

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A RESOLUÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR Valdecino Ferreira
da Assunção E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 03/03/1997
Paulo de Barros Correia
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Energia

**Otimização Energética de Rede de
Trocadores de Calor:**

Abordagem Multi-Objetivo em Grafo Generalizado

Autor: Valdecino Ferreira da Assunção

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Barros Correia

03/1997

As79o

30220/BC

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Energia

**Otimização Energética de Rede de
Trocadores de Calor:**

Abordagem Multi-Objetivo em Grafo Generalizado

Autor: Valdecino Ferreira da Assunção

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Barros Correia

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Dissertação de mestrado apresentado a comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1997
São Paulo - Brasil

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	AS 79o
V.	Ea
YOMBO BC	30.220
PROC.	281797
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R.15.11,00
DATA	16/05/97
N.º CPD	

CM-00098077-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

As79o Assunção, Valdecino Ferreira da
Otimização energética de rede de trocadores de calor:
abordagem multi-objetivo em grafo generalizado /
Valdecino Ferreira da Assunção.--Campinas, SP: [s.n.],
1997.

Orientador: Paulo de Barros Correia.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Teoria dos grafos. 2. Otimização matemática. 3.
Trocadores de calor. 4. Recuperação de calor. 5. Energia
- Conservação. I. Correia, Paulo de Barros. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Energia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Otimização Energética de Rede de
Trocadores de Calor:**

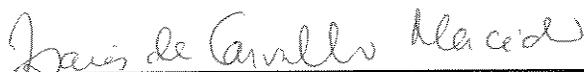
Abordagem Multi-Objetivo em Grafo Generalizado

Autor: Valdecino Ferreira da Assunção

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Barros Correia



**Prof. Dr. Paulo de Barros Correia
FEM - UNICAMP**



**Prof. Dr. Isaías de Carvalho Macedo
COPERSUCAR**



**Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr.
FEM - UNICAMP**

Campinas, 03 de março de 1997

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais:

Zenita Francisca Borges

e

Manoel Ferreira da Assunção
(in memoriam)

Agradecimentos

A realização deste trabalho tornou-se possível devido à colaboração de diversas pessoas, às quais agradeço sinceramente.

- Aos autores dos trabalhos citados neste, pois esses formaram a base deste estudo;
- Ao Prof. Paulo de Barros Correia por sua dedicada orientação e incentivo;
- À minha irmã, Maria Aparecida Assunção, pelo apoio e incentivo, mesmo nas situações mais difíceis;
- Aos amigos Rivaldo Araújo Vilela e Sérgio Augusto Araújo da Gama Cerqueira pelos incentivos constantes, amizade e colaboração;
- À CAPES cuja bolsa de estudos viabilizou o desenvolvimento desta dissertação;
- Enfim, a todos os professores, colegas e funcionários da UNICAMP, especialmente da Faculdade de Engenharia Mecânica, que de forma direta e/ou indireta auxiliaram-me na conclusão deste trabalho.

O mundo julga os homens por sua capacidade em suas profissões, e nós julgamos a nós mesmos de acordo com o mesmo teste; pois é disso que depende o nosso sucesso na vida.

William Hazlitt, escritor inglês (1778 - 1830)

Resumo

ASSUNÇÃO, Valdecino Ferreira da, *Otimização Energética de Rede de Trocadores de Calor: Abordagem multi-objetivo em grafo generalizado*, Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 90 p. Tese (Mestrado)

Neste trabalho procura-se desenvolver um modelo de otimização de rede de trocadores de calor que represente adequadamente o processo e permita avaliar a influência de algumas variáveis da integração energética do mesmo, objetivando a redução do uso das utilidades e da área de transferência de calor. Neste sentido, busca-se apresentar não apenas uma solução em que um dos objetivos é ótimo, mas um conjunto de soluções eficientes que permita ao analista escolher a situação mais conveniente. As funções objetivos são analisadas utilizando técnicas de otimização multi-objetivo, com as trocas térmicas realizadas de acordo com as restrições impostas pelas técnicas de otimização em grafo generalizado e por um algoritmo que avalia adequadamente os intervalos de temperatura das correntes envolvidas no processo. Além disso, o modelo permite que se inclua todas as restrições relativas às combinações entre correntes e também parte das perdas de calor inerentes a estas, gerando, portanto, resultados mais realísticos. No entanto, para atingir os objetivos propostos pelo modelo são necessárias diversas combinações entre correntes, acarretando geralmente no uso de vários equipamentos de transferência de calor.

Palavras Chave: Grafo generalizado, otimização multi-objetivo, rede não conservativa, recuperação energética, trocadores de calor, uso de utilidades.

Abstract

ASSUNÇÃO, Valdecino Ferreira da, *Otimização Energética de Rede de Trocadores de Calor: Abordagem multi-objetivo em grafo generalizado*, Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 90 p. Tese (Mestrado)

This work develops an optimization model for heat exchanger network synthesis which adequately represents the actual process. The model allows the evaluation of the influence of the minimum utility usage and of the minimum heat transfer area in the heat exchange process. Rather than presenting a single solution where one of the objectives has been optimized, a complete set of efficient solutions is generated. The most suitable solution can then be chosen. The objectives are analyzed based on multiple criteria optimization techniques. The heat transfer is modeled in accordance with constraints imposed by generalized graph theory. An algorithm is used to correctly evaluate the stream temperature intervals in the process. Moreover, the model allows the inclusion of all restrictions regarding the combinations among the streams and part of the heat loss inherent to them. Since heat dissipation to environment is considered, the model generates results similar to those achieved in practice. Nevertheless, to reach the objectives it is necessary to utilize several combinations between streams, increasing the amount of heat exchange equipment required.

Keywords: Energy recovery, generalized graph, heat exchanger, multiple criteria optimization, nonconservative network, utility usage.

Sumário

Capítulo 1	1
Introdução	1
Capítulo 2	5
Síntese de Redes de Trocadores de Calor	5
2.1 - Introdução	5
2.2 - Integração Térmica de Processos	6
2.2.1 - Consumo de energia térmica	7
2.2.2 - Área de transferência de calor	10
2.2.3 - Número de equipamentos	14
2.2.4 - Custo anual total	15
2.3 - Ferramentas Computacionais	16
Capítulo 3	17
Otimização em Redes de Fluxo	17
3.1 - Introdução	17
3.2 - Grafo Conservativo	18
3.2.1 - Formulação	18
3.2.2 - Solução ótima	19
3.2.3 - Aplicações	21

3.3 - Grafo Generalizado	21
3.3.1 - Formulação	22
3.3.2 - Solução ótima	23
3.3.3 - Aplicações	24
3.4 - Otimização Multi-Objetivo	24
3.4.1 - Formulação	25
3.4.2 - Função utilidade	25
3.4.3 - Soluções eficientes	26
3.4.4 - Solução final e a região do <i>trade-off</i>	27
3.4.5 - Método dos pesos	27
3.4.6 - Filtragem de pontos	29
Capítulo 4	31
Recuperação Energética em Rede de Trocadores de Calor	
Considerando Perdas	31
4.1 - Introdução	31
4.2 - Intervalos de Temperatura	32
4.3 - Fator de Eficiência do Isolamento Térmico	36
4.4 - Minimização do Uso das Utilidades	37
4.4.1 - Função objetivo	37
4.4.2 - Restrições	38
4.4.3 - Formulação	38
Capítulo 5	40
Extensão do Modelo ao Problema Multi-Objetivo	40
5.1 - Introdução	40
5.2 - Minimização da Área Total de Transferência de Calor	41
5.2.1 - Função objetivo	41
5.2.2 - Formulação	42
5.3 - Formulação do Problema Multi-Objetivo	42

Capítulo 6	45
Análise do Modelo	45
6.1 - Introdução	45
6.2 - Caracterização do Processo	46
6.3 - Determinação dos Parâmetros	46
6.3.1 - Intervalos de temperatura	47
6.3.2 - Multiplicadores de arcos	51
6.4 - Minimização do Uso das Utilidades	55
6.5 - Minimização do Uso das Utilidades Considerando o Problema Conservativo	56
6.6 - Minimização das Áreas de Transferência de Calor	58
6.7 - O Problema Multi-Objetivo	59
6.7.1 - Soluções eficientes	59
6.7.2 - Análise do <i>trade-off</i>	59
6.8 - A Rede de Trocadores	64
Capítulo 7	65
Conclusões e Sugestões	65
7.1 - Conclusões	65
7.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos	67
Referências Bibliográficas	69
Apêndice A	74
Minimização do Uso de Utilidades Através de um Modelo de Transporte	74
A.1 - Introdução	74
A.2 - O Problema de Transporte	74
A.3 - Minimização do uso das Utilidades	75
A.4 - Regra do Canto Noroeste	76
A.5 - Solução Ótima	77

Apêndice B	79
Etapas Básicas do Projeto de um Sistema Térmico	79
B.1 - Introdução	79
B.2 - Categorias de Projeto	79
B.3 - Elementos de Análise em Projeto de Sistemas Térmicos	81
Apêndice C	85
Projeto de Trocadores de Calor a Partir do Modelo	85
C.1 - Introdução	85
C.2 - Especificação de Trocadores de Calor	86
C.2.1 - Informações do processo	86
C.2.2 - Informações mecânicas	86
C.3 - Trocadores de Calor Utilizados no Modelo	87
C.3.1 - Descargas dos fluidos	87
C.3.1 - Número de tubos	88
C.3.3 - Velocidades dos fluidos	88
C.3.4 - Outros parâmetros	89
C.4 - Verificação do Trocador de Calor	89

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Curvas das correntes de processos em aquecimento (c_i) e em resfriamento (h_i)	8
Figura 2.2 - Identificação do ponto de <i>pinch</i> nas curvas compostas do processo da Figura 2.1	9
Figura 2.3 - Curvas compostas no cálculo da área	12
Figura 2.4 - Transferências de calor <i>vertical</i> e <i>crisscrossed</i> (AHMAD, 1985)	13
Figura 2.5 - Combinações <i>verticais</i> entre correntes das curvas compostas (TJOE e LINNHOFF, 1986)	14
Figura 2.6 - Combinações <i>crisscrossing</i> entre correntes das curvas compostas (TJOE e LINNHOFF, 1986)	14
Figura 3.1 - Representação de um problema de fluxo em grafo conservativo	20
Figura 3.2 - Fluxo ótimo do problema da Figura 3.1	20
Figura 3.3 - Transporte de fluxo em um arco (i, j): (a) grafo conservativo e (b) grafo generalizado.	21
Figura 3.4 - Representação de um problema de fluxo em grafo generalizado	23
Figura 3.5 - Fluxo ótimo do problema da Figura 3.4	24
Figura 3.6 - Soluções eficientes no espaço de decisão	26
Figura 3.7 - Região do <i>trade-off</i>	28
Figura 3.8 - Filtragem de pontos: (a) problema original e (b) problema filtrado	29
Figura 3.9 - Filtragem de pontos: (a) problema original e (b) problema linearizado	30
Figura 4.1 - Identificação dos pontos candidatos a limitarem os intervalos de temperatura nas curvas compostas	33
Figura 4.2 - Obtenção dos níveis de temperatura do problema da Figura 4.1	35
Figura 4.3 - Esquema de um trocador de calor	36
Figura 4.4 - Combinações entre as correntes participantes de um processo	39
Figura 6.1 - Correntes de processo	47
Figura 6.2 - Curvas compostas pela fusão das correntes de processo	48

Figura 6.3 - Custo da rede em função do ΔT_{min}	50
Figura 6.4 - Representação das faixas de temperaturas das correntes de processo	50
Figura 6.5 - Representação do exemplo em grafo generalizado.	54
Figura 6.6 - Solução em que o uso das utilidades é mínimo	55
Figura 6.7 - Solução obtida através da regra do canto noroeste, segundo CERDA <i>et alii</i> (1983)	56
Figura 6.8 - Solução obtida através da regra do canto noroeste considerando os arcos não conservativos	57
Figura 6.9 - Solução em que a área total de transferência de calor é mínima	58
Figura 6.10 - Soluções eficientes do problema multi-objetivo (uso das utilidades x área total de transferência de calor).	60
Figura 6.11 - Conjunto de soluções eficientes filtradas	61
Figura 6.12 - Curva <i>trade-off</i>	63
Figura A.1 - Representação gráfica de um problema de transporte	75
Figura B.1 - Exemplo hipotético mostrando os vários tipos de soluções (BOEHM, 1987)	80
Figura B.2 - Etapas analisadas no projeto de um sistema térmico (BOEHM, 1987)	82

Lista de Tabelas

Tabela 6.1 - Dados térmicos do processo	46
Tabela 6.2 - Pontos candidatos a limitarem os intervalos de temperatura	49
Tabela 6.3 - Intervalos de temperatura para a divisão das correntes de processo ($\Delta T_{min}=20^{\circ}\text{C}$)	51
Tabela 6.4 - Parâmetros do problema	53
Tabela 6.5 - Análise econômica na curva <i>trade-off</i>	63
Tabela 6.6 - Variações dos objetivos na curva <i>trade-off</i>	64
Tabela A.1 - Solução ótima obtida através da aplicação da regra do canto noroeste	78

Nomenclatura

- α_i^k - Taxa de transferência de calor requerido pela corrente fria i ao nível de temperatura k , kW;
- a_t - Taxa de transferência de calor demandado pelo nó t , kW;
- A - Conjunto de arcos da rede;
- \mathbf{A} - Matriz cujas linhas representam os coeficientes das restrições;
- A - Área de transferência de calor solicitado pelo processo, m²;
- A_{min} - Área mínima de transferência de calor solicitado pelo processo, m²;
- A_t - Seção transversal total dos tubos do trocador de calor em um único trajeto, m²;
- \mathbf{b} - Vetor oferta/demanda;
- b_i - Quantidade de fluxo ofertada ou demandada por um nó $i \in \mathbf{N}$;
- b_i^l - Taxa de transferência de calor a ser removido da corrente quente i ao nível de temperatura l , kW;
- b_s - Taxa de transferência de calor fornecido pelo nó s , kW;
- c_i^k - Corrente de processo fria i ao nível de temperatura k ;
- c_{ij} - Custo por unidade de fluxo transportado no arco $(i, j) \in \mathbf{A}$;
- \mathbf{C} - Matriz cujas linhas representam os coeficientes das funções objetivos;
- \mathcal{E} - Conjunto composto pelos arcos que representam as transferências de calor das correntes de processo quentes para as correntes das utilidades de resfriamento;
- C_i^k - Corrente de utilidade de resfriamento i ao nível de temperatura k ;
- C_p - Calor específico à pressão constante, kJ/kg°C;
- C_{TC} - Custo de aquisição de um trocador de calor, US\$;
- C_{Uti} - Custo do uso das utilidades, US\$/ano;
- C_{inv} - Custo de investimento, US\$;

- C_{Anual} - Custo de investimento anualizado, US\$/ano;
- d_i - Diâmetro interno dos tubos do trocador de calor, m²;
- d_e - Diâmetro externo dos tubos do trocador de calor, m²;
- D - Função utilidade do analista;
- $DMLT$ - Diferença média logarítmica de temperatura, °C;
- E - Somatório absoluto da taxa de calor transferido entre as correntes de processo e as utilidades, kW;
- \mathcal{E} - Conjunto composto pelos arcos que representam as transferências de calor das correntes de processo quentes para as correntes de processo frias;
- h - Coeficiente de película, kW/m² °C;
- h_e - Coeficiente de película externo aos tubos do trocador de calor, kW/m² °C;
- h_i - Coeficiente de película interno aos tubos do trocador de calor, kW/m² °C;
- h_i^l - Corrente de processo quente i ao nível de temperatura l ;
- H_i^l - Corrente de utilidade de aquecimento i ao nível de temperatura l ;
- H_{op} - Número de horas anuais de operação do processo, h/ano;
- i - Nó origem;
- $I_{C,j}^+$ - Conjunto das correntes frias que necessitam de aquecimento imediatamente acima da temperatura T_j ;
- $I_{C,j}^-$ - Conjunto das correntes frias que necessitam de aquecimento imediatamente abaixo da temperatura T_j ;
- $I_{H,j}^+$ - Conjunto das correntes quentes que necessitam de resfriamento imediatamente acima da temperatura T_j ;
- $I_{H,j}^-$ - Conjunto das correntes quentes que necessitam de resfriamento imediatamente abaixo da temperatura T_j ;
- j - Nó destino;
- k_t - Condutibilidade térmica do material dos tubos do trocador de calor, kW/m °C;
- l_{ij} - Quantidade mínima de fluxo que poderá ser transportado no arco $(i, j) \in A$;
- L - Número de caminho cíclico (*loops*) feito pela carga térmica na rede;
- \dot{m} - Descarga de fluidos, kg/s;
- \dot{m}_c - Descarga da corrente fria, kg/s;
- \dot{m}_h - Descarga da corrente quente, kg/s;
- M - Número total de correntes participantes do processo (incluindo as utilidades);

- n - Número total de tubos do trocador de calor;
- n_r - Número de tubos por trajeto no trocador de calor;
- N - Conjunto de nós da rede;
- N_1 - Subconjunto de N contendo todos os nós com oferta de fluxo;
- N_2 - Subconjunto de N contendo todos os nós com demanda de fluxo;
- P - Número de subsistemas (problemas independentes) na rede de trocadores;
- q_r - Taxa de transferência de calor do arco r , kW;
- Q_C - Carga térmica rejeitada nas utilidades de resfriamento, kW;
- Q_C^k - Carga térmica rejeitada nas utilidades de resfriamento ao nível de temperatura k , kW;
- Q_H - Carga térmica fornecida pelas utilidades de aquecimento, kW;
- Q_H^l - Carga térmica fornecida pelas utilidades de aquecimento ao nível de temperatura l , kW;
- r - Arco representando um trocador de calor;
- \mathcal{R}_c - Conjunto de trocadores que apresentam dissipações de calor para o antes que este calor passe pela área de transferência de calor em análise;
- Re - Resistência térmica de depósito do fluido no trocador de calor externo aos tubos, m^2C/kW ;
- Ri - Resistência térmica de depósito do fluido no trocador de calor interno aos tubos, m^2C/kW ;
- \mathcal{R}_h - Conjunto de trocadores que apresentam dissipações de calor para o ambiente após o calor ter passado pela área de transferência de calor analisada;
- s - Nó origem;
- S - Região factível;
- S_c - Conjunto composto pelos nós que representam as subcorrentes de processo frias;
- S_h - Conjunto composto pelos nós que representam as subcorrentes de processo quentes;
- t - Nó destino;
- T_c - Temperatura da corrente fria, °C;
- T_h - Temperatura da corrente quente, °C;
- T_{c1} - Temperatura do fluido frio na entrada do trocador de calor, °C;
- T_{c2} - Temperatura do fluido frio na saída do trocador de calor, °C;
- T_{h1} - Temperatura do fluido quente na entrada do trocador de calor, °C;
- T_{h2} - Temperatura do fluido quente na saída do trocador de calor, °C;

- T_x - Taxa anual de juros;
- \mathcal{N}_c - Conjunto composto pelos nós que representam as subcorrentes das utilidades de resfriamento;
- \mathcal{N}_h - Conjunto composto pelos nós que representam as subcorrentes das utilidades de aquecimento;
- u_{ij} - Quantidade máxima de fluxo que poderá ser transportado no arco $(i, j) \in A$;
- U - Coeficiente global de transferência de calor, $\text{kW/m}^2\text{°C}$;
- U_r - Coeficiente global de transferência de calor no arco r , $\text{kW/m}^2\text{°C}$;
- v - Velocidade do fluido, m/s^2 ;
- V - Período de vida útil do processo, anos;
- W - Comprimento dos tubos do trocador de calor, m;
- \mathbf{x} - Vetor decisão, no espaço de decisão $\mathbf{x} \in X$;
- x_{ij} - Quantidade de fluxo transportada no arco $(i, j) \in A$;
- X - Espaço de decisão;
- \mathbf{z} - Vetor função objetivo;
- Z - Espaço dos objetivos;
- α_r - Fator que relaciona a área de um trocador de calor r com o calor transferido, m^2/kW ;
- ΔT - Diferença de temperatura, °C ;
- ΔT_{min} - Diferença mínima de temperatura entre duas correntes que poderão transferir calor, °C ;
- ΔTm_r - Diferença média de temperatura no trocador de calor r , °C ;
- μ_{ij} - Multiplicador de arco (fator que mostra a relação entre a quantidade de fluxo que deixa o nó i e a quantidade de fluxo que chega no nó j);
- μ_t - Fator de eficiência térmica do isolamento do trocador de calor r ;
- ρ - Massa específica, kg/m^3 ;
- λ - Vetor peso;
- λ_i - Peso da função objetivo i ;
- Λ - Conjunto de vetores peso.

Capítulo 1

Introdução

O projeto de uma rede de trocadores de calor que se integre adequadamente aos processos industriais tem sido um importante objeto de estudo no campo das Ciências Térmicas. Para se ter uma idéia, um processo típico contém de trinta a oitenta correntes que necessitam de aquecimento e/ou resfriamento (GUNDERSEN e NAESS, 1988). E, com a transferência de calor, através de combinações entre as correntes quentes e frias do próprio processo, pode-se suprir parte da demanda térmica das correntes, exigindo menos energia das fontes complementares de calor e frio. A redução do uso da energia complementar, através da recuperação térmica, e também de outros fatores que agregam custos aos processos, tem despertado o interesse de diversos pesquisadores no desenvolvimento de técnicas que permitam a integração térmica do processo, envolvendo essencialmente o projeto da rede de trocadores de calor.

No projeto de uma rede de trocadores de calor com máxima integração térmica são geralmente objetos de análise: o uso de utilidades, a recuperação térmica, a área de transferência de calor e o número de equipamentos de troca térmica no custo do processo (custos de investimento e operacional). Neste sentido, serão abordados neste trabalho dois destes fatores: a recuperação térmica e a área de transferência de calor, analisando-os de forma a permitir que se incluam todas as possíveis combinações das correntes do processo, além de considerações sobre a dissipação de calor para o meio ambiente.

O projeto de uma rede de trocadores de calor com máxima integração térmica do processo é um problema complexo que envolve análise combinatória entre as correntes quentes e frias a fim de aumentar a recuperação térmica. Além disso, a transferência de calor depende da diferença de temperatura entre as correntes e das propriedades de transporte dos fluidos de processo, da configuração dos escoamentos e dos materiais de construção dos trocadores de calor.

Neste projeto devem estar inclusos os objetivos quantitativos que englobam os custos de aquisição dos equipamentos de troca térmica, as utilidades externas, os custos operacionais e os objetivos qualitativos, que envolvem segurança, flexibilidade, operabilidade e controlabilidade da unidade industrial. Deste modo, é difícil a obtenção de uma única função objetivo que avalie adequadamente todo o projeto. Devido aos efeitos topológicos (adição ou remoção de serviços), a função custo do investimento apresenta descontinuidades, em função da unidade de equipamentos utilizados. Alguns dos aspectos qualitativos mencionados anteriormente não podem ser formulados facilmente sem considerar a variável tempo. O custo de flexibilidade, por exemplo, somente poderá ser calculado para uma rede bem definida. Uma vez que o *ótimo global* é difícil de ser obtido, os engenheiros têm recorrido a modelos simplificados e o uso de regras heurísticas com a obtenção de soluções satisfatórias (GUNDERSEN e NAESS, 1988).

Os modelos de otimização de rede de trocadores de calor descritos na literatura (Capítulo 2) são significativos e geram bons resultados quando aplicados em processos industriais que podem ser admitidos conservativos. Porém, nos casos em que se deseja considerar as perdas inerentes aos processos, aqueles modelos não são aplicáveis, visto que as perdas não são previstas na formulação. Nos processos onde há transporte de energia térmica entre dois pontos quaisquer, utilizando um fluido, a dissipação de energia térmica é significativa e necessita ser considerada. Esta dissipação é resultado, principalmente, de isolamento térmico inadequado, perdas por queda de pressão e vazamento do fluido de processo.

Este trabalho apresenta uma formulação alternativa para a solução dos problemas abordados acima. Porém, utiliza um modelo baseado na técnica de otimização em grafo generalizado (AHUJA *et alii*, 1993), buscando minimizar o uso de utilidades e a área total de

transferência de calor, considerando perdas térmicas nas transferências entre as correntes do processo. Estes objetivos são analisados simultaneamente através das técnicas de otimização multi-objetivo (STEUER, 1989). Para atender este propósito, são desenvolvidos diversos capítulos que se complementam no entendimento deste trabalho.

No Capítulo 2 comenta-se, de forma resumida, alguns dos principais trabalhos desenvolvidos no campo da integração térmica de processos. Apesar de terem sido publicados mais de duzentos trabalhos relevantes nesta área (GUNDERSEN e NAEISS, 1988), será dado ênfase àqueles que abordam as metas aqui almejadas.

A descrição das técnicas de otimização em redes de fluxos são apresentadas no Capítulo 3. Os métodos da programação linear como grafo conservativo e generalizado são descritos de maneira sucinta, embora estes sejam fundamentais para o entendimento deste trabalho. Este capítulo ainda descreve as técnicas de otimização para problemas multi-objetivo, dando destaque ao método dos pesos.

No Capítulo 4 desenvolve-se em grafo generalizado uma formulação que minimiza o uso das utilidades em uma rede de trocadores de calor. Como dito anteriormente, neste modelo pode-se incluir a energia térmica perdida para o meio ambiente através dos trocadores de calor, que neste caso será considerado em função do coeficiente de eficiência térmica do isolamento. Além disso, neste capítulo apresenta-se um algoritmo que permite a divisão das correntes de fluxos envolvidas no processo em diversos níveis de temperatura. Esta divisão categoriza as correntes em níveis de energia, o que facilita aplicação das leis termodinâmicas. Assim, só ocorrerá transferência de calor entre duas correntes (dois níveis de temperatura) se existir entre ambas uma diferença mínima de temperatura, que é fixada no processo.

No Capítulo 5 desenvolve-se uma formulação que minimiza a área total de transferência de calor solicitada pelo processo. Esta formulação também está baseada em grafo generalizado e utiliza os mesmos conceitos do Capítulo 4. Além disso, neste capítulo desenvolve-se um modelo multi-objetivo utilizando as formulações que minimizam o uso das utilidades e a área total de transferência de calor, cuja resolução baseia-se no método dos pesos.

O Capítulo 6 apresenta uma aplicação do modelo a um exemplo, de carácter teórico, com o intuito de fazer uma análise dos objetivos propostos. Para este fim, em princípio, as funções objetivos são analisadas isoladamente, em seguida, simultaneamente através do uso de conceitos da programação linear multi-objetivo. Além disso, são discutidas as soluções para o mínimo uso das utilidades do problema formulado em grafo conservativo e em grafo generalizado com o objetivo de ressaltar as principais diferenças. Em todas estas situações, consideram-se conhecidas as propriedades termodinâmicas dos fluidos envolvidos no processo.

Finalmente, são apresentados três apêndices que complementam este estudo. O Apêndice A descreve passo a passo um modelo que minimiza o uso das utilidades em grafo conservativo. Este modelo foi desenvolvido por CERDA *et alii* (1983) e possui um método simples de resolução através da aplicação da regra do canto noroeste. No Apêndice B tem-se as etapas básicas do projeto de um sistema térmico, desde a fase de planeamento até o projeto final. Já o Apêndice C constitui-se da descrição de um roteiro complementar na elaboração de projetos de trocadores de calor a partir dos dados fornecidos pelo modelo aqui apresentado.

Capítulo 2

Síntese de Redes de Trocadores de Calor

2.1 - Introdução

A minimização dos custos e, por conseqüência, a maximização dos lucros sempre foram objetivos de estudos entre pesquisadores na tentativa de aperfeiçoar suas atividades. Um caso típico é a síntese de rede de trocadores de calor, cuja meta principal é a integração térmica dos processos industriais. Assunto este, que despertou grande interesse a partir de 1973 com a crise do petróleo, uma vez que esta fonte de energia constituía (e ainda constitui) uma parcela significativa do custo do processo. Em princípio, esta necessidade conduziu os pesquisadores ao desenvolvimento de técnicas que identificassem o *ótimo energético* (menor consumo de energia proveniente das utilidades), em seguida, estas técnicas evoluíram para a obtenção do custo ótimo global da rede de trocadores de calor. Por se tratar de um problema complexo, este assunto ainda é amplamente estudado por vários grupos de pesquisa e é conhecido na literatura inglesa como *Heat Exchanger Network Synthesis*.

Os modelos que constituíram as primeiras tentativas de obter redes de trocadores de calor com a máxima integração térmica do processo não tiveram muito sucesso, uma vez que não representavam adequadamente os processos e as soluções geradas tinham aplicações duvidosas (GUNDERSEN e NAESS, 1988). No entanto, com a evolução das técnicas de otimização em redes, a integração térmica de um processo pôde ser obtida sistematicamente com a transformação do problema em um modelo matemático, cuja solução é obtida através de métodos numéricos. Contudo, em função da complexidade citada no Capítulo 1, é inevitável a

realização de algumas simplificações do problema no modelo matemático. Estas simplificações quando não são prejudiciais à representação do problema real geram soluções satisfatórias. Com este intuito, serão comentados neste capítulo alguns destes modelos de acordo com suas aplicações. Entretanto, ao longo deste trabalho surgem termos que requerem alguns conceitos e definições específicas que poderão ser melhor esclarecidas nas referências originais.

2.2 - Integração Térmica de Processos

As técnicas empíricas proporcionaram o desenvolvimento de projetos de sistemas térmicos por vários anos. Porém, nas últimas décadas, os significados empíricos estão gradualmente sendo substituídos por técnicas analíticas. Esta tendência foi auxiliada, em seu estágio inicial, pelo desenvolvimento de métodos analíticos em transferência de calor, mecânica dos fluidos e processos químicos e termodinâmicos, os quais também evoluíram com os métodos empíricos. No entanto, as técnicas analíticas foram impulsionadas com o desenvolvimento dos computadores de alta velocidade. Mais recentemente, a aplicação de técnicas de otimização tem-se mostrado extremamente valiosa.

Nas últimas décadas, diversos métodos e modelos foram apresentados visando a otimização de redes de trocadores de calor. Segundo GUNDERSEN e NAESS (1988), estes trabalhos têm evoluído em três linhas de pesquisa, a saber, o uso de conceitos termodinâmicos, métodos heurísticos e a prática de projetar processos baseada em projetos anteriores. Dentre estes trabalhos, destacam-se o uso de métodos heurísticos (MASSO e RUDD, 1969), problemas de atribuição de programação linear (KESLER e PARKER, 1969; KOBAYASHI *et alii*, 1971; NISHIDA *et alii*, 1971), aproximação termodinâmica (HOHMANN, 1971) e o ponto de recuperação de calor (UMEDA *et alii*, 1978; LINNHOFF *et alii*, 1979). Todos estes métodos além de apresentarem novas abordagens termodinâmicas, constituem as primeiras tentativas de obter redes de trocadores de calor quantificando a integração térmica dos processos.

Os principais objetivos abordados nos estudos de integração térmica de processos foram: a redução do consumo de energia térmica através da minimização do uso das utilidades, a redução das áreas de transferência de calor, a redução do número de equipamentos de

transferência de calor e a minimização dos custos anuais de implantação e de operação de um processo. A evolução dos métodos que analisaram estes objetivos é comentada de maneira simplificada a seguir.

2.2.1 - Consumo de energia térmica

A redução do consumo de energia térmica é um dos principais pontos abordados nos projetos que otimizam redes de trocadores de calor, seja eliminando os agentes causadores de perdas térmicas ou mudando o *layout* do processo. Os agentes causadores de perdas térmicas como a perda de calor para o meio ambiente devido ao isolamento térmico inadequado, o vazamento de fluido de processo e bombeamento adicional devido as perdas de carga ao longo das tubulações, são os primeiros itens verificados. No entanto, estes itens não são suficientes para otimizar todo o processo e mudanças no *layout* deverão ser feitas. As mudanças no *layout* poderão abranger processos já existentes ou em fase de projeto. Neste caso, o alvo preferido pelos pesquisadores têm sido mudanças no *layout* através da minimização do uso das utilidades, uma vez que o uso destas representa custos adicionais ao processo.

Este problema tem sido estudado em duas etapas, inicialmente não considerando proibições quanto as combinações entre as correntes nas trocas térmicas e, posteriormente, considerando estas restrições. O uso correto da energia térmica nos problemas sem restrições foi estudado por diversos pesquisadores como HOHMANN (1971), que propôs uma tabela de factibilidade para estabelecer uma meta na redução do consumo de energia proveniente das utilidades, LINNHOFF e FLOWER (1978a, b), que desenvolveram um algoritmo em forma de tabela e UMEDA *et alii* (1978), que utilizaram uma representação no diagrama temperatura-entalpia na resolução de tais problemas.

UMEDA *et alii* (1978) desenharam no diagrama temperatura-entalpia duas curvas, representando as correntes do processo, uma composta pela fusão de todas correntes frias (curva de aquecimento) e a outra pela fusão de todas correntes quentes (curva de resfriamento). Estas fusões são feitas através do somatório das cargas térmicas de cada corrente em um mesmo nível de temperatura, como mostra o esquema das Figuras 2.1 e 2.2. Aproximando estas curvas compostas, mantendo o mesmo nível de temperatura, os pesquisadores acima verificaram que estas curvas tinham um ponto em que a diferença de

temperatura era mínima (ΔT_{min}), o qual foi chamado de *pinch*. Este ponto constituía um gargalo na recuperação térmica de processos. Segundo GUNDERSEN e NAESS (1988), esta descoberta resultou em esforços crescente nos meios acadêmicos e industriais para o desenvolvimento de uma metodologia sistemática de aplicação desses conceitos tanto em processos novos como nos já existentes. Destes estudos resultou-se a recuperação térmica *pinch* que constitui-se da recuperação térmica do processo através de combinações entre as correntes de forma a manter pelo menos um ΔT_{min} nas transferências de calor entre estas. No entanto, a recuperação térmica *pinch* só foi melhor compreendida depois do trabalho de LINNHOFF *et alii* (1979).

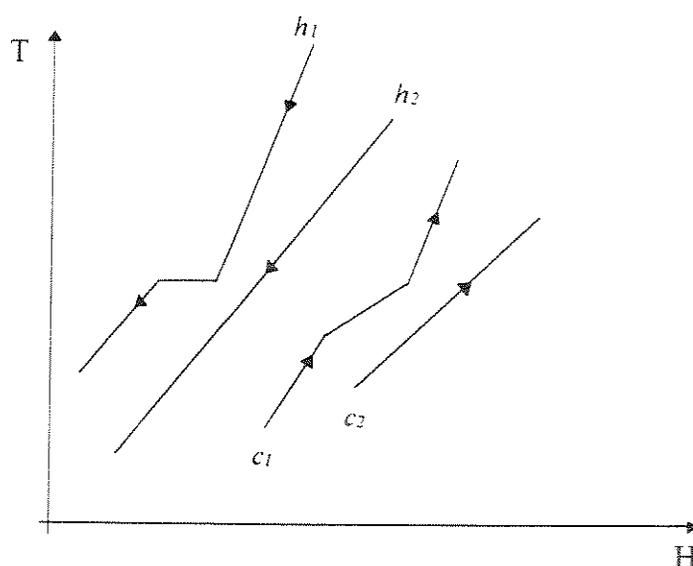


Figura 2.1 - Curvas das correntes de processos em aquecimento (c_i) e em resfriamento (h_i)

Através dos estudos de LINNHOFF e seus colaboradores, foi possível observar em profundidade o significado da recuperação térmica *pinch*. Verifica-se que o sistema é dividido termodinamicamente em dois subsistemas (Figura 2.2), cada qual possuindo no seu balanço entálpico o uso de utilidades diferentes. Acima do ponto de *pinch* é requisitado somente utilidades de aquecimento e abaixo deste, somente utilidades de resfriamento. Baseado nestas observações, LINNHOFF *et alii* (1979) estabeleceram três regras básicas que garantem a máxima eficiência do projeto:

- (1) Não há utilidade de resfriamento acima do *pinch*;
- (2) Não há utilidade de aquecimento abaixo do *pinch* e
- (3) Não há recuperação térmica no processo cruzando o *pinch*.

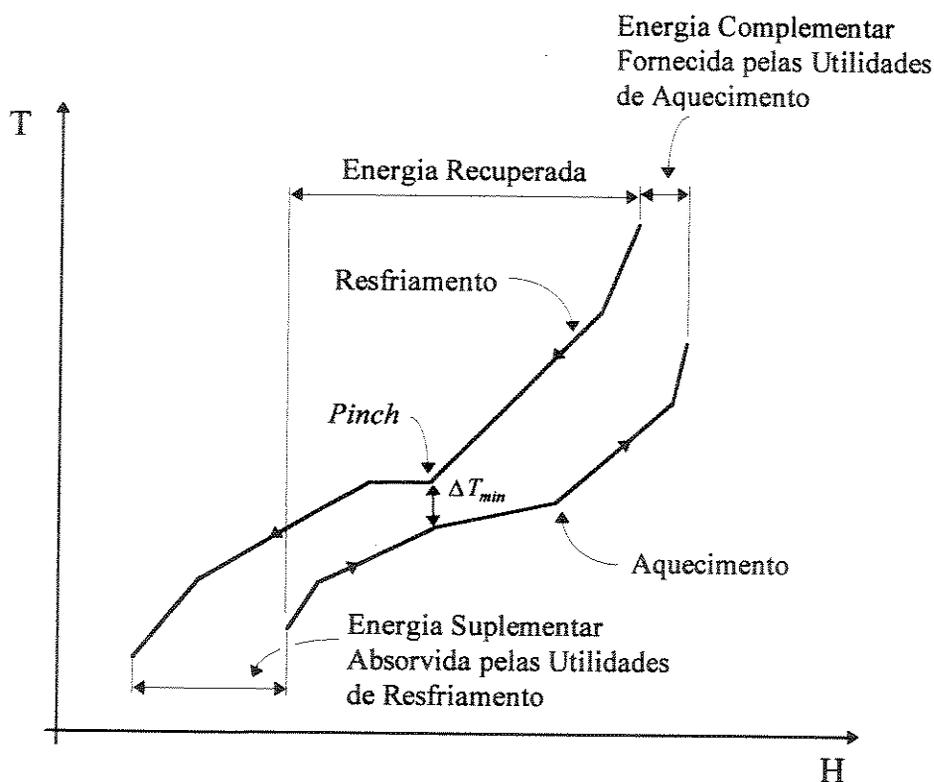


Figura 2.2 - Identificação do ponto de *pinch* nas curvas compostas do processo da Figura 2.1

Além da metodologia *pinch*, as situações envolvendo os problemas com restrições entre as combinações das correntes foram formuladas como um problema de transporte da programação linear por CERDA *et alii* (1983), Apêndice A, e como um problema de transbordo (*transshipment*) da programação linear com tamanho reduzido por PAPOULIAS e GROSSMANN (1983). VISWANATHAN e EVANS (1987) apresentaram uma aproximação de *correntes duais* para reduzir as penalizações energéticas freqüentemente relatadas como restrições. Se duas correntes, sendo uma quente e uma fria, não podem transferir calor entre si, elas caracterizam-se um par de correntes restritas. No entanto esta transferência de calor poderá ser feita de maneira indireta. Para isso, a corrente quente deste par restrito aquecerá uma outra corrente quente (neste caso esta última transforma-se em uma corrente fria, por definição), que por sua vez irá aquecer a corrente fria do par restrito. Este problema é

formulado como um problema de transbordo modificado e resolvido como um problema de fluxo em rede usando o algoritmo *out-off-kilter*. O modelo fornece uma solução compreendida entre as soluções fornecidas pelos modelos sem restrições e os modelos com restrições, dependendo do conjunto de correntes do problema.

Tanto o algoritmo sugerido por LINNHOFF e FLOWER (1978a, b) quanto os modelos da programação linear permitem que as correntes contribuam individualmente com uma diferença de temperatura nas transferências de calor. Para isto, estes trabalhos utilizam um algoritmo semelhante ao descrito no item 4.2. Finalmente, SABOO *et alii* (1986a, b) sugeriram vários modelos de programação linear que também permitem que as correntes tenham contribuições individuais, além de permitir a obtenção do menor consumo de energia para uma dada estrutura de rede ou para uma área total especificada. Estes aspectos são interessantes nos casos de *retrofit*.

2.2.2 - Área de transferência de calor

A área de transferência de calor é fundamental na elaboração de um projeto de um trocador de calor, pois é a partir dela que todo o projeto se desenvolve. Ela também fornece uma estimativa do custo deste, uma vez que o custo do trocador é geralmente proporcional à área de transferência de calor. Segundo GUNDERSEN e NAESS (1988), existem duas linhas de pesquisa no desenvolvimento de procedimentos que minimizam a área de transferência de calor. Numa estão incluídas as estratégias para a minimização da área total de transferência no desenvolvimento da rede de trocadores. Na outra, estão os algoritmos que calculam a mínima área de transferência à frente de um projeto.

A transferência de calor entre as correntes de processo foi apresentada como um modelo de atribuição por KESLER e PARKER (1969), dividindo as correntes em pequenos elementos (*exchangelets*) de mesmo tamanho. Neste caso, o problema de atribuição é constituído pela associação dos elementos das correntes quentes com elementos das correntes frias. Esta abordagem foi melhor representada por KOBAYASHI *et alii* (1971) que utilizaram diagramas de conteúdo térmico de modo a permitir divisões nas correntes e associações cíclicas. Já NISHIDA *et alii* (1971) introduziram regras no emparelhamento das correntes na tentativa de minimizar a área total de transferência de calor.

HOHMANN (1971) e NISHIDA *et alii* (1971) apresentaram procedimentos de geração da rede, relacionando a mínima área de transferência de calor no diagrama temperatura-entalpia através das curvas compostas. Este algoritmo foi aperfeiçoado por NISHIDA *et alii* (1977), que incluíram as utilidades na minimização da área. Neste caso, as utilidades estão localizados em pontos “ótimos” da rede. Já UMEDA *et alii* (1978) discutiram como as diferenças nos coeficientes de transferência de calor e o custo por unidade de área poderiam ser controlados pelas mudanças nos intervalos de temperatura e nas posições onde foram combinadas na rede.

Segundo NISHIDA *et alii* (1981), os pesquisadores têm assumido no cálculo da área mínima de transferência de calor que os coeficientes globais de transferência de calor U são constantes, os fluidos estão em contracorrente e as transferências de calor ocorrem de modo *vertical* entre as curvas compostas (este termo será explicado mais tarde, conforme AHMAD (1985); TJOE e LINNHOFF (1986) e os esquemas mostrados nas Figuras 2.4 a 2.6). Desta forma, a área mínima de transferência de calor (A_{min}) pode ser calculada pela equação (2.1).

$$A_{min} = \int_0^{\Delta Q} \frac{dQ}{U(T_h - T_c)} \quad (2.1)$$

sendo ΔQ o calor a ser transferido da corrente em resfriamento com temperatura (T_h) para a corrente em aquecimento com temperatura (T_c). Caso seja considerada a variação da área somente com a temperatura, utilizando as curvas compostas (Figura 2.3), a equação anterior transforma-se na equação 2.2, onde Q_j é o calor a ser transferido entre duas correntes com uma diferença média logarítmica de temperatura ($DMLT_j$).

$$A_{min} = \frac{1}{U} \sum_j \frac{Q_j}{DMLT_j} \quad (2.2)$$

TOWNSEND e LINNHOFF (1984) apresentaram esta equação considerando um coeficiente de película (h), ao invés do coeficiente global de transferência de calor, para cada corrente k do processo em cada seção j . A equação (2.3) mostra esta consideração.

$$A_{min} = \sum_j \frac{1}{DMLT_j} \sum_k \left[\frac{\Delta q_k}{h_k} \right] \quad (2.3)$$

Segundo GUNDERSEN e NAESS (1988), esta abordagem é exata somente para coeficientes de película constantes, com trocas térmicas estritamente *verticais*, fornecendo, porém, boas aproximações em outros casos. Deste modo, todas as correntes k em cada intervalo j (Figura 2.3) são divididas e emparelhadas de acordo com suas necessidades térmicas nas curvas compostas. Assim, uma rede de área mínima pode envolver um grande número de divisões e de trocadores de calor, sendo chamada *Spaghetti design* por LINNHOFF e seus colaboradores.

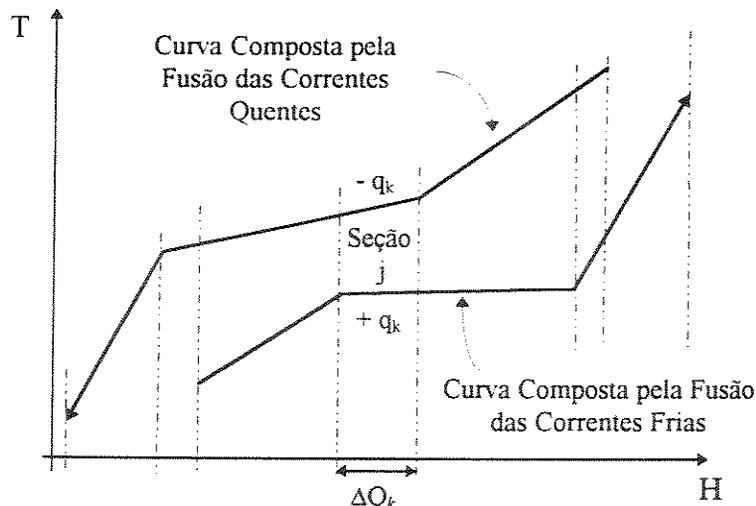


Figura 2.3 - Curvas compostas no cálculo da área

Um cálculo mais rigoroso da área de transferência de calor, mesmo para coeficientes de películas diferentes, foi formulado por SABOO *et alii* (1986b) utilizando um modelo de transporte da programação linear. Finalmente, AHMAD (1985) e TJOE e LINNHOFF (1986) explicam que a área total de transferência de calor geralmente é mínima quando é considerada

a transferência de calor *vertical* entre as curvas compostas, conforme as comparações entre as transferências de calor *vertical* e *crisscrossing*, mostradas esquematicamente na Figura 2.4.

Segundo TJOE e LINNHOFF (1986), se as necessidades térmicas das correntes de um processo forem supridas apenas com a transferência de calor entre as correntes das curvas compostas, combinadas verticalmente conforme o esquema da Figura 2.5, a área de transferência de calor do sistema global será mínima. Esta configuração é equivalente ao uso de trocadores de calor simples com fluidos em contracorrente. Algumas das combinações diferentes da vertical (*crisscrossing* da Figura 2.6) terão como vantagem uma ΔT local maior. Porém, mais tarde, nesta mesma curva, haverá necessidade de combinações na direção oposta com um ΔT menor. Esta mudança tem como consequência um acréscimo na área total requerida.

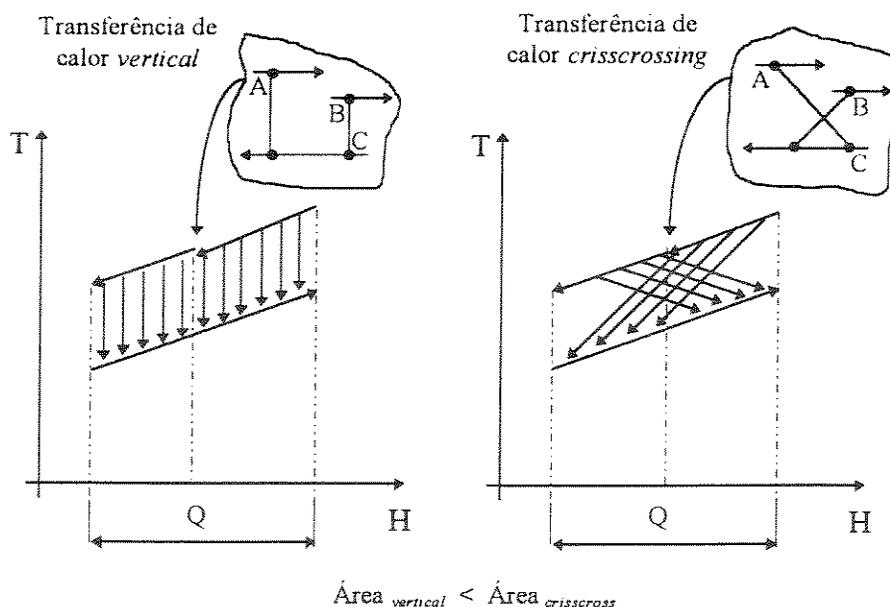


Figura 2.4 - Transferências de calor *vertical* e *crisscrossed* (AHMAD, 1985)

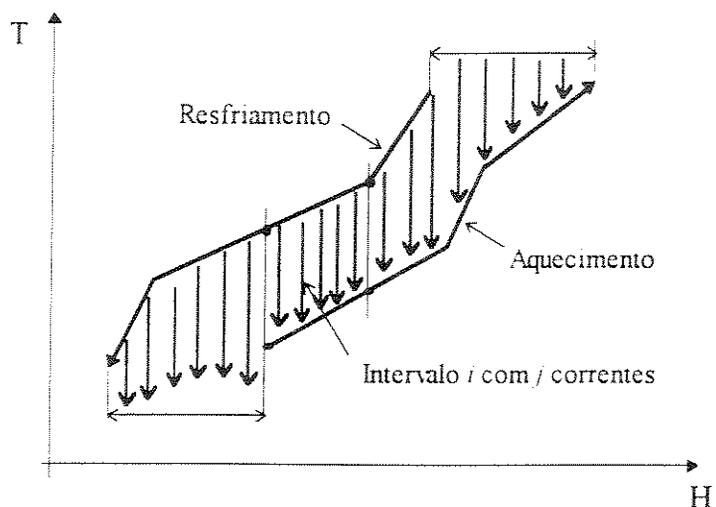


Figura 2.5 - Combinações *verticais* entre correntes das curvas compostas (TJOE e LINNHOFF, 1986)

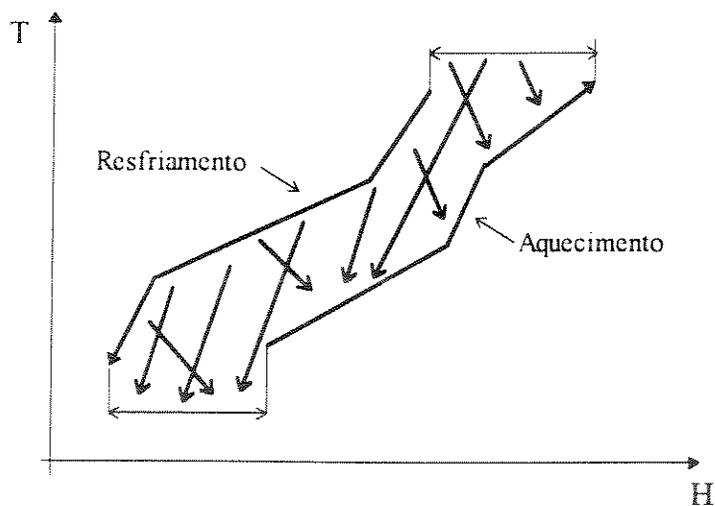


Figura 2.6 - Combinações *crisscrossing* entre correntes das curvas compostas (TJOE e LINNHOFF, 1986)

2.2.3 - Número de equipamentos

Em um processo com M correntes (incluindo as utilidades), o número mínimo de trocadores de calor pode ser estimado pela regra $(M-1)$, estabelecida por HOHMANN (1971). BOLAND e LINNHOFF (1979) estenderam esta regra utilizando o teorema de Euler da teoria

de grafo para $(M - P + L)$, onde P é o número de subsistemas (problemas independentes) e L o número de caminhos cíclicos (*loops*) percorridos pela carga térmica na rede.

Na metodologia *pinch*, um aspecto importante é a decomposição do problema em duas redes distintas, uma abaixo e outra acima do *pinch*. Baseado neste conceito, LINNHOFF e TURNER (1981) utilizaram a regra $(M - 1)$ em duas etapas, primeiro, minimizando o número de equipamentos da rede representada abaixo *pinch* e posteriormente, aqueles da rede acima do *pinch*.

Utilizando a programação linear inteira mista, CERDA e WESTERBERG (1983) formularam um modelo de transporte com relaxações na minimização do número de equipamentos. PAPOULIAS e GROSSMANN (1983) utilizaram conceitos semelhantes na formulação de um modelo de transbordo para a mesma finalidade.

2.2.4 - Custo anual total

No princípio, os projetos de redes de trocadores de calor eram feitos com base apenas nas especificações do processo, já que havia grande dificuldade de considerar os custos de implantação e de operação deste. Porém, com o advento de novas metodologia de cálculo, além da evolução dos recursos computacionais, é possível considerar todos os custos envolvidos no processo e otimizá-lo no momento da elaboração do projeto, por exemplo, através da minimização do custo anual total do processo. Obviamente, o consumo de energia, o número de equipamentos e a área de transferência de calor são fatores constituintes do problema.

A elaboração de um projeto de rede de trocadores de calor utilizando a metodologia *pinch* foi resumida por LINNHOFF e HANDMARSH (1983). A rede de trocadores é obtida visando basicamente a recuperação térmica, sendo a dificuldade principal a determinação da diferença mínima de temperatura (ΔT_{min}) entre as correntes que poderão transferir calor. Segundo GUNDERSEN e NAESS (1988), mesmo com experiência em um dado processo, a escolha da ΔT_{min} pode não ser ótima, uma vez que ela é dependente de três fatores: custo relativo da energia e dos equipamentos, características das curvas compostas e condições de transferência de calor na região do *pinch*.

A introdução dos custos na elaboração do projeto foi apresentado por LINNHOFF e AHMAD (1986a, b), incluindo também o consumo de energia, a área e o número de equipamentos de transferência de calor. BOEHM (1987), PIOVESANI (1990) e PETER e TIMMERHAUS (1991) apresentaram alguns gráficos e equações que podem ser usadas na estimativa do custo de alguns equipamentos de transferência de calor. Finalmente, ROSSI (1995) aplicou a metodologia *pinch* na elaboração de um projeto alternativo de uma rede de trocadores de calor para uma refinaria de petróleo e, também, discutiu a influência da escolha da ΔT_{min} para este projeto.

2.3 - Ferramentas Computacionais

Segundo GUNDERSEN e NAEISS (1988), está disponível no mercado uma série de pacotes computacionais utilizados em projetos de redes de trocadores de calor. Os mais importantes são: o HEXTRAN, que se baseia numa abordagem dual de temperatura, utilizado na obtenção da rede com o menor consumo de energia e também no dimensionamento de seus trocadores; o ADVENT é um programa interativo que está baseado na metodologia *pinch* e opera em estações de trabalho; o SUPERTARGET está baseado na metodologia *pinch* e permite estabelecer o valor “ótimo” para a ΔT_{min} de um projeto e o RESHEX e o MAGNETS utilizam modelos de transporte da programação linear com algumas restrições inteiras e são utilizados na geração de redes com o menor número de trocadores de calor.

Capítulo 3

Otimização em Redes de Fluxo

3.1 - Introdução

As redes de fluxo estão cada vez mais presentes na vida das pessoas, apesar de serem notadas, algumas vezes, somente quando surge algum tipo de problema. As redes de transmissão e de distribuição de potência elétrica, que fornecem iluminação e entretenimento nas residências, as redes telefônicas, que permitem comunicação simultânea entre diferentes locais, as redes de distribuição de água e de coleta de esgotos residenciais, os sistemas viários e as redes férreas, que fornecem meios de percorrer grandes distâncias geográficas, são alguns dos diversos tipos de redes de fluxo.

As redes de fluxo constituem-se de um conjunto de problemas em várias áreas, incluindo aplicações em matemática, ciência da computação, engenharia, gerenciamento e pesquisa operacional. Em todos estes problemas, deseja-se mover algum ente (eletricidade, água, produto, veículo, mensagem, etc.) de um ponto ao outro de uma rede básica, dando tanta eficiência quanto possível, através do uso de técnicas de otimização especializada. A evolução destas técnicas deveu-se em grande parte aos estudos de Gustav Kirchhoff, que analisou sistematicamente os circuitos elétricos, estabelecendo idéias chave da teoria da rede de fluxo (grafo) como objeto matemático na representação de sistemas físicos (AHUJA *et alii*, 1993).

Os problemas em redes são normalmente de duas categorias, uma referente aos problemas em que o fluxo nos arcos, em regime permanente, se conserva (*grafo conservativo*)

e outra referente aos problemas em que este fluxo não se conserva (*grafo generalizado*). A resolução destas categorias de problemas é normalmente feita utilizando o método *simplex*, que fornece bons resultados nos problemas da programação linear, adaptado a estrutura de rede. As formulações destas categorias de problemas, juntamente com as técnicas de otimização multi-objetivo, são os objetivos deste capítulo.

3.2 - Grafo Conservativo

Um grafo é definido por um conjunto de nós N unidos por um conjunto de arcos A , geralmente orientados. Nos problemas de fluxo em grafos, os nós e/ou arcos estão associados a valores numéricos, geralmente representando custos, capacidade e/ou ofertas/demandas.

Existe uma série de problemas em grafo conservativo que são agrupados em problemas modelo, que possuem algoritmo próprio de resolução. Os principais modelos são: problemas de custo mínimo, problemas de caminho mínimo, problemas de fluxo máximo, problemas de atribuição, problemas de transporte e problemas de circulação. O modelo de problemas de fluxo de custo mínimo constitui uma representação genérica dos problemas de fluxo em grafo conservativo, resolvendo, portanto, todos os demais problemas relacionados com os outros modelos citados acima.

3.2.1 - Formulação

Nos problemas de fluxo de custo mínimo, os arcos estão orientados de um nó i para um nó j e cada arco $(i, j) \in A$ está associado a um custo c_{ij} , que denota o custo por unidade de fluxo neste arco. Assume-se que o custo do fluxo neste arco varia linearmente com a quantidade de fluxo transportado. Também associa-se a cada arco $(i, j) \in A$ uma capacidade dada por l_{ij} e u_{ij} , que denotam a mínima e a máxima quantidades de fluxo que poderão ser transportadas no arco, respectivamente. Um nó $i \in N$ é identificado por um número inteiro e sua oferta/demanda é representada por b_i . Se $b_i > 0$, o nó i é um nó com oferta (fornecedor); se $b_i < 0$, o nó i é um nó com demanda (consumidor); e se $b_i = 0$, o nó i é um nó de

transbordo (ocorre apenas a baldeação do fluxo neste nó). A variável de decisão em um grafo é o fluxo em cada arco, representado no arco $(i, j) \in A$ por x_{ij} .

A formulação da programação linear para o problema de fluxo de custo mínimo em grafo conservativo (AHUJA *et alii*, 1993), é mostrada a seguir:

Minimizar:

$$\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (3.1a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} = b_i, \quad \text{para todo } i \in N \quad (3.1b)$$

e

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \quad \text{para todo } (i, j) \in A \quad (3.1c)$$

A equação (3.1a) fornece o custo do fluxo nos arcos, enquanto a equação (3.1b) identifica as restrições do balanço de fluxo, sendo que o primeiro termo indica as restrições quanto ao total de fluxo que sai do nó i e o segundo termo indica as restrições quanto ao fluxo que entra no nó i . As restrições do balanço de fluxo declaram que o fluxo que sai menos o fluxo que entra deve ser igual a oferta/demanda do nó i . O fluxo deve também satisfazer as restrições das capacidades inferior e superior de cada arco (3.1c). As limitações dos fluxos nos arcos são geralmente físicas ou imposições das faixas operacionais. Em muitas aplicações, a limitação inferior de um arco é zero e neste caso, geralmente não se declara este valor.

3.2.2 - Solução ótima

A solução ótima em grafo (ou em rede) consiste em distribuir adequadamente os fluxos nos arcos de forma que o custo global seja mínimo. Esta solução pode ser obtida pela adaptação do método *simplex* à estrutura de redes. Este algoritmo move-se de uma estrutura

de árvore de recobrimento (*spanning tree*) factível à outra, até a obtenção de uma estrutura de árvore de recobrimento que satisfaça as condições de otimalidade (KENNINGTON e HELGASON, 1980; BARNES e JENSEN, 1980; AHUJA *et alii*, 1993).

Na Figura 3.1 tem-se a representação de um problema de fluxo em grafo conservativo e na Figura 3.2, a solução em que a distribuição do fluxo na rede é ótima, isto é, o custo é mínimo, o que neste caso corresponde a 390,00 unidades monetárias.

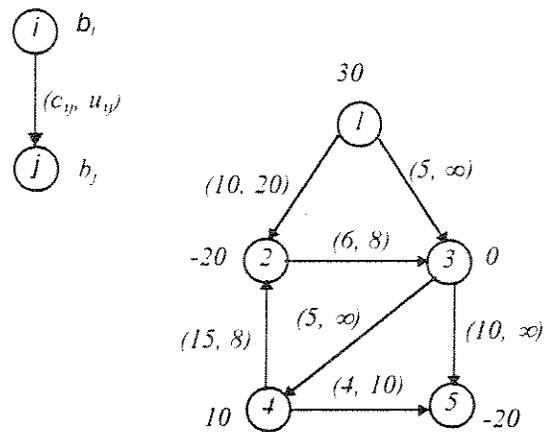


Figura 3.1 - Representação de um problema de fluxo em grafo conservativo

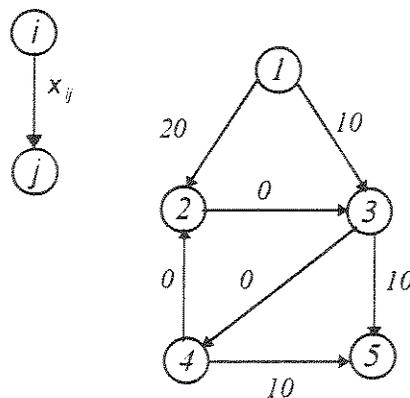


Figura 3.2 - Fluxo ótimo do problema da Figura 3.1

3.2.3 - Aplicações

De acordo com AHUJA *et alii* (1993), o modelo de fluxo de custo mínimo é o mais importante de todos os modelos de problemas de fluxo em grafo conservativo, pois pode ser usado em diversas situações em que os problemas podem ser representados por arcos com fluxos conservativos. Este problema é facilmente declarado, como, por exemplo, a determinação do custo de embarques de mercadorias através de uma rede que atenda em ordem às ofertas/demandas de certos nós. Além disso, pode-se expandir para um número familiar de aplicações, dentre elas: a distribuição de um produto proveniente de diversas fabricas para os atacadistas (armazéns) ou destes para os varejistas; o fluxo de matéria prima e suas fases intermediárias em células de fabricação de uma linha de produção em série; a rota de automóveis em um centro urbano; e a rota de chamadas telefônicas.

3.3 - Grafo Generalizado

Em grafo conservativo não ocorrem variações nos fluxos transportados, uma vez que a mesma quantidade de fluxo x_{ij} que sai de um nó origem i para um nó destino j chega ao mesmo sem qualquer alteração (Figura 3.3a). Porém, em grafo generalizado, o fluxo que é enviado de um nó i , chega ao seu destino multiplicado por um fator μ_{ij} (o fluxo transportado para o nó j é de $\mu_{ij} \cdot x_{ij}$). Neste caso, o arco é considerado não conservativo, como pode ser visto na Figura 3.3b.



Figura 3.3 - Transporte de fluxo em um arco (i, j) : (a) grafo conservativo e (b) grafo generalizado.

3.3.1 - Formulação

A formulação apresentada no item 3.2.1, foi desenvolvida para sistemas conservativos, no entanto, introduzindo multiplicadores de arcos no problema de fluxo de custo mínimo, tem-se o problema de fluxo generalizado. O multiplicador de um arco é definido como a razão entre o fluxo que chega no nó destino pelo fluxo que foi enviado no nó origem através deste mesmo arco. Assim, uma rede é considerada não conservativa quando ocorrem perdas e/ou ganhos no sistema ao se deslocar de um ponto a outro da rede. A formulação da programação linear para o este problema de fluxo (AHUJA *et alii*, 1993), é mostrada a seguir:

Minimizar:

$$\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (3.1a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} \mu_{ji} \cdot x_{ji} = b_i, \quad \text{para todo } i \in N \quad (3.1b)$$

e

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \quad \text{para todo } (i, j) \in A \quad (3.1c)$$

onde: c_{ij} é o custo por unidade de fluxo x_{ij} transportado no arco (i, j) ; b_i é a oferta ou a demanda no nó i ; l_{ij} e u_{ij} são os fluxos mínimo e máximo no arco (i, j) , respectivamente; μ_{ij} é o *multiplicador do arco* (i, j) (se $\mu_{ij} > 1$ o arco (i, j) é um *gerador*, ocorrendo ganho no arco; se $\mu_{ij} < 1$ o arco (i, j) é um *sorvedor* ou um *consumidor*, ocorrendo perda ou consumo no arco; e, se $\mu_{ij} = 1$, o arco (i, j) é *conservativo*).

3.3.2 - Solução ótima

Como dito anteriormente, o problema de fluxo em um grafo generalizado é uma generalização do caso conservativo, o que torna significativamente mais difícil de ser resolvido. Em alguns casos, pode-se generalizar o algoritmo do fluxo em um grafo conservativo e adaptá-lo para a resolução de problemas de fluxo em grafo generalizado. O algoritmo *simplex* para grafo conservativo deve ser modificado para gerar soluções para um grafo generalizado, já que, na prática, este é o único algoritmo disponível e suficientemente rápido. Para se ter uma idéia, o tempo de resolução de um problema de fluxo através do algoritmo *simplex* para grafo generalizado é aproximadamente três vezes mais longo que o algoritmo para grafo conservativo; no entanto, é cerca de cem vezes mais rápido do que o algoritmo *simplex* tradicional (AHUJA *et alii* 1993).

Se o problema da Figura 3.1 fosse resolvido como um problema de fluxo em grafo generalizado, utilizando os multiplicadores de arco mostrado na Figura 3.4, a solução não seria a mesma, uma vez que o multiplicador de arco altera a quantidade de fluxo transportado, gerando ou eliminando fluxo. Neste caso, os nós da rede são atendidos ao custo de 377,50 unidades monetárias (Figura 3.5), que é inferior ao apresentado na Figura 3.2.

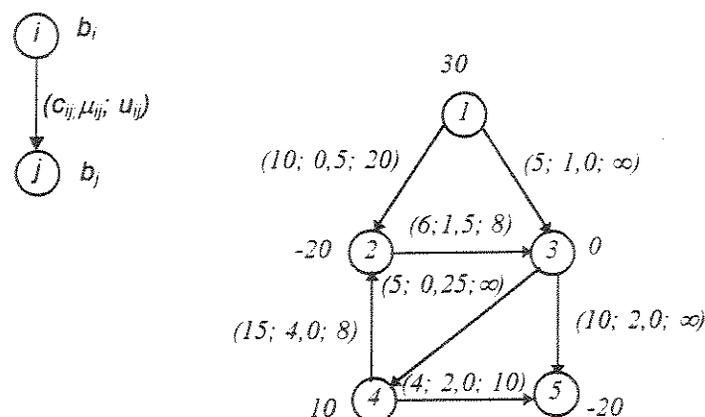


Figura 3.4 - Representação de um problema de fluxo em grafo generalizado

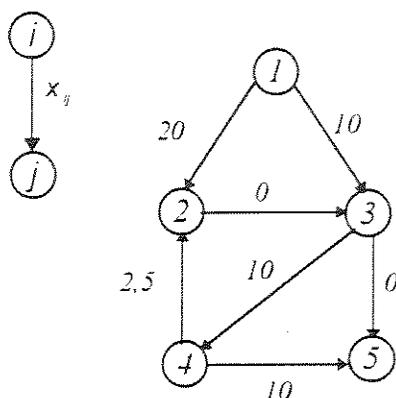


Figura 3.5 - Fluxo ótimo do problema da Figura 3.4

3.3.3 - Aplicações

O grafo generalizado tem sido aplicado com sucesso em diversas situações em que o método de grafo conservativo não representa adequadamente o problema. Existem duas interpretações muito comuns para o multiplicador de arco (μ_{ij}) utilizado em grafo generalizado. Na primeira interpretação, o multiplicador de arco é visto como um modificador da quantidade de fluxo de alguns itens em particular. Utilizando esta interpretação, o modelo de grafo generalizado representa situações envolvendo transformações físicas, como evaporação, vazamento, deterioração e purificação de processo com várias eficiências, além de transformações administrativas, tal como, o crescimento monetário devido a aplicação de uma taxa de juro. Em uma segunda interpretação, a multiplicação do processo é vista como a transformação de um determinado item em outro. Esta interpretação permite a modelagem de processos tais como a fabricação de um determinado produto, a troca de moeda e a transferência de recursos financeiros em recursos humanos.

3.4 - Otimização Multi-Objetivo

A técnica de *otimização multi-objetivo* é usada quando se pretende otimizar simultaneamente várias funções objetivo. A solução ideal de um problema multi-objetivo ocorre quando todos os objetivos são minimizados (ou maximizados) simultaneamente. Porém,

em grande parte dos problemas, isto é impossível, pois as funções objetivo são conflitantes. Entende-se por objetivos conflitantes, todas as funções objetivo que não podem ser melhoradas sem piorar pelo menos um dos demais objetivos.

Em redes, os problemas multi-objetivo aparecem quando se deseja otimizar simultaneamente diversas funções que utilizam a mesma rede. Estas funções podem ser diferenciadas por características físicas ou simplesmente por origem e destino dos pares de nós. Se os objetivos são conflitantes, o analista pode optar por uma análise das soluções eficientes na região de compromisso (*trade-off*).

3.4.1 - Formulação

Utilizando a formulação multi-objetivo da programação linear (STEUER, 1989), o problema de minimização é formulado como segue:

$$\text{Minimizar } \mathbf{z} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (3.3)$$

$$\text{Sujeito a: } \mathbf{x} \in \mathbf{S}$$

onde: \mathbf{z} é o vetor função objetivo, no espaço dos objetivos $\mathbf{z} \in \mathbf{Z}$; \mathbf{C} é a matriz cujas linhas representam os coeficientes das funções objetivos; \mathbf{x} é o vetor decisão, no espaço de decisão $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$; $\mathbf{S} = \{\mathbf{x} \in \mathbf{X} : \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0}\}$ é o conjunto factível, $\mathbf{S} \subseteq \mathbf{X}$; \mathbf{A} é a matriz cujas linhas representam os coeficientes das restrições e \mathbf{b} é o vetor oferta/demanda.

3.4.2 - Função utilidade

Alguns problemas multi-objetivo permitem que o analista construa uma função que agrega todos os objetivos simultaneamente, é a *função utilidade do analista D*. Neste caso, um problema multi-objetivo é formulado como segue.

$$\text{Min } \{D(\mathbf{z}) : \mathbf{z} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \mathbf{x} \in \mathbf{S}\} \quad (3.4)$$

No entanto, neste tipo de problema existe uma grande dificuldade em obter uma representação matemática desta função, já que, quanto maior a complexidade do problema maior será a dificuldade em obtê-la.

3.4.3 - Soluções eficientes

Um ponto em S é ótimo se e somente se minimiza a função utilidade (3.4). Para ser ótimo, no entanto, deve ser *eficiente*. Um ponto em S é eficiente se e somente se seus vetores objetivo não são *dominados*, isto é, um ponto é eficiente se e somente se não é possível decrescer um dos objetivos sem crescer um dos outros objetivos. Assim, uma solução $\mathbf{x}^* \in S$ é eficiente se e somente se não existir um $\mathbf{x} \in S$ tal que, $\mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{C}\mathbf{x}^*$ e $\mathbf{C}\mathbf{x} \neq \mathbf{C}\mathbf{x}^*$.

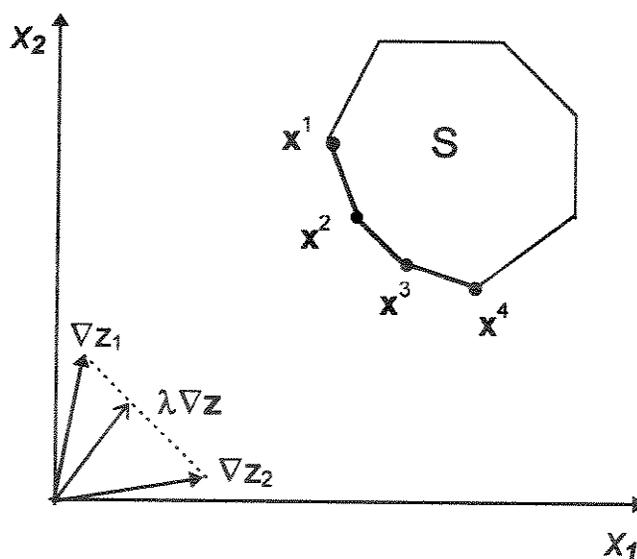


Figura 3.6 - Soluções eficientes no espaço de decisão

A representação gráfica de um conjunto de soluções eficientes, no espaço de decisão, está mostrado na Figura 3.6. Verifica-se que, ao variar o gradiente dos objetivos (∇z) pela multiplicação de um vetor λ , obtém-se todos os pontos eficientes da região factível S . Os pontos x^1 , x^2 , x^3 e x^4 , são os pontos *extremos eficientes* e os segmentos de retas entre eles, formam o conjunto das soluções eficientes.

3.4.4 - Solução final e a região do *trade-off*

A solução que participa satisfatoriamente do processo de decisão em um problema multi-objetivo é chamada de *solução final*. Esta solução pode ser a solução ótima ou uma outra próxima à solução ótima, uma vez que, na prática, o analista pode ficar satisfeito com esta.

A solução final pode ser obtida através da função utilidade construída pelo analista, porém, sem o conhecimento explícito desta, uma alternativa do analista é analisar os objetivos na *região do trade-off*. Esta tarefa, no entanto, não é fácil, pois esta região geralmente não é pequena.

Na otimização multi-objetivo com objetivos conflitantes, o *trade-off* é caracterizado pelo fato de não poder melhorar um dos objetivos sem piorar pelo menos um dos demais objetivos. A região do *trade-off* é representado no espaço dos objetivos pelo conjunto das soluções eficientes, conforme mostra a Figura 3.7 para o conjunto das soluções eficientes da Figura 3.6. Na região do *trade-off*, a escolha da solução final é baseada, principalmente, no gradiente ($\nabla \mathbf{z}$) entre dois pontos extremos eficientes. Porém, quando há mais de dois objetivos esta análise é dificultada, pois a análise gráfica é de difícil execução. No entanto, na prática o uso de programas computacionais interativos têm demonstrado ser este o método mais eficiente para a análise desta região, permitindo que o analista interfira nas fases de cálculo e de decisão. Esta interferência na escolha da solução de um problema é uma das características que diferenciam os métodos de otimização multi-objetivo dos métodos tradicionais (monobjetivo) de programação matemática.

3.4.5 - Método dos pesos

O método dos *pesos* pondera os objetivos e gera uma única função objetivo; através da formulação da programação linear obtém-se a solução ótima. Infelizmente, o conjunto solução ótima obtido através do *vetor peso* λ , nada mais é que uma preferência do analista, uma vez que a solução ótima também é dependente do comprimento relativo do gradiente da função objetivo e da geometria da região factível (STEUER, 1989). No entanto, a vantagem em usar o método dos pesos é que a solução gerada em (3.5), para cada vetor $\lambda \in \Lambda$, é um ponto

extremo ótimo em S e este por sua vez é eficiente. Assim, utilizando todos os vetores λ de Λ determina-se todos os pontos extremos eficientes do problema.

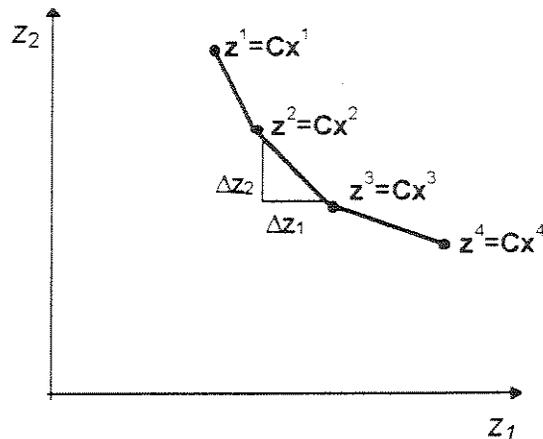


Figura 3.7 - Região do *trade-off*

A formulação (3.3) parametrizada com o vetor peso é dada por

$$\text{Minimizar } z = \lambda Cx \quad (3.5)$$

Sujeito a: $x \in S$;

$$\lambda \in \Lambda$$

onde $\Lambda = \{\lambda : \sum \lambda_i = 1 \text{ e } \lambda_i > 0\}$

Quando o problema tem apenas dois objetivos, o método dos pesos pode ser resolvido através da programação paramétrica, como segue:

$$\text{Minimizar } z = \lambda C_1 x + (1-\lambda) C_2 x \quad (3.6)$$

Sujeito a: $x \in S$;

onde: C_1x e C_2x são os objetivos e λ corresponde a componente do vetor peso, dado por $\lambda=(\lambda, 1-\lambda)$, o qual deve estar no intervalo $0 < \lambda < 1$.

3.4.6 - Filtragem de pontos

A *filtragem* refere-se ao processo de seleção de subconjuntos de pontos de um conjunto grande, porém finito, de pontos. Esta ferramenta permite administrar grandes quantidades de informação. Há dois tipos de filtragem, a direta e a reversa. Por exemplo, dado um conjunto V finito de vetores e uma quantidade n de vetores a ser determinada com a filtragem (n é o tamanho do subconjunto a ser selecionado), na *filtragem direta*, empenha-se em obter n vetores em V , o mais diferente possível um dos outros. Esta tarefa é finalizada quando encontra-se os n vetores em V que têm o maior distanciamento, lado a lado, um do outro, de acordo com a métrica dada. Já na *filtragem reversa*, dado um vetor $v \in V$, seleciona-se $n - 1$ vetores em V , o mais similar de v . Esta tarefa é finalizada quando encontra-se os $n - 1$ vetores o mais próximo possível de v , de acordo com a métrica dada (STEUER, 1989).

Neste trabalho, a filtragem será utilizada na eliminação de algumas soluções eficientes na região do *trade-off*. Isto se faz necessário devido ao grande número de soluções próximas, cuja eliminação facilita a análise sem perda de informações. As Figuras 3.8 e 3.9 mostram dois tipos comuns de filtragem, sendo que na parte (a) tem-se o problema original enquanto na parte (b) o problema está filtrado.

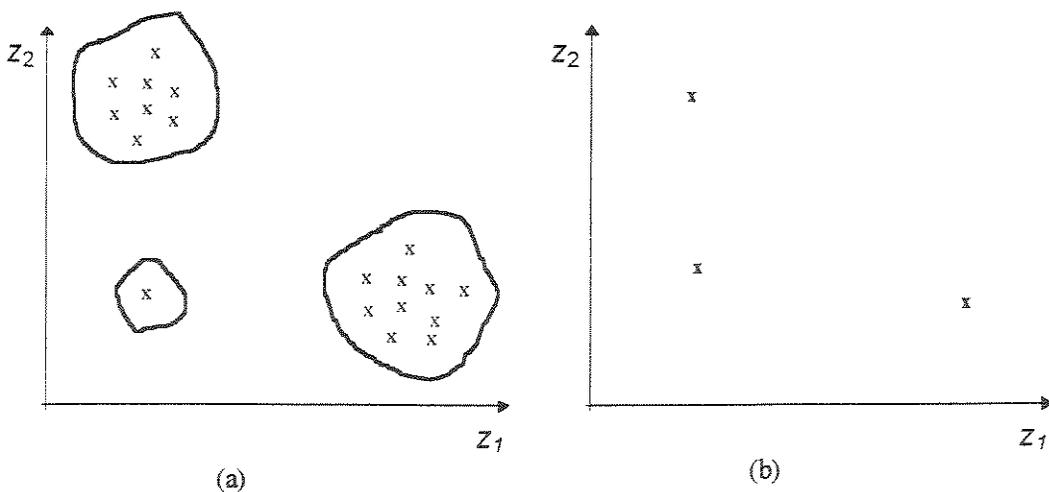


Figura 3.8 - Filtragem de pontos: (a) problema original e (b) problema filtrado

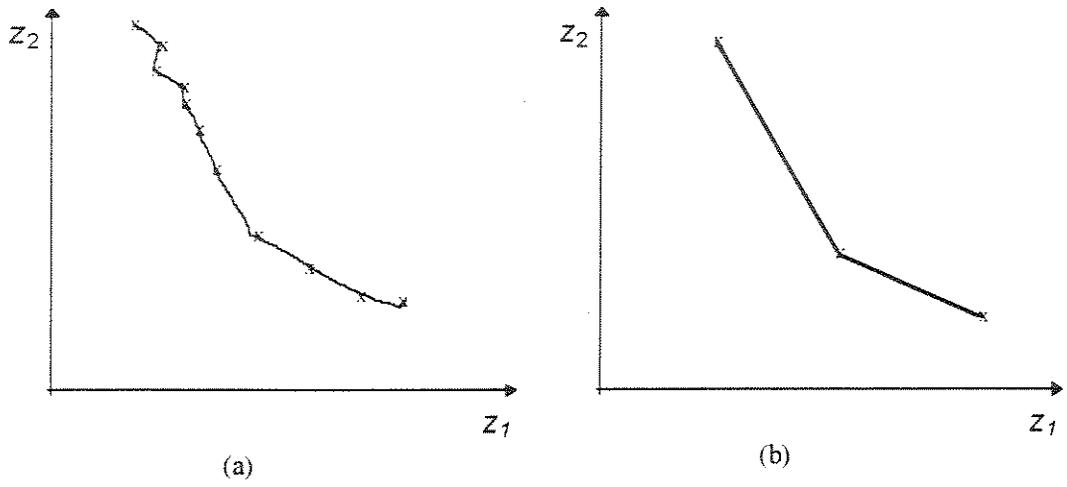


Figura 3.9 - Filtragem de pontos: (a) problema original e (b) problema linearizado

Capítulo 4

Recuperação Energética em Rede de Trocadores de Calor Considerando Perdas

4.1 - Introdução

Uma das preocupações dos projetistas em um processo industrial tem sido a recuperação térmica em redes de trocadores de calor. Um problema típico ocorre quando se pretende atender a demanda de energia térmica de um conjunto de correntes, quentes e frias do processo, para que este atinja temperaturas prefixadas. Esta demanda poderá ser suprida com a transferência de calor entre as correntes quentes e frias do próprio processo. No entanto, na maioria das vezes, a energia térmica nelas disponível para transferência de calor não é suficiente, ou, não é possível a realização desta transferência. Além disso, parte desse calor é dissipado para o meio ambiente. Então, faz-se o uso de utilidades, para complementar a energia solicitada. Como o uso das utilidades representa custo adicional ao processo, o uso destas deverá ser minimizado.

Uma forma de minimizar o uso das utilidades em uma rede de trocadores de calor, considerando a dissipação de calor para o meio ambiente, é através da aplicação das formulações de grafo generalizado. A adaptação do problema de fluxo em grafo generalizado para rede de trocadores de calor requer a reorganização de algumas variáveis e a introdução de novos índices. Para assegurar a transferência de calor, é considerada uma diferença mínima de temperatura entre as diversas correntes que poderão transferir calor. Para isso, as correntes do processo serão divididas em blocos, aqui chamados de subcorrentes, em função das faixas

de temperatura. Antes de ser apresentada a formulação do modelo de otimização, que terá como finalidade a minimização do uso de utilidades, serão apresentados alguns conceitos e definições fundamentais ao entendimento do mesmo.

4.2 - Intervalos de Temperatura

Para definir os intervalos de temperatura, é utilizado o procedimento proposto por LINNHOFF e FLOWER (1978a) e modificado por CERDA *et alii* (1983), que consiste em identificar os pontos terminais (quinas) dos intervalos de temperatura. Estes intervalos definem blocos (níveis) de energia nas correntes do processo, além disso as temperaturas que limitam estes blocos normalmente são as temperaturas das correntes na entrada e na saída dos trocadores de calor que serão utilizados.

Para fazer esta seleção inicialmente as correntes de processos são fundidas em duas curvas, uma referente às correntes que deverão ser aquecidas (correntes frias) e outra referente as correntes que deverão ser resfriadas (correntes quentes), conforme ilustrações das Figuras 2.1 e 2.2. Cada curva relaciona a oferta ou demanda do fluxo de energia térmica em função da temperatura. Assim, uma temperatura T_j será um ponto candidato a limitar o intervalo de temperatura se na curva de aquecimento

$$\sum_{i \in I_{C,j}^+} (\dot{m} \cdot Cp)_i > \sum_{i \in I_{C,j}^-} (\dot{m} \cdot Cp)_i \quad (4.1a)$$

ou se na curva de resfriamento

$$\sum_{i \in I_{H,j}^+} (\dot{m} \cdot Cp)_i < \sum_{i \in I_{H,j}^-} (\dot{m} \cdot Cp)_i \quad (4.1b)$$

onde os conjuntos $I_{C,j}^+$ e $I_{C,j}^-$ são as correntes frias que necessitam de aquecimento imediatamente acima e abaixo da temperatura T_j , respectivamente, e os conjuntos $I_{H,j}^+$ e $I_{H,j}^-$

são similarmente definidos para as correntes quentes que necessitam de resfriamento imediatamente acima e abaixo da temperatura T_j .

Segundo CERDA *et alii* (1983), o ponto de *pinch* (Figura 2.2) sempre corre onde há uma mudança na inclinação de uma das curvas compostas. Esta constatação permite a limitação do conjunto de pontos candidatos a limitarem os intervalos de temperatura. Deste modo, os pontos candidatos a limitarem os intervalos de temperatura são os pontos extremos e aqueles onde há uma mudança na inclinação das curvas compostas, como mostrado na Figura 4.1. Nesta pode-se verificar que os pontos de 1 a 6, na curva de aquecimento, e os pontos de 7 a 12, na curva de resfriamento, são os pontos candidatos a limitarem estes intervalos de temperaturas.

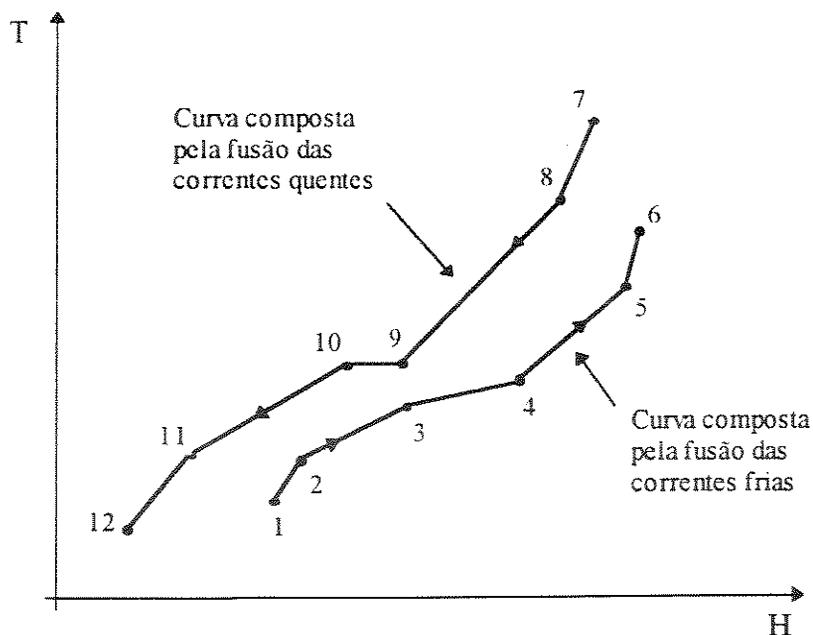


Figura 4.1 - Identificação dos pontos candidatos a limitarem os intervalos de temperatura nas curvas compostas.

Cada ponto selecionado nas inequações (4.1a) e (4.1b) define o limite de um dos intervalos de temperatura em duas diferentes escalas, uma correspondente à faixa de temperatura das correntes que deverão ser aquecidas e outra correspondente à faixa de

temperatura das correntes que deverão ser resfriadas. Um ponto de temperatura T_j selecionado pela inequação (4.1a) é marcado diretamente na escala de temperatura referente às correntes frias e marcado com um acréscimo de uma ΔT_{min} na escala de temperatura referente as correntes quentes, ou seja é marcado $T_j + \Delta T_{min}$, onde ΔT_{min} é uma diferença mínima de temperatura entre as correntes que poderão transferir calor. Já um ponto de temperatura T_j selecionado pela inequação (4.1b) é marcado diretamente na escala de temperatura referente às correntes quentes e marcado com um decréscimo de uma ΔT_{min} na escala de temperatura referente as correntes frias, ou seja é marcado $T_j - \Delta T_{min}$. Estas escalas de temperaturas deverão conter todas as faixas de temperatura de suas respectivas correntes de processo e utilidades. O intervalo de temperatura entre dois pontos consecutivos em uma das escalas de temperatura será chamado de *nível ou intervalo de temperatura*.

Para fixar este conceito, admita-se que ao aplicar as inequações (4.1) no processo da Figura 4.1, por exemplo, seja selecionado o conjunto de pontos {1, 2, 5, 7 e 9} que irão limitar os intervalos de temperatura. Ao aplicar o procedimento descrito no parágrafo acima, gera-se os níveis de temperatura mostrados na Figura 4.2. Nesta, observa-se que os pontos 7 e 9 na curva de resfriamento (correspondentes as temperaturas T_7 e T_9 , respectivamente) ao serem reduzidos de um ΔT_{min} originaram-se os pontos T'_7 e T'_9 , respectivamente, na escala das correntes frias. Já os pontos 1, 2 e 5 na curva de aquecimento (correspondentes as temperaturas T_1 , T_2 e T_5 , respectivamente) ao serem acrescidos de um ΔT_{min} originaram-se os pontos T'_1 , T'_2 e T'_5 , respectivamente, na escala das correntes quentes. Os pontos marcados nas escalas de temperaturas são os pontos que definirão os níveis de temperatura, os quais correspondem aos intervalos entre dois pontos de temperatura consecutivos. No exemplo, o nível 4 nas correntes frias corresponde ao intervalo de temperatura $[T'_9, T_5]$, enquanto nas correntes quentes corresponde ao intervalo $[T_9, T'_5]$. Os níveis extremos que não possuem correntes não necessitam ser considerados.

A escolha deste procedimento deve-se ao fato deste ser baseado na metodologia de recuperação térmica *pinch*, a qual permite a máxima integração térmica do processo. Além disso, as temperaturas que limitam os níveis são geralmente as temperaturas das correntes na entrada e na saída dos trocadores de calor de acordo com as combinações das correntes

realizadas nos diversos níveis de temperatura. Outro fato é que a partição em intervalos permite descrever as restrições termodinâmicas para o problema, pois o calor sempre flui de um nível de temperatura maior para um menor. Neste caso, um intervalo de temperatura l das correntes quentes pode transferir calor para um intervalo de temperatura k das correntes frias, desde que $k \leq l$.

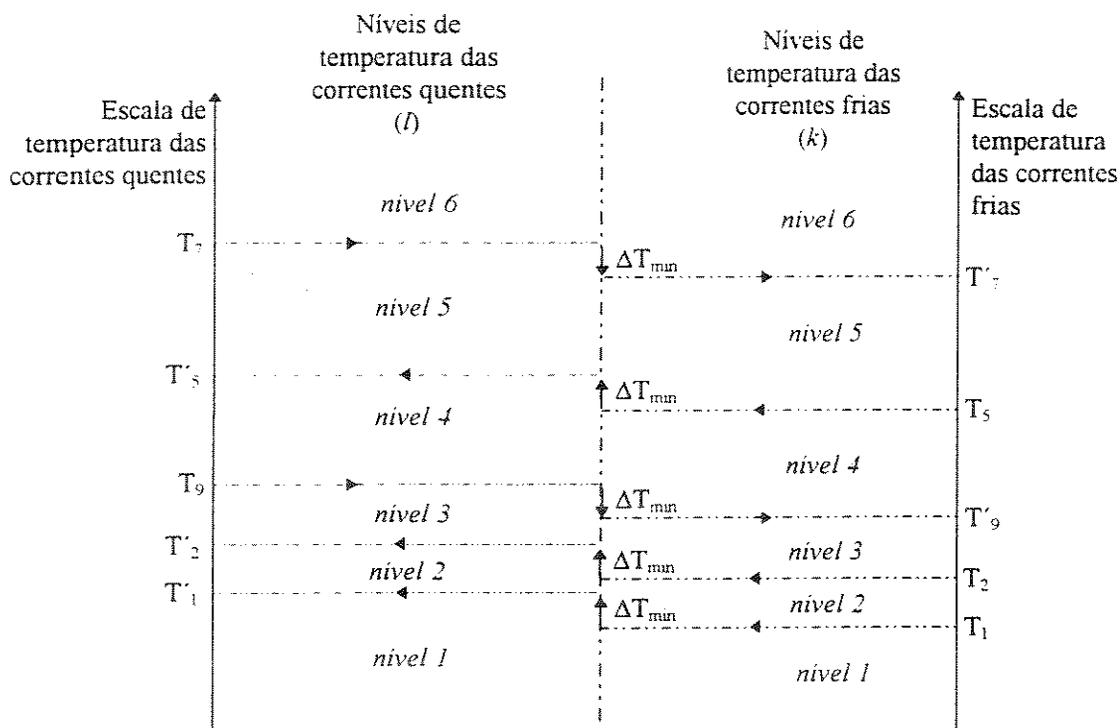


Figura 4.2 - Obtenção dos níveis de temperatura do problema da Figura 4.1.

Para facilitar a quantificação da capacidade de transferência térmica entre as correntes, estas são divididas em função de seu nível de temperatura. Para isso, pode-se imaginar que cada corrente de processo foi projetada nos intervalos de temperatura e a parcela de cada corrente, em cada intervalo de temperatura, será chamada de *subcorrente*. Desta forma, cada subcorrente é caracterizada por dois índices, sendo que o inferior identifica a corrente que a originou e o superior o nível de temperatura analisado. Denota-se por a_i^k a carga térmica necessária para o aquecimento da corrente fria i no intervalo de temperatura k (subcorrente c_i^k ou C_i^k). Quando não ocorre mudança de fase, a_i^k é dada por

$$a_i^k = \left(\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \right)_i^k \quad (4.2a)$$

De modo análogo, b_i^l é a disponibilidade térmica da corrente quente i no intervalo de temperatura l (subcorrente h_i^l ou H_i^l) e pode ser obtida por

$$b_i^l = \left(\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \right)_i^l \quad (4.2b)$$

4.3 - Fator de Eficiência do Isolamento Térmico

Em uma rede de trocadores de calor as perdas energéticas podem ser significativas, devendo, portanto, ser consideradas nos métodos de otimização. Elas são causadas, principalmente, por isolamento térmico inadequado das tubulações e dos trocadores de calor, além das causadas por queda de pressão e vazamento dos fluidos de processos. No entanto, por simplificação, serão consideradas aqui apenas as perdas inerentes aos trocadores de calor, através de um fator de eficiência do isolamento térmico μ_r . Este fator representa a razão entre a quantidade de calor útil transferido para a corrente fria (Q_c) e o calor disponível na corrente quente (Q_h) que foi transferido para a corrente fria e para o ambiente no intervalo de temperatura analisado, conforme mostra a Figura 4.3 (neste caso, $\mu_r = Q_c/Q_h$). Em um trocador de calor onde não ocorre mudança de fase do fluido de processo, para a corrente fria $Q_c = \dot{m}_i C_p (T_{c2} - T_{c1})$ e para a corrente quente $Q_h = \dot{m}_j C_p (T_{h1} - T_{h2})$.

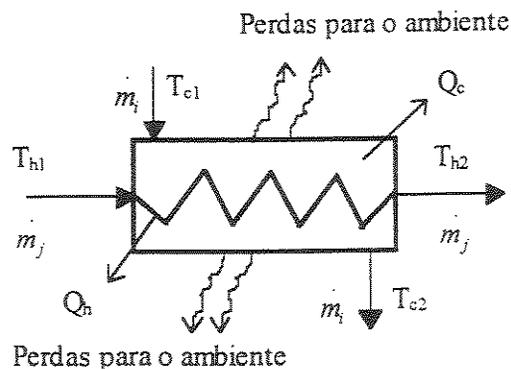


Figura 4.3 - Esquema de um trocador de calor

4.4 - Minimização do Uso das Utilidades

Na representação em grafo generalizado, as subcorrentes $(c_i^k, C_i^k, h_i^l, H_i^l)$ representam nós pertencentes a um dos seguintes conjuntos:

- conjunto das subcorrentes de processo frias, S_c ;
- conjunto das subcorrentes de processo quentes, S_h ;
- conjunto das subcorrentes das utilidades de resfriamento, \mathcal{U}_c ;
- conjunto das subcorrentes das utilidades de aquecimento, \mathcal{U}_h .

A transferência de calor entre duas subcorrentes é representada por um *arco* $r=(s, t)$, cuja orientação é do nó $s \in S_h \cup \mathcal{U}_h$ para um nó $t \in S_c \cup \mathcal{U}_c$. Um arco r pode corresponder a uma das seguintes categorias de *recuperadores* de calor:

- *aquecedores* \mathcal{H} , os quais transferem calor das correntes das utilidades de aquecimento para as correntes de processo frias;
- *resfriadores* \mathcal{C} , os quais transferem calor das correntes de processo quentes para as correntes das utilidades de resfriamento;
- *permutadores* \mathcal{E} , os quais transferem calor das correntes de processo quentes para as correntes de processo frias.

Assim, a rede de trocadores de calor é composta pela união dos conjuntos $\mathcal{C} \cup \mathcal{E} \cup \mathcal{H}$.

4.4.1 - Função objetivo

A quantidade de calor proveniente das utilidades é dada pela soma do calor transferido nos arcos que ligam as correntes de processo às correntes das utilidades. De acordo com a representação em grafo generalizado (item 3.3.1), a função objetivo E que representa o uso das utilidades é dada por

$$E = \sum_{r \in \mathcal{C}} \mu_r \cdot q_r + \sum_{r \in \mathcal{H}} q_r \quad (4.3)$$

A primeira parte desta equação representa o calor que poderá ser transferido das correntes de processo quentes para as utilidades de resfriamento. Já a segunda parte representa o calor que poderá ser transferido das utilidades de aquecimento para as correntes de processo frias. O termo μ_r representa o fator de eficiência do isolante térmico do trocador utilizado na transferência de calor entre dois nós (duas subcorrentes). O arco r neste modelo representa o trocador de calor.

4.4.2 - Restrições

A demanda de calor em um nó t (a_t^k) é representada por a_t e o calor a ser removido de um de um nó s (b_s^l) é representado por b_s . Deste modo, as restrições em grafo generalizado que representam a região factível S da função objetivo (E) são dadas por

$$\sum_{r \in \mathcal{H} \cup \mathcal{E}} \mu_r \cdot q_r = a_t, \text{ para todo } t \in \mathcal{S}_c \quad (4.4a)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{O} \cup \mathcal{E}} q_r = b_s, \text{ para todo } s \in \mathcal{S}_h \quad (4.4b)$$

$$q_r \geq 0, \text{ para todo } r \in \mathcal{O} \cup \mathcal{E} \cup \mathcal{H} \quad (4.4c)$$

A equação (4.4a) mostra as restrições quanto ao calor solicitado pelas correntes de processo frias das correntes de processo quentes e/ou das utilidades de aquecimento. A equação (4.4b) mostra as restrições quanto ao calor disponível nas correntes de processo quentes que poderá ser transferido para as correntes de processo frias e/ou para as utilidades de resfriamento. O calor transferido é sempre maior que zero (4.4c) e o fator de eficiência do isolamento térmico é sempre menor ou igual a um ($0 < \mu_r \leq 1$).

4.4.3 - Formulação

A formulação do problema com restrições em grafo generalizado aplicado em rede de trocadores de calor, tendo como objetivo a minimização do uso das utilidades é dada pela junção das equações (4.3) e (4.4), como mostrado a seguir.

$$\text{Minimizar } \sum_{r \in \mathcal{E}} \mu_r \cdot q_r + \sum_{r \in \mathcal{A}} q_r$$

Sujeito a:

$$\sum_{r \in \mathcal{E} \cup \mathcal{A}} \mu_r \cdot q_r = a_t, \text{ para todo } t \in \mathcal{S}_c \quad (4.5)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{E} \cup \mathcal{A}} q_r = b_s, \text{ para todo } s \in \mathcal{S}_b$$

$$q_r \geq 0, \text{ para todo } r \in \mathcal{E} \cup \mathcal{A}$$

A Figura 4.4 mostra esquematicamente as combinações possíveis entre as correntes participantes de um processo de acordo com os níveis de temperatura. Observa-se que, quanto mais integrado está o processo, menos uso se faz das utilidades.

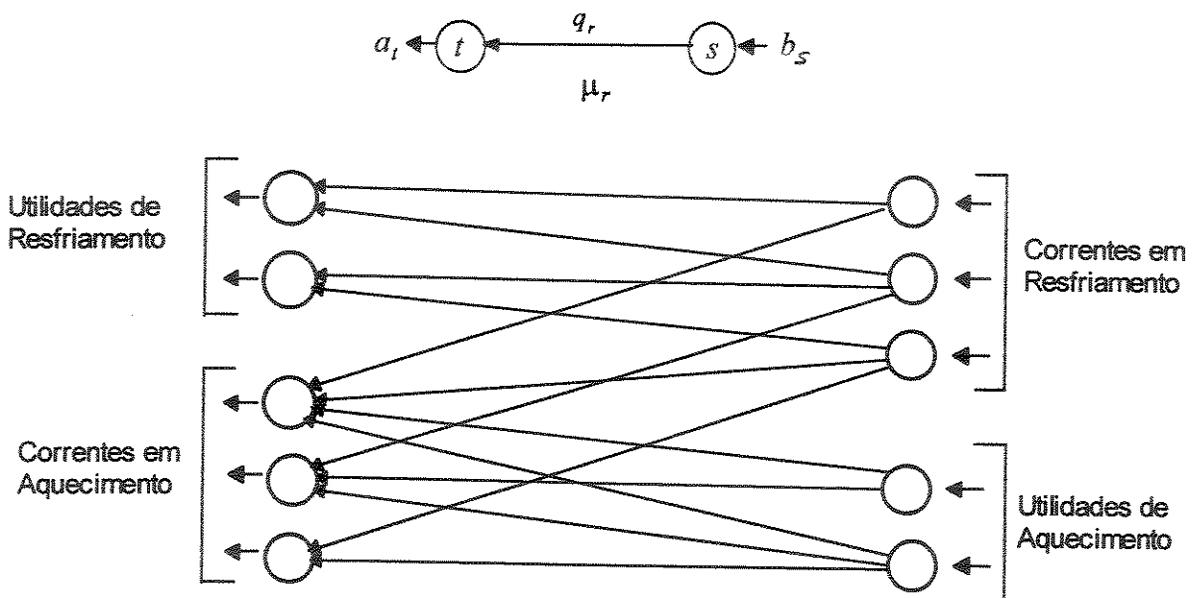


Figura 4.4 - Combinações entre as correntes participantes de um processo

Capítulo 5

Extensão do Modelo ao Problema Multi-Objetivo

5.1 - Introdução

Além do uso de utilidades, cuja minimização foi discutida no capítulo anterior, outro fato que merece atenção especial em uma rede de trocadores é a área de transferência de calor, uma vez que, salvo em alguns casos, o custo de um trocador é tipicamente proporcional à sua área de transferência de calor. Isto implica que, minimizando a área de transferência de calor, minimiza-se também o custo do trocador. Neste caso, vale ressaltar dois tipos de custos envolvidos: um custo de investimento representado pela área de transferência de calor e um custo operacional referente ao uso de utilidades.

O modelo de otimização multi-objetivo aplicado em rede de trocadores de calor desenvolvido neste trabalho considera os dois objetivos citados acima, considerando também a dissipação de energia térmica para o meio ambiente. Este modelo permite que se faça uma análise destes objetivos simultaneamente, mostrando suas variações e influências na escolha da solução final.

5.2 - Minimização da Área Total de Transferência de Calor

No cálculo da área de transferência de calor são utilizados os mesmos conceitos e definições do Capítulo 4. Além disso, no desenvolvimento da formulação são utilizadas as mesmas restrições apresentadas na equação (4.4), já que se trata da mesma rede de trocadores de calor.

5.2.1 - Função objetivo

A área de transferência de calor (A) é proporcional à taxa de energia térmica (q) e inversamente proporcional ao produto do coeficiente global de transferência de calor (U) pela diferença média de temperatura (ΔT_m) e é dada por:

$$A = \frac{q}{U \cdot \Delta T_m} \quad (5.1)$$

Aplicando esta equação na rede de trocadores de calor, a função objetivo A que representa as áreas de transferências de calor em grafo generalizado é dada por

$$A = \sum_{r \in \mathcal{R}_c} \frac{\mu_r \cdot q_r}{U_r \cdot \Delta T_{m,r}} + \sum_{r \in \mathcal{R}_h} \frac{q_r}{U_r \cdot \Delta T_{m,r}} \quad (5.2)$$

onde $\mathcal{R}_c \subset (\mathcal{O} \cup \mathcal{E} \cup \mathcal{A})$ e refere-se aos trocadores que apresentam dissipação de calor para o ambiente sem que este calor passe antes pela área de transferência de calor em análise; já $\mathcal{R}_h = (\mathcal{O} \cup \mathcal{E} \cup \mathcal{A}) - \mathcal{R}_c$ e refere-se aos trocadores que apresentam dissipação de calor para o ambiente após o calor ter passado pela área de transferência de calor analisada. Em um trocador de calor tipo casco e tubo, o fluido quente circula no casco em \mathcal{R}_c e nos tubos em \mathcal{R}_h . Assim, a equação (5.2) representa a soma das áreas de transferência de calor dos trocadores da rede. O termo U_r representa o coeficiente global de transferência de calor do trocador situado entre duas subcorrentes. Similarmente, para a diferença média de temperatura ($\Delta T_{m,r}$).

5.2.2 - Formulação

A formulação do problema com restrições em grafo generalizado aplicado em rede de trocadores de calor, tendo como objetivo a minimização da área total de transferência de calor, é dada pela junção das equações (5.2) e (4.4), como mostrado a seguir.

$$\text{Minimizar } A = \sum_{r \in \mathcal{R}_c} \frac{\mu_r \cdot q_r}{U_r \cdot \Delta T m_r} + \sum_{r \in \mathcal{R}_h} \frac{q_r}{U_r \cdot \Delta T m_r}$$

Sujeito a:

$$\sum_{r \in \mathcal{H} \cup \mathcal{E}} \mu_r \cdot q_r = a_t, \text{ para todo } t \in \mathcal{S}_c$$

$$\sum_{r \in \mathcal{C} \cup \mathcal{E}} q_r = b_s, \text{ para todo } s \in \mathcal{S}_h \quad (5.3)$$

$$q_r \geq 0, \text{ para todo } r \in \mathcal{C} \cup \mathcal{E} \cup \mathcal{H}$$

A representação desta formulação em grafo é semelhante ao apresentado na Figura 4.2, ressaltando que nos arcos deve fluir uma determinada taxa de energia térmica que solicite uma mínima área de transferência de calor no sistema global.

5.3 - Formulação do Problema Multi-Objetivo

Como dito anteriormente, este modelo de otimização multi-objetivo tem como metas a minimização do uso das utilidades e a minimização da área de transferência de calor. No Capítulo 4, verificou-se que o uso das utilidades pode ser formulado em grafo generalizado através das equações (4.3). Já a área de transferência de calor pode ser minimizada de acordo com a equação (5.2). Estas duas funções objetivos estão sujeitas ao mesmo conjunto de

restrições S , o qual é dado pelo conjunto de equações (4.4). Desta forma, a formulação do problema multi-objetivo é dado pela junção das equações (4.3), (5.2) e (4.4), conforme mostrado no conjunto de equações (5.4) abaixo.

$$\text{Minimizar } E = \sum_{r \in \mathcal{C}} \mu_r \cdot q_r + \sum_{r \in \mathcal{H}} q_r$$

e

$$A = \sum_{r \in \mathcal{R}_c} \frac{\mu_r \cdot q_r}{U_r \cdot \Delta T m_r} + \sum_{r \in \mathcal{R}_h} \frac{q_r}{U_r \cdot \Delta T m_r}$$

Sujeito a: (5.4)

$$\sum_{r \in \mathcal{H} \cup \mathcal{E}} \mu_r \cdot q_r = a_t, \text{ para todo } t \in \mathcal{S}_c$$

$$\sum_{r \in \mathcal{C} \cup \mathcal{E}} q_r = b_s, \text{ para todo } s \in \mathcal{S}_h$$

$$q_r \geq 0, \text{ para todo } r \in \mathcal{C} \cup \mathcal{E} \cup \mathcal{H}$$

Nas duas primeiras equações têm-se os objetivos a serem minimizados e as demais são suas restrições. Analisando estes objetivos, nota-se que eles são conflitantes, uma vez que a área é minimizada quando se tem grandes diferenças médias de temperatura e estas normalmente ocorrem quando se faz uso das utilidades, como poderá ser visto no próximo capítulo.

Para obter o conjunto de soluções eficientes dos objetivos é necessário equacionar o problema conforme a estrutura do método dos pesos. Assim, a formulação (5.4) assume a representação:

$$\text{Minimizar } z = \lambda_1 E + \lambda_2 A$$

Sujeito a:

$$q_r \in S; \quad (5.5)$$

e

$$\lambda \in \Lambda$$

$$\text{onde } \Lambda = \{\lambda : \sum \lambda_i = 1 \text{ e } \lambda_i > 0\}$$

Como na formulação tem-se apenas dois objetivos, o vetor peso $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)$ pode ser escrito através de uma única componente, uma vez que $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$. Desta forma, para $\lambda = \lambda_1, \lambda_2 = 1 - \lambda$ e $0 < \lambda_1 < 1$, o modelo formulado na forma paramétrica fica:

$$\text{Minimizar } z = \lambda E + (1 - \lambda)A$$

(5.6)

Sujeito a:

$$q_r \in S$$

Desta forma, ao variar o parâmetro λ no intervalo aberto $]0, 1[$, obtém-se o conjunto completo de pontos extremos eficientes do problema. Por se tratar de um problema linear, a união dos pontos extremos eficientes consecutivos por segmento de retas, gera o conjunto solução eficiente (Figura 3.6). Se esta seqüência for representada no espaço dos objetivos, obtém-se a região do *trade-off* (Figura 3.7).

Capítulo 6

Análise do Modelo

6.1 - Introdução

Nesta análise pretende-se verificar, para um dado processo, a solução ótima para cada objetivo do modelo, considerando que parte do calor seja dissipado para o meio ambiente, como ocorre normalmente na prática. Porém, em problemas com objetivos conflitantes, como estes em questão, a solução que otimiza uma das metas não otimiza pelo menos uma das demais. Neste caso, uma análise das soluções eficientes torna-se necessária.

Assim, além da análise citada acima, o modelo permite que o usuário inclua também todas as restrições quanto às combinações das correntes na transferência de calor. Estas proibições poderão ser de carácter técnico e/ou econômico. Como as correntes são combinadas através de um arco (trocador de calor), as restrições poderá corresponder a ausência de determinados arcos na formulação da rede (Figura 4.2).

Para atingir esta meta, inicialmente, as funções objetivos são analisadas isoladamente e, em seguida, utilizando os conceitos da programação linear multi-objetivo, são analisados simultaneamente. Além disso, é analisado a solução para o mínimo uso das utilidades considerando o problema formulado em grafo conservativo e em grafo generalizado. Em todas estas situações, admitem-se conhecidos as propriedades termodinâmicas dos fluidos envolvidos no processo.

6.2 - Caracterização do Processo

Para fixar a idéia mostrada neste trabalho será resolvido um exemplo teórico composto por 5 correntes de processo, sendo 3 quentes e 2 frias. Pretende-se que estas atinjam determinadas temperaturas no decorrer do processo, conforme mostra a Tabela 6.1. Este objetivo poderá ser atingido com a transferência de calor entre as correntes de processo e/ou com uso de utilidades. No entanto, o processo deverá ser otimizado de forma que o uso das utilidades e a área total de transferência de calor sejam mínimos.

Tabela 6.1 - Dados térmicos do processo

<i>Correntes</i>	<i>Faixa de Temperatura [°C]</i>	<i>Cp médio [kJ/kg°C]</i>	<i>m [kg/s]</i>
Corrente quente, h ₁	250 → 120	2,2	8,0
	120 → 50	2,0	8,0
Corrente quente, h ₂	300 → 130	1,8	20,0
Corrente quente, h ₃	180 → 60	1,2	5,0
Corrente fria, c ₁	50 → 150	2,5	15,0
	150 → 280	3,0	15,0
Corrente fria, c ₂	20 → 150	1,3	10,0

6.3 - Determinação dos Parâmetros

O exemplo apresentado na Tabela 6.1 é resolvido considerando os arcos não conservativos, os quais representam as transferências de calor, conforme a formulação apresentada anteriormente. Para isso, deve-se dividir adequadamente as faixas de temperaturas em níveis, atribuindo uma diferença mínima de temperatura (ΔT_{min}) entre os níveis das correntes quentes e frias participantes do processo que poderão transferir calor, assegurando, assim, a transferência de calor entre as diversas subcorrentes, conforme descrito no item 4.2.

6.3.1 - Intervalos de temperatura

Antes da determinação dos parâmetros necessários à resolução do exemplo, é aplicado o procedimento apresentado no item 4.2, que permite a determinação dos níveis de temperatura das correntes do processo.

Para facilitar o entendimento, as correntes apresentadas na Tabela 6.1 são representadas no diagrama temperatura-carga térmica através das Figuras 6.1 e 6.2. A Figura 6.1 mostra todas as correntes de processo, enquanto a Figura 6.2 as curvas compostas pelas fusões destas, gerando as curvas de aquecimento e resfriamento. É importante observar nestas figuras que as correntes estão dispostas em função direta da temperatura, porém de modo relativo a taxa de transferência de calor (carga térmica). Deste modo, a fusão destas correntes é feita somando as cargas térmicas de cada corrente e variando-as linearmente com a diferença de temperatura, ou seja $\sum(mCp)\Delta T$ de todas as correntes quentes gera a curva composta de resfriamento e $\sum(mCp)\Delta T$ de todas as correntes frias gera a curva composta de aquecimento.

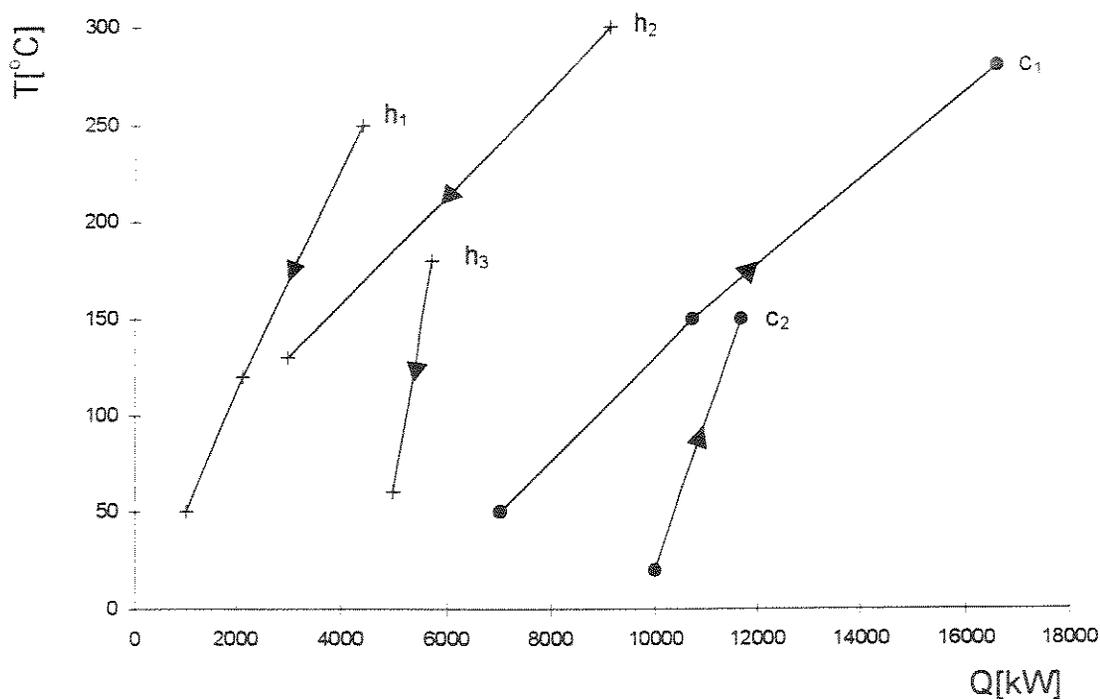


Figura 6.1 - Correntes de processo

Os pontos de temperatura (T_j) candidatos a limitar os intervalos de temperatura, são todos os pontos extremos das correntes, e também, aqueles em que a curva muda de inclinação na representação do diagrama temperatura-carga térmica das Figuras 6.1 e 6.2 (esta abordagem é válida somente para fluidos em que a entalpia varia linearmente com a temperatura). Estes pontos poderão ser selecionados através da aplicação das inequações (4.1). Por exemplo, na Figura 6.2, o somatório da capacidade térmica das correntes imediatamente acima do ponto b ($\sum(\dot{m}C_p)^+$) corresponde a 36,0 [kW/°C] e o somatório da capacidade térmica das correntes imediatamente abaixo do ponto b ($\sum(\dot{m}C_p)^-$) corresponde a 53,6 [kW/°C]. Esta diferença deve-se ao fato da corrente h_1 não existir acima deste ponto. Como no ponto b ($\sum(\dot{m}C_p)^- > \sum(\dot{m}C_p)^+$), este ponto limitará um intervalo de temperatura. O resultado da aplicação das inequações (4.1) está mostrado na Tabela 6.2.

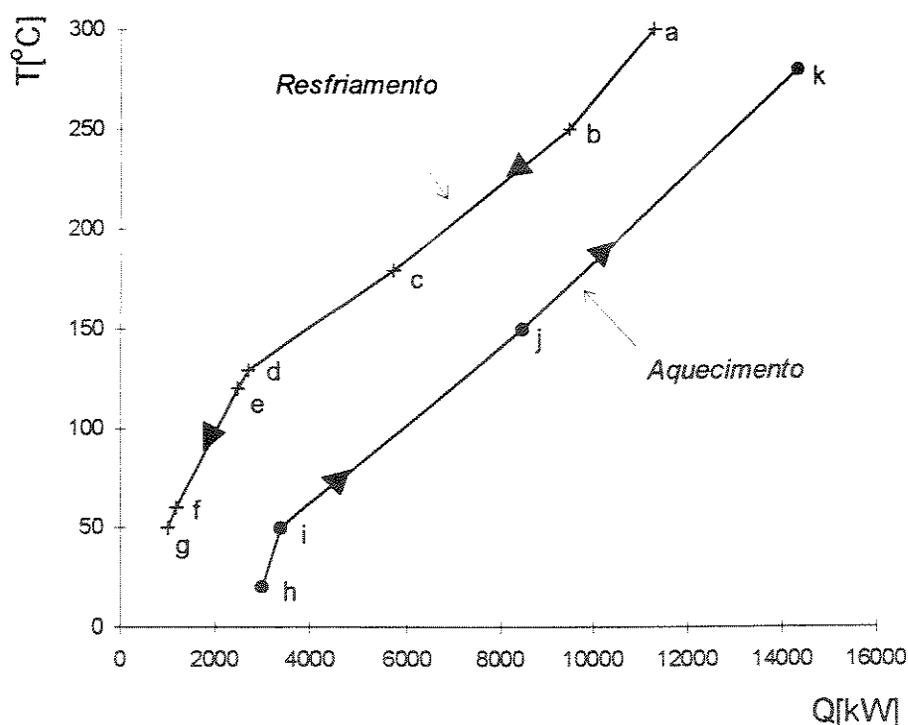


Figura 6.2 - Curvas compostas pela fusão das correntes de processo

Tabela 6.2 - Pontos candidatos a limitarem os intervalos de temperatura

Correntes	Ponto	T_j [°C]	$\Sigma(\dot{m}Cp)^+$ [kW/°C]	$\Sigma(\dot{m}Cp)^-$ [kW/°C]	Validade das inequações (4.1)
Quentes	a	300	0.0	36.0	Sim
	b	250	36.0	53.6	Sim
	c	180	53.6	59.6	Sim
	d	130	59.6	23.6	Não
	e	120	23.6	22.0	Não
	f	60	22.0	16.0	Não
	g	50	16.0	0.0	Não
Frias	h	20	13.0	0.0	Sim
	i	50	50.5	13.0	Sim
	j	150	45.0	50.5	Não
	k	280	0.0	45.0	Não

Segundo LINNHOFF e HINDMARSH (1983), a influência do ΔT_{min} no custo do processo pode ser representado pela Figura 6.3 que mostra qualitativamente a variação do custo total da rede de trocadores de calor e o custo anualizado das utilidades com a variação do ΔT_{min} . Obviamente, quando o ΔT_{min} é igual a zero, a área de transferência de calor tende ao infinito, assim como o custo total da rede de trocadores. Porém, o uso das utilidades e, conseqüentemente, o custo destas é mínimo. A medida que o ΔT_{min} aumenta, o custo total da rede diminui de forma a passar por um ponto de mínimo e, em seguida, aumenta com o custo das utilidades. No entanto, o ponto de mínimo custo é difícil de ser obtido e é dependente de todos os custos envolvido no processo. Em um problema real deve-se fazer uma análise entre os diversos ΔT_{min} na tentativa de encontrar aquele que gere a rede de menor custo. Porém, por simplificação e por não se conhecer todas estas informações citadas acima neste trabalho, para o exemplo em questão, será feito uma análise somente para o $\Delta T_{min} = 20^\circ\text{C}$.

A Figura 6.4 apresenta a disposição das correntes de processo do exemplo com relação às faixas de temperaturas e às projeções dos pontos selecionados na Tabela 6.2 nos respectivos intervalos. Esta figura foi obtida de maneira semelhante àquela da Figura 4.2. Observa-se que a projeção do ponto $T_j=300^\circ\text{C}$ do intervalo de temperatura das correntes quentes, para um $\Delta T_{min}=20^\circ\text{C}$, resulta em $T_j=280^\circ\text{C}$ no intervalo de temperatura das correntes frias, e assim sucessivamente para os demais pontos selecionados na Tabela 6.2. A Tabela 6.3 lista os

intervalos de temperatura das correntes quentes e das correntes frias após a aplicação do procedimento mostrado no item 4.2.

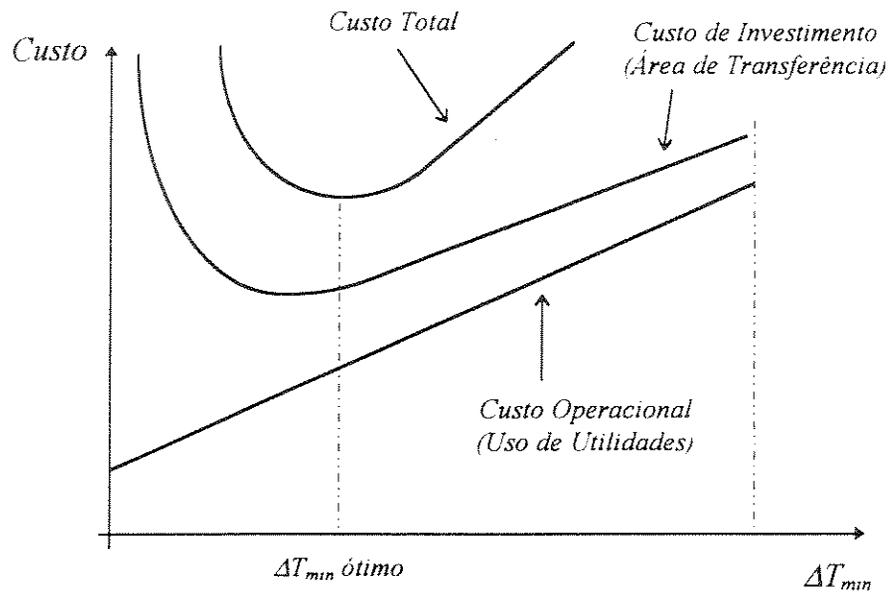


Figura 6.3 - Custo da rede em função do ΔT_{min}

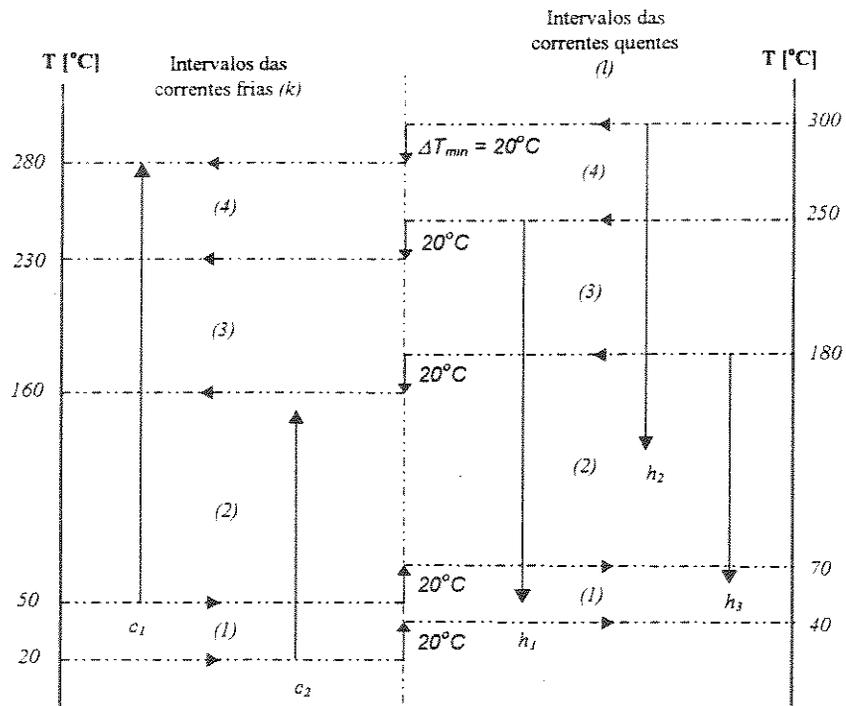


Figura 6.4 - Representação das faixas de temperaturas das correntes de processo

Tabela 6.3 - Intervalos de temperatura para a divisão das correntes de processo ($\Delta T_{min}=20^{\circ}\text{C}$)

Intervalos	(k) - Intervalos das correntes frias [$^{\circ}\text{C}$]	(l) - Intervalos das correntes quentes [$^{\circ}\text{C}$]
1	20 \rightarrow 50	40 \rightarrow 70
2	50 \rightarrow 160	70 \rightarrow 180
3	160 \rightarrow 230	180 \rightarrow 250
4	230 \rightarrow 280	250 \rightarrow 300

As correntes das utilidades devem ser divididas de maneira semelhante as correntes de processo, em função do nível de temperatura. Neste trabalho será admitido idealmente que as correntes das utilidades atingem todos os níveis de temperatura e cuja a projeção corresponderia aos próprios intervalos de temperatura da Figura 6.4. Assim, as utilidades de resfriamento compreende a faixa de temperatura de 20°C a 280°C e as de aquecimento a faixa de 300°C a 40°C . Desta forma, as utilidades garantem as demandas de cada corrente de processo em qualquer nível de temperatura.

6.3.2 - Multiplicadores de arcos

No cálculo da área total de transferências de calor deste exemplo é considerada a hipótese de que todos os trocadores são do tipo casco e tubo, sendo que o fluido circulante no casco tem apenas um trajeto enquanto o fluido que circula nos tubos tem trajetos pares.

A diferença média de temperatura (ΔT_m) para um trocador de calor tipo casco e tubo com fluidos com um trajeto no casco e trajetos pares nos tubos (KERN, 1987) é dado por

$$\Delta T_m = \frac{K_1}{\text{Ln} \left(\frac{K_2 + K_1}{K_2 - K_1} \right)} \quad (6.1)$$

onde:
$$K_1 = \sqrt{(T_{h2} - T_{h1})^2 + (T_{c2} - T_{c1})^2}$$

$$K_2 = (T_{h2} + T_{h1}) - (T_{c2} + T_{c1})$$

Além disso, T_{c1} e T_{c2} são as temperaturas do fluido frio na entrada e na saída do trocador de calor, respectivamente e, T_{h1} e T_{h2} as temperatura do fluido quente na entrada e na saída do trocador de calor, respectivamente. Para o cálculo da diferença média logarítmica de temperatura para trocadores de calor diferente destes, pode-se verificar maiores detalhes no manual do TEMA (1978) e em KAYS e LONDON (1964).

O coeficiente global de transferência de calor (U) pode ser estimado a partir de tabelas fornecidas por BELL (1980) e reproduzidas por GOLDSTEIN (1987). Nestas tabelas, este coeficiente é fornecido em função dos fluidos do trocador de calor.

No exemplo, calculam-se todos os parâmetros necessários a resolução do mesmo, cujo resultado está mostrado na Tabela 6.4. Nesta, a diferença média de temperatura (ΔT_m) foi obtida através da aplicação da equação (6.1) para as diversas combinações de subcorrentes mostradas na Figura 6.4, lembrando que as temperaturas terminais das correntes juntamente com as temperaturas que limitam os níveis são as temperaturas de entrada e saída do trocador de calor. Por se tratar de um exemplo teórico, os valores do coeficiente global de transferência de calor (U_r) e os fatores de eficiência do isolamento térmico do trocador de calor (μ_r) foram estimados para as diversas combinações de fluidos. Os números entre parênteses são os valores de a_i^k e b_i^l calculados através das equações (4.2a) e (4.2b), respectivamente, e os números que contornam a Tabela 6.4 são as temperatura dos intervalos mostrados na Figura 6.3. Finalmente, a letra I representa o arco (trocador de calor) onde há restrições quanto à combinação entre correntes, sendo aqui considerada apenas a impossibilidade termodinâmica de transferência de calor. A legenda no canto inferior direito auxilia na localização dos parâmetros desta tabela.

Por exemplo, ao combinar a corrente h_2 no nível de temperatura 2 (subcorrente h_2^2) com a corrente c_1 no nível de temperatura 2 (subcorrente c_1^2), mostrado em destaque na Tabela 6.4. Deve-se calcular os seguintes parâmetros:

- taxa máxima de calor a ser transferido da subcorrente h_2^2 , $b_2^2 = \left(\dot{m} C_p (T_{h1} - T_{h2}) \right)_2^2$

$$\dot{m}=20,0 \text{ kg/m}^2; C_p=1,8 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad (\text{Tabela 6.1})$$

$$T_{h1}=180\text{ }^{\circ}\text{C}; T_{h2}=130\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Figura 6.4})$$

$$b_2^2 = 20,0 \cdot 1,8 \cdot (180 - 130) = 1800 \text{ kW}$$

- taxa mínima de calor a ser transferido para a subcorrente c_1^2 , $\alpha_1^2 = \left(m C_p (T_{c2} - T_{c1}) \right)_1^2$

$$m = 15,0 \text{ kg/m}^2; \quad C_p = 2,5 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \text{ para } 50\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 150\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ e}$$

$$C_p = 3,0 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \text{ para } 150\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 280\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Tabela 6.1})$$

$$T_{c1} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}; T_{c2} = 160\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Figura 6.4})$$

$$\alpha_1^2 = 15,0 \cdot 2,5 \cdot (150 - 50) + 15,0 \cdot 3,0 \cdot (160 - 150) = 4200 \text{ kW}$$

- diferença média de temperatura ΔTm

$$T_{c1} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}; T_{c2} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}; T_{h1} = 180\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ e } T_{h2} = 130\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Figura 6.4})$$

$$\text{aplicando a equação (6.4), tem-se } \Delta Tm = 43,3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

- fator de eficiência do isolamento térmico, $\mu = 0,98$ (estimado)
- coeficiente global de transferência de calor, $U = 0,34 \text{ kW/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (estimado).

Tabela 6.4 - Parâmetros do problema

		300°	250°	180°			70°		40°				
	Nós	h_2^4 (1800)	h_1^3 (1232)	h_2^3 (2520)	h_1^2 (1856)	h_2^2 (1800)	h_3^2 (660)	h_1^1 (320)	h_3^1 (60)	H_1^4 (Q_H^4)	H_1^3 (Q_H^3)	H_1^2 (Q_H^2)	H_1^1 (Q_H^1)
280°	c_1^4 (2250)	0,94 20,0 0,48	I	I	I	I	I	I	I	0,94 20,0 1,02	I	I	I
230°	c_1^3 (3150)	0,95 71,6 0,44	0,96 20,0 0,47	0,97 20,0 0,41	I	I	I	I	I	0,95 71,6 0,87	0,96 20,0 0,86	I	I
160°	c_1^2 (4200)	0,96 162,6 0,40	0,97 95,6 0,42	0,97 95,6 0,37	0,98 20,0 0,40	0,98 43,3 0,34	0,96 20,0 0,27	I	I	0,96 162,6 0,72	0,96 95,5 0,71	0,97 20,0 0,69	I
	c_2^2 (1300)	0,96 168,9 0,34	0,98 103,2 0,36	0,98 103,2 0,32	0,99 24,7 0,34	0,99 51,0 0,30	0,97 24,7 0,24	I	I	0,97 168,9 0,55	0,97 103,2 0,54	0,98 24,7 0,53	I
50°	c_1^2 (390)	0,97 238,8 0,31	0,98 177,3 0,32	0,99 177,3 0,29	1,00 76,3 0,31	0,99 117,6 0,27	0,98 76,3 0,22	1,00 19,8 0,29	0,99 27,0 0,19	0,98 238,8 0,47	0,98 177,3 0,46	0,99 76,3 0,45	1,00 20,0 0,45
20°	C_1^4 (Q_C^4)	0,95 20,0 0,72	I	I	I	I	I	I	I				
	C_1^3 (Q_C^3)	0,96 79,6 0,71	0,97 20,0 0,78	0,97 20,0 0,63	I	I	I	I	I				
	C_1^2 (Q_C^2)	0,97 162,6 0,69	0,98 95,6 0,76	0,98 95,6 0,61	0,99 20,0 0,69	0,98 43,3 0,54	0,96 20,0 0,37	I	I				
	C_1^1 (Q_C^1)	0,98 238,8 0,67	0,99 177,3 0,73	0,98 177,3 0,60	1,00 76,3 0,67	0,99 117,6 0,52	0,97 76,3 0,36	1,00 19,8 0,60	0,98 27,0 0,28				

Correntes em:

- Resfriamento
- Aquecimento

A Figura 6.5 mostra a representação do exemplo em grafo generalizado. Nesta figura, verifica-se à esquerda o calor que deve ser fornecido às correntes frias nos diversos níveis de temperatura, e à direita, o calor que deve ser removido das correntes quentes nos diversos intervalos de temperatura. Finalmente, ao centro, o fluxo de calor que poderá passar em cada arco com seu respectivo fator de eficiência térmica, μ_r , e α_r que é o multiplicador de arco que gera a área de transferência de calor ao ser multiplicado pelo fluxo térmico q_r , $\alpha_r = \left(\frac{1}{U_r \Delta T m_r} \text{ ou } \frac{\mu_r}{U_r \Delta T m_r} \right)$. Os multiplicadores de arco α_r encontram-se implícitos na Tabela 6.4, uma vez que todos os seus parâmetros foram fornecidos. Na combinação anterior entre as subcorrentes h_2^2 e c_1^2 , tem-se $\alpha=0,067926$ se a corrente fria estiver no casco ou $\alpha=0,066567$ se a corrente fria estiver nos tubos do trocador de calor.

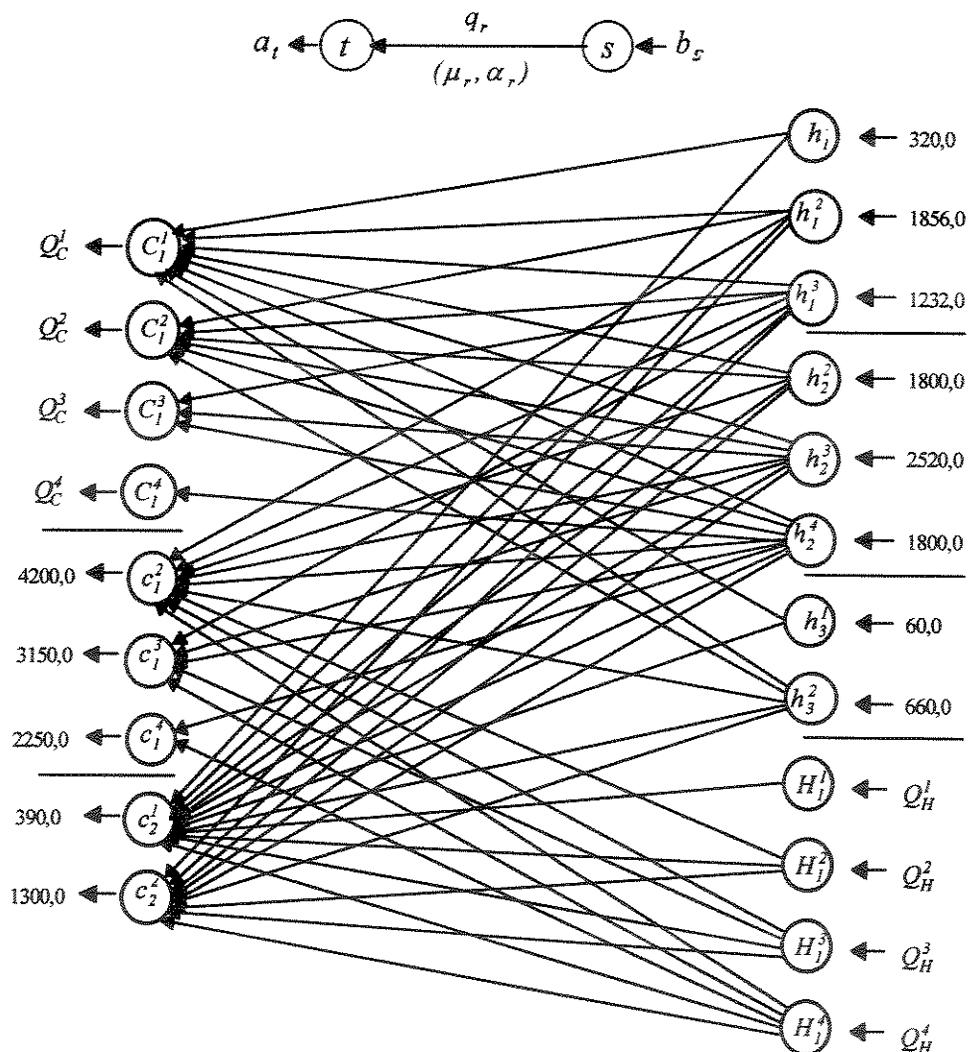


Figura 6.5 - Representação do exemplo em grafo generalizado.

6.4 - Minimização do Uso das Utilidades

A configuração dos fluxos de calor na rede de trocadores que minimiza o uso das utilidades, conforme o sistema de equações formuladas no Capítulo 4, pode ser obtida através de *software* de resolução de problemas de fluxo em grafo generalizado, como o desenvolvido por CORREIA (1989), que gerou as soluções deste trabalho.

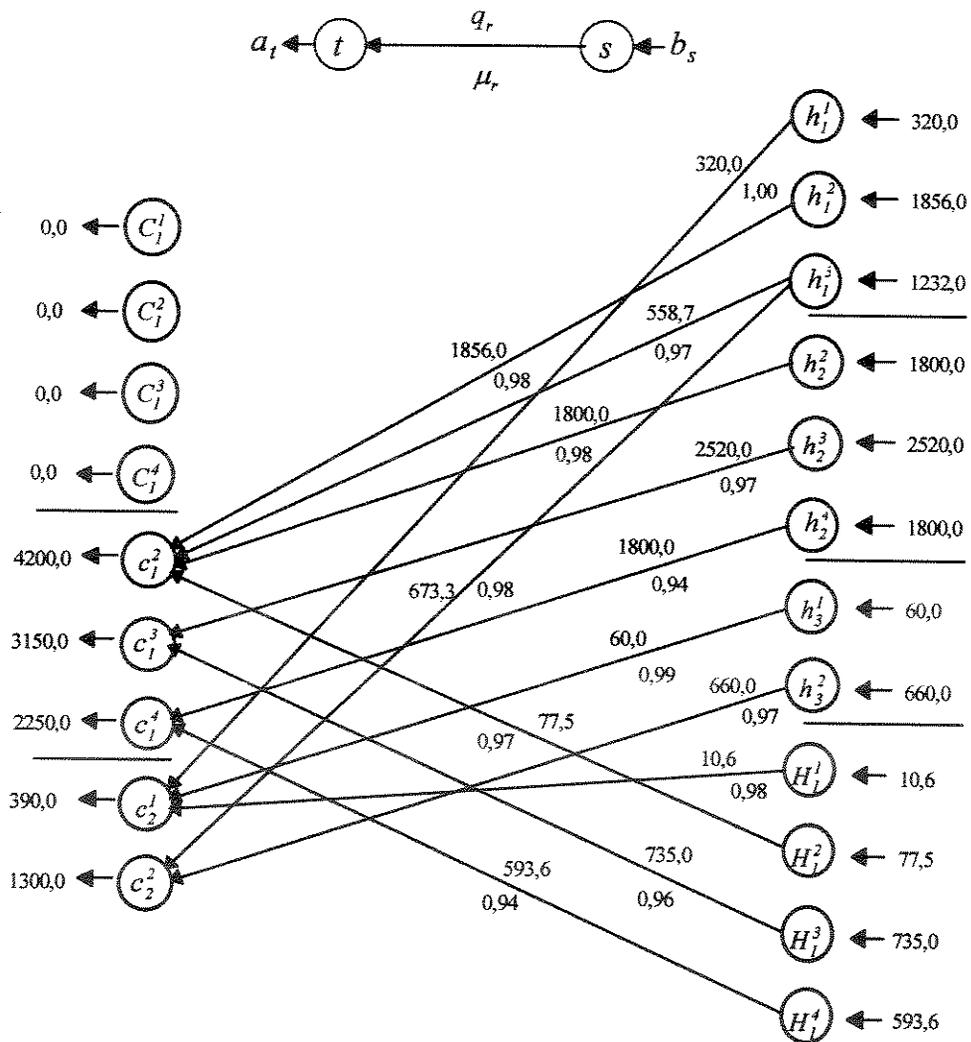


Figura 6.6 - Solução em que o uso das utilidades é mínimo

A Figura 6.6 mostra a configuração em que o uso das utilidades é mínimo, para os dados da Tabela 6.4. Os arcos constituintes da solução representam os trocadores de calor necessários para atingir o objetivo. Para esta situação, a função objetivo minimizada corresponde a 1416,7 kW, que é a soma das taxas de transferência de calor nos arcos usados pelas utilidades, sendo que, neste caso, fez-se uso somente das utilidades de aquecimento.

Posteriormente será mostrado que esta solução gerará a rede de trocadores de calor que demanda a maior área de transferência de calor do processo.

6.5 - Minimização do Uso das Utilidades Considerando o Problema Conservativo

Diversos pesquisadores resolveram este problema em grafo conservativo utilizando modelos de transporte ou de transbordo da programação linear. A vantagem de usar estes modelos é que a solução, muitas vezes, pode ser obtida manualmente através da *regra do canto noroeste* (LUEMBERGER, 1984), a qual é utilizada normalmente para fornecer uma solução inicial para o problema. Nesta linha, destaca-se o modelo proposto por CERDA *et alii* (1983) que resolve problemas de caráter conservativo utilizando um modelo de transporte da programação linear aplicando a regra do canto noroeste.

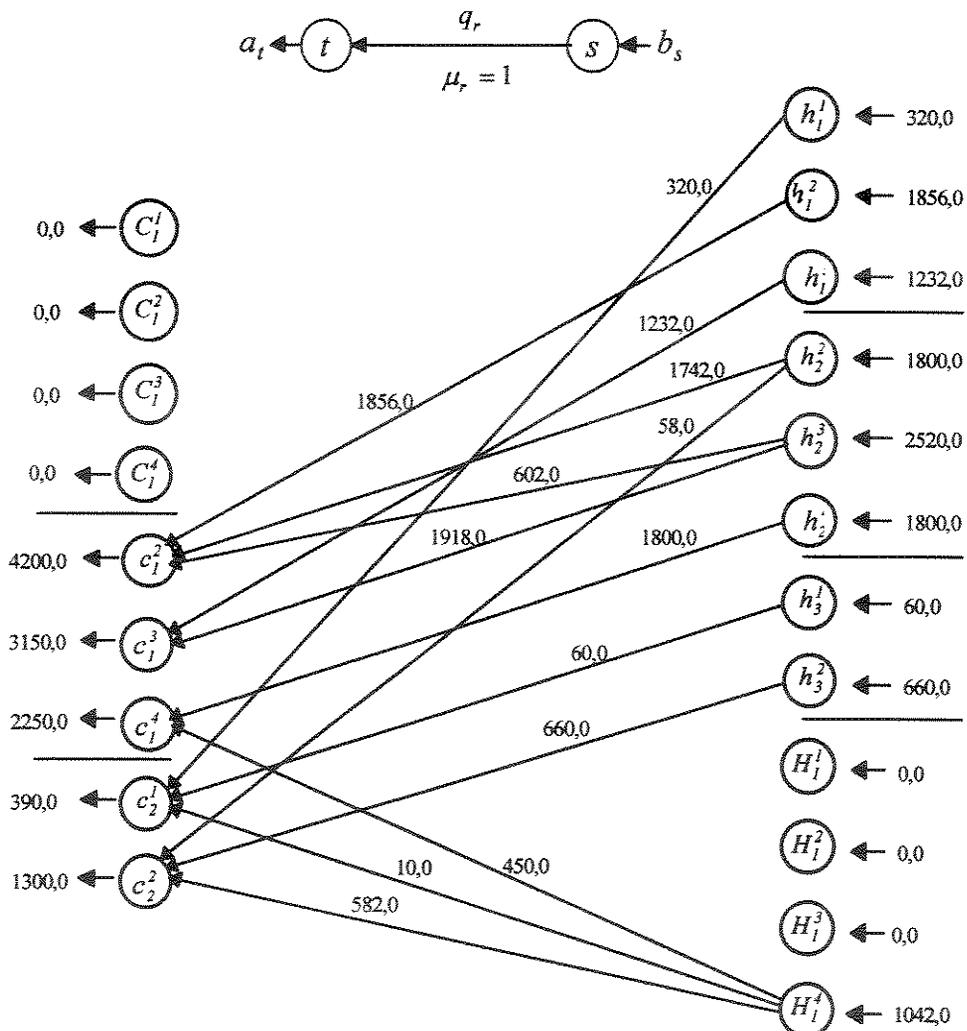


Figura 6.7 - Solução obtida através da regra do canto noroeste, segundo CERDA *et alii* (1983)

Utilizando o modelo sugerido por CERDA *et alii* (1983) na resolução deste exemplo, aplicando a regra do canto noroeste (Apêndice A), a solução ótima exige um aquecimento de 1042,0 kW fornecido pelas utilidades de aquecimento, como pode ser visto na Figura 6.7. No entanto, considerando os arcos não conservativos ao aplicar a regra do canto noroeste, conforme a sugestão de CERDA *et alii* (1983), a solução exige um aquecimento de 1430,4 kW proveniente das utilidades, veja a Figura 6.8. Observa-se que a solução da Figura 6.7 não é factível em grafo generalizado, pois há um déficit de fluxo, enquanto a regra do canto noroeste aplicada em grafo generalizado não gera uma solução ótima (Figura 6.8).

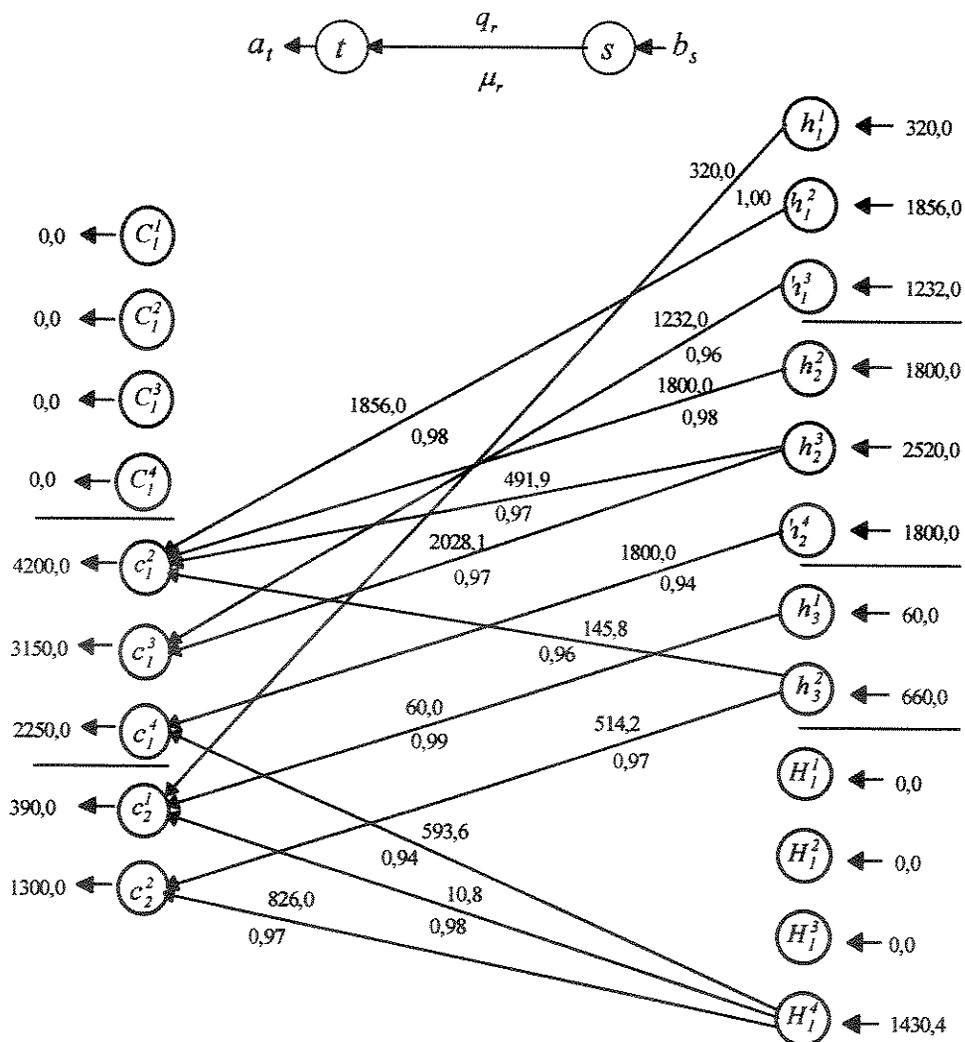


Figura 6.8 - Solução obtida através da regra do canto noroeste considerando os arcos não conservativos

6.6 - Minimização das Áreas de Transferência de Calor

Como dito anteriormente, a minimização do uso das utilidades e a da área de transferência de calor são objetivos conflitantes, de forma que, a solução que otimiza uma meta não otimiza a outra. A configuração dos fluxos de calor na rede de trocadores que minimiza a área total, para o problema formulado na equação (5.3), está representado na Figura 6.9. Esta mostra que a área total de transferência de calor na rede de trocadores é de 404,94 m². Porém, a configuração de fluxos de calor que originou esta área adiciona 9716,3 kW nas utilidades de resfriamento e requisita 11426,6 kW das utilidades de aquecimento. Neste problema considerou-se que as correntes quentes circulam no interior dos tubos, portanto o multiplicador de arco $\alpha_r = \left(\frac{1}{U_r \Delta T_r} \right)$ foi utilizado no cálculo da área.

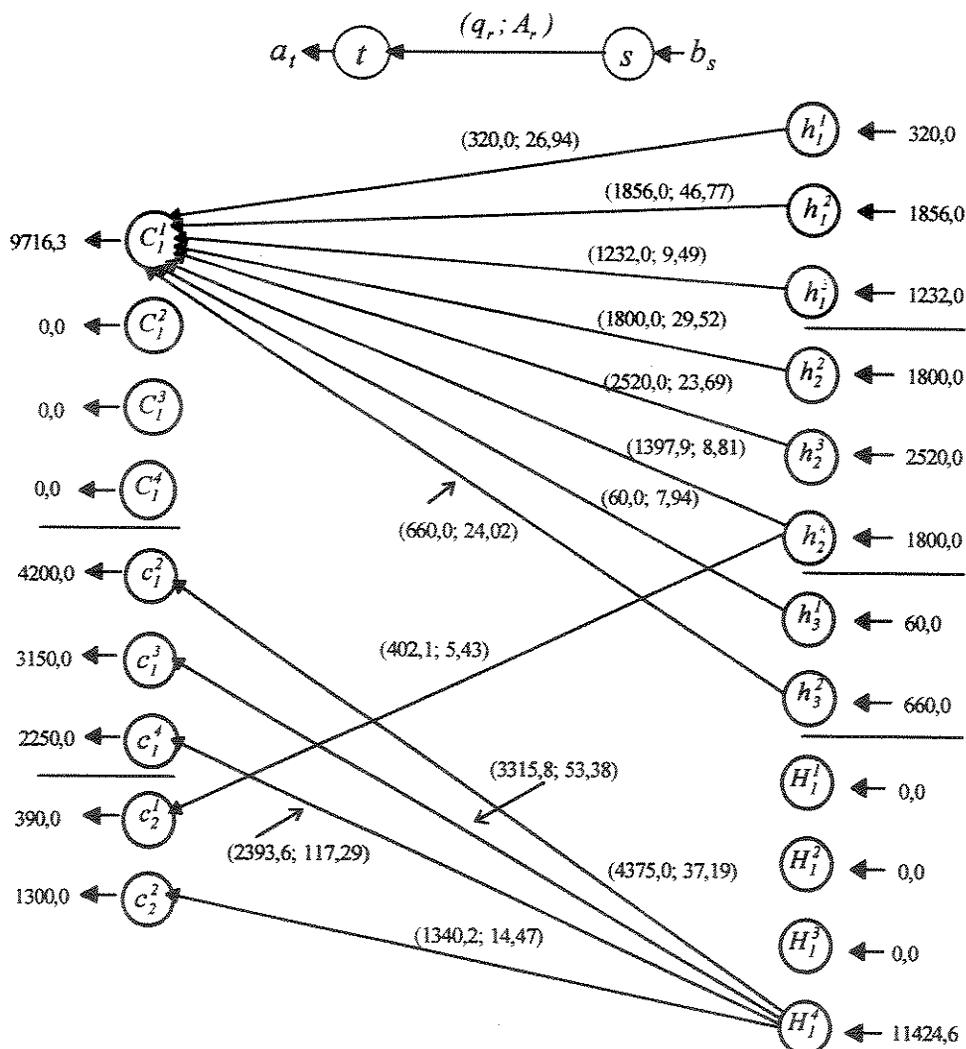


Figura 6.9 - Solução em que a área total de transferência de calor é mínima

6.7 - O Problema Multi-Objetivo

Será analisado, agora, a influência das funções objetivos na escolha da solução final. Isto é feito através da representação gráfica de todas as soluções eficientes do exemplo em questão. Para facilitar esta análise, é feita uma filtragem das soluções extremas eficientes, e também, a construção de tabelas de ganhos na região de compromisso dos objetivos.

6.7.1 - Soluções eficientes

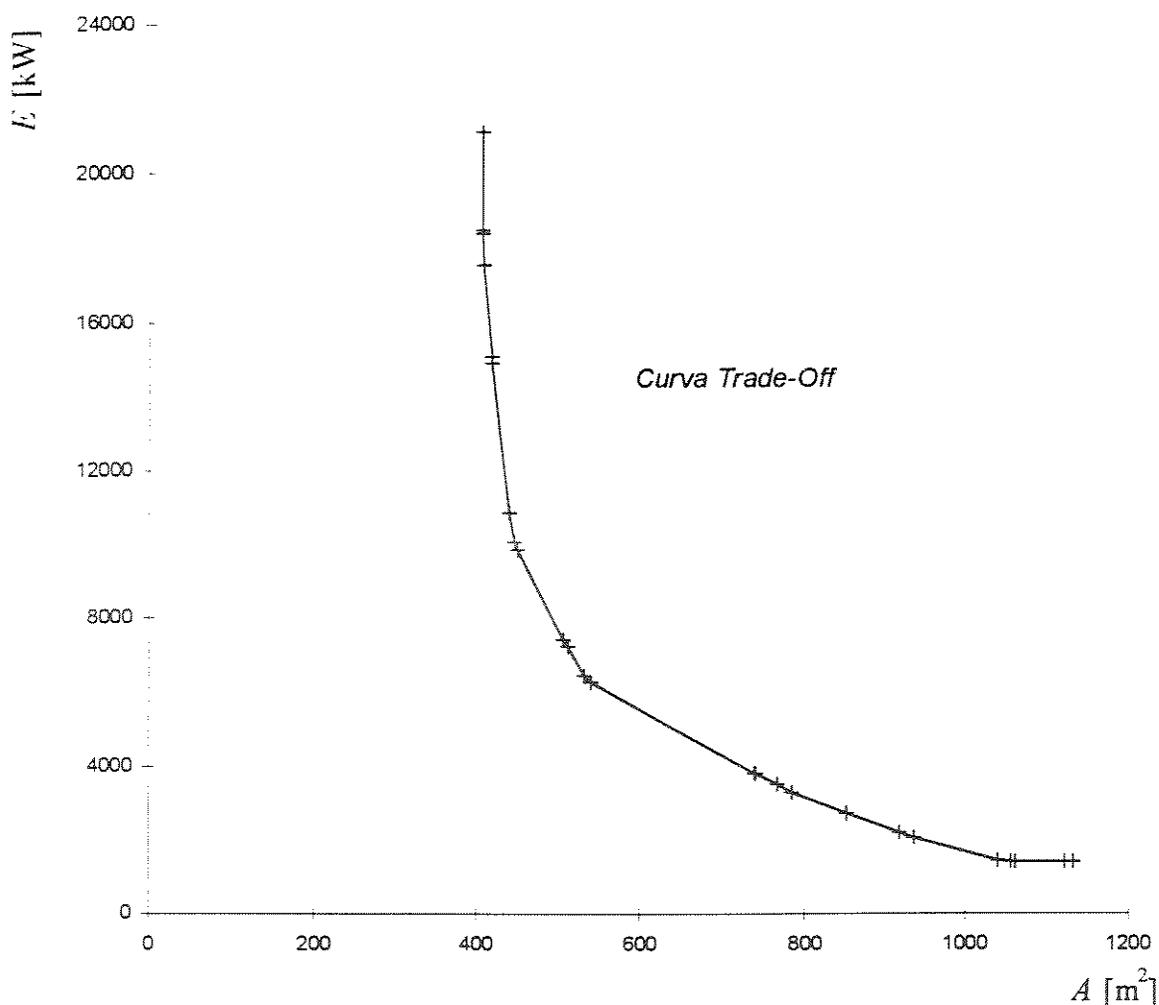
Com a formulação do problema multi-objetivo, apresentada no sistema de equações (5.4), e com os dados da Tabela 6.4, equaciona-se o exemplo através do balanço térmico no trocador de calor. Através de um *software* de resolução de problemas de fluxos em grafo generalizado (CORREIA, 1989), adaptado ao método da soma dos pesos (equação 5.6), obtém-se o conjunto de soluções extremas eficientes do exemplo. Unindo estes pontos consecutivamente através de segmentos de retas, obtém-se o conjunto de soluções eficientes. Neste caso, verifica-se que ocorre um *trade-off* entre o mínimo uso das utilidades (E) e a área total mínima de transferência de calor (A). Este cenário está representado pela curva *trade-off*, mostrada na Figura 6.10, a qual possui 27 soluções extremas eficientes. Vale ressaltar que em todas estas soluções ocorreram 13 combinações entre as correntes, necessitando, portanto, de 13 trocadores de calor para a cada configuração da rede.

Analisando a Figura 6.10, verifica-se que há vários segmentos de retas que possuem aproximadamente a mesma inclinação. Agrupando os segmentos, cuja variação angular máxima entre eles seja de 5° , em um segmento maior, obtém-se o conjunto soluções eficientes filtradas. Desta filtragem resultaram apenas 7 pontos extremos eficientes, cuja união por segmentos de retas ainda representa satisfatoriamente o conjunto de soluções eficientes do problema, como mostra a Figura 6.11.

6.7.2 - Análise do *trade-off*

Assim como em qualquer projeto, o custo de investimento e de operação do processo é muito importante. Em um processo que envolve rede de trocadores de calor, o custo de investimento refere-se aos gastos da aquisição dos equipamentos de troca térmica, tubulações,

motores, bombas, válvulas, entre outros. Já no custo operacional estão inclusos os gastos com bombeamento de fluidos, manutenção, impostos, taxa de juros, etc.. No entanto, a parcela do custo de alguns destes fatores só pode ser calculada para equipamentos e *layout* bem definidos, como é o caso das tubulações e da perda de pressão. Apesar disso, pode-se aproximar o custo da rede considerando como custo de investimento somente o custo de aquisição dos trocadores de calor e como custo operacional o do uso das utilidades, já que os demais fatores têm uma influência relativa inferior no custo total do processo.



**Figura 6.10 - Soluções eficientes do problema multi-objetivo
(uso das utilidades x área total de transferência de calor).**

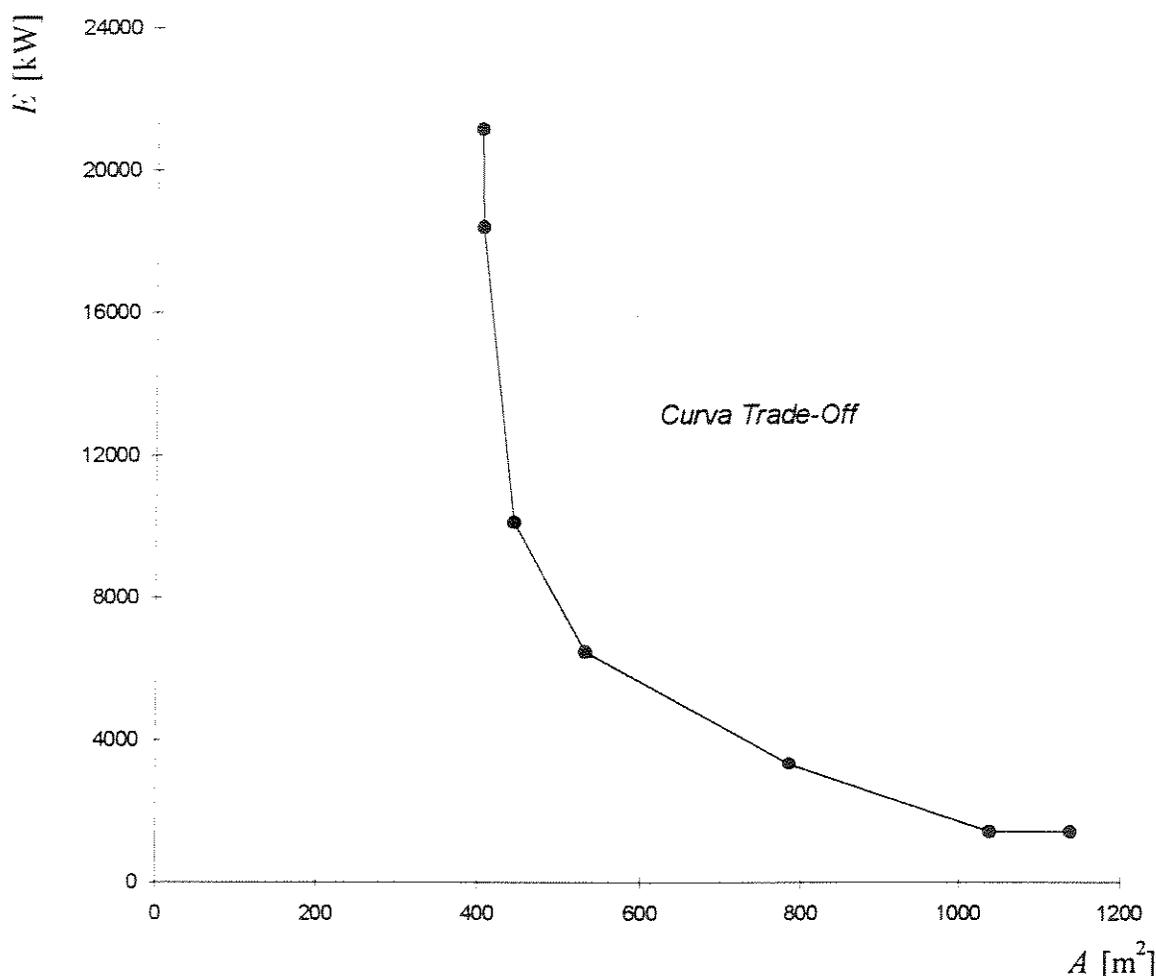


Figura 6.11 - Conjunto de soluções eficientes filtradas

O custo de um trocador de calor (C_{TC}) do tipo casco e tubo com cabeçote flutuante, pressão de projeto de 150 psi (1,03 MPa), aço carbono, 16 pés (4,877 m) de comprimento; pode ser estimado em função da área de troca térmica, conforme BOEHM (1987), através da expressão seguinte.

$$C_{TC} = 798,4A^{0,71} \quad (6.2)$$

Segundo BOEHM (1987), esta expressão aplica-se a trocadores com $2 \leq A \leq 2000 \text{ m}^2$ de área de transferência de calor. Para pressões de projeto de 400 psi (2,76 MPa), 1000 psi (6,89 MPa), 3000 psi (20,68 MPa) e 5000 psi (34,47 MPa), multiplica-se o resultado da expressão

(6.2) por 1,25; 1,55; 2,50 e 3,10; respectivamente. Este resultado é expresso em dólares americano (US\$).

O custo do uso de utilidades pode ser estimado através da expressão (6.3) fornecida por PIOVESANI (1990).

$$C_{Uti} = 3600H_{op}(2,1857 \cdot 10^{-6} Q_H + 3,57228 \cdot 10^{-7} Q_C) \quad (6.3)$$

onde os H_{op} representa o número de horas anuais de operação do processo (estimados aqui, em cerca de 8000 horas; conforme PIOVESANI, 1990). Os coeficientes Q_H e Q_C , referem-se às necessidades (em kW) de aquecimento e resfriamento, respectivamente. O resultado da formulação (6.3) é expresso em dólares americano por ano (US\$/ano).

Para comparar o custo de investimento ($C_{inv.}$) com o custo operacional é necessário que estes estejam compreendidos em um mesmo intervalo de tempo. Isto pode ser obtido através da amortização do custo de investimento ao longo da vida útil do processo (V). Assim, o custo de investimento anualizado (C_{Anual}) de um processo com vida útil de 15 anos, cujos recursos foram captados no mercado financeiro a uma taxa de juros (Tx) de 12% ao ano, é dado pela expressão (6.4).

$$C_{Anual} = C_{Inv.} \left(\frac{(1+Tx)^V Tx}{(1+Tx) - 1} \right) \quad (6.4)$$

A Figura 6.12 mostra o custo total estimado anualmente para os pontos extremos eficientes do problema. Já a Tabela 6.5 apresenta detalhadamente os custos referentes ao uso das utilidades e de aquisição dos trocadores de calor em cada um destes pontos, utilizando as expressões (6.2), (6.3) e (6.4).

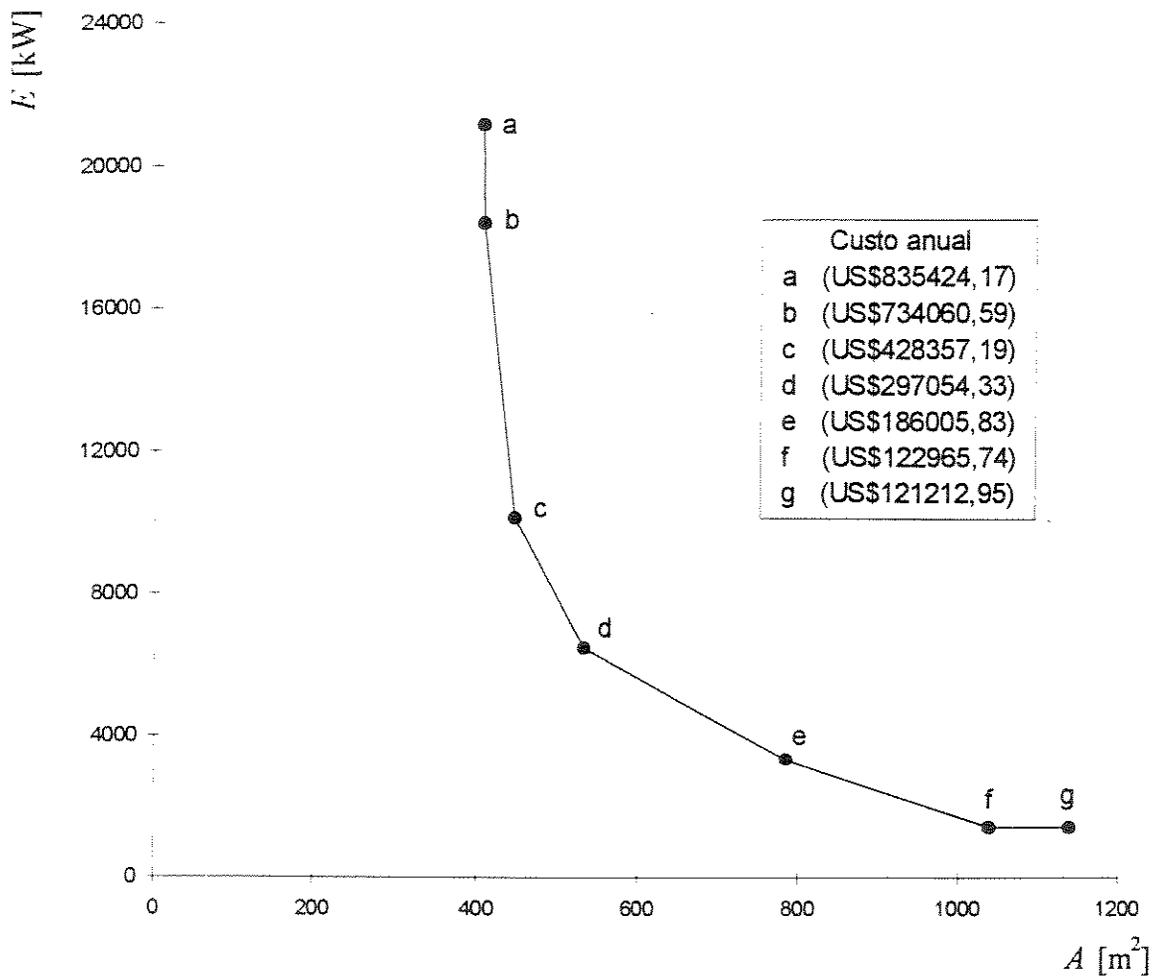


Figura 6.12 - Curva trade-off

Tabela 6.5 - Análise econômica na curva trade-off

Ponto	Q_H [kW]	Q_C [kW]	Nº de Trocadores	Área Total [m²]	Custos Estimados		
					Trocadores	Trocadores	$(Q_H + Q_C)$
					US\$	US\$/ano	US\$/ano
a	11424,6	9716,3	13	404,94	111042,37	16303,71	819120,46
b	10040,6	8346,3	13	405,52	110030,66	16155,17	717905,42
c	5833,7	4267,0	13	445,24	117398,16	17236,90	411120,29
d	3996,3	2485,0	13	532,01	135730,32	19928,50	277125,83
e	2393,6	919,0	13	785,56	176253,56	25878,29	160127,54
f	1439,4	0,0	13	1039,41	220287,04	32358,16	90607,58
g	1416,7	0,0	13	1138,61	218181,24	32034,29	89178,66

O *trade-off* do conjunto de soluções eficientes é quantificado na Tabela 6.6, mostrando a razão (kW/m^2) entre as variações da taxa de transferência de calor das utilidades e a área total de transferência de calor da rede de trocadores. Esta informação é importante na escolha da solução final, uma vez que ela mostra ao analista o quanto o uso das utilidades aumenta para cada unidade de área de transferência de calor economizada, em cada segmento de reta da Figura 6.12. Além disso, esta tabela apresenta a variação do custo dos objetivos no intervalo, embora ele não varie linearmente com os parâmetros.

Tabela 6.6 - Variações dos objetivos na curva *trade-off*

Intervalo	ΔA [m ²]	ΔE [kW]	$\Delta E/\Delta A$ [kW/ m ²]	ΔCusto [US\$/ano]
a - b	0,58	-2754,0	-4748,28	101363,58
b - c	39,72	-8286,2	-208,62	305703,40
c - d	86,77	-3619,4	-41,71	131302,86
d - e	253,55	-3168,7	-12,50	111048,50
e - f	253,85	-1873,2	-7,38	63040,09
f - g	99,20	-22,7	-0,23	1752,79

6.8 - A Rede de Trocadores

De um modo geral, o projeto de um sistema térmico segue um roteiro sugerido por BOEHM (1987), o qual está descrito no Apêndice B. Neste são descritas as etapas básicas do projeto, ressaltando a importância da otimização que é normalmente realizada através um processo iterativo a partir de uma solução inicial (projeto preliminar). Neste sentido, a partir dos resultados obtidos pelo modelo, pode-se gerar os trocadores de calor da rede, uma vez que os resultados gerados representam configurações de rede de trocadores com a melhor recuperação térmica ao considerar um fator de eficiência do isolamento térmico a ser utilizado. Para isso, é necessário definir e calcular outros parâmetros, cujo roteiro básico é apresentado no Apêndice C.

Capítulo 7

Conclusões e Sugestões

7.1 - Conclusões

O modelo de otimização de redes de trocadores de calor mostrado neste trabalho analisa a minimização do uso das utilidades e da área total de transferência de calor, uma vez fixadas as condições terminais das correntes participantes do processo em análise. Além disso, considera-se também um fator de perda de calor para o meio ambiente e uma diferença mínima de temperatura nas transferências de calor entre as correntes.

A técnica de otimização apresentada permite que o usuário inclua todas as restrições que julgar necessárias ao problema, seja de caráter físico ou econômico, além de poder alterar os intervalos de temperatura sugeridos. Outro fato que vale ser ressaltado é que na integração térmica do processo preocupou-se em fornecer apenas o conjunto de soluções eficientes do ponto de vista da recuperação térmica e da área de transferência de calor, embora este não seja necessariamente o conjunto de soluções eficientes do ponto de vista econômico, uma vez que os custos dos componentes do processo e os custos operacionais são também fatores decisivos na escolha da melhor solução. Na tentativa de solucionar parte deste problema, estimou-se o custo da rede em função do custo dos trocadores de calor e do uso das utilidades, embora estes não permitam ainda uma estimativa precisa, visto que, existem outros fatores a serem considerados.

Os problemas que envolvem a integração térmica dos processos são melhores representados em grafo generalizado que em grafo conservativo, uma vez que a ocorrência de perdas de calor para o meio ambiente, não é prevista nas formulações em grafo conservativo. Isto pode ser verificado através do exemplo aqui apresentado, no qual utiliza-se o modelo formulado em grafo conservativo sugerido por CERDA *et alii* (1983), cuja solução ótima, obtida através da regra do canto noroeste, exige um aquecimento de 1042,0 kW proveniente das utilidades (veja a Figura 6.7). Em contrapartida, o modelo formulado em grafo generalizado faz uso de 1416,7 kW proveniente das utilidades (Figura 6.6). No entanto, a solução fornecida pela Figura 6.7 não pertence à região factível do problema de fluxo em grafo generalizado, visto que esta solução é menor que a solução ótima obtida em grafo generalizado. Este fato caracteriza a infactibilidade do problema, pois ocorre um déficit de fluxo. Contudo, ao considerar os arcos não conservativos na aplicação da regra canto noroeste a solução normalmente não é ótima. Nesta situação, é necessário o fornecimento de 1430,4 kW pelas utilidades de aquecimento, como mostrado na Figura 6.8. Assim, fica demonstrado que esta solução não é ótima em grafo generalizado, já que o uso das utilidades difere daquele apresentado na Figura 6.6.

Nas Figuras 6.10 e 6.11, verifica-se que ao gerar a área de transferência de calor mínima para o processo é necessário fazer o máximo uso das utilidades, ocorrendo o inverso quando se pretende fazer o mínimo uso das utilidades. Em situações como estas, com objetivos conflitantes, o analista nunca conseguirá minimizar todos os objetivos simultaneamente. Porém, se conhecida a função utilidade, que neste problema corresponde a soma de todos os custos de investimento e operação do processo, pode-se ponderar os diversos objetivos em uma única função objetivo, cuja solução ótima pertence ao conjunto de soluções eficientes do problema. Todavia, analisando a curva *trade-off* apresentada por estes objetivos obtém-se algumas conclusões importantes. Se o analista está disposto a utilizar uma solução entre os pontos *a* e *b* (Figura 6.12), o uso das utilidades cresce na ordem de 44748,28 kW para cada 1,00 m² de área de transferência economizada. Em contrapartida, se ele pretende utilizar uma solução entre os pontos *f* e *g* (Figura 6.12), o uso das utilidades cresce na ordem de 0,23 kW para cada 1,00 m² de área de transferência economizado. Assim, a escolha da solução final depende unicamente do analista, já que qualquer solução escolhida na curva *trade-off* é eficiente.

Quando considera-se o custo construtivo e operacional da rede de trocadores de calor, apesar de ser considerado apenas o custo dos trocadores e o uso das utilidades, observa-se que há uma tendência da rede de menor custo corresponder a que faz menor uso das utilidades, como mostrado na Figura 6.12 e nas Tabelas 6.5 e 6.6. Nestas, podem-se constatar que o custo referente ao uso das utilidades é muito superior ao custo anualizado dos trocadores, variando cerca de 10 vezes entre a solução do ponto *a* e a do ponto *g*, enquanto o custo dos trocadores varia cerca de 2 vezes neste mesmo intervalo (Tabela 6.5). Todavia, vale ressaltar a importância de adicionar os demais custos na escolha da solução final, como, por exemplo, os custos de aquisições de bombas, tubulações e acessórios, o bombeamento de fluidos, a manutenção da instalação, etc..

Na integração térmica de processos geralmente observa-se grande número de trocadores de calor, como comprovou-se no exemplo resolvido, que utilizou 13 trocadores em todas as soluções extremas eficientes. Este fato implica em redes de trocadores complexas com diversas ramificações, acarretando em custos adicionais de bombeamento. No entanto, este custo pode ser superado pela redução no uso das utilidades.

7.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos

O método de otimização em grafo generalizado é uma técnica que pode representar satisfatoriamente os processos industriais nos quais ocorrem perdas ou ganhos no sistema. Quando aplicado na integração térmica de processos, pode-se considerar a dissipação de calor para o meio ambiente e/ou outras variáveis importantes do processo.

Neste trabalho, considerou-se a dissipação de calor apenas nos trocadores, embora esta ocorra também nas tubulações que conduzem o fluido até os trocadores. Além disso, foi analisada a influência do uso das utilidades e da área total de transferência de calor no projeto de uma rede de trocadores que atenda à demanda do processo. Contudo, este projeto é dependente do número de equipamentos utilizados e dos custos anualizados do processo, que foram aqui considerados de modo simplificado. Outro fator a ser considerado, é a diferença mínima de temperatura entre as correntes que poderão transferir calor (ΔT_{\min}). Esta possui

uma importância significativa no custo do processo e merece uma análise criteriosa no sentido de identificar o valor que proporciona o menor custo.

Na tentativa de solucionar os problemas abordados acima, bem como complementar este trabalho, sugere-se a elaboração de trabalhos que analisem o uso das utilidades, a área de transferência de calor, o número de equipamentos e o custo anualizado do processo no projeto da rede de trocadores de calor. Além disso, pode-se considerar a dissipação de calor para o ambiente tanto nos trocadores como nas tubulações, como ocorre na prática. Outra sugestão é a construção da função utilidade do analista na qual deve agregar todos os custos envolvidos no processo.

Paralelo a estes trabalhos, sugere-se também a análise do comportamento dos vetores peso, que geram as soluções finais, de um grupo de problemas pertencentes a uma determinada categoria de processos. O objetivo desta análise é avaliar se estes vetores possuem um valor característico em cada categoria. Havendo um valor característico, o processo de escolha da solução final é simplificado. Deste modo, pode-se dispor de estudos que permitam e facilitam a elaboração de projetos com uma melhor integração do processo. Estas análises também poderão ser feitas com diversas ΔT_{\min} , cuja importância foi citada anteriormente.

Referências Bibliográficas

- AHMAD, S. *Heat Exchanger Network - Cost trade-offs in energy and capital*, Manshester - UK: Institute of Science and Technology, University of Manshester , 1985, Ph.D. Thesis.
- AHUJA, K. R., MAGNANTI, T. L., ORLIN, J. B. *Network Flows - Theory, algorithms, and application*, Englewood Cliffs, NJ - USA: Prentice-Hall, 1993, 846p.
- BAZARAA, M. S., JAVIS, J. J., SHERALI, H. D. *Linear Programming and Network Flows*, New York, NY - USA: John Wiley & Sons, Second Edition, 1990, 684p.
- BELL, K. J. *Delaware Method for Shell Side Design - In heat exchanger thermal-hydraulic fundamentals and design*, New York, NY - USA: McGraw-Hill, 1980.
- BOEHM, R. F. *Design Analysis of Thermal Systems*, New York, NY - USA: John Wiley & Sons, International Edition, 1987, 266p.
- BOLAND D., LINNHOFF, B. The Preliminary Design of Networks for Heat Exchange by Systematic Methods, *The Chemical Engineer*, p. 222-228, April 1979.
- CERDA, J., WESTERBERG, A.W. Synthesizing Heat Exchanger Networks Having Restricted Stream/Stream Matches Using Transportation Problem Formulation, *Chemical Engineering Science*, Vol. 38, Nº 10, p. 1723 - 1740, October 1983.

- CERDA, J., WESTERBERG, A.W., MASON, D., LINNHOFF, B. Minimum Utility Usage in Heat Exchanger Network Synthesis - A transportation problem, *Chemical Engineering Science*, Vol. 38, Nº 3, p. 373-387, March 1983.
- CORREIA, P. B. *Um Modelo Multisetorial para Otimização do Suprimento de Energia: eletricidade, gás natural e cogeração com biomassa*, Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica - UNICAMP, 1989, 120 p. Tese (Doutorado)
- GOLDSTEIN, L. *Transferência de Calor Industrial*, Campinas - SP: Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, UNICAMP, 1987 (Apostila).
- GUNDERSEN, L., NAESS, L. The Synthesis of Cost Optimal Heat Exchanger Networks - An industrial review of state of the art, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 12 Nº 6, p. 503-530, 1988.
- HOHMANN, E. C. *Optimum Networks for Heat Exchange*, Los Angeles - USA: University of Southern California, 1971, Ph.D. Thesis.
- JANSEN, P. A., BARNES, J. W. *Network Flows Programming*, New York, NY - USA: John Wiley & Sons, 1980, 408 p.
- KENNINGTON, J. L., HELGASON, R. V. *Algorithms for Network Programming*, New York, NY - USA: John Wiley & Sons, 1980, 291 p.
- KAYS, W. M., LONDON, A. L. *Compact Heat Exchangers*, New York, NY - USA: McGraw-Hill, 1964, 272 p.
- KERN, D. Q. *Processos de Transmissão de Calor*, Rio de Janeiro, RJ: Guanabara, 1987, 671 p.
- KESLER, M. G., PARKER, R. O. Optimal Networks of Heat Exchange, *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, Vol. 61, Nº 92, p. 111-120, 1969.

- KOBAYASHI, S., UMEDA, T., ICHIKAWA, A. Synthesis of Optimal Heat Exchange Systems - An approach by the optimal assignment problem in linear programming, *Chemical Engineering Science*, Vol. 26, N° 9, p. 1367-1380, 1971.
- LINNHOFF, B., AHMAD, S. SUPERTARGETING: The Optimization of Heat Exchanger Networks Prior to Design, WORD CONGRESS III, *Chemical Engineering, Tokyo*, 1986a.
- LINNHOFF, B., AHMAD, S. SUPERTARGETING: Optimum Synthesis of Energy Management Systems, *ASME Mtg., Anaheim, California*, 1986b.
- LINNHOFF, B., FLOWER, J. R. Synthesis of Heat Exchanger Networks - Systematic generation of energy optimal networks, *A. I. Ch. E. Journal*, Vol. 24 N° 4, p. 633-654, July 1978a.
- LINNHOFF, B., FLOWER, J. R. Synthesis of Heat Exchanger Networks - Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality, *A. I. Ch. E. Journal*, Vol. 24 N° 4, p. 633-654, July 1978b.
- LINNHOFF, B., HINDMARSH, E. The Pinch Design Method of Heat Exchanger Networks, *Chemical Engineering Science*, Vol. 38 N° 5, p. 745-763, 1983.
- LINNHOFF, B., MASON, D. R., WARDLE I. Understanding Heat Exchanger Networks, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 3, p. 295-302, 1979.
- LINNHOFF, B., TURNER, J. A. Heat-Recovery Networks - New insights yield big savings, *Chemical Engineering*, Vol. 88, N° 1, p. 56-70, November 1981.
- LUEMBERG, D. G. Linear and Nonlinear Programming, Reading - Massachusetts - USA: 2nd Edition, Addison - Wesley Publishing Company, 1984, 491p.

- MASSO, A. H., RUDD, D. F. The Synthesis of System Designs - Heuristic structuring, *A. I. Ch. E. Journal*, Vol. 15, Nº 1, p. 10-17, 1969.
- NISHIDA, N., KOBAYASHI, S., ICHIKAWA, A. Optimal Synthesis of Heat Exchange Systems - Necessary conditions for minimum heat transfer area and their application to systems synthesis, *Chemical Engineering Science*, Vol. 26, Nº 11, p. 1841-1856, 1971.
- NISHIDA, N., LIU Y. A., LAPIDUS, L. Studies in Chemical Process Design and Synthesis - A simple and practical approach to the optimal synthesis of heat exchanger networks, *A. I. Ch. E. Journal*, Vol. 23, Nº 1, p. 77-93, January 1977.
- NISHIDA, N., STEPHANOPOULOS, G., WESTEBERG, A. W. A Review of Process Synthesis, *A. I. Ch. E. Journal*, Vol. 27 p. 321-351, 1981.
- ÖZISIC, M. N. *Basic Heat Transfer*, New York, NY - USA: McGraw-Hill, 1977, 572 p.
- PAPOULIAS, S. A., GROSSMANN, I. E. A Structural Optimization Approach in Process Synthesis - Heat recovery networks, *Computers and Chemical Engineering.*, Vol. 7, p. 707-721, 1983.
- PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K. D. *Plant design and Economics for Chemical Engineer*, 4th edition, McGraw-Hill, International edition, 1991, 910p.
- PIOVESANI, P. D. Influência dos Coeficientes de Película na Otimização de Redes de Trocadores de Calor, Rio de Janeiro: COPPE - UFRJ, 1990, Tese (Mestrado).
- ROSSI, F. S. R. *Otimização Energética de Redes de Trocadores de Calor Industriais: Aplicações em engenharias de petróleo, alimentos e química*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, 1989, 171p., Tese (Doutorado).
- SABOO, A. K., MORARI, M., COLBERG, R. D. RESHEX: An Interactive Software Package for the Synthesis and Analysis of Resilient Heat Exchanger Networks - Program

- description and application. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 10, p. 577-589, 1986a.
- SABOO, A. K., MORARI, M., COLBERG, R. D. RESHEX: An Interactive Software Package for the Synthesis and Analysis of Resilient Heat Exchanger Networks - Discussion of area targeting and network synthesis algorithms, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 10, p. 591-599, 1986b.
- SAUNDERS, E. A. D. *Heat Exchangers: selection, design and construction*, New York - NY - USA: John Wiley & Sons -, 1988, 568p.
- STEUER, R. E. *Multiple Criteria Optimization: Theory, computation, and application*, Malabar -Florida - USA: Krieger Publishing Company, 1989, 546p.
- TEMA (TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURES ASSOCIATION) *Standards of Tubular Exchanger Manufactures Association*, New York - NY - USA: TEMA Incorporation, Sixth Edition, 1978, 242 p.
- TJOE, T. N., LINNHOFF, B. Using Pinch Technology for Process Retrofit, *Chemical Engineering*, Vol. 93, p. 47-60, 1986.
- TOWNSEND, D. W., LINNHOFF, B. Surface Area Targets for Heat Exchanger networks, *IChemE Annl Res. Mtg*, Bath, 1984.
- UMEDA T., ITOH, J., SHIROKO, K. Heat exchange system synthesis, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 74, p. 70-76, 1978.
- VISWANATHAN, M., EVANS, L. B. Studies in the Heat Integration of Chemical Process Plants, *A. I. Ch. E. Journal*, Vol. 33, N^o 11, p. 1781-1790, 1987.

Apêndice A

Minimização do Uso de Utilidades Através de um Modelo de Transporte

A.1 - Introdução

A obtenção de redes de trocadores de calor que fazem o menor uso das utilidades, foi estudada por diversos pesquisadores (Capítulo 2), dentre eles CERDA *et alii* (1983) que formularam este problema como um modelo de transporte. Neste trabalho eles apresentam uma maneira de organizar o problema em uma tabela, de modo que, ao aplicar a regra do canto noroeste, a solução gerada é ótima.

Neste apêndice serão mostrados as etapas do modelo de transporte sugerido pelos pesquisadores citados acima, bem como sua aplicação ao exemplo apresentado no Capítulo 6. Porém, primeiramente será conceituado o problema de transporte e a regra do canto noroeste.

A.2 - O Problema de Transporte

⋈ problema de transporte é um caso especial do problema de fluxo de custo mínimo (equação 3.1) com o conjunto de nós N particionado em dois subconjuntos, N_1 e N_2 . ⋈ conjunto N é dividido de modo que (1) cada nó em N_1 é um nó fornecedor (origem de arcos), (2) cada nó em N_2 é um nó consumidor (destino de arcos) e (3) para cada arco $(i, j) \in A$,

$i \in N_1$ e $j \in N_2$. Um exemplo clássico deste problema é a distribuição de mercadorias dos armazéns para os consumidores. Neste contexto, os nós em N_1 representam os armazéns, os nós em N_2 representam os consumidores (ou, mais tipicamente, as zonas de consumo), e um arco $(i, j) \in A$ representa um canal de distribuição do armazém i para o consumidor j . Deste modo, a representação gráfica do problema de transporte torna-se simples, já que o objetivo é atender as ofertas/demandas de cada nó, tal que o custo total do transporte seja mínimo, como mostrado na Figura A.1.

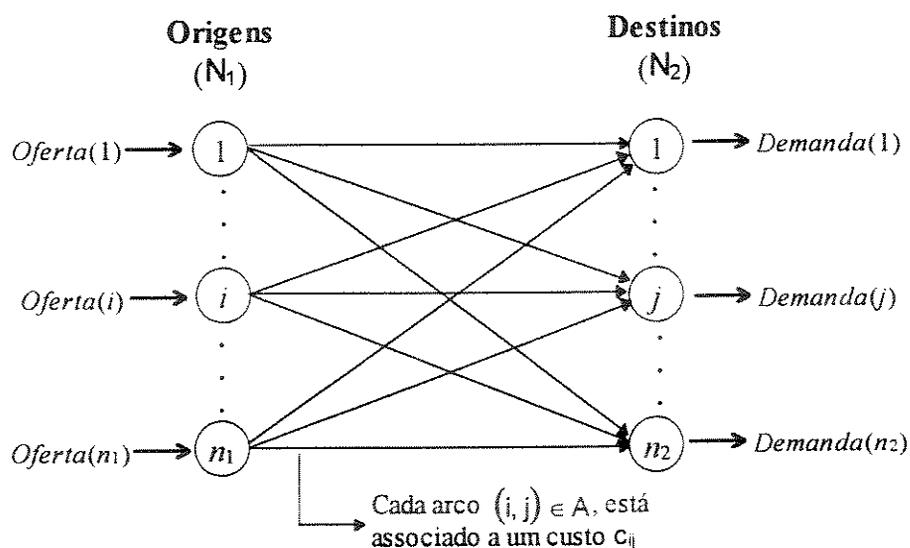


Figura A.1 - Representação gráfica de um problema de transporte

A.3 - Minimização do uso das Utilidades

A formulação do modelo sugerido por CERDA *et alii* (1983) é aqui apresentada, utilizando os mesmos conceitos definidos no Capítulo 4, no que se refere à divisão das correntes do processo e a notação, observando-se as ressalvas quanto ao problema, que é conservativo, portanto $\mu_r = 1$. Assim, o problema é formulado como segue:

$$\text{Minimizar } \sum_{r \in \mathcal{C} \cup \mathcal{H}} q_r \quad (\text{A.1})$$

Sujeito a:

$$\sum_{r \in \mathcal{H} \cup \mathcal{E}} q_r = a_t, \text{ para todo } t \in \mathcal{S}_c \quad (\text{A.2a})$$

$$\sum_{r \in \mathcal{C} \cup \mathcal{E}} q_r = b_s, \text{ para todo } s \in \mathcal{S}_h \quad (\text{A.2b})$$

$$q_r \geq 0, \text{ para todo } r \in \mathcal{C} \cup \mathcal{E} \cup \mathcal{H} \quad (\text{A.2c})$$

Neste problema, considera-se que apenas as transferências de calor que envolvem utilidades agregam custos, as quais deverão ser minimizada (equação A.1). Deste modo, o modelo obriga a ocorrência de trocas térmicas entre as correntes de processo. Porém, o calor que poderá ser transferidos das correntes que deverão ser resfriadas é limitado (equação A.2a). Da mesma forma, o calor necessário para o aquecimento é restringido pela equação (A.2b), uma vez que as temperaturas a serem atingidas são prefixadas. Já, a potência térmica é maior que zero (equação A.2c), visto que o calor flui sempre da fonte quente para a fonte fria.

A.4 - Regra do Canto Noroeste

Na pesquisa operacional, a solução dos problemas é feita por intermédio de procedimentos iterativos. Em geral é necessário atribuir uma estimativa inicial para as variáveis do problema de modo que o processo de busca da solução ótima seja inicializado. De acordo com LUEMBERGER (1984), para os problemas modelados conforme a estrutura do problema de transporte, existe uma maneira direta de se encontrar esta solução inicial. Esta abordagem refere-se ao uso da *regra do canto noroeste* (BAZARAA *et alii*, 1990), a qual permite a obtenção de uma *solução básica factível*.

De acordo com LUEMBERGER(1984) e BAZARAA *et alii* (1990) o procedimento em etapas, para a implementação da regra do canto noroeste, pode ser exposto como segue:

- (1) Constrói-se uma tabela, de modo que na primeira linha tenha-se os nós origem com suas respectivas ofertas e, na primeira coluna, os nós destino, com suas respectivas demandas.
- (2) Inicia-se pela célula interna, situada no canto superior esquerdo (noroeste);
- (3) Aloca-se a máxima quantidade factível consistente com as necessidades, da soma de linhas e colunas, que envolvem aquela célula (ao menos uma dessas necessidades deverá ser atendida);
- (4) Move-se uma célula para a direita se exigir algum requisito na linha, para ser atendido; em caso contrário, move-se uma célula para baixo;
- (5) Se todas as necessidades forem atendidas, finaliza-se o procedimento; em caso contrário, volta-se ao estágio (3).

A.5 - Solução Ótima

De acordo com CERDA *et alii* (1983), para um problema de máxima recuperação térmica, quando formulado através do modelo de transporte, se não forem violadas quaisquer restrições termodinâmicas e, além disso, for satisfeito o valor de ΔT_{min} para todas as possíveis associações de correntes, a regra do canto noroeste proporciona a solução ótima do problema. Para isso, é necessária uma reordenação de todas as linhas e colunas tal que o número de células factíveis cresça de cima para baixo e da esquerda para a direita. Para atingir este objetivo, as células são ordenadas em ordem decrescente de temperatura. As células correspondente às correntes que deverão ser resfriadas são ordenadas da direita para a esquerda e as células correspondente às correntes que deverão ser aquecidas são ordenadas de cima para baixo.

Aplicando-se este procedimento ao exemplo proposto no Capítulo 6 (Tabela 6.1), utilizando os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 6.4, tem-se na Tabela A.1 cuja

solução é fornecida pela regra do canto noroeste, que é ótima. A legenda no canto inferior direito auxilia na localização dos parâmetros da tabela.

Tabela A.1 - Solução ótima obtida através da aplicação da regra do canto noroeste

		300°	250°	180°			70°		40°				
	Nós	h_2^4 (1800)	h_1^3 (1232)	h_2^3 (2520)	h_1^2 (1856)	h_2^2 (1800)	h_3^2 (660)	h_1^1 (320)	h_3^1 (60)	H_1^4 (Q_H^4)	H_1^3 (Q_H^3)	H_1^2 (Q_H^2)	H_1^1 (Q_H^1)
280°	c_1^4 (2250)	1800	I	I	I	I	I	I	I	450	I	I	I
230°	c_1^3 (3150)		1232	1918	I	I	I	I	I			I	I
160°	c_1^2 (4200)			602	1856	1742		I	I				I
	c_2^2 (1300)					58	660	I	I	582			I
50°	c_2^1 (390)							320	60	10			
20°	c_1^1 (Q_C^4)		I	I	I	I	I	I	I				
	c_1^1 (Q_C^3)				I	I	I	I	I				
	c_1^2 (Q_C^2)							I	I				
	c_1^1 (Q_C^1)												

Correntes em:

- Resfriamento
- Aquecimento

Os elementos que aparecem nas estrutura matricial da Tabela A.1 representam uma solução básica inicial factível para o problema. Uma célula vazia representa a não ocorrência de transferência de energia entre as correntes de processo envolvidas, nos intervalos de temperatura. A condição de infactibilidade (neste exemplo, transferir calor de uma corrente quente em um nível de temperatura inferior ao da corrente fria) é dada pela letra I. No exemplo analisado, chegou-se ao requisito mínimo de energia de 1042,0 kW, proveniente das utilidades de aquecimento.

No trabalho de CERDA *et alii* (1983), as utilidades de aquecimento são representadas por apenas uma coluna e as de resfriamento por uma linha. Neste exemplo foram representados todos os níveis de temperaturas, para facilitar a identificação da origem da transferência de calor e a comparação com o modelo proposto (Capítulos 4, 5 e 6).

Apêndice B

Etapas Básicas do Projeto de um Sistema Térmico

B.1 - Introdução

Por ser de fundamental importância na prática da engenharia, diversos tópicos sobre projeto foram escritos. Porém, as importâncias são relativas em diferentes campos de aplicação da engenharia curricular, uma vez que durante todos os anos alguns campos se enfraquecem enquanto outros se fortalecem.

Ao elaborar um projeto, normalmente, é necessária a aplicação de conceitos da engenharia, de uma maneira geralmente específica, acoplada com um toque de criatividade. Um projeto bem sucedido poderá representar uma coleção de vários processos, sendo que a introdução dos resultados finais desejados é o primeiro passo na concepção do mesmo. O segundo passo corresponde o modo pelo qual os resultados finais poderão ser obtidos, também chamado de *síntese*. Por último, são feitas análises dos resultados obtidos nas etapas anteriores, com a finalidade de fazer a correspondência destes resultados com o projeto real.

B.2 - Categorias de Projeto

Sem considerar as técnicas utilizadas na definição de um projeto, a síntese do processo resultará em um projeto *funcional* ou *não funcional*. Se, por exemplo, é projetado um trocador e este não transfere calor, então, este equipamento não é funcional, caso contrário,

ele é dito funcional. Esta distinção é bastante óbvia, mas não é o suficiente, já que o projetista está interessado em um projeto funcional que tem uma boa performance.

Ao impor alguns critérios aos projetos funcionais, geralmente relacionados com sua performance, tem-se os projetos *satisfatórios*. Por exemplo, se poderia exigir que o trocador de calor aquecesse 5 m³/h de água de 20 °C para 40 °C ou transferisse 100.000 kcal/h. Mesmo assim, poderiam existir vários projetos que atendam este objetivo.

A última e a mais desejada das categorias é a que gera o projeto *ótimo*. Nesta etapa, algumas restrições específicas poderão ser colocadas junto ao produto final, usualmente, na forma de custos estimados (PETERS e TIMMERHAUS, 1991). Por exemplo, poderia obter um projeto ótimo do trocador de calor que transfira 100.000 kcal/h e que minimize o custo global considerando um ciclo de vida de 20 anos. Poderá haver virtualmente milhares de projetos satisfatórios, no entanto, somente um ou poucos projetos serão ótimos.

O resumo das categorias de projetos são mostradas na Figura B.1 para um espaço de soluções com duas variáveis de projetos independentes.

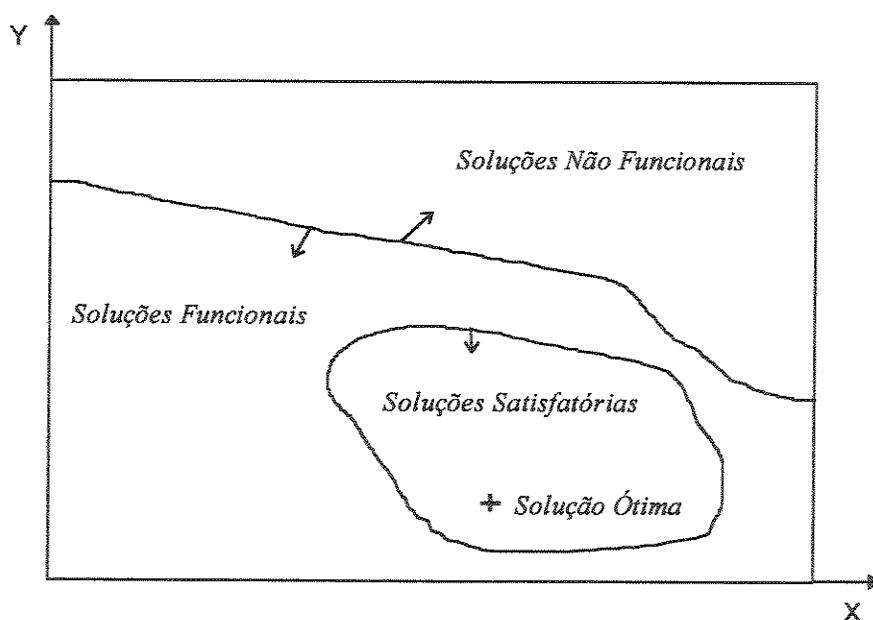


Figura B.1 - Exemplo hipotético mostrando os vários tipos de soluções (BOEHM, 1987)

Na prática, o uso de soluções satisfatórias é bastante comum, devido principalmente ao grande número de fatores que devem ser analisados e a falta de ferramentas eficientes para análise dos projetos. Um dos fatores predominante na análise de um projeto térmico é o custo dos energéticos, cujo impacto pode ser considerado facilmente.

Os custos de investimento tornam-se fatores determinantes se os custos operacionais são negligenciados. Neste caso, a minimização dos custos de investimento representa a própria minimização dos custos do processo. Porém, como a energia e outros custos operacionais podem crescer com o tempo, os projetos que simplesmente minimizam os custos de investimento podem ser insatisfatórios.

B.3 - Elementos de Análise em Projeto de Sistemas Térmicos

Para gerar o projeto final de um sistema térmico, é necessária a realização de diversos passos (BOEHM, 1987; PETERS e TIMMERHAUS, 1991). Se for admitido que o sistema é composto por mais de um processo, então os elementos dos processos são as bases do procedimento de síntese. A Figura B.2 mostra uma representação das etapas básicas para a obtenção de um projeto ótimo. Mesmo assim, cada bloco do diagrama pode representar outros passos que não estão detalhados. A descrição dos principais passos do projeto é apresentada a seguir.

A *concepção do projeto* consiste em definir o que vai ser feito no projeto e como ele pode ser executado. Frequentemente, podem haver aproximações que satisfazem uma dada requisição de entrada e saída. Após uma análise, seleciona-se uma concepção inicial, mas usualmente esta não é conhecida.

A *especificação do projeto* é um passo bastante crítico, pois nem sempre os dados de saída estão bem definidos. Esta fase é importante para definir não apenas o desejado, mas também, o não desejado. Por exemplo, um projeto de aletas para um tubo que maximiza a transferência de calor, em princípio, pode ser a mais longa que possa ser construída. Assim,

algumas referências sobre o tamanho são de grande valia. Frequentemente, considerações sobre os custos dos componentes, sobretudo na análise, ajudarão no controle de tais fatores.

A *definição de componentes* requer a aplicação de alguns conceitos dos aspectos físicos dos vários componentes do sistema global. Isto é feito normalmente utilizando relações matemáticas que definem cada componente do processo. Estas são geralmente relações empíricas que se baseiam na concepção teórica do processo, principalmente, quando se deseja atender todas as faixas operacionais dos parâmetros que estão sendo definidos (BOEHM, 1987). Por exemplo, em trocadores de calor em que a performance esteja bem definida, a queda de pressão e as características do coeficiente de transferência de calor são normalmente representadas empiricamente.

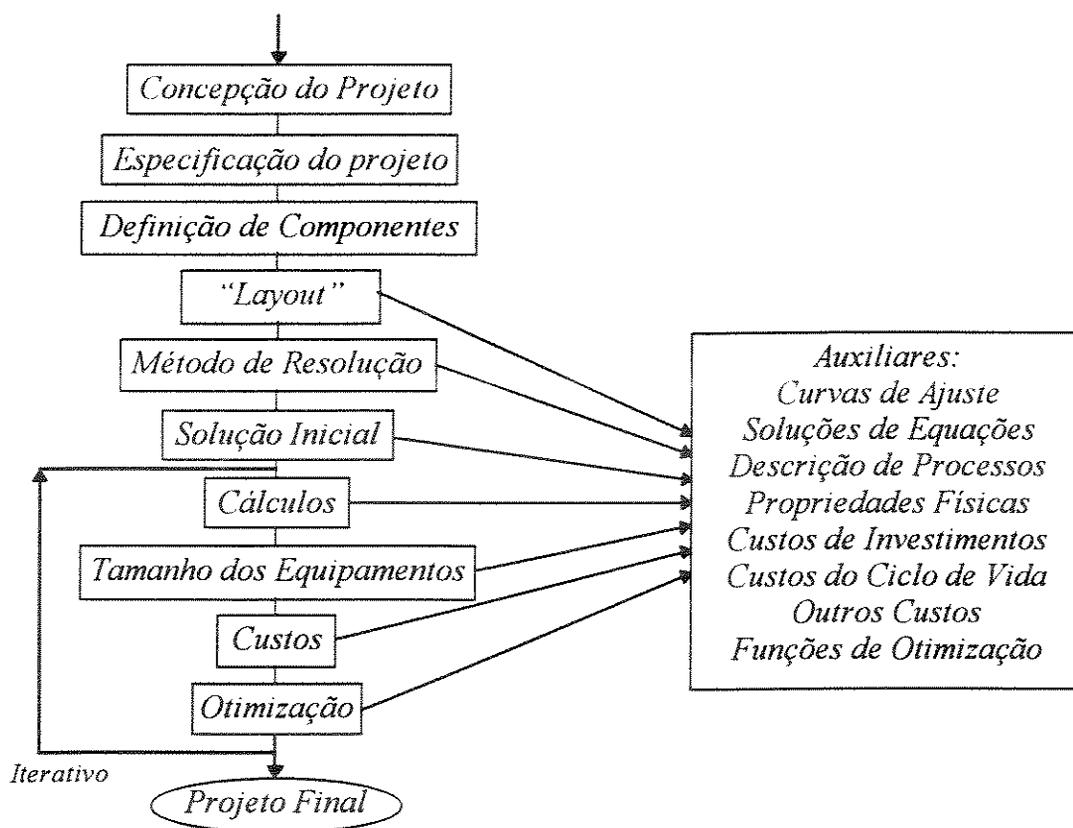


Figura B.2 - Etapas analisadas no projeto de um sistema térmico (BOEHM, 1987)

O passo correspondente ao "*layout*" é importante para aqueles problemas em que há grande número de componentes no processo. Em plantas complexas com diversos componentes conectados, este passo é indispensável para o entendimento das características operacionais do sistema.

O bloco correspondente ao *método de resolução* pode representar grande número de variações. Assim como no *layout*, ele pode representar um conjunto muito complexo de procedimentos quando o sistema envolve grande quantidade de processos. Este procedimento geralmente descreve passo a passo as características dos processos de forma a resultar em problemas com soluções matemáticas.

Após a finalização da etapa anterior, verifica-se que há um sistema bem definido com as funções matemáticas para todos os elementos do processo, bem como uma técnica geral de resolução. Agora, é necessária a introdução de uma *solução inicial* para as variáveis do problema. Esta solução, freqüentemente, pode ser obtida através de uma análise dos dados de entrada do sistema. No entanto, em problemas complexos esta tarefa não é fácil e o sucesso da solução final depende da escolha de uma solução inicial razoável.

No passo denotado por *cálculos* tem-se uma fase de cálculos interativos em que o uso de um computador é indispensável. Esta fase é geralmente representada por um modelo do sistema em que as variáveis de entrada (possivelmente incluindo o tamanho dos componentes, algumas pressões de entrada do processo, temperaturas, etc.) são utilizadas no procedimento de cálculo para encontrar todas as iterações do sistema. Nesta fase, ainda poderão ser incluídos as potências de entrada e saída, adição e rejeição de calor e os demais fluxos mássicos de entrada e saída das correntes participantes do processo.

No bloco correspondente ao *tamanho de componentes* são introduzidos os parâmetros capazes de definir as dimensões de cada equipamento a ser utilizados. Apesar da solução, em alguns casos, ser obtida em função da unidade de massa, neste item são respondidas perguntas como: qual a potência produzida por este gerador?, qual a carga térmica total deste trocador de calor?, etc.

No bloco referente a *custos* é considerado o valor monetário para cada um dos aspectos da planta. Neste item, normalmente, não se introduz apenas os preços dos equipamentos, mas também, pode-se incluir as estimativas dos custos operacionais e todos os outros fatores que agregam valores no custo global da planta. Este passo é extremamente importante sobretudo no projeto final.

Após a inclusão de todos os itens citados (Figura B.2), as soluções geradas deverão ser analisadas de acordo com o(s) critério(s) de *otimização(ões)* selecionado(s). Estes critérios visam normalmente o mínimo custo, ou seja, aquele projeto que apresentar o menor custo é o projeto ótimo. O projeto ótimo corresponderá ao *projeto final*.

Apêndice C

Projeto de Trocadores de Calor a Partir do Modelo

C.1 - Introdução

No Apêndice B, foram mostradas as etapas básicas para o projeto de um sistema térmico. Porém, os dados apresentados neste estudo não estão dispostos naquela seqüência, uma vez que aqui não se objetivou otimizar todo um sistema e sim, partes dele como a minimização do uso das utilidades e da área total de transferência de calor. Se obedecida a seqüência da Figura B.2, percebe-se que através deste estudo pode-se gerar uma solução inicial para a rede de trocadores de calor. No entanto, alguns componentes precisam ainda ser definidos. Além disso, neste estudo não foi analisada a influência da perda de carga nos trocadores de calor, embora alguns pesquisadores afirmem que a redução nos custos térmicos se sobrepõe ao acréscimo dos custos de bombeamento (PITERS e TIMMERHAUS, 1991). Deste modo, se fixado o valor máximo admissível para a perda de pressão, o trocador de calor ótimo deverá fazer o máximo uso desta, para aumentar a taxa de transferência de calor (GOLDSTEIN, 1987; SAUNDERS, 1988).

Neste Apêndice, pretende-se analisar os principais parâmetros pertinentes aos trocadores de calor, seja definindo-os ou indicando ferramentas para a sua obtenção.

C.2 - Especificação de Trocadores de Calor

A especificação de um trocador de calor baseia-se nas condições requeridas pelo processo e nas partes mecânicas envolvidas. No projeto de um trocador de calor, os fabricantes geralmente trabalham com configurações padrões que os auxiliam no projeto. Desta forma, alguém com o conhecimento básico destas configurações está capacitado a especificar todos os detalhes de um trocador de calor. As informações básicas que deverão ser fornecidas aos fabricantes de trocadores de calor são descritas a seguir.

C.2.1 - Informações do processo

Segundo PITERS e TIMMERHAUS (1991), são necessários as seguintes informações do processo para projetar um trocador de calor:

- 1) - Fluidos a ser utilizados, incluindo as propriedades termodinâmicas destes se estas não forem do conhecimento do fabricante;
- 2) - Descargas dos fluidos;
- 3) - Temperaturas na entrada e saída;
- 4) - Parcela dos fluidos que é condensado ou vaporizado;
- 5) - Pressões de operação e quedas de pressão permitidas;
- 6) - Fatores de depósitos;
- 7) - Taxa de transferência de calor.

C.2.2 - Informações mecânicas

As informações mecânicas, segundo PITERS e TIMMERHAUS (1991), necessárias ao projeto de um trocador de calor do tipo casco e tubo, são as seguintes:

- 1) - Dimensões dos tubos (tamanho, diâmetro e espessura);
- 2) - Arranjo e passo dos tubos;
- 3) - Temperaturas e pressões de projeto;
- 4) - Tolerância de corrosão;
- 5) - Normas especiais envolvidas;
- 6) - Materiais de construção envolvidos.

Estas recomendações são apenas sugestões, para maiores informações veja SAUNDERS (1988) e o manual do TEMA (1978).

C.3 - Trocadores de Calor Utilizados no Modelo

No Capítulo 6, foram feitas algumas considerações sobre o trocador de calor que deverão ser obedecidas na construção do mesmo, uma vez que estas influenciaram nos parâmetros obtidos. As considerações inicialmente feitas para todos os trocadores de calor foram: (1) todos são do tipo casco e tubo, sendo que os fluidos circulam com um trajeto no casco e trajetos pares nos tubos; (2) o fluido com maior temperatura inicial circulará interno aos tubos enquanto o outro no casco e (3) fluidos sem mudanças de fases. Além disso, foram fixados valores para o coeficiente global de transferência de calor (U) e para as temperaturas dos fluidos nas entradas e nas saídas do trocador de calor, as quais permitiram o cálculo da diferença média de temperatura (ΔT_m).

A partir das considerações anteriores, o modelo gerou soluções com diversas combinações entre correntes para atender os objetivos propostos. Deste modo, para um trocador de calor (r), o modelo determinou a carga térmica ótima (q_r) e sua respectiva área de transferência de calor (A_r). Como diversos parâmetros já foram determinados, os demais deverão ser obtidos de modo a permitir a funcionalidade do trocador de calor. Estes parâmetros geralmente serão determinados de maneira iterativa, pois estão diretamente interligados. A análise necessária para a determinação dos parâmetros restantes para a geração do trocador de calor é mostrada na seqüência.

C.3.1 - Descargas dos fluidos

A descarga dos fluidos (vazão mássica), \dot{m} , de cada corrente do trocador de calor é obtida a partir da carga térmica (q_r) determinada no Capítulo 6. Assim, na corrente que está resfriando (\dot{m}_h)

$$\dot{m}_h = \frac{q}{Cp(T_{h1} - T_{h2})} \quad (\text{C.1a})$$

na corrente que está aquecendo (\dot{m}_c)

$$\dot{m}_c = \frac{q}{Cp(T_{c1} - T_{c2})} \quad (\text{C.1b})$$

C.3.2 - Número de tubos

O número total de tubos (n) de um trocador que utiliza tubos de diâmetro externo (de) com comprimento W e área de transferência de calor (A), é calculado de acordo com a expressão abaixo,

$$n = \frac{A}{\pi de W} \quad (\text{C.2})$$

C.3.3 - Velocidades dos fluidos

A velocidade (v) de cada fluido deverá ser definida de modo a manter uma perda de carga admissível no trocador de calor, tanto no lado dos tubos quanto no lado do casco.

$$v = \frac{\dot{m} \rho}{A_t} \quad (\text{C.3})$$

A seção transversal (A_t) pode ser determinada pela equação (C.4) para o fluido que circula nos tubos de um trocador em k trajetos com n_t tubos de diâmetro interno (di) por trajeto.

$$A_t = \frac{n_t \pi di^2}{4} \quad (\text{C.4})$$

C.3.4 - Outros parâmetros

Além dos parâmetros mencionados anteriormente, é necessário definir os seguintes componentes: tipos de cabeçotes, tipo de feixe tubular, disposições dos tubos, diâmetro do casco, chicanas, bocais, etc. Todos estes detalhes construtivos podem ser vistos no manual do TEMA (1978), BELL (1980), GOLDSTEIN (1987) e SAUNDERS (1988), que discutem as varias possibilidades para diversas configurações de trocadores de calor.

C.4 - Verificação do Trocador de Calor

O trocador de calor a ser gerado deve fornecer a carga térmica calculada pelo modelo, ou seja, $q = \dot{m}C_p\Delta T = AU\Delta Tm$. A carga térmica q , a área A e a diferença média de temperatura ΔTm , foram fixados no modelo no entanto, o coeficiente global de transferência de calor (U) é calculado através da expressão (C.5) e deve corresponder ao valor estimado na Tabela 6.4. Caso isso não ocorra, deve-se variar iterativamente os demais parâmetros da expressão (C.5) até a obtenção desta igualdade.

$$U = \frac{1}{\frac{de}{hi \cdot di} + \frac{de}{2 \cdot k_t} \cdot \ln\left(\frac{de}{di}\right) + \frac{1}{he} + Ri \cdot \frac{de}{di} + Re} \quad (C.5)$$

onde: di , de o diâmetro interno e externo dos tubos do trocador de calor, respectivamente; hi , he o coeficiente global de transferência de calor por convecção interno e externo aos tubos do trocador de calor, respectivamente; Ri , Re a resistência térmica de depósito do fluido no trocador de calor interno e externo aos tubos, respectivamente; k_t é a condutibilidade térmica do material dos tubos do trocador de calor e, U é o coeficiente global de transferência de calor.

O manual do TEMA (1978) traz uma série de tabelas com valores estimados das resistências de depósitos para diversas combinações de fluidos, a condutibilidade térmica de vários materiais e os principais diâmetros dos tubos comercializados, que poderá servir de base para esta análise.

As expressões para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção, coeficiente de película h , são encontradas na literatura de transferência de calor, em função das propriedades do escoamento do fluido em análise. Para o fluido que circula dentro dos tubos de diâmetro interno d_i , o coeficiente de película (h_i) pode ser obtido através da expressão (C.6),

$$h_i = \frac{Nu k_i}{d_i} \quad (C.6)$$

onde, k_i é a condutibilidade térmica do fluido que circula nos tubos e Nu é o número de Nusselt, que por sua vez é um coeficiente adimensional calculado em função de outros dois números adimensionais, Reynolds e Prandtl (ÖZISIC, 1977; KERN, 1987).

Variações em h_i podem ser obtidas através de mudanças no número de Nusselt através de alterações na velocidade do escoamento do fluido, conforme indicam as expressões em ÖZISIC (1977), KERN (1987) e GOLDSTEIN (1987).

O coeficiente de película do lado do casco é um fator muito complexo e uma discussão detalhada pode ser vista em BELL (1980) e GOLDSTEIN (1987). No entanto, este coeficiente pode ser obtido para condições ideais através de gráficos e tabelas, em função do arranjo dos tubos do trocador de calor e do número de Stanton (BELL, 1980; GOLDSTEIN, 1987; ÖZISIC, 1977).

A variação do coeficiente de película no lado do casco, h_e , está diretamente ligada a trajetória do escoamento. Assim, pode-se obter esta variação alterando os seguintes parâmetros:

- número de passes de tubos por casco (neste exemplo são múltiplos de dois);
- número de chicanas;
- corte das chicanas (segmentadas ou duplamente segmentadas);
- arranjo dos tubos;
- passo dos tubos;
- comprimento dos tubos, etc.