



COPPE/UFRJ

PROJETO ÓTIMO DE REDES DE TROCADORES DE CALOR UTILIZANDO
TÉCNICAS NÃO DETERMINÍSTICAS

Aline Priscila da Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Orientador(es): Evaristo Chalbaud Biscaia Junior
Mauro Antonio da Silva Sá
Ravagnanai

Rio de Janeiro
Maio de 2009

PROJETO ÓTIMO DE REDES DE TROCADORES DE CALOR UTILIZANDO
TÉCNICAS NÃO DETERMINÍSTICAS

Aline Priscila da Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA QUÍMICA.

Aprovada por:

Prof. Evaristo Chalbaud Biscaia Jr., D. Sc.

Prof. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani, Dr. Eng.

Prof. Argimiro Resende Secchi, D. Sc.

Prof. Príamo Albuquerque Melo Jr, D. Sc.

Prof. Helcio Rangel Barreto Orlande, D. Sc.

Dra. Roberta Chasse Vieira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2009

Silva, Aline Priscila da

Projeto Ótimo de Redes de Trocadores de Calor Utilizando Técnicas Não Determinísticas - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIV, 122 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Evaristo Chalbaud Biscaia Junior

Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Química, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 6, 19-23, 33-34, 65-67, 93-94, 112-114.

1. Otimização de Processos I. Biscaia Junior, Evaristo Chalbaud *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Química. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre esteve guiando meus passos por meio dos conselhos de pessoas boas, vindos na hora certa.

Aos meus pais, Benedito e Ivani, que sempre estiveram presentes apoiando minhas escolhas e me ajudando a alcançar meus objetivos.

A minha irmã Aniele e meu novo irmão Lucas que, mesmo a distância, sempre comemoraram comigo os momentos de vitória e me sustentaram nos momentos de dificuldade. E também pelos sobrinhos que vão me dar!

Ao Ricardo por seu amor, carinho e, principalmente, paciência por tantos anos de viagens, distâncias, lamentações e stress (bem característico de um doutorado).

Aquele a quem logo de cara virei fã número 1, Evaristo, por ter acreditado e confiado tanto em mim, por ter me dado coragem e até enxugado minhas lágrimas nas horas em que tudo parecia impossível (e ele sabiamente sabia que não era!). Ao Mauro, pelos preciosos e essenciais ensinamentos, por ter sempre insistido na minha capacidade quando eu mesma não acreditava nela e por ter desistido de desistir.

Aqueles que me acolheram e compartilharam alegrias, dúvidas, angústias, cafés fortes, passeios, compras, guarda-chuva, almoços no Fundão, 485 no tiroteio congestionado da Linha Vermelha e domingos chuvosos e solitários no Rio: Clarissa, LF, Helô, Nilson. Vocês são realmente especiais!

Aos colegas do LMSCP – o Lar dos Trogloditas – que fazem de lá o lugar mais divertido, inteligente e excelente para trabalhar: o ótimo global no espaço de busca. E, além disso, compartilham os seguintes pensamentos:

- Se não for FORTRAN, não presta;
- “All models are wrong, but some are useful.” (George Box)

A Universidade Estadual de Maringá por viabilizar esse doutorado por meio do PACT (Plano de Apoio à Capacitação Técnica Universitária), em especial aos amigos do DEQ por entenderem e me cobrirem em tantas ausências.

À ChemTech pelo apoio financeiro.

Muito obrigada a todos!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

PROJETO ÓTIMO DE REDES DE TROCADORES DE CALOR UTILIZANDO
TÉCNICAS NÃO DETERMINÍSTICAS

Aline Priscila da Silva

Maio/2009

Orientadores: Evaristo Chalbaud Biscaia Junior
Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani

Programa: Engenharia Química

Em processos industriais, uma das grandes preocupações é o consumo excessivo de energia na forma de utilidades quentes e frias. Também, o custo de construção e instalação dos equipamentos de troca térmica é um fator que influencia no custo global do processo. Neste trabalho, uma sistemática foi desenvolvida com o objetivo de realizar a síntese de redes de trocadores de calor para recuperar energia nos processos industriais, com custo mínimo de investimento. A metodologia proposta se utiliza de um modelo de otimização baseado em superestruturas, cuja solução é obtida com a aplicação do método do enxame de partículas. Além disso, a mesma superestrutura foi usada para o reprojeto (*retrofit*) de redes de trocadores de calor. Foi também proposto um modelo para o dimensionamento termo-hidráulico dos equipamentos de troca térmica, baseado no padrão TEMA. Este modelo foi incorporado ao modelo de síntese e ao modelo de *retrofit*. A aplicabilidade dessas sistemáticas foi avaliada por meio do estudo de exemplos da literatura e também de um caso real de grande porte. Os resultados mostraram que a metodologia proposta é eficiente, sendo possível obter redes de menor custo dos que as apresentadas na literatura.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

OPTIMAL HEAT EXCHANGER NETWORKS USING NON DETERMINISTIC TECHNIQUES

Aline Priscila da Silva

May/2009

Advisors: Evaristo Chalbaud Biscaia Junior
Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani

Program: Chemical Engineering

Excessive energy consumption by hot and cold utilities is a critical feature in industrial processes. The fixed cost of equipment manufacturing and installation has influence in the global process cost. In the present work a systematic was developed aiming at synthesizing heat exchanger networks with minimum global cost, considering minimum fixed cost and maximum energy recovery. The proposed methodology uses a model based on stage wise superstructures, whose solution is obtained by applying a Particle Swarm Optimization approach. The proposed superstructure was used to the retrofit of heat exchanger networks. A model was also proposed for the optimal thermal hydraulic design of the heat exchangers based on TEMA standards. This model was incorporated to the heat exchanger network synthesis and to the retrofit models. The applicability of this systematic was validated using literature examples and a real industrial case. The results show that the proposed methodology is efficient, been possible to achieve heat exchanger networks with lower costs than those in the literature.

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Referências.....	6
2. REDES DE TROCADORES DE CALOR	7
2.1 Métodos Sequenciais	9
2.2 Métodos Simultâneos	14
2.3 Referências.....	19
3. OTIMIZAÇÃO E MÉTODO DO ENXAME DE PARTÍCULAS	24
3.1 Introdução.....	24
3.2 O Método do Enxame de Partículas.....	28
3.2.1 Algoritmo Básico para o Método do Enxame de Partículas	30
3.3 Implementação do Método do Enxame de Partículas.....	31
3.4 Referências.....	33
4. PROJETO DE TROCADORES DE CALOR.....	35
4.1 Introdução.....	35
4.2 Modelo Matemático	41
4.2.1 Lado dos Tubos	44
4.2.2 Lado do Casco	45
4.2.3 Aspectos Gerais do Trocador de Calor	48
4.3 Comentários Gerais sobre a Implementação Computacional.....	50
4.3.1 Algoritmo Proposto	51
4.4 Aplicações	53
4.4.1 Exemplo 4.1	54
4.4.2 Exemplo 4.2	56
4.4.3 Exemplo 4.3	58
4.5 Comentários	63
4.6 Referências.....	65
5. SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR	68
5.1 Introdução.....	68

5.2	Definição do Problema: Síntese de RTC.....	69
5.2.1	Comentários Gerais sobre a Implementação Computacional	72
5.2.2	Algoritmo proposto	72
5.2.3	Variáveis e Função Objetivo	74
5.3	Aplicações: Síntese de RTC.....	78
5.3.1	Exemplo 5.1	78
5.3.2	Exemplo 5.2	79
5.4	Definição do Problema: Síntese de RTC com projeto detalhado dos trocadores de calor	83
5.4.1	Algoritmo proposto	84
5.5	Aplicações: Síntese de RTC com projeto detalhado dos trocadores de calor	86
5.5.1	Exemplo 5.3	86
5.5.2	Exemplo 5.4	89
5.6	Comentários	91
5.7	Referências.....	93
6.	RETROFIT	95
6.1	Introdução.....	95
6.2	Definição do Problema: <i>Retrofit</i>	98
6.2.1	Comentários Gerais sobre a Implementação Computacional	99
6.2.2	Algoritmo Proposto	100
6.3	Aplicação: <i>Retrofit</i>	102
6.3.1	Exemplo 6.1	102
6.4	Definição do Problema: <i>Retrofit</i> com projeto detalhado dos trocadores de calor	105
6.5	Aplicação: <i>Retrofit</i> com projeto detalhado dos trocadores de calor	106
6.5.1	Exemplo 6.2	107
6.6	Comentários	111
6.7	Referências.....	112
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	115
8.	APÊNDICE	119
8.1	Apêndice A - Dados adicionais para o modelo de trocadores de calor casco-tubo.....	119
8.2	Apêndice B – Tabela TEMA	120

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Integração energética entre duas correntes de processo	8
Figura 2.2 – Superestrutura em estágios para problema com duas correntes de processo quentes e duas correntes frias	16
Figura 3.1 – Fluxograma para o método do enxame de partículas	29
Figura 4.1 – Trocador de calor com uma passagem do lado dos tubos.....	42
Figura 4.2 – Parte A do Exemplo 4.3.....	59
Figura 4.3 – Parte B do Exemplo 4.3.....	60
Figura 4.4 – Parte C do Exemplo 4.3	61
Figura 5.1 – Superestrutura para um problema de seis correntes	69
Figura 5.2 – Rede de trocadores de calor da partícula j	76
Figura 5.3 – Rede de trocadores de calor da partícula l	76
Figura 5.4 – Rede de trocadores de calor ótima	77
Figura 5.5 - Rede de trocadores de calor ótima para o Exemplo 5.1	79
Figura 5.6 – Rede ótima para o Exemplo 5.2	82
Figura 5.8 – Rede ótima para o Exemplo 5.4	90
Figura 6.1 – Rede atual para o Exemplo 6.1	103
Figura 6.2 – Rede após metodologia proposta para <i>retrofit</i> para o Exemplo 6.1	105
Figura 6.3 – Rede de trocadores de calor atual para o Exemplo 6.2	109
Figura 6.4 - Rede após metodologia proposta para <i>retrofit</i> para o Exemplo 6.2.....	110

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Parâmetros para o método do enxame de partículas.....	53
Tabela 4.2 – Dados do Exemplo 4.1	54
Tabela 4.3 – Resultados para o Exemplo 4.1.....	55
Tabela 4.4 – Dados para o Exemplo 4.2	57
Tabela 4.5 – Resultados para o Exemplo 4.2.....	57
Tabela 4.6 – Dados para o Exemplo 4.3	59
Tabela 4.7 - Resultados para o Exemplo 4.3	62
Tabela 5.1 – Dados das correntes e dados de custo	74
Tabela 5.2 – Exemplos de partículas iniciais aleatórias	75
Tabela 5.3 – Valores para a população inicial.....	77
Tabela 5.4 – Parâmetros para o método do enxame de partículas.....	78
Tabela 5.5 - Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 5.1	79
Tabela 5.6 - Comparação com a literatura para o Exemplo 5.1	79
Tabela 5.7 – Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 5.2	80
Tabela 5.8 – Calor trocado pelos trocadores de calor para o Exemplo 5.2.....	81
Tabela 5.9 – Resumo dos resultados para o Exemplo 5.2.....	81
Tabela 5.10 – Parâmetros para o método do enxame de partículas.....	86
Tabela 5.11 – Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 5.3	87
Tabela 5.12 - Detalhes de projeto dos trocadores de calor para o Exemplo 5.3.....	88
Tabela 5.13 - Comparação dos resultados com a literatura para o Exemplo 5.3.....	88
Tabela 5.14 – Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 5.4	89
Tabela 5.15 – Detalhes dos Equipamentos de troca térmica para o Exemplo 5.4	91
Tabela 5.16 - Comparação com a literatura para o Exemplo 5.4	91
Tabela 6.1 – Parâmetros para o método do enxame de partículas.....	102
Tabela 6.2 – Calor trocado e área para os trocadores existentes	103

Tabela 6.3 – Calor trocado, área e custo para os trocadores novos.....	104
Tabela 6.4 - Consumo e custo de utilidades para o Exemplo 6.1	104
Tabela 6.5 – Parâmetros para o método do enxame de partículas.....	106
Tabela 6.6 – Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 6.2	108
Tabela 6.7 – Calor trocado e área dos trocadores existentes	108
Tabela 6.8 – Calor, área e custo dos trocadores da rede nova.....	108
Tabela 6.9 – Detalhes dos trocadores de calor novos	109
Tabela 6.10 - Consumo e custo de utilidades	110
Tabela 8.1 – Coeficientes Empíricos Usados nas Equações 3.11 e 3.12.....	119
Tabela 8.2 – Parte da Tabela TEMA usada no algoritmo para projeto de trocadores de calor	120

Lista de Símbolos

Os símbolos e abreviações utilizados ao longo deste trabalho são listados abaixo.

A	área de troca térmica
a_1, a_2, a_3 e a_4	coeficientes empíricos
aa_1	parâmetro constante para o custo da área
aa_2	coeficiente constante para o custo da área
aa_3	parâmetro constante para o custo de bombeamento
arr	arranjo nos tubos (triangular ou quadrado)
b_1, b_2, b_3 e b_4	coeficientes empíricos
C_{area}	custo referente à área de troca térmica
C_{CU}	custo referente à utilidade fria
C_{HU}	custo referente à utilidade quente
C_p	capacidade calorífica
C_{pump}	custo referente ao bombeamento dos fluidos
C_{total}	custo total da rede de trocadores de calor
$C_{\text{utilidade}}$	custo referente ao total de utilidades
CU	total de utilidade fria na rede de trocadores de calor
d_{ex}	diâmetro externo dos tubos
d_{in}	diâmetro interno dos tubos
D^s	diâmetro do casco
dchi	diâmetro da chicana
Dft	diâmetro do feixe de tubos
FSC	fração de divisão da corrente fria
FSH	fração de divisão da corrente quente

H	coeficiente de transferência de calor individual
HU	total de utilidade quente na rede de trocadores de calor
k^{MAX}	número máximo de equipamentos de troca térmica
L	comprimento dos tubos
l_c	corte das chicanas
l_s	espaçamento entre as chicanas
LMDT	média logarítmica de temperatura
m	vazão mássica
N	número de estágios
ncf	número de correntes frias
ncq	número de correntes quentes
N_b	número de chicanas
NS	número de cascos
n^t	número de tubos
np^t	número de passos nos tubos
pt	<i>pitch</i>
Q	calor trocado
r_d	fator de incrustação
T	temperatura
T^{in}	temperatura de entrada da corrente no trocador de calor
T^{out}	temperatura de saída da corrente no trocador de calor
Uc	coeficiente de transferência de calor global sem incrustação
Ud	coeficiente de transferência de calor global com incrustação
ΔP	queda de pressão
k	condutividade térmica
μ	viscosidade

ρ densidade

Índices:

h fluido quente

c fluido frio

s lado do casco

t lado dos tubos

w parede do tubo

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. O contínuo aumento dos custos de insumos energéticos, a redução de disponibilidade dos combustíveis e o aumento das restrições ambientais à emissão de poluentes inerente à geração de energia têm justificado o investimento em projetos industriais que minimizem seu consumo energético.

Além disso, quanto mais antigas, maiores as oportunidades de otimização energética das plantas industriais existentes, visto que nas décadas passadas as preocupações com o consumo energético eram baixas e as ferramentas para avaliar e projetar plantas eram carentes nesse aspecto.

Embora os sistemas de recuperação de calor tenham sempre gerado interesse entre os estudos de síntese, uma maior atenção foi dada a esta área após a crise energética mundial, no início dos anos setenta. A partir de então, 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.

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 dessas 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.

Muitos trabalhos significativos apareceram sobre síntese de redes de trocadores de calor nos últimos 40 anos. Além da maximização da integração energética entre as correntes de processo e conseqüente minimização do emprego de utilidades, outro conceito economicamente importante na síntese de uma rede de trocadores de calor é a minimização do número de trocadores de calor ou da área de troca térmica. Porém, a grande maioria dos trabalhos disponíveis que abordam esse conceito considera trocadores de calor com configuração em contracorrente para todas as trocas térmicas. Na indústria, os equipamentos mais utilizados para transferência de calor são os trocadores de calor do tipo casco-tubo. Utilizar somente a configuração contracorrente para calcular a área de troca térmica pode gerar resultados não ótimos da área total da rede ou afastados da realidade industrial.

Os trabalhos abordando a síntese de redes de trocadores de calor são classificados em dois grupos principais: os métodos seqüenciais e os métodos simultâneos. Isso foi recentemente proposto por FURMAN e SAHINIDIS (2002) após uma revisão crítica de inúmeros artigos publicados sobre o assunto.

Os métodos sequenciais consistem na decomposição do problema da síntese em uma série de subproblemas com o objetivo de reduzir o esforço computacional na solução, podendo ainda ser divididos em duas subcategorias: (1) método da Análise *Pinch*, que utiliza conceitos termodinâmicos e regras heurísticas, (2) métodos de programação matemática, que são baseados na solução sequencial de subproblemas, lineares e não lineares, para o mínimo custo de utilidades, mínimo número de unidades de troca térmica e o mínimo custo fixo da rede.

De acordo com SILVA (2003), inicialmente o problema é dividido em uma série de subproblemas com diferentes metas, baseadas em regras heurísticas. Geralmente,

as metas dos subproblemas são apresentadas na seguinte ordem de importância: (1) mínimo consumo de utilidades, (2) número mínimo de unidades de troca térmica, (3) mínimo custo de área, ou seja, mínimo custo fixo da rede. É importante ressaltar que esta heurística não garante a síntese de uma rede com o custo total anual mínimo, uma vez que a rede final será a soma de todas as sub-redes ótimas, o que não necessariamente fornece uma rede global ótima. Outra característica destes métodos é o fato de que a divisão de intervalos de temperatura implica na definição de um diferencial mínimo de temperatura (ΔT_{\min}), sendo este mais um parâmetro a ser determinado já que o custo de área da rede e o mínimo consumo de utilidades dependem do mesmo.

Já os métodos simultâneos não utilizam a decomposição do problema e 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, considerando a importância dos custos de utilidades e de equipamentos simultaneamente. Portanto, para um dado espaço de soluções, definido pela superestrutura, é possível obter-se uma solução ótima ou muito próxima da ótima.

A grande maioria das abordagens do problema pelos métodos simultâneos se dá via programação matemática não linear. Na maior parte das mesmas não existe a necessidade da definição do diferencial mínimo de temperatura. A vantagem da possibilidade de obtenção de um ótimo global por essa técnica nem sempre é abordada devido aos modelos, muitas vezes, possuírem não convexidades e, conseqüentemente, necessitarem de técnicas de otimização global as quais demandam elevados esforços computacionais. Portanto, diversos modelos com simplificações nas superestruturas foram criados.

A maior parte dos trabalhos apresentados na literatura abordando a síntese de redes de trocadores de calor não leva em conta o projeto detalhado e a consideração da perda de carga nos trocadores de calor durante a síntese da rede. Sem essa etapa

do projeto detalhado dos equipamentos, a chance da área total de troca térmica da rede ser mal dimensionada é grande. Com relação ao custo global da rede de trocadores de calor, este pode ser subestimado se não forem levados em conta os custos de bombeamento dos fluidos, relacionados à perda de carga do trocador de calor.

Outras lacunas verificadas na literatura são a pouca quantidade de trabalhos abordando o “reprojeto” de redes de trocadores de calor (*retrofit*). Isso acontece pois a complexidade desse tipo de problema aumenta, devido ao fato de que deve-se considerar a reutilização de unidades já existentes juntamente com o projeto de novas unidades. Porém, a exploração desse assunto se faz necessária visto que muitos processos antigos não passaram pela etapa de integração energética em seu projeto inicial. Além disso, os processos atuais sofrem muitas modificações, necessitando assim, com o passar do tempo, de um reprojeto de sua rede de trocadores de calor original, o *retrofit*.

Desta forma, buscando suprir a carência de abordagem desses conceitos, os objetivos deste trabalho são a construção de redes de trocadores de calor ótimas, incluindo o projeto ótimo de trocadores de calor. A proposta de projeto ótimo de trocadores de calor deve incluir o cálculo dos coeficientes de transferência de calor e da queda de pressão em função das propriedades físicas das correntes e de detalhes geométricos dos equipamentos. Além disso, pretende-se abordar os conceitos de *retrofit* de redes de trocadores de calor, aplicando-os aos modelos apropriados.

O método escolhido para realizar tais tarefas foi o método simultâneo com a definição de uma superestrutura. Muitos são os modelos, formulações matemáticas e simplificações disponíveis na literatura visando driblar as não convexidades dos problemas e o alto esforço computacional exigido para sua solução. Neste trabalho, optou-se por usar um método não determinístico de otimização. A escolha se deve ao fato de serem algoritmos de fácil implementação. Além disso, esses métodos já tem se

mostrado eficientes em problemas desse tipo, como visto em SILVA (2003) que usou os algoritmos genéticos aliados aos métodos sequenciais para síntese de redes de trocadores de calor. O método não determinístico escolhido foi o método do enxame de partículas.

Para que os objetivos deste trabalho fossem alcançados, alguns conceitos teóricos foram empregados, conceitos estes que serão discutidos nos próximos capítulos.

No Capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica sobre a síntese de redes de trocadores de calor apresentando os conceitos mais importantes dos métodos sequencial e simultâneo com o objetivo de situar a presente proposta no estado da arte.

O Capítulo 3 é dedicado à abordagem dos conceitos de otimização e dos métodos heurísticos de otimização. São apresentados a analogia com a natureza e as características e os parâmetros do método do enxame de partículas.

No Capítulo 4 são abordados alguns conceitos do projeto ótimo de trocadores de calor, bem como a formulação matemática para o modelo do mesmo. Alguns exemplos da literatura para projetos ótimos de trocadores de calor foram testados e os resultados são mostrados ao final do capítulo.

No Capítulo 5 são apresentados os modelos para síntese de redes de trocadores de calor, bem como a metodologia proposta para obtenção da rede ótima. Resultados para a síntese da rede ótima sem e com o projeto ótimo dos trocadores de calor também são mostrados.

Em seguida, no Capítulo 6, é apresentada uma revisão bibliográfica apresentando os trabalhos desenvolvidos aplicando conceitos de *retrofit* de redes de trocadores de calor. Uma metodologia para o *retrofit* usando a mesma superestrutura usada na rede totalmente nova é apresenta.

O Capítulo 7 faz uma síntese de todos os resultados obtidos. Algumas conclusões e sugestões para trabalhos futuros são também apresentadas.

1.1 Referências

FURMAN, K. C., SAHINIDIS, N.V., 2001, "Computational Complexity of Heat Exchanger Network Synthesis", *Comput. Chem. Eng.*, n. 25, pp. 1371-1390.

SILVA, A. P., 2003, *Síntese de Redes de Trocadores de Calor Utilizando Algoritmos Genéticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.

2. REDES DE TROCADORES DE CALOR

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. A Figura 2.1 mostra, de uma forma esquemática, a integração energética entre duas correntes de processo, uma quente e outra fria.

Na Figura 2.1, UQ é a utilidade quente, UF a utilidade fria, TQ_{en} , TQ_{sai} , TF_{sai} e TF_{en} são as temperaturas de entrada e saída quente e saída e entrada fria, respectivamente. O ΔT_{min} é a variação mínima de temperatura entre as correntes quentes e frias nos terminais do equipamento de troca térmica.

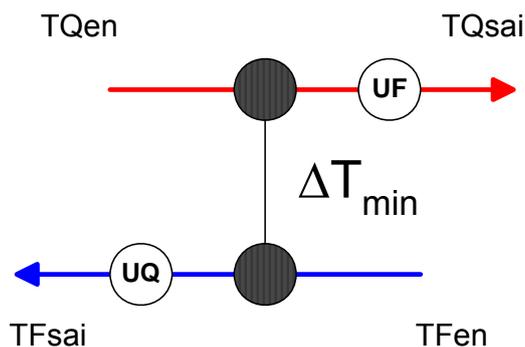


Figura 2.1 – Integração energética entre duas correntes de processo

A minimização do consumo de utilidades e do número de trocadores de calor possibilita a redução de custos operacional e de capital, tanto para redes novas como para as já existentes. Isto explica o grande interesse industrial despertado para a integração energética de processos.

Embora o problema de minimização do consumo de energia tenha começado a ser estudado a partir da década de 1960, apenas a partir da década seguinte houve um maior desenvolvimento desta área de pesquisa.

Segundo RAVAGNANI (1994), os trabalhos de HWA (1965), usando métodos de programação separável, e de KESLER e PARKER (1969), usando programação linear, estão entre os primeiros trabalhos a serem publicados apresentando propostas para solucionar o problema de síntese de redes de trocadores de calor.

A partir de então, 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. Esses trabalhos, segundo GUNDERSEN e NAESS (1988), eram classificados em duas linhas básicas de estudo: a dos métodos matemáticos, que utiliza técnicas de programação linear e não linear, e a conhecida como *Análise Pinch*, baseada em regras heurísticas e conceitos termodinâmicos.

Mais recentemente, FURMAN e SAHINIDIS (2002) apresentaram uma nova revisão bibliográfica sobre a síntese de redes de trocadores de calor. Esse trabalho, diferentemente de GUNDERSEN e NAESS (1988), reclassificou os métodos de resolução do problema em dois novos grandes grupos: as técnicas sequenciais e as técnicas simultâneas. As técnicas sequenciais baseiam-se na divisão do problema em subproblemas, de mais fácil resolução, que são resolvidos sucessiva e sequencialmente. Os subproblemas podem ser formulados com regras heurísticas evolucionárias (Análise *Pinch*) ou via programação matemática. Já as técnicas simultâneas baseiam-se na definição de superestruturas e na síntese da redes de trocadores de calor sem a decomposição do problema, ou seja, o problema é formulado e resolvido em uma única etapa.

O presente trabalho aplica a técnica simultânea resolvida por meio de um método não determinístico de otimização. O desenvolvimento desta metodologia, porém, foi precedido pelo trabalho de SILVA (2003) em que a mesma idéia foi aplicada. No entanto, em SILVA (2003) foi usada a técnica sequencial, também aliada a um métodos não determinísticos. Sua metodologia e os resultados obtidos fomentaram discussões e interesses para que o estudo continuasse.

Nos itens seguintes são apresentados alguns dos trabalhos de maior relevância em síntese de redes de trocadores de calor, divididos pela metodologia que empregam: método sequencial ou simultâneo.

2.1 Métodos Sequenciais

De acordo com MIZUTANI (2003), 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. Logo após veio o trabalho muito citado de PONTON e DONALDSON (1974), também utilizando regras heurísticas para a síntese da rede.

Vale a pena ressaltar que vários métodos baseados em conceitos termodinâmicos e regras heurísticas foram apresentados na literatura. Em LIPORACE (1996), é apresentada uma revisão bibliográfica completa sobre os procedimentos utilizados nesta abordagem até então.

No fim da década de 70, através do trabalho de LINNHOFF e FLOWER (1978) e BOLAND e LINNHOFF (1979), a Tecnologia *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, antes que qualquer detalhamento do projeto fosse executado. 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 Tecnologia *Pinch* (ou Análise *Pinch*, como passou a ser denominada na década de 1980) foram enriquecidos com inúmeras outras técnicas e conceitos, que expandiram o poder de análise e determinação de alvos a outros sistemas e processos.

LINNHOFF e HINDMARSH (1983) apresentaram um método de projeto de redes de trocador de calor em que o problema é dividido em duas regiões, uma acima e outra abaixo do ponto de estrangulamento energético. Estas regiões são independentes e pode-se realizar a síntese da rede para cada região separadamente. O método apresenta critérios para orientar a alocação de trocadores, de modo a garantir a máxima recuperação de energia na rede. Quando há mais de uma possibilidade de troca, o projetista, baseado em sua experiência, tem a liberdade de escolher a opção que for mais conveniente ao processo.

TJOE e LINNHOFF (1986) apresentaram uma metodologia para o ajuste de redes de trocadores de calor em operação, baseada na “filosofia de metas” da Análise *Pinch*, sendo, tal qual esta operação, caracterizada pelo alto grau de interação com o usuário. Por tratar-se de rede em operação, o parâmetro principal para a avaliação é o tempo de retorno do investimento demandado pela readequação da rede de trocadores de calor. Os autores fazem observações sobre a correta estimativa do ΔT_{\min} para o procedimento de sua otimização, para que se possa garantir o melhor ajuste para a rede existente. O caso estudado neste trabalho foi o da unidade de destilação da segunda maior refinaria de petróleo do Reino Unido, de propriedade da Shell Ltda.

SABOO *et al.* (1986a, b) desenvolveram o *software* HESHEX para a síntese e análise de redes de trocadores de calor. Os autores fazem uso de algoritmos de programação linear mista com inteiros para a síntese da rede e o cálculo da área de troca térmica, considerando ainda restrições relativas à divisão de correntes e ao número de trocadores de calor.

Logo depois, FLOUDAS e GROSSMANN (1987) propuseram um procedimento esquemático para a síntese de redes de trocadores de calor, o qual envolve as vazões e temperaturas iniciais das correntes do processo. Este método decompõe o problema em dois estágios: a predição das combinações de correntes para a troca térmica e a derivação da configuração da rede. A cada estágio, as técnicas de síntese são combinadas à análise da flexibilidade do problema, com o objetivo de avaliar a viabilidade operacional do projeto em relação a um determinado conjunto de parâmetros de incerteza.

Em um dos primeiros trabalhos desenvolvidos no Brasil sobre esse assunto, VALLECILLO (1989) desenvolveu uma técnica para a síntese de redes de trocadores de calor com consumo mínimo de utilidade e número mínimo de trocadores de calor por meio da solução dos problemas de programação linear e de programação linear mista com inteiros aplicados ao modelo de transbordo.

LINNHOFF (1993) fez uma revisão do estado da arte da aplicação da Análise *Pinch* em processos industriais, citando oito áreas nas quais o desenvolvimento era mais recente. Logo em seguida, em LINNHOFF (1994) é apresentada a Análise *Pinch* com ênfase na redução de custos de capital e emissão de poluentes.

No mesmo ano, RAVAGNANI (1994) desenvolveu um programa computacional para a síntese de redes de trocadores de calor incorporando a otimização do ΔT_{\min} e o dimensionamento dos equipamentos. A síntese da rede é feita utilizando-se conceitos da Análise *Pinch* e depois evoluída pela identificação e quebra dos laços de troca térmica. Após a evolução da rede, os trocadores de calor são dimensionados considerando-se as perdas de carga e os fatores de incrustação permitidos, utilizando o método de Bell-Delaware. Este é um dos primeiros e poucos trabalhos que englobam a otimização do ΔT_{\min} na síntese de redes de trocadores de calor.

Um dos primeiros trabalhos mesclando métodos sequenciais para síntese de redes de trocadores de calor e métodos híbridos de otimização foi apresentado por LEWIN *et al.* (1998). O modelo proposto resulta em um problema de programação linear mista com inteiros, que não considera divisão de correntes. A estrutura da rede é determinada por um algoritmo genético e, em seguida, as quantidades de calor das unidades são obtidas aplicando-se o método SIMPLEX visando a máxima recuperação de energia.

Em seguida, no mesmo ano, LEWIN (1998) modificou o modelo proposto por ele e seus colaboradores, para um modelo capaz de prever a divisão de correntes. Além disso, a solução buscava encontrar a configuração ótima de rede em relação aos custos anuais da mesma. O modelo, neste caso, era não linear com restrições lineares e foi otimizado com auxílio de algoritmos genéticos.

Alguns anos depois, LONA *et al.* (2000) desenvolveram um *software* didático, com interface amigável, na mesma linha do trabalho de RAVAGNANI (1994). A rede de trocadores de calor é desenvolvida por meio da Análise *Pinch* e, posteriormente, os

trocadores de calor são dimensionados. O objetivo foi disponibilizar o software para estudantes de graduação em engenharia química, permitindo o teste de várias configurações em um tempo reduzido.

LAKSHMANAN e FRAGA (2002) estudaram uma metodologia para a localização do ponto *Pinch* e do ΔT_{\min} em problemas que apresentam curvas compostas descontínuas. Esta metodologia permitiu que se chegasse a valores melhores do que os encontrados pelo método original, mostrando-se eficiente para este tipo de problema.

No ano seguinte, RAVAGNANI *et al.* (2003) apresentaram uma metodologia para a síntese de redes de trocadores de calor incorporando o dimensionamento detalhado dos equipamentos. A síntese da rede é feita utilizando-se conceitos da Análise *Pinch* e os trocadores de calor são dimensionados considerando-se as perdas de carga e os fatores de incrustação permitidos, utilizando o método de Bell-Delaware. Um exemplo industrial demonstra a aplicabilidade da metodologia desenvolvida.

Ainda em 2003, outro trabalho abordando a integração energética e métodos heurísticos de otimização foi desenvolvido. SILVA (2003) propôs uma metodologia que dividia o problema de síntese em três etapas. Na primeira etapa o ΔT_{\min} é otimizado utilizando algoritmos genéticos. Em seguida ocorre a localização do ponto *Pinch* e a divisão da rede em duas sub-redes. Por fim, utilizando um modelo não linear e alguns conceitos da Análise *Pinch*, a síntese da rede é feita também utilizando algoritmos genéticos. Como dito anteriormente, este trabalho de SILVA (2003) foi o precursor da presente tese de doutorado.

Dando continuidade ao trabalho de SILVA (2003), mais recentemente, RAVAGNANI *et al.* (2005) e SILVA *et al.* (2005) aproveitaram a metodologia proposta por SILVA (2003) e testaram novos exemplos e novos métodos de otimização não-determinísticos para ratificar a importância da otimização prévia do ΔT_{\min} nos métodos seqüenciais, bem como a facilidade e aplicabilidade desses métodos de otimização

em síntese de redes de trocadores de calor. SILVA *et al.* (2005) apresentaram um dos primeiros trabalhos abordando esse assunto aliado ao método do enxame de partículas.

Apesar de mais escassos, os trabalhos abordando os métodos sequenciais ainda têm aparecido recentemente. Novas abordagens empregando as tradicionais ferramentas da Análise *Pinch* podem ser vistas em SALAMA (2008a) e RASKOVIC e STOILJKOVIC (2008).

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). Na maior parte desses trabalhos não existe a necessidade da definição do diferencial mínimo de temperatura, variável necessária na abordagem sequencial.

A vantagem da possibilidade de obtenção de um ótimo global por essa técnica nem sempre é abordada devido aos modelos, muitas vezes, possuírem não convexidades e, conseqüentemente, necessitarem de técnicas de otimização global, as quais demandam elevados esforços computacionais. Portanto, diversos modelos com simplificações nas superestruturas foram criados. 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.

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 segundo FURNAN e SANHINIDIS (2002). Isso se deu, principalmente, devido aos avanços obtidos pelos algoritmos de otimização matemática aliados ao rápido desenvolvimento de computadores que viabilizaram a solução da síntese via técnicas simultâneas. Além disso, mais recentemente, é possível verificar que o número de publicações continua grande, mostrando uma crescente diversidade de modelos e técnicas de resolução para o problema.

FLOUDAS *et al.* (1986) apresentaram um algoritmo para a síntese automática de configurações ótimas de redes de trocadores de calor. Tais configurações são caracterizadas pelo custo mínimo de investimento, relacionado à área de troca térmica, sujeito ao custo mínimo de utilidades. Uma superestrutura composta por várias configurações possíveis para uma determinada rede foi proposta e a esta superestrutura foi aplicada uma formulação de programação não linear, a qual resulta em configurações otimizadas de rede.

No trabalho de FLOUDAS *et al.* (1986), a média logarítmica de temperatura (LMTD) é substituída pela aproximação de PATERSON (1984) com o objetivo de evitar dificuldades numéricas. É importante ressaltar que este modelo contém não convexidades, portanto há a possibilidade da existência de diversos ótimos locais. Torna-se necessária, então, a utilização de algoritmos de otimização global para a determinação do ótimo. Isso foi realizado por FLOUDAS e CIRIC (1989), que desenvolveram uma formulação MINLP onde os três problemas, LP, MILP e NLP são levados em conta e resolvidos simultaneamente.

Com objetivo de simplificar a superestrutura do problema MINLP de rede de trocadores de calor YEE e GROSSMANN (1990) formularam o problema da síntese com duas simplificações na superestrutura da rede de trocadores de calor. A primeira se trata da formulação de uma superestrutura simplificada baseada em estágios e a segunda é a consideração de mistura isotérmica nas correntes com divisão. A Figura

2.2 apresenta uma superestrutura baseada em dois estágios para duas correntes quentes e duas correntes frias.

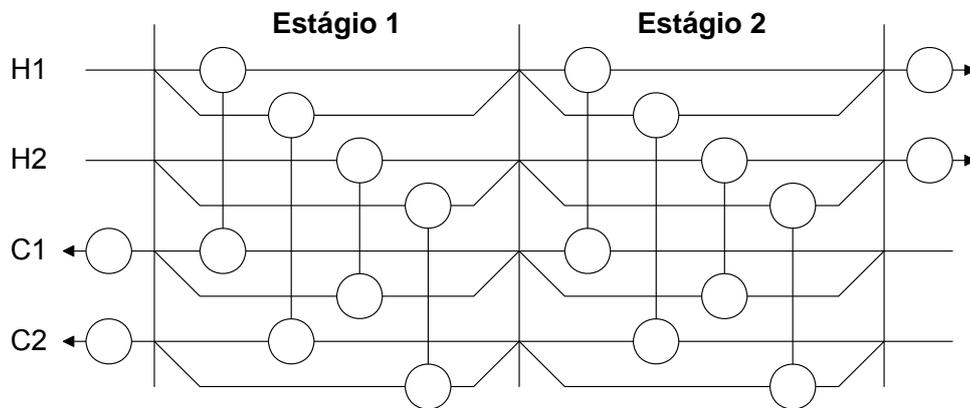


Figura 2.2 – Superestrutura em estágios para problema com duas correntes de processo quentes e duas correntes frias

ZAMORA e GROSSMANN (1998) propuseram uma formulação MINLP baseada na proposta de superestrutura de YEE e GROSSMANN (1990) em que um algoritmo faz uso de aproximações convexas de forma a determinar uma topologia de rede com otimalidade global. As principais simplificações impostas ao problema são a linearização da relação entre o custo dos trocadores e as respectivas áreas de troca térmica, a utilização da média aritmética de temperaturas para o cálculo das áreas e a não possibilidade de divisões de correntes. É importante ressaltar que o uso da média aritmética de temperaturas para o cálculo das áreas pode levar a erros consideráveis nos cálculos das áreas dos trocadores de calor.

FURNAN e SAHINIDIS (2001) apresentaram uma análise de complexidade computacional do problema de síntese de redes de trocadores de calor para modelos determinísticos de programação matemática da literatura. O trabalho demonstra que mesmo modelos de otimização simples, ou de otimização simultânea simplificados como o de YEE e GROSSMANN (1990), implicam na existência de algoritmos eficientes. A principal consequência deste resultado é que os problemas de otimização

matemática geralmente utilizados para a síntese de redes de trocadores de calor têm um aumento explosivo do seu tempo de resolução computacional com o aumento do tamanho dos problemas.

MIZUTANI (2003) e MIZUTANI *et al.* (2003) observaram que poucos trabalhos na literatura levavam em consideração a realização de um projeto detalhado dos trocadores de calor, o que resultaria na obtenção de coeficientes de transferência de calor mais próximos da realidade. Além disso, incluiu a possibilidade de estimar a perda de carga nos equipamentos, incluindo os custos de bombeamento na função objetivo. Ele propôs uma modelagem matemática simultânea para a solução do problema de síntese de redes com a inclusão do projeto detalhado dos equipamentos de troca térmica.

Analisando-se os métodos de otimização para solução dos modelos de síntese de redes de trocadores de calor, encontra-se o trabalho de DOLAN *et al.* (1990), um dos primeiros usando métodos de otimização não convencionais. Esses autores utilizaram o método de otimização recozimento simulado combinado à programação orientada a objeto para a otimização de redes de trocadores de calor. Este método combinatorial de otimização é baseado na teoria matemática das cadeias de Markov. A modelagem do problema divide a rede em duas categorias, representando as correntes do processo (ponteiros) e as unidades de troca térmica (nós). Partindo-se de uma configuração de rede inicial, faz-se uma alteração aleatória, gerando uma variação do custo. Avalia-se a variação de custo de acordo com a distribuição de Boltzmann para a aceitação ou descarte da alteração realizada.

NIELSEN *et al.* (1996) realizaram um trabalho similar ao apresentado por DOLAN *et al.* (1990). A metodologia empregada inclui a modelagem detalhada dos trocadores de calor, capacidades caloríficas e coeficientes de troca térmica variáveis, além de considerações de queda de pressão e flexibilidade. Cada elemento da rede é descrito por seu comportamento funcional. Esta descrição conceitual gera um conjunto

de elementos genéricos que compõem as funções gerais da rede. Para a solução do problema de síntese resultante empregou-se, da mesma forma que DOLAN *et al.* (1990), o método do recozimento simulado combinado com a programação orientada a objeto, permitindo a solução de problemas de alta complexidade.

CHAKRABORTY e GHOSH (1999) aplicaram técnicas de randomização para a solução do problema de síntese de redes de trocadores de calor. Este modelo gerava um número suficientemente grande de redes, dentre as quais se escolhia a que melhor se ajustasse aos parâmetros de projeto previamente determinados. Utilizaram um algoritmo de busca aleatória para a síntese de redes sem divisão de correntes. Os autores ressaltam que a metodologia apresentada pode ser útil na geração de estimativas iniciais de métodos MINLP, que necessitam de boas estimativas iniciais para o seu melhor desempenho.

YU *et al.* (2000) desenvolveram um algoritmo de cálculo para a síntese de redes onde são combinados os métodos via algoritmo genético (GA) e recozimento simulado (SA). O algoritmo proposto produz uma pseudopopulação via SA, em paralelo a uma outra pseudopopulação via GA. A superestrutura utilizada não aceita divisão de correntes para evitar a explosão combinatória do espaço de soluções.

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 KIM *et al.* (2009), SALAMA (2008,b), DIPAMA *et al.* (2008), PONCE-ORTEGA *et al.* (2008).

2.3 Referências

BOLAND, D.; LINNHOFF, B., 1979, "The Preliminary Design Of Networks For Heat Exchange By Systematic Methods". *Chem. Eng.*, April, pp 222.

CHAKRABORTY, S. and GHOSH, P., 1998, "Heat Exchanger Network Synthesis: the Possibility of Randomization", *Chemical Engineering Journal*, v. 72, pp. 209 – 216.

DIPAMA, J., Teyssedou, A. e Sorin, M., 2008, "Synthesis of heat exchanger networks using genetic algorithms", *Applied Thermal Engineering*, n. 28, 1763–1773.

DOLAN, W. B., CUMMINGS, P. T. and LE VAN, M. D., 1990, "Algorithmic Efficiency of Simulated Annealing for Heat Exchanger Network Design", *Computers & Chemical Engineering*, v. 14, n. 10, pp. 1039-1050.

FLOUDAS, C. A. and GROSSMANN, I. E., 1987, "Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks with Uncertain Flowrates and Temperatures", *Computers & Chemical Engineering*, v. 11, n. 4, pp. 319-336.

FLOUDAS, C. A., 1995, "Nonlinear and Mixed-Integer Optimization – Fundamentals and Applications", *Oxford University Press*.

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.

FLOUDAS, C. A., CIRIC, A. R., 1989, "Strategies for Overcoming Uncertainties in Heat Exchanger Network Synthesis", *Comp. Chem. Engng.*, 13(10): 1133-1152.

FURMAN, K. C., SAHINIDIS, N.V., 2001, "Computational Complexity of Heat Exchanger Network Synthesis", *Comput. Chem. Eng.*, n. 25, pp. 1371-1390.

FURMAN, K.C., SAHINIDIS, N.V., 2002, "A Critical Review and Annotated Bibliography

for Heat Exchanger Network Synthesis in the 20th Century”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41, 2335-2370.

GUNDERSEN, T., NAESS, L., 1988, “The Synthesis of Cost Optimal Heat Exchanger Networks”, *Comp. Chem. Eng.*, 20, S97-S102.

HOHMANN, E. C., 1971, *Optimum Networks of Heat Exchange*, Ph.D. Thesis, Univ. of Southern California.

HWA, C. S., 1965, “Mathematical Formulation and Optimization of Heat Exchanger Networks Using Separable Programming”, *AIChE-I Chem E Symp. Ser 4*, pp. 101-106.

KESLER, M. S. e PARKER, R. O., 1969, “Optimal Networks of Heat Exchanger”, *Chem. Eng. Progr. Symp. Ser. 65*, pp. 111-120.

KIM, J., KIM, J., KIM, J., YOO, C. e MOONA, I., 2009, “A simultaneous optimization approach for the design of wastewater and heat exchange networks based on cost estimation”, *Journal of Cleaner Production*, n. 17, 162–171.

LAKSHMANAN, R. e FRAGA, E. S., 2002, “Pinch Location And Minimum Temperature Approach For Discontinuous Composite Curves”. *Computers and Chemical Engineering*, v. 26, pp. 779 – 783.

LEWIN, D. R., “A Generalized Method For HEN Synthesis Using Stochastic Optimization - II. The Synthesis Of Cost-Optimal Networks”. *Computers and Chemical Engineering*, v. 22, pp. 1387 - 1405, 1998.

LEWIN, D. R.; WANG, H. e SHALEV, O., 1998, “A Generalized Method For HEN Synthesis Using Stochastic Optimization - I. General Framework And MER Optimal Synthesis”. *Computers and Chemical Engineering*, v. 22, pp. 1503 - 1513.

LINNHOFF, B. and HINDMARSH, E., 1983, “The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks”, *Computers & Chemical Engineering*, v.38, n. 5, pp. 745-763.

LINNHOFF, B., 1993, “Pinch Analysis: A state-of-art Overview”. *Transactions of the*

IChemE, v. 71, Part A, pp. 503 – 522.

LINNHOFF, B., 1994, "Use Pinch Analysis To Knock Down Capital Cost And Emissions". *Chemical Engineering Progress*, p. 32 – 57, Aug.

LINNHOFF, B., and FLOWER, J. R., 1978, "Synthesis of Heat Exchanger Networks, Part I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks", *AIChE Journal*, v. 24, n. 633.

LIPORACE, F. S., 1996, *Síntese de Redes de Trocadores de Calor Afastadas do Ponto de Estrangulamento Energético*, Tese de Mestrado, Rio de Janeiro, EQ/UFRJ.

LONA, L. M. F.; FERNANDES, F. A. N.; ROQUE, M. C. *et al.*, 2000, "Developing Educational Software for Heat Exchangers and Heat Exchanger Networks Projects", *Computers and Chemical Engineering*, v. 24, pp. 1247 – 1251.

MIZUTANI, F. T., 2003, *Síntese de Redes de Trocadores de Calor com o Projeto Detalhado das Unidades Via Programação Matemática*, Tese de D.Sc., Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIZUTANI, F. T., PESSOA, F. L. P., QUEIROZ, E. M., HAUAN, S., GROSSMANN, I. E., 2003, "Mathematical Programming Model for Heat Exchanger Network Synthesis Including Detailed Heat Exchanger Designs. 1. Shell-and-Tube Heat Exchanger Design", *In. Eng. Chem. Res.*, n. 42, pp. 4009-4018.

NIELSEN, J. S., HANSEN, M. W., JOERGENSEN, S., 1996, "Heat Exchanger Network Modeling Framework for Optimal Design and Retrofitting", *Computers & Chemical Engineering*, v. 20, Suppl., pp. S249 - S254.

PATERSON, W.R., 1984, "A Replacement for the Logarithmic Mean", *Chem. Eng. Sci.*, 39, 1635.

PONCE-ORTEGA, J. M., JIMENEZ-GUTIERREZ, A. E GROSSMANN, I. E., 2008, "Optimal synthesis of heat exchanger networks involving isothermal process streams",

Computers and Chemical Engineering, n. 32, 1918–1942.

PONTON, J. W., DONALDSON, R. A. B., 1974, “A Fast Method for the Synthesis of Optimal Heat Exchanger Networks”, *Chemical Engineering Science*, 29, 2375-2377.

RASKOVIC, P. e STOILJKOVIC, S., 2008, “Pinch design method in the case of a limited number of process streams”, *Energy*, in press.

RAVAGNANI, M. A. S. S., 1994, *Projeto e Otimização de Redes de Trocadores de Calor*, Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

RAVAGNANI, M. A. S. S., SILVA, A. P. e ANDRADE, A. L., 2003, “Detailed Equipment Design in Heat Exchanger Networks Synthesis and Optimization”. *Applied Thermal Analysis*, v. 23, pp. 141 – 151.

RAVAGNANI, M. A. S. S., SILVA, A. P., ARROYO, P. A., *et al.*, 2005, “Heat Exchanger Network Synthesis And Optimization Using Genetic Algorithm”. *Applied Thermal Engineering*, v. 25, pp. 1003-1017.

SABOO, A. K., Morari, M. and Colberg, R. D., 1986-a, “RESHEX: an Interactive Software Package for the Synthesis of Resilient Heat-Exchanger Networks – I: Program Description and Application”, *Computers and Chemical Engineering*, v.10, n. 6, pp. 577-589.

SABOO, A. K., Morari, M. and Colberg, R. D., 1986-b, “RESHEX: an Interactive Software Package for the Synthesis and Analysis of Resilient Heat-Exchanger Networks – II: Discussion of Area Targeting and Network Synthesis Algorithms”, *Computers and Chemical Engineering*, v.10, n. 6, pp. 591-599.

SALAMA, A., 2008a, “Numerical construction of HEN composite curves and their attributes”, *Computers and Chemical Engineering*, in press.

SALAMA, A., 2008b, ” Heat exchanger network synthesis based on minimum rule

variations”, *Applied Thermal Engineering*, n. 28, 1234–1249.

SILVA, A. P., 2003, *Síntese de Redes de Trocadores de Calor Utilizando Algoritmos Genéticos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.

SILVA, A. P., BISCAIA JR, E. C., RAVAGNANI, M. A. S. S., 2005, “Heuristic Optimization Of Heat Exchangers Networks”, In: *4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering*, Rio de Janeiro – Brasil, em CD-ROM.

TJOE, T. N. e LINNHOFF, B., 1986, “Using Pinch Technology for Process Retrofit”. *Chemical Engineering*, v. 93, pp. 47 - 60.

VALLECILLO, A. L., 1989, *Síntese de Redes de Trocadores de Calor*. Tese de M.Sc., ITA, São José dos Campos, SP, Brasil.

YEE, T. F. e GROSSMANN, I. E., 1990, “Simultaneous Optimization Models for Heat Integration – II Heat Exchanger Network Synthesis”, *Comp. Chem. Eng.*, 14(10): 1165-1184.

YU, H., FANG, H., YAO, P. e YUAN, Y., 2000, “A Combined Genetic Algorithm/ Simulated Annealing Algorithm for Large Scale System Energy Integration”, *Comp. Chem. Engng.*, 24, p. 2023-2035.

ZAMORA, J. M., GROSSMANN, I. E., 1998, “A Global MINLP Optimization Algorithm for the Synthesis of Heat Exchanger Networks with no Stream Splits”, *Comp. Chem. Engng.*, Vol.22, No. 3, pp. 367-384.

3. OTIMIZAÇÃO E MÉTODO DO ENXAME DE PARTÍCULAS

3.1 Introdução

Reduzir custos, melhorar a qualidade de um produto, minimizar riscos ambientais, são algumas das motivações para o desenvolvimento de ferramentas de otimização para os problemas complexos que envolvem o projeto e a operação de plantas industriais. Vários fatores têm contribuído para esse desenvolvimento, e um dos principais é a disponibilidade, cada vez maior, de computadores e sua crescente capacidade de cálculos, que facilitam a aplicação de complexos modelos matemáticos.

Em uma definição simples, VIEIRA e BISCAIA (2002) afirmam que um método de otimização consiste em encontrar a melhor solução (o valor ótimo) 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 primeiro é o espaço de busca, no qual são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema. O outro é 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. Este número permite medir a qualidade de uma resposta: no problema de minimização, quanto menor o valor da função objetivo, melhor a resposta. No problema de maximização, o inverso ocorre.

De forma geral, um problema de otimização pode ser descrito como apresentado na Equação 3.1.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar : } & f(x,y) \\ \text{sujeito a : } & g(x,y) \leq 0 \\ & h(x,y) = 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Na equação, $f(x,y)$ é a função objetivo a ser otimizada e que está sujeita a restrições de desigualdade e igualdade, tanto de variáveis contínuas (x), como de variáveis discretas (y).

A questão fundamental está no fato de que nem sempre o "ótimo" é encontrado facilmente, num único cálculo. 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.

É possível encontrar na literatura um número muito grande de métodos para resolver os problemas de otimização. Segundo PRADO e SARAMAGO (2005), as técnicas determinísticas de otimização são conhecidas há bem mais de um século. Essas técnicas são confiáveis e possuem alta precisão dos valores obtidos. Porém, as mesmas podem apresentar algumas dificuldades numéricas e problemas de robustez relacionados com a falta de continuidade das funções a serem otimizadas ou de suas restrições. Outras restrições na aplicação das técnicas determinísticas estão nas funções não convexas, existência de mínimos ou máximos locais, desconhecimento de uma boa estimativa inicial dos parâmetros, entre outros.

Os métodos determinísticos possuem, como grande vantagem, o baixo número de avaliações da função objetivo, o que faz com que tenham convergência rápida. Contudo, estes métodos têm uma dificuldade para "escapar" de mínimos locais. Como estes métodos utilizam um único ponto do espaço de busca e informações sobre os gradientes, ao se depararem com mínimos locais os mesmos não conseguem avançar na busca, convergindo prematuramente, sem encontrar o ótimo global.

Dessa forma, a solução de problemas de elevado nível de complexidade computacional tem sido um desafio constante para os pesquisadores. Problemas altamente combinatoriais, cuja solução ótima, em muitos casos, ainda está limitada somente a pequenas instâncias, são freqüentemente encontrados. O problema das desvantagens e da falta de flexibilidade dos métodos determinísticos foi um pouco reduzido a partir do momento em que se passou a associar técnicas de otimização com ferramentas de Inteligência Artificial, mais especificamente, com as ferramentas de busca heurística.

De acordo com SCHWEFEL e TAYLOR (1994), os estudos de métodos heurísticos, com busca aleatória controlada por critérios probabilísticos, aparecem como uma forte tendência nos últimos anos. Isto se dá, principalmente, devido ao avanço dos recursos computacionais, pois um fator limitante destes métodos é a necessidade de um número elevado de avaliações da função objetivo e das restrições.

Há duas áreas que dependem fortemente de técnicas de otimização heurística: a *Otimização Global*, que consiste em encontrar um valor da variável x que minimize a função $f(x)$ para todos os possíveis valores de x ; e a *Otimização Combinatorial*, na qual o espaço das soluções é discreto, podendo ser finito ou apenas enumerável.

Ainda de acordo com VIEIRA e BISCAIA (2002), um método heurístico de otimização pode ser estocástico ou determinístico, a depender se empregará ou não números sorteados aleatoriamente para executar seu algoritmo. Um método é denominado *determinístico* se for possível prever todos os seus passos conhecendo seu ponto de partida. Em outras palavras, um método determinístico sempre leva à mesma resposta se partir do mesmo ponto inicial. Em oposição a estes métodos, existem os chamados métodos *Estocásticos* ou *Aleatórios*. Nestes métodos, várias escolhas são feitas com base em números aleatórios, sorteados no momento da execução do código. Como a cada execução do código os números sorteados serão diferentes, um método aleatório não executará a mesma sequência de operações em

duas execuções sucessivas. Partindo de um mesmo ponto inicial, cada execução do código seguirá o seu próprio caminho e, possivelmente, levará a uma resposta final diferente.

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, robustez e não requerem continuidade na definição do problema.

A desvantagem dos Métodos de Otimização Natural é o elevado número de avaliações da função objetivo, fator que muitas vezes torna o método inviável. Porém, na década de 1980, com o crescimento do uso de computadores, tornou-se viável empregar estes algoritmos para a otimização de funções e processos, quando métodos mais tradicionais não tinham sucesso: problemas de otimização combinatória ou problemas com vários mínimos/máximos locais.

Vários métodos de otimização surgiram motivados por estes algoritmos, como Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*), o Método de Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*), as técnicas de Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*), Algoritmos Genéticos. O método escolhido para ser usado neste trabalho foi o método do enxame de partículas.

De acordo com KENNEDY e ELBERHART (2001), o Método de Enxame de Partículas explora a analogia com o comportamento social de animais, como enxames, cardumes ou bandos de pássaros. Nestes, cada indivíduo do grupo toma suas próprias decisões, mas sempre se baseando, de alguma forma, na experiência do líder do grupo. Matematicamente, cada indivíduo do bando é considerado um ponto

do espaço de busca. A velocidade deste indivíduo é a direção de busca a ser usada neste ponto candidato à solução. 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).

A seguir são apresentadas as características de implementação desse algoritmo.

3.2 O Método do Enxame de Partículas

O método do enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization*, muito conhecido por PSO) foi introduzido por KENNEDY e ELBERHART (1995) e emergiu de experiências com algoritmos que implementam uma metáfora do “comportamento social” observado em muitas espécies de animais.

Conforme MEDEIROS (2005), essa metáfora foi desenvolvida a partir da observação de bandos de pássaros e cardumes em busca de alimento em uma determinada região. Ao observar o comportamento desses grupos, verifica-se que o comportamento do grupo é influenciado pela experiência individual acumulada por cada indivíduo, bem como pela experiência acumulada pelo grupo.

O método do enxame de partículas, em particular, se destaca por sua simplicidade, eficiência e robustez. Uma característica interessante deste método é marcada por uma busca de caráter global no início do procedimento que, ao longo das iterações, torna-se local, quando ocorre a convergência final das partículas. Assim, no início é realizada uma busca global, permitindo a localização de possíveis ótimos globais; em seguida, o caráter local da busca permite aumentar a precisão do valor obtido. Esta característica, além de aumentar a probabilidade de encontrar o ótimo global, garante uma boa precisão do valor obtido e uma boa exploração da região próxima ao ótimo, possibilitando uma boa representação da região de confiança dos

parâmetros por meio da utilização das avaliações da função objetivo realizadas pelo método durante a minimização.

O termo *partícula* é usado para se referir a cada um dos indivíduos do grupo, já 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. A Figura 3.1 representa um esboço do algoritmo.

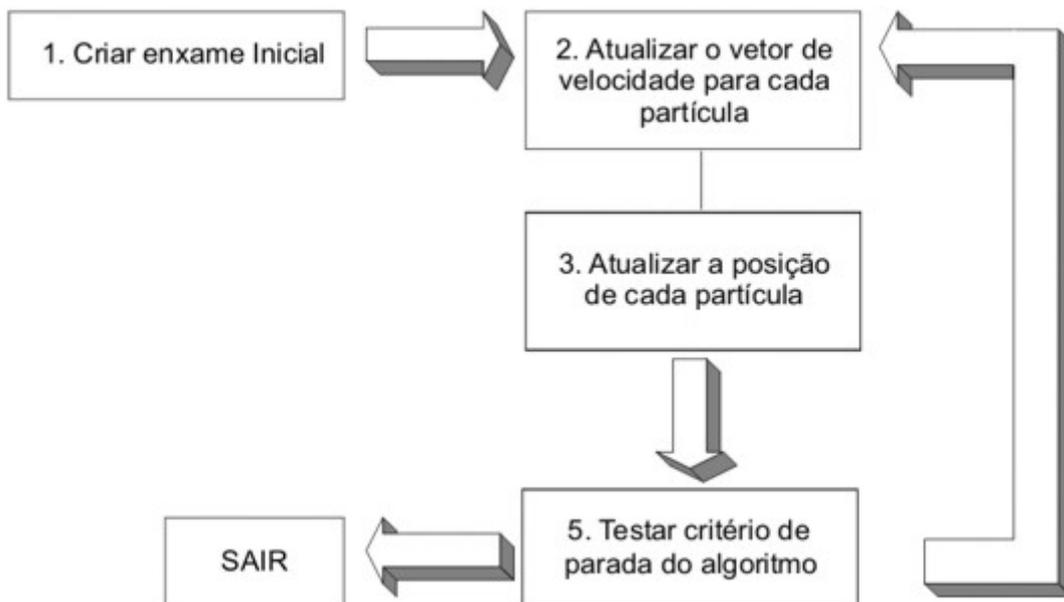


Figura 3.1 – Fluxograma para o método do enxame de partículas

Neste trabalho foi utilizado o método do enxame de partículas seguindo a metodologia proposta por VIEIRA e BISCAIA (2002). Esta metodologia modifica a proposta inicial de KENNEDY e ELBERHART (1995) inserindo o peso de inércia (SHI e EBERHART, 1998). A velocidade que define a direção do movimento das partículas é atualizada em cada iteração por meio da Equação 3.2 e as partículas por meio da Equação 3.3.

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c1 \cdot r_1 \cdot (p_i^k - x_i^k) + c2 \cdot r_2 \cdot (p_{global}^k - x_i^k) \quad (3.2)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3.3)$$

Os principais parâmetros para o método são as ponderações entre as experiências individual e coletiva ($c1$ e $c2$) e o fator de inércia w . O peso de inércia w 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 do peso de inércia w fornece, então, um equilíbrio entre capacidade de exploração global e local.

Nessas equações, x_i e v_i são, respectivamente, vetores da posição e velocidade da partícula i , w é o peso de inércia, $c1$ e $c2$ 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.

3.2.1 Algoritmo Básico para o Método do Enxame de Partículas

Um algoritmo básico para o método do enxame de partículas seguindo a metodologia proposta por VIEIRA e BISCAIA (2002) é apresentado nos seguintes passos:

- i) Entrada de Dados

- Critério de parada
 - Número de partículas na população (Npt)
 - c_1 , c_2 e ω
 - Valores máximo e mínimo das variáveis
- ii) Geração inicial aleatória das partículas
 - iii) Cálculo da função objetivo com as variáveis geradas no passo anterior
 - iv) Teste das restrições, se houver. Caso alguma restrição seja desrespeitada, penalizar a função objetivo.
 - v) Início do método do enxame de partículas
Atualizar as variáveis das partículas com as Equações 3.2 e 3.3.
 - vi) Recalcular a função objetivo e testar as restrições para os valores atualizados das variáveis (passo iii e iv) e verificar qual das partículas possui o valor ótimo atual
 - vii) Repetir o passo vi até o critério de parada ser satisfeito (número de iterações).

3.3 Implementação do Método do Enxame de Partículas

Em todas as etapas do presente trabalho, a metodologia empregada na resolução dos problemas de otimização foi a mesma. Primeiramente estabeleceu-se um critério de parada para o algoritmo. Em seguida, foram definidos os parâmetros de otimização w , c_1 e c_2 e Npt. Além disso, foi necessário fixar uma penalização para a função objetivo das partículas que tinham suas restrições não satisfeitas.

Para estabelecer um critério de parada, a seguinte metodologia foi adotada para cada caso estudado:

- i) Resolver o problema com vários conjuntos de parâmetros de otimização, utilizando como critério de parada inicial o valor de 5000 iterações
- ii) Definir como “valor ótimo” do problema o menor valor encontrado no passo (i)
- iii) Definir como critério de parada definitivo o encerramento da execução no momento em que o valor da função objetivo atingir um valor igual ou menor que o valor ótimo, valor este considerado como sucesso de busca.

Com o critério de parada estabelecido, passou-se então para a definição dos parâmetros de otimização w , c_1 e c_2 e N_{pt} . Um total de 10 conjuntos de parâmetros foram testados, empregando a metodologia baseada em SCHWAAB (2005). Cada vez que se utiliza o método do enxame de partículas em um novo problema, os valores mais adequados para o conjunto de parâmetros w , c_1 e c_2 e N_{pt} pode mudar. Desta forma, esta avaliação foi refeita para todos os modelos apresentados nos capítulos seguintes.

- i) Resolver o problema, um total de 50 vezes, para cada conjunto de parâmetros
- ii) Determinar os itens:
 - a. PS – percentual de sucesso, percentual de vezes que as corridas atingem o valor ótimo
 - b. Iter – média aritmética do número de iterações das corridas que obtiveram sucesso

- c. NF – número esperado de avaliações da função objetivo, calculado pela Equação 3.4, proposta por TRELEA (2003)
- iii) Definir como conjunto de parâmetros definitivo aquele que apresentar um menor valor de NF, que está diretamente ligado ao tempo computacional e ao desempenho do algoritmo

$$NF = \frac{N_{pt} \cdot Iter}{PS} \quad (3.4)$$

Dessa forma, é possível definir dois termos que serão empregados com frequência nos capítulos seguintes. O *valor ótimo* é o menor valor encontrado para o problema estudado na definição do critério de parada. A *taxa de sucesso* foi definida como sendo a porcentagem de vezes que o algoritmo atinge o ótimo em 100 execuções, após definido o melhor conjunto de parâmetros para o caso.

Ainda se faz necessário fixar uma penalização da função objetivo para o caso das partículas que têm alguma restrição não respeitada. Neste trabalho, a penalização foi feita somando-se à função objetivo o valor de 10^6 , o que faz com que a partícula em questão assuma um valor muito maior do que o valor das partículas que não tiveram as restrições desrespeitadas.

3.4 Referências

- KENNEDY, J.; EBERHART, R., 2001, *Swarm Intelligence*. London, Academic Press.
- KENNEDY, J., EBERHART, R., 1995, "Particle Swarm Optimization". In: *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, Perth, Australia.
- MEDEIROS, J. A. C. C., 2005, *Enxame de Partículas como Ferramenta de Otimização em Problemas Complexos de Engenharia Nuclear*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio

de Janeiro, RJ, Brasil.

PRADO, J. R., SARAMAGO, S. F. P., 2005, "Otimização Por Colônia De Partículas", *FAMAT em Revista*, v. 4, pp. 87-103.

SCHWAAB, M., 2005, *Avaliação de Algoritmos Heurísticos de Otimização em Problema de Estimação de Parâmetros*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SCHWEFEL, H. P. e TAYLOR, L., 1994, *Evolution and Optimum Seeking*, John Wiley & Sons Inc., United States of America, pp. 87-88.

SHI, Y., EBERHART, R., 1998, "A Modified Particle Swarm Optimizer". In: *Proc. Conference on Evolutionary Computation*, pp. 69-73, Anchorage, Alaska.

TRELEA, I. C., 2003, "The Particle Swarm Optimization Algorithm: Convergence Analysis and Parameter Selection", *Information Processing Letters*, v. 85, pp. 317-325.

VIEIRA, R. C. e BISCAIA JR., E. C., 2002, *Métodos Heurísticos de Otimização*. Notas de aula da Escola Piloto Virtual do PEQ/COPPE/UFRJ, Disponível sob consulta: biscaia@peq.coppe.ufrj.br.

4. PROJETO DE TROCADORES DE CALOR

4.1 Introdução

A transferência de calor entre fluidos de processo é uma parte essencial da maior parte dos processos químicos. Devido às suas características de fabricação e flexibilidade de adaptação a diferentes condições de operação, os trocadores de calor do tipo casco-tubo são os equipamentos de transferência de calor mais usados nos processos industriais. Eles são também facilmente adaptáveis às condições operacionais. Desta forma, o projeto de trocadores de calor casco-tubo é um assunto importante dentro dos processos industriais. Entretanto, algumas dificuldades são encontradas no projeto desse tipo de trocador de calor, especialmente por causa da grande e complexa quantidade de características envolvidas, inerente às características de transferência de calor ou de queda de pressão.

Como mostrado em TABOREK (1983), alguns métodos foram propostos na literatura para se calcular a área de troca térmica, os coeficientes de troca térmica individuais e global, bem como a queda de pressão para os lados do casco e dos tubos. KERN (1950) publicou o primeiro e mais conhecido método de projeto termo-hidráulico de trocadores de calor. O método de Kern permite projetar um trocador de calor ou simplesmente verificar um trocador existente com respeito à queda de pressão e fator de incrustação. Para o lado do casco, as correlações propostas são baseadas em diâmetro equivalente. Apesar de alguns parâmetros serem superestimados, até hoje este é um dos métodos mais usados para projeto de trocadores de calor do tipo casco-tubo.

Além das correlações de KERN (1950) para o lado do casco, outras correlações disponíveis para o cálculo de coeficientes de transferência no lado do casco são aquelas apresentadas pelo método de Bell-Delaware. Esse método é

baseado em detalhes mecânicos do lado do casco e apresenta resultados mais realistas para o coeficiente de transferência de calor e queda de pressão do lado do casco.

Segundo TABOREK (1983), o método de Bell-Delaware é o método disponível que fornece as correlações mais apropriadas para o projeto detalhado de trocadores casco-tubo e o mais adequado para aplicações de engenharia. Detalhes do método de Bell-Delaware podem ser encontrados, passo a passo, em KAKAÇ *et al.* (1981) ou em PERRY (1999). TABOREK (1983) atualizou o método de Bell-Delaware apresentando correlações para o cálculo de coeficientes que, originalmente, eram lidos graficamente. SAUNDERS (1988) desenvolveu tabelas com coeficientes de projeto baseados em cálculos com as correlações de TABOREK (1983), de forma que estes coeficientes são utilizados em um método proposto para o projeto rápido, fixando-se um conjunto de parâmetros geométricos.

Poucos trabalhos são encontrados na literatura apresentando o projeto de trocadores de calor incluindo o cálculos dos coeficientes de transferência de calor durante a síntese da rede de trocadores de calor. Os primeiros trabalhos a considerarem essa situação foram JEGEDE e POLLEY (1992), POLLEY e PANJEH SHAHI (1991), POLLEY *et al.* (1990), entre outros. Em POLLEY *et al.* (1990), os autores desenvolveram um conjunto de correlações entre o diferencial de pressão, a área de transferência de calor e o coeficiente de transferência de calor para trocadores de calor casco-tubo. Estas correlações são baseadas na conhecida correlação de Dittus & Boelter (escoamento turbulento em tubos) para o lado dos tubos e na correlação de KERN (1950) para o lado do casco. Essas correlações tornaram possível o cálculo direto dos principais parâmetros geométricos de um trocador de calor após a especificação do diâmetro dos tubos, do número de passos nos tubos e do arranjo da matriz tubular. Portanto, o método tradicional de simulações sucessivas para o projeto de trocadores de calor era evitado. A utilização da correlação de KERN

(1950) por POLLEY *et al.* (1990) e outros autores é o principal ponto de crítica desta metodologia, pois a mesma, na média, apresenta um erro significativo na previsão do coeficiente de transferência de calor e, principalmente, na queda de pressão.

PODDAR e POLLEY (1996) apresentaram uma técnica gráfica que identifica o espaço geométrico de projetos viáveis. Desta forma, o esforço computacional para o projeto poderia ser reduzido. MURALIKRISHNA e SHENOY (2000) estenderam o trabalho de PODDAR e POLLEY (1996) e introduziram metas para o mínimo de área e custo de projeto de trocadores de calor. Porém, os trabalhos de PODDAR e POLLEY (1996), assim como MURALIKRISHNA e SHENOY (2000), também foram baseados nas correlações de KERN (1950).

SAFFAR-AVVAL e DAMANGIR (1995) desenvolveram correlações para a determinação do espaçamento ótimo entre chicanas para diversos tipos de trocadores de calor casco-tubo. Estas correlações foram desenvolvidas com base em diversas simulações pelo método desenvolvido por TABOREK (1983).

Em 1994 surgiu um dos primeiros e poucos trabalhos que englobam a síntese de redes de trocadores de calor incorporando o dimensionamento termo-hidráulico dos equipamentos utilizando o método de Bell-Delaware. RAVAGNANI (1994) desenvolveu um programa computacional no qual a síntese da rede é feita utilizando-se conceitos da *Análise Pinch*. Após a evolução da rede, os trocadores de calor são dimensionados, considerando-se as perdas de carga e os fatores de incrustação permitidos. Os coeficientes de transferência de calor individual e global são calculados baseados nos padrões especificados pelo TEMA (*Tubular Exchanger Manufactures Association*, 1988), começando com o menor trocador de calor com o maior número de passos nos tubos, para explorar todo o limite de queda de pressão e incrustação fixados no início do projeto. Se a queda de pressão ou o fator de incrustação não for satisfeito, um novo trocador de calor é testado, com o menor número de passos nos

tubos ou o diâmetro dos cascos maior. Baseado no método da tentativa e erro, o trocador de calor com menor área possível é obtido.

Alguns anos depois, LONA *et al.* (2000) desenvolveram um programa computacional didático, com interface amigável, na mesma linha do trabalho de RAVAGNANI (1994). A rede de trocadores de calor é desenvolvida por meio da Análise *Pinch* e, posteriormente, os trocadores de calor são dimensionados. O objetivo foi disponibilizar o programa computacional para estudantes de graduação em engenharia química, permitindo o teste de várias configurações em um tempo reduzido.

No início dessa década, três trabalhos abordando o projeto dos equipamentos de troca térmica na síntese de redes de trocadores de calor foram publicados. Em RAVAGNANI *et al.* (2003), um exemplo industrial demonstra a aplicabilidade da metodologia desenvolvida em RAVAGNANI (1994), além de incluir a evolução da rede de trocadores de calor pela identificação e quebra dos laços de troca térmica.

FRAUSTO-HERNÁNDEZ *et al.* (2003) utilizaram modelos de programação MINLP para desenvolver uma tecnologia para síntese de redes de trocadores de calor incorporando o dimensionamento detalhado dos equipamentos. Diferentemente de outros trabalhos nesta linha, este leva em conta aspectos da perda de carga das correntes e ainda considera que os coeficientes de transferência de calor não são constantes com a temperatura.

Um modelo baseado em programação disjunta generalizada, otimizado com o uso de MINLP, foi apresentado por MIZUTANI *et al.* (2003). Diferentemente dos trabalhos de RAVAGNANI *et al.* (2003) e FRAUSTO-HERNÁNDEZ *et al.* (2003), neste trabalho uma relação de custo e benefício entre os custos de investimento e operacionais é levada em consideração durante o projeto da unidade de troca. O modelo segue os padrões TEMA (1988), mas algumas características como número

de tubos e diâmetro do feixe de tubos, que são calculadas e otimizadas, podem não estar de acordo com os padrões.

Em RAVAGNANI e CABALLERO (2007 a), o método de Bell-Delaware é usado para formular um modelo matemático envolvendo variáveis contínuas e discretas para seleção de uma configuração ótima de um trocador do tipo casco-tubo. Da mesma forma que em MIZUTANI *et al.* (2003), o modelo é baseado na programação disjuntiva generalizada e é otimizado com uma formulação MINLP. Uma tabela, similar à usada em RAVAGNANI *et al.* (2003), é proposta. Seguindo o padrão TEMA, é possível encontrar o diâmetro do casco, o diâmetro do feixe de tubos, o diâmetro externo dos tubos, o *pitch*, o arranjo dos tubos, o número de passos nos tubos e o número de tubos. A função objetivo pode ser considerada como a minimização dos custos de área e bombeamento ou somente a minimização da área. Esta formulação foi incorporada ao método para síntese de redes de trocadores de calor mostrado em RAVAGNANI e CABALLERO (2007b).

Nos trabalhos citados anteriormente que abordam o projeto detalhado de trocadores de calor em conjunto ou não com a síntese da rede de trocadores de calor, é possível observar basicamente dois métodos diferentes para resolver o problema. FRAUSTO-HERNÁNDEZ *et al.* (2003), MIZUTANI *et al.* (2003) e RAVAGNANI e CABALLERO (2007a) utilizam programação MINLP para obter o projeto ótimo do trocador de calor. Já os trabalhos de RAVAGNANI (1994), RAVAGNANI *et al.* (2003) e LONA *et al.* (2000) propuseram métodos iterativos (sistemática de tentativa e erro) para encontrar o melhor equipamento em um conjunto de muitas possibilidades. Em todos esses casos, códigos com grande complexidade e elevado custo computacional são necessários.

Uma maneira pouco difundida de obter o projeto ótimo de trocadores de calor é utilizar métodos não-determinísticos para resolver o problema de otimização. Um dos poucos trabalhos encontrados nessa linha, segundo MIZUTANI (2003), é o de

CHAUDHURI e DIWEKAR (1997) que apresentaram uma estratégia em que um método estocástico do tipo recozimento simulado é utilizado para o projeto ótimo de trocadores de calor casco-tubo. O algoritmo é auxiliado pelo programa de projeto de trocadores da HTRI (*Heat Transfer Research Inc. USA*), o qual realiza as simulações propostas pelo recozimento simulado. De acordo com MIZUTANI (2003), os autores usam o algoritmo de recozimento simulado como técnica de otimização do projeto devido ao fato do programa de projeto HTRI ser um programa fechado, ou seja, as correlações utilizadas não estão disponíveis. Outros exemplos deste tipo de programa de projeto são o HTFS (*Heat Transfer and Fluid Flow Service, UK*) e o B-JAC (*Aspen Tech*).

Ainda nessa linha dos métodos não determinísticos tem-se o trabalho de SELBAS *et al.* (2006). Os autores desenvolveram um método para otimização da área de troca térmica de trocadores de calor baseado no método dos algoritmos genéticos. Os algoritmos genéticos foram aplicados para variar algumas variáveis de projeto e determinar a área de troca térmica para uma configuração previamente existente.

Outro trabalho bem recente é o de PONCE-ORTEGA *et al.* (2009). Os autores também utilizam o método dos algoritmos genéticos para o projeto ótimo de trocadores de calor do tipo casco-tubo. O método de Bell-Delaware é usado, porém as variáveis são todas otimizadas sem levar em conta o padrão TEMA.

Como mencionado no Capítulo 1, embora a síntese de redes de trocadores de calor seja um campo de significativo volume de produção científica nos últimos 40 anos, muitas das metodologias para síntese de redes de trocadores de calor não consideram o projeto detalhado dos trocadores de calor, utilizando os coeficientes de transferência de calor constantes para a estimativa das áreas de troca térmica. Outro aspecto pouco explorado, principalmente nas técnicas simultâneas, é a consideração da perda de carga nos equipamentos de troca térmica.

A proposta de projeto detalhado dos equipamentos, na presente tese de doutorado, inclui o cálculo dos coeficientes de transferência de calor e da queda de pressão em função das propriedades físicas das correntes e de detalhes geométricos dos equipamentos. A configuração obtida deve estar de acordo com algumas características de projeto previamente fixadas, a saber, limite de perda de carga, limite de velocidade dos fluidos e limite do fator de incrustação, tanto para os lados do casco quanto dos tubos. Esta metodologia foi desenvolvida para ser incorporada ao algoritmo de síntese de redes de trocadores de calor.

4.2 Modelo Matemático

Dado um par de correntes quente e fria, o projeto de trocadores de calor consiste na determinação ótima do trocador de calor casco-tubo para a transferência de calor entre uma corrente quente e uma corrente fria, formulado como um problema de otimização. O principal objetivo é determinar as características de um equipamento que apresente um custo mínimo, considerando o custo referente à área de troca térmica e/ou os custos de bombeamento associados a perda de carga. Essas características devem seguir rigorosamente o padrão TEMA e o projeto final do equipamento deve respeitar os limites de queda de pressão, velocidade dos fluidos e incrustação impostos pelo processo.

Um conjunto de dados das correntes quente e fria, bem como alguns parâmetros de projeto são fornecidos, tais como: T_{in} (temperatura de entrada), T_{out} (temperatura de saída), m (vazão mássica), ρ (densidade), C_p (calor específico), μ (viscosidade), k (condutividade térmica), ΔP (limite para a queda de pressão), rd (limite para o fator de incrustação) e dados de custo (área e/ou bombeamento). O modelo proposto é formulado considerando-se os fluidos com suas propriedades físicas

constantes e em uma única fase. A Figura 4.1 mostra um exemplo de um trocador de calor do tipo 1-1 (um passo no lado dos tubos e um passo no lado do casco).

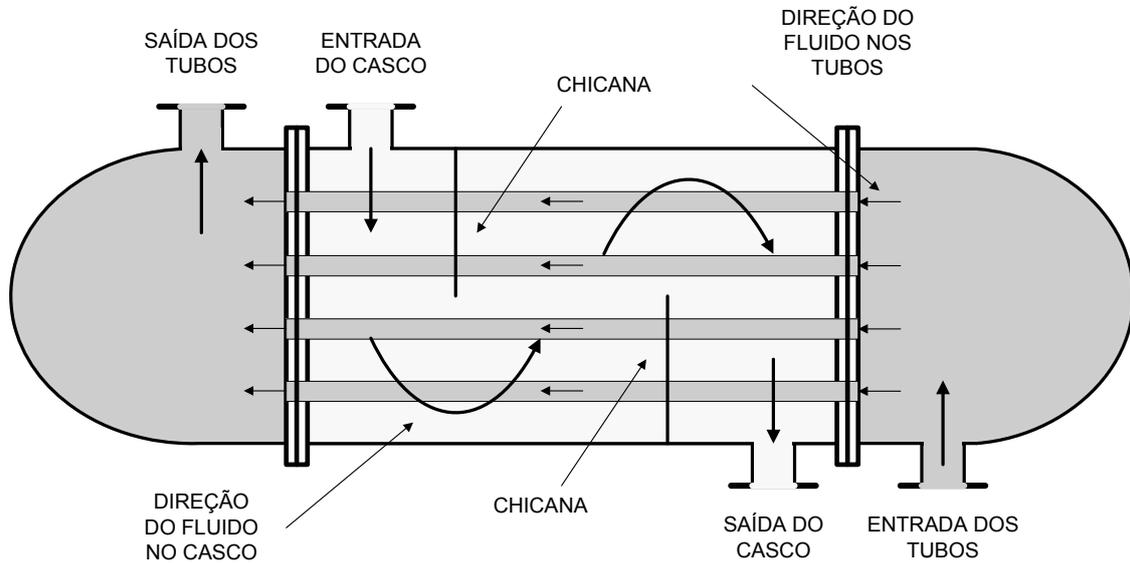


Figura 4.1 – Trocador de calor com uma passagem do lado dos tubos

As variáveis mecânicas do equipamento a serem calculadas pela metodologia proposta para o lado dos tubos são o diâmetro interno dos tubos (d_{in}), diâmetro externo dos tubos (d_{ex}), arranjo dos tubos (triangular ou quadrado), *pitch* (pt), comprimento dos tubos (L), número de passos nos tubos (N_{pt}) e número de tubos (nt). Para o lado do casco, as variáveis que devem ser otimizadas são o diâmetro do casco (D_s), diâmetro do feixe de tubos (D_{ft}), número de chicanas (N_b), corte das chicanas (lc) e o espaçamento entre as chicanas (ls). As variáveis termo-hidráulicas envolvidas no projeto são o calor trocado (Q), área de troca térmica (A), coeficientes de transferência de calor do lado do casco e do lado do tubo (h^t e h^s), coeficiente global de troca térmica com e sem incrustação (U_d e U_c), queda de pressão no lado dos tubos e no lado do casco (ΔP^t e ΔP^s), fator de incrustação (rd), média logarítmica de temperatura ($LMTD$), fator de correção da média logarítmica de temperatura (Ft) e alocação dos fluidos no trocador de calor (casco ou tubos).

O modelo de otimização proposto baseia-se no método de Bell-Delaware para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor e da queda de pressão no lado do casco. Esta metodologia foi apresentada por RAVAGNANI (1994), que usou um método iterativo para obter o projeto detalhado dos trocadores de calor. Esta foi a primeira vez que se usou uma tabela contendo conjuntos de parâmetros geométricos dos trocadores de calor baseados no padrão TEMA. Esta tabela facilitava a escolha desses parâmetros, selecionando automaticamente um conjunto compatível de parâmetros contendo o diâmetro do casco, diâmetro do feixe de tubos, diâmetro interno e externo dos tubos, número de tubos, número de passos nos tubos e arranjo dos tubos. RAVAGNANI *et al.* (2003) aplicou essa metodologia em uma série de problemas de síntese de redes de trocadores de calor.

Mais recentemente, RAVAGNANI e CABALLERO (2007a) basearam-se no modelo de RAVAGNANI (1994) e de RAVAGNANI *et al.* (2003), usando a programação disjunta generalizada e a otimização com programação não linear inteira mista (MINLP) para a determinação do projeto ótimo de trocadores de calor casco-tubo.

O projeto ótimo de trocadores de calor é visto como uma relação de custo e benefício entre os custos de área e bombeamento. MIZUTANI *et al.* (2003) foram os primeiros a considerar o custo de bombeamento dos fluidos no problema de otimização. Um aumento da turbulência nos fluidos passando nos cascos e tubos resulta em uma elevação dos valores dos coeficientes de transferência de calor, o que, por sua vez, resulta em uma menor área de troca de calor e na redução do custo de investimento. Por outro lado, há um maior custo de bombeamento dos fluidos.

As equações do modelo, extraídas de RAVAGNANI e CABALLERO (2007a), estão relacionadas a seguir. As Equações 4.01 a 4.07 relacionam as características do lado dos tubos. As Equações 4.08 a 4.29 apresentam as características para o lado do casco. As Equações 4.30 a 4.39 mostram as características gerais do trocador de

calor. Por fim, o problema de otimização (função objetivo e restrições) é apresentado nas Equações 4.40 a 4.43.

4.2.1 Lado dos Tubos

1. Número de Reynolds:

$$\text{Re}^t = \frac{4 \cdot m^t \cdot np^t}{\pi \cdot \mu^t \cdot d_{in}^t \cdot n^t} \quad (4.1)$$

2. Número de Prandtl:

$$\text{Pr}^t = \frac{\mu^t \cdot Cp^t}{k^t} \quad (4.2)$$

3. Número de Nusselt:

$$\text{Nu}^t = 0.072 \cdot (\text{Re}^t)^{0.8} \cdot (\text{Pr}^t)^{\frac{1}{3}} \quad (4.3)$$

4. Coeficiente de transferência de calor individual:

$$ht = \frac{\text{Nu}^t \cdot k^t}{d_{in}^t} \quad (4.4)$$

5. Fator de atrito de Fanning:

$$f_t^t = \frac{0.079}{(\text{Re}^t)^{0.25}} \quad (4.5)$$

6. Velocidade do fluido:

$$v^t = \frac{\text{Re}^t \cdot \mu^t}{\rho^t \cdot d_{in}^t} \quad (4.6)$$

7. Queda de pressão:

$$\Delta P^t = \frac{1}{\rho^t} \cdot \left(\frac{2 \cdot f_t^t \cdot np^t \cdot L^t \cdot (v^t)^2}{d_{in}^t} + 1.25 \cdot np^t \cdot (v^t)^2 \right) \quad (4.7)$$

4.2.2 Lado do Casco

8. S_m - área de referência para o escoamento no casco, que é equivalente à área livre entre chicanas no centro da região de escoamento cruzado:

$$\left[\begin{array}{l} \text{triangular} \Rightarrow \left[S_m = l_s \cdot \left(D^s - D_{ft} + \frac{(p_t - d_{ex}^t) \cdot (D_{ft} - d_{ex}^t)}{p_t} \right) \right] \\ \text{quadrado} \Rightarrow \left[S_m = l_s \cdot \left(D^s - D_{ft} + \frac{(p_t - d_{ex}^t) \cdot (D_{ft} - d_{ex}^t)}{p_n} \right) \right] \end{array} \right] \quad (4.8)$$

9. Número de Reynolds:

$$Re^s = \frac{m^s \cdot d_{ex}^t}{\mu^s \cdot S_m} \quad (4.9)$$

10. Velocidade:

$$v^s = \frac{m_s / \rho^s}{(D^s / p_t) \cdot (p_t - d_{ex}^t) l_s} \quad (4.10)$$

11. Fator de Colburn:

$$\left[\begin{array}{l} a = \frac{a_3}{1 + 0.14 \cdot (Re^s)^{a_4}} \\ j_i = a_1 \cdot 1.064^{a_2} \cdot (Re^s)^{a_2} \end{array} \right] \quad (4.11)$$

Na Equação 4.11, a_1 , a_2 , a_3 e a_4 assumem diferentes valores dependendo do arranjo dos tubos e da faixa do número de Reynolds no lado do casco. Esses valores são apresentados no Apêndice A.

12. Fator de atrito de Fanning:

$$\left[\begin{array}{l} b = \frac{b_3}{1 + 0.14 \cdot (Re^s)^{b_4}} \\ f_i^c = b_1 \cdot 1.064^{b_2} \cdot (Re^s)^{b_2} \end{array} \right] \quad (4.12)$$

Na Equação 4.12, b_1 , b_2 , b_3 e b_4 assumem diferentes valores dependendo do arranjo dos tubos e da faixa do número de Reynolds no lado do casco. Esses valores são apresentados no Apêndice A.

13. Número de colunas de tubos atravessadas no escoamento cruzado ideal:

$$N_c = \frac{0.5 \cdot D^s}{pp} \quad (4.13)$$

14. Número de colunas de tubos atravessadas na região das janelas:

$$N_{cw} = \frac{0.2 \cdot D^s}{pp} \quad (4.14)$$

15. Fração de tubos presentes na região de escoamento cruzado puro:

$$\left[\begin{array}{l} \lambda = \frac{0.5 \cdot D^s}{D_{ft}} \\ F_c = \frac{1}{\pi} \cdot [\pi + 2 \cdot \lambda \cdot \text{sen}(\arccos(\lambda)) - 2 \cdot \arccos(\lambda)] \end{array} \right] \quad (4.15)$$

16. Fração de S_m no escoamento das correntes de vazamento pela folga entre o feixe tubular e o casco e pelas folgas na matriz tubular deixadas pela presença das placas de partição de passos nos cabeçotes:

$$F_{sbp} = \frac{l_s}{S_m} \cdot (D^s - D_{ft}) \quad (4.16)$$

17. Área de folga chicana-casco em uma chicana:

$$\left[\begin{array}{l} \delta_{sb} = \frac{3.1 + 0.004 \cdot (D^s \cdot 1000)}{1000} \\ S_{sb} = \frac{(\pi - a \cos(0.5)) \cdot D^s \cdot \delta_{sb}}{2} \end{array} \right] \quad (4.17)$$

18. Área de folga tubo-chicana em uma chicana:

$$S_{tb} = 0.0006223 \cdot d_{ex}^t \cdot n^t \cdot (1 + F_c) \quad (4.18)$$

19. Área de livre escoamento nas janelas:

$$S_w = \frac{1.038 \cdot (D^s)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d_{ex}^t)^2 \cdot n^t \cdot (1 - F_c)}{8} \quad (4.19)$$

20. Coeficiente de transferência de calor para o escoamento cruzado ideal:

$$h_{oi} = \frac{j_i \cdot C_p^s \cdot m^s}{S_m} \cdot \left(\frac{\kappa^s}{C_p^s \cdot \mu^s} \right)^{2/3} \quad (4.20)$$

21. Fator de correção associado ao corte das chicanas:

$$Jc = Fc + 0.54 \cdot (1 - Fc)^{0.345} \quad (4.21)$$

22. Fator de correção resultante das correntes de vazamento pelas folgas tubo-chicana e chicana-casco:

$$\left[\begin{aligned} \alpha &= 0.44 \cdot \left(1 - \frac{Ssb}{Stb + Ssb} \right) \\ JI &= \alpha + (1 - \alpha) \cdot \exp\left(-2.2 \cdot \frac{Ssb + Stb}{Sm} \right) \end{aligned} \right. \quad (4.22)$$

23. Fator de correção resultante da corrente que escoo pela folga casco-matriz tubular:

$$Jb = \exp(-0.3833 \cdot Fsbp) \quad (4.23)$$

24. Coeficiente de transferência de calor:

$$hs = hoi \cdot Jc \cdot JI \cdot Jb \quad (4.24)$$

25. Queda de pressão para o escoamento cruzado ideal:

$$\Delta Pb = \frac{2 \cdot fi^s \cdot Nc \cdot (m^s)^2}{\rho^s \cdot Sm^2} \quad (4.25)$$

26. Queda de Pressão de referência para o escoamento nas janelas:

$$\Delta Pw = (2 + 0.6 \cdot Ncw) \cdot \frac{(m^s)^2}{2 \cdot Sm \cdot Sw \cdot \rho^s} \quad (4.26)$$

27. Fator de correção para a queda de pressão em função das correntes de vazamento pelas folgas tubo-chicana e chicana-casco:

$$\left[\begin{aligned} K &= -0.15 \cdot \left(1 + \frac{Ssb}{Stb + Ssb} \right) + 0.8 \\ RI &= \exp\left[-1.33 \cdot \left(1 + \frac{Ssb}{Stb + Ssb} \right) \cdot \left(\frac{Stb + Ssb}{Sm} \right)^K \right] \end{aligned} \right. \quad (4.27)$$

28. Fator de correção da queda de pressão em função da corrente que escoo pela folga casco-matriz tubular:

$$Rb = \exp(-1.3456 \cdot Fsbp) \quad (4.28)$$

29. Queda de pressão:

$$\Delta P^s = 2 \cdot \Delta P_b \cdot \left(1 + \frac{N_c w}{N_c}\right) \cdot R_b + (N_b + 1) \cdot \Delta P_b \cdot R_b \cdot R_l + N_b \cdot \Delta P_w \cdot R_l \quad (4.29)$$

4.2.3 Aspectos Gerais do Trocador de Calor

30. Calor trocado:

$$Q = m^h \cdot C_p^h \cdot (T_{in}^h - T_{out}^h) = m^c \cdot C_p^c \cdot (T_{out}^c - T_{in}^c) \quad (4.30)$$

31. LMTD, média logarítmica de temperatura:

$$\begin{aligned} \Delta T1 &= T_{in}^h - T_{out}^c \\ \Delta T2 &= T_{out}^h - T_{in}^c \\ LMTD &= \frac{(\Delta T1 - \Delta T2)}{\ln\left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2}\right)} \end{aligned} \quad (4.31)$$

32. Ft - fator de correção da LMTD para trocadores com mais de uma passagem nos tubos:

$$\begin{aligned} S &= \frac{(T_{out}^c - T_{in}^c)}{(T_{in}^h - T_{in}^c)} \quad R = \frac{(T_{in}^h - T_{out}^h)}{(T_{out}^c - T_{in}^c)} \quad Px = \frac{1 - \left[\frac{R \cdot S - 1}{S - 1}\right]^{\frac{1}{NS}}}{R - \left[\frac{R \cdot S - 1}{S - 1}\right]^{\frac{1}{NS}}} \\ Ft &= \left(\frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1}\right) \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 - Px}{1 - R \cdot Px}\right)}{\ln\left[\frac{\left(\frac{2}{Px}\right) - 1 - R + \sqrt{R^2 + 1}}{\left(\frac{2}{Px}\right) - 1 - R - \sqrt{R^2 + 1}}\right]} \end{aligned} \quad (4.32)$$

33. Pitch - distância entre os centros dos tubos adjacentes:

$$pt = 1.25 \cdot d_{ex}^t \quad (4.33)$$

34. Espaçamento das chicanas:

$$ls = \frac{L^t}{(N_b + 1)} \quad (4.34)$$

35. Distância entre as linhas de centro dos tubos na direção normal ao escoamento pn e paralela pp:

$$\left[\begin{array}{l} \text{triangular} \Rightarrow \left[\begin{array}{l} pn = 0.5 \cdot pt \\ pp = 0.866 \cdot pt \end{array} \right] \\ \text{square} \Rightarrow \left[\begin{array}{l} pn = pt \\ pp = pt \end{array} \right] \end{array} \right. \quad (4.35)$$

36. Área do trocador de calor:

$$A = n' \cdot \pi \cdot d_{ex}' \cdot L' \quad (4.36)$$

37. Coeficiente global de transferência térmica sem incrustação:

$$Uc = \frac{1}{\left(\frac{d_{ex}'}{htd_{in}'} + \frac{r_{in} d_{ex}'}{d_{in}'} + \frac{d_{ex}' \log\left(\frac{d_{ex}'}{d_{in}'}\right)}{2k_w} + r_{ex} + \frac{1}{hs} \right)} \quad (4.37)$$

38. Coeficiente global de transferência térmica com incrustação:

$$Ud = \frac{Q}{A \cdot LMTD} \quad (4.38)$$

39. Fator de Incrustação:

$$rd = \frac{Uc - Ud}{Uc \cdot Ud} \quad (4.39)$$

40. Problema de Otimização

Minimizar: $C_{total} = C_{area} + C_{pump}$

$$\Delta P^t \leq \Delta P^{max}$$

$$\Delta P^s \leq \Delta P^{max}$$

Sujeito a: $rd \geq rd_{design} \quad (4.40)$

$$Ft \geq 0.75$$

$$1 \leq v_t \leq 3$$

$$0.5 \leq v_s \leq 2$$

v_t e v_s em m/s.

Onde:

$$C_{area} = aa_1 \cdot \left(\frac{Q}{U \cdot Ft \cdot MLDT} \right)^{aa_2} \quad (4.41)$$

$$C_{pump} = aa_3 \cdot \left(\frac{\Delta P^t \cdot m^t}{\rho^t} + \frac{\Delta P^s \cdot m^s}{\rho^s} \right) \quad (4.42)$$

Para este problema de otimização é possível considerar o custo da área de troca térmica, bem como os custos de bombeamento ou somente a área de troca térmica, dependendo dos dados disponíveis. Se os parâmetros de custo não estiverem disponíveis, a metodologia encontrará o trocador de calor com a menor área de troca térmica. Para estes casos, considera-se o seguinte problema de otimização:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar:} \quad & A = \frac{Q}{U \cdot Ft \cdot MLDT} \\ & \Delta P^t \leq \Delta P^{max} \\ & \Delta P^s \leq \Delta P^{max} \\ \text{Sujeito a:} \quad & rd \geq rd_{design} \\ & Ft \geq 0.75 \\ & 1 \leq v_t \leq 3 \\ & 0.5 \leq v_s \leq 2 \end{aligned} \quad (4.43)$$

v_t e v_s em m/s.

4.3 Comentários Gerais sobre a Implementação Computacional

Neste problema, três variáveis consideradas independentes são geradas aleatoriamente no início da otimização, sendo modificadas a cada iteração pelas Equações 3.2 e 3.3. Cada partícula é formada pelas seguintes variáveis: alocação dos fluidos (1, se o fluido quente passa nos tubos, 2 se passa no casco), comprimento dos tubos e posição (ou linha) da Tabela TEMA.

Neste trabalho, denomina-se Tabela TEMA uma tabela construída seguindo rigorosamente o padrão TEMA, na qual cada linha define automaticamente um conjunto de dados contendo os seguintes parâmetros: diâmetro do casco, diâmetro do feixe de tubos, diâmetro interno e externo dos tubos, número de tubos, número de passos nos tubos e arranjo dos tubos. A tabela usada neste trabalho é similar a apresentada por RAVAGNANI (1994). Basicamente, as duas diferem pelo número de linhas. Neste trabalho, uma quantidade maior de possibilidades foi considerada, sendo acrescentada a ela mais valores de diâmetro de casco, bem como mais valores de diâmetros internos e externos de tubo. Uma parte da Tabela TEMA é apresentada no Apêndice B para ilustrar as variáveis definidas por ela.

Após a geração das partículas, os parâmetros do trocador de calor e os custos de área e bombeamento são calculados. Isto é feito para todas as partículas, seja ela solução do problema ou não. O valor da função objetivo é obtido e se a particular não for solução do problema (alguma restrição violada), a função objetivo é penalizada.

4.3.1 Algoritmo Proposto

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 de partículas na população (Npt)
 - c_1 , c_2 e w
 - Valores máximo e mínimo das variáveis (número máximo de linhas da Tabela TEMA)
 - Dados das correntes quente e fria, dados de custo (se disponível)
- ii) Geração inicial aleatória das partículas

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

- Comprimento dos tubos (somente valores recomendados pelo padrão TEMA: 2,438 m; 3,048 m; 3,658 m; 4,877 m; 6,096 m)
- Alocação do fluido quente (casco ou tubo)
- Posição (ou linha) da Tabela TEMA (que automaticamente define o diâmetro do casco, diâmetro do feixe de tubos, diâmetro interno e externo dos tubos, arranjo dos tubos, pitch, número de passagens nos tubos e número de tubos)

iii) Avaliação da função objetivo em uma sub-rotina com o modelo matemático do projeto de trocadores de calor

Com as variáveis geradas no passo anterior, é possível calcular:

- Parâmetros para o lado dos tubos, Equações 4.1 a 4.7
- Parâmetros para o lado do casco, Equações 4.8 a 4.29
- Aspectos gerais do trocador de calor, Equações 4.30 a 4.39
- Função Objetivo, Equação 4.40 a 4.42 ou 4.43

iv) Verificar as restrições para todas as partículas iniciais. 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 3.2 e 3.3.

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.

Durante a implementação do algoritmo, é importante notar que todas as restrições são sempre testadas. Quando uma restrição não é satisfeita, a função objetivo da partícula em questão é penalizada.

Neste problema de otimização de projeto de trocadores de calor lida-se com diferentes tipos de variáveis de decisão. A alocação dos fluidos é uma variável nominal, que assume os valores 1 ou 2 para fluido quente passando nos tubos ou no casco, respectivamente. O comprimento dos tubos é uma variável discreta, que assume um valor real, de uma lista de possíveis valores recomendados pelo padrão TEMA. A posição (ou linha) da Tabela TEMA é uma variável inteira que varia de 1 ao número máximo de linhas da tabela.

No momento em que as variáveis são atualizadas no passo v , elas assumem automaticamente o número mais próximo ao seu valor atualizado. A variável nominal assume o valor 1 ou 2, valor este que seja mais próximo do seu valor atualizado. A variável inteira arredonda seu valor para o número inteiro mais próximo. A variável discreta assume para o valor real mais próximo da lista de valores possíveis.

4.4 Aplicações

Três exemplos da literatura, mostrado em RAVAGNANI *et al.* (2009), foram estudados para testar a metodologia proposta. Esses exemplos foram testados com vários conjuntos de diferentes parâmetros para o método do enxame de partículas. Foi, então, avaliada a influência de cada conjunto no desempenho do algoritmo, conforme descrito no Capítulo 3. O conjunto de parâmetros que melhor se adaptou a este tipo de problema é apresentado na Tabela 4.1. Este conjunto de parâmetros foi usado nos três exemplos estudados.

Tabela 4.1 – Parâmetros para o método do enxame de partículas

c1	c2	w	Npt
1,3	1,3	0,75	30

4.4.1 Exemplo 4.1

O primeiro caso estudo foi extraído de SHENOY (1995). O problema pode ser descrito como um projeto de um trocador de calor do tipo casco-tubo para resfriar querosene aquecendo óleo cru. Dados de temperatura, vazão, bem como das propriedades físicas dos dois fluidos e os limites de perda de carga e incrustação são mostrados na Tabela 4.2. No trabalho de SHENOY (1995) não estão disponíveis os dados de custo de área nem os dados de custo de bombeamento. Neste caso, a função objetivo consiste na minimização da área do trocador de calor apresentados na Equação 4.43.

Tabela 4.2 – Dados do Exemplo 4.1

Fluido	T_{in} (K)	T_{out} (K)	m (kg/s)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	κ (W/mK)	r_d (W/mK)
Querosene	371,15	338,15	14,9	0,00023	777	2684	0,11	1,5e-4
Óleo Cru	288,15	298,15	31,58	0,00100	998	4180	0,60	1,5e-4

A condutividade térmica da parede do tubo é 50 WmK⁻¹. Os limites de queda de pressão são 42 kPa para o lado dos tubos e 7 kPa para o lado do casco. O fator de incrustação deve ser superior a 0.00015 m²KW⁻¹ em cada um dos lados (tubo e casco).

SHENOY (1995) usa três diferentes métodos para o projeto do trocador de calor; o método de KERN (1950), o método de Bell-Delaware (TABOREK, 1982) e o algoritmo do projeto rápido, desenvolvido e apresentado nos trabalhos de POLLEY *et al.* (1990), POLLEY e PANJEH SHAHI (1991), JEGEDE e POLLEY (1992) e PANJEH SHAHI (1992), que fixa a queda de pressão nos lados do casco e dos tubos antes do

projeto. Neste trabalho, SHENOY (1995) fixa a alocação do fluido frio no lado dos tubos. Os diâmetros interno e externo dos tubos e o pitch também são fixos.

Na Tabela 4.3 são apresentadas a configuração do trocador de calor obtida por SHENOY (1995), a melhor solução obtida com o modelo MINLP proposto por RAVAGNANI e CABALLERO (2007a) e os resultados obtidos neste trabalho. No trabalho de SHENOY (1995) o padrão TEMA não é considerado. Este tipo de aproximação fornece uma especificação preliminar do equipamento. Esta especificação preliminar precisará ser ajustada para atender aos padrões TEMA. Por exemplo, o comprimento dos tubos obtido é 1.286 m porém o menor comprimento de tubo recomendado pelo padrão TEMA é 8 ft ou 2.438 m.

Tabela 4.3 – Resultados para o Exemplo 4.1

	SHENOY (1995)	RAVAGNANI e CABALLERO (2007)	Trabalho Atual
Área (m ²)	28,40	28,31	19,83
D ^s (m)	0,549	0,438	0,438
L (m)	1,286	2,438	2,438
d _{ex} ^t (m)	0,0191	0,0191	0,0254
d _{in} ^t (m)	0,0154	0,0170	0,0212
Arranjo dos tubos	Quadrado	Triangular	Quadrado
l _s (m)	0,192	0,105	0,263
Número de Chicanas	6	6	8
Número de Tubos	368	194	102
Passos nos tubos	6	4	4
Passos no casco	1	1	1
ΔP ^s (kPa)	3,60	7,00	4,24
ΔP ^t (kPa)	42,00	26,92	23,11
h ^s (kW/m ² °C)	8649,60	3831,38	5799,43
h ^t (kW/m ² °C)	1364,50	2759,84	1965,13
U (W/m ² °C)	1000,70	1017,88	865,06
r _d (m ² °C/W)	0,00041	0,00030	0,00032
Ft	0,9	0,9	0,9
Alocação do fluido quente	Casco	Tubo	Tubo
v ^t (m/s)	**	1,827	2,034
v ^s (m/s)	**	0,935	0,949

**Não disponível

Como pode ser visto na Tabela 4.3, a metodologia proposta com o método do enxame de partículas apresentada neste trabalho obteve êxito. A área do trocador de calor projetado é $19,83 \text{ m}^2$, menor do que $28,40 \text{ m}^2$ e $28,31 \text{ m}^2$, os valores obtidos por SHENOY (1995) e RAVAGNANI e CABALLERO (2007a), respectivamente, assim como o número de tubos (102 comparado a 194 e 368). O diâmetro do casco e o comprimento dos tubos são os mesmos apresentados por RAVAGNANI e CABALLERO (2007a). O fator de incrustação, as velocidades dos fluidos e a queda de pressão em ambos os lados, tubo e casco, estão de acordo com os valores limites fixados.

A taxa de sucesso do método do enxame de partículas para este exemplo foi 78%. O tempo computacional em um microcomputador Pentium(R) 2.8 GHz foi menor do que 1 minutos.

4.4.2 Exemplo 4.2

O segundo exemplo foi extraído de SERNA e JIMÉNEZ (2005). Neste exemplo a função objetivo também considera somente a minimização da área de troca térmica. Os custos de área e queda de pressão não são considerados, assumindo então o problema apresentado na Equação 4.43. A Tabela 4.4 apresenta as propriedades físicas dos fluidos, temperatura, vazões e os limites de queda de pressão. O fator de incrustação deve ser superior a $0.00035 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ em ambos os lados (tubo e casco). A condutividade térmica na parede do tubo é 45 W/mK .

A Tabela 4.5 mostra três configurações para o trocador de calor. A primeira coluna apresenta a melhor solução de SERNA e JIMÉNEZ (2005), a segunda apresenta os resultados de RAVAGNANI e CABALLERO (2007a) e a terceira coluna apresenta o equipamento projetado usando o algoritmo proposto neste trabalho. As

áreas de troca térmica obtidas são 165,3 m², 148,56 m² and 131,27 m², respectivamente.

Tabela 4.4 – Dados para o Exemplo 4.2

Fluido	T_{in} (K)	T_{out} (K)	m (kg/s)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	k (W/mK)	ΔP_{max} (kPa)
A	483,15	377,59	19,15	1,2e-4	789,72	2428	0,106	78,81
B	324,81	355,37	75,22	2,9e-4	820,12	2135	0,123	83,63

Tabela 4.5 – Resultados para o Exemplo 4.2

	SERNA e JIMÉNEZ (2005)	RAVAGNANI e CABALLERO (2007a)	Trabalho Atual
Área (m ²)	165,3	148,56	131,27
D ^s (m)	0,771	0,737	0,635
L (m)	5,422	4,880	6,096
d _{ex} ^t (m)	0,01905	0,01905	0,01905
d _{in} ^t (m)	0,01483	0,01700	0,01540
Arranjo dos tubos	Triangular	Triangular	Quadrado
l_c (%)	25,4	25	25,4
l_s (m)	0,258	0,305	0,381
Número de Chicanas	18	15	14
Número de Tubos	529	509	360
Passos nos tubos	6	6	6
Passos no casco	1	1	1
ΔP^s (kPa)	83,63	43,69	10,58
ΔP^t (kPa)	78,805	76,74	60,37
h^s (kW/m ² °C)	1,336,73	928,60	2,638,64
h^t (kW/m ² °C)	1,267,23	1,174,36	3,479,08
U (W/m ² °C)	381,86	425,10	642,48
r_d (m ² °C/W)	**	**	7,091e-04
Alocação do fluido quente	Tubo	tubo	tubo
v^t (m/s)	**	**	2,171
v^s (m/s)	**	**	0,520

**Não disponível

Assim como no Exemplo 4.1, é possível notar que somente as duas últimas colunas na Tabela estão de acordo com o padrão TEMA. Como a configuração do trocador estará restrita aos parâmetros regidos pelo padrão TEMA, a configuração de SERNA e JIMÉNEZ (2005) deveria sofrer modificações para se ajustar às especificações do padrão. Vê-se, também, que a terceira coluna apresenta os melhores resultados, com menor área de troca térmica, diâmetro do casco e número de tubos, apesar do maior comprimento dos tubos.

Neste exemplo, a taxa de sucesso para o método do enxame de partículas foi 76%. O tempo computacional em um microcomputador Pentium(R) 2.8 GHz foi menor do que 1 minutos.

4.4.3 Exemplo 4.3

O terceiro exemplo foi apresentado por MIZUTANI *et al.* (2003) e está dividido em três diferentes situações

Parte A: A Tabela 4.6 apresenta as propriedades dos fluidos, temperaturas de entrada e saída e os limites de queda de pressão e bombeamento. Nesta parte, o calor trocado entre as correntes quente e fria é um parâmetro fixo, desde que as vazões mássicas e as temperaturas de entrada e saída de ambos os fluidos são especificadas. Os autores apresentaram os parâmetros de custo de área e bombeamento, então o problema de otimização consiste na minimização da função custo global, sujeitos às restrições mostradas na Equação 4.40. A Figura 4.2 exemplifica a Parte A do Exemplo 4.3.

Tabela 4.6 – Dados para o Exemplo 4.3

Fluido	T_{in} (K)	T_{out} (K)	m (kg/s)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	k (W/mK)	ΔP_{max} (kPa)	rd (W/mK)
A	368,15	313,75	27,78	3,4e-4	750	2840	0,19	68,95	1,7e-4
B	298,15	313,15	68,88	8,0e-4	995	4200	0,59	68,95	1,7e-4

$A_{cost} = 123 \cdot A^{0.59}$
 $Pump_{cost} = 1.31 \cdot \left(\frac{\Delta P^t \cdot m^t}{\rho^t} + \frac{\Delta P^s \cdot m^s}{\rho^s} \right)$
 $\$/year, A = m^2 \Delta P = Pa \ m = kg/s \ \rho = kg/m^3$

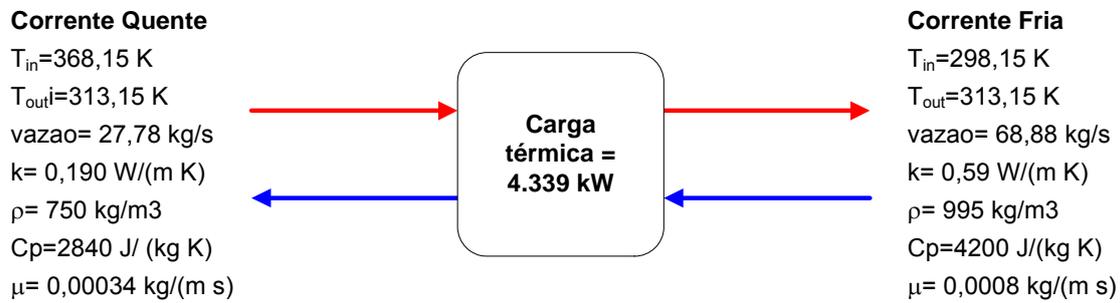


Figura 4.2 – Parte A do Exemplo 4.3

Parte B: Neste caso, deseja-se projetar um trocador de calor para os mesmos fluidos usados na Parte A, mas assume-se que a temperatura de saída do fluido frio e sua vazão são, ambas, desconhecidas e variáveis. Dessa forma, considera-se que a corrente fria é um fluido refrigerante e deve ser suficiente para a obtenção da mesma temperatura de saída do fluido quente obtida na Parte A. O fluido refrigerante tem um custo de \$7,93/1000 tons, e esse custo é adicionado à função objetivo. Além daquelas restrições mostradas na Equação 4.40, uma outra é acrescentada ao problema. A nova restrição, bem como o novo problema de otimização são apresentados na Equação 4.44, em que C_{refrig} é o custo referente ao fluido refrigerante. A Figura 4.3 exemplifica a Parte B do Exemplo 4.3.

Minimizar:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{area}} + C_{\text{pump}} + C_{\text{refrig}}$$

$$\Delta P^t \leq \Delta P^{\text{max}}$$

$$\Delta P^s \leq \Delta P^{\text{max}}$$

$$rd \geq rd_{\text{design}}$$

Sujeito a:

$$Ft \geq 0.75 \quad (4.44)$$

$$1 \leq v_t \leq 3$$

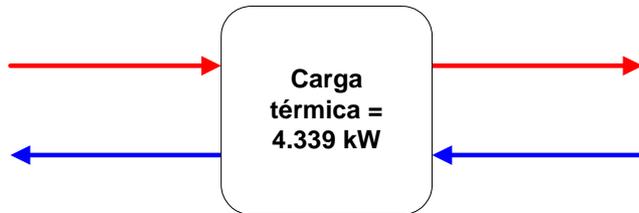
$$0.5 \leq v_s \leq 2$$

$$T_{\text{in}}^c \leq T_{\text{out}}^c \leq (T_{\text{in}}^h - 1)$$

v_t e v_s em m/s.

Corrente Quente

$T_{\text{in}}=368,15 \text{ K}$
 $T_{\text{out}}=313,15 \text{ K}$
 vazao= 27,78 kg/s
 $k= 0,190 \text{ W/(m K)}$
 $\rho= 750 \text{ kg/m}^3$
 $C_p=2840 \text{ J/(kg K)}$
 $\mu= 0,00034 \text{ kg/(m s)}$



Corrente Fria

$T_{\text{in}}=298,15 \text{ K}$
 $T_{\text{out}}= ?$
 vazao= ?
 $k= 0,59 \text{ W/(m K)}$
 $\rho= 995 \text{ kg/m}^3$
 $C_p=4200 \text{ J/(kg K)}$
 $\mu= 0,0008 \text{ kg/(m s)}$

Figura 4.3 – Parte B do Exemplo 4.3

Parte C: Na terceira etapa, novamente a temperatura de saída do fluido frio e sua vazão mássica são consideradas variáveis e o mesmo custo para o fluido refrigerante da Parte B é usado. Além disso, a temperatura de saída do fluido quente também é desconhecida e considerada como variável, assim o calor trocado definido na primeira etapa pode variar. Para que isso não ocorra, é considerada uma refrigeração auxiliar com um custo de \$20/kW.ano para suprir a energia não trocada no equipamento projetado, a fim de que o total de energia trocada seja a mesma das Partes A e B. Esse custo também é adicionado à função objetivo e as restrições do problema também aumentam nesse caso. O novo problema de otimização é mostrado na Equação 4.45. $C_{\text{ref aux}}$ é o custo referente à refrigeração auxiliar, Q^{trac} e $Q^{\text{ref aux}}$ são o

calor trocado entre o fluido quente e o fluido frio e entre o fluido quente e a refrigeração auxiliar, respectivamente. A Figura 4.4 exemplifica a Parte C do Exemplo 4.3.

Todas as três partes do Exemplo 4.3 foram resolvidas com a metodologia proposta e os resultados são mostrados na Tabela 4.7. Nesta tabela também são apresentados os resultados de MIZUTANI *et al.* (2003) para as três partes do Exemplo, bem como os resultados obtidos pelo algoritmo MINLP apresentado por RAVAGNANI e CABALLERO (2007a) para a Parte A.

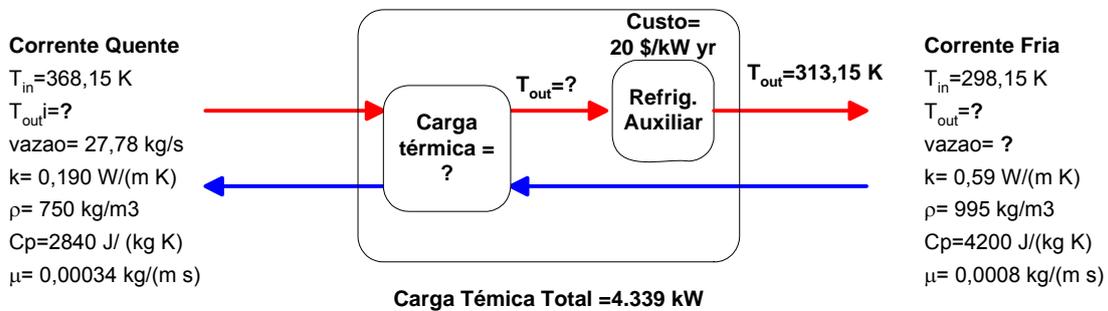


Figura 4.4 – Parte C do Exemplo 4.3

Minimizar:

$$C_{total} = C_{area} + C_{pump} + C_{refrig} + C_{ref\ aux}$$

$$\Delta P^t \leq \Delta P^{max}$$

$$\Delta P^s \leq \Delta P^{max}$$

$$rd \geq rd_{design}$$

$$Ft \geq 0.75$$

(4.45)

Sujeito a:

$$1 \leq v_t \leq 3$$

$$0.5 \leq v_s \leq 2$$

$$T_{in}^c \leq T_{out}^c \leq (T_{in}^h - 1)$$

$$Q^{troc} + Q^{ref\ aux} = 4339$$

v^t e v^s em m/s.

Tabela 4.7 - Resultados para o Exemplo 4.3

	Parte A			Parte B		Parte C	
	Mizutani <i>et al.</i> (2003)	Ravagnani e Caballero (2007)	Trabalho Atual	Mizutani <i>et al.</i> (2003)	Trabalho Atual	Mizutani <i>et al.</i> (2003)	Trabalho Atual
Custo Total (\$/ano)	5250	5028	3944	19641	11573	21180	15151
Custo de Área (\$/ano)	2826	3495	3200	3023	4563	2943	4000
Custo de Bomb. (\$/ano)	2424	1533	744	1638	1356	2868	1103
Custo do Fl. Frio (\$/ano)	*	*	--	14980	5654	11409	6095
Custo Refr. Auxil. (\$/ano)	*	*	--	*	--	3960	3952
m_c (kg/s)	*	*	*	58		46	
T_c^{out} (K)	*		--	316	336	319	339
T_h^{out} (K)	*		--	*	--	316	315,66
Área (m ²)	202,00	264,63	250,51	227,00	386,42	217,00	365,63
D^s (m)	0,687	1,067	0,838	0,854	1,219	0,754	1,219
L (m)	4,88	4,88	6,09	4,88	3,66	4,88	4,88
d_{ex}^t (m)	0,01519	0,02504	0,01905	0,01905	0,01905	0,01905	0,02540
d_{in}^t (m)	0,0126	0,02300	0,01575	0,01483	0,01420	0,01483	0,01860
Arr	Quadrado	Quadrado	Quadrado	Quadrado	Triangular	Triangular	Quadrado
l_c (%)	**	25%	25%	**	25%	**	25%
l_s (m)	0,542	0,610	0,503	0,610	0,732	0,610	0,732
N_b	8	7	11	7	4	7	5
n^t	832	680	687	777	1766	746	940
np^t	2	8	4	4	8	4	8
Passos casco	**	1	1	**	3	**	2
ΔP^s (Pa)	7494	4431	4398	7719	5097	5814	2819
ΔP^t (Pa)	22676	23312	7109	18335	15096	42955	17467
h^s (W/m ² °C)	1829	3240	5010	4110	3103	1627	3173
h^t (W/m ² °C)	6480	1986	1322	2632	1495	6,577	1524
U (W/m ² °C)	860	655	700	857	598	803	592
r_d (m ² °C/W)	**	3,46e-4	3,42e-4	**	3,40e-4	**	3,40e-4
FT	0,812	0,812	0,812	0,750	0,797	0,750	0,801
Aloc. do fl. quente	Casco	tubo	tubo	tubo	tubo	Casco	tubo
v^t (m/s)	**	1,058	1,951	**	1,060	**	1,161
v^s (m/s)	**	0,500	0,566	**	0,508	**	0,507

* Não se aplica

** Não disponível

Pode-se observar que, em todos os casos, o método do enxame de partículas apresentou melhores resultados para o custo anual global. Na Parte A, o custo da área é maior que o apresentado por MIZUTANI *et al.* (2003), porém menor que o apresentado por RAVAGNANI e CABALLERO (2007a). Os custos de bombeamento, entretanto, são sempre menores. Combinando ambos, área e bombeamento, o custo global é menor que aquele encontrado pelos outros autores.

Na Parte B, o custo da área é maior do que o apresentado por MIZUTANI *et al.* (2003) mas o custo de bombeamento e o custo do fluido frio são menores. Dessa forma, o custo global é menor (11573 *versus.* 19641). A temperatura de saída do fluido frio é 335,73 K, mais alta do que o valor obtido por MIZUTANI *et al.* (2003), 316 K, isso explica o custo mais baixo do fluido frio.

Na Parte C, ao se comparar os resultados com MIZUTANI *et al.* (2003) percebe-se que o custo de área obtido pelo algoritmo proposto é maior, o custo da refrigeração auxiliar é praticamente igual, porém os custos de bombeamento e do fluido frio são menores. Por causa dessa combinação, o custo anual global é menor do que o de MIZUTANI *et al.* (2003). A temperatura de saída do fluido frio é 338,66 K, maior do que o valor obtido pelos autores e a temperatura de saída intermediária do fluido quente é praticamente a mesma.

A taxa de sucesso do método do enxame de partículas para esse exemplo foi de 74%, 69% e 65% para as Partes A, B e C, respectivamente.

4.5 Comentários

Neste capítulo, é apresentada uma metodologia para obter o projeto ótimo de trocadores de calor. O objetivo principal é encontrar as configurações de um trocador de calor com custo mínimo, levando-se em conta os custos de área e bombeamento, ou somente com área de troca térmica mínima, dependendo da disponibilidade dos

parâmetros de custo. Este projeto é feito seguindo rigorosamente o Padrão TEMA e respeitando as condições limites de queda de pressão, velocidade dos fluidos e incrustação tanto do lado do casco, como do lado dos tubos.

Dado um conjunto de dados dos fluidos quente e frio que devem trocar calor (propriedades físicas, vazão, temperaturas de entrada e saída, limites de queda de pressão e incrustação), bem como os parâmetro de custo de área e/ou bombeamento, a metodologia proposta permite projetar um trocador de calor do tipo casco-tubo e calcular as variáveis mecânicas para os lados do casco e do tubo. Essas variáveis são: diâmetro interno dos tubos (d_{in}), diâmetro externo dos tubos (d_{ex}), arranjo dos tubos, pitch (pt), comprimento dos tubos (L), número de passos nos tubos (np^t) e número de tubos (n^t) para o lado dos tubos. Para o lado do casco, as variáveis são: diâmetro do casco (D^s), diâmetro do feixe de tubos (Dft), número de chicanas (Nb), corte das chicanas (lc) e espaçamento entre as chicanas (ls). Além dessas, as variáveis termo-hidráulicas também são calculadas, sendo elas o calor trocado (Q), área de troca térmica (A), coeficientes de transferência de calor no lado casco e dos tubos (h^t e h^s), coeficiente global de troca térmica com e sem incrustação (Ud e Uc), queda de pressão nos lados do casco e dos tubos (ΔP^t e ΔP^s), fator de incrustação (rd), média logarítmica de temperatura ($LMTD$), fator de correção para média logarítmica (Ft) e a alocação dos fluidos no trocador de calor.

O método de Bell-Delaware é usado para os cálculos do lado do casco e uma tabela com os parâmetros mecânicos, apresentada em RAVAGNANI (1994), também é usada no modelo. O problema de otimização é resolvido usando o algoritmo método do enxame de partículas.

Três casos da literatura foram estudados. Os resultados mostraram, que em todos os casos, os valores obtidos para a função objetivo usando o algoritmo proposto são melhores que os resultados apresentados na literatura. Vale ressaltar que para

todos os exemplos estudados, os modelos de otimização usados pelos autores na literatura são baseados em MINLP e resolvidos usando programação matemática.

Em todos os casos o tempo computacional em um microcomputador Pentium(R) 2.8 GHz foi menor do que 1 minutos para 100 iterações.

4.6 Referências

CHAUDHURI, P. D., DIWEKAR, U. M., 1997, "An Automated Approach for the Optimal Design of Heat Exchangers", *Ind. Eng. Chem. Res.*, n. 36, pp. 3685-3693.

FRAUSTO-HERNÁNDEZ, S.; RICO-RAMÍREZ, V.; JIMÉNEZ-GUTIÉRREZ, A., *et al.*, 2003, "MINLP Synthesis of Heat Exchanger Networks Considering Pressure Drop Effects". *Computers and Chemical Engineering*, v. 27, pp. 1143 – 1152.

JEGEDE, F. O., POLLEY, G. T., 1992, "Optimum Heat Exchanger Design", *Trans. IChemE*, n. 70(A2), pp. 133-141.

KAKAÇ, S.; BERGLES, A., E.; MAYINGER, F., 1981, *Heat Exchangers – Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design*, Hemisphere Publishing Corporation: Washington.

KERN, D. Q., 1950, *Process Heat Transfer*, McGraw-Hill: New York.

LONA, L. M. F.; FERNANDES, F. A. N.; ROQUE, M. C. *et al.*, 2000, "Developing Educational Software for Heat Exchangers and Heat Exchanger Networks Projects", *Computers and Chemical Engineering*, v. 24, pp. 1247 – 1251.

MIZUTANI, F. T., 2003, *Síntese de Redes de Trocadores de Calor com o Projeto Detalhado das Unidades Via Programação Matemática*, Tese de D.Sc., Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIZUTANI, F. T., PESSOA, F. L. P., QUEIROZ, E. M., HAUAN, S., GROSSMANN, I.

E., 2003, "Mathematical Programming Model for Heat Exchanger Network Synthesis Including Detailed Heat Exchanger Designs. 1. Shell-and-Tube Heat Exchanger Design", *In. Eng. Chem. Res.*, n. 42, pp. 4009-4018.

MURALIKRISHNA, K., SHENOY, U. V., 2000, "Heat Exchanger Design Targets for Minimum área and Cost", *Trans. IChemE.*, n. 78, Part A, pp. 161-167.

PERRY, R. H., GREEN, D. W., 1999, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7th Edition, Mc Graw-Hill Companies, Inc.

PODDAR, T. K., POLLEY, G. T., 1996, "Heat Exchanger Design Through Parameter Plotting", *Trans. IChemE.*, n. 74, Part A, pp. 849-852.

POLLEY, G. T., PANJEH SHAHI, M. H. M., 1991, "Interfacing Heat Exchanger Network Synthesis and Detailed Heat Exchanger Design", *Trans. IChemE.*, n. 69, pp. 445-457.

POLLEY, G. T., PANJEH SHAHI, M. H. P., JEGEDE, F. O., 1990, "Pressure Drop Considerations in the Retrofit of Heat Exchanger Networks", *Trans. IChemE.*, n. 68, pp. 211- 220.

RAVAGNANI, M. A. S. S., SILVA, A. P., BISCAIA JR, E. C. e CABALLERO, J. A. , 2009, "Optimal Design of Shell-and-Tube Heat Exchangers Using Particle Swarm Optimization". *Ind. Eng. Chem. Res.*, in press.

RAVAGNANI, M. A. S. S. e CABALLERO, J. A. , 2007a, "A MINLP model for the rigorous design of shell and tubo heat exchangers using the TEMA standards". *Trans. IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design*, n. 85(A10): pp. 1 – 13.

RAVAGNANI, M. A. S. S. e CABALLERO, J. A., 2007b, "Optimal heat exchanger network synthesis with the detailed heat transfer equipment design". *Computers and Chemical Engineering*, 31, 1432 – 1448.

RAVAGNANI, M. A. S. S., 1994, *Projeto e Otimização de Redes de Trocadores de*

Calor, Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

RAVAGNANI, M. A. S. S., SILVA, A. P. e ANDRADE, A. L., 2003, "Detailed Equipment Design in Heat Exchanger Networks Synthesis and Optimization". *Applied Thermal Analysis*, v. 23, pp. 141 – 151.

SAFFAR-AVVAL, M., DAMANGIR, E. A, 1995, "General Correlation for Determining Optimum Baffle Spacing for all Types of Shell and tubo Exchangers", *Int. J. Heat Mass Transfer*, v. 38, 13, pp. 2501-2506.

SAUNDERS, E.A.D., 1988, *Heat Exchangers: Selection, Design and Construction*, Longman Scientific & Technical, Longman Group UK.

SELBAS, R., KIZILKAN, O. e REPPICH, M., 2006, "A new design approach for shell and tubo heat exchangers using genetic algorithms from economic point of view", *Chemical Engineering and Processing*, n. 45, pp. 268-275.

SERNA, M. e JIMÉNEZ, A., 2005, "A compact formulation of the Bell-Delaware method for heat exchanger design and optimization", *Chemical Engineering Research and Design*, n. 83, A5, pp. 539-550.

SHENOY, U. V., 1995, *Heat Exchanger Network Synthesis – Process Optimization by Energy and Resource Analysis*, Gulf Publishing Company.

TABOREK, J., 1983, "Shell and tubo Heat Exchangers: Single Phase Flow"; In *Heat Exchanger Design Handbook*, Section 3.3, Hemisphere Publishing Corporation.

TEMA, 1988, *Standards of the Tubular Exchangers Manufactures Association*, 7º ed., Tubular Exchanger Manufacturers Association: New York.

5. SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR

5.1 Introdução

Como já foi discutido nos capítulos anteriores, na grande maioria das plantas industriais existem correntes de processo que devem sofrer aquecimento e correntes que devem sofrer resfriamento, que são feitos, normalmente, por meio de utilidades quentes e frias, respectivamente. 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.

Com intuito de economizar custos operacionais diminuindo o consumo de energia nos processos, esse assunto vem sendo um tema de pesquisa com quantidade significativa de publicações nos últimos 40 anos. Além da maximização da integração energética entre as correntes de processo e consequente minimização do emprego de utilidades, outro conceito economicamente importante na síntese de uma rede de trocadores de calor é a minimização do número de trocadores de calor ou da área de troca térmica.

Na revisão bibliográfica feita no Capítulo 2, foi colocado que esse assunto da síntese de redes de trocadores de calor é tratado basicamente por dois caminhos: os métodos sequenciais e os métodos simultâneos.

Este trabalho propõe-se a tratar o assunto pelo método simultâneo, propondo uma metodologia baseada no modelo de superestruturas. O problema é formulado como um problema de otimização e resolvido pelo método do enxame de partículas.

5.2 Definição do Problema: Síntese de RTC

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, custos relacionados à área de troca térmica e custos de bombeamento, caso deseje-se fazer também o projeto detalhado dos trocadores de calor.

Neste trabalho 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 e GROSSMANN (1990). A Figura 5.1 apresenta um exemplo da superestrutura usada neste método, para um conjunto de três correntes quentes e três correntes frias.

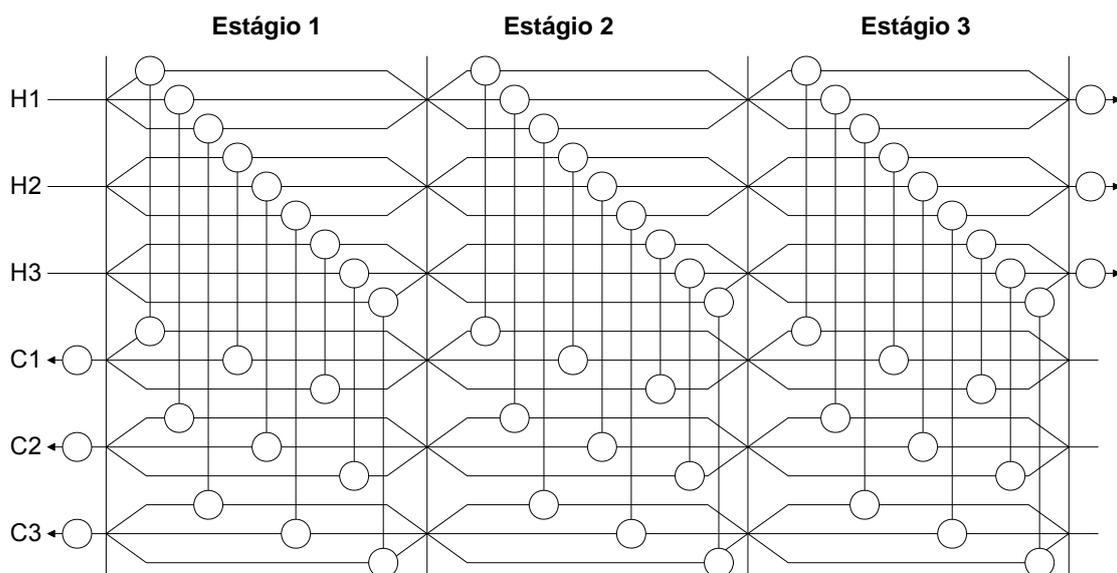


Figura 5.1 – Superestrutura para um problema de seis correntes

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 e 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 e 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 é obtida considerando os trocadores de calor do tipo contracorrente, sendo calculada pela Equação 5.1. Esta é outra grande diferença do trabalho de YEE e GROSSMANN (1990) e de todos que trabalharam nessa linha utilizando o GAMS, 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 5.1 está presente o termo LMDT. Este é outro aspecto que pode levar a problemas de não linearidades sendo, com grande frequência, simplificado e substituído pela média aritmética de temperatura.

$$A = \frac{Q}{U \cdot \text{LMDT}} \quad (5.1)$$

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 5.2 a 5.5 mostram o problema de otimização com a função objetivo e suas restrições.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar:} \quad & C_{\text{total}} = C_{\text{area}} + C_{\text{utilidade}} + C_{\text{pump}} \\ \text{Sujeito a:} \quad & \left\{ \begin{array}{l} (T_h^{\text{in}})_k > (T_c^{\text{out}})_k \\ (T_h^{\text{out}})_k > (T_c^{\text{in}})_k \end{array} \right. \quad (5.2) \\ & k = 1, \dots, \text{número de equipamentos} \end{aligned}$$

Em que:

$$C_{\text{area}} = \sum_k aa_1 \cdot (A_k)^{aa_2} \quad (5.3)$$

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

$$C_{\text{utilidade}} = C_{\text{HU}} \cdot \text{HU} + C_{\text{CU}} \cdot \text{CU} \quad (5.4)$$

$$k^{\text{MAX}} = N \cdot \text{ncq} \cdot \text{ncf} \quad (5.5)$$

5.2.1 Comentários Gerais sobre a Implementação Computacional

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 3.2 e 3.3. 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, 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 5.6 é usada para calcular as temperaturas de saída das correntes quente e fria de cada trocador de calor.

$$Q = CP_h \cdot \Delta T_h = CP_c \cdot \Delta T_c \quad (5.6)$$

5.2.2 Algoritmo proposto

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)
 - c1, c2 e ω
 - 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 novos $[0, Q_{max}]$
- 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 5.6
 - A área de troca térmica – Equação 5.1
 - Função objetivo, Equações 5.2 a 5.5
- 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 3.2 e 3.3. 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 função objetivo é penalizada e a partícula.

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

5.2.3 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 5.1 mostra os dados para o caso de AHMAD (1985).

Tabela 5.1 – Dados das correntes e dados de custo

Correntes	T_{in} (K)	T_{out} (K)	CP (kW/K)	h (kW/m ² K)
H1	300	80	0,30	0,4
H2	200	40	0,45	0,4
C1	40	180	0,40	0,4
C2	140	280	0,60	0,4
UQ	400	399		0,4
UF	10	11		0,4

Custo de área = $300A^{0.5}$, A em m².
Custo da utilidade quente = 110 \$/kW ano.
Custo da utilidade fria = 12.2 \$/kW ano.

Passo 2: Geração aleatória das partículas iniciais

- 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 novos [0, Q_{max}]

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

Dois exemplos de partículas aleatórias são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Exemplos de partículas iniciais aleatórias

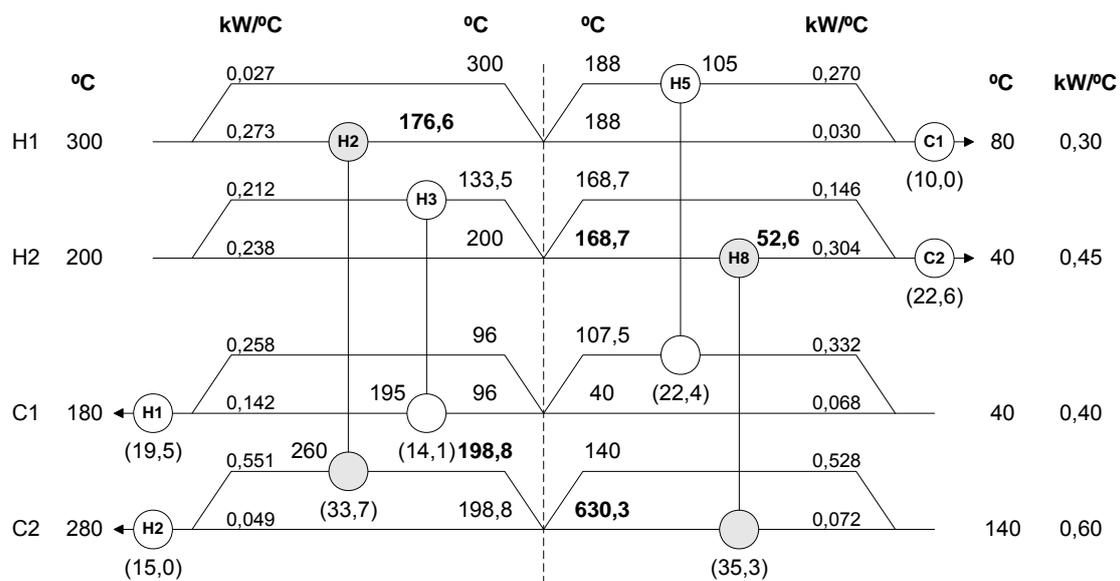
Partícula <i>j</i>				Partícula <i>l</i>			
Estágio 1		Estágio 2		Estágio 1		Estágio 2	
Q1	0,0	Q5	22,4	Q1	0,0	Q5	20,43
Q2	33,7	Q6	0,0	Q2	18,16	Q6	0,0
Q3	14,1	Q7	0,0	Q3	0,0	Q7	31,27
Q4	0,0	Q8	35,3	Q4	22,10	Q8	0,0
FSH1	0,090	FSH1	0,900	FSH1	0,35	FSH1	0,633
FSH2	0,707	FSH2	0,324	FSH2	0,129	FSH2	1,000
FSC1	0,645	FSC1	0,830	FSC1	1,000	FSC1	0,263
FSC2	0,918	FSC2	0,880	FSC2	0,270	FSC2	0,000
$j, l \in i / i = 1 \dots N_{pt}$							

Passo 3: Cálculo da função objetivo

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

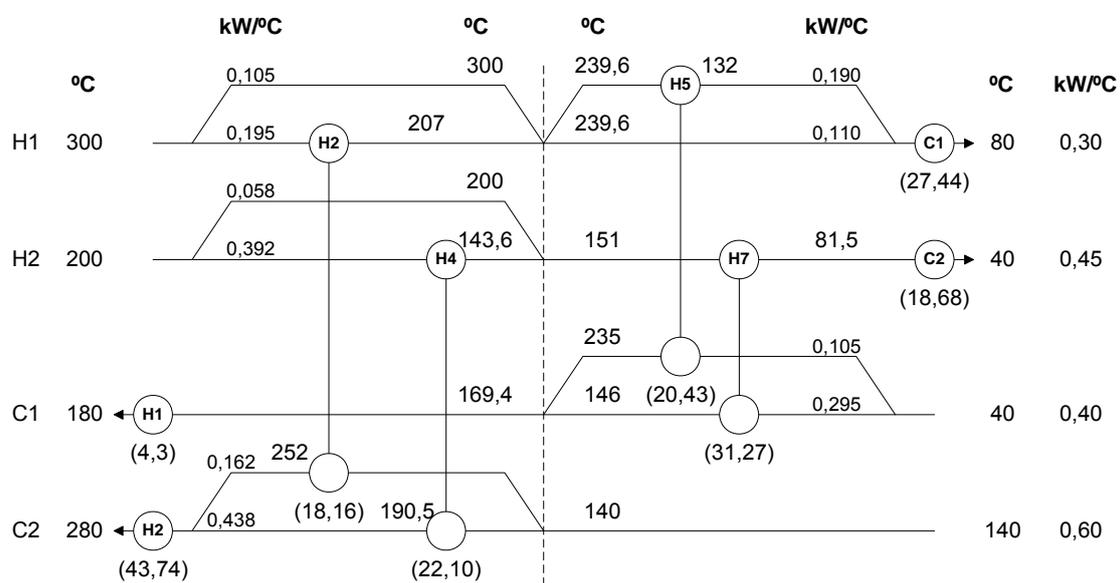
- A temperatura de saída das correntes quente e fria para cada trocador de calor – Equação 5.6
- A área de troca térmica para cada trocador - Equação 5.1
- Função Objetivo, Equações 5.2 a 5.5

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam as redes de trocadores de calor calculadas para as partículas *j* e *l*, respectivamente.



H3 e H5 são trocadores de calor viáveis
H2 e H8 são trocadores de calor inviáveis (restrições de temperatura)
H1, H4, H6 e H7 não existem (Q=0)

Figura 5.2 – Rede de trocadores de calor da partícula *j*



H2, H4, H5 e H7 são trocadores de calor viáveis
H1, H3, H6 e H8 não existem (Q=0)

Figura 5.3 – Rede de trocadores de calor da partícula *l*

Passo 4: Análise das restrições

A Tabela 5.3 mostra os melhores valores da função objetivo obtida pelas partículas j e l (o primeiro até o momento) e o melhor valor encontrado pelo grupo todo (população inicial). A partícula j foi penalizada, pois não respeita as restrições.

Tabela 5.3 – Valores para a população inicial

$p_1^{(j)}$	$p_1^{(l)}$	p_1^{global}
10^{10} \$/ano	8969 \$/ano	8658 \$/ano

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 5.4 mostra a rede de trocadores de calor obtida para esse exemplo após o critério de parada. O valor da função objetivo é 7884 \$/ano.

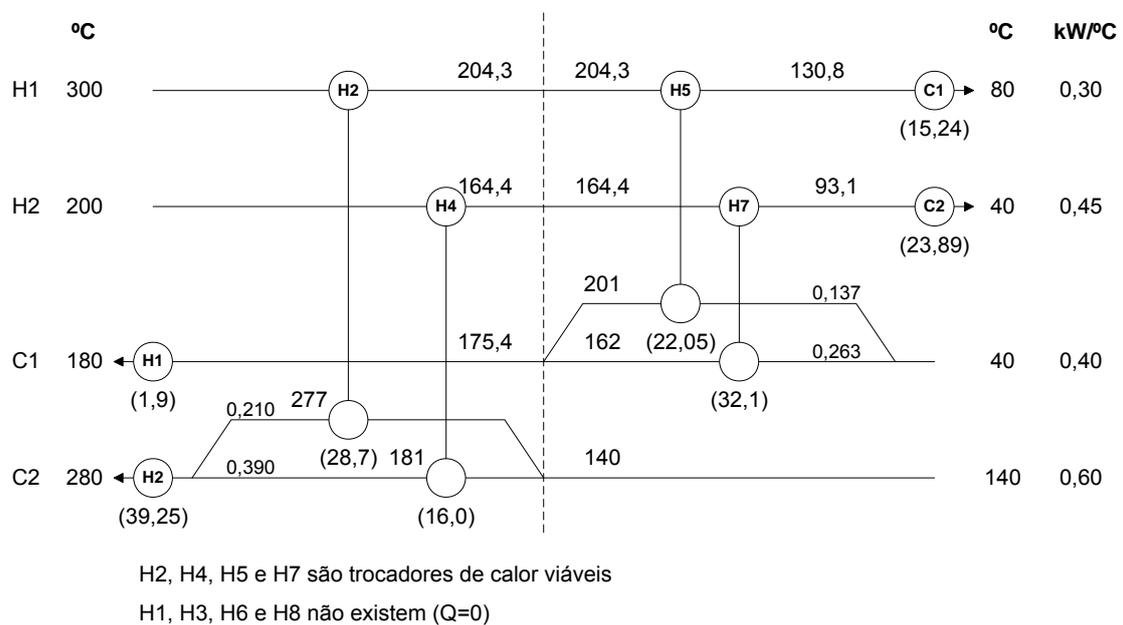


Figura 5.4 – Rede de trocadores de calor ótima

5.3 Aplicações: Síntese de RTC

Um exemplo da literatura e um caso real foram estudados para ilustrar a metodologia proposta. Esses exemplos foram testados com vários conjuntos de diferentes parâmetros para o método do enxame de partículas. Foi, então, avaliado a influência de cada conjunto no desempenho do algoritmo, conforme descrito no Capítulo 3. Os conjuntos de parâmetros que melhor se adaptaram aos problemas são apresentados na Tabela 5.4. O primeiro conjunto de parâmetros foi usado no exemplo da literatura. O segundo conjunto de parâmetros foi usado no caso real estudado.

Tabela 5.4 – Parâmetros para o método do enxame de partículas

Conjunto 01				Conjunto 02			
c1	c2	w	Npt	c1	c2	w	Npt
1,0	1,0	0,75	30	1,0	1,0	0,75	50

5.3.1 Exemplo 5.1

O primeiro caso estudado foi extraído de ZHU (1997). 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 5.5. As propriedades físicas dos fluidos, bem como os dados de custo de bombeamento não estão disponíveis para este problema. Sendo assim, o projeto detalhado dos equipamentos de troca térmica não foi feito. A área foi calculada considerando trocadores de calor contracorrente.

Aplicando a metodologia proposta, uma configuração para a rede ótima é obtida. A Figura 5.5 apresenta esta configuração. O custo da rede de trocadores de calor obtida é 1816470 \$/ano. A Tabela 5.6 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%.

Tabela 5.5 - Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 5.1

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

Custo de área = $9094 + 221A^{0.81}$, A em m².
 Custo da utilidade quente = 110 \$/kW ano.
 Custo da utilidade fria = 10 \$/kW ano.

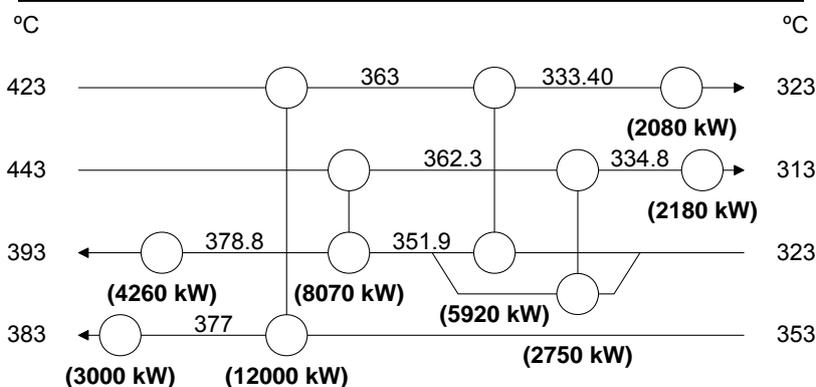


Figura 5.5 - Rede de trocadores de calor ótima para o Exemplo 5.1

Tabela 5.6 - Comparação com a literatura para o Exemplo 5.1

	ZHU (1997)	Presente Trabalho
Custo Anual Global (\$/ano)	1818031	1816470
Custo de Área (\$/ano)	1008031	975270
Custo de Utilidade (\$/ano)	810000	841200
CPU time (min) @ Pentium IV 170 GHz	*	~ 10

* Não disponível

5.3.2 Exemplo 5.2

O segundo exemplo, extraído de BENINCA (2008), é um caso real de uma planta de Eteno, mais especificamente a Planta 1 de Olefinas 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.

Para a aplicação da metodologia, considerou-se a planta sem qualquer tipo de integração energética existente (como se fosse uma planta nova). Assim, não é possível fazer uma comparação com os resultados da literatura, que propôs uma análise de flexibilidade em várias etapas da planta já existente. Os dados de custo das utilidades, custo de área e coeficiente global de troca térmica usados são os propostos por BENINCA (2008).

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 5.7 apresenta os dados das correntes, bem como os dados de custo de utilidades e área.

Tabela 5.7 – Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 5.2

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

Custo de área = $4333A^{0,6}$, \$/ano, A em m²
Custo da utilidade quente = 288,2 \$/kW ano
Custo da utilidade fria = 75,3 \$/kW ano

A configuração da rede ótima é mostrada na Figura 5.6. A Tabela 5.8 mostra o calor trocado pelos trocadores de calor. A Tabela 5.9 apresenta o custo de utilidades, o custo referente aos trocadores de calor e o tempo computacional. 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%.

Tabela 5.8 – Calor trocado pelos trocadores de calor para o Exemplo 5.2

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

Tabela 5.9 – Resumo dos resultados para o Exemplo 5.2

Custo Anual Global (\$/ano)	10753995,5
Custo de Área (\$/ano)	5945372,9
Custo de Utilidade (\$/ano)	4808622,6
CPU time (min) @ Pentium IV 170 GHz	~300

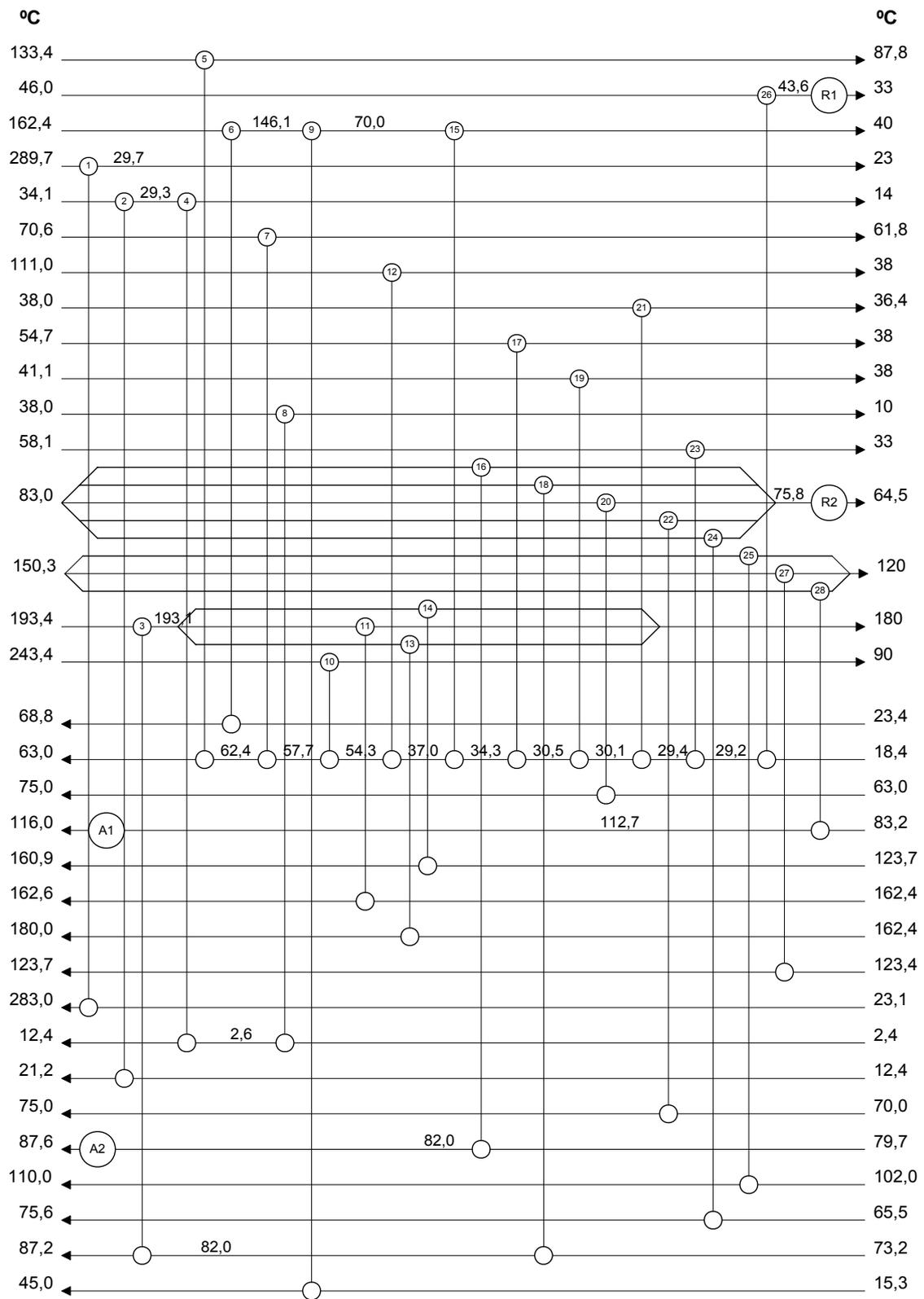


Figura 5.6 – Rede ótima para o Exemplo 5.2

5.4 Definição do Problema: Síntese de RTC com projeto detalhado dos trocadores de calor

Como já foi dito anteriormente, na síntese de redes de trocadores de calor, a área de troca térmica pode ser obtida de duas maneiras diferentes. A primeira e mais simples é considerar os trocadores de calor do tipo contracorrente, o que já foi discutido nos itens anteriores. Outra forma de obter a área de troca térmica é fazer o projeto detalhado dos equipamentos, levando-se em conta a configuração do trocador de calor do tipo casco-tubo e também a queda de pressão para os lados do casco e dos tubos. Ao se optar pela forma detalhada, a área é obtida pela metodologia discutida no Capítulo 4.

Assim, o problema de otimização passa a ser 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, o custo referente aos equipamentos de troca térmica e o custo de bombeamento, relativo à perda de carga dos equipamentos.

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 temperaturas das correntes quentes devem sempre ser maiores do que as temperaturas das correntes frias. As Equações 5.7 a 5.11 mostram o problema de otimização com a função objetivo e suas restrições. A área de troca térmica é calculada em uma rotina interna que contém a formulação apresentada no Capítulo 4, incluindo suas restrições.

Minimizar: $C_{total} = C_{area} + C_{utilidade} + C_{pump}$

Sujeito a:
$$\left\{ \begin{array}{l} (T_h^{in})_k > (T_c^{out})_k \\ (T_h^{out})_k > (T_c^{in})_k \end{array} \right. \quad (5.7)$$
 $k = 1, \dots, \text{número de equipamentos}$

$$C_{area} = \sum_k aa_1 \cdot (A_k)^{aa_2} \quad (5.8)$$

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

$$C_{utilidade} = C_{HU} \cdot HU + C_{CU} \cdot CU \quad (5.9)$$

$$C_{pump} = \sum_1^k aa_3 \cdot \left(\frac{\Delta P^t \cdot m^t}{\rho^t} + \frac{\Delta P^s \cdot m^s}{\rho^s} \right)_k \quad (5.10)$$

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

$$k^{MAX} = N \cdot ncq \cdot ncf \quad (5.11)$$

5.4.1 Algoritmo proposto

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 de partículas na população (Npt)
 - c1, c2 e ω
 - Valores máximo e mínimo das variáveis
 - Dados das correntes quentes e frias, dados de custo de área e das utilidades, propriedades física das correntes e custos de bombeamento
- ii) Geração aleatória das partículas iniciais

Não há critério algum para essa geração, a não ser os limites das variáveis. A geração é feita totalmente 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 novos $[0, Q_{\max}]$

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 5.6
- A área de troca térmica: área do trocador com projeto detalhado do equipamento – Subrotina com o Algoritmo mostrado no Capítulo 4, item 4.3.1
- Função Objetivo, Equações 5.7 a 5.11

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 3.2 e 3.3. 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 função objetivo é penalizada.

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

5.5 Aplicações: Síntese de RTC com projeto detalhado dos trocadores de calor

Dois exemplos da literatura foram estudados para ilustrar a metodologia proposta. Esses exemplos foram testados com vários conjuntos de diferentes parâmetros para o método do enxame de partículas. Foi, então, avaliado a influência de cada conjunto no desempenho do algoritmo, conforme descrito no Capítulo 3. O conjunto de parâmetros que melhor se adaptou aos problemas é apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Parâmetros para o método do enxame de partículas

Conjunto 01			
c1	c2	w	Npt
1,0	1,0	0,75	30

5.5.1 Exemplo 5.3

O primeiro exemplo foi apresentado por RAVAGNANI e CABALLERO (2007). Neste caso, a síntese de redes de trocadores de calor considera o projeto detalhado dos equipamentos de troca térmica pois as propriedades físicas das correntes estão disponíveis. O problema tem duas correntes quentes, duas correntes frias, uma

utilidade quente e uma utilidade fria. Os dados de temperatura e capacidade calorífica das correntes, suas propriedades físicas, assim como os dados de custo de área, utilidades e bombeamento estão mostradas na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Dados das correntes de dados de custo para o Exemplo 5.3

Corrente	T_{in} (K)	T_{out} (K)	m (kg/s)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	κ (W/mK)	ΔP (kPa)	r_d (W/mK)
H1	368	348	8,15	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H2	353	348	81,5	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C1	303	363	16,3	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C2	333	343	20,4	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
UQ	500	500							
UF	300	320							

Custo de área = $1000 + 60A^{0,6}$, A em m²
 Custo de Bombeamento = $0.7 (\Delta P^t m^t / \rho^t + \Delta P^s m^s / \rho^s)$, ΔP em Pa, m em kg/s e ρ em kg/m³
 Custo da utilidade quente = 60 \$/kW ano
 Custo da utilidade fria = 6 \$/kW ano

Aplicando a metodologia proposta, a rede de trocadores de calor ótima foi obtida e é mostrada na Figura 5.7. O valor de do custo anual global é 96007 \$/ano. A Tabela 5.12 apresenta os detalhes de projeto dos equipamentos, que estão todos de acordo com o padrão TEMA. A Tabela 5.13 apresenta a comparação dos resultados com os da literatura.

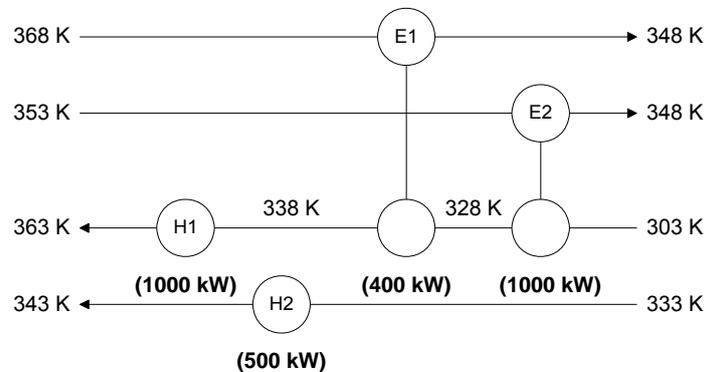


Figura 5.7 – Rede de trocadores de calor ótima para o Exemplo 5.3

Tabela 5.12 - Detalhes de projeto dos trocadores de calor para o Exemplo 5.3

	E1	E2
área (m ²)	36,76	73,43
Calor Trocado (W)	400	1000
N _{tp}	4	1
NS	1	1
D _s (m)	0,43815	0,6858
D _{ott} (m)	0,4064	0,64453
N _t	168	286
N _b	12	7
d _{ex} (mm)	0,01905	0,0254
d _{in} (mm)	0,017	0,0225
p _t (mm)	0,0254	0,03175
L (m)	3,658	3,658
h _s (W/m ² K)	1662,34	964,46
h _t (W/m ² K)	1212,61	995,65
U _c (W/m ² K)	524,37	390,29
U _d (W/m ² K)	441,36	334,62
ΔP _t (kPa)	9299,32	1165,84
ΔP _s (kPa)	1563,14	418,88
r _d (m ² KW)	3,58e-04	4,26e-04
Arranjo dos tubos	Quadrado	Quadrado
Alocação do fluido quente	Tubo	Tubo

Tabela 5.13 - Comparação dos resultados com a literatura para o Exemplo 5.3

	RAVAGNANI e CABALLERO (2007)	Trabalho atual
Custo Anual Global (\$/ano)	96013,65	96007,39
Custo de Área (\$/ano)	5844,09	5783,23
Custo de Bombeamento (\$/ano)	169,56	224,16
Custo de Utilidade (\$/ano)	90000,00	90000,00
CPU time (min) @ Pentium IV 170 GHz	*	~ 80

* Não disponível

A taxa de sucesso do método do enxame de partículas para esse exemplo foi de 89%.

5.5.2 Exemplo 5.4

O segundo exemplo usado foi adaptado de um caso apresentado por CASTILLO *et al.* (1998). Seis correntes quentes e cinco correntes frias são consideradas, bem como uma corrente de utilidade quente e uma de utilidade fria.

Nesse exemplo não estavam disponíveis os dados de custo de bombeamento, bem como as propriedades físicas das correntes. Porém, com o intuito de demonstrar a aplicabilidade da metodologia com o projeto detalhado dos equipamentos de troca térmica em um exemplo com mais do que quatro correntes, se fez necessário propor esses dados. A Tabela 5.14 apresenta os dados de temperatura de entrada e saída das correntes, as propriedades físicas, vazão, bem como os dados de custo de utilidades, área e bombeamento.

Tabela 5.14 – Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 5.4

Corrente	T_{in} (K)	T_{out} (K)	m (kg/s)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	κ (W/mK)	ΔP (kPa)	r_d (W/mK)
H1	1113	313	2,033	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H2	349	318	1,909	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H3	323	313	0,315	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H4	453	350	0,249	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H5	453	452	119,28	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H6	363	318	1,249	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C1	297	298	134,39	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C2	298	343	0,219	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C3	308	395	1,519	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C4	363	453	0,248	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C5	453	454	1051,79	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
UQ	503	503							
UF	293	313							

Custo de área = $9094 + 485A^{0.81}$, A em m^2
 Custo de Bombeamento = $0.7 (\Delta P^t m^t / \rho^t + \Delta P^s m^s / \rho^s)$, ΔP em Pa, m em kg/s e ρ em kg/m³
 Custo da utilidade quente = 110 \$/kW ano
 Custo da utilidade fria = 15 \$/kW ano

A configuração da rede ótima é mostrada na Figura 5.8. A Tabela 5.15 mostra a configuração dos trocadores de calor. A Tabela 5.16 apresenta a comparação dos resultados obtidos por este trabalho com a literatura. Nessa mesma tabela, pode-se ver a comparação dos custos da rede com o projeto detalhado e sem o projeto detalhado dos trocadores de calor.

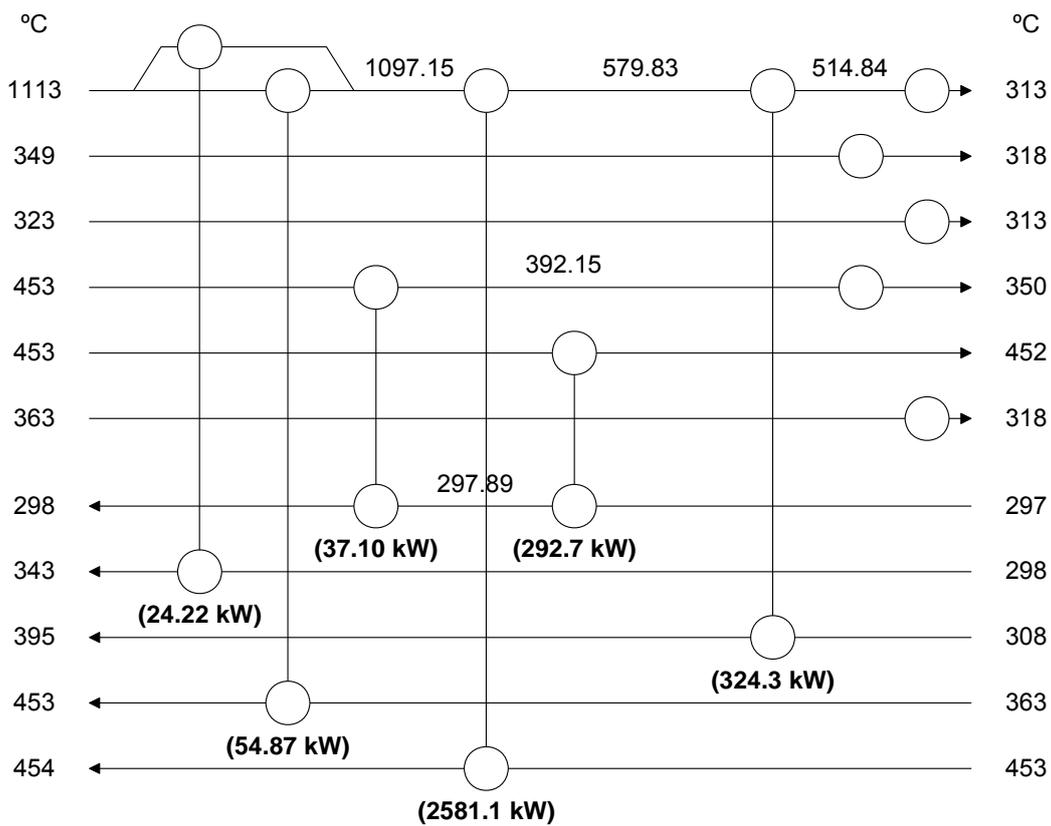


Figura 5.8 – Rede ótima para o Exemplo 5.4

O valor do custo global anual da rede de trocadores de calor obtido aplicando-se a metodologia proposta sem o projeto detalhado dos equipamentos é 139.777 \$/ano. Considerando os custos de bombeamento referentes ao projeto detalhado dos trocadores de calor, o custo da rede é 152.120 \$/anos.

Tabela 5.15 – Detalhes dos Equipamentos de troca térmica para o Exemplo 5.4

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
área (m ²)	0,23	0,27	2,88	6,79	3,31	0,36
L (m)	2,438	2,438	2,438	2,438	2,438	3,048
D _s (m)	0,205	0,205	0,489	0,686	0,533	0,205
N _t	16	14	148	349	170	20
d _{ex} (m)	0,0191	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0191
d _{in} (m)	0,0142	0,0193	0,0221	0,0225	0,0221	0,0142
h _s (W/m ² K)	243,81	238,14	81,38	244,81	4074,85	1016,41
h _t (W/m ² K)	1939,92	2395,75	2800,81	2724,39	2326,12	2399,69
U _c (W/m ² K)	190,66	191,96	76,14	204,46	878,05	501,30
U _d (W/m ² K)	13,20	28,96	10,58	120,84	57,13	454,76
ΔP _t (kPa)	38693,30	67766,48	17078,80	16194,09	10861,74	47523,62
ΔP _s (kPa)	3,58	3,91	0,45	13,83	30509,97	168,78
r _d (m ² KW)	7,048E-02	2,931E-02	8,133E-02	3,384E-03	1,636E-02	2,041E-04
Arranjo dos tubos	Triangular	triangular	Quadrado	triangular	Quadrado	Quadrado
Alocação do fluido quente	Tubo	Tubo	Casco	Casco	Casco	Casco

Tabela 5.16 - Comparação com a literatura para o Exemplo 5.4

	CASTILLO <i>et al.</i> (1998)	Trabalho Atual Sem Projeto	Trabalho Atual Com Projeto
Custo Anual Global (\$/ano)	141554,88	139675,40	152120,31
Custo de Área (\$/ano)	121699,02	119820,60	117611,64
Custo de Bombeamento (\$/ano)	**	**	14653,86
Custo de Utilidade (\$/ano)	19855,86	19854,80	19854,80
CPU time (min) @ Pentium IV 170 GHz	*	~ 80	~540

* Não disponível

** Não se aplica

5.6 Comentários

Neste capítulo uma metodologia para obter a síntese de redes de trocadores de calor é 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, utilidades e bombeamento, ou somente com área de troca térmica e utilidades, dependendo da disponibilidade das propriedades físicas das correntes e dos parâmetros de custo.

O método é baseado no modelo de superestrutura similar ao de YEE e GROSSMANN (1990). Porém, diferentemente dos autores, o número de estágios é visto como uma variável a ser otimizada e não como um parâmetro fixo previamente definido. Aproximações para calcular a área e simplificações na LMDT também não são consideradas.

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 estudados. 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 dimensão, por não ter sido encontrado nenhum exemplo na literatura. Entretanto, um caso real foi utilizado para mostrar a capacidade do método.

Além da síntese de redes de trocadores de calor propriamente dita, foi proposta uma metodologia para incorporar à síntese o projeto detalhado dos trocadores de calor, seguindo o padrão TEMA.

Dois casos da literatura foram estudados. Analisando-se os resultados é possível concluir que a metodologia proposta melhora os resultados obtidos para a rede de trocadores de calor sem o projeto detalhado dos trocadores de calor. Além disso, os valores obtidos neste trabalho são melhores que os resultados encontrados na literatura, pois desconsiderando-se os custos de bombeamento (não considerados pelos autores citados) o custo da rede obtido é menor do que o apresentado na literatura.

Vale ressaltar que para todos os exemplos estudados, os modelos de otimização usados pelos autores na literatura são baseados em MINLP e resolvidos usando programação matemática.

Em todos os casos o tempo computacional foi considerado pequeno ou suportável. 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.

5.7 Referências

AHMAD, S., 1985, *Heat Exchanger Networks: Cost Tradeoffs in Energy and Capital*, Tese de D.Sc. – Faculty of Technology, University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester.

BENINCA, M., 2008, *Integração Energética de uma Planta de Eteno com Aspectos de Flexibilidade: Aplicação da Análise Pinch em Conjunto com a Otimização Matemática*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

CASTILLO, E., ACEVEDO, L. e REVERVERI, A., 1998, “Cleaner Production of Nitric Acid by Heat Transfer Optimization: A case study”, *Chem. Biochem. Eng.*, 12, 157 – 165.

MIZUTANI, F. T., PESSOA, F. L. P., QUEIROZ, E. M., HAUAN, S., GROSSMANN, I. E., 2003, “Mathematical Programming Model for Heat Exchanger Network Synthesis Including Detailed Heat Exchanger Designs. 1. Shell-and-Tube Heat Exchanger Design”, *In. Eng. Chem. Res.*, n. 42, pp. 4009-4018.

RAVAGNANI, M. A. S. S. e CABALLERO, J. A., 2007, "Optimal heat exchanger network synthesis with the detailed heat transfer equipment design". *Computers and Chemical Engineering*, 31, 1432 – 1448.

YEE, T. F. e GROSSMANN, I. E., 1990, "Simultaneous Optimization Models for Heat Integration – II Heat Exchanger Network Synthesis", *Comp. Chem. Eng.*, 14(10): 1165-1184.

ZHU, X., 1997, "Automated Design Method for Heat Exchanger Network Synthesis Using Block Decomposition and Heuristic Rules", *Comput. Chem. Eng.*, 21, 1095 – 1104.

6. RETROFIT

6.1 Introdução

Os estudos envolvendo redes de trocadores de calor podem, de acordo com o objetivo a ser alcançado, abordar o reprojeto (*retrofit*) de redes já existentes. Atualmente a maioria dos projetos de novos processos já leva em consideração os conceitos sobre integração energética durante a etapa de síntese. Porém, como já mencionado no Capítulo 1, a exploração desse assunto se faz necessária visto que muitos processos antigos não passaram pela etapa de integração energética em seu projeto inicial. Além disso, os processos atuais sofrem muitas modificações, necessitando assim, com o passar do tempo, de um reprojeto de sua rede de trocadores de calor original, o *retrofit*. Com o intuito de melhorar seu consumo de energia, os processos em operação devem sofrer algumas modificações estruturais, que por sua vez representam aumentos em seu custo fixo (novas áreas de troca térmica, novas tubulações *etc.*).

Segundo BRIONES e KOKOSIS (1999), embora os problemas de *retrofit* representem uma grande parte dos projetos industriais, a tecnologia de *retrofit* comparada com o projeto totalmente original (síntese) apresenta um progresso muito menos intenso, tanto nas abordagens via programação matemática, quanto nas abordagens que utilizam conceitos termodinâmicos.

Segundo WESTERBERG (1989) e YEE e GROSSMANN (1991), o trabalho sistemático em projetos de *retrofit* é consideravelmente mais árduo do que o trabalho em uma síntese envolvendo projeto totalmente original, devido ao fato de que se deve considerar a reutilização de unidades já existentes juntamente com o projeto de novas unidades.

Trabalhos voltados para o *retrofit* em redes de trocadores de calor começaram a ser publicados na década de 80 com abordagens que utilizam conceitos termodinâmicos. TJOE e LINNHOFF (1986) foram os primeiros a realizar um estudo sobre *retrofit* calculando a área ótima de troca térmica baseando-se na tecnologia *Pinch*. Os autores relacionaram essa área ótima com a área existente na rede, porém sem considerar a disposição dos trocadores.

Os métodos matemáticos começaram a ser utilizados em cálculos de *retrofit* a partir dos estudos de CIRIC e FLOUDAS (1989), que apresentaram uma abordagem em dois estágios para o problema de *retrofit* de redes de trocadores de calor. Em um primeiro estágio, uma formulação MILP seleciona os cruzamentos das correntes de forma a minimizar os custos de investimento. Esta primeira formulação baseia-se em estimativas de custos de área. Em um segundo estágio, uma formulação NLP otimiza a rede com as trocas definidas na etapa anterior.

Em 1990, YEE e GROSSMAN propuseram um modelo que aplicava MILP para estabelecer as modificações estruturais da rede de trocadores de calor.

Em seguida vieram os trabalhos de CIRIC e FLOUDAS (1990) e YEE e GROSSMAN (1991). Todos eles utilizam o conceito de superestruturas e cujos modelos tem a formulação de problemas MINLP.

Segundo PINTO e ZEMP (2006), a partir destes trabalhos os estudos ficaram divididos em dois grandes grupos: os que utilizam conceitos termodinâmicos (Análise *pinch*), com maior interação do usuário, e os que aplicam uma otimização matemática, com resultados mais precisos.

No grupo dos que utilizam conceitos termodinâmicos tem-se ainda os trabalhos de ASANTE e ZHU (1996) e SILVA e ZEMP(1998).

A linha dos métodos matemáticos encontra-se ainda presente em SINGH e CASTILLO (2002), MIZUTANI (2003) e BJORK e NORDMAN (2005).

Mesclando conceitos termodinâmico e métodos matemáticos, ZHU e ASANTE (1999) desenvolveram uma metodologia levando em conta os custos de modificações, tanto nas utilidades de processo, quanto na topologia da rede. Primeiramente, são identificados os *Pinchs* da rede, ou seja, os trocadores que “estrangulam” o processo devido a sua iminente violação do diferencial mínimo de temperatura. O processo de identificação de gargalos da rede é realizado via formulação LP, na qual, basicamente, busca-se a máxima recuperação de energia sem modificações na topologia da rede. Em seguida, uma formulação MILP calcula modificações na topologia da rede (inserções de novos trocadores, trocas de posicionamento de unidades e divisões de correntes) mais uma vez visando maximizar a recuperação de energia, sem levar em conta os custos de instalação destas modificações. As propostas de modificação na rede original podem ser adotadas ou descartadas, pelo usuário, numa etapa posterior de avaliação. Finalmente, as propostas escolhidas são otimizadas em função dos custos totais, operacionais e fixos, com as suas topologias mantidas inalteradas, ou seja, as variáveis de otimização nesta etapa são as vazões das divisões e temperaturas das correntes mantendo-se a estrutura da rede fixa.

É importante observar que ZHU e ASANTE (1999) não levaram em consideração os custos de bombeamento nas propostas de modificações da rede. NIE e ZHU (1999) aproveitam a proposta do trabalho anterior, porém introduzem a influência desses custos no *retrofit*.

Mais recentemente, PANJEH SHAHI *et al.* (2008) aplicaram os conceitos de *retrofit* aliados a Análise *Pinch* em um caso específico de uma planta de processamento de amônia. NORDMAN e BERNTSSON (2009 a,b) também usando conceitos termodinâmicos, propuseram um método gráfico para prever possíveis alternativas para o *retrofit*.

6.2 Definição do Problema: *Retrofit*

O *retrofit* de redes de trocadores de calor visa reduzir o consumo de energia nos processos industriais em operação aproveitando os trocadores de calor já existentes na rede e acrescentando novas unidades de troca térmica. Esses trocadores são aproveitados nos mesmos cruzamentos em que estão instalados ou em outras posições da futura rede de trocadores de calor.

Neste capítulo, um método para o *retrofit* que proponha uma nova rede de trocadores de calor, aproveitando os trocadores já existentes é apresentado. O método baseia-se no modelo de superestrutura apresentado por YEE e GROSSMANN (1990) da mesma forma que foi abordado no Capítulo 5, para a síntese de redes de trocadores de calor novas. A diferença está na condição de incluir obrigatoriamente, dentre as possibilidades de troca, todos os trocadores existentes.

O problema consiste em determinar uma rede de trocadores de calor tendo-se um conjunto de correntes quentes e frias com suas temperaturas de entrada e saída e suas respectivas vazões mássicas especificadas. Além disso, devem ser conhecidas também as utilidades quentes e frias com as suas respectivas temperaturas.

Para a rede de trocadores de calor existente devem ser conhecidos os cruzamentos de cada trocador de calor existente, assim como as suas respectivas áreas de troca térmica. Ainda devem ser levados em conta os dados de custos para o consumo de utilidades da rede e para a adição de novos trocadores.

Da mesma forma que para a síntese de redes novas, o *retrofit* de redes de trocadores de calor é definido como um problema de minimização do custo da rede gerada, sujeito a algumas restrições. Uma função objetivo para minimização do custo total é proposta e os custos a serem minimizados são os custos de utilidade empregados na rede de trocadores de calor e os custos com o acréscimo de novos

trocadores. As restrições do problema de otimização são as restrições termodinâmicas das trocas térmicas.

A área de troca térmica é obtida pela Equação 6.1.

$$A = \frac{Q}{U \cdot \text{LMDT}} \quad (6.1)$$

As Equações 6.2 a 6.5 mostram o problema de otimização com a função objetivo e suas restrições.

Minimizar: $C_{\text{total}} = C_{\text{area}} + C_{\text{utilidade}}$

Sujeito a:
$$\begin{cases} (T_h^{in})_k > (T_c^{out})_k \\ (T_h^{out})_k > (T_c^{in})_k \end{cases} \quad (6.2)$$

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

Em que:

$$C_{\text{area}} = \sum_k aa_1 \cdot (A)^{aa_2} \quad (6.3)$$

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

$$C_{\text{utilidade}} = C_{\text{HU}} \cdot \text{HU} + C_{\text{CU}} \cdot \text{CU} \quad (6.4)$$

$$k^{MAX} = N \cdot ncq \cdot ncf \quad (6.5)$$

6.2.1 Comentários Gerais sobre a Implementação Computacional

No problema de otimização do *retrofit* de redes de trocadores de calor, cinco variáveis são geradas aleatoriamente no início da otimização, sendo modificadas a cada iteração pelas Equações 3.2 e 3.3. Cada partícula é formada pelas seguintes variáveis: fração de divisão da vazão das correntes quentes, fração de divisão da vazão das correntes frias, número de estágios, posição em que os trocadores existentes serão alocados, calor trocado pelos demais trocadores.

Após a geração da partícula, a área de cada trocador de calor novo 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, sejam elas 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 6.6 é usada para calcular as temperaturas de saída das correntes quente e fria de cada trocador de calor novo, pois o calor trocado é conhecido. Nos trocadores existentes, como a área de troca térmica já está previamente determinada, usa-se a Equação 6.6 aliada à Equação 6.1, num processo iterativo.

Da mesma forma como foi considerado no Capítulo 5, neste caso também simplificação ou aproximação alguma foi feita.

$$Q = CP_h \cdot \Delta T_h = CP_c \cdot \Delta T_c \quad (6.6)$$

6.2.2 Algoritmo Proposto

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)
 - c1, c2 e w
 - Valores máximo e mínimo das variáveis
 - Dados das correntes quentes e frias, dados de custo de área e das utilidades, área dos trocadores existentes
- ii) Geração inicial aleatória das partículas

Não há critério algum para essa geração, a não ser os limites das variáveis. A geração é feita totalmente 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
- Posição em que os trocadores existentes serão alocados $[1,k^{MAX}]$
- Calor trocado pelos trocadores novos $[0,Q_{max}]$

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 – Equações 6.1 e 6.6.
- Função Objetivo, Equação 6.2 a 6.5

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 3.2 e 3.3. 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 função objetivo é penalizada.

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

6.3 Aplicação: *Retrofit*

Para verificar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida para o *retrofit*, um caso foi estudado. O exemplo foi testado com vários conjuntos de diferentes parâmetros para o método do enxame de partículas. Foi, então, avaliada a influência de cada conjunto na performance do algoritmo, conforme descrito no Capítulo 3. O conjunto de parâmetros que melhor se adaptou a este tipo de problema é apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros para o método do enxame de partículas

c1	c2	w	Npt
1,0	1,0	0,65	30

6.3.1 Exemplo 6.1

Foi utilizado parte de um exemplo apresentado por PANJEH SHAHI *et al.* (2008). A rede de trocadores de calor atual, para esse problema, é formada por dois trocadores de calor, três aquecedores e dois resfriadores, que consomem 23.498 kW de utilidade fria e 1.708 kW de utilidade quente. Para este trabalho foi assumido que o coeficiente de transferência de calor (h) é 0,2 kW/m²°C para todas as correntes. A Figura 6.1 mostra a rede existente e a Tabela 6.2 mostra o calor trocado e os valores calculados da área dos trocadores de calor existentes.

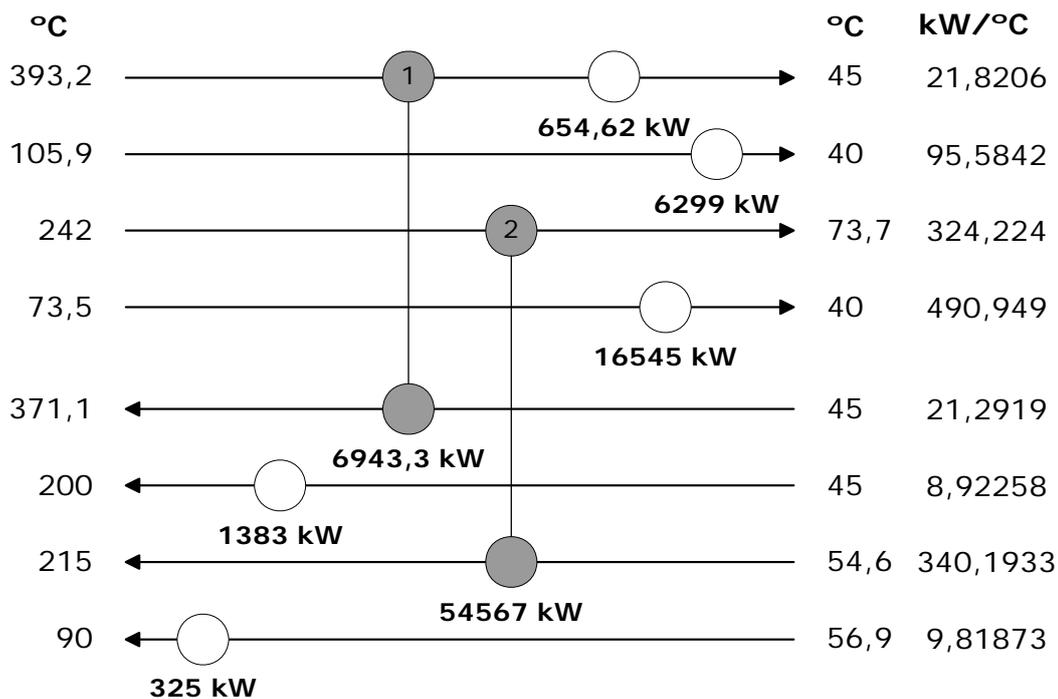


Figura 6.1 – Rede atual para o Exemplo 6.1

Tabela 6.2 – Calor trocado e área para os trocadores existentes

Trocador	Q (kW)	Área (m ²)
1	6943	2686
2	54567	23909

Os custos das utilidades quente e fria são, respectivamente, 23 \$/kW/ano e 1,52 \$/kW/ano. Os custos dos trocadores adicionais foram calculados pela Equação 6.7, com A em m².

$$C_{\text{área}} (\$) = 3764,3 + 752,9 \cdot A^{0,7} \quad (6.7)$$

Após a aplicação da metodologia, tem-se uma nova rede de trocadores de calor. A rede obtida tem um aquecedor, três resfriadores e quatro trocadores de calor, sendo dois trocadores novos e dois antigos que foram reaproveitados. O calor trocado e a área a ser acrescentada na rede, referente aos dois trocadores de calor novos, bem como seu custo, podem ser vistos na Tabela 6.3.

O custo total de investimento da nova rede de trocadores de calor obtida é de \$ 68.068. Com ela tem-se uma economia de utilidades de 21.478 \$/ano. A Tabela 6.4 mostra o consumo e o custo de utilidades para a rede atual e para a rede proposta. O tempo de retorno do investimento, baseado no custo de investimento e na economia de utilidade, seria 3,2 anos. A Figura 6.2 mostra a nova rede obtida, com os trocadores novos e antigos (trocadores destacados).

O tempo computacional em um microcomputador Pentium IV 170 GHz foi de, aproximadamente, 500 minutos. A taxa de sucesso do método do enxame de partículas para esse exemplo foi de 32%.

Tabela 6.3 – Calor trocado, área e custo para os trocadores novos

Trocador	Situação	Q (kW)	Área (m ²)	Custo (\$)
1	Atual	6110	2686	*
2	Atual	54567	23909	*
3	Novo	325	115	24656
4	Novo	1383	288	43412

* O trocador já existe e não tem custo

Tabela 6.4 - Consumo e custo de utilidades para o Exemplo 6.1

	Atual		Nova	
	Consumo (kW)	Custo (\$/ano)	Consumo (kW)	Custo (\$/ano)
UQ	1708	39284	832	19136
UF	23498	35717	22623	34387
Total		75001		53523

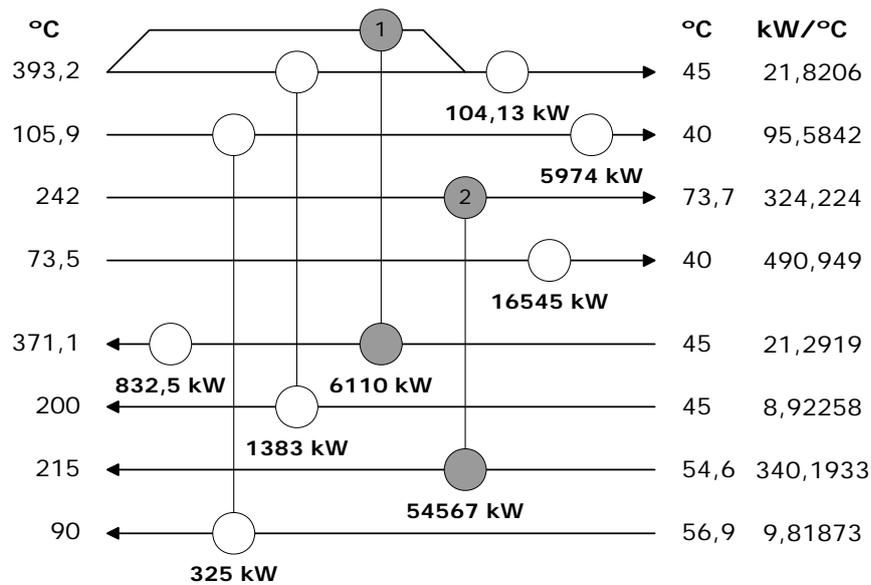


Figura 6.2 – Rede após metodologia proposta para *retrofit* para o Exemplo 6.1

6.4 Definição do Problema: *Retrofit* com projeto detalhado dos trocadores de calor

Como já foi dito anteriormente, no *retrofit* de redes de trocadores de calor, a área de troca térmica pode ser obtida de duas maneiras diferentes. A primeira e mais simples é considerar os trocadores de calor do tipo contracorrente, o que já foi discutido nos itens anteriores. Outra forma de obter a área de troca térmica é fazer o projeto detalhado dos equipamentos, levando-se em conta a configuração do trocador de calor do tipo casco-tubo e também a queda de pressão para os lados do casco e dos tubos. Ao se optar pela forma detalhada, a área é obtida pela metodologia discutida no Capítulo 4.

Assim, o problema de *retrofit* de redes de trocadores de calor passa a ser definido como nas Equações 6.8 a 6.12. A área de troca térmica é calculada em uma rotina interna que contém a formulação apresentada no Capítulo 4, incluindo suas restrições.

Minimizar: $C_{total} = C_{area} + C_{utilidade}$

Sujeito a:
$$\begin{cases} (T_h^{in})_k > (T_c^{out})_k \\ (T_h^{out})_k > (T_c^{in})_k \end{cases} \quad (6.8)$$

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

Em que:

$$C_{area} = \sum_k aa_1 \cdot (A)^{aa_2} \quad (6.9)$$

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

$$C_{utilidade} = C_{HU} \cdot HU + C_{CU} \cdot CU \quad (6.10)$$

$$C_{pump} = \sum_1^k aa_3 \cdot \left(\frac{\Delta P^t \cdot m^t}{\rho^t} + \frac{\Delta P^s \cdot m^s}{\rho^s} \right)_k \quad (6.11)$$

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

$$k^{MAX} = N \cdot ncq \cdot ncf \quad (6.12)$$

6.5 Aplicação: Retrofit com projeto detalhado dos trocadores de calor

Para verificar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida para o *retrofit* com o projeto detalhado dos trocadores de calor, um exemplo foi estudado. O exemplo foi testado com vários conjuntos de diferentes parâmetros para o método do enxame de partículas. Foi, então, avaliada a influência de cada conjunto na performance do algoritmo, conforme descrito no Capítulo 3. O conjunto de parâmetros que melhor se adaptou a este tipo de problema é apresentado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Parâmetros para o método do enxame de partículas

c1	c2	w	Npt
1,0	1,0	0,65	30

6.5.1 Exemplo 6.2

Neste caso, o mesmo exemplo de CASTILLO *et al.* (1998), utilizado no Capítulo 5 (Exemplo 3) foi utilizado. Como os dados do problema são para o caso de uma rede totalmente nova, foi necessário propor uma rede existente. A rede de trocadores de calor atual proposta é formada por três trocadores de calor, seis aquecedores e cinco resfriadores, que consomem 3.100 kW de utilidade quente e 4.375 kW de utilidade fria. Os dados das correntes, bem como os dados de custo para os trocadores adicionais são os mesmos apresentados na Tabela 5.10 e mostrados novamente na Tabela 6.6. A Figura 6.3 mostra a rede existente proposta e a Tabela 6.7 mostra o calor trocado e os valores calculados da área dos trocadores de calor existentes.

Após a aplicação da metodologia, tem-se uma nova rede de trocadores de calor. A rede obtida tem seis trocadores de calor, cinco resfriadores e nenhum aquecedor. Dos trocadores de calor, três são novos e três são os trocadores atuais reaproveitados em outras trocas. As áreas de troca térmica dos trocadores novos foram calculadas pela metodologia proposta pelo Capítulo 4, levando-se em conta o detalhamento do trocador de calor. O calor trocado e a área a ser acrescentada na rede, referente aos três trocadores de calor novos, bem como seu custo, podem ser vistos na Tabela 6.8. A Tabela 6.9 mostra as características dos trocadores de calor.

O custo total de investimento da nova rede de trocadores de calor obtida é de \$29885,95. Com ela tem-se uma economia de quase 90% do consumo de utilidades. A Tabela 6.10 mostra o consumo e o custo de utilidades para a rede atual e para a rede proposta. O tempo de retorno do investimento, baseado no custo de investimento e na economia de utilidade, seria de apenas alguns meses. A Figura 6.4 mostra a nova rede obtida, com os trocadores novos e antigos (trocadores destacados).

Tabela 6.6 – Dados das correntes e dados de custo para o Exemplo 6.2

Corrente	T_{in} (K)	T_{out} (K)	m (kg/s)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	κ (W/mK)	ΔP (kPa)	r_d (W/mK)
H1	1113	313	2,033	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H2	349	318	1,909	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H3	323	313	0,315	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H4	453	350	0,249	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H5	453	452	119,28	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
H6	363	318	1,249	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C1	297	298	134,39	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C2	298	343	0,219	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C3	308	395	1,519	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C4	363	453	0,248	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
C5	453	454	1051,79	2,4 E-4	634	2454	0,114	68,95	1,7 E-4
UQ	503	503							
UF	293	313							

Custo de área = $9094 + 485A^{0.81}$, A em m²
 Custo de Bombeamento = $0.7 (\Delta P^t m^t / \rho^t + \Delta P^s m^s / \rho^s)$, ΔP em Pa, m em kg/s e ρ em kg/m³
 Custo da utilidade quente = 110 \$/kW ano
 Custo da utilidade fria = 15 \$/kW ano

Tabela 6.7 – Calor trocado e área dos trocadores existentes

Trocador	Q (kW)	Área (m ²)
1	1476,3	5,69
2	67,1	2,55
3	9,2	0,41

Tabela 6.8 – Calor, área e custo dos trocadores da rede nova

Trocador	Situação	Q (kW)	Área (m ²)	Custo (\$)
1	Atual	261,7	5,69	*
2	Atual	329,8	2,55	*
3	Atual	54,9	0,41	*
4	Novo	2581,1	6,80	11382,53
5	Novo	24,3	0,23	9241,48
6	Novo	62,8	0,27	9261,94

* O trocador já existe e não tem custo

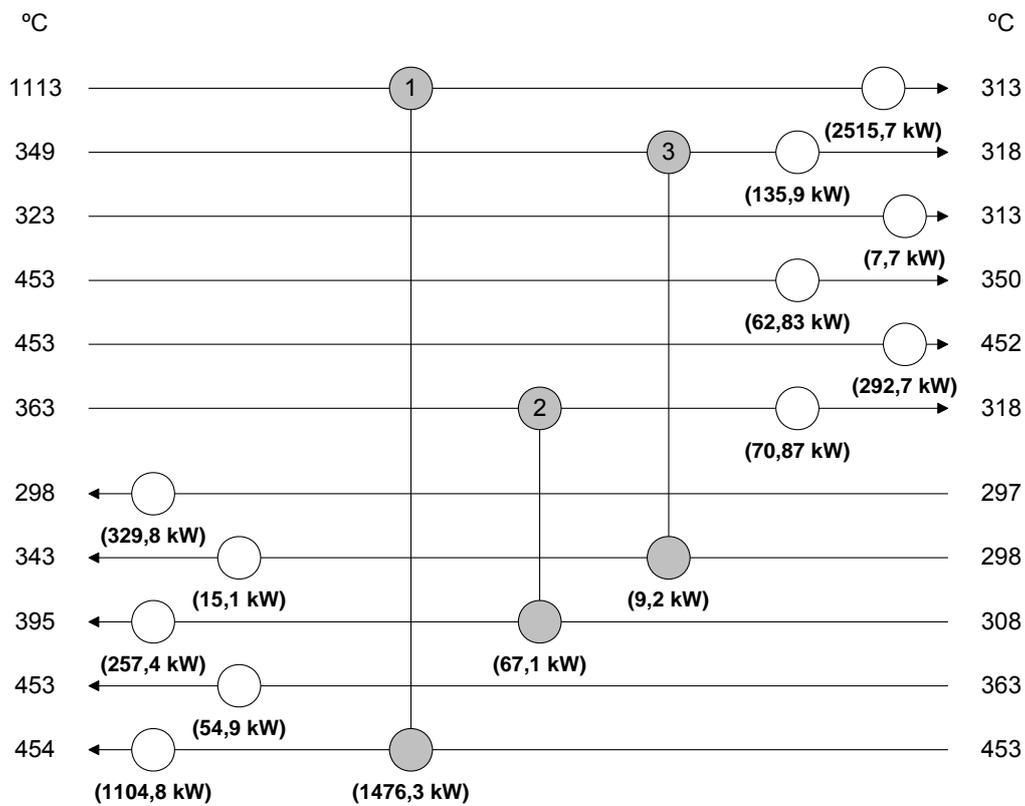


Figura 6.3 – Rede de trocadores de calor atual para o Exemplo 6.2

Tabela 6.9 – Detalhes dos trocadores de calor novos

	E4	E5	E6
L (m)	2,438	2,438	2,438
D_s (m)	0,686	0,205	0,205
N_t	349	16	14
d_{ex} (m)	0,0254	0,0191	0,0254
d_{in} (m)	0,0225	0,0122	0,0170
ΔP_t (kPa)	16587,14	63668,32	67854,25
ΔP_s (kPa)	33,29	3,58	3,91
r_d (m ² KW)	3,396E-03	1,171E-02	7,710E-04
Arranjo dos tubos	triangular	triangular	triangular
Alocação do fluido quente	Casco	Tubo	Tubo

Tabela 6.10 - Consumo e custo de utilidades

	Atual		Nova	
	Consumo (kW)	Custo (\$/ano)	Consumo (kW)	Custo (\$/ano)
UQ	1762	193820	0	0
UF	3086	46290	1416	21240
Total		240110		21240

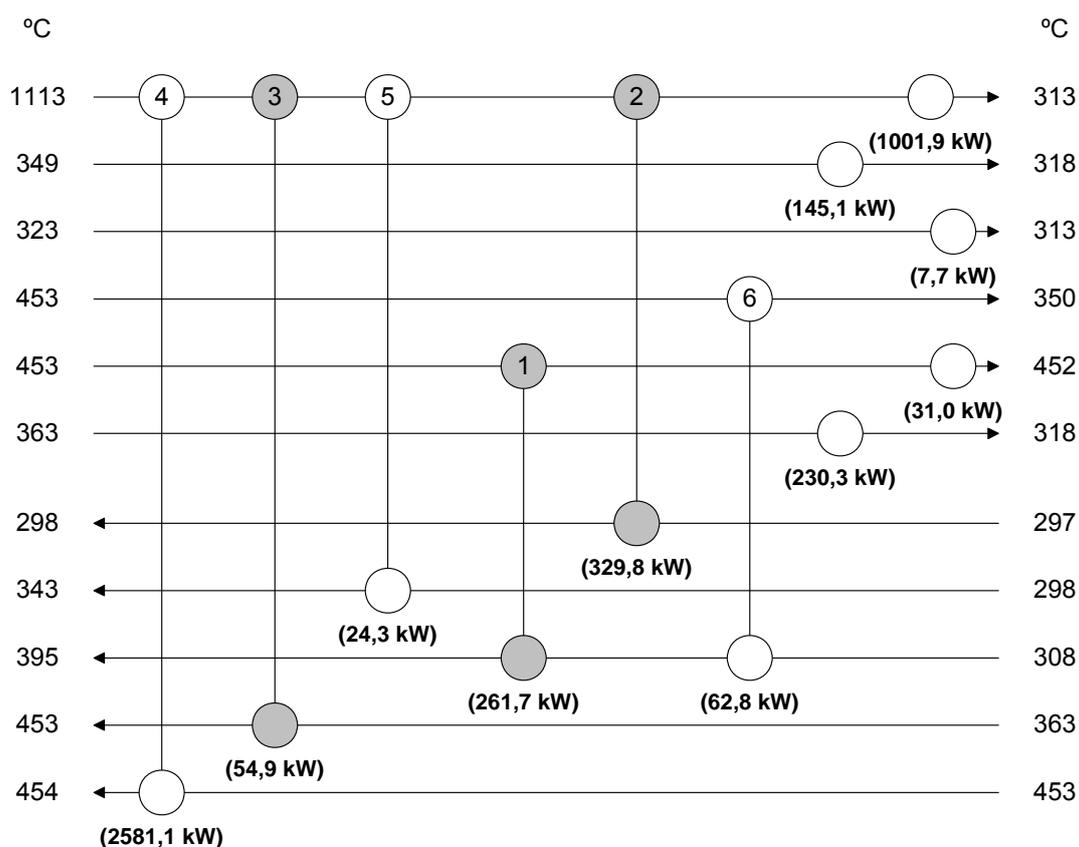


Figura 6.4 - Rede após metodologia proposta para retrofit para o Exemplo 6.2

O tempo computacional em um microcomputador Pentium IV 170 GHz foi de aproximadamente 620 minutos. A taxa de sucesso do método do enxame de partículas para esse exemplo foi de 29%.

6.6 Comentários

Neste capítulo, é proposta uma metodologia para o *retrofit* de redes de trocadores de calor. 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, utilidades e bombeamento, ou somente com área de troca térmica e utilidades, dependendo da disponibilidade das propriedades físicas das correntes e dos parâmetros de custo. Nesta configuração devem estar presentes, obrigatoriamente, os trocadores de calor existentes.

O método é baseado no modelo de superestrutura similar ao de YEE e GROSSMANN (1990). Da mesma forma que para a síntese de redes de trocadores de calor novas, o número de estágios é visto como uma variável a ser otimizada e aproximações para calcular a área e simplificações na LMDT não são consideradas.

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

Dois casos da literatura foram estudados. O primeiro considerando trocadores de calor contracorrente, o segundo considerando o projeto detalhado dos trocadores de calor. Os resultados mostraram que a metodologia proposta é viável, sendo possível obter configurações de redes aproveitando os trocadores existentes e economizando energia.

O tempo computacional foi considerado suportável, porém a taxa de sucesso se mostrou baixa. Isso se deve ao aumento das restrições de incluir, obrigatoriamente, os trocadores existentes. Isso acarreta dificuldades na convergência e a obtenção de uma região viável se torna difícil.

6.7 Referências

- ASANTE, N. D. K. e ZHU, X. X., 1996, "An automated approach for heat exchanger network retrofit featuring minimal topology modifications". *Comp. Chem. Eng.* v. 20, pp. S7–S12.
- BJORK, K. e NORDMAN, R., 2005, "Solving large-scale retrofit heat exchanger network synthesis problems". *Chem. Eng. Proc.* v. 44, pp. 869-876.
- BRIONES, V. e KOKOSSIS, A. C., 1999, "Hypertargets: a Conceptual Programming Approach for the Optimization of Industrial Heat Exchanger Networks – II. Retrofit Design", *Chem. Eng. Sci.*, v. 54, pp. 541-561.
- CASTILLO, E., ACEVEDO, L. e REVERVERI, A., 1998, "Cleaner Production of Nitric Acid by Heat Transfer Optimization: A case study", *Chem. Biochem. Eng.*, 12, 157 – 165.
- CIRIC, A. R., e FLOUDAS, C. A., 1989, "A Retrofit Approach for Heat Exchanger Networks", *Comp. Chem. Eng.*, v. 13, n. 6, pp. 703-715.
- CIRIC, A. R. e FLOUDAS, C. A., 1990, "A Mixed Integer Nonlinear Programming Model for Retrofitting Heat-Exchanger Networks", *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 29, 239-251.
- MIZUTANI, F. T., 2003, *Síntese de Redes de Trocadores de Calor com o Projeto Detalhado das Unidades Via Programação Matemática*, Tese de D.Sc., Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- NIE, X., R. e ZHU, X., 1999, "Heat Exchanger Network Retrofit Considering Pressure Drop and Heat-Transfer Enhancement", *AIChE Journal*, n. 45(6): pp. 1239-1254.
- NORDMAN, R. e BERNTSSON, T., 2009a, "Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit I: Theory and concepts", *Applied Thermal*

Engineering, n. 29, 275–281.

NORDMAN, R. e BERNTSSON, T., 2009b, “Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit II. Case studies”, *Applied Thermal Engineering*, n. 29, 282–289.

PANJEH SHAHI, M. H., Ghasemian Langeroudi, E., Tahouni, N., 2008, “Retrofit of ammonia plant for improving energy efficiency”, *Energy*, v. 33, pp 46–64.

PINTO, M. L. M. e ZEMP, R. J., 2006, “Desenvolvimento de um Métodos de *Retrofit* de Trocadores de Calor a Partir da Variação da Área”, In: *XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Santos – SP, em CD-ROM.

SILVA, M. L. e ZEMP, R. J., 1998, “*Retrofit* de Redes de Trocadores de Calor Utilizando Matriz de Área com Restrições de Queda de Pressão”, In: *Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ)*, Porto Alegre/Brasil (Setembro), em CD-ROM.

SINGH, H. e CASTILLO, F., 2002, “Process life cycle solutions for the case of automated heat exchanger network retrofit”. *Applied Thermal Eng.* v. 22, pp. 949-958.

TJOE, T.N. e LINNHOFF, B., 1986, “Using Pinch Technology for Process Retrofit”, *Chemical Engineering* (April 28), pp. 47 - 60.

WESTERBERG, A. W., 1989, “Synthesis in Engineering Design”, *Comp. Chem. Eng.*, n. 13, pp. 365-376.

YEE, T. F. e GROSSMANN, I. E., 1990, “Simultaneous Optimization Models for Heat Integration – II Heat Exchanger Network Synthesis”, *Comp. Chem. Eng.*, 14(10): 1165-1184.

YEE, T., F. e GROSSMANN, I. E., 1991, “A Screening and Optimization Approach for the Retrofit of Heat-Exchanger Networks”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, n. 30(1): pp. 146-162.

ZHU, X. X. e ASANTE, N. D. K., 1999, "Diagnosis and Optimization Approach for Heat Exchanger Network Retrofit", *AIChE Journal*, n. 45(7): pp. 1488-1503.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho foi abordado o uso do método do enxame de partículas para resolver problemas de síntese de redes de trocadores de calor. Diante de tudo que foi exposto nos capítulos anteriores, percebe-se que diversos trabalhos envolvendo o assunto foram e vêm sendo disponibilizados, há muitos anos, motivados pela possibilidade de economia de energia e água 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. Dessa forma, além de sintetizar e comentar os resultados obtidos no presente trabalho, este capítulo também se propõe a sugerir linhas de pesquisa neste tema para trabalhos futuros.

A grande contribuição desse trabalho está no uso do método do enxame de partículas em conjunto com as três ferramentas desenvolvidas: projeto ótimo de trocadores de calor, síntese de rede de trocadores de calor novas e *retrofit* de redes de trocadores de calor. A integração dessas três ferramentas entre si, resolvida com métodos não determinísticos é a inovação aqui proposta.

Por integração das três ferramentas, entende-se a inclusão do modelo de projeto detalhado nos modelos de síntese e *retrofit* e o emprego da mesma superestrutura usada na síntese de redes novas no modelo de *retrofit*.

Nota-se que o problema foi abordado como sendo uma evolução. Iniciou-se o trabalho com um problema mais simples, o projeto detalhado de uma única unidade de troca térmica.

Em seguida, em um estágio mais avançado, foi proposta uma superestrutura para síntese de redes de trocadores de calor novas, em que cada trocador de calor

pudesse ter seu projeto detalhado feito. Para isso, aproveitou-se a metodologia desenvolvida na primeira etapa.

Finalizando, um problema mais complexo foi proposto. A superestrutura da segunda etapa, juntamente com o projeto detalhado dos trocadores de calor da primeira fase foram usados para fazer o *retrofit* de redes de trocadores de calor. Para o *retrofit*, uma rede de trocadores de calor é proposta, aproveitando-se os trocadores de calor existentes na rede atual e acrescentando-se novas unidades para diminuir o consumo de energia.

Em todas as etapas do trabalho, algumas inovações específicas foram também apresentadas. No projeto de trocadores de calor destaca-se a formulação do problema como um problema de otimização de uma função custo-benefício, resolvido pelo método do enxame de partículas e respeitando-se rigorosamente o padrão TEMA. A união dessas três frentes gerou resultados bastante satisfatórios, ainda não reportados na literatura.

Na síntese de redes de trocadores de calor novas não foi necessário incluir nenhuma simplificação na geração da superestrutura proposta, nem em qualquer outra etapa do modelo. Para fugir de problemas de não-linearidades, é muito comum encontrar trabalhos que utilizam aproximações para o cálculo da área de troca térmica. Pelo mesmo motivo dos problemas de não-linearidades, outra simplificação muito encontrada é a substituição da LMDT pela média aritmética de temperatura. No presente trabalho nenhuma dessas simplificações foi feita.

Outra inovação apresentada nesta etapa da síntese de redes de trocadores de calor, 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.

Ainda nessa etapa deve-se ressaltar o uso da metodologia proposta para solução de problemas de grande porte. Apesar de certa dificuldade para se atingir o

ótimo (baixa porcentagem de sucesso), ainda assim foi possível encontrar uma solução para um problema desse nível. Na literatura não foi encontrado nenhum caso de grande porte resolvido pelo modelo de superestruturas para possíveis comparações, o que indica mais uma limitação para os métodos já desenvolvidos.

Na terceira etapa, o *retrofit* de redes de trocadores de calor, está uma das maiores contribuições deste trabalho, em termos de novas metodologias. A grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura propõe metodologias e superestruturas específicas, que servem somente para casos muito particulares. Neste trabalho, a mesma superestrutura utilizada para encontrar uma rede de trocadores de calor nova, serve também para o *retrofit*. Isso significa que qualquer caso pode ser resolvido utilizando-se a metodologia proposta, inclusive problemas com um elevado número de correntes, sem ter que dividir o processo em etapas ou fazer qualquer simplificação.

Analisando os resultados obtidos, nota-se que tanto o modelo para projeto detalhado dos trocadores de calor, como o modelo para síntese de trocadores de calor novas com pequeno número de correntes, possuem um desempenho computacional muito satisfatório. Os resultados são obtidos em um tempo computacional relativamente baixo e com uma taxa de sucesso alta.

A 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, bem como no modelo de *retrofit*, comparada com o projeto individual de trocadores de calor e o problema da síntese de redes de trocadores de calor novas de pequeno porte.

Por fim, são dadas algumas sugestões para trabalhos futuros buscando abranger as lacunas que este trabalho não abordou dentro da síntese de redes de trocadores de calor. São elas:

1. Incluir dentro do modelo de projeto de trocadores de calor a possibilidade de calcular as propriedades físicas dos fluidos (capacidades caloríficas, viscosidades, massas específicas e condutividades térmicas) em função da temperatura.

2. Possibilitar o uso de fluidos em condições de mudanças de fases.

3. Propor tratamentos diferenciados para as soluções que violam as restrições para tentar aumentar a porcentagem de sucesso, principalmente no problema de grande porte e de *retrofit* de redes de trocadores de calor.

4. Fazer comparações entre os métodos determinísticos e não-determinísticos usando o mesmo modelo matemático e as mesmas considerações usadas nesse trabalho.

5. Construir um *software* que englobe os três aspectos principais discutidos nesse trabalho – projeto de trocadores de calor, síntese de redes de trocadores de calor novas e *retrofit* de redes de trocadores de calor – e possa ser disponibilizado para uso didático e/ou industrial.

6. Extrapolar os conceitos empregados neste trabalho para outros problemas como redes de transferência de massa ou síntese de colunas de destilação.

8. APÊNDICE

8.1 Apêndice A - Dados adicionais para o modelo de trocadores de calor casco-tubo

Tabela 8.1 – Coeficientes Empíricos Usados nas Equações 3.11 e 3.12

Arranjo dos tubos	Reynolds	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4
Triangular	10^5-10^4	0,321	-0,388	1,450	0,519	0,372	-0,123	7,00	0,500
	10^4-10^3	0,321	-0,388	1,450	0,519	0,486	-0,152	7,00	0,500
	10^3-10^2	0,593	-0,477	1,450	0,519	4,570	-0,476	7,00	0,500
	10^2-10	1,360	-0,657	1,450	0,519	45,100	-0,973	7,00	0,500
	<10	1,400	-0,657	1,450	0,519	48,000	-1,000	7,00	0,500
Quadrado	10^5-10^4	0,370	-0,395	1,187	0,370	0,391	-0,148	6,30	0,378
	10^4-10^3	0,107	-0,266	1,187	0,370	0,082	0,022	6,30	0,378
	10^3-10^2	0,408	-0,460	1,187	0,370	6,090	-0,602	6,30	0,378
	10^2-10	0,900	-0,631	1,187	0,370	32,100	-0,963	6,30	0,378
	<10	0,970	-0,667	1,187	0,370	35,000	-1,000	6,30	0,378

8.2 Apêndice B – Tabela TEMA

Tabela 8.2 – Parte da Tabela TEMA usada no algoritmo para projeto de trocadores de calor

D^s (m)	D_{ft} (m)	d_{ex} (m)	d_{in} (m)	Arr Tubos	Pitch (m)	Passos Tubo	N. Tubos
0,205	0,17325	0,01905	0,0122	1	0,02379	1	38
0,205	0,17325	0,01905	0,0122	2	0,0254	6	20
0,205	0,17325	0,0254	0,017	2	0,03175	6	14
0,25431	0,22276	0,01905	0,0122	1	0,02379	1	62
0,25431	0,22276	0,01905	0,0122	2	0,0254	6	36
0,25431	0,22276	0,0254	0,017	1	0,03175	1	37
...							
0,3048	0,26035	0,01905	0,0129	1	0,02379	1	109
0,3048	0,26035	0,01905	0,0129	2	0,0254	8	60
0,3048	0,26035	0,0254	0,0179	1	0,03175	1	57
0,33655	0,3048	0,01905	0,0129	1	0,02379	2	114
0,33655	0,3048	0,01905	0,0129	2	0,0254	6	77
0,33655	0,3048	0,01905	0,0129	2	0,0254	8	70
...							
0,38735	0,3556	0,01905	0,0135	1	0,02379	1	170
0,38735	0,3556	0,01905	0,0135	2	0,0254	8	108
0,38735	0,3556	0,0254	0,0186	1	0,03175	1	96
0,43815	0,4064	0,01905	0,0135	1	0,02379	8	178
0,43815	0,4064	0,0254	0,0186	2	0,03175	8	82
...							
0,48895	0,4572	0,01905	0,0142	1	0,02379	8	234
0,48895	0,4572	0,01905	0,0142	1	0,0254	1	273
0,48895	0,4572	0,0254	0,0193	2	0,03175	8	116
0,5334	0,48895	0,01905	0,0142	1	0,02379	1	361
0,5334	0,48895	0,01905	0,0142	2	0,0254	8	234
0,5334	0,48895	0,0254	0,0193	1	0,03175	1	199
...							
0,59055	0,5461	0,01905	0,0148	1	0,02379	8	364
0,59055	0,5461	0,01905	0,0148	1	0,0254	1	381
0,59055	0,5461	0,0254	0,0199	2	0,03175	8	184
0,635	0,59373	0,01905	0,0148	1	0,02379	1	531
0,635	0,59373	0,01905	0,0148	2	0,0254	8	343

D^s (m)	Dft (m)	d_{ex} (m)	d_{in} (m)	Arr Tubos	Pitch (m)	Passos Tubo	N. Tubos
0,635	0,59373	0,0254	0,0199	2	0,03175	8	210
...							
0,7366	0,65933	0,01905	0,0154	1	0,02379	1	721
0,7366	0,65933	0,01905	0,0154	2	0,0254	8	500
0,7366	0,65933	0,0254	0,0206	1	0,03175	1	397
0,7874	0,74613	0,01905	0,0154	1	0,02379	8	720
0,7874	0,74613	0,01905	0,0154	1	0,0254	1	745
0,7874	0,74613	0,0254	0,0206	2	0,03175	8	348
...							
0,9398	0,89535	0,01905	0,0157	1	0,02379	1	1142
0,9398	0,89535	0,01905	0,0157	2	0,0254	8	852
0,9398	0,89535	0,0254	0,0212	2	0,03175	8	538
0,9906	0,94615	0,01905	0,0157	1	0,02379	8	1212
0,9906	0,94615	0,01905	0,0157	1	0,0254	1	1206
0,9906	0,94615	0,0254	0,0212	2	0,03175	8	605
...							
1,0668	1,02235	0,01905	0,0161	1	0,02379	8	1456
1,0668	1,02235	0,01905	0,0161	1	0,0254	1	1409
1,0668	1,02235	0,0254	0,0217	1	0,03175	1	890
1,1176	1,07315	0,01905	0,0161	1	0,02379	8	1592
1,1176	1,07315	0,01905	0,0161	1	0,0254	1	1562
1,1176	1,07315	0,0254	0,0217	2	0,03175	8	763
...							
1,2192	1,1684	0,01905	0,0166	1	0,02379	1	1965
1,2192	1,1684	0,01905	0,0166	1	0,0254	1	1827
1,2192	1,1684	0,0254	0,0221	1	0,03175	1	1188
1,32	1,27	0,01905	0,0166	1	0,02379	2	2273
1,32	1,27	0,01905	0,0166	2	0,0254	6	1826
1,32	1,27	0,0254	0,0221	2	0,03175	8	1110
...							
1,4224	1,3716	0,01905	0,017	1	0,02379	1	2704
1,4224	1,3716	0,01905	0,017	2	0,0254	6	2142
1,4224	1,3716	0,0254	0,0225	1	0,03175	1	1638
1,524	1,473	0,01905	0,017	1	0,02379	1	3399
1,524	1,473	0,01905	0,017	2	0,0254	8	2460
1,524	1,473	0,0254	0,0225	2	0,03175	6	1553

A Coisa

*A gente pensa uma coisa,
acaba escrevendo outra
e o leitor entende uma terceira coisa...
e, enquanto se passa tudo isso,
a coisa propriamente dita começa a desconfiar
que não foi propriamente dita.*

(Mário Quintana)