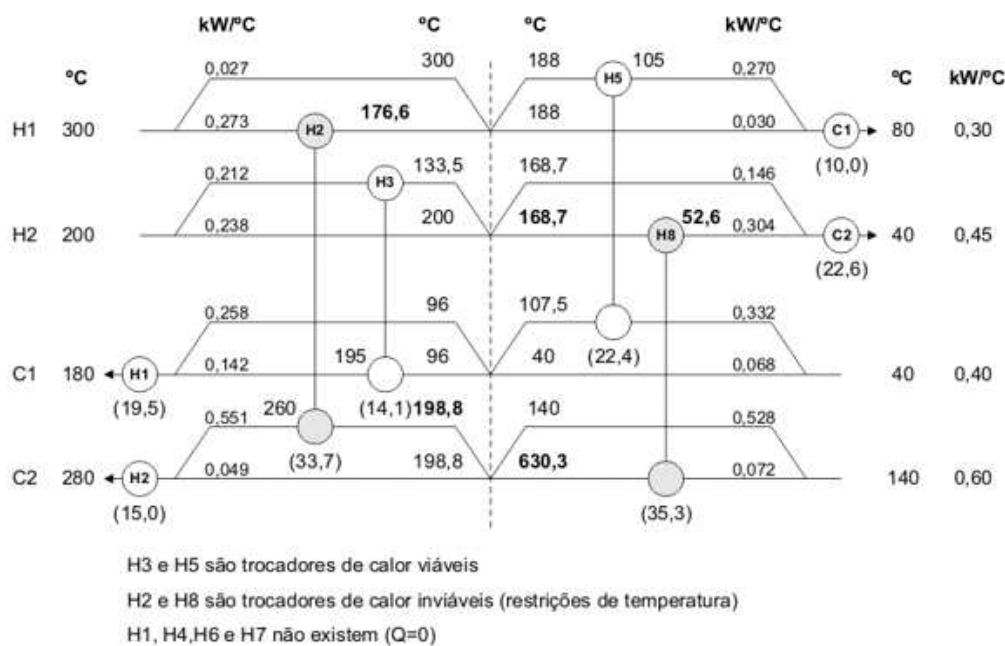


Figura 2. Rede de trocadores de calor da partícula j .

A Tabela 3 mostra os melhores valores da função objetivo obtida pelas partículas j e l e o melhor valor encontrado pelo grupo todo (população inicial). A partícula j foi penalizada, pois não respeita as restrições.

Assim, conforme as partículas vão sendo modificadas pelo método do enxame de partículas, as redes vão sendo construídas e seu custo é obtido. A Figura 4 mostra a rede de trocadores de calor obtida para esse exemplo após o critério de parada. O valor da função objetivo é 7884 \$/ano.

5. Aplicações

5.1 Exemplo 01

O primeiro caso estudado foi extraído de Zhu (1997) e também apresentado em Silva et al. (2010). O problema tem duas correntes quentes, duas correntes frias, uma utilidade quente e uma utilidades fria. Os dados das correntes e dos custos de área e utilidades são mostrados na Tabela 4.

Aplicando a metodologia proposta, uma configuração para a rede ótima é obtida, conforme apresentado na Figura 5. O custo da rede de trocadores de calor obtida é 1816470 \$/ano. A Tabela 5 mostra a comparação dos resultados com os resultados da literatura. A taxa de sucesso do método do enxame de partículas para esse exemplo foi de 93%.

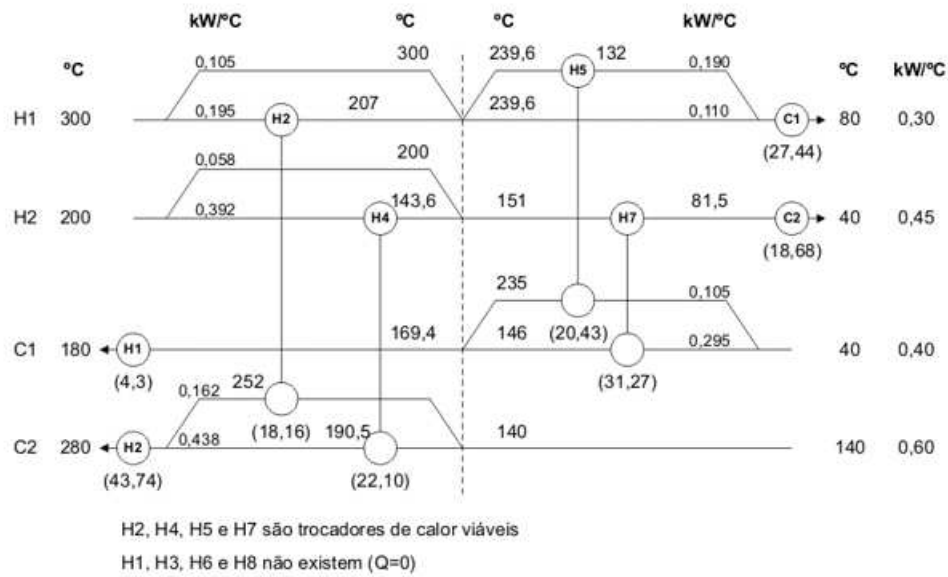


Figura 3. Rede de trocadores de calor da partícula l .

Tabela 3. Valores para a população inicial.

P_1^j	P_1^l	P_1^{global}
10^{10} \$/ano	8969 \$/ano	8658 \$/ano

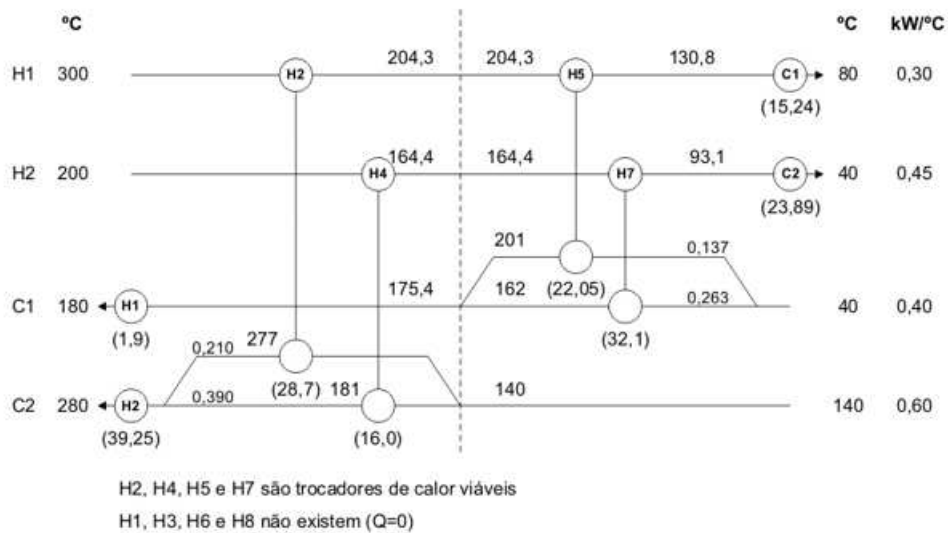


Figura 4. Rede de trocadores de calor ótima.

5.2 Exemplo 02

O segundo exemplo, extraído de Beninca (2008), é um caso real de uma planta de Eteno da Companhia Petroquímica do Sul (Copesul), recentemente adquirida pela Braskem S. A. Segundo Beninca (2008), a tecnologia datada da década de 70 candidata-a como detentora de oportunidade de integração energética.

Tabela 4. Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 01.

Correntes	T^{in} (K)	T^{out} (K)	CP (kW/K)	h (kW/m ² K)
H1	423	323	200	0,20
H2	443	313	100	0,20
C1	323	393	300	0,20
C2	353	383	500	0,20
UQ	453	453		0,20
UF	293	313		0,20

Custo de área: $9094 + 221.A^{0,81}$, A em m^2 .

Custo da utilidade quente: 110 \$/kW ano. e Custo da utilidade fria: 10 \$/kW ano.

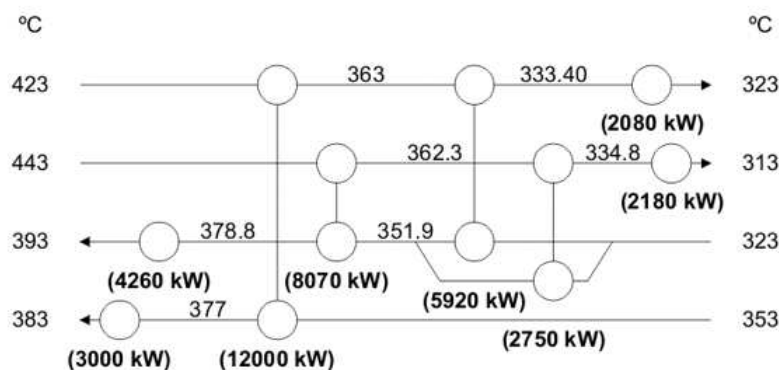


Figura 5. Rede de trocadores de calor ótima para o Exemplo 1.

Tabela 5. Comparação com a literatura para o Exemplo 1.

	ZHU (1997)	Resultado Atual
Custo Anual Global (\$/ano)	1818031	1816470
Custo de Área (\$/ano)	1008031	975270
Custo de Utilidade (\$/ano)	810000	841200

Para a aplicação da metodologia, considerou-se a planta sem qualquer tipo de integração energética existente (como se fosse uma planta nova). Os dados de custo das utilidades, custo de área e coeficiente global de troca térmica usados são os propostos por Beninca (2008). Este caso também pode ser visto em Ravagnani et al. (2010).

A planta é composta por dezesseis correntes quentes e dezessete correntes frias, bem como uma corrente de utilidade quente e uma de utilidade fria. A Tabela 6 apresenta os dados das correntes, bem como os dados de custo de utilidades e área.

A configuração da rede ótima é mostrada na Figura 6. A Tabela 7 mostra o calor trocado pelos trocadores de calor. A Tabela 8 apresenta o custo de utilidades e o custo referente aos trocadores de calor. O valor do custo global anual da rede de trocadores de calor é 10^7 \$/ano. A taxa de sucesso do método do enxame de partículas para esse exemplo foi de 25%.

6. Comentários e Conclusão

Diante de tudo que foi exposto, percebe-se que pesquisa envolvendo o assunto de redes de trocadores de calor é e vêm sendo disponibilizada, há muitos anos, motivados pela possibilidade de economia de energia em plantas de processo, reduzindo os custos de processamento.

Apesar deste não ser um tema relativamente novo, ele não está esgotado. Ainda é grande o interesse pelo assunto e a quantidade de trabalhos que continuam a ser desenvolvidos propondo técnicas mais eficientes e realistas para se obter resultados melhores só tem aumentado.

Tabela 6. Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 2.

Corr	T^{in} (°C)	T^{out} (°C)	CP (kW/°C)	h (kW/m ² °C)	Corr	T^{in} (°C)	T^{out} (°C)	CP (kW/°C)	h (kW/m ² °C)
H1	133,4	87,8	2,3	0,80	C1	23,4	68,8	5,9	0,80
H2	46,0	33,0	813,9	0,80	C2	18,4	63,0	182,9	0,80
H3	162,4	40,0	16,6	0,80	C3	63,0	75,0	149,6	0,80
H4	289,7	23,0	10,5	0,80	C4	83,2	116,0	243,2	0,80
H5	34,1	14,0	320,5	0,80	C5	123,7	160,9	230,3	0,80
H6	70,6	61,8	97,5	0,80	C6	162,4	162,6	190550	0,80
H7	111,0	38,0	43,3	0,80	C7	162,4	180,0	97,8	0,80
H8	38,0	36,4	80,7	0,80	C8	123,4	123,7	19383,3	0,80
H9	54,7	38,0	41,3	0,80	C9	23,1	283,0	10,5	0,80
H10	41,1	38,0	20,7	0,80	C10	2,4	12,4	494,9	0,80
H11	38,0	10,0	3,2	0,80	C11	12,4	21,2	175,2	0,80
H12	58,1	33,0	1,1	0,80	C12	70,0	75,0	1660,4	0,80
H13	83,0	64,5	2254,1	0,80	C13	79,7	87,6	1245,2	0,80
H14	150,3	120,0	599,0	0,80	C14	102,0	110,0	644,1	0,80
H15	193,4	180,0	3695,6	0,80	C15	65,5	75,6	151,0	0,80
H16	243,4	90,0	4,0	0,80	C16	73,2	87,2	185,2	0,80
UQ	203	203			C17	15,3	45,0	42,5	0,80
UF	30	35							

Custo de área: $4333.A^{0,61}$, A em m^2 .

Custo da utilidade quente: 288,2 \$/kW ano. e Custo da utilidade fria: 75,3 \$/kW ano.

Tabela 7. Calor trocado pelos trocadores de calor para o Exemplo 02.

Equipamento	Q (kW)	Equipamento	Q (kW)	Equipamento	Q (kW)
1	2739	12	3158	23	29
2	1538	13	1721	24	1526
%hline 3	964	14	8568	25	5153
4	4904	15	498	26	1975
5	104	16	2864	27	5814
6	270	17	689	28	7182
7	858	18	1630	A1	803
8	90	19	64	A2	6973
9	1263	20	1796	R1	8627
10	611	21	129	R2	25471
11	38176	22	8302		

Tabela 8. Resumo dos resultados para o Exemplo 02.

Custo Anual Global (\$/ano)	10753995,5
Custo de Área (\$/ano)	5945372,9
Custo de Utilidade (\$/ano)	4808622,6

Neste capítulo uma metodologia para obter a síntese de redes de trocadores de calor foi apresentada. O objetivo principal é encontrar as configurações de uma rede de trocadores de calor com custo mínimo, levando-se em conta os custos de área de troca térmica e consumo de utilidades.

Na metodologia proposta não foi necessário incluir nenhuma simplificação na geração da superestrutura, nem em qualquer outra etapa do modelo. Para fugir de problemas de não-linearidades, é muito comum encontrar trabalhos que utilizam aproximações e simplificações. O método é baseado no modelo de superestrutura similar ao de [Yee & Grossmann \(1990\)](#). Porém, diferentemente dos autores, outra inovação apresentada é incluir o número de estágios da rede como uma variável a ser otimizada. A maior parte, se não todos, os trabalhos que utilizam esse modelo de superestrutura trata o número de estágios como um parâmetro fixo, previamente determinado.

O problema de otimização é resolvido usando o algoritmo do método do enxame de partículas.

Um exemplo da literatura e um caso real de grande dimensão foram usados para demonstrar a aplicabilidade da metodologia. Os resultados para o problema da literatura mostraram que os valores obtidos para a função objetivo usando o algoritmo proposto são melhores que os resultados apresentados na literatura. Não foi possível fazer comparação para nenhum caso de grande porte, por não ter sido encontrado nenhum exemplo na literatura resolvido pelo modelo de superestruturas, o que indica mais uma limitação para os métodos já desenvolvidos. Entretanto, um caso real foi utilizado para mostrar a capacidade do método.

Analisando os resultados obtidos, nota-se que o modelo para síntese de redes de trocadores de calor com pequeno número de correntes possuem um desempenho muito satisfatório. Os resultados são obtidos com uma taxa de sucesso alta.

Conforme a dimensão do problema aumenta, a porcentagem de sucesso tende a diminuir, entretanto deve-se levar em conta o fato de ter sido possível obter um resultado até mesmo em um problema considerado de grande dimensão. Em muitos casos, os métodos de otimização comumente utilizados na literatura não permitem sequer obter um resultado.

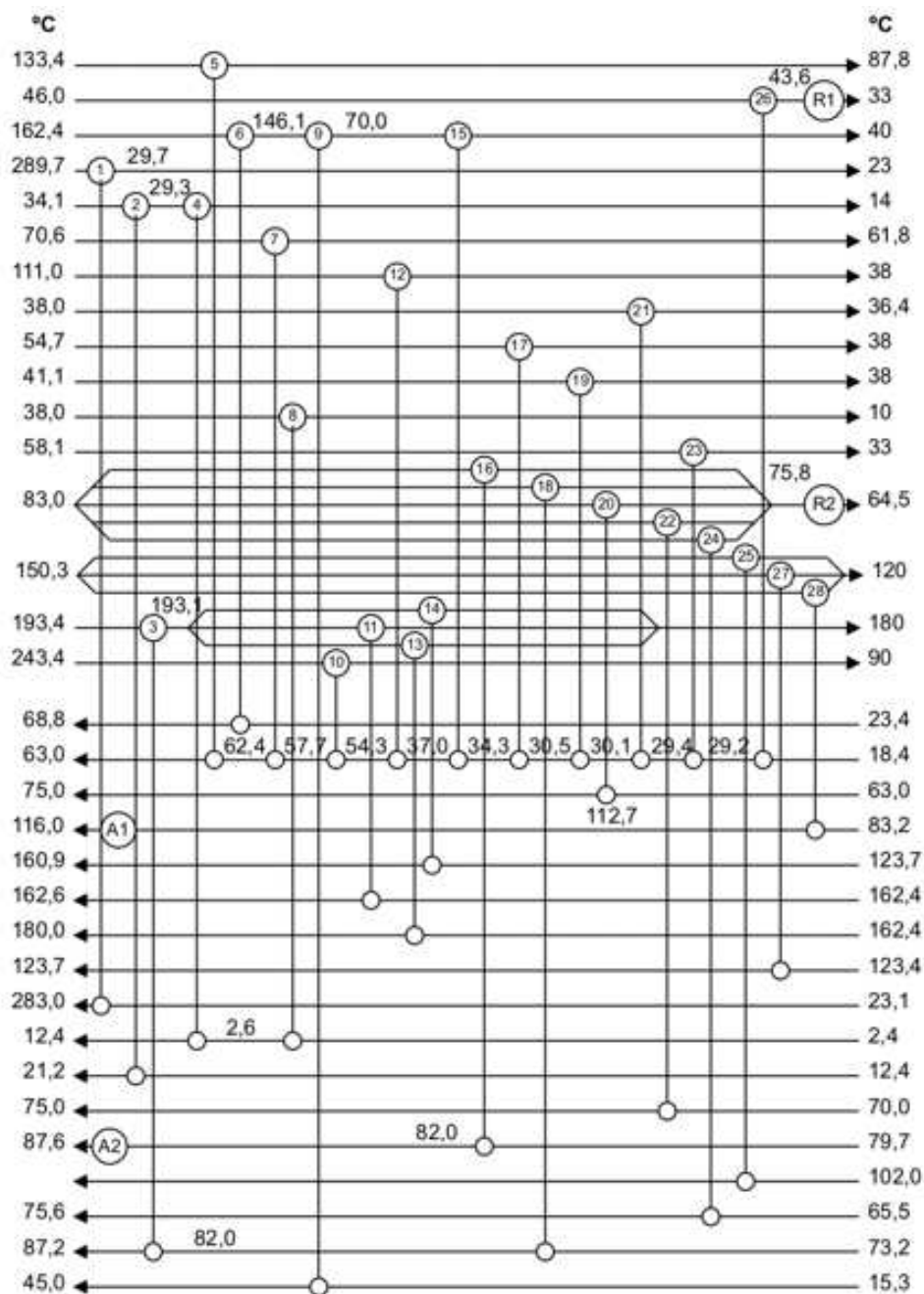


Figura 6. Rede de trocadores de calor ótima para o Exemplo 02.

À medida em que o número de restrições aumenta, o desempenho computacional diminui significativamente. É importante ressaltar que a performance aqui mencionada não significa tempo para a convergência e sim dificuldades na convergência, ou seja, a obtenção de uma região viável é bastante difícil. Isso é observado pela baixa taxa de sucesso conseguida na síntese de redes para o problema de grande porte, comparada com o problema da síntese de redes de trocadores de calor de pequeno porte.

Referências

- Ahmad, S., *Heat Exchanger Networks: Cost Tradeoffs in Energy and Capital*. PhD thesis, Faculty of Technology, University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, USA, 1985.
- Alwi, S.R.W. & Manan, Z.A., Step: A new graphical tool for simultaneous targeting and design of a heat exchanger network. *Chemical Engineering Journal*, 62:106–121, 2010.
- Beninca, M., *Integração Energética de uma Planta de Eteno com Aspectos de Flexibilidade: Aplicação da Análise Pinch em Conjunto com a Otimização Matemática*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2008.
- Bogataj, M. & Kravanja, Z., An alternative strategy for global optimization of heat exchanger networks. *Applied Thermal Engineering*, 43:75–90, 2012.
- Castier, M., Rigorous multiple utility targeting in heat exchanger networks. *Energy Conversion and Management*, 59:74–85, 2012.
- Floudas, C.A., *Nonlinear and Mixed-Integer Optimization: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press, 1995.
- Floudas, C.A. & Ciric, A.R., Strategies for overcoming uncertainties in heat exchanger network synthesis. *Computers and Chemical Engineering*, 13(10):1133–1152, 1989.
- Hohmann, E.C., *Optimum Networks of Heat Exchange*. PhD thesis, University of Southern California, 1971.
- Kennedy, J. & Eberhart, R., Particle swarm optimization. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia, p. 1942–1948, 1995.
- Lakshmanan, R. & Fraga, E.S., Pinch location and minimum temperature approach for discontinuous composite curves. *Computers and Chemical Engineering*, 26:779–783, 2002.
- Lewin, D.R.; Wang, H. & Shalev, O., A generalized method for heat exchanger synthesis using stochastic optimization: I. general framework and mer optimal synthesis. *Computers and Chemical Engineering*, 22:1503–1513, 1998.
- Linnhoff, B., Pinch analysis: A state-of-art overview. *Transactions of the IChemE*, 71, 1993.
- Linnhoff, B. & Flower, J.R., Synthesis of heat exchanger networks, part i. systematic generation of energy optimal networks. *AIChE Journal*, 24(633), 1978.
- Linnhoff, B. & Hindmarsh, E., The pinch design method for heat exchanger networks. *Computers and Chemical Engineering*, 38(5):745–763, 1983.
- Mizutani, F.T.; Pessoa, F.L.P.; Queiroz, E.M.; Hauan, S. & Grossmann, I.E., Mathematical programming model for heat exchanger network synthesis including detailed heat exchanger designs. 1. shell-and-tube heat exchanger design. *In Eng Chem Res*, 42:4009–4018, 2003.
- Nielsen, J.S.; Hansen, M.W. & Joergensen, S., Heat exchanger network modeling framework for optimal design and retrofitting. *Computers and Chemical Engineering*, 20:S249–S254, 1996.
- Ravagnani, M.A.S.S., *Projeto e Otimização de Redes de Trocadores de Calor*. Tese de d.sc., Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1994.
- Ravagnani, M.A.S.S. & Caballero, J., *Redes de Trocadores de Calor*. Universidade Estadual de Maringá: EDUEM, 2012.
- Ravagnani, M.A.S.S. & Silva, A.P., Retrofit of heat exchanger networks including the detailed equipment design. *Computer Aided Chemical Engineering*, 31:235–239, 2012.
- Ravagnani, M.A.S.S.; Silva, A.P.; Arroyo, P.A. & et al., Heat exchanger network synthesis and optimization using genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 25:1003–1017, 2005.
- Ravagnani, M.A.S.S.; Silva, A.P.; Biscaia Jr., E.C. & Caballero, J.A., An optimisation method for the synthesis of heat exchanger networks. *Hydrocarbon World*, 5(1):70–72, 2010.
- Salama, A.I.A., Numerical construction of heat exchanger composite curves and their attributes. *Computers and Chemical Engineering*, 33:181–190, 2009.
- Sieniutycz, S. & Jezowski, J., Heat exchanger network synthesis. *Energy Optimization in Process Systems and Fuel Cells*, Second Edition:585–620, 2013.
- Silva, A.P.; Jr., E.C.B. & Ravagnani, M.A.S.S., Heuristic optimization of heat exchanger networks. In: Proceedings of the 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering. Rio de Janeiro, Brasil, p. 01–10, 2005.
- Silva, A.P.; Ravagnani, M.A.S.S. & Biscaia Jr., E.C., Particle swarm optimisation in heat exchanger network synthesis including detailed equipment design. *Computer Aided Chemical Engineering*, 25:713–718, 2008.

- Silva, A.P.; Ravagnani, M.A.S.S.; Biscaia Jr., E.C. & Caballero, J.A., Optimal heat exchanger network synthesis using particle swarm optimization. *Optimization and Engineering*, 11:459–470, 2010.
- Tjoe, T.N. & Linnhoff, B., Using pinch technology for process retrofit. *Chemical Engineering*, 93:47–60, 1986.
- Vieira, R.C. & Biscaia Jr., E.C., *Métodos Heurísticos de Otimização*. Disponível sob consulta: aline@deq.uem.br edição. PEQ/COPPE/UFRJ: Escola Piloto Virtual, 2002.
- Yee, T.F. & Grossmann, I.E., Simultaneous optimization models for heat integration: Heat exchanger network synthesis. *Computers and Chemical Engineering*, 14(10):1165–1184, 1990.
- Yu, H.; Fang, H.; Yao, P. & Yuan, Y., A combined genetic algorithm/ simulated annealing algorithm for large scale system energy integration. *Computers and Chemical Engineering*, 24:2023–2035, 2000.
- Zamora, J.M. & Grossmann, I.E., A global minlp optimization algorithm for the synthesis of heat exchanger networks with no stream splits. *Computers and Chemical Engineering*, 20(3):367–384, 1998.
- Zhu, X., Automated design method for heat exchanger network synthesis using block decomposition and heuristic rules. *Computers and Chemical Engineering*, 21:1095–1104, 1997.