

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA

**SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR ATRAVÉS DE
TÉCNICAS DE DECOMPOSIÇÃO**

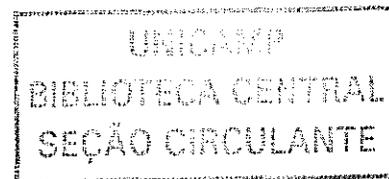
Autor: Luís Fernando Novazzi

Orientador: Prof. Dr. Roger Josef Zemp

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Campinas - SP
Dezembro de 2001

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL



UNIDADE	Be
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	N857s
V	EX
TOMBO P.	48511
PLAC.	16-837102
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	
Nº CPD	

CM00166497-0

BIB ID 237922

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

Novazzi, Luís Fernando

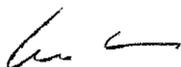
N857s Síntese de redes de trocadores de calor através de técnicas de decomposição / Luís Fernando Novazzi.--
Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Roger Josef Zemp.

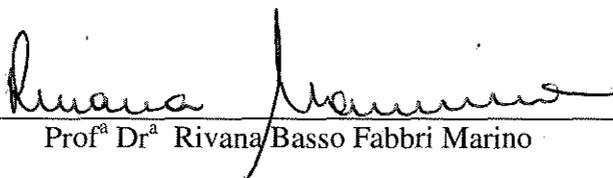
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Modelos matemáticos. 2. Otimização matemática.
3. Permutadores térmicos. 4. Energia. I. Zemp, Roger
Josef. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Dissertação de Mestrado defendida por Luis Fernando Novazzi e aprovada em 18 de dezembro de 2001 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Roger Josef Zemp



Prof.^a Dr.^a Rivana/Basso Fabbri Marino



Prof. Dr. Mario de Jesus Mendes

759618009

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida por Luis Fernando Novazzi e aprovada pela comissão julgadora em 18 de dezembro de 2001.



Prof. Dr. Roger Josef Zemp

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo suporte e paciência durante esse trabalho.

Ao Roger, pela amizade e pelo apoio incondicional.

À Maristhela, pela inestimável ajuda.

Ao Luiz, ao Geraldo, à Rivana, à Leda e à Amanda, que sempre estiveram do meu lado.

Acceptez donc ici l'hommage de ma gratitude, qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera jamais à la hauteur de votre dévouement.

**What you think the summit is just a step
(Seneca)**

Resumo

A Tecnologia *Pinch* é uma ferramenta bastante utilizada na integração de processos químicos. Ela se baseia na determinação, somente em função de algumas propriedades físicas das correntes de um processo, de metas de consumo de energia, de área e de custos de uma rede de trocadores de calor. Também determina regras para a síntese de redes cujos custos, área e consumo energético se aproximam muito daqueles estipulados pelas metas.

Entretanto, a aplicação irrestrita da Tecnologia *Pinch*, integrando todas as correntes de um processo num único conjunto, pode levar a redes de trocadores demasiadamente complexas.

Foi sugerida nesse trabalho uma metodologia de decomposição das correntes em que as mesmas são integradas em subgrupos independentes entre si, a fim de se obter redes de trocadores mais simples. Através do *Simulated Annealing*, um método de otimização aleatório e aplicável a funções discretas, buscaram-se as diferentes configurações de correntes nos subgrupos que levavam a um mínimo ou nas metas de custo, ou área ou consumo energético.

Na síntese de uma rede de trocadores, é importante levar em conta aspectos operacionais tais como *layout*, questões de segurança, controlabilidade, etc. Esses aspectos foram incluídos na metodologia proposta através do conceito de matriz de restrições.

Para exemplificar a técnica de decomposição em subgrupos, foram sintetizadas algumas redes de trocadores de calor, cujos custos totais desviaram-se em menos do que 2% em relação às metas estipuladas.

Palavras chave: otimização, Tecnologia *Pinch*, redes de trocadores de calor, decomposição

Abstract

Pinch Technology is a very useful tool for integration in chemical processes. By only taking some of process streams physical properties into account, it sets energy targets, area targets and cost targets for a heat exchanger network. It also determines rules for the design of a heat exchanger network whose costs, area and energy consumption remain quite close to the targets set.

However, blind obedience to Pinch Technology rules, integrating all streams in just one group, can lead to very complex heat exchanger networks.

It was suggested in this work a decomposition technique where the streams were integrated in independent subgroups, aiming for simpler networks. Through Simulated Annealing, a randomic optimisation method applicable to discrete functions, different configurations of streams in the subgroups which led to a minimum in energy targets, or in area targets or in cost targets, were sought.

In heat exchanger network synthesis, it is important to consider aspects of plant operability, such as layout, security, controlability, etc. These aspects were included in the proposed methodology through the concept of a constraint matrix.

To give some examples of the decomposition technique, some heat exchanger networks were synthetised, whose costs presented less than 2% of deviation in relation to the targets set.

Key words: optimisation, Pinch Technology, heat exchanger networks, decomposition

Sumário

Capítulo 1 - Introdução à tese.....	1
1.1 Importância do uso eficiente de energia em processos químicos.....	1
1.2 Exemplo: planta de aromáticos.....	2
1.3 Análise energética da planta de aromáticos.....	3
1.4 Integração energética aplicada na planta de aromáticos.....	5
1.5 Problemas na análise <i>Pinch</i>	6
1.6 Objetivos da tese.....	8
Capítulo 2 - Integração energética.....	11
2.1 Histórico.....	11
2.2 Curva Composta.....	11
2.3 Metas de consumo de energia através do algoritmo tabular.....	17
2.4 Regras para se atingir as metas de consumo de utilidades.....	20
2.5 Diagrama de grade.....	22
2.6 Metas para o número de unidades de trocadores de calor.....	23
2.7 Metas de área da rede de trocadores.....	24
2.8 Metas de custo total da rede de trocadores.....	28
2.9 Síntese da rede.....	30
2.10 Conclusões.....	31
Capítulo 3 - Técnicas de decomposição.....	33
3.1 Introdução.....	33
3.2 Sugestão de uma nova técnica de decomposição.....	35
3.3 <i>Simulated Annealing</i>	37
3.4 Exemplo: otimização das metas de custo da planta de aromáticos através do <i>Simulated Annealing</i>	43
3.5 Conclusões.....	47

Capítulo 4 - Otimização de metas de energia, área e custo.....	51
4.1 Introdução.....	51
4.2 Influência do ΔT_{min} nas metas de energia, área e custo total.....	51
4.3 Otimização das metas de energia.....	56
4.4 Otimização das metas de área.....	61
4.5 Otimização das metas de custo para um ΔT_{min} fixo.....	63
4.6 Influência do ΔT_{min} na otimização das metas de custo.....	80
4.7 Otimização das metas de custo com ΔT_{min} variável.....	85
4.8 Conclusões.....	90
Capítulo 5 - Decomposição com restrições.....	93
5.1 Introdução.....	93
5.2 Penalidades na associação de correntes.....	94
5.3 Favorecimento de associação de correntes.....	100
5.4 Conclusões.....	104
Capítulo 6 - Estudo de caso.....	107
6.1 Introdução.....	107
6.2 Exemplo: unidade de fracionamento de óleo cru.....	107
6.3 Decomposição das correntes da unidade de fracionamento de óleo cru.....	111
6.4 Conclusões.....	115
Capítulo 7 - Conclusões e propostas para futuros trabalhos.....	117
7.1 Conclusões finais.....	117
7.2 Propostas para futuros trabalhos.....	118
Referências Bibliográficas.....	121

Nomenclatura

Letras Latinas:

T	temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
H	entalpia (kW)
CP	capacidade calorífica ($\text{kW}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Q	carga térmica (kW)
U	coeficiente global de transferência de calor ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
A	área (m^2)
h	coeficiente de película ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
N_{max}	número máximo de correntes por subgrupo
N	número de correntes
I	número total de correntes quentes num intervalo de entalpia
J	número total de correntes frias num intervalo de entalpia
K	número total de intervalos de entalpia
a	parâmetro de custo de um trocador de calor
b	parâmetro de custo de um trocador de calor
c	parâmetro de custo de um trocador de calor

Letras gregas

Δ	diferença
----------	-----------

Subscritos

H	utilidade quente
C	utilidade fria
min	valor mínimo
k	intervalo de entalpia
i	correntes quentes
j	correntes frias
LM	média logarítmica

<i>l</i>	laços
<i>extra</i>	quantidade em excesso
<i>u</i>	trocadores de calor
<i>s</i>	correntes
<i>p</i>	problemas independentes

Capítulo 1 - Introdução à tese

1.1 Importância do uso eficiente de energia em processos químicos

A indústria química é uma das mais importantes consumidoras de energia em todo o mundo, ficando apenas atrás da indústria siderúrgica. Na figura 1.1 é representado o consumo energético percentual de diferentes segmentos industriais europeus, referentes ao ano de 1984:

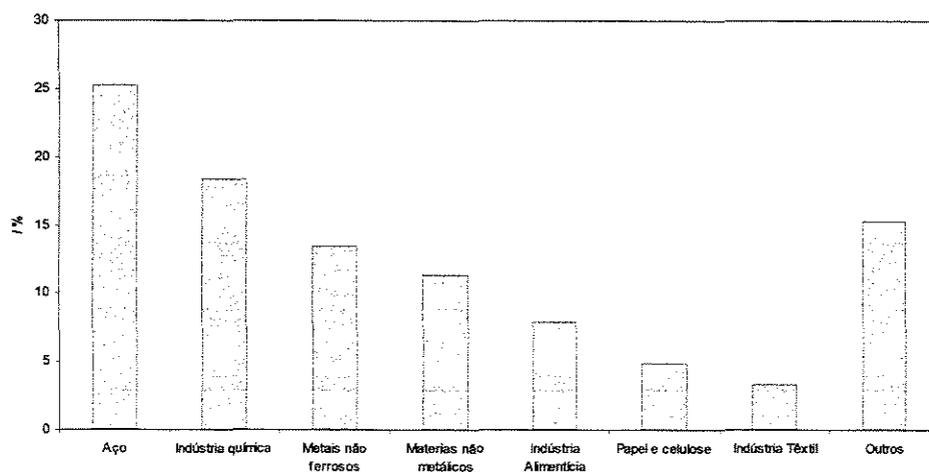


Figura 1.1 Consumo energético percentual por segmento industrial, na Europa em 84 (adaptado de “Process Heat Transfer”, Hewitt G. F., Shires G. L., Bott T. R., editora CRC Press, 1994, pág. 3)

Em meados da década de oitenta o mundo passou por uma grave crise energética, provocada por um brutal aumento no preço do petróleo. Esse fato, entre outras coisas, veio ressaltar a necessidade do uso eficiente de energia em processos químicos.

Atualmente, além de se considerar o aspecto energético, é preciso também levar-se em conta aspectos ambientais. Calor rejeitado num processo químico não somente representa um desperdício de combustível, mas também significa que mais poluição está sendo gerada.

A formação de gases de combustão, tais como CO_2 , CO , NO_x e SO_x , em caldeiras e fornos, é proporcional ao consumo de combustível e está diretamente ligada a diversos problemas, como o efeito estufa e as chuvas ácidas.

Esse desperdício também acarreta, indiretamente, um maior consumo de água de resfriamento, já que uma quantidade maior da mesma deve circular no sistema, passando por torres de resfriamento e gerando maior perda devido à evaporação. Nessas torres também é gerada uma maior quantidade de efluente líquido, pois é necessário um aumento na quantidade de água purgada para manter baixa a concentração de sais dissolvidos em todo o circuito.

Nos processos químicos existem correntes que precisam ser aquecidas e outras que precisam ser resfriadas entre as várias etapas de processamento. O resfriamento ou aquecimento dessas correntes pode ser feito através do uso direto de utilidades, sendo isso provavelmente pouco eficiente do ponto de vista energético e também normalmente não muito aconselhável do ponto de vista ambiental por aumentar as quantidades de efluentes líquidos e gasosos, como foi discutido anteriormente. Esse aquecimento ou resfriamento pode também ser realizado através do aproveitamento da energia disponível nas correntes, integrando-as e diminuindo a quantidade total de utilidade a ser usada. Na maioria dos casos essa última opção é a mais viável.

1.2 Exemplo: planta de aromáticos

A figura 1.2 representa um fluxograma simplificado para a produção de aromáticos a partir da reforma da nafta (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989), sem integração energética entre as correntes de processo:

Nessa figura, os equipamentos identificados por H e C representam trocadores de calor que utilizam utilidade quente e utilidade fria, respectivamente. Não foram incluídos os refeedores e os condensadores das colunas D1 e D2 (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989).

A alimentação de nafta, constituída essencialmente de alcanos e cicloalcanos, é vaporizada em H1 e passa num reator de dessulfurização R1. A corrente de saída do reator R1 é então resfriada em C1, sofre condensação parcial e a mistura bifásica resultante é separada no tanque flash F1. O líquido obtido em F1 é aquecido em H2 e alimentado na coluna de destilação D1, onde são removidos no topo da coluna os compostos que ainda contêm enxofre e também as frações mais leves da nafta. A corrente de nafta dessulfurizada da coluna D1 é aquecida em H3, misturada com o gás de reciclo proveniente do tanque

flash F2 e a mistura é alimentada no reator de reforma catalítica R2. A corrente de saída do reator R2 é primeiramente resfriada na unidade E, onde atende a algumas necessidades de processo não representadas na figura, e posteriormente é resfriada em C2, havendo condensação parcial da mesma. A mistura bifásica resultante é separada no tanque flash F2; o gás obtido em F2 é pré-aquecido em H4 antes de ir novamente para o reator R2 e o líquido obtido em F2 é pré-aquecido em H5 e alimentado na coluna de estabilização D2. O produto de fundo da coluna D2, que contém basicamente produtos aromáticos, é resfriado em C3 e segue para estocagem.

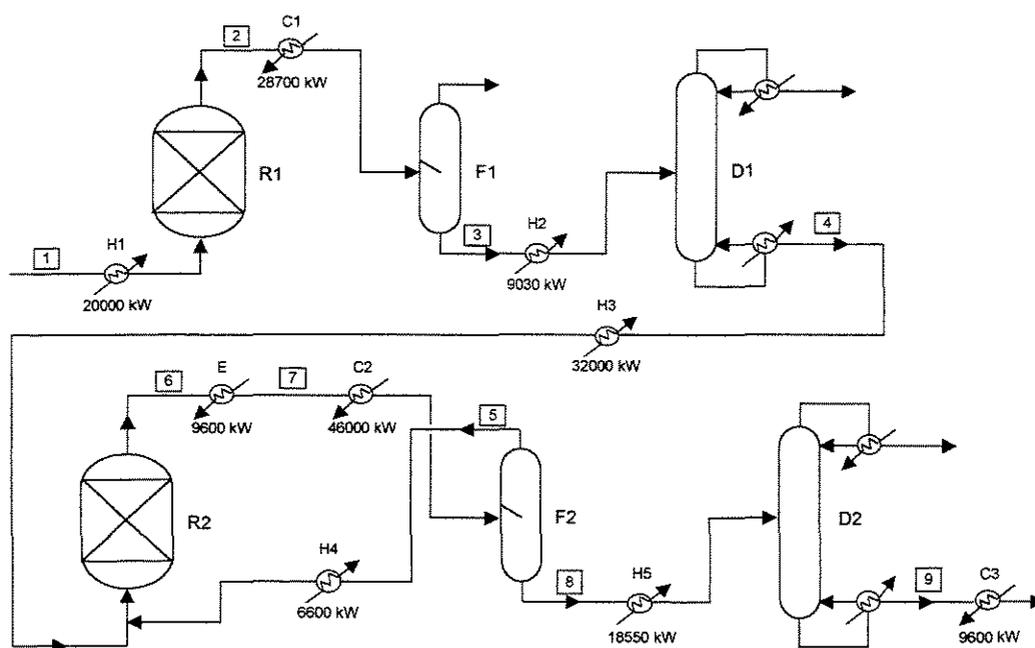


Figura 1.2 Fluxograma de uma planta de aromáticos

1.3 Análise energética da planta de aromáticos

Num processo químico, as correntes que precisam ser aquecidas são chamadas de correntes frias e, de maneira análoga, as correntes que precisam ser resfriadas são chamadas de correntes quentes.

Na planta de aromáticos, por exemplo, a corrente 2, proveniente do reator R1, é uma corrente quente que deve ser resfriada de 327°C , temperatura essa simbolizada por $T_{entrada}$, até 40°C , temperatura essa representada por $T_{saída}$, antes de seguir para o tanque flash F1. Analogamente, a corrente 1 é uma corrente fria que deve ser aquecida de 100 até

300°C antes de ir para o reator R1. Supõe-se que todas as correntes possuam calor específico constante. O calor específico de uma corrente, C_P , multiplicado pela vazão mássica da mesma dá como resultado CP . A variação de entalpia ΔH é positiva para correntes frias e negativa para correntes quentes, de acordo com convenções termodinâmicas. São fornecidos na tabela 1.1 alguns dados das correntes do processo dos aromáticos (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989):

Tabela 1.1 Dados das correntes de processo da planta de aromáticos

corrente	tipo	$T_{entrada} / (^\circ\text{C})$	$T_{saída} / (^\circ\text{C})$	$CP / (\text{kW}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$\Delta H / (\text{kW})$
2	quente	327	40	100	-28700
6	quente	220	160	160	-9600
9	quente	220	60	60	-9600
7	quente	160	45	400	-46000
1	fria	100	300	100	20000
3	fria	35	164	70	9030
8	fria	85	138	350	18550
5	fria	60	170	60	6600
4	fria	140	300	200	32000

No fluxograma representado na figura 1.2, as correntes frias são aquecidas com utilidade quente, cujo consumo total é representado por Q_H , e as correntes quentes são resfriadas com utilidade fria, cujo consumo total é representado por Q_C . Não foi realizada a integração energética entre as correntes de processo, sendo todas elas sustentadas com utilidades. O consumo energético e o número de trocadores de calor nesse caso são indicados na tabela 1.2.

Tabela 1.2 Consumo de energia e número de trocadores para a planta de aromáticos sem integração energética

Q_C / kW	93900
Q_H / kW	86180
número de trocadores	9

O fato de não haver o aproveitamento de nenhuma parte da energia disponível nas correntes, diminuindo o uso de utilidade externa, sugere que o processo não deve ser muito eficiente do ponto de vista energético.

1.4 Integração energética aplicada na planta de aromáticos

Para que haja aproveitamento da energia disponível nas correntes de processo é necessário realizar a síntese de uma rede de trocadores de calor, a qual proporcionará a integração energética entre essas correntes.

Normalmente, podem ser sugeridas várias configurações de rede que levam a diferentes consumos energéticos. A pergunta que se põe é a seguinte: qual seria o mínimo consumo de utilidades e qual ou quais redes de trocadores levariam a esse mínimo consumo? Uma ferramenta que responde a essa pergunta é a Tecnologia *Pinch*, uma metodologia desenvolvida por Linnhoff e colaboradores (1982). Nessa metodologia, são estipuladas metas de consumo de energia e de custo de capital para a rede de trocadores de calor, sem haver necessidade do projeto tradicional da mesma. Além disso, na Tecnologia *Pinch* também foram desenvolvidas regras que permitem a construção de redes de trocadores cujo consumo de energia e custo de capital têm normalmente um erro menor do que 10% em relação às metas estipuladas.

Uma rede de trocadores típica, obtida através da aplicação da Tecnologia *Pinch* ao caso dos aromáticos, com todas as correntes integradas num só grupo, para um ΔT_{min} de 25°C, é representada na figura 1.3, sendo ΔT_{min} a mínima diferença de temperatura entre as correntes no lado frio ou no lado quente de um trocador de calor. Os refeedores e condensadores das colunas D1 e D2 não foram levados em conta na integração energética, sendo sustentados com utilidades (Ahmad S. e Linnhoff B. 1989).

O consumo energético e o número de trocadores são comparados, na tabela 1.3, para o processo integrado, com a rede obtida através da aplicação da Tecnologia *Pinch*, e para o processo não integrado.

Com a integração energética entre as correntes de processo, o consumo de utilidade fria passou a 32200 kW, ou seja, uma redução de mais de 65% em relação ao processo não integrado. Analogamente, o consumo de utilidade quente passou a 24480 kW, ou seja, uma redução de mais de 70%. Em contrapartida, o número de trocadores de calor aumentou consideravelmente, de 9 para 16. Entretanto, para esse processo, o custo com energia era muito mais significativo do que o custo com trocadores, justificando a integração entre as correntes (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989).

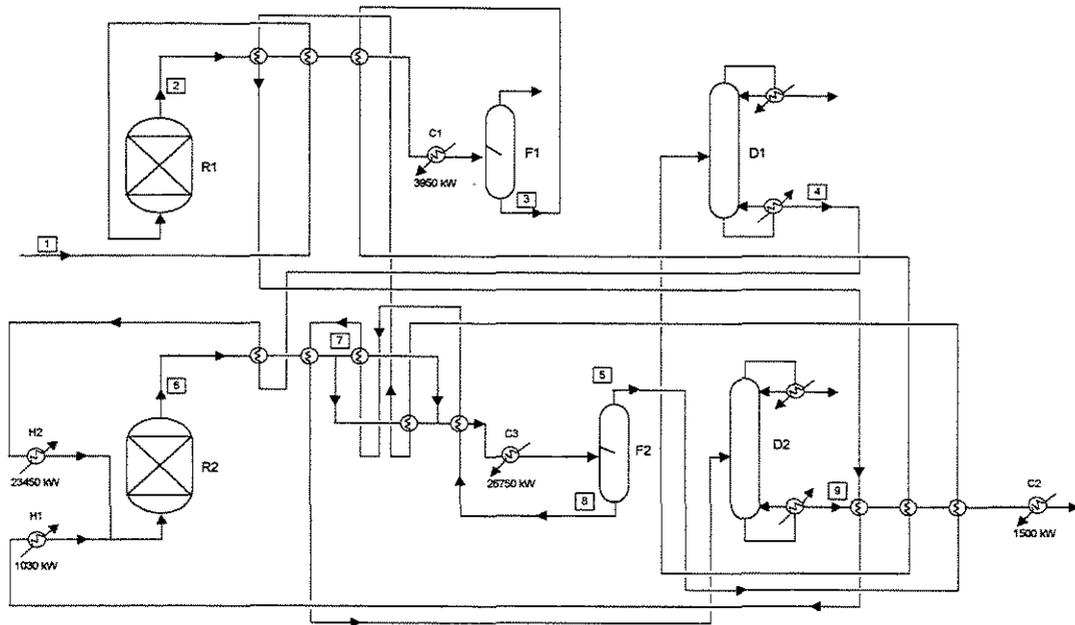


Figura 1.3 Integração total com ΔT_{min} de 25°C

A determinação de metas de consumo de energia e de custos, bem como regras que permitem a síntese de redes de trocadores que se aproximam dessas metas, como a rede indicada na figura 1.3, por exemplo, é feita através da Tecnologia *Pinch*, discutida com mais detalhes no capítulo 2.

Tabela 1.3 Comparação do consumo de energia e número de trocadores para a planta de aromáticos energeticamente integrada e não integrada

	Processo não integrado	Processo integrado
Q_C / kW	93900	32200
Q_H / kW	86180	24480
número de trocadores	9	16

1.5 Problemas na análise *Pinch*

No fluxograma representado na figura 1.3, as correntes são integradas num só grupo. A corrente 2, proveniente do reator R1, primeiramente troca calor com o gás de reciclo vindo do tanque flash F2; é então resfriada pela corrente 1, a alimentação de nafta; em seguida, sofre novo resfriamento através de troca térmica com o líquido vindo do tanque flash F1 e, por final, sofre um último resfriamento em C1 antes de seguir para o

próprio tanque flash F1. Os produtos aromáticos, obtidos no fundo da coluna D2, são primeiramente resfriados pelo gás de reciclo vindo do tanque flash F2; são então resfriados pelo líquido do tanque flash F1; em seguida trocam calor novamente com o gás de reciclo vindo de F2 para depois sofrerem um resfriamento final em C2 e seguirem para estocagem. A simples descrição do caminho percorrido por duas correntes de processo da planta de aromáticos, com as correntes integradas num só grupo, dá uma idéia da complexidade da rede de trocadores dessa planta.

Na abordagem tradicional, em que as correntes são integradas num único conjunto, a aplicação irrestrita das regras e procedimentos ditados pela Tecnologia *Pinch* pode levar a plantas desnecessariamente complexas e potencialmente perigosas (Polley G. T.e Heggs P. J., 1999).

Na análise *Pinch* não são levados em conta aspectos importantes, tais como:

- Partida e parada da planta: esses procedimentos se tornam muito difíceis e em alguns casos podem ser até mesmo inviáveis em função da complexidade da planta;
- *Layout*: a distância entre correntes a serem integradas não é considerada. Isso pode implicar em penalidades devido a bombeamento de correntes, gastos com tubulação, etc. Além disso, existem também grupos de correntes que estão próximas e cuja integração seria bastante natural;
- Controlabilidade: o controle de uma rede complexa não é trivial. Uma perturbação na temperatura ou na vazão de uma corrente pode afetar um grande número de correntes de processo. Uma perturbação na temperatura do produto de fundo da coluna D1, na planta de aromáticos, por exemplo, pode ser corrigida pelo aquecedor H2, mas antes dessa corrente chegar a ele a perturbação vai se refletir na corrente de saída do reator R2 e no líquido que sai do tanque flash F2 e nessas duas correntes não há utilidade externa para contornar o problema.

1.6 Objetivos da tese

A rede de trocadores de calor representada na figura 1.3 é complexa, conforme se discutiu na seção anterior. Nessa rede, as correntes foram integradas num único conjunto. Há a necessidade de se desenvolver uma metodologia que leve a redes menos complicadas.

Na figura 1.4 é sugerida uma rede de trocadores de calor alternativa para a planta de aromáticos, na qual se procurou a associação de correntes, agrupadas no máximo duas a duas, que levassem a um consumo mínimo de energia.

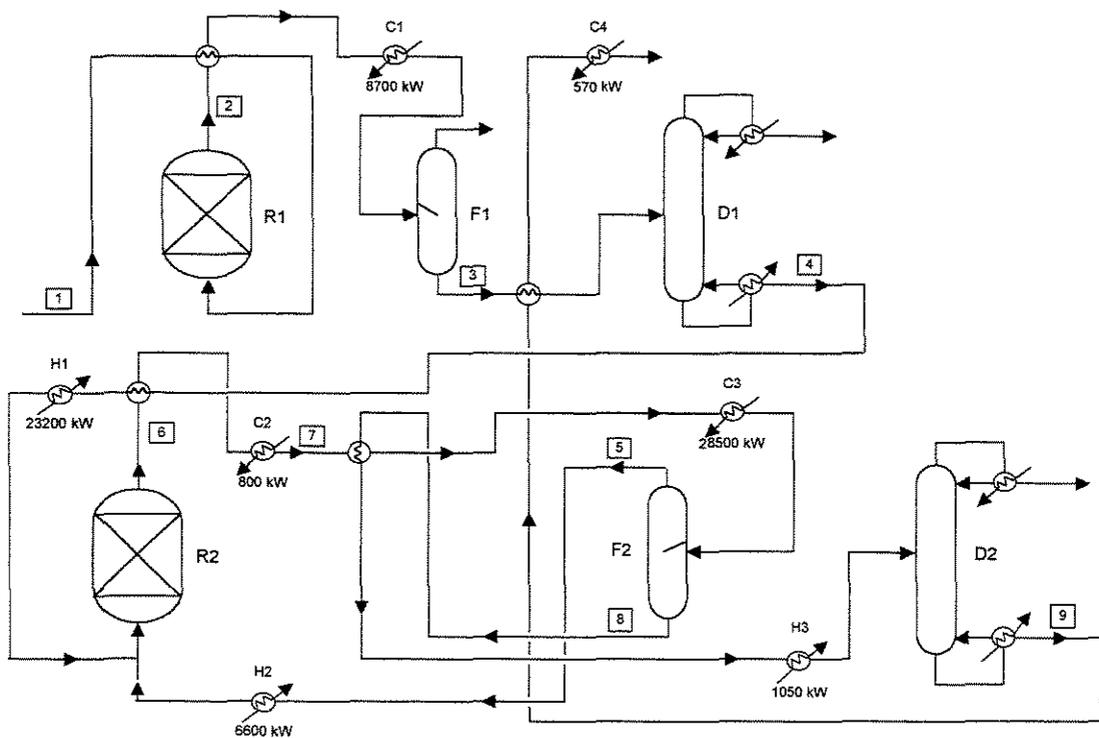


Figura 1.4 Rede de trocadores com integração em subgrupos

As correntes da planta de aromáticos foram integradas em cinco subgrupos independentes entre si, com os consumos energéticos representados na tabela 1.4.

A integração das correntes em subgrupos fez com o que o consumo energético tivesse um pequeno aumento em relação ao processo totalmente integrado, conforme se vê na tabela 1.5. Entretanto, a forma como as correntes foram integradas ainda é energeticamente eficiente: há uma redução de cerca de 60% e de 64% de utilidade fria e quente, respectivamente, em relação ao processo não integrado.

Tabela 1.4 Subgrupos de uma rede de trocadores alternativa

subgrupo	correntes	utilidade fria / kW	utilidade quente / kW
1	1 e 2	8700	0
2	4 e 6	800	23200
3	3 e 9	570	0
4	7 e 8	28500	1050
5	5	0	6600

Entretanto, a rede representada na figura 1.4, com as correntes integradas em subgrupos, é muito mais simples do que a rede obtida na figura 1.3, em que houve integração total das correntes, e ainda assim energeticamente eficiente quando comparada com o processo não integrado. Essa simplicidade se reflete, por exemplo, no aspecto de controle: uma perturbação no produto de fundo da coluna D1 provoca uma perturbação na corrente de saída do reator R2 que é contornada no resfriador C2 e a alteração da corrente 4 por sua vez é corrigida no aquecedor H1. Também em termos de *layout* o fluxograma representado na figura 1.4 é mais simples do que aquele apresentado na figura 1.3.

Tabela 1.5 Comparação do consumo de energia e número de trocadores para o processo não integrado, integrado e integrado em subgrupos

	Processo não integrado	Processo integrado	Processo integrado em subgrupos
Q_C / kW	93900	32200	38570
Q_H / kW	86180	24480	30850
número de trocadores	9	16	11

A integração das correntes em subgrupos independentes, levando em conta restrições de associação, áreas de integridade, aspectos operacionais, etc., tem sido feita tradicionalmente através de bom senso e experiência, como proposto por Polley G. T. e Heggs P. J. (1999).

Essa tese tem como propósito estabelecer uma metodologia, baseada em otimização, que permita decompor as correntes em diferentes subgrupos independentes, que ainda sejam energeticamente eficientes e mesmo assim simples do ponto de vista operacional, como a planta mostrada na figura 1.4. Aspectos como restrições de associação

de correntes, *layout*, operacionalidade, etc., são levados em conta através do conceito de matriz de restrições, o que torna a abordagem matemática bastante flexível e se coloca como uma alternativa ao trabalho desenvolvido por Polley G. T. e Heggs P. J. (1999).

Capítulo 2 - Integração energética

2.1 Histórico

Há mais de vinte anos foram lançadas as bases da tecnologia moderna de integração de processos por Umeda e colaboradores (1978). De 1978 a 1982, esse grupo introduziu o conceito de análise global de processos, reintroduziu o conceito de curvas compostas e mostrou como o mesmo poderia ser usado para se determinar o consumo de utilidades de um processo, desenvolveu uma estratégia de síntese baseada em custos globais de uma rede e identificou o ponto de estrangulamento energético pela primeira vez.

Essa metodologia foi posteriormente estendida, principalmente através da introdução do elegante conceito de se estabelecer metas de consumo de energia e de custo de capital antes do projeto (Linnhoff e colaboradores, 1982). Devido a isso, o ponto *Pinch* de um processo se tornou um dos elementos mais importantes no projeto da rede de trocadores. A metodologia passou então a ser conhecida como Tecnologia *Pinch*.

2.2 Curva Composta

Considerando-se o exemplo dos aromáticos, apresentado no capítulo 1, sejam, por exemplo, as correntes 2 e 4. Baseando-se somente no balanço de energia, vê-se que a corrente 2 teria sua carga térmica, de 28700 kW, suprida totalmente pela corrente 4 e esta por sua vez teria sua necessidade de utilidade quente reduzida de 32000 kW para 3300 kW. Entretanto, nessa associação não foram levadas em conta as temperaturas de entrada e saída das correntes, ou seja, não foi considerada a mínima diferença de temperatura ΔT_{min} necessária para haver transferência de calor. Nota-se então que a integração direta dessas correntes é claramente inviável. Se o ΔT_{min} entre as correntes 2 e 4 for de 15°C, haverá necessidade de utilidades quente e fria:

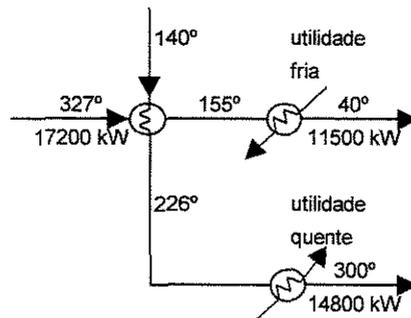


Figura 2.1 Integração das correntes 2 e 4 com ΔT_{min} de 15°C

Se as correntes 2 e 4 forem colocadas num diagrama temperatura em função variação de entalpia ($T \times \Delta H$) tem-se:

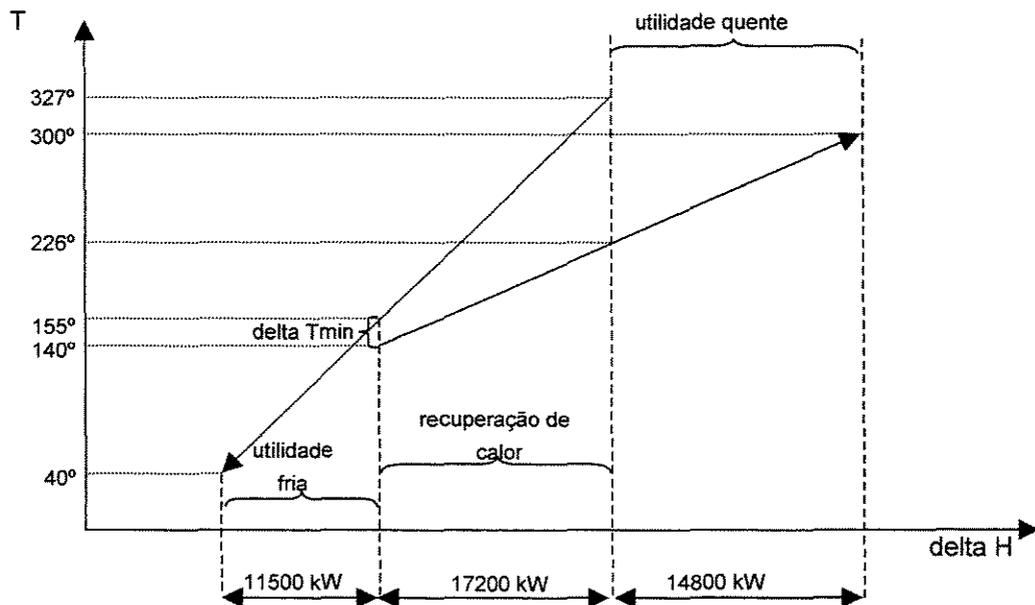


Figura 2.2 Gráfico $T \times \Delta H$ para as correntes 2 e 4 com ΔT_{min} de 15°C

O coeficiente angular de cada uma das retas acima é dado por $1/CP$ e esse valor é constante já que foi adotado um calor específico constante para cada uma dessas correntes (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989).

A região de sobreposição entre as duas curvas identifica a quantidade de calor possível de ser trocada entre correntes de processo. Para um ΔT_{min} de 15°C, essa quantidade é de 17200 kW. A parte da corrente fria que se estende além do começo da corrente quente não pode ser aquecida por esta última e necessita de 14800 kW de utilidade quente; esse é o

consumo mínimo de utilidade quente Q_{Hmin} . Analogamente o consumo mínimo de utilidade fria Q_{Cmin} é de 11500 kW.

No gráfico indicado na figura 2.2, é representada no eixo das abscissas a variação de entalpia das correntes. Isto significa que uma corrente pode ser colocada em qualquer posição no eixo horizontal, desde que não sejam alterados o coeficiente angular e as temperaturas dessa corrente. Se houver esse deslocamento horizontal, haverá uma variação no ΔT_{min} e conseqüentemente o consumo energético irá variar.

Se as correntes 2 e 4 forem integradas com um ΔT_{min} de 25°C, tem-se:

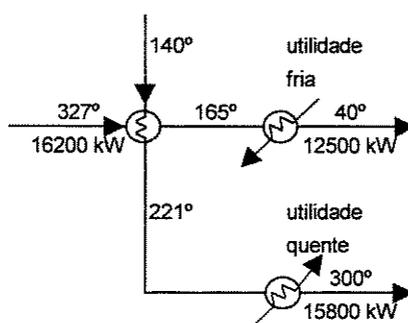


Figura 2.3 Integração das correntes 2 e 4 com ΔT_{min} de 25°C

O diagrama $T \times \Delta H$ para as correntes 2 e 4 integradas com um ΔT_{min} de 25°C é indicado na figura 2.4.

Analisando-se as figuras 2.2 e 2.4, nota-se que um aumento no ΔT_{min} entre as correntes, ou seja, um aumento na força motriz nos trocadores de calor que permitem a integração entre correntes de processo, provoca um aumento no consumo de utilidades, até o caso limite em que todas as correntes de processo seriam aquecidas ou resfriadas através de utilidades, conforme mostrado na tabela 2.1.

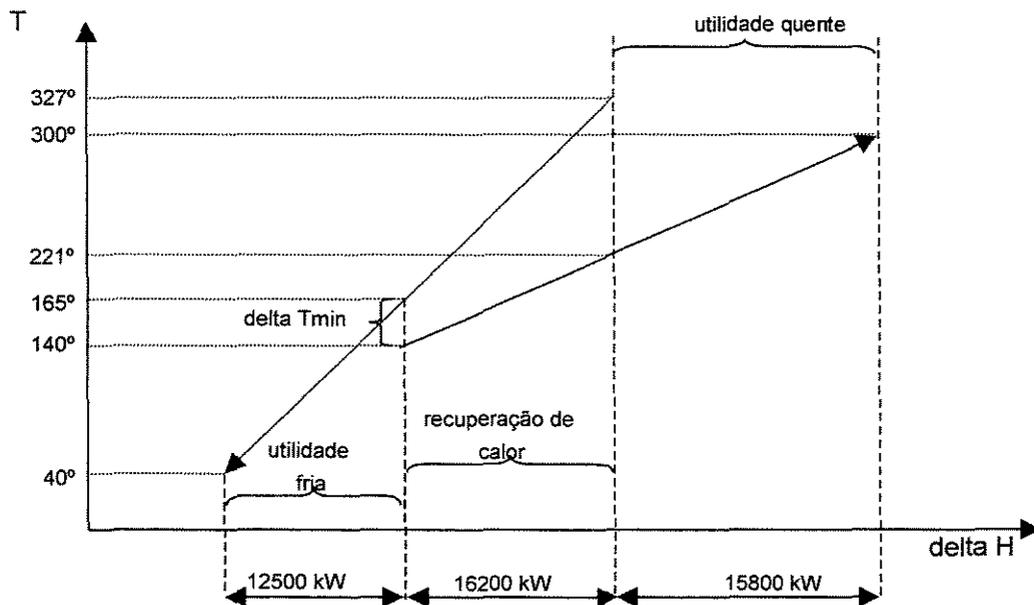


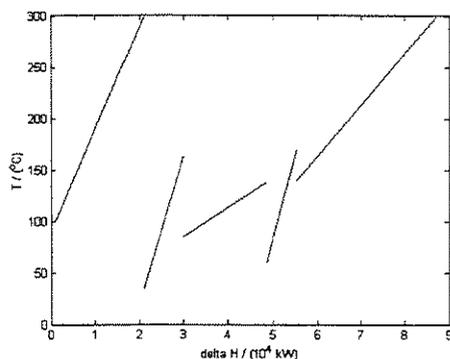
Figura 2.4 Gráfico $T \times \Delta H$ para as correntes 2 e 4 com ΔT_{min} de 25°C

Tabela 2.1 Influência do ΔT_{min} na integração das correntes 2 e 4

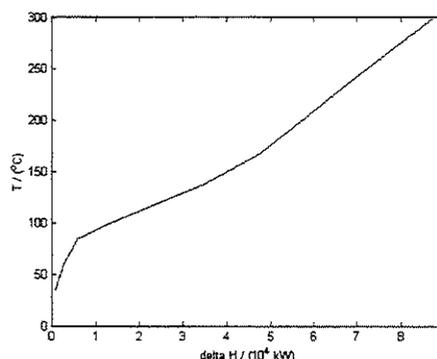
	$\Delta T_{min} = 15^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{min} = 25^{\circ}\text{C}$	Somente uso de utilidades
Q_{Cmin} / kW	11500	12500	28700
Q_{Hmin} / kW	14800	15800	32000
Calor recuperado / kW	17200	16200	0

O raciocínio apresentado até agora foi feito para duas correntes e precisa ser estendido para todas as correntes do processo.

Quando todas as correntes frias estiverem presentes, divide-se o eixo de temperaturas em intervalos definidos pelas temperaturas iniciais e finais de cada corrente e cada uma delas é colocada num gráfico $T \times \Delta H$, conforme mostrado na figura 2.5 (a). As correntes frias são combinadas, sendo o coeficiente angular em cada um dos trechos dado por $1/\Sigma CP$, e obtém-se então a Curva Composta para as correntes frias, conforme indicado na figura 2.5 (b).



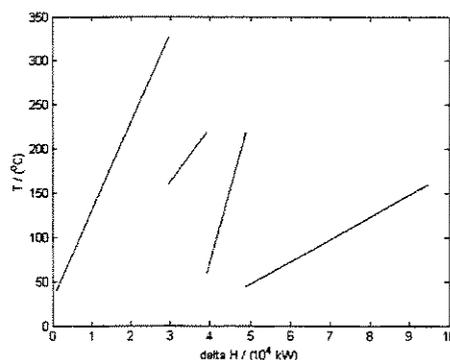
(a)



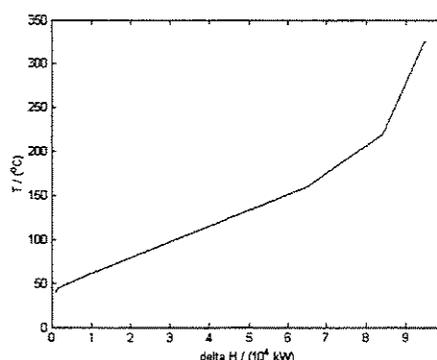
(b)

Figura 2.5 Curva Composta para as correntes frias

A Curva Composta para as correntes quentes é obtida de maneira análoga, como indicado na figura 2.6 (a) e 2.6 (b):



(a)



(b)

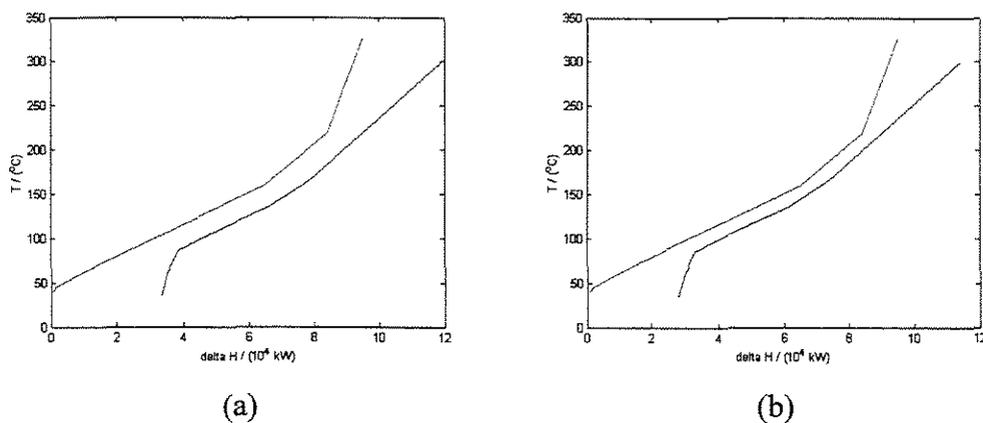
Figura 2.6 Curva Composta para as correntes quentes

Representando-se todas as correntes quentes e todas as correntes frias num gráfico $T \times \Delta H$ tem-se a Curva Composta para as correntes integradas com um ΔT_{min} de 25°C e de 15°C, conforme mostram as figuras 2.7 (a) e 2.7 (b), respectivamente.

A região onde a curva composta fria se estende além da curva composta quente indica o consumo mínimo de utilidade quente. Analogamente, na região onde a curva composta quente vai além da curva composta fria há necessidade do uso de utilidade fria.

Nos gráficos da figura 2.7 existe uma região em que a aproximação entre as curvas compostas quentes e frias é máxima e conseqüentemente a diferença de temperaturas entre correntes é mínima. Esse ponto é conhecido como ponto *Pinch* ou ponto de estrangulamento energético, que divide o processo em duas regiões termodinamicamente independentes. Acima do ponto *Pinch* o processo recebe calor das utilidades quentes, todas

as correntes quentes são supridas por correntes frias e nenhum calor é rejeitado para a região abaixo do ponto *Pinch*. Situação semelhante ocorre abaixo do ponto *Pinch*: o processo rejeita calor para as utilidades frias, todas as correntes frias são supridas por correntes quentes de modo a não haver a presença de utilidades fria.



(a) (b)
Figura 2.7 Curva Composta a 25°C e a 15°C

Notam-se nos gráficos da figura 2.7 que as curvas compostas quente e fria seguem quase que paralelas acima do *Pinch*, ou seja, a diferença de temperatura entre essas curvas nessa região é quase que a própria diferença de temperatura ΔT_{min} . Isto significa que as forças motrizes dos trocadores localizados nessa seção serão bastante reduzidas, dificultando a montagem da rede de trocadores de calor, como será discutido mais à frente.

Ainda analisando a Figura 2.7, vê-se que o consumo de utilidades, tanto quente como fria, aumenta com um aumento no ΔT_{min} , já que as curvas se distanciaram horizontalmente.

Na planta de aromáticos eram disponíveis as utilidades representadas na tabela 2.2 (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989).

Tabela 2.2 Utilidades disponíveis para a planta de aromáticos

utilidade	tipo	$T_{entrada}$ / (°C)	T_{saida} / (°C)
óleo	quente	330	230
água	fria	10	30

Quando são incluídas também as utilidades na Curva Composta, tem-se a Curva Composta Balanceada, representada nas figuras 2.8 (a) e 2.8 (b), para um ΔT_{min} de 25°C e de 15°C, respectivamente.

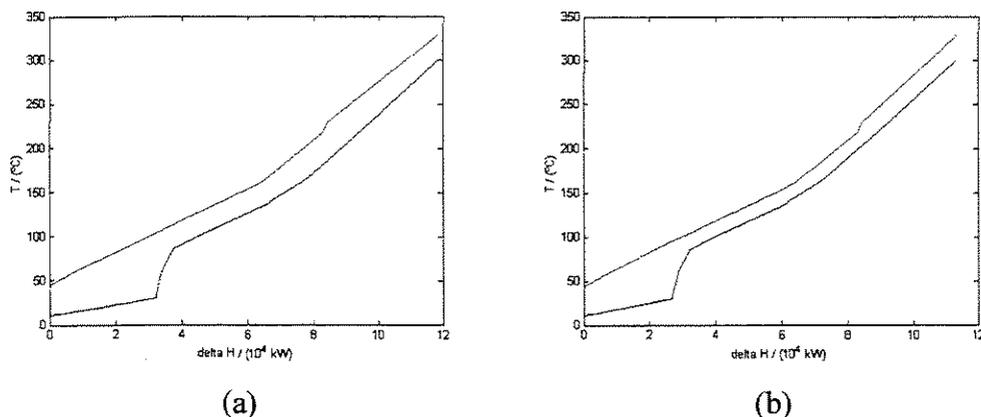


Figura 2.8 Curva Composta Balanceada a 25°C e a 15°C

2.3 Metas de consumo de energia através do algoritmo tabular

A Curva Composta, descrita na seção anterior, é utilizada para se determinar metas de consumo de energia e localização do ponto *Pinch* num processo. Entretanto, a construção da Curva Composta é baseada num método gráfico. O algoritmo tabular, desenvolvido por Linnhoff, dispensa a construção gráfica. Baseia-se nos seguintes passos:

1. Definir diferentes intervalos de temperatura, em função das temperaturas objetivo e disponível das correntes. Nas correntes quentes subtrair $\Delta T_{min}/2$ das temperaturas e nas correntes frias somar $\Delta T_{min}/2$ às temperaturas. Isso assegura a recuperação de todo o calor em cada um dos intervalos já que existem forças motrizes suficientes nos mesmos, conforme representado na Tabela 2.1.

2. Em cada um dos intervalos de temperatura, realizar o balanço de energia através de:

$$\Delta H_i = \left(\sum_{\text{correntes}_\text{frias}} CP_C - \sum_{\text{correntes}_\text{quentes}} CP_H \right) \Delta T_i \quad (2.1)$$

onde ΔH_i é a variação de entalpia do intervalo i e ΔT_i é a diferença de temperatura presente no intervalo, conforme representado na figura 2.9, utilizando como exemplo um ΔT_{min} de 15°C. Se as correntes frias predominarem sobre as quentes, o intervalo tem um déficit de

energia e conseqüentemente ΔH é positivo. Se as correntes quentes predominarem sobre as frias, o intervalo possui um excedente de energia e ΔH é negativo.

3. Depois que forem definidos os ΔH em cada um dos intervalos, transferir energia do nível mais alto até o nível mais baixo, como é indicado na figura 2.10 (a). Os níveis mais elevados possuem temperaturas mais altas do que os níveis mais baixos, dando condições para que essa transferência seja possível.

4. Depois que a energia for transferida, em determinado intervalo haverá um déficit máximo de energia que deverá ser suprido com utilidade quente. Adiciona-se então essa utilidade no último nível de temperaturas, como representado na figura 2.10 (b), e recomeça-se o processo de transferência.

Intervalo de temperatura	Correntes	delta T / (°C)	delta H / (kW)
319.5 °C	2	12	-1200
307.5 °C		95	19000
212.5 °C	6 9	35	-700
177.5 °C		6	240
171.5 °C		19	2090
152.5 °C	7	5	-650
147.5 °C		2	-660
145.5 °C		38	760
107.5 °C	1	15	-1200
92.5 °C		25	-10750
67.5 °C	8 5	15	-7350
52.5 °C		10	-4300
42.5 °C	3	5	-2500
37.5 °C		5	-500
32.5 °C			

Figura 2.9 Intervalos de temperatura e balanço energético com ΔT_{min} de 15°C

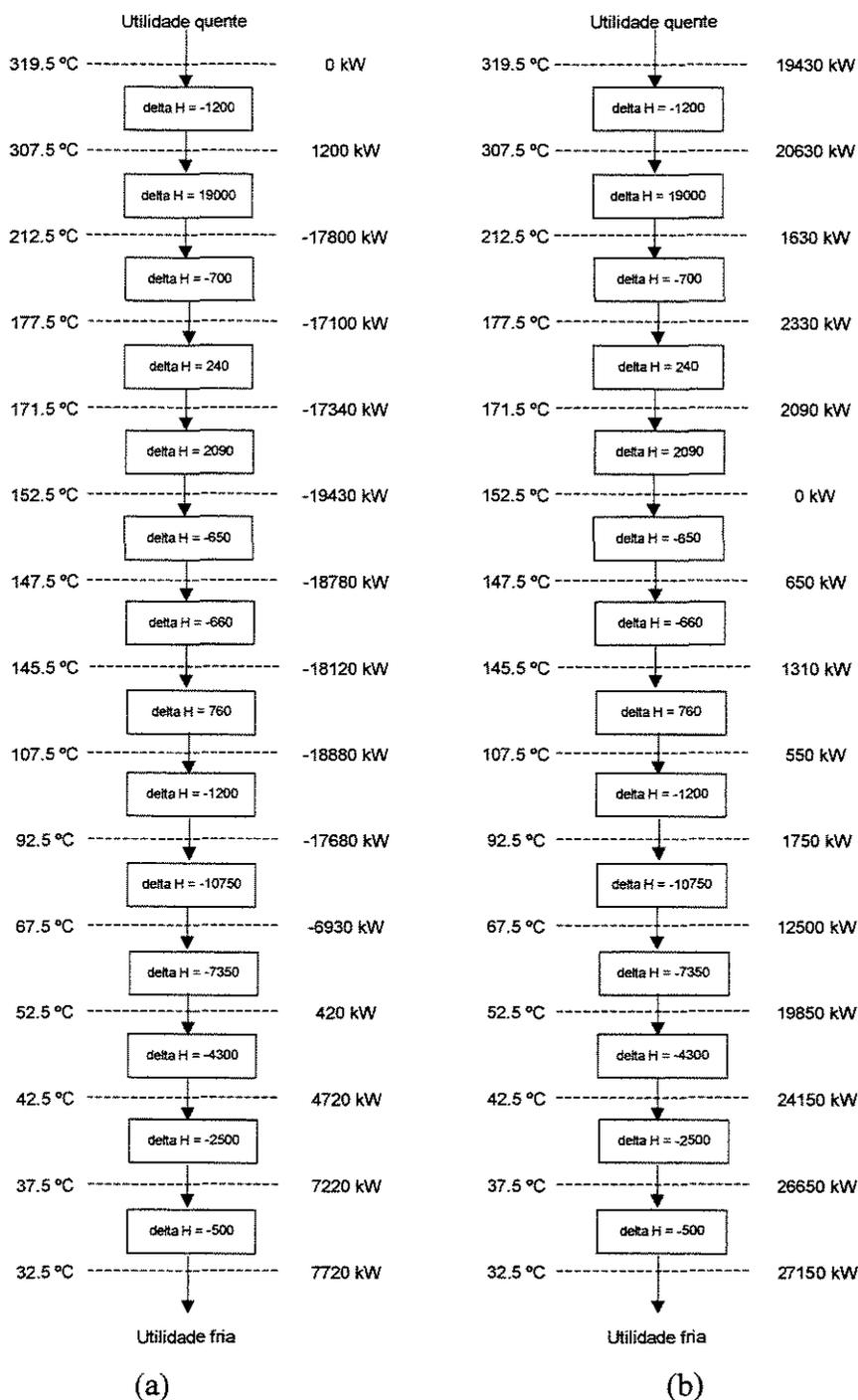


Figura 2.10 Transferência de energia com ΔT_{min} de 15°C

As curvas compostas são úteis por fornecerem uma compreensão conceitual do processo, mas o algoritmo tabular é uma ferramenta de cálculo mais adequada. Como indicado na figura 2.10, para um ΔT_{min} de 15°C, o consumo de utilidade quente e fria é de respectivamente 19430 kW e de 27150 kW. Aplicando-se o algoritmo tabular à planta de

aromáticos para um ΔT_{min} de 25°C tem-se como consumo mínimo de 24480 kW e de 32200 kW de utilidade quente e fria, respectivamente, como indicado na tabela 2.3.

Tabela 2.3 Metas de consumo de utilidades na planta de aromáticos em função do ΔT_{min}

$\Delta T_{min} / ^\circ\text{C}$	15	25
Q_C / kW	27150	32200
Q_H / kW	19430	24480

2.4 Regras para se atingir as metas de consumo de utilidades

A região acima do ponto *Pinch* é receptora de calor enquanto que a região abaixo do *Pinch* se apresenta como uma fonte de calor, não havendo transferência de calor entre essas duas zonas, como representado esquematicamente na figura 2.11.

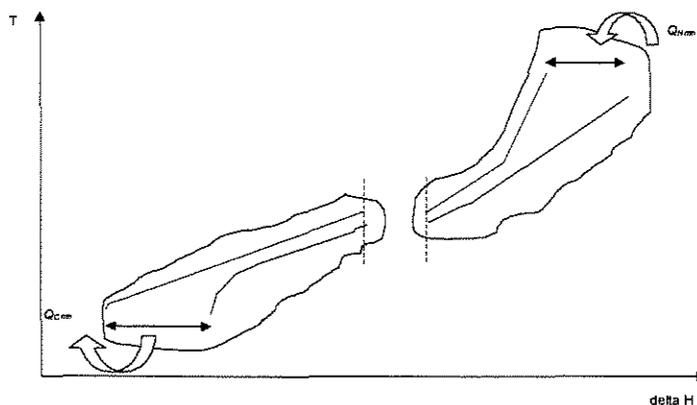


Figura 2.11 Curva Composta esquemática

Para se atingir as metas de consumo de energia dadas pelo Algoritmo Tabular, não se deve transferir calor através do *Pinch*, seja entre correntes de processo ou seja através do uso inadequado de utilidades.

A transferência de calor entre correntes quentes abaixo do *Pinch* e correntes frias acima do *Pinch* é claramente inviável em virtude de uma violação no ΔT_{min} . A transferência de calor entre correntes quentes acima do *Pinch* e correntes frias abaixo do *Pinch* pode ser realizada mas não é aconselhável. Supondo que isso ocorra e que essa quantidade de calor transferida através do *Pinch* seja Q_{extra} , haverá um déficit de energia nas correntes quentes acima do *Pinch* e esse déficit deverá ser suprido com utilidade

quente. Abaixo do *Pinch*, haverá um excedente de energia Q_{extra} que deverá ser rejeitado às utilidades frias, conforme representado na figura 2.12.

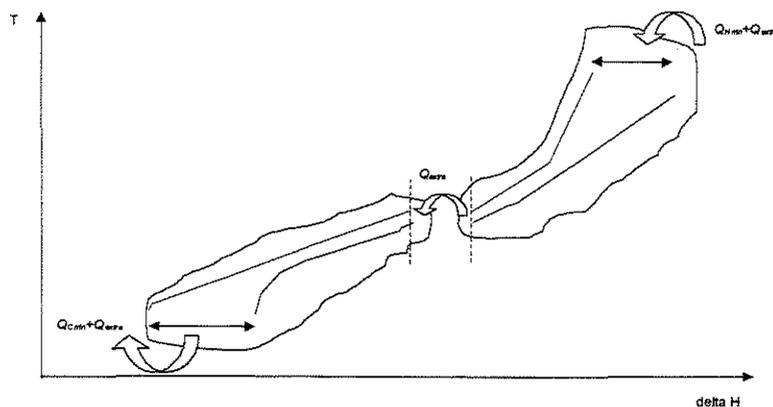


Figura 2.12 Transferência de calor através do *Pinch*

As metas de consumo de energia também não são atingidas se houver um uso inadequado das utilidades. Se uma determinada quantidade de calor Q_{extra} for rejeitada às utilidades frias acima do *Pinch* significa que nessa região haverá um déficit energético que deverá ser suprido pelas utilidades quentes, com um consumo total de $Q_{extra} + Q_{Hmin}$. Essa situação é representada na figura 2.13.

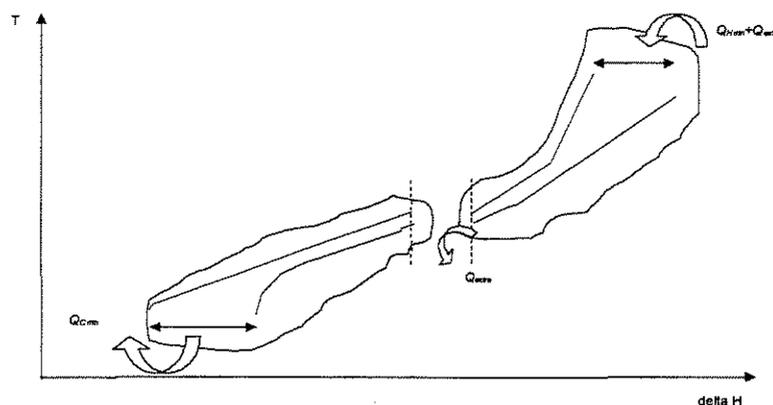


Figura 2.13 Uso de utilidade fria acima do *Pinch*

Ao se fornecer ao processo uma certa quantidade de utilidade quente Q_{extra} abaixo do *Pinch*, há um desequilíbrio energético de maneira que essa quantidade de calor precisa ser rejeitada às utilidades frias, conforme representado na figura 2.14.

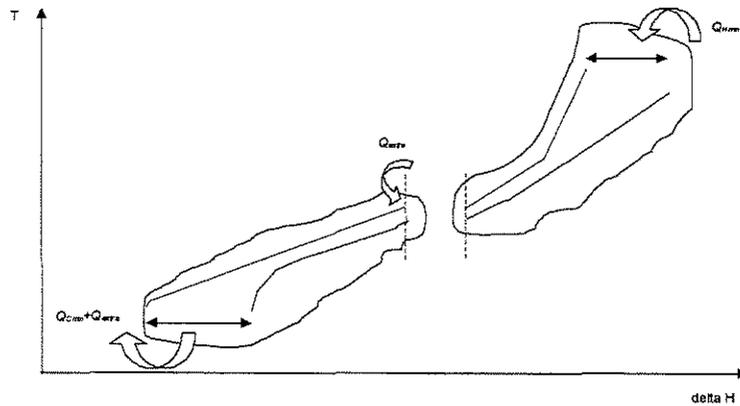


Figura 2.14 Uso de utilidade quente abaixo do Pinch

2.5 Diagrama de grade

A rede de trocadores de calor do fluxograma da figura 1.3 é convenientemente representada usando-se o diagrama de grade (Linnhoff e colaboradores, 1982), como na figura 2.15.

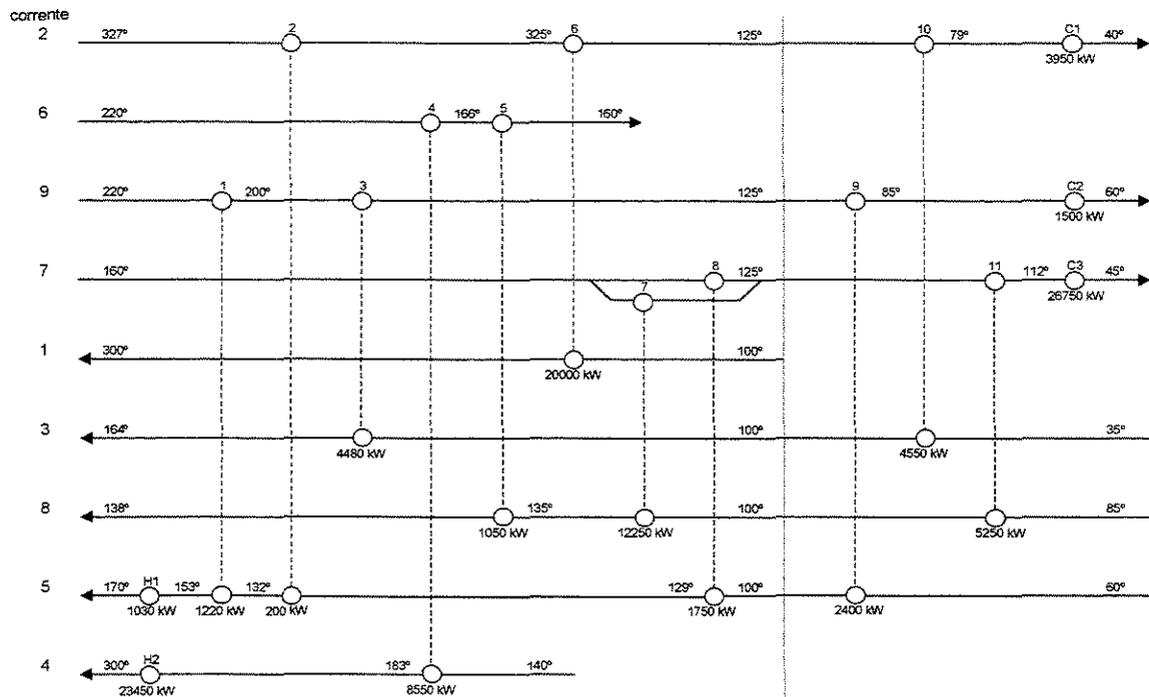


Figura 2.15 Representação de uma rede de trocadores através do diagrama de grade

As correntes quentes são indicadas por setas que vão da esquerda para a direita, e as correntes frias são indicadas por setas que vão da direita para a esquerda. A corrente 3, por exemplo, é uma corrente fria cuja seta que a representa inicia na direita com uma temperatura de 35°C e termina na esquerda com uma temperatura de 164°C. Os trocadores de calor entre correntes de processo são representados por ligações entre correntes quentes e fria, isto é, dois círculos que são conectados por uma linha vertical com a carga térmica do trocador indicada abaixo do círculo inferior. O trocador de calor 6, por exemplo, permite a troca de calor entre as correntes 1 e 2 e possui carga térmica de 20000 kW. Normalmente os aquecedores (trocadores de calor que utilizam utilidade quente), simbolizados por H, aparecem na esquerda das correntes frias e os resfriadores (trocadores de calor que utilizam utilidade fria), simbolizados por C, aparecem na direita das correntes quentes. As temperaturas são indicadas acima de cada seta que representa uma corrente. A grande vantagem da representação de uma rede de trocadores de calor na forma de diagrama de grade é que o ponto *Pinch*, quando existir, é facilmente identificado como uma reta tracejada vertical que divide o processo em duas regiões independentes: a região acima do *Pinch* e a região abaixo do *Pinch*. Na figura 2.15, o ponto *Pinch* está a 125°C para as correntes quentes e a 100°C para as correntes frias.

2.6 Metas para o número de unidades de trocadores de calor

A determinação de metas para o número de unidades de trocadores de calor são baseadas no teorema de redes de Euler e podem ser calculadas por (Linnhoff B. e Flower J. R., 1979):

$$N_u = N_s + N_l - N_p \quad (2.2)$$

onde:

N_u : número de unidades, incluindo aquecedores e resfriadores

N_s : número de correntes, incluindo as utilidades

N_l : número de laços

N_p : número de sistemas ou problemas independentes

O laço para uma rede de trocadores de calor é definido por trocadores que apresentam trocas térmicas entre as mesmas correntes de processo, ou seja, é qualquer caminho numa rede que começa num ponto e retorna ao mesmo ponto. Estes trocadores participantes do laço podem ser eliminados, diminuindo o número de unidades de troca. Esta eliminação, porém, pode levar a um aumento no consumo de utilidades ou a uma violação no ΔT_{min} .

Sistemas independentes ou problemas independentes são conjuntos de correntes que estão energeticamente em equilíbrio.

O número mínimo de trocadores de calor numa rede é atingido quando não existem laços e o número de problemas independentes dessa rede é igual a um. Em função dessas simplificações a equação 2.2 se torna:

$$N_u = N_s - 1 \quad (2.3)$$

Vê-se pela equação 2.3 que o número mínimo de unidades numa rede pode ser determinado simplesmente em função do número de correntes que fazem parte da rede. Se o processo apresentar um ponto *Pinch* a equação 2.3 deve ser aplicada a cada região independente do mesmo, conforme a equação 2.4.

$$N_u = (N_{S_{acima\ Pinch}} - 1) + (N_{S_{abaixo\ Pinch}} - 1) \quad (2.4)$$

Para a planta de aromáticos, com um ΔT_{min} de 25°C, o número mínimo de unidades, em função da equação 2.4, é de 15 trocadores de calor.

2.7 Metas de área da rede de trocadores

O estabelecimento de metas de área é feito a partir da Curva Composta Balanceada. Divide-se essa curva em intervalos de entalpia, como representado na figura 2.16, onde cada intervalo é delimitado por uma mudança na inclinação das curvas compostas quente e/ou fria. Em cada um dos intervalos considera-se que a transferência de calor é vertical, isto é, as correntes quentes de determinado intervalo somente trocam calor com as correntes frias do referido intervalo.

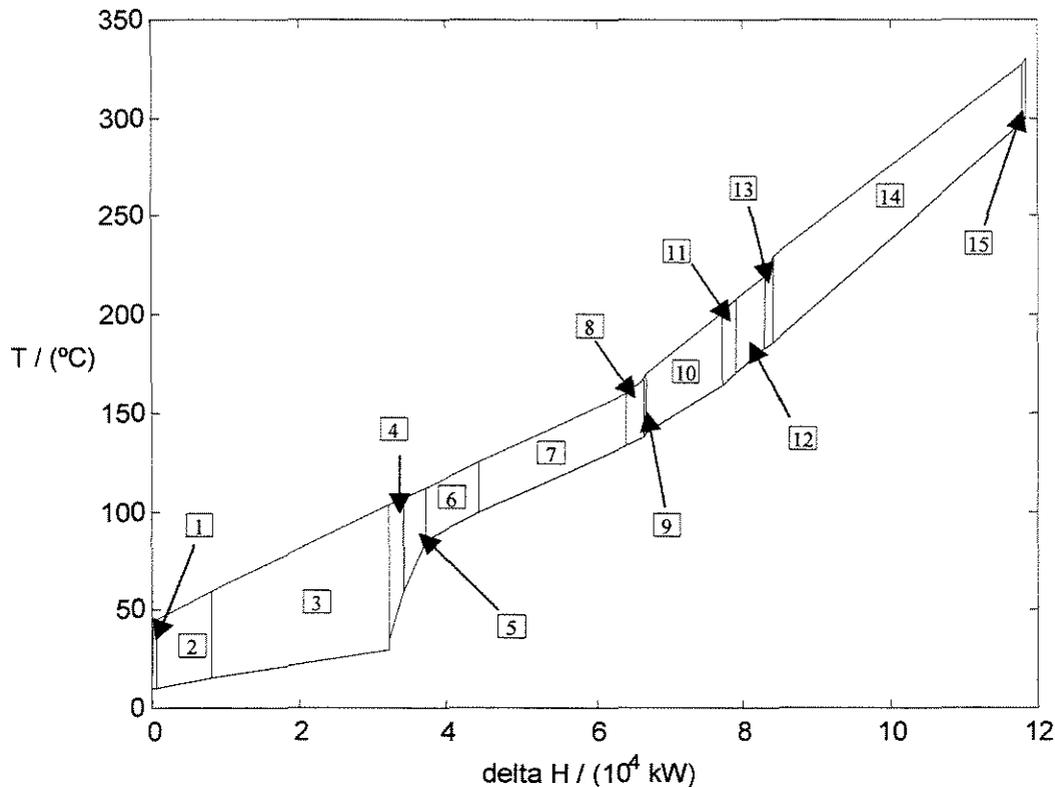


Figura 2.16 Curva Composta Balanceada dividida em intervalos de entalpia para o caso dos aromáticos para um ΔT_{min} de 25°C

Nesta tese, por simplificação, supõe-se que todos os trocadores de calor são contracorrente ou 1-1, como representado na figura 2.17. Em função disso, as equações de projeto desses trocadores são:

$$Q = UA\Delta T_{LM} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_q} + \frac{1}{h_f} \quad (2.6)$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (2.7)$$

onde:

Q : carga térmica do trocador

U : coeficiente global de transferência de calor

A : área de troca térmica

- ΔT_{LM} : média logarítmica de temperaturas
- h_q : coeficiente de película para as correntes quentes
- h_f : coeficiente de película para as correntes frias
- ΔT_1 : diferença de temperatura para o lado quente do trocador
- ΔT_2 : diferença de temperatura para o lado frio do trocador

É importante notar que a equação 2.6 é uma equação simplificada para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor. Nela não foram levados em conta a resistência condutiva dos tubos, a resistência devido à incrustação e supôs-se que o tubos eram delgados, ou seja, tinham igual diâmetro interno e externo. Entretanto, a metodologia para a estimativa de metas de área é perfeitamente aplicável mesmo se a equação 2.6 fosse mais rigorosa.

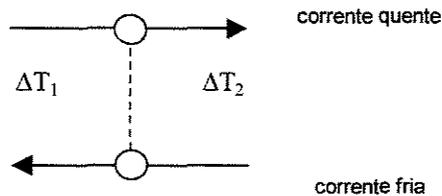


Figura 2.17 Diferenças de temperatura num trocador contracorrente

Os valores dos coeficientes de película das correntes de processo e das utilidades são dados na tabela 2.4 (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989). Supõe-se nesse trabalho que esses coeficientes sejam constantes e, conseqüentemente, os coeficientes globais de transferência também serão constantes.

Tabela 2.4 Coeficientes de película para as correntes da planta de aromáticos

corrente	$h / (\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
1	0,5
2	0,5
3	0,5
4	0,5
5	0,5
6	0,5
7	0,5
8	0,5
9	0,5
óleo	1,0
água	2,5

A predição da área de uma rede de trocadores de calor é feita através da equação 2.8, como proposto por Linnhoff e colaboradores (1982).

$$A_{rede} = \sum_k^K \frac{1}{\Delta T_{LM,k}} \left(\sum_i^I \frac{q_i}{h_i} + \sum_j^J \frac{q_j}{h_j} \right) \quad (2.8)$$

onde:

- q_i : carga térmica da corrente quente i no intervalo de entalpia k
- q_j : carga térmica da corrente fria j no intervalo de entalpia k
- h_i, h_j : coeficientes de película para a corrente quente i e a corrente fria j
- I : número total de correntes quentes no intervalo de entalpia k
- J : número total de correntes frias no intervalo de entalpia k
- K : número total de intervalos de entalpia

O cálculo da área em cada um dos 15 intervalos de entalpia representados na figura 2.16, através da equação 2.8, é mostrado na tabela 2.5 e resulta numa área total de troca térmica de 11657 m².

Tabela 2.5 Estimativa de área para a rede de trocadores da figura 1.3

Intervalo	Q_k / kW	$\Delta T_{LM,k} / ^\circ\text{C}$	A_k / m^2
1	2200	29,7	74,1
2	110040	36,2	3038,9
3	4000	40,5	98,7
4	15280	37,7	405,7
5	8640	37,7	229,3
6	41280	33,0	1250,3
7	1840	29,3	62,7
8	9760	27,9	350,1
9	78400	25,6	3062,7
10	28800	26,1	1105,3
11	13000	35,9	362,2
12	7000	56,6	123,7
13	58080	57,9	1001,6
14	18000	39,6	454,1
15	1200	32,2	37,2

2.8 Metas de custos totais da rede de trocadores de calor

O custo total de uma rede de trocadores de calor é composto dos custos de capital, ou seja, dos custos com a compra e instalação de trocadores e é composto também do custo de energia (utilidades) necessária na rede.

Para a planta de aromáticos, usada como um dos exemplos nesse trabalho, o custo das utilidades é representado na tabela 2.6 (Ahmad S. e Linhoff B., 1989). Para a integração das correntes num único grupo e com um ΔT_{min} de 25°C , o consumo de utilidade quente é de 24480 kW e o de utilidade fria é de 32200 kW, conforme já discutido anteriormente. Esse consumo energético resulta num custo de \$1939000.

Tabela 2.6 Custo das utilidades da planta de aromáticos

Utilidade	Custo / ($\$. \text{kW}^{-1} . \text{ano}^{-1}$)
quente	70
fria	7

Com o valor de área estimado no item 2.7, é possível obter metas de custos de capital para a integração energética, isto é, metas de custo dos trocadores de calor. Para isso, supõe-se que o custo de um único trocador de calor, em função de sua área A , pode ser determinado por uma equação do tipo:

$$\text{custo de capital} = a + bA^c \quad (2.9)$$

onde a , b e c são parâmetros que variam em função do material de construção do trocador, em função da faixa de pressão em que o trocador opera e em função do tipo de trocador a ser utilizado.

Entretanto, as metas de área estipuladas anteriormente valem para toda a rede de trocadores. É preciso que essa área total seja distribuída para cada trocador de calor. Uma das maneiras de se fazer essa distribuição é supor que os trocadores têm área igual (Smith R., 1995) e estimar o custo total da rede através da equação 2.10.

$$\text{custo da rede} = N_u \left(a + b \left(A_{rede} / N_u \right)^c \right) \quad (2.10)$$

Os parâmetros a , b e c utilizados nesse trabalho são dados na tabela 2.7 (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989). Supõe-se que eles são válidos para todos os trocadores da planta de aromáticos.

Tabela 2.7 Parâmetros de custo dos trocadores da planta de aromáticos

parâmetro	valor
a	1
b	700
c	0,83

As metas de custo da rede de trocadores da planta de aromáticos, para um ΔT_{min} de 25°C, calculada pela equação 2.10, fica em \$836000, levando em conta um fator de anualização de 3,15 (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989).

As metas de custo total são dadas então pela soma do custo com energia mais a soma dos custos de capital, resultando num valor de \$2775000, conforme indicado na tabela 2.8. Essas metas são relativas a um custo anual, assim como todas as metas de custo para a planta de aromáticos apresentadas nessa tese.

Tabela 2.8 Metas de custo total, por ano, para a planta de aromáticos com as correntes integradas num único grupo e com um ΔT_{min} de 25°C

Metas de custo de energia / (10 ⁶ \$)	Metas de custo de capital / (10 ⁶ \$)	Metas de custo total / (10 ⁶ \$)
1,939	0,836	2,775

2.9 Síntese da rede

A síntese da rede de trocadores de calor, com a máxima recuperação de energia, é obtida através do *Pinch Design Method* (Linnhoff B. e Hindmarsh, 1983). Este método reconhece inicialmente o ponto de estrangulamento energético, já determinado pelo Algoritmo Tabular e a partir dele o problema é dividido em duas regiões: uma acima do *Pinch* e outra abaixo do *Pinch*.

Para cada uma destas regiões a síntese da rede é realizada iniciando-se pelo *Pinch* e caminhando no sentido contrário a ele. Para a escolha das correntes que vão trocar calor três regras simples são propostas:

- a primeira delas diz respeito ao número de correntes que passam pelo *Pinch*. O número de correntes que saem do *Pinch* tem que ser sempre maior ou igual ao número de correntes que chegam ao *Pinch*;
- a segunda regra diz respeito à relação entre as capacidades térmicas (*CP*) das correntes, ou seja, as capacidades térmicas das correntes que saem do *Pinch* têm que ser sempre maior ou igual a daquelas que chegam;
- a terceira regra diz que a diferença entre o somatório das capacidades térmicas das correntes que deixam o *Pinch* e entre o somatório das capacidades térmicas das correntes que chegam ao *Pinch*, não podem ser menor que o somatório da diferença entre as capacidades térmicas das correntes que trocam calor no *Pinch*.

Caso algumas dessas três regras for violada, há a necessidade de se dividir correntes para que não haja violação do ΔT_{min} estabelecido.

Tendo sido realizados todos os cruzamentos possíveis, as duas subredes sintetizadas, acima e abaixo do *Pinch*, são acopladas formando uma única rede, com a garantia da obtenção da máxima recuperação de energia. Esta rede deve, posteriormente, sofrer alguns refinamentos para a minimização do seu custo global, visto que pode-se obter um número de trocadores acima do necessário.

Em função de todas essas regras obteve-se, para a planta de aromáticos, com as correntes integradas num só grupo e para um ΔT_{min} de 25°C, a rede apresentada anteriormente na figura 2.15.

O cálculo da área dos trocadores de calor representados na figura 2.15 é realizado em função das equações de projeto 2.5, 2.6 e 2.7 e indicado na tabela 2.9.

Tabela 2.9 Cálculo da área dos trocadores de calor representados na figura 2.15

Trocador	Tipo	$Q / (\text{kW})$	$\Delta T_{LM} / (^\circ\text{C})$	$U / (\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$A / (\text{m}^2)$
H1	aquecedor	1030	114	0,333	27
H2	aquecedor	23450	38	0,333	1853
C1	resfriador	3950	39	0,417	243
C2	resfriador	1500	52	0,417	69
C3	resfriador	26750	55	0,417	1164
1	processo	1220	67	0,250	73
2	processo	200	195	0,250	4
3	processo	4480	30	0,250	597
4	processo	8550	32	0,250	1083
5	processo	1050	27	0,250	157
6	processo	20000	25	0,250	3200
7	processo	12250	25	0,250	1960
8	processo	1750	28	0,250	252
9	processo	2400	25	0,250	384
10	processo	4550	34	0,250	538
11	processo	5250	26	0,250	811
total					12415

2.10 Conclusões

Os procedimentos e regras da tecnologia *Pinch* foram aplicados a uma planta de aromáticos, considerando-se um ΔT_{min} de 25°C. Na tabela 2.10 são comparadas as metas estipuladas com o número de unidades, consumo energético, área e custo total da rede de trocadores representada na figura 2.15. Pode ser observado que a rede sintetizada a partir de regras da Tecnologia *Pinch* proporciona um consumo energético mínimo e que as metas de custo estipuladas tiveram um erro menor do que 1% em relação à rede proposta.

A metodologia estabelecida por Linnhoff e colaboradores determina, de forma sistemática: metas de consumo de energia, de área e de custos totais para um processo antes que o projeto da rede de trocadores de calor tenha sido realizado. Além disso, na Tecnologia *Pinch* também foram desenvolvidas regras para a síntese de redes cujo consumo energético, área e custos têm um erro pequeno em relação às metas estipuladas.

Tabela 2.10 Comparação entre as metas previstas para a planta de aromáticos e a rede sintetizada a partir de regras da Tecnologia *Pinch*, para um ΔT_{min} de 25°C

	Metas	Rede de trocadores da figura 2.15
número de trocadores	15	16
carga térmica quente / (kW)	24480	24480
carga térmica fria / (kW)	32200	32200
área / (m ²)	11657	12415
custo total / (10 ⁶ \$)	2,775	2,764

Capítulo 3 - Técnicas de decomposição

3.1 Introdução

No capítulo 1 deste trabalho, foi sugerida uma rede de trocadores de calor alternativa, indicada na figura 1.4, para uma planta de produtos aromáticos em que as correntes foram associadas no máximo duas a duas, conforme se vê na tabela 1.4. Essa rede de trocadores apresentava vantagens operacionais em relação à rede representada na figura 1.3, na qual as correntes foram integradas num único grupo, e, além disso, também era energeticamente eficiente frente a essa última, como mostrado na tabela 1.5.

Uma das maneiras de se chegar a uma rede mais simples de trocadores de calor, com as correntes decompostas em subgrupos independentes, foi sugerida por G. T. Polley e P. J. Heggs (1999). Essa metodologia baseia-se nos passos descritos a seguir e representados na figura 3.1, para o processo dos aromáticos, com um ΔT_{min} de 25°C.

1) Ordenar as correntes seqüencialmente. Para a planta dos aromáticos, seja, por exemplo, a seqüência de correntes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, nessa ordem;

2) Determinar metas de custo para as correntes integradas num único grupo e usar esse valor como referência;

3) Dividir as correntes em dois subgrupos. No exemplo dos aromáticos, a corrente 1 ficaria no primeiro subgrupo e as correntes de 2 a 9 ficariam no segundo subgrupo.

4) Determinar metas de custo para cada um dos subgrupos obtidos, somar esses valores e comparar a soma com o valor de referência.

5) Modificar as correntes que fazem parte de cada subgrupo respeitando a seqüência estipulada no passo 1. Numa segunda divisão, por exemplo, no subgrupo 1 fariam parte as correntes 1 e 2 e no subgrupo 2 fariam parte as correntes 3 a 9.

6) Repetir os passos 4 e 5 até que todas as possibilidades tenham sido examinadas.

Seqüência inicial		
Correntes	Metas de custo / (10 ⁶ \$)	
1,2,3,4,5,6,7,8 e 9	2,775	

Primeira divisão		
Subgrupo	Correntes	Metas de custo / (10 ⁶ \$)
1	1	1,462
2	2,3,4,5,6,7,8 e 9	1,634
total		3,096

Segunda divisão		
Subgrupo	Correntes	Metas de custo / (10 ⁶ \$)
1	1 e 2	0,271
2	3,4,5,6,7,8 e 9	2,522
total		2,793

Terceira divisão		
Subgrupo	Correntes	Metas de custo / (10 ⁶ \$)
1	1,2 e 3	0,545
2	4,5,6,7,8 e 9	2,314
total		2,859

⋮

Oitava divisão		
Subgrupo	Correntes	Metas de custo / (10 ⁶ \$)
1	1,2,3,4,5,6,7 e 8	3,032
2	9	0,086
total		3,118

Figura 3.1 Representação da metodologia proposta por Polley G. T. e Heggs P. J. aplicada à planta de aromáticos para um ΔT_{min} de 25°C

Deve-se notar que a ordem em que as correntes são colocadas no passo 1 é muito importante no resultado final da análise. O fato de colocá-las numa seqüência adequada pode trazer benefícios em termos de custos de bombeamento, operacionalidade e simplicidade da planta (Polley G. T. e Heggs P. J., 1999). Nessa abordagem, é imprescindível a experiência do projetista ao reconhecer áreas de integridade e, em função disso, ordenar as correntes de uma maneira lógica no passo 1.

A idéia desse capítulo é apresentar uma nova técnica de decomposição das correntes em subgrupos, alternativa ao trabalho proposto por Polley G. T. e Hegggs P. J., e que se baseia num enfoque matemático do problema.

3.2 Sugestão de uma nova técnica de decomposição

Deseja-se decompor as correntes de um processo em diferentes subgrupos de modo que os mesmos sejam operacionalmente simples e eficientes do ponto de vista energético. Uma das maneiras de tornar esses subgrupos simples é limitar o número máximo de correntes em cada um deles. O fluxograma representado na figura 1.4 é um exemplo típico desse fato.

Na planta de produtos aromáticos, por exemplo, se o número máximo de correntes por subgrupo fosse 3, poderiam existir as configurações representadas na tabela 3.1, entre muitas outras possíveis.

Tabela 3.1 Diferentes configurações de subgrupos para um número máximo de três correntes em cada um deles

Configuração 1		Configuração 2		Configuração 3	
Subgrupo	Correntes	Subgrupo	Correntes	Subgrupo	Correntes
1	1, 2 e 3	1	1, 2 e 3	1	1 e 2
2	4, 5 e 6	2	6 e 8	2	4 e 7
3	7, 8 e 9	3	4 e 7	3	5 e 9
		4	5 e 9	4	6
				5	3
				6	8

As configurações representadas na tabela anterior provavelmente darão origem a redes de trocadores simples, já que o número de correntes em cada um dos subgrupos é relativamente pequeno. Entretanto, é improvável que todas elas sejam energeticamente eficientes em relação às correntes integradas num único grupo.

A questão é: se na planta de aromáticos, para um ΔT_{min} fixo, o número máximo de correntes por subgrupo for 3, por exemplo, qual configuração de correntes leva a um mínimo consumo energético? E a uma área de troca térmica mínima? E a um mínimo custo?

O problema se resume a minimizar uma função objetivo, seja o custo ou o consumo energético ou a área de uma rede de trocadores, que são funções da configuração da rede e do ΔT_{min} , suposto fixo num primeiro momento. Uma das características dessa função objetivo é ela ser discreta, já que depende da configuração da rede.

O número de configurações possíveis, em função do número máximo de correntes por subgrupo, é muito grande, pois trata-se de um problema combinatorial. Na planta de aromáticos, se o número máximo de correntes por subgrupo fosse 3, o número de configurações possíveis seria 50857, como indicado na tabela 3.2. Nessa tabela, a estrutura 8, por exemplo, corresponde a 2 subgrupos com 1 corrente, 2 subgrupos com 2 correntes e 1 subgrupo com 3 correntes. O número de combinações de n correntes em subgrupos de k elementos é dado por:

$$C_{n,k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (3.1)$$

Quando o cálculo da função objetivo é complexo, como é o caso da determinação de metas de energia, área e custo, conforme discutido no capítulo 2, a avaliação dessa função em todas as configurações possíveis é inviável.

Uma das ferramentas mais apropriadas para resolver esse tipo de problema de otimização é o *Simulated Annealing*, discutido na próxima seção.

Tabela 3.2 Número de configurações possíveis para um número máximo de 3 correntes por subgrupo

Estrutura	Número de subgrupos	Número de correntes por subgrupo	Combinações	Configurações possíveis
1	9	1	$C_{9,9}$	1
2	7	1	$C_{9,2}$	36
	1	2		
3	6	1	$C_{9,3}$	84
	1	3		
4	5	1	$C_{9,2}.C_{7,2}$	756
	2	2		
5	4	1	$C_{9,3}.C_{6,2}$	1260
	1	2		
	1	3		
6	3	1	$C_{9,2}.C_{7,2}.C_{5,2}$	7560
	3	2		
7	3	1	$C_{9,3}.C_{6,3}$	1680
	2	3		
8	2	1	$C_{9,3}.C_{6,2}.C_{4,2}$	7560
	2	2		
	1	3		
9	1	1	$C_{9,2}.C_{7,2}.C_{5,2}.C_{3,2}$	22680
	4	2		
10	3	2	$C_{9,3}.C_{6,2}.C_{4,2}$	7560
	1	3		
11	3	3	$C_{9,3}.C_{6,3}$	1680
Total				50857

3.3 Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* é uma técnica de otimização aplicável a funções discretas ou a funções contínuas, normalmente onde um mínimo global está entre muitos mínimos locais.

O método é baseado numa analogia com a Termodinâmica, na maneira em que metais em fase líquida são resfriados e se solidificam. A temperaturas elevadas, os átomos desse metal podem se mover livremente uns em relação aos outros. Conforme o metal vai sendo resfriado, essa mobilidade vai diminuindo. Se o resfriamento é lento, os átomos do metal podem se organizar e formar cristais regulares; esse cristais correspondem a um estado de mínima energia do sistema. Se o resfriamento é realizado de maneira rápida, os

átomos do metal não têm tempo de se organizarem e a estrutura final é amorfa, não correspondendo a um estado de mínima energia. Esse processo é conhecido como recozimento ou *annealing*.

Alguns métodos de otimização, como o gradiente conjugado e o *steepest descent*, procuram buscar rapidamente um mínimo e, muitas vezes, acabam determinando somente um mínimo local. Por analogia, isso corresponde a resfriar um metal em fase líquida muito rápido e atingir um estado de energia que não representa o mínimo global.

O *Simulated Annealing*, ao contrário das técnicas de otimização citadas anteriormente, dá tempo para que o sistema se reconfigure e, teoricamente, atinja um mínimo global. Em algumas dessas reconfigurações, admite-se que o sistema possa assumir um estado energético mais elevado do que o anterior. Isso significa que, algumas vezes, na busca de um mínimo global, é aceito um aumento no valor da função objetivo para que se possa sair de um mínimo local. O fato de se aceitar ou não uma reconfiguração baseia-se na lei de distribuição de probabilidade de Boltzmann, que determina a probabilidade de existência de um estado energético E numa dada temperatura T , conforme indicado na equação 3.2.

$$p(E) \sim e^{\frac{-E}{kT}} \quad (3.2)$$

A probabilidade de reconfiguração de um sistema num estado energético E_1 para um estado energético E_2 , em função da equação de Boltzmann, é dada por:

$$p = e^{\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}} \quad (3.3)$$

Nota-se que quando o sistema passa de um nível energético mais alto E_1 para um mais baixo E_2 , isto é, $E_2 < E_1$, a probabilidade p , calculada pela equação 3.3, é maior do que um. Admite-se então que $p=1$, ou seja, o sistema sempre aceita esse tipo de reconfiguração.

A implementação de um algoritmo para se determinar uma configuração de correntes que minimize uma função objetivo (consumo energético, área ou custo), baseado em todas as idéias discutidas nessa seção, é feita a partir dos seguintes passos:

1) Determinar possíveis configurações do sistema. Na técnica de decomposição de correntes sugerida nessa tese, a configuração de um sistema é dada pelo número de subgrupos do processo, pelas correntes que fazem parte de cada um dos subgrupos e pelo número máximo N_{max} de correntes por subgrupo. Algumas configurações das correntes da planta de aromáticos são indicadas na tabela 3.1, para $N_{max}=3$.

2) Determinar operações que permitam que o sistema se reconfigure. São admitidos dois tipos de rearranjos:

Permutação: ocorre quando duas correntes, cada uma de um subgrupo diferente, são permutadas, como indicado na tabela 3.3, por exemplo. Não há a criação e nem o desaparecimento de subgrupos.

Tabela 3.3 Permutação: (a) configuração inicial e (b) configuração com as correntes 5 e 7 permutadas

Subgrupo	Correntes		
1	1	4	
2	3	7	
3	2	9	
4	5	6	8

(a)

Subgrupo	Correntes		
1	1	4	
2	3	5	
3	2	9	
4	7	6	8

(b)

Transferência: ocorre quando uma corrente de determinado subgrupo é transferida a um outro subgrupo já existente, como indicado na tabela 3.4, ou essa corrente é transferida para criar um novo subgrupo, como mostrado na tabela 3.5. Algumas vezes a transferência provoca o desaparecimento de um subgrupo, como se veria se as tabelas 3.5 (a) e 3.5 (b) estivessem em ordem invertida.

Tabela 3.4 Transferência: (a) configuração inicial e (b) configuração depois da corrente 9 ser transferida para um subgrupo existente

Subgrupo	Correntes		
1	1	4	
2	3	7	
3	2	9	
4	5	6	8

(a)

Subgrupo	Correntes		
1	1	4	9
2	3	7	
3	2		
4	5	6	8

(b)

Tabela 3.5 Transferência: (a) configuração inicial e (b) configuração depois da corrente 9 ser transferida e criar um novo subgrupo

Subgrupo	Correntes			
1	1	4		
2	3	7		
3	2	9		
4	5	6	8	

(a)

Subgrupo	Correntes			
1	1	4		
2	3	7		
3	2			
4	5	6	8	
5	9			

(b)

3) Definir uma função objetivo E , análoga ao estado energético, que se deseja minimizar. Como discutido anteriormente, a função objetivo a ser minimizada pode ser ou o consumo energético, ou a área de troca térmica ou o custo total de uma rede de trocadores de calor. Independentemente de qual deles será minimizado, a função objetivo pode ser expressa como:

$$E = f(\text{configuração}, \Delta T_{\min}) \quad (3.4)$$

A grande flexibilidade do *Simulated Annealing* encontra-se nessa etapa: é possível colocar diretamente na função objetivo penalidades devido a determinadas associações de correntes. Isso será discutido mais à frente nesse trabalho.

4) Definir um parâmetro de controle T , análogo à temperatura num sistema, e estipular a maneira pela qual esse parâmetro passa de valores mais altos para valores mais baixos. Em outras palavras, é necessário definir uma pseudo temperatura inicial e como será feito o "resfriamento" do sistema. A estratégia que se sugere nesse passo, para se determinar a pseudo temperatura inicial, é partir de uma configuração aleatória do sistema, e permitir que o mesmo sofra dez rearranjos, também aleatórios, definidos no passo 2. Foi tomada como exemplo a configuração inicial representada na tabela 3.6, com $N_{max}=3$ e um ΔT_{\min} de 25°C.

Tabela 3.6 Distribuição aleatória inicial de correntes para $N_{max}=3$ e ΔT_{min} de 25°C e avaliação das metas de custo

Subgrupo	Correntes		
1	3		
2	5	7	9
3	2	6	
4	1	4	8
Metas de custo / (10^6 \$)	6,598		

Em função dessa distribuição inicial foram feitas dez reconfigurações aleatórias, como indicado na tabela 3.7. Em cada uma delas foram avaliadas as metas de custo, função objetivo desse exemplo.

Para cada uma das reconfigurações feitas, calcula-se a variação ΔE , em módulo, que ocorreu na função objetivo, determina-se a média de todos esses valores e supõe-se que a temperatura inicial é igual a 5 vezes o valor dessa média. Esse cálculo é indicado na tabela 3.7, em função das reconfigurações mostradas na figura 3.2. A pseudo temperatura inicial nesse caso seria igual a $4 \cdot 10^6$, um valor considerável em relação à ordem de grandeza da função objetivo, como se pode ver pelas metas de custo indicadas na figura 3.2. Esse valor sugere que no início do *Simulated Annealing* praticamente todas as reconfigurações seriam aceitas.

Tabela 3.7 Variações no valor da função objetivo frente a reconfigurações no sistema

Reconfiguração	$ \Delta E / (10^6)$
1	0,698
2	0,003
3	0,486
4	1,142
5	0,611
6	0,479
7	2,006
8	0,922
9	1,633
10	0,020
Média	0,800

Subgrupo	Correntes		
1	3		
2	5	7	9
3	2	6	
4	1	4	8
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	6,598		

Transferência ⇒

Subgrupo	Correntes		
1	2	3	7
2	5	9	
3	6		
4	1	4	8
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	5,903		

Transferência ⇒

Subgrupo	Correntes		
1	2	3	7
2	5		
3	1	6	
4	4	8	9
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	5,247		

Permutação ⇒

Subgrupo	Correntes		
1	1	3	7
2	5		
3	2	6	9
4	4	8	
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	6,337		

Permutação ⇒

Subgrupo	Correntes		
1	3	7	8
2	5		
3	1	2	9
4	4	6	
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	3,409		

Transferência ⇒

Subgrupo	Correntes		
1	2	3	7
2	5		
3	6	9	
4	1	4	8
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	6,389		

Permutação ⇒

Subgrupo	Correntes		
1	1	3	7
2	5		
3	2	6	
4	4	8	9
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	5,858		

Transferência ⇒

Subgrupo	Correntes		
1	1	3	7
2	5		
3	2	8	9
4	4	6	
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	4,331		

Permutação ⇒

Subgrupo	Correntes		
1	3	8	
2	5		
3	1	2	9
4	4	6	7
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	5,042		

Transferência ⇒

Subgrupo	Correntes		
1	3	8	
2	5		
3	1	2	
4	4	6	7
5	9		
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	5,062		

Figura 3.2 Rearranjos aleatórios, com $N_{max}=3$ e ΔT_{min} de 25°C

A estratégia adotada para o "resfriamento" do sistema foi manter determinada temperatura T e permitir que o sistema se reconfigurasse aleatoriamente até que houvesse $100N$ reconfigurações sem sucesso ou $10N$ reconfigurações com sucesso, sendo N o número de correntes envolvidas no problema, sem levar em conta as utilidades. Quando se atingia o número de reconfigurações com ou sem êxito estipulado, a temperatura era reduzida em 5% e os rearranjos recomeçavam; isso se repetia para 200 diferentes temperaturas ou até que não houvesse mais sucesso em absolutamente nenhuma das reconfigurações. O algoritmo era então finalizado. A implementação do método sugerido nesse trabalho foi feita em Fortran.

3.4 Exemplo: otimização das metas de custo da planta de aromáticos através do *Simulated Annealing*

Para exemplificar a metodologia descrita na seção anterior, foram minimizadas as metas de custo da planta de aromáticos através do *Simulated Annealing*, limitando-se o número máximo de correntes a 3 por subgrupo e supondo-se um ΔT_{min} de 25°C. Na figura 3.3 são representados os valores da função objetivo (custo, nesse exemplo) em relação a cada iteração, onde cada uma delas corresponde a um abaixamento na pseudo temperatura.

Para o mesmo exemplo, é mostrado o abaixamento da pseudo temperatura em 5% em cada iteração na figura 3.4.

Na figura 3.3, pode-se observar que são aceitas reconfigurações que levam a um aumento significativo na função objetivo aproximadamente até a sexagésima iteração. Isso se deve ao fato de que até esse ponto a pseudo temperatura é bastante elevada e portanto a probabilidade de se aceitar aumentos na função objetivo também é grande. Pode-se ver que a função objetivo passa por vários mínimos locais e em seguida os deixa. Isso é vantajoso pois permite que se escape desses mínimos locais. A partir da sexagésima iteração, a pseudo temperatura já está bem mais baixa: conseqüentemente, nesse ponto, a probabilidade de reconfiguração que leve a um aumento na função objetivo é bem menor e isso é um indício de que o sistema provavelmente deve estar próximo a um mínimo global. Perto da nonagésima iteração, a pseudo temperatura está num valor muito baixo, fazendo com que praticamente nenhuma reconfiguração tenha êxito: teoricamente foi alcançado um mínimo global.

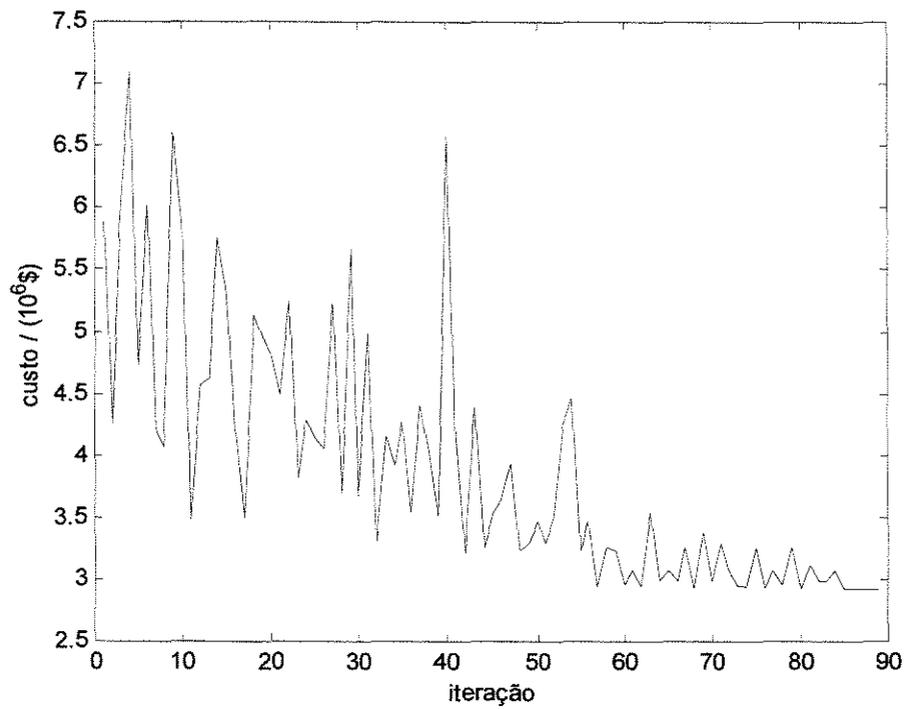


Figura 3.3 *Simulated Annealing* aplicado à planta de aromáticos, com $N_{max}=3$ e um ΔT_{min} de 25°C, para otimização das metas de custo

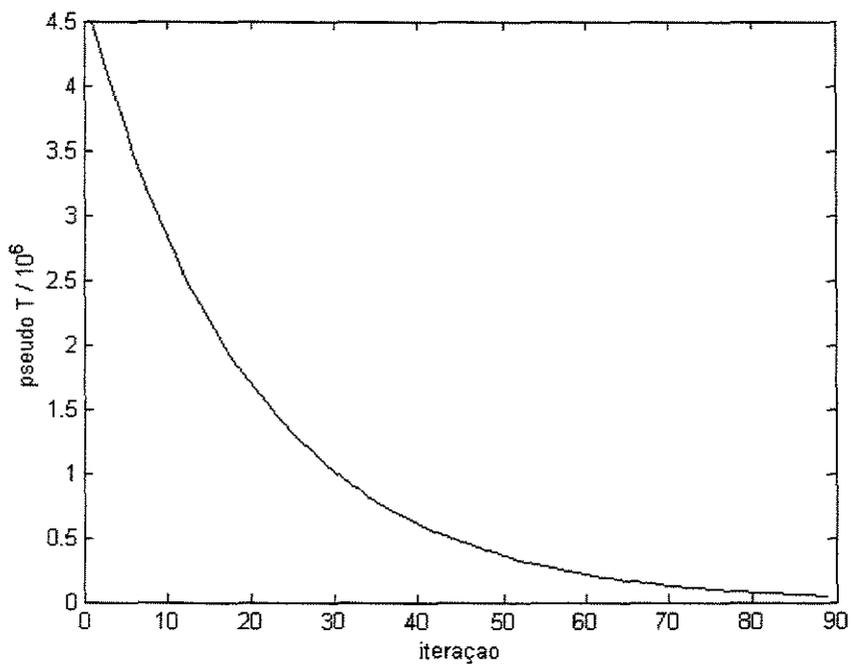


Figura 3.4 Abaixamento da pseudo temperatura

Nas figuras 3.5 (a) e (b) são indicadas mais duas simulações:

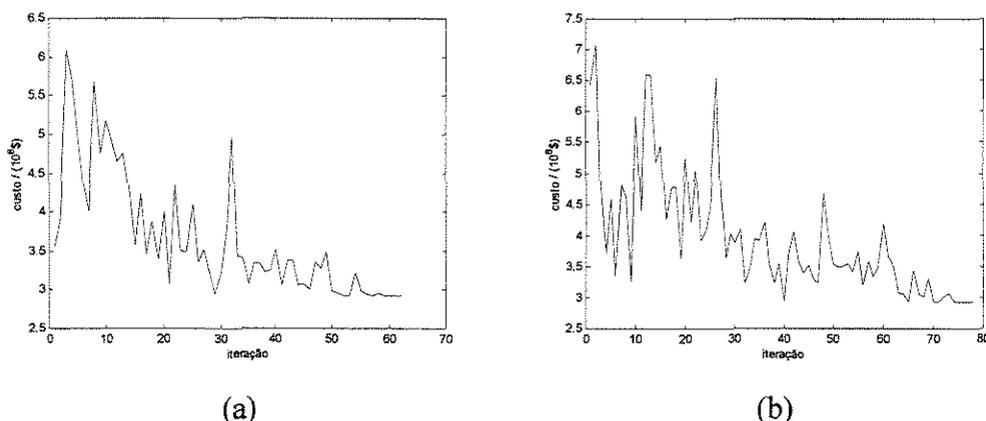


Figura 3.5 Dois exemplos do *Simulated Annealing* aplicado à planta de aromáticos, com $N_{max}=3$ e um ΔT_{min} de 25°C , para otimização das metas de custo

A figura 3.5 mostra, tanto na curva em (a) como em (b), o mesmo tipo de comportamento apresentado pela curva do gráfico mostrado na figura 3.3: no início são aceitas reconfigurações que levam a um grande aumento na função objetivo; conforme a pseudo temperatura vai diminuindo, os rearranjos que levam a aumentos na função objetivo começam a se tornar cada vez menos prováveis.

As simulações indicadas nas figuras 3.3 e 3.5 (a) e (b) levaram a um mínimo global de $\$2,921 \cdot 10^6$ nas metas de custo. A configuração do sistema que leva a esse mínimo é indicada na tabela 3.8.

Tabela 3.8 Configuração que leva a um mínimo nas metas de custo, com $N_{max}=3$ e um ΔT_{min} de 25°C

Subgrupo	Correntes		
1	7	8	5
2	2	1	
3	6	4	
4	9	3	
Metas de custo / ($10^6\text{\$}$)	2,921		

Montando-se a rede de trocadores de calor para a configuração acima, em função de regras citadas na seção 2.9, tem-se:

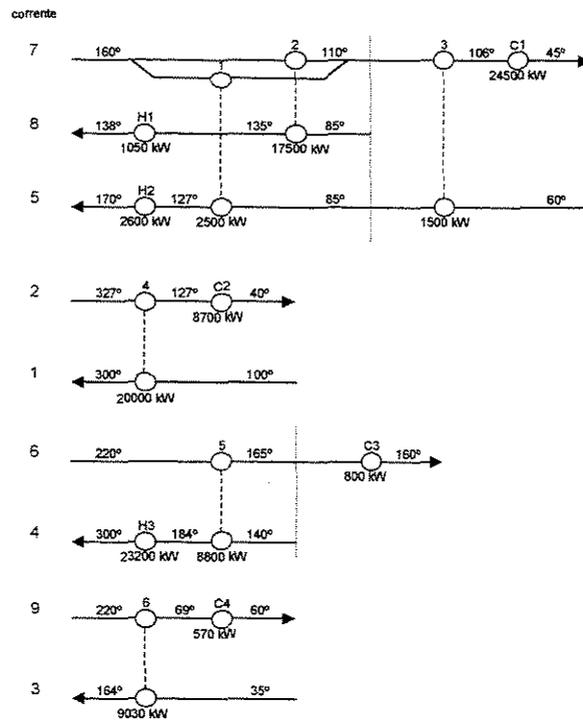


Figura 3.6 Rede de trocadores de calor que leva a um custo mínimo, com $N_{max}=3$ e um ΔT_{min} de 25°C

A área dos trocadores de calor indicados na figura 3.6 é calculada na tabela 3.9.

Tabela 3.9 Cálculo da área dos trocadores de calor representados na figura 3.6

Trocador	Tipo	$Q / (\text{kW})$	$\Delta T_{LM} / (^{\circ}\text{C})$	$U / (\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	$A / (\text{m}^2)$
H1	aquecedor	1050	138	0,333	23
H2	aquecedor	2600	129	0,333	60
1	processo	2500	29	0,250	347
2	processo	17500	25	0,250	2800
3	processo	1500	34	0,250	174
C1	resfriador	24500	53	0,417	1112
4	processo	20000	27	0,250	2963
C2	resfriador	8700	57	0,417	366
H3	aquecedor	23200	37	0,333	1859
5	processo	8800	30	0,250	1167
C3	resfriador	800	142	0,417	13
6	processo	9030	44	0,250	819
C4	resfriador	570	44	0,417	31
Total					11734

Novamente os valores previstos pelas metas se aproximaram muito daqueles da rede montada através de procedimentos ditados pela Tecnologia *Pinch*, como indicado na tabela 3.10. As metas de custo, por exemplo, tiveram um pequeno desvio de 2% em relação ao custo da rede de trocadores representado na figura 3.6.

Tabela 3.10 Comparação entre as metas previstas para a configuração indicada na tabela 3.8 e a rede indicada na figura 3.6

	Metas	Rede de trocadores da figura 3.6
número de trocadores	12	13
carga térmica quente / (kW)	26850	26850
carga térmica fria / (kW)	34570	34570
área / (m ²)	11704	11734
custo total / (10 ⁶ \$)	2,921	2,868

3.5 Conclusões

A decomposição das correntes de um processo em subgrupos independentes gera redes de trocadores de calor que são simples do ponto de vista operacional. A maneira pela qual as correntes são distribuídas nos diferentes subgrupos influencia no consumo de utilidades, na área de troca térmica e no custo da rede.

Polley G. T. e Heggs P. J. (1999) sugeriram uma metodologia de decomposição em que é muito importante a experiência do projetista ao ordenar as correntes numa seqüência adequada de modo a obter vantagens em termos de custo de bombeamento, operacionalidade e simplicidade da planta.

Foi sugerida nesse capítulo uma técnica de decomposição que distribui as correntes em diferentes subgrupos, limitando o número máximo de correntes em cada um deles. Quando o número de correntes integradas num subgrupo é pequeno, é provável que a rede de trocadores de calor correspondente seja simples, mas não necessariamente eficiente do ponto de vista energético. É interessante determinar a configuração que leva ou a um mínimo consumo de energia, ou a uma mínima área de trocadores ou a um mínimo custo na rede de trocadores. Em outras palavras, existe uma função objetivo (consumo de energia, área ou custo) que se deseja minimizar. A avaliação da função objetivo em todas as configurações possíveis é inviável pois o problema é fatorialmente grande.

Para resolver esse tipo de problema, foi utilizado o *Simulated Annealing*, um método de otimização aleatório. A aplicação do método se deu em quatro passos principais:

- 1) *Configuração*: pode ser definida pelo número de subgrupos do sistema, pelas correntes que constituem cada um dos subgrupos e pelo número máximo de correntes por subgrupo;
- 2) *Rearranjos*: o sistema se reconfigurava através de permutações ou de transferências de correntes entre os grupos;
- 3) *Função objetivo*: dependia da configuração do sistema e do ΔT_{min} , como indicado na equação 3.4;
- 4) *Estratégia de “resfriamento”*: eram feitas algumas reconfigurações aleatórias no sistema a fim de se determinar o valor inicial do parâmetro de controle T . Para cada valor de T eram permitidos $100N$ rearranjos sem êxito ou $10N$ rearranjos com sucesso. O parâmetro T era então reduzido em 5% e as reconfigurações continuavam para até 200 valores de T ou até que não houvesse mais nenhuma reconfiguração com sucesso.

Para exemplificar a metodologia descrita, o algoritmo acima foi aplicado às correntes da planta de aromáticos com $N_{max}=3$ e um ΔT_{min} de 25°C. Obteve-se uma rede operacionalmente simples e com as metas de custo minimizadas. O algoritmo também foi aplicado à planta de aromáticos com $N_{max}=9$ e um ΔT_{min} de 25°C, ou seja, era permitida a integração das nove correntes num único grupo. Para esse último N_{max} obteve-se a rede trocadores representada na figura 1.3, ou seja, houve a integração das correntes num único grupo. Na tabela 3.11 são comparadas as metas de custo das redes representadas nas figuras 3.9 ($N_{max}=3$) e 1.3 ($N_{max}=9$), respectivamente:

Tabela 3.11 Comparação das metas de custo na planta de aromáticos com um ΔT_{min} de 25°C

Nmax	Metas de custo / (10 ⁶ \$)
3	2,921
9	2,775

Analisando-se a tabela 3.11, pode-se ver que uma planta operacionalmente mais simples, com $N_{max}=3$, tem metas de custo que são apenas cerca de 5% maiores do que a planta com as correntes integradas num só grupo. O ganho em operacionalidade

provavelmente compensa em muito o pequeno aumento nas metas de custo, conforme discutido no capítulo 1.

recebe o nome de *Supertargeting* (Smith R., 1995), onde as metas foram determinadas para a planta de aromáticos com as correntes integradas num só grupo.

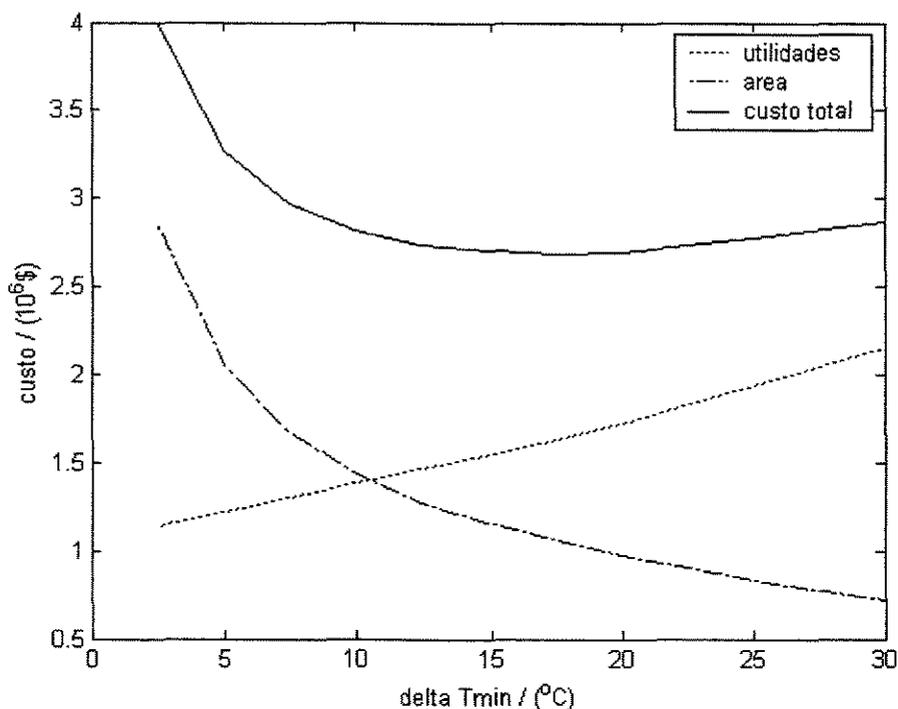


Figura 4.1 *Supertargeting* para as correntes da planta de aromáticos integradas num único grupo

Vê-se que o ΔT_{min} ótimo para a planta de aromáticos, com as correntes integradas num só grupo, encontra-se entre 15 e 20°C. É interessante notar que, a rigor, o mínimo custo é conseguido com um ΔT_{min} de cerca de 18°C. Quando se fala num ΔT_{min} ótimo, se fala numa faixa ótima de temperaturas, e não num único valor absolutamente exato, já que a estimativa das metas sempre envolve um pequeno erro.

O raciocínio descrito anteriormente pode ser aplicado para as correntes integradas num único grupo e também pode ser aplicado quando as correntes estiverem integradas em subgrupos. Seja, por exemplo, a configuração de correntes indicada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Exemplo de configuração das correntes da planta de aromáticos

Subgrupo	Correntes							
1	1	2	3	5	7	8	9	
2	4	6						

A curva *Supertargeting* para os subgrupos 1 e 2 é representada na figura 4.2.

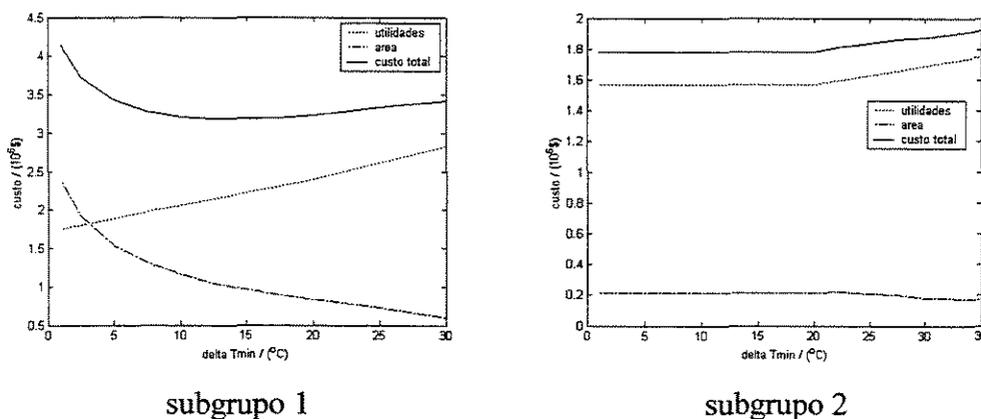


Figura 4.2 *Supertargeting* para as correntes da planta de aromáticos integradas conforme a configuração indicada na tabela 4.1

A otimização do ΔT_{min} em cada um dos subgrupos pode trazer economia no custo total da rede de trocadores de calor. Se os subgrupos 1 e 2 operassem com um ΔT_{min} de 25°C, as metas de custo total ficariam em $\$5,175 \cdot 10^6$. Entretanto, se o subgrupo 1 operasse com um ΔT_{min} de 15°C e o subgrupo 2 tivesse um ΔT_{min} de 20°C, o custo total seria de $\$4,962 \cdot 10^6$. Isso significa uma economia de cerca de 5%. A comparação desses resultados é feita na tabela 4.2.

Tabela 4.2 Otimização do ΔT_{min} em cada subgrupo

Subgrupo	$\Delta T_{min} / ^\circ\text{C}$	Metas de custo / ($10^6\$$)	$\Delta T_{min} / ^\circ\text{C}$	Metas de custo / ($10^6\$$)
1	25	3,337	15	3,181
2	25	1,838	20	1,781
Total		5,175		4,962

Pode-se observar na figura 4.2 que o consumo energético no subgrupo 2, composto das correntes 4 e 6, é constante até um ΔT_{min} de 20°C. Esse tipo de situação recebe o nome

de Problema Limite ou *Threshold Problem* (Smith R., 1995), que é caracterizado por não apresentar um ponto de estrangulamento energético. Na figura 4.3 é representada a Curva Composta para as correntes 4 e 6 com um ΔT_{min} de 30°C. Nessa condição, são necessários 24000 kW de utilidade quente e 1600 kW de utilidade fria.

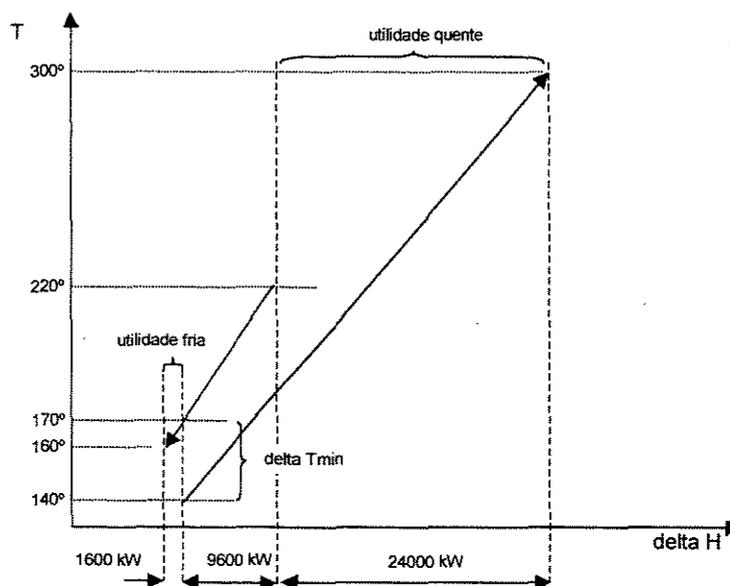


Figura 4.3 Curva Composta para as correntes 4 e 6 da planta de aromáticos com um ΔT_{min} de 30°C

Aproximando-se as Curvas Compostas quente e fria até um ΔT_{min} de 20°C, conforme indicado na figura 4.4, o consumo de utilidade quente cai para 22400 kW e não há consumo de utilidade fria.

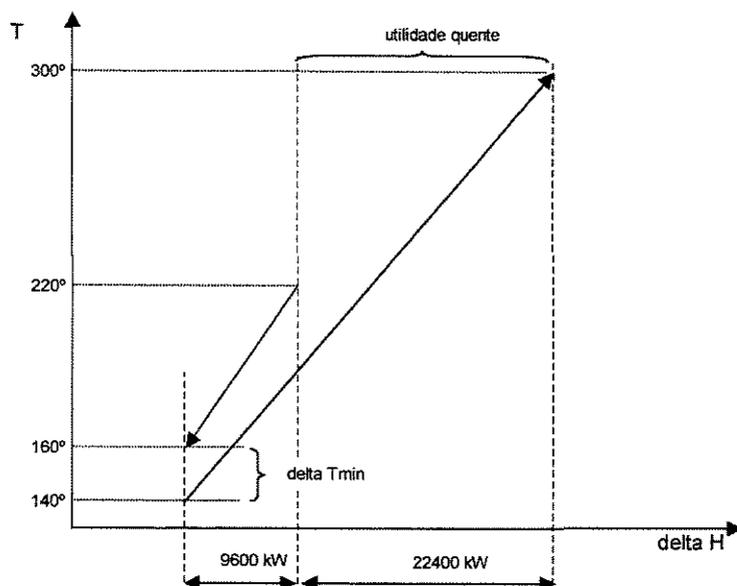


Figura 4.4 Curva Composta para as correntes 4 e 6 da planta de aromáticos com um ΔT_{min} de 20°C

Aproximando-se ainda mais as duas Curvas Compostas, até um ΔT_{min} de 10°C , como representado na figura 4.5, o consumo de utilidade quente e fria permanecem constantes em 22400 kW e 0 kW, respectivamente.

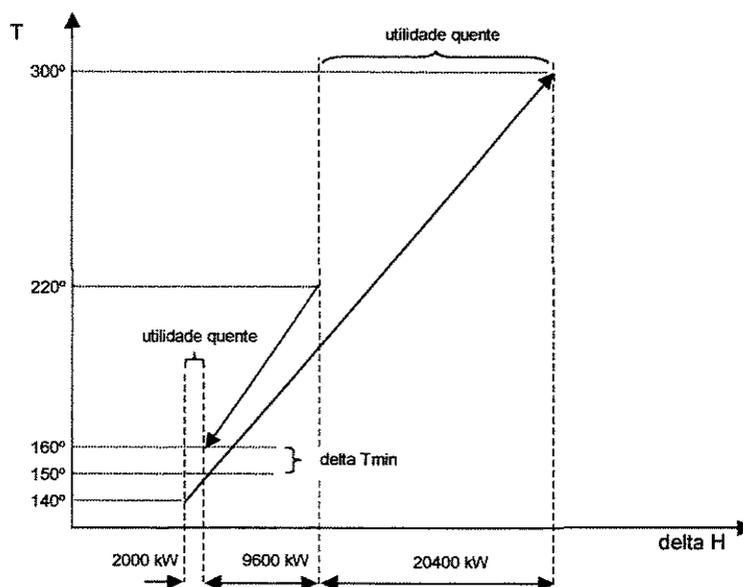


Figura 4.5 Curva Composta para as correntes 4 e 6 da planta de aromáticos com um ΔT_{min} de 10°C

A variação do consumo energético em função do ΔT_{min} das correntes 4 e 6 da planta de aromáticos é indicado na figura 4.6 e representa um comportamento típico apresentado por Problemas Limite, em que até determinado valor de ΔT_{min} o consumo de uma das utilidades é nulo e o da outra é constante. Ultrapassado esse limite, o consumo de ambas começa a aumentar de maneira proporcional.

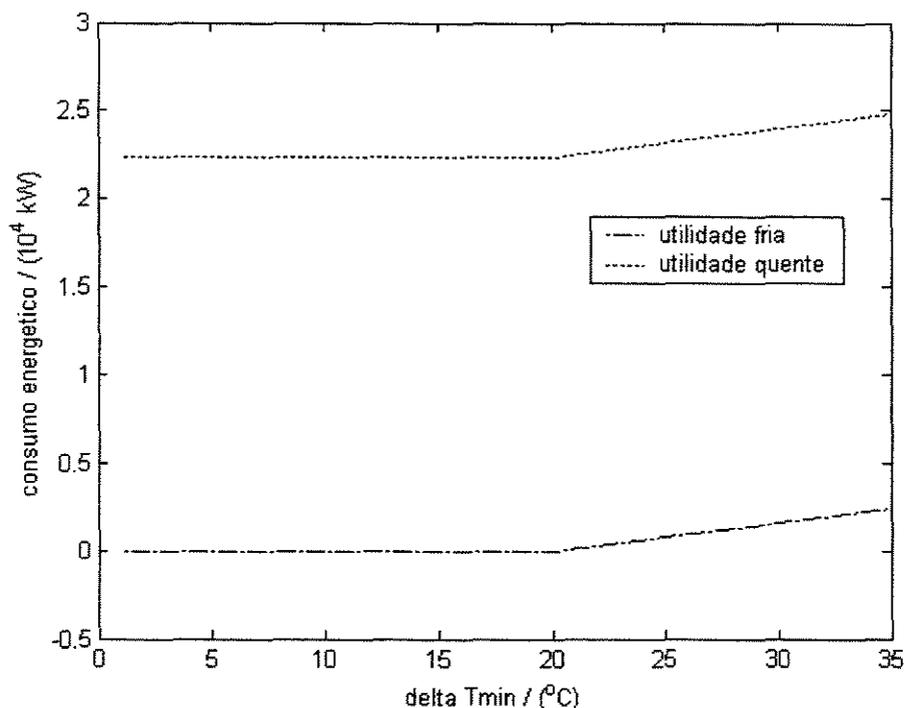


Figura 4.6 Consumo energético de um Problema Limite

4.3 Otimização das metas de energia

Nessa seção são otimizadas as metas de energia da planta de aromáticos, através do *Simulated Annealing*, restringindo-se o número máximo de correntes por subgrupo.

Se o número máximo de correntes por subgrupo for 1, isso significa que não há integração energética entre as correntes de processo. O consumo de energia nesse caso é bastante elevado, conforme indicado na tabela 1.2.

Quando se limita o número máximo de correntes a duas por subgrupo, a configuração que leva a um mínimo consumo de energia, para um ΔT_{min} fixo de 25°C , é

indicada na tabela 4.3. Essa configuração é a mesma representada na rede sugerida na figura 1.4.

Tabela 4.3 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=2$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo consumo nas metas de energia

subgrupo	correntes	
1	1	2
2	4	6
3	3	9
4	7	8
5	5	
Metas de utilidade quente / kW	30850	
Metas de utilidade fria / kW	38570	

Limitando-se o número máximo de correntes a três por subgrupo, com um ΔT_{min} fixo de 25°C , e otimizando as metas de energia, chega-se à configuração indicada na tabela 4.4. Nota-se que a distribuição de correntes sugerida é a mesma daquela representada na tabela 3.8, ou seja, essa configuração leva tanto a um mínimo nas metas de energia como nas metas de custo.

Tabela 4.4 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=3$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo consumo nas metas de energia

subgrupo	correntes		
1	5	7	8
2	1	2	
3	4	6	
4	3	9	
Metas de utilidade quente / kW	26850		
Metas de utilidade fria / kW	34570		

Realizando-se o mesmo raciocínio para no máximo quatro, cinco, seis, sete, oito e nove correntes por subgrupo, com um ΔT_{min} fixo de 25°C , são obtidas respectivamente as configurações indicadas nas tabelas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9.

Tabela 4.5 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo consumo nas metas de energia

subgrupo	correntes			
1	3	4	6	9
2	5	7	8	
3	1	2		
Metas de utilidade quente / kW	25480			
Metas de utilidade fria / kW	33200			

Tabela 4.6 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=5$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo consumo nas metas de energia

subgrupo	correntes				
1	3	4	6	9	
2	1	2	5	7	8
Metas de utilidade quente / kW	25130				
Metas de utilidade fria / kW	32850				

Tabela 4.7 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=6$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo consumo nas metas de energia

subgrupo	correntes					
1	1	2	3	4	6	9
2	5	7	8			
Metas de utilidade quente / kW	25030					
Metas de utilidade fria / kW	32750					

Tabela 4.8 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=7$ e $N_{max}=8$ com um ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo consumo nas metas de energia

subgrupo	correntes						
1	3	4	5	6	7	8	9
2	1	2					
Metas de utilidade quente / kW	24980						
Metas de utilidade fria / kW	32700						

Tabela 4.9 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=9$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo consumo nas metas de energia

subgrupo	correntes
1	todas
Metas de utilidade quente / kW	24480
Metas de utilidade fria / kW	32200

A influência do número máximo de correntes por subgrupo sobre as metas de consumo de utilidade quente Q_{Hmin} , para um ΔT_{min} de 15 e de 25°C, é indicada na figura 4.7.

Pode ser observado nessa figura que tanto para um ΔT_{min} de 15°C como para um ΔT_{min} 25°C as curvas de consumo energético apresentam um comportamento semelhante. Isso significa que o consumo de energia, sem haver integração energética ($N_{max}=1$), é extremamente elevado se comparado com o consumo de energia quando as correntes estão associadas no máximo duas a duas, ou no máximo três a três, etc., independentemente do ΔT_{min} . Tomando-se como referência o valor de 86180 kW, que corresponde ao consumo de utilidade quente quando $N_{max}=1$ e calculando-se a redução percentual variando-se N_{max} , são obtidos os valores indicados na tabela 4.10. Vê-se que essa redução pode chegar a mais de 75%.

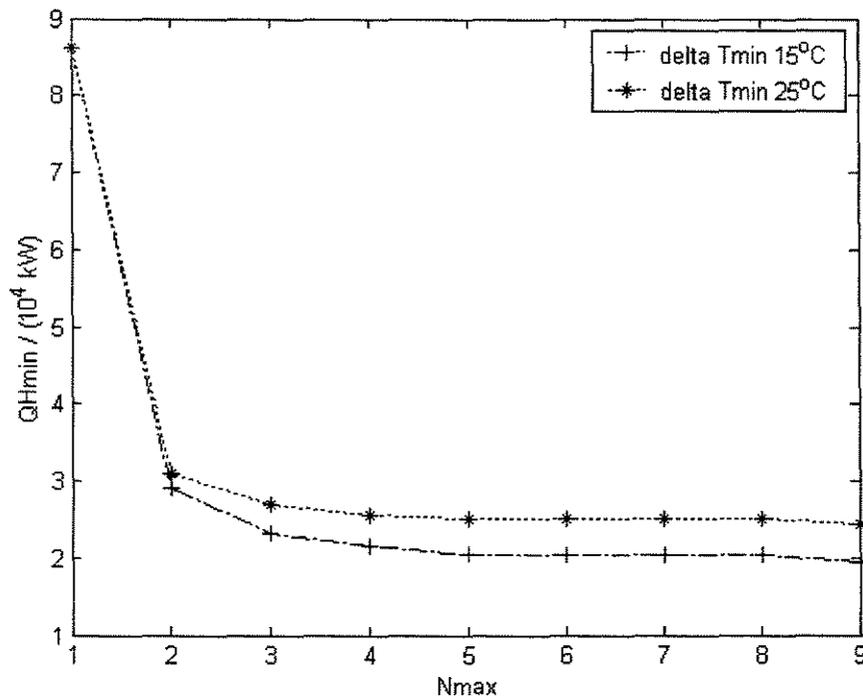


Figura 4.7 Influência no número máximo de correntes em cada subgrupo sobre as metas de consumo de utilidade quente para diferentes ΔT_{min}

Tabela 4.10 Redução percentual do consumo de utilidade quente tomando como valor de referência o consumo de utilidade quente quando não há integração energética entre as correntes

N_{max}	Redução percentual / (%)	
	$\Delta T_{min}=15^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{min}=25^{\circ}\text{C}$
2	66,3	64,2
3	72,9	68,8
4	74,9	70,4
5	76,3	70,8
6	76,3	70,9
7	76,3	71,0
8	76,3	71,0
9	77,5	71,6

É interessante notar que conforme se aumenta o número máximo de correntes por subgrupo, a economia em energia não é tão grande, excetuando-se $N_{max}=1$. Com um ΔT_{min} de 25°C , por exemplo, para $N_{max}=4$ tem-se uma redução percentual de 70,4% e com

$N_{max}=9$ a redução percentual é de somente 71,6%. Além disso, a integração de muitas correntes num só subgrupo freqüentemente leva a redes de trocadores de calor bastante complicadas e de difícil operação.

4.4 Otimização das metas de área

Um dos parâmetros que compõe as metas de custo total são as metas de área, conforme discutido no capítulo 2. Nessa seção são otimizadas as metas de área sem levar em conta o consumo energético.

Quando $N_{max}=1$, isto é, as correntes não estão integradas, as metas de área são iguais a 5680 m². Esse valor é igual à área dos trocadores de calor representados na figura 4.8 e cujo valor é calculado na tabela 4.11. Pode-se ver nessa rede de trocadores de calor que a menor diferença de temperatura entre correntes, igual a 30°C, ocorre nos trocadores H1 e H5. As temperaturas das correntes no lado quente desses dois trocadores são iguais a 330°C (utilidade quente) e 300°C (corrente de processo). Nos outros trocadores de calor, as diferenças de temperatura são bem maiores do que 30°C. Como cada corrente está associada somente ou com uma utilidade quente ou com uma utilidade fria, os ΔT_{min} nos trocadores são sempre constantes. Conseqüentemente, para $N_{max}=1$, a área deixa de ser função do ΔT_{min} .

Tabela 4.11 Cálculo da área dos trocadores de calor representados na figura 4.8

Trocador	Tipo	$Q / (\text{kW})$	$\Delta T_{LM} / (^\circ\text{C})$	$U / (\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$A / (\text{m}^2)$
C1	resfriador	28700	116	0,333	739
C2	resfriador	9600	169	0,333	170
C3	resfriador	9600	105	0,333	275
C4	resfriador	46000	72	0,333	1906
H1	aquecedor	20000	68	0,417	703
H2	aquecedor	9030	180	0,417	120
H3	aquecedor	18550	167	0,417	266
H4	aquecedor	6600	165	0,417	96
H5	aquecedor	32000	55	0,417	1405
Total					5680

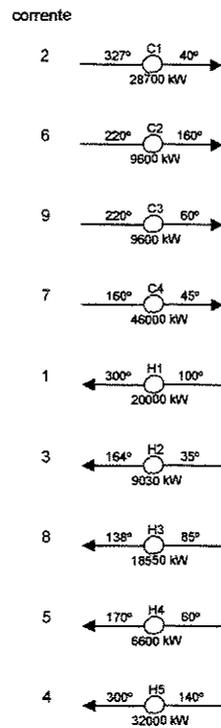


Figura 4.8 Rede de trocadores de calor para a planta de aromáticos sem integração energética entre as correntes

Restringindo-se o número máximo de correntes por subgrupo a duas e otimizando as metas de área através do Simulated Annealing, chegam-se a diferentes configurações em que todas levam a uma meta de área igual a 5680 m^2 . Algumas dessas configurações são indicadas na tabela 4.12.

Tabela 4.12 Configurações de correntes que levam a um mínimo nas metas de área

Configuração 1		
Subgrupo	Correntes	
1	2	6
2	9	
3	7	
4	1	3
5	5	8
6	4	

Configuração 2		
Subgrupo	Correntes	
1	2	9
2	6	7
3	1	5
4	3	4
5	8	

Configuração 3	
Subgrupo	Correntes
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9

A explicação para as configurações obtidas anteriormente é simples: quando não há restrição no consumo energético, o *Simulated Annealing* sempre tende a fazer com que as correntes sejam sustentadas por utilidades, reunindo num mesmo subgrupo somente correntes quentes ou somente correntes frias. Nesse caso, as forças motrizes em cada trocador de calor aumentam, resultando numa diminuição na área de cada um, em função da equação 2.5. Mesmo quando se permite a integração total entre as correntes, com $N_{max}=9$, obtém-se configurações análogas àquelas representadas na tabela 4.12, isto é, subgrupos somente com um tipo de corrente, quente ou fria.

4.5 Otimização das metas de custo para um ΔT_{min} uniforme

A otimização das metas de custo de uma rede de trocadores de calor, decompondo as correntes em subgrupos independentes, é bastante importante já que nessas metas estão incluídas tanto metas de consumo de energia como metas de área. Nessa seção é feita a decomposição das correntes em diferentes subgrupos, para um ΔT_{min} fixo em cada um dos mesmos, de modo a se minimizar as metas de custo total.

Quando as correntes não estão integradas, isto é, quando $N_{max}=1$, o consumo energético é bastante elevado. Como nesse caso as correntes são ou aquecidas ou resfriadas por utilidades, as forças motrizes nos trocadores de calor são grandes, acarretando na necessidade de uma área pequena de troca térmica, conforme foi discutido na seção anterior. Para $N_{max}=1$, tanto o consumo de energia como a área de troca de térmica não são mais funções do ΔT_{min} , como também foi mostrado na seção anterior. Não há desvios entre as metas previstas para $N_{max}=1$ e a rede de trocadores de calor representada na figura 4.8, como pode-se ver na tabela 4.13.

Tabela 4.13 Comparação entre as metas previstas para as correntes não integradas e a rede indicada na figura 4.8

	Metas	Rede de trocadores da figura 4.8
número de trocadores	9	9
carga térmica quente / (kW)	86180	86180
carga térmica fria / (kW)	93900	93900
área / (m ²)	5680	5680
custo total / (10 ⁶ \$)	7,089	7,089

Fazendo-se a integração das correntes em subgrupos, para um ΔT_{min} de 25°C, com no máximo duas correntes por subgrupo e minimizando as metas de custo, chega-se à configuração representada na tabela 4.14.

Tabela 4.14 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=2$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes	
1	2	1
2	6	4
3	9	3
4	7	8
5	5	
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	3,173	

É interessante observar que a configuração indicada na tabela 4.14 é idêntica à configuração representada na tabela 4.3. Isso significa que para um ΔT_{min} de 25°C, a mesma configuração leva tanto a um mínimo nas metas de energia como nas metas de custo. A configuração acima também é a mesma do fluxograma sugerido anteriormente no capítulo 1, na figura 1.4, e representada na figura 4.9 na forma de diagrama de grade.

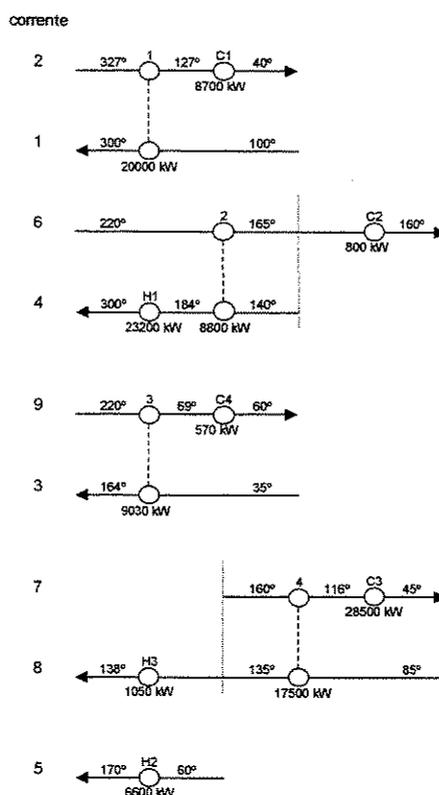


Figura 4.9 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo e a um mínimo consumo energético para $N_{max}=2$ e um ΔT_{min} de 25°C

Pode-se ver na tabela 4.15 que as metas previstas para a configuração representada na tabela 4.14 são bastante próximas dos valores calculados para a rede indicada na figura 4.9. Para os custos, por exemplo, o desvio é de somente 1,5%.

Tabela 4.15 Comparação entre as metas previstas para a configuração indicada na tabela 4.15 e a rede representada na figura 4.9

	Metas	Rede de trocadores da figura 4.9
número de trocadores	12	11
carga térmica quente / (kW)	30850	30850
carga térmica fria / (kW)	38570	38570
área / (m^2)	11059	11077
custo total / ($10^6\text{\$}$)	3,173	3,128

Integrando as correntes em subgrupos com no máximo três correntes, para um ΔT_{min} de 25°C , e otimizando-se as metas de custo, chega-se à configuração indicada na

tabela 3.8. A rede de trocadores de calor para essa configuração é representada na figura 3.6. As metas apresentam um desvio pequeno em relação aos valores calculados para essa rede, como pode-se ver na tabela 3.10.

Fazendo-se a integração das correntes em subgrupos com no máximo quatro correntes em cada um deles, para um ΔT_{min} de 25°C, e minimizando as metas de custo através do *Simulated Annealing*, obtém-se a configuração indicada na tabela 4.16.

Tabela 4.16 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes			
1	6	9	3	4
2	7	8	5	
3	2	1		
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	2,839			

Deve-se salientar que a configuração representada acima é a mesma da tabela 4.5, em que foi realizada a otimização das metas de energia para $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} de 25°C, significando que essa configuração leva tanto a um mínimo nas metas de energia como nas metas de custo. Uma rede de trocadores de calor típica, obtida em função dessa configuração, é representada na figura 4.10.

Novamente as metas estipuladas para a configuração representada na tabela 4.16 se aproximam muito dos valores calculados para a rede sugerida na figura 4.10, como indicado na tabela 4.17. O desvio em relação aos custos é de somente 0,6%.

Tabela 4.17 Comparação entre as metas previstas para a configuração indicada na tabela 4.16 e a rede sugerida na figura 4.10

	Metas	Rede de trocadores da figura 4.10
número de trocadores	11	14
carga térmica quente / (kW)	25480	25480
carga térmica fria / (kW)	33200	32200
área / (m ²)	12260	12632
custo total / (10 ⁶ \$)	2,839	2,822

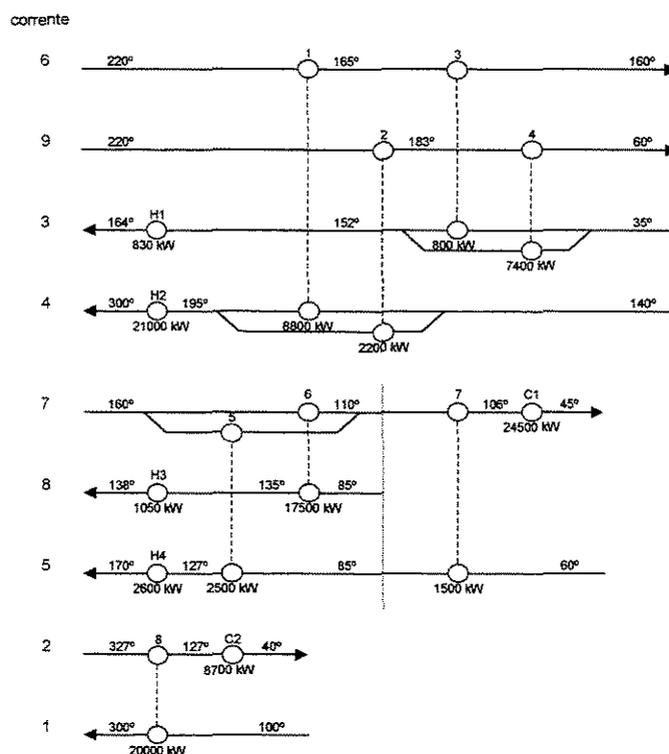


Figura 4.10 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo e a um mínimo consumo energético para $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} de 25°C

Permitindo-se que o número máximo de correntes por subgrupo seja cinco, e minimizando-se as metas de custo para um ΔT_{min} de 25°C , chega-se à configuração representada na tabela 4.18. Pode-se observar que essa configuração é a mesma daquela indicada anteriormente na tabela 4.6, e que novamente levou a um mínimo nas metas de energia e de área.

Tabela 4.18 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=5$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes				
1	2	7	1	8	5
2	6	9	3	4	
Metas de custo / (10^6 \$)	2,798				

Sintetizando-se uma rede de trocadores de calor em função das regras da Tecnologia *Pinch* descritas no capítulo 2 e em função da configuração acima, é possível se obter uma rede de trocadores como a representada na figura 4.11.

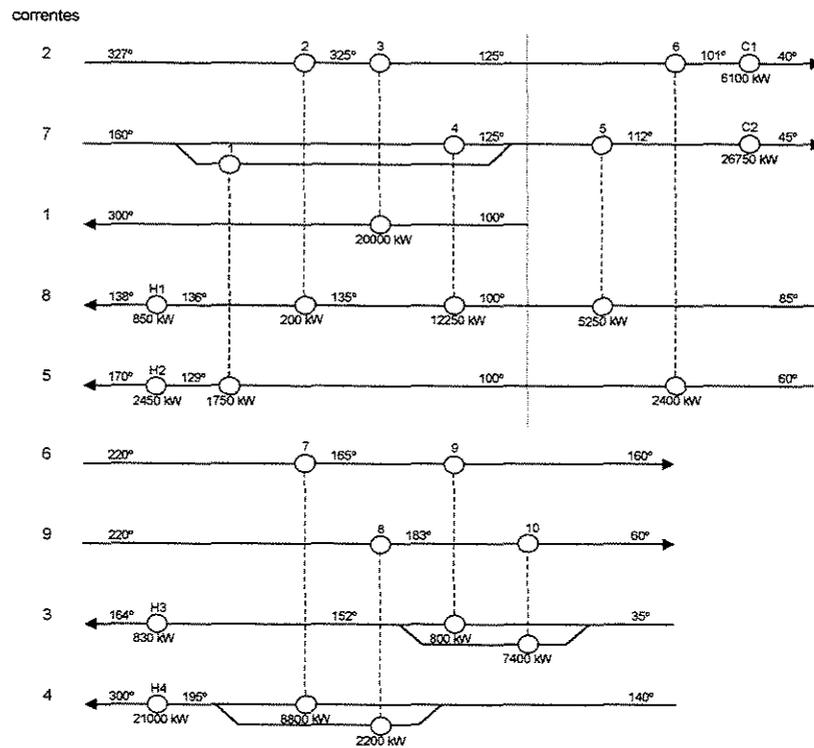


Figura 4.11 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo para $N_{max}=5$ e $N_{max}=6$, com um ΔT_{min} de 25°C

As metas previstas para a rede de trocadores representada na figura 4.11 também apresentam um desvio muito pequeno em relação aos valores calculados em função dessa rede, como indicado na tabela 4.19. As metas de custo, por exemplo, desviam-se somente em 0,3% em relação aos custos totais da rede sugerida na figura 4.11.

Quando se limita o número máximo de correntes por subgrupo a seis e otimizam-se as metas de custo, obtém-se uma configuração de correntes idêntica àquela representada na tabela 4.18, para o caso em que N_{max} era igual a cinco. Para $N_{max}=6$, a configuração que leva a um mínimo nas metas de custo é diferente da configuração que leva a um mínimo nas metas de consumo de energia, como pode ser observado nas tabelas 4.18 e 4.7.

Tabela 4.19 Comparação entre as metas previstas para a configuração indicada na tabela 4.18 e a rede sugerida na figura 4.11

	Metas	Rede de trocadores da figura 4.11
número de trocadores	13	16
carga térmica quente / (kW)	25130	25130
carga térmica fria / (kW)	32850	32850
área / (m ²)	11573	12659
custo total / (10 ⁶ \$)	2,798	2,808

Limitando-se N_{max} a sete correntes por subgrupo e minimizando-se as metas de custo total, consegue-se uma configuração de correntes como a indicada na tabela 4.20.

Tabela 4.20 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=7$ e ΔT_{min} de 25°C que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes						
1	6	9	7	3	8	5	4
2	2	1					
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	2,792						

Uma rede de trocadores de calor típica, obtida em função da configuração acima, é sugerida na figura 4.12.

A configuração sugerida anteriormente leva tanto a um mínimo nas metas de custo como nas metas de consumo energético, como indicado nas tabelas 4.20 e 4.8. Na tabela 4.21 são comparadas as metas da referida configuração e os valores calculados em função da rede da figura 4.12. O desvio das metas de custo é de 1,2%.

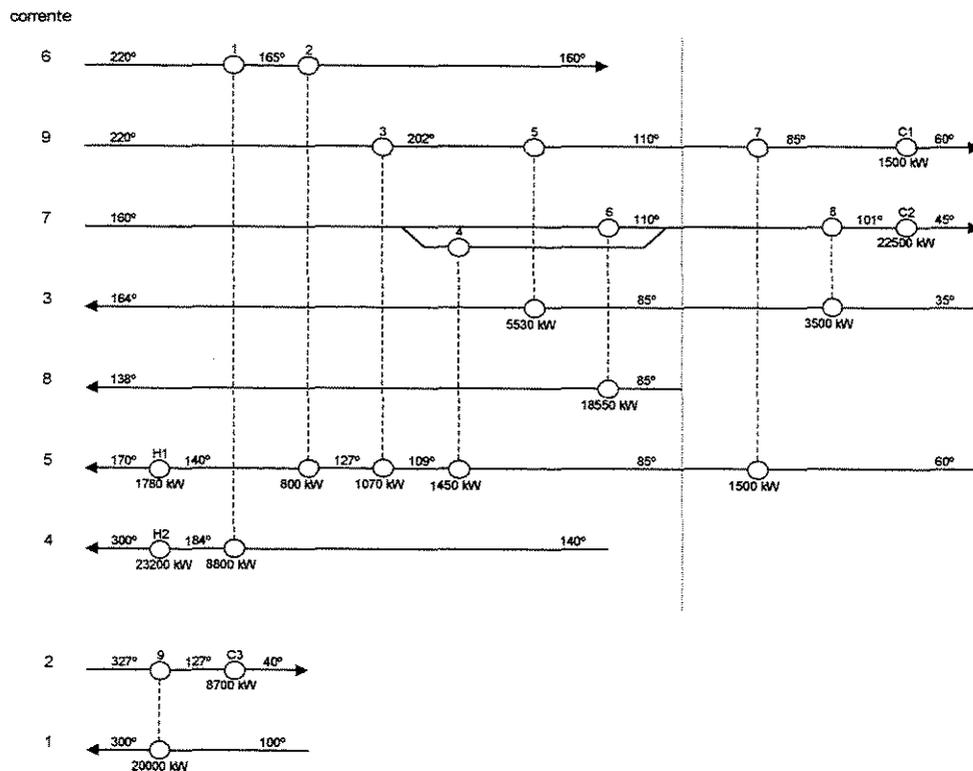


Figura 4.12 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo e a um mínimo consumo energético para $N_{max}=7$ e um ΔT_{min} de 25°C

Tabela 4.21 Comparação entre as metas previstas para a configuração indicada na tabela 4.20 e a rede sugerida na figura 4.12

	Metas	Rede de trocadores da figura 4.12
número de trocadores	13	14
carga térmica quente / (kW)	24980	24980
carga térmica fria / (kW)	32700	32700
área / (m^2)	11759	12227
custo total / ($10^6\text{\$}$)	2,792	2,759

Quando é permitida a integração total entre as correntes, ou seja, quando $N_{max}=9$, a configuração que leva a um mínimo nas metas de energia é a mesma que leva a um mínimo nas metas de custo. Essa configuração é dada na tabela 4.9. A rede de trocadores obtida em função dessa configuração é aquela sugerida no diagrama de grade representado na figura 2.15. Demonstrou-se também que é possível a construção de uma rede de

trocadores cujos custos totais, consumo energético e área se aproximaram muito das metas estipuladas, conforme se vê na tabela 2.10.

É importante ressaltar como o número de correntes em cada um dos subgrupos afeta na complexidade da rede de trocadores, sintetizada em função desse número. Redes de trocadores relativamente simples, como aquelas representadas nas figuras 4.9, 3.6 e 4.10, foram se tornando cada vez mais complexas conforme N_{max} aumentava, até se chegar à rede de trocadores representada na figura 2.15, onde todas as correntes estavam integradas num único conjunto, com um ΔT_{min} de 25°C. O decréscimo nas metas de custo, conforme N_{max} é aumentado, é relativamente baixo, como indicado na figura 4.13, sugerindo que plantas operacionalmente complexas, com muitas correntes integradas, não são assim tão vantajosas, em termos de custo, em relação a plantas com um menor nível de integração energética entre as correntes.

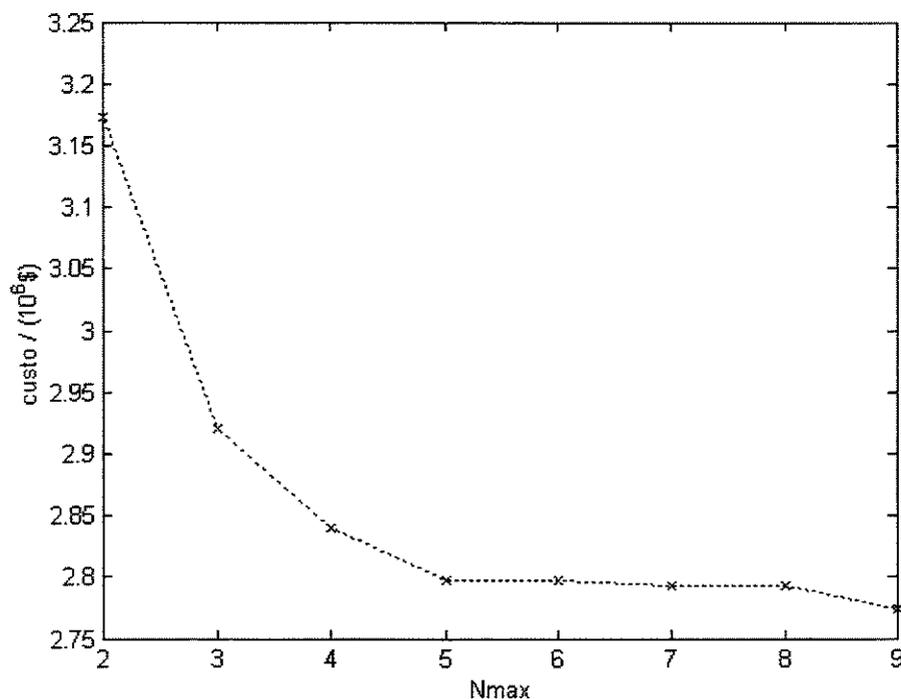


Figura 4.13 Influência do número máximo de correntes por subgrupo nas metas de custo da planta de aromáticos, com um ΔT_{min} de 25°C

A decomposição em subgrupos feita anteriormente para redes com um ΔT_{min} de 25°C foi também realizada com um ΔT_{min} de 15°C. Para a decomposição em subgrupos com no máximo duas correntes em cada um deles, a configuração de correntes que otimiza as metas de custo é igual à apresentada na tabela 4.14. Em função desse ΔT_{min} e dessa configuração foi sugerida a rede de trocadores de calor indicada na figura 4.14.

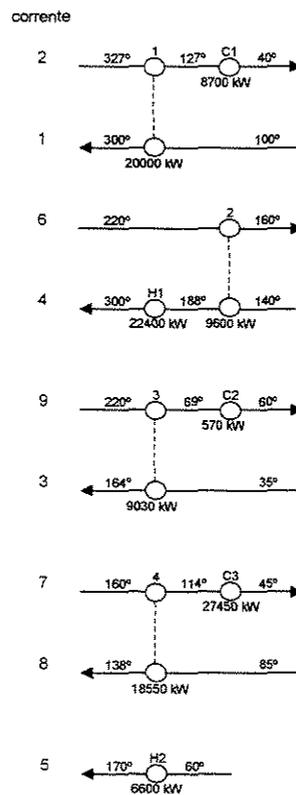


Figura 4.14 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo para $N_{max}=2$ e um ΔT_{min} de 15°C

O consumo energético, o valor da área e o custo da rede representada na figura 4.14 ficaram muito próximos dos valores previstos pelas metas, como se vê na tabela 4.22.

Tabela 4.22 Comparação entre as metas previstas para a configuração indicada na tabela 4.14, com um ΔT_{min} de 15°C, e a rede sugerida na figura 4.14

	Metas	Rede de trocadores da figura 4.14
número de trocadores	9	9
carga térmica quente / (kW)	29000	29000
carga térmica fria / (kW)	36720	36720
área / (m ²)	11810	11792
custo total / (10 ⁶ \$)	3,039	3,019

Fazendo-se a decomposição das correntes em subgrupos para $N_{max}=3$, com um ΔT_{min} de 15°C, e otimizando-se as metas de custo, obtém-se a configuração de correntes representada na tabela 4.23, ligeiramente diferente da tabela 3.8.

Tabela 4.23 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=3$ e ΔT_{min} de 15°C que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes		
1	7	3	8
2	6	4	
3	9	5	
4	2	1	
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	2,748		

Uma das redes de trocadores possíveis de se obter em função de $N_{max}=3$ e um ΔT_{min} de 15°C é representada na figura 4.15.

As metas previstas para a rede anterior se aproximaram muito do custo dessa rede, como indicado na tabela 4.24.

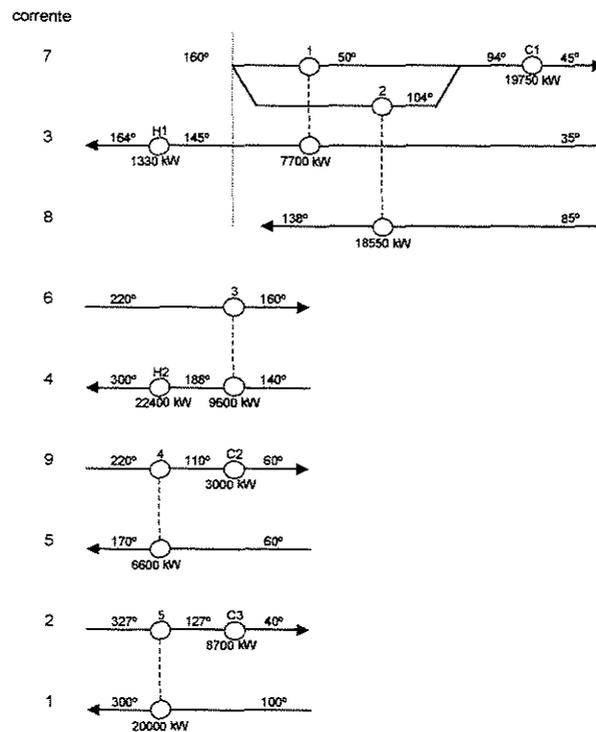


Figura 4.15 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo para $N_{max}=3$ e um ΔT_{min} de 15°C

Tabela 4.24 Comparação entre as metas previstas para a configuração indicada na tabela 4.23, com um ΔT_{min} de 15°C , e a rede sugerida na figura 4.15

	Metas	Rede de trocadores da figura 4.15
número de trocadores	10	10
carga térmica quente / (kW)	23730	23730
carga térmica fria / (kW)	31450	31450
área / (m^2)	13472	14057
custo total / ($10^6\text{\$}$)	2,748	2,741

Permitindo-se que no máximo existam 4 correntes por subgrupo, para um ΔT_{min} fixo de 15°C , e minimizando-se as metas de custo, obtém-se a configuração de correntes representada abaixo. Nota-se que essa configuração é diferente daquela representada na tabela 4.5.

Tabela 4.25 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$ e ΔT_{min} de 15°C que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes			
1	6	9	5	4
2	7	3	8	
3	2	1		
Metas de custo / (10^6 \$)	2,719			

Uma rede característica, obtida em função da configuração anterior e de um ΔT_{min} de 15°C , é indicada a seguir, na figura 4.16.

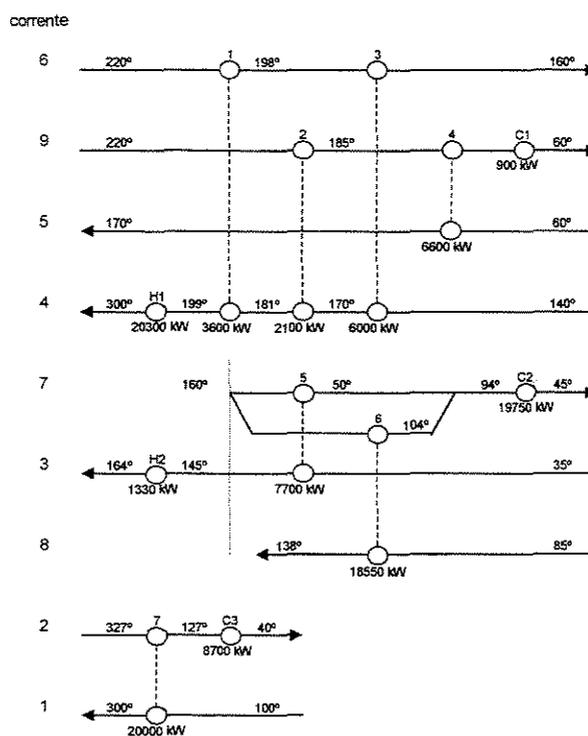


Figura 4.16 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo para $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} de 15°C

Logo a seguir é feita a comparação das metas previstas para $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} de 15°C com a rede de trocadores de calor sugerida na figura 4.16. Vê-se que a

aproximação entre as metas estipuladas e os valores calculados para a rede da figura 4.16 é muito boa.

Tabela 4.26 Comparação entre as metas previstas para a configuração indicada na tabela 4.25, com um ΔT_{min} de 15°C, e a rede sugerida na figura 4.16

	Metas	Rede de trocadores da figura 4.16
número de trocadores	12	12
carga térmica quente / (kW)	21630	21630
carga térmica fria / (kW)	29350	29350
área / (m ²)	15226	15923
custo total / (10 ⁶ \$)	2,719	2,703

Levando-se em conta agora um N_{max} igual a cinco correntes, com um ΔT_{min} de 15°C, e otimizando-se as metas de custo, chega-se à configuração de correntes indicada na tabela 4.27. Essa configuração também leva a um mínimo nas metas de custo com $N_{max}=6$.

Tabela 4.27 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=5$ e $N_{max}=6$, com ΔT_{min} de 15°C, que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes				
1	9	7	3	8	5
2	2	6	1	4	
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	2,657				

Foi sintetizada uma rede de trocadores em função da configuração acima, como indicado na figura 4.17.

As metas para a configuração anterior tiveram uma boa aproximação em relação à rede sintetizada na figura 4.17, como indicado na tabela 4.28.

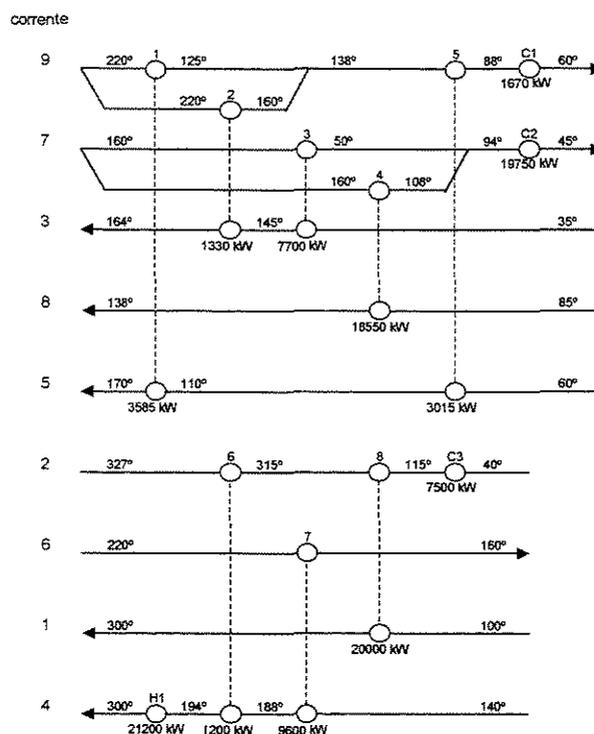


Figura 4.17 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo para $N_{max}=5$ e $N_{max}=6$, com um ΔT_{min} de 15°C

Tabela 4.28 Comparação entre as metas previstas para a configuração indicada na tabela 4.27, com um ΔT_{min} de 15°C , e a rede sugerida na figura 4.17

	Metas	Rede de trocadores da figura 4.17
número de trocadores	11	12
carga térmica quente / (kW)	21200	21200
carga térmica fria / (kW)	28920	28920
área / (m^2)	14874	16670
custo total / (10^6 \$)	2,657	2,684

Otimizando-se as metas de custo com $N_{max}=7$, para um ΔT_{min} de 15°C , chega-se à configuração de correntes representada na tabela 4.29.

função da configuração da tabela 4.29. Esse fato é ilustrado na tabela 4.30. Na figura 4.19 foi sugerida uma rede de trocadores com todas as correntes integradas num único grupo.

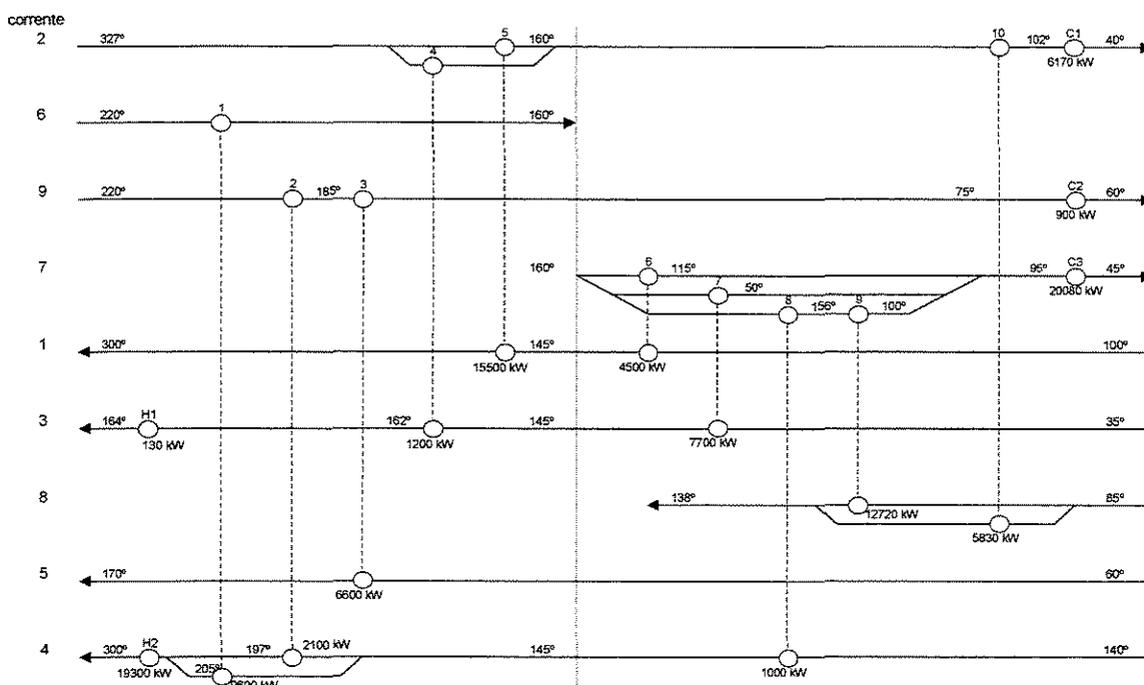


Figura 4.19 Rede de trocadores da planta de aromáticos com todas as correntes integradas num único grupo, com um ΔT_{min} de 15°C

Tabela 4.30 Comparação entre consumo energético, área e custo total, para um ΔT_{min} de 15°C, entre uma rede de trocadores com todas as correntes integradas num único grupo e uma rede com as correntes integradas em dois subgrupos independentes, em função da tabela 4.29

	Rede obtida com a integração de todas correntes num único grupo	Rede obtida com a integração das correntes como indicado na figura 4.18
número de trocadores	15	11
carga térmica quente / (kW)	19430	22400
carga térmica fria / (kW)	27150	30120
área / (m ²)	18447	14676
custo total / (10 ⁶ \$)	2,728	2,668

Pode-se observar que a rede sugerida na figura 4.19, com integração total entre as correntes, é consideravelmente mais complexa do que a rede sugerida na figura 4.18, com

as correntes integradas em dois subgrupos, e, além disso, a primeira tem um custo 2,5% mais elevado do que a última.

A influência do número máximo de correntes por subgrupo nas metas de custo, para um ΔT_{min} de 15°C, é indicada a seguir. O comportamento da curva é análogo ao da curva da figura 4.13, em que foi estudada a influência de N_{max} nas metas de custo para um ΔT_{min} de 25°C.

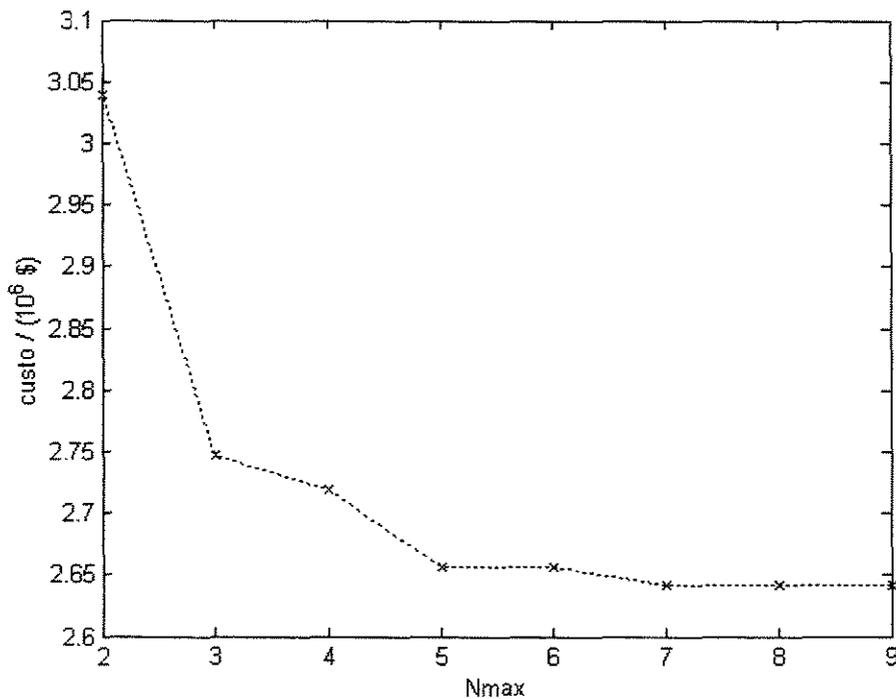


Figura 4.20 Influência do número máximo de correntes por subgrupo nas metas de custo da planta de aromáticos, com um ΔT_{min} de 15°C

4.6 Influência do ΔT_{min} na otimização das metas de custo

Na seção 4.5 foram otimizadas as metas de custo para um ΔT_{min} de 15°C e para um ΔT_{min} de 25°C. Esses ΔT_{min} eram uniformes em todos os subgrupos.

Para $N_{max}=2$, por exemplo, as metas otimizadas de custo, para um ΔT_{min} de 25°C e para um ΔT_{min} de 15°C, eram respectivamente iguais a $\$2,921 \cdot 10^6$ e $\$2,719 \cdot 10^6$, correspondendo a uma diferença de aproximadamente 6% entre esses dois valores.

Ao se analisar essas metas de custo, surge uma questão interessante: dado um N_{max} qualquer, qual será o ΔT_{min} , uniforme em todos os subgrupos, que leva a um mínimo nas metas de custo? Para responder a pergunta, são otimizadas as metas de custo em função de vários ΔT_{min} , e não mais somente 15°C e 25°C.

Na figura 4.21 é indicada a influência do ΔT_{min} nas metas de custo otimizadas para o caso em que o número máximo de correntes por subgrupo é igual a dois.

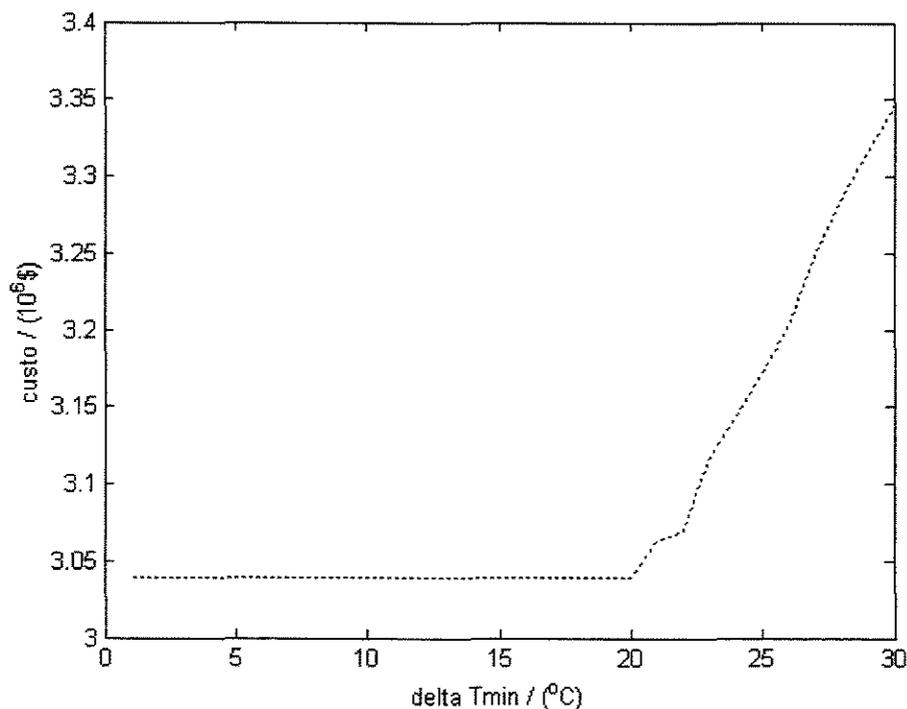


Figura 4.21 Influência do ΔT_{min} nas metas de custo otimizadas, com $N_{max}=2$

Pode ser observado nessa figura que as metas de custo ótimo são constantes até um ΔT_{min} de 20°C. Isso se deve ao fato de que todas as configurações nesse intervalo correspondem a Problemas Limite. Para um ΔT_{min} maior do que 20°C, as metas otimizadas de custo começam a aumentar consideravelmente.

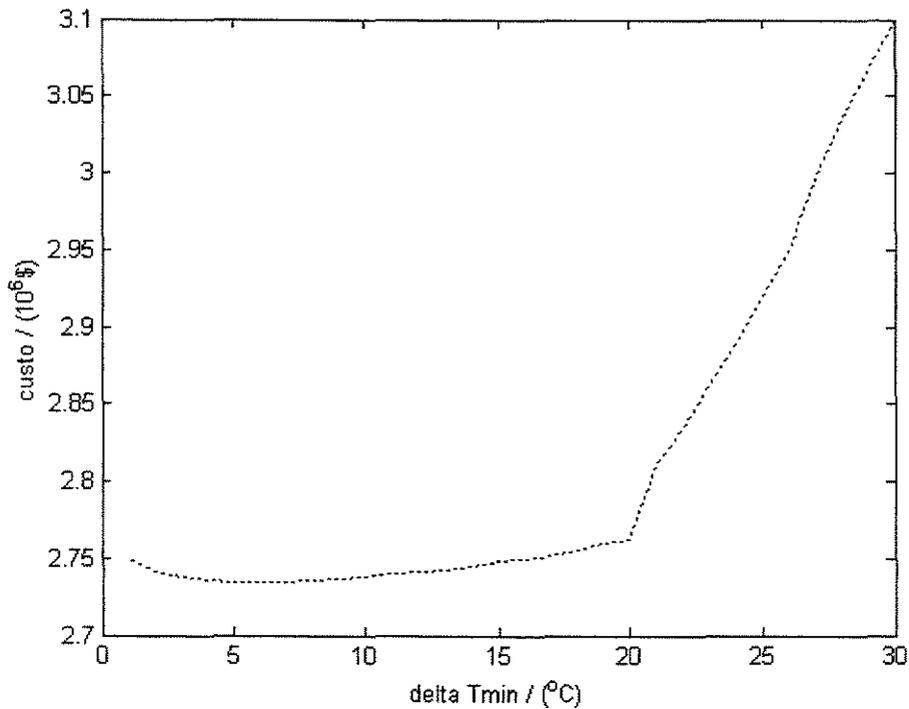


Figura 4.22 Influência do ΔT_{min} nas metas de custo otimizadas, com $N_{max}=3$

Na figura 4.22, é indicado o efeito do ΔT_{min} nas metas otimizadas de custo para $N_{max}=3$. Pode-se ver que o ΔT_{min} ótimo nesse caso fica próximo a 6°C. É importante ressaltar que a cada ΔT_{min} corresponde uma determinada configuração de correntes. Para 15°C e 25°, por exemplo, as configurações são respectivamente indicadas nas tabelas 3.8 e 4.14.

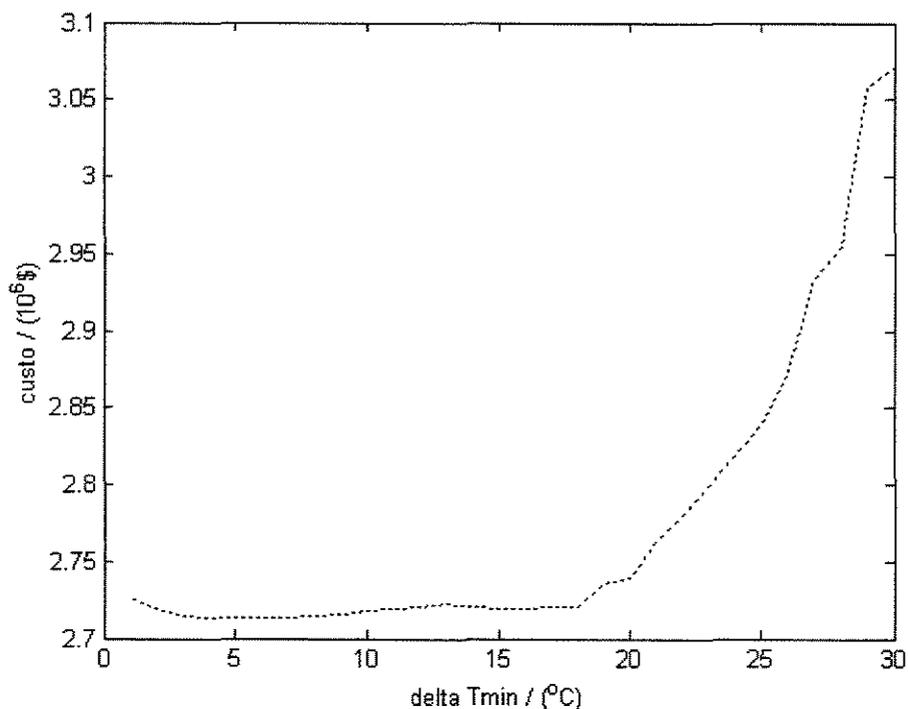


Figura 4.23 Influência do ΔT_{min} nas metas de custo otimizadas, com $N_{max}=4$

Na figura 4.23 observa-se a influência do ΔT_{min} nas metas otimizadas de custo para no máximo quatro correntes por subgrupo. O ΔT_{min} ótimo nessa situação corresponde a 5°C.

Obtêm-se iguais metas de custo tanto para $N_{max}=5$ como para $N_{max}=6$. Consequentemente, a influência de ΔT_{min} também será igual nos dois casos, como indicado na figura 4.24. O ΔT_{min} ótimo nessa situação corresponde a 14°C. Caso semelhante surge na figura 4.25, para $N_{max}=7$ e $N_{max}=8$.

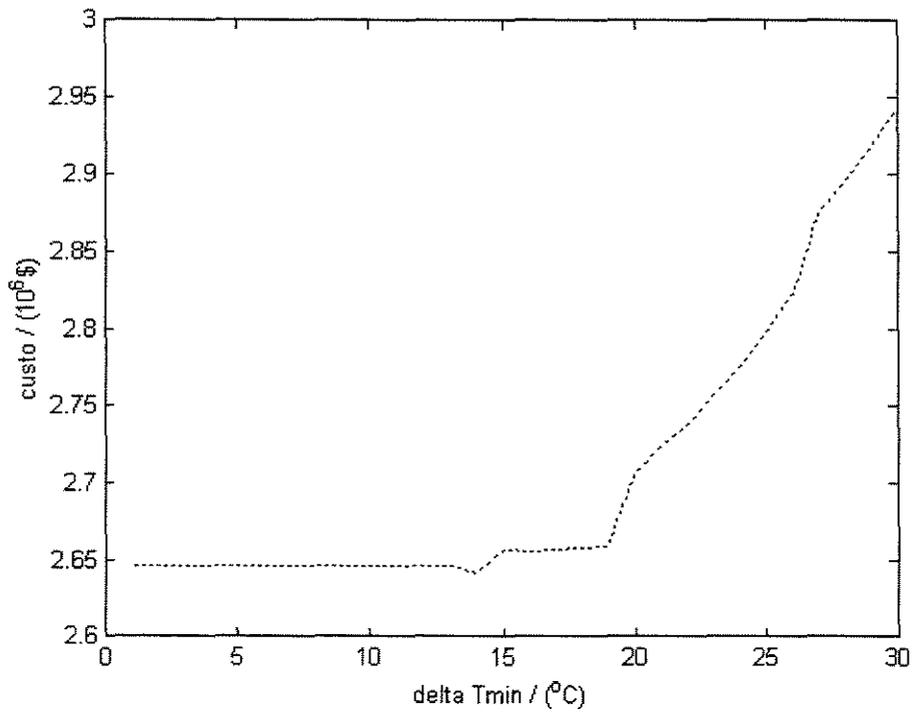


Figura 4.24 Influência do ΔT_{min} nas metas de custo otimizadas, com $N_{max}=5$ e $N_{max}=6$

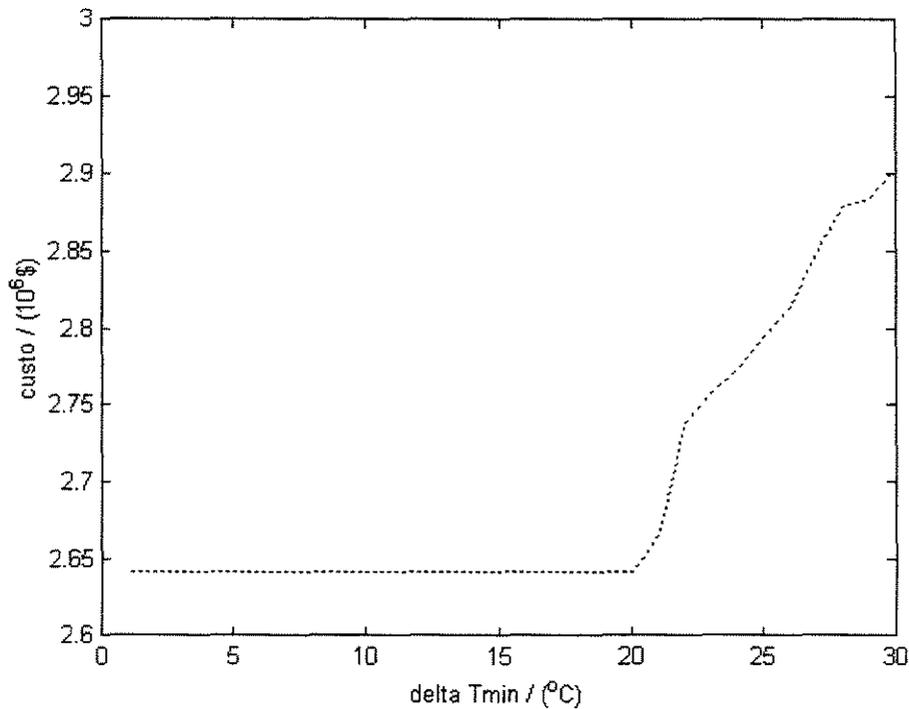


Figura 4.25 Influência do ΔT_{min} nas metas de custo otimizadas, com $N_{max}=7$ e $N_{max}=8$

Na figura 4.26 é representada a influência do ΔT_{min} nas metas otimizadas de custo quando $N_{max}=9$. A configuração correspondente até um ΔT_{min} de 20°C foi indicada na tabela 4.29.

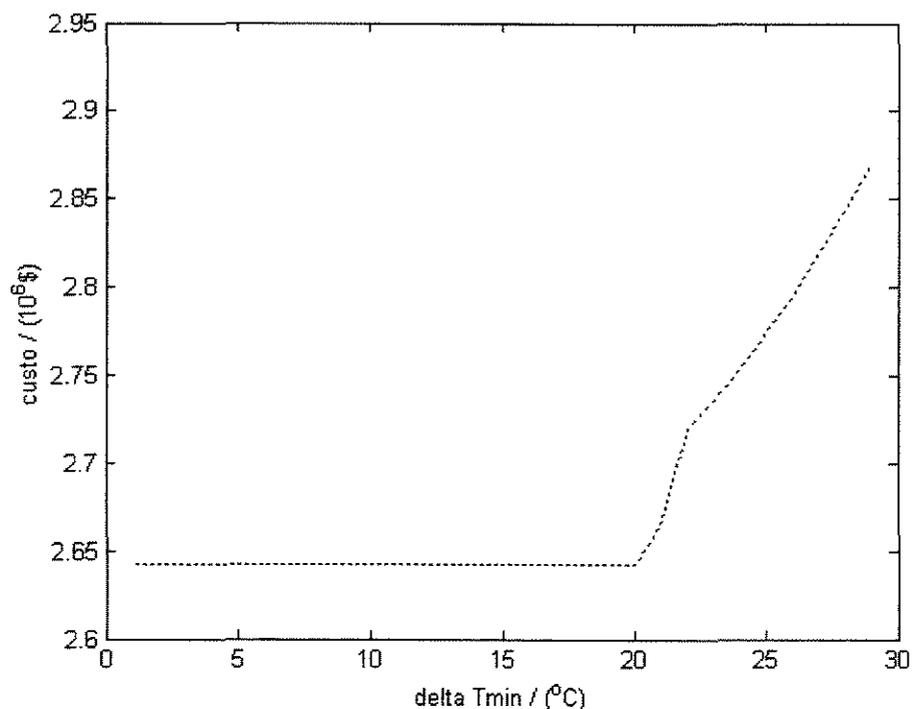


Figura 4.26 Influência do ΔT_{min} nas metas de custo otimizadas, com $N_{max}=9$

4.7 Otimização das metas de custo com ΔT_{min} variável

Nessa seção são otimizadas tanto as metas de custo como o ΔT_{min} nos subgrupos, ou seja, cada um deles terá seu ΔT_{min} específico. O tempo computacional para a resolução desse tipo de problema passa a ser considerável frente às outras otimizações realizadas até agora nesse trabalho.

Como o ΔT_{min} ótimo em cada subgrupo corresponde a uma faixa de temperaturas e não a um valor rigorosamente exato, conforme discutido na seção 4.2, é desnecessário haver precisão na busca desse valor. Para cada subgrupo é feita uma busca discreta, de 1°C em 1°C, do ΔT_{min} ótimo. As metas de custo são dadas então pela soma das metas de custo de cada subgrupo, cada um com seu ΔT_{min} .

Limitando-se o número máximo de correntes a duas por subgrupo e otimizando-se as metas de custo e o ΔT_{min} em cada subgrupo, chega-se à configuração de correntes representada na tabela 4.31, idêntica àquela representada na tabela 4.14. A rede de trocadores correspondente é indicada na figura 4.14.

Tabela 4.31 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=2$, com um ΔT_{min} ótimo em cada subgrupo, que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes		ΔT_{min} ótimo
1	1	2	até 27°C
2	4	6	até 20°C
3	3	9	até 34°C
4	7	8	até 22°C
5	5		-
Metas de custo / (10^6 \$)	3,039		

Nos subgrupos 1, 2, 3 e 4, há consumo somente de um tipo de utilidade até o ΔT_{min} ótimo indicado. Nesse caso as metas de custo são constantes até se atingir essa temperatura.

Fazendo-se $N_{max}=3$ e otimizando as metas de custo e o ΔT_{min} em cada subgrupo, obtém-se a configuração representada na tabela 4.32, idêntica à configuração representada na tabela 4.23.

Tabela 4.32 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=3$, com um ΔT_{min} ótimo em cada subgrupo, que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes			ΔT_{min} ótimo
1	7	3	8	6°C
2	6	4		até 27°C
3	9	5		até 20°C
4	2	1		até 30°C
Metas de custo / (10^6 \$)	2,735			

A rede de trocadores de calor indicada na figura 4.27, sintetizada em função da configuração acima, é bastante semelhante à rede de trocadores indicada na figura 4.15, alteraram-se somente algumas cargas térmicas e algumas temperaturas. A otimização do

ΔT_{min} em cada subgrupo, com $N_{max}=3$, proporciona uma redução nas metas de custo de 7% e de 0,5%, respectivamente, em relação às metas de custo indicadas nas tabelas 3.8 e 4.23. Esse resultados sugerem que de fato é interessante se escolher um ΔT_{min} adequado em cada subgrupo.

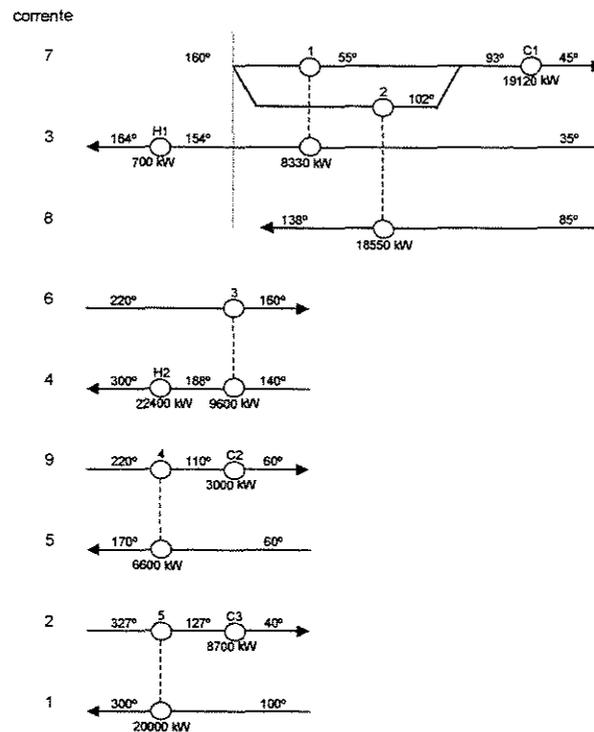


Figura 4.27 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo para $N_{max}=3$, com um ΔT_{min} ótimo em cada subgrupo

As metas de custo da rede anterior têm um desvio de somente 0,2% em relação ao custo calculado da citada rede.

Limitando-se agora o número máximo de correntes por subgrupo a quatro e otimizando-se tanto as metas de custo como o ΔT_{min} em cada subgrupo, chega-se à configuração representada na tabela 4.33.

Tabela 4.33 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$, com um ΔT_{min} ótimo em cada subgrupo, que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes				ΔT_{min} ótimo
1	7	3	8		6°C
2	6	9	5	4	20°C
3	2	1			até 27°C
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	2,699				

A síntese de uma rede típica, em função da configuração anterior e dos ΔT_{min} ótimos em cada subgrupo, é indicada na figura 4.28. As metas de custo, em relação a essa rede, desviam-se somente em 0,6%.

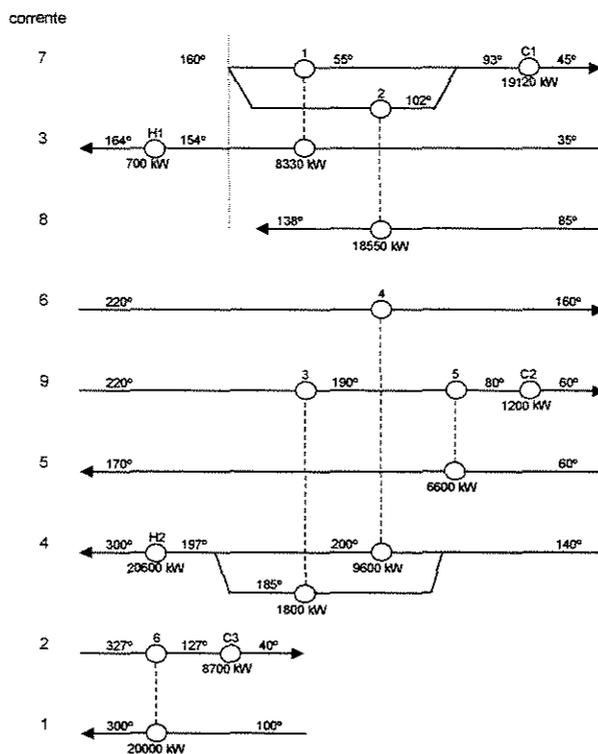


Figura 4.28 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo para $N_{max}=4$, com um ΔT_{min} ótimo em cada subgrupo

Quando se limita o número máximo de correntes a cinco por subgrupo e otimizam-se as metas de custo e cada um dos ΔT_{min} , obtém-se a configuração representada na tabela 4.34.

Tabela 4.34 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=5$, $N_{max}=6$, $N_{max}=7$, $N_{max}=8$ e $N_{max}=9$, com um ΔT_{min} ótimo em cada subgrupo, que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes					ΔT_{min} ótimo
1	2	7	1	3	8	até 14°C
2	6	9	5	4		20°C
Metas de custo / (10 ⁶ \$)	2,631					

Na figura 4.30 é sugerida uma rede de trocadores de calor sintetizada em função da configuração acima. As metas de custo para a rede abaixo têm um erro de 1,5%.

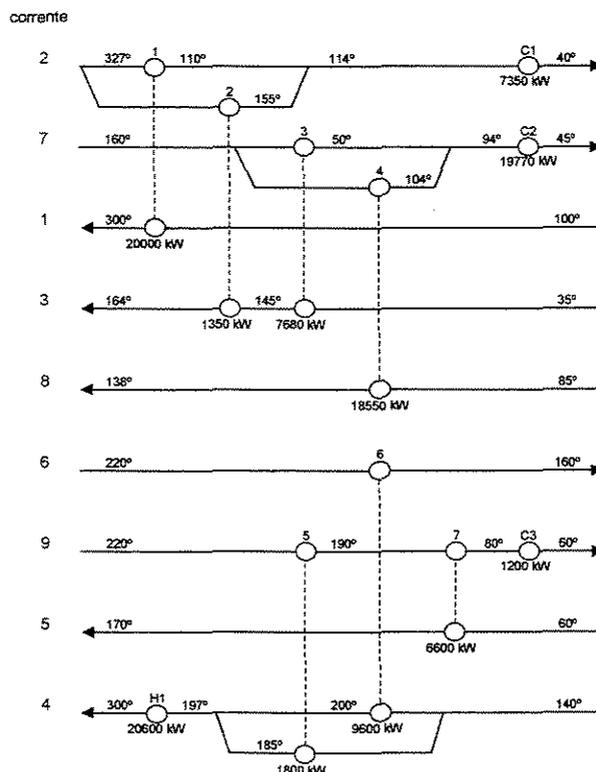


Figura 4.29 Rede de trocadores de calor que leva a um mínimo custo para $N_{max}=5$, $N_{max}=6$, $N_{max}=7$, $N_{max}=8$ e $N_{max}=9$, com um ΔT_{min} ótimo em cada subgrupo

A configuração indicada na tabela 4.34 leva a um mínimo nas metas de custo tanto para $N_{max}=5$ como para $N_{max}=6$, $N_{max}=7$, $N_{max}=8$ e $N_{max}=9$. É interessante notar que plantas complicadas do ponto de vista operacional, como aquelas representadas nos diagramas de grade das figuras 4.19 e 2.15, ainda têm metas de custo mais elevada do que quando as correntes estão integradas em subgrupos independentes, como aquela representada na figura 4.23.

4.8 Conclusões

A metodologia de decomposição das correntes de um processo em subgrupos independentes foi aplicada à planta de aromáticos para otimizar metas de consumo de energia, área ou custo da rede de trocadores. A influência do ΔT_{min} nas metas de energia, área e custo foi discutida na seção 4.2. Nessa seção também se falou a respeito dos Problemas Limite ou *Threshold Problems*, que se caracterizam por apresentar um consumo de utilidades constante até um determinado valor de ΔT_{min} .

As configurações de correntes que levaram a um mínimo nas metas de área, sem levar em conta o consumo de energia e independentemente do N_{max} , eram constituídas por subgrupos em que somente existiam correntes quentes ou somente correntes frias, fazendo com que todas as correntes tivessem suas necessidades energéticas supridas por utilidades. Isso resultava numa grande força motriz em cada trocador de calor e, conseqüentemente, numa área pequena de troca térmica.

Foram minimizadas as metas de energia para um ΔT_{min} de 25°C e um ΔT_{min} de 15°C. A integração de muitas correntes num subgrupo tende a gerar redes de trocadores complexas e que não são muito mais eficientes energeticamente do que redes sintetizadas a partir de subgrupos com um número reduzido de correntes (figura 4.7 e tabela 4.10). Os fluxogramas representados nas figuras 1.3 e 1.4 são um exemplo disso. A maioria das configurações que levavam a um mínimo nas metas de energia também levavam a um mínimo nas metas de custo. Isso é explicado pelo fato de que, para essa rede (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989), o custo com energia era mais acentuado do que o custo com área de troca térmica. Na seção 4.6 estudou-se a influência de um ΔT_{min} , uniforme em todos os subgrupos, sobre as metas otimizadas de custo e observou-se que a escolha adequada do

ΔT_{min} pode trazer economia nessas metas (figuras 4.21 a 4.26). Na seção 4.7 as metas de custo foram otimizadas para um ΔT_{min} variável, ou seja, cada subgrupo passou a ter seu ΔT_{min} específico.

Na tabela 4.35 são expressos os principais resultados da otimização das metas de custo, para um ΔT_{min} fixo de 15°C e 25°C, para um ΔT_{min} ótimo e uniforme em todos os subgrupos e também para um ΔT_{min} ótimo e variável em cada um dos subgrupos.

Tabela 4.35 Influência do número máximo de correntes por subgrupo e do ΔT_{min} nas metas de custo otimizadas

N_{max}	Metas de custo / (10^6 \$)			
	ΔT_{min} de 15°C	ΔT_{min} de 25°C	ΔT_{min} uniforme	ΔT_{min} variável
2	3,039	3,173	3,039	3,039
3	2,748	2,921	2,735	2,735
4	2,719	2,839	2,714	2,699
5	2,657	2,798	2,646	2,631
6	2,657	2,798	2,646	2,631
7	2,642	2,793	2,642	2,631
8	2,642	2,793	2,642	2,631
9	2,642	2,775	2,642	2,631

Para algumas das configurações implícitas na tabela anterior, foram sugeridas redes de trocadores, construídas de acordo com regras da Tecnologia *Pinch*. Em todos os casos as metas de custo tiveram um desvio inferior a 2% em relação aos custos dessas redes. Isso significa que é possível se determinar um valor bastante preciso do custo de uma rede de trocadores de calor sem que o projeto da mesma tenha sido executado.

Pode-se observar na tabela 4.35 que, independentemente do ΔT_{min} , a redução nas metas de custo não é tão significativa conforme se aumenta o N_{max} . Uma das conseqüências desse fato é que um aumento na complexidade da rede provavelmente não é justificado pela pequena diminuição nas metas de custo.

A otimização do ΔT_{min} , seja ele uniforme ou variável nos subgrupos, pode trazer redução nas metas de custo. Para $N_{max}=4$, por exemplo, as metas de custo, com um ΔT_{min} de 25°C, sofrem uma redução de 7% quando o ΔT_{min} é variável e otimizado em cada um dos subgrupos.

As metas de custo previstas quando se realiza a otimização com um ΔT_{min} variável são ligeiramente menores do que quando se faz a otimização com um ΔT_{min} uniforme nos subgrupos. Entretanto, o tempo computacional requerido é consideravelmente maior.

Quanto maior o número de correntes integradas num mesmo subgrupo, maior a tendência desses subgrupos darem origem a redes de trocadores complexas. Algumas vezes, é possível se obter redes mais simples, e ainda com menor custo do que redes obtidas através da integração de muitas correntes (figuras 4.18 e 4.19 e tabela 4.30).

Capítulo 5 - Decomposição com restrições

5.1 Introdução

Até agora, nessa tese, supôs-se que qualquer corrente quente poderia, a princípio, ser associada com qualquer corrente fria, desde que houvesse uma diferença de temperatura viável entre as mesmas.

Entretanto, freqüentemente existem restrições operacionais que impedem algumas associações. Poderia ser o caso, por exemplo, de duas correntes que são integradas num trocador de calor e, havendo vazamento, as duas correntes entrariam em contato resultando numa condição inaceitável em termos de segurança. Nesse caso, não há dúvida de que a associação dessas duas correntes deveria ser evitada, ou seja, haveria uma restrição.

Uma outra razão para uma restrição seria o caso em que duas correntes não estão perto uma da outra, levando a penalidades em termos de bombeamento e tubulação. Problemas de controle, partida e parada de planta também normalmente exigem restrições.

Outra razão também bastante comum para impor restrições é quando existem áreas de integridade no processo (Ahmad S. e Hui D.C.W., 1991). Exemplos de áreas de integridade seriam a “área de reação” e a “área de separação” do processo. Essas áreas são separadas umas das outras devido a razões tais como partida e parada de planta, flexibilidade operacional, segurança, etc. Normalmente essas áreas são independentes umas das outras (Ahmad S. e Hui D.C.W., 1991) e, para o serem, não podem trocar calor entre si.

Amidpour S. e Polley G. T. (1997) introduziram o conceito de decomposição na análise de integração de processos. Nesse enfoque, um problema global de integração energética é decomposto em subproblemas de acordo com o fluxograma do processo. A integração das correntes é restrita às áreas de integridade. Num outro artigo, Amidpour S. e Polley G. T. (1994) discutiram restrições devido a bombeamento e sugeriram que correntes problemáticas nesse aspecto, tais como misturas bifásicas, não devem ser transferidas de suas áreas de integridade.

Polley G.T. e Heggs P.J. (1999) propuseram uma metodologia para a decomposição das correntes em diferentes subgrupos, como discutido no capítulo 3. Ao

decompor o problema global dessa maneira, tem-se no final redes de trocadores “locais” em termos de operação, ou seja, são respeitadas as zonas de integridade. Nessa metodologia, as restrições são impostas ao não se colocar num mesmo subgrupo correntes que não possam ser associadas.

Nesse capítulo é proposto um enfoque matemático no qual as restrições são colocadas diretamente na função objetivo, como discutido mais adiante. Dessa maneira, pode-se fazer com que duas ou mais correntes não pertençam ao mesmo grupo ou obrigar que as mesmas estejam no mesmo subgrupo, mantendo áreas de integridade, por exemplo.

5.2 Penalidades na associação de correntes

A imposição de restrições na associação de correntes é simples de ser implementada no *Simulated Annealing*. Essas restrições podem ser colocadas diretamente na função objetivo a ser minimizada, na forma de penalidades. Esse enfoque dá uma grande flexibilidade à metodologia.

São otimizadas nesse capítulo metas de custo sujeitas a restrições. As metas de custo são função da configuração de correntes e do ΔT_{min} em cada um dos subgrupos, como foi mostrado anteriormente.

A configuração representada abaixo na tabela 5.1, idêntica à configuração indicada na tabela 4.16, com $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} uniforme de 25°C , leva a um mínimo nas metas de custo.

Tabela 5.1 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$ e ΔT_{min} fixo de 25°C que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes			
1	6	9	3	4
2	7	8	5	
3	2	1		
Metas de custo / (10^6 \$)	2,839			

E, se por determinado motivo, seja de segurança, seja operacional ou qualquer outro, as correntes 1 e 2 não pudessem ser integradas no mesmo subgrupo? Qual

configuração de correntes, tendo em conta essa restrição, levaria a um mínimo nas metas de custo?

O *Simulated Annealing* foi aplicado na resolução dessas questões com uma pequena modificação. Sempre que as correntes 1 e 2 estivessem no mesmo subgrupo, seria somada na função objetivo uma penalidade. O valor dessa penalidade é ditado pelo tipo de restrição que existe nessa associação. Uma restrição devido ao *layout*, por exemplo, acarreta num maior custo devido a bombeamento e tubulação e pode ser incluído diretamente na função objetivo todas as vezes que as correntes 1 e 2 estivessem no mesmo subgrupo. Uma restrição mais séria, devido a problemas com segurança, por exemplo, resultaria na inclusão de uma penalidade muito grande na função objetivo, de modo que provavelmente se torna inviável as correntes 1 e 2 estarem no mesmo subgrupo. Na figura 5.1 é indicada a influência de penalidades, tendo como restrição a associação das correntes 1 e 2, nas metas de custo com $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} fixo de 25°C.

Pode ser observado na figura 5.1 que conforme se aumentam as penalidades, aumenta-se o valor das metas de custo. Entretanto, para penalidades maiores do que $\$0,078 \cdot 10^6$, as metas de custo permanecem constantes e iguais a $\$2,917 \cdot 10^6$. Isso é explicado pelo fato de que o sistema não aceita uma penalidade maior do $\$0,078 \cdot 10^6$ e se reconfigura, não permitindo que as correntes 1 e 2 estejam no mesmo subgrupo. A nova configuração é indicada na tabela 5.2. Vê-se que as correntes 1 e 2 realmente não pertencem ao mesmo subgrupo.

Tabela 5.2 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$ e ΔT_{min} fixo de 25°C, com restrição na associação das correntes 1 e 2, que leva a um mínimo nas metas de

custo

Subgrupo	Correntes			
1	6	7	1	8
2	2	3	4	
3	9	5		
Metas de custo / (10^6 \$)	2,917			

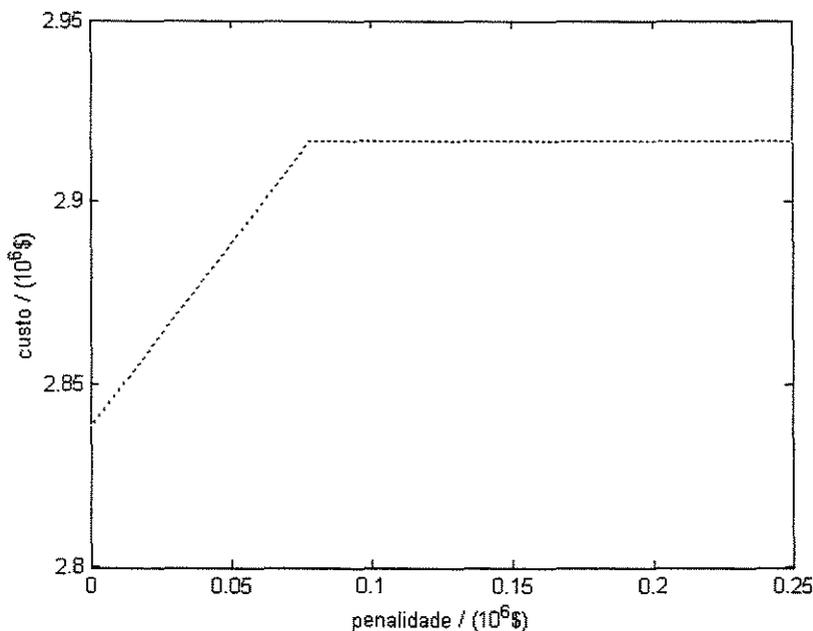


Figura 5.1 Influência de penalidades nas metas de custo com $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} fixo de 25°C tendo como restrição a associação das correntes 1 e 2

Em função da configuração indicada na tabela 5.2, foi sugerida a rede de trocadores de calor representada na figura 5.2. As metas de custo para essa rede tiveram um erro de 1,8%.

E se houvesse restrição na associação das correntes 7 e 8, também com $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} fixo de 25°C? Nesse caso, a influência das penalidades é indicada na figura 5.3. Há um aumento na função objetivo para penalidades menores do $\$0,668 \cdot 10^6$, significando que a configuração do sistema se mantém igual até esse valor. Quando esse limite é ultrapassado, o sistema se reconfigura, não permitindo a integração das correntes 7 e 8 no mesmo subgrupo, e as metas de custo permanecem constantes e iguais a $\$3,507 \cdot 10^6$, como indicado na tabela 5.3.

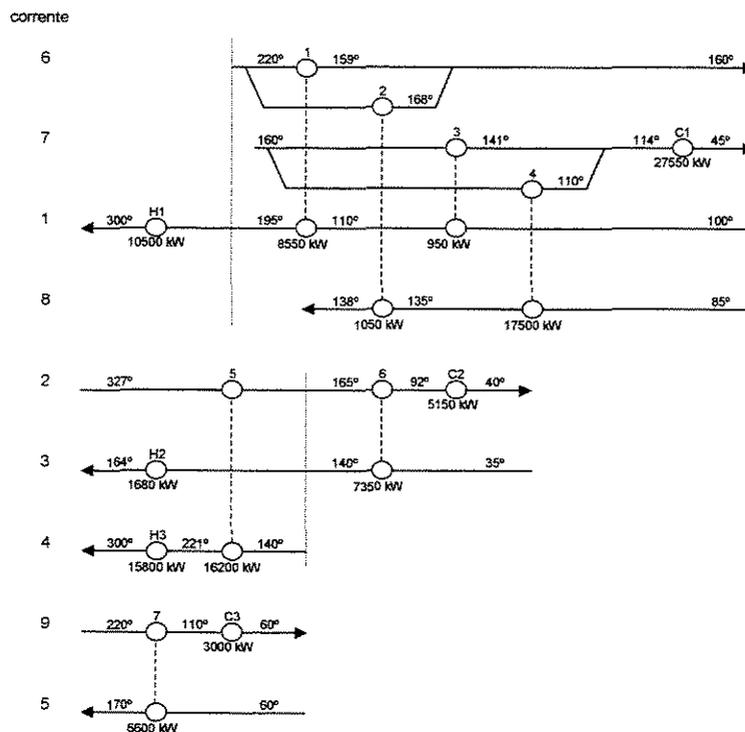


Figura 5.2 Rede de trocadores de calor típica sintetizada em função da configuração indicada na tabela 5.2

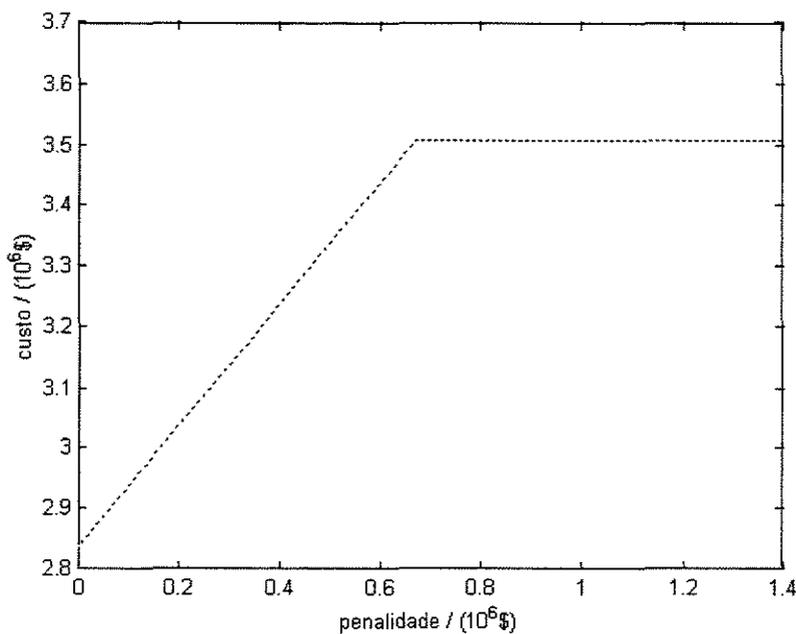


Figura 5.3 Influência de penalidades nas metas de custo com $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} fixo de 25°C tendo como restrição a associação das correntes 7 e 8

Tabela 5.3 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$ e ΔT_{min} fixo de 25°C , com restrição na associação das correntes 7 e 8, que leva a um mínimo nas metas de

custo

Subgrupo	Correntes			
1	2	9	8	4
2	7	3	5	
3	6	1		
Metas de custo / (10^6 \$)	3,507			

Em função da configuração indicada na tabela 5.3, foi sugerida a rede de trocadores de calor representada na figura 5.4. As metas de custo para essa rede tiveram um erro de 0,5%.

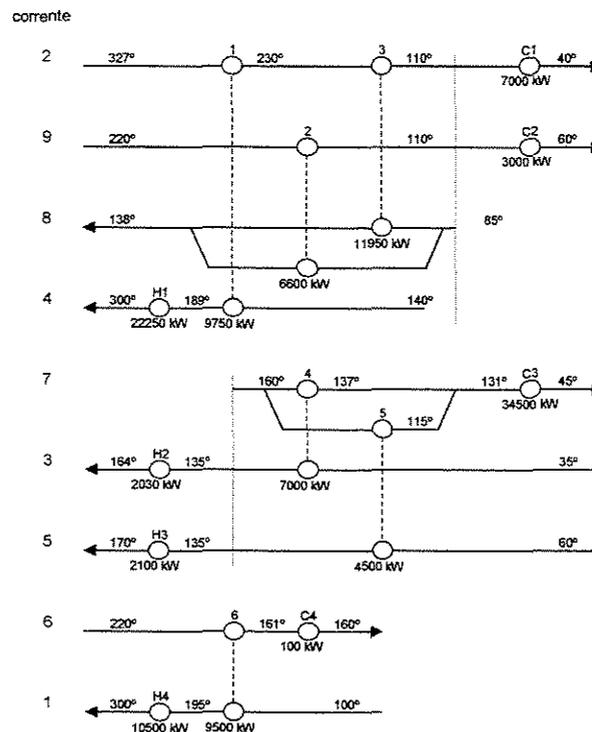


Figura 5.4 Rede de trocadores de calor típica sintetizada em função da configuração indicada na tabela 5.3

Poderia surgir uma situação, por exemplo, em que houvesse restrição na associação das correntes 7 e 8 e também houvesse restrição na associação das correntes 5 e

7. Nesse caso, a configuração que leva a um mínimo nas metas de custo, levando em conta essas restrições e um ΔT_{min} fixo de 25°C, com $N_{max}=4$, é indicada na tabela 5.4.

Tabela 5.4 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$ e ΔT_{min} fixo de 25°C, com restrição na associação das correntes 7 e 8 e também das correntes 5 e 7, que leva a um mínimo nas metas de custo

Subgrupo	Correntes			
1	2	6	8	4
2	7	1	3	
3	9	5		
Metas de custo / (10^6 \$)	3,527			

Em função da configuração indicada na tabela 5.4, foi sugerida a rede de trocadores de calor representada na figura 5.5. As metas de custo para essa rede tiveram um erro de 0,7%.

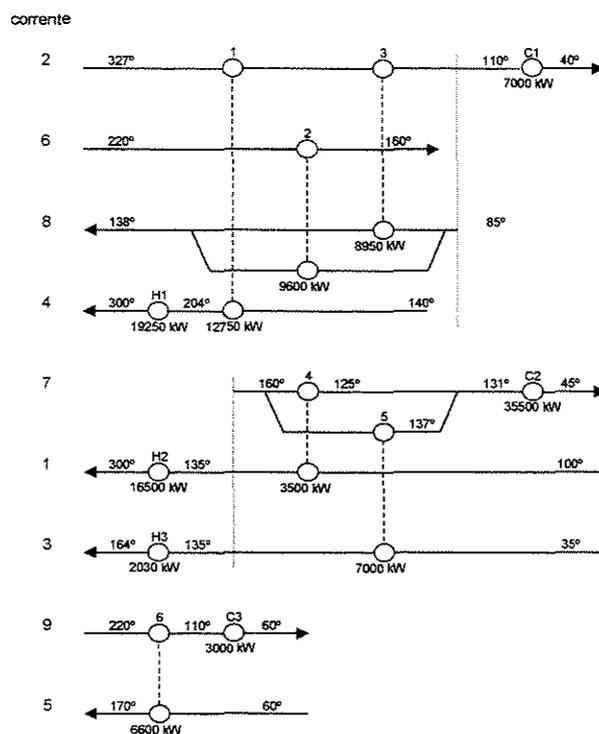


Figura 5.5 Rede de trocadores de calor típica sintetizada em função da configuração indicada na tabela 5.4

As restrições poderiam ser colocadas na forma de uma matriz, como indicado na tabela 5.5. Nesse exemplo, existem penalidades sérias na associação das correntes 7 e 8, e 5 e 7, e há penalidades mais leves na associação das correntes 1 e 2, e 4 e 9. Esse enfoque matemático é bastante flexível pois permite incluir no projeto da rede de trocadores aspectos operacionais e de segurança, valorizando a experiência do projetista, já que o mesmo pode determinar a ordem de grandeza de cada penalidade.

Tabela 5.5 Matriz de restrições na associação de correntes. O valor das penalidades aparece dividido por 10^6 \$

correntes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0,100	0	0	0	0	0	0	0
2		0	0	0	0	0	0	0	0
3			0	0	0	0	0	0	0
4				0	0	0	0	0	0,200
5					0	0	3,000	0	0
6						0	0	0	0
7							0	3,000	0
8								0	0
9									0

5.3 Favorecimento de associação de correntes

Foram discutidos na seção anterior casos em que havia restrição na associação de determinadas correntes num mesmo subgrupo.

Entretanto, em algumas situações é interessante que duas ou mais correntes estejam num mesmo subgrupo. Isso pode acontecer quando essas correntes estão próximas umas das outras, favorecendo uma integração local, que por sua vez traz benefícios em termos de bombeamento, operacionalidade e simplicidade da planta. Em realidade, as áreas de integridade são mantidas.

Na figura 5.6 (a) é indicado o comportamento de uma corrente que não possui coeficiente angular constante num diagrama $T \times \Delta H$. Nesse caso, é preciso linearizar a curva através de vários segmentos de reta (Linnhoff B. e colaboradores, 1982), como indicado na figura 5.6 (b), em que foram usados três segmentos. Um caso típico em que se precisa fazer a linearização dessa curva é quando há mudança de fase da corrente. Vê-se aí mais uma oportunidade para o uso do conceito de favorecimento: cada um dos segmentos lineares que compõem a corrente devem fazer parte de um mesmo subgrupo.

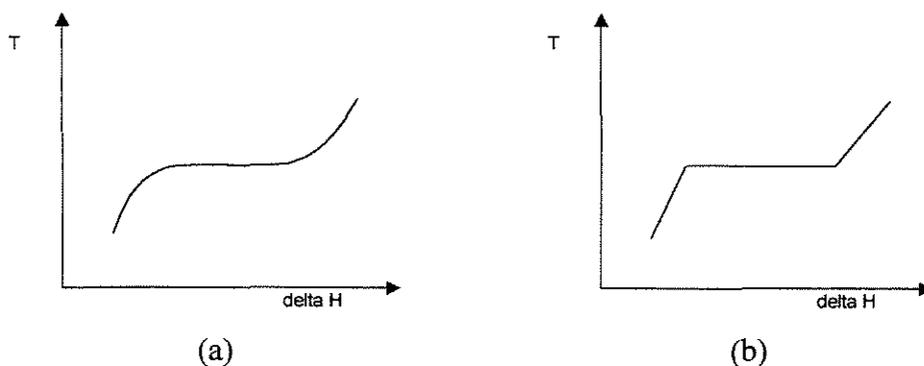


Figura 5.6 Diagrama $T \times \Delta H$ para uma corrente que apresenta variação no CP

Fazer com que duas correntes façam parte do mesmo subgrupo é simples através do *Simulated Annealing*. Toda vez que essas correntes estão juntas num subgrupo, subtrai-se determinado valor da função objetivo. Dessa maneira, quando se faz a otimização, a tendência dessas correntes é sempre permanecer no mesmo subgrupo. Quando se atinge a configuração final, que corresponde a um mínimo, é somado o valor que inicialmente havia sido subtraído, já que na verdade não houve uma redução real na função objetivo, mas sim uma redução que foi matematicamente imposta.

Quando é feita a otimização das metas de custo com $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} fixo de 25°C , chega-se à configuração indicada na tabela 5.1. E se fosse interessante manter num mesmo subgrupo as correntes 2 e 3, por exemplo? Nesse caso, a configuração que leva a um mínimo custo mantendo as correntes 2 e 3 juntas é representada na tabela 5.6. Analisando-se as tabelas 5.1 e 5.6, pode-se observar que houve apenas um ligeiro aumento nas metas de custo.

Tabela 5.6 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$ e ΔT_{min} fixo de 25°C , que leva a um mínimo nas metas de custo favorecendo-se a integração das correntes

2 e 3

Subgrupo	Correntes			
1	9	7	8	5
2	2	1	3	
3	6	4		
Metas de custo / (10^6 \$)	2,903			

Foi sugerida uma rede de trocadores de calor, indicada na figura 5.7 e sintetizada em função da configuração representada na tabela 5.6. As metas de custo para essa rede desviaram-se somente em 0,5%.

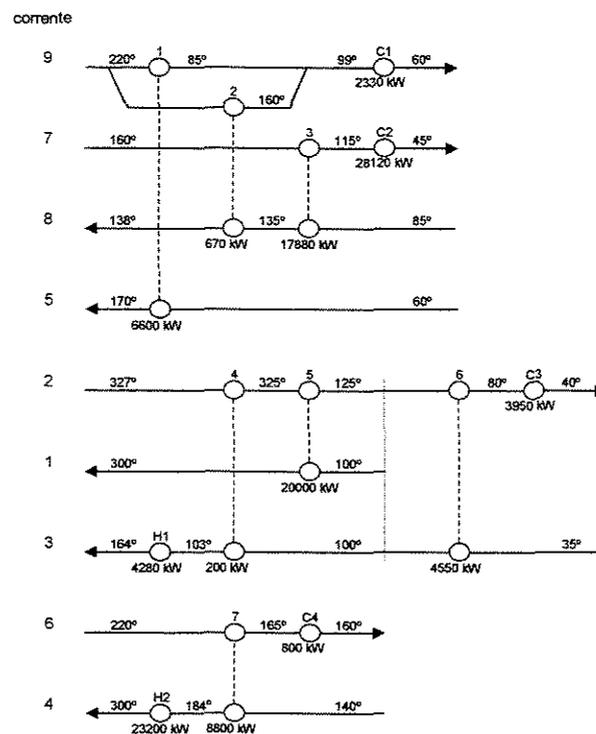


Figura 5.7 Rede de trocadores de calor típica sintetizada em função da configuração indicada na tabela 5.6

Supondo-se, por exemplo, que houvesse vantagem que as correntes 2 e 5 estivessem num mesmo conjunto, a configuração que leva a um mínimo nas metas de custo com $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} fixo de 25°C é indicada na tabela 5.7.

Tabela 5.7 Configuração de correntes da planta de aromáticos para $N_{max}=4$ e ΔT_{min} fixo de 25°C , que leva a um mínimo nas metas de custo favorecendo-se a integração das correntes

2 e 5

Subgrupo	Correntes			
1	6	9	3	4
2	2	1	5	
3	7	8		
Metas de custo / (10^6 \$)	2,879			

Na figura 5.8 é representada uma rede de trocadores típica, sintetizada em função da tabela 5.7, com $N_{max}=4$ e um ΔT_{min} fixo de 25°C . Em relação a essa rede, as metas de custo têm um erro de somente 1,4%.

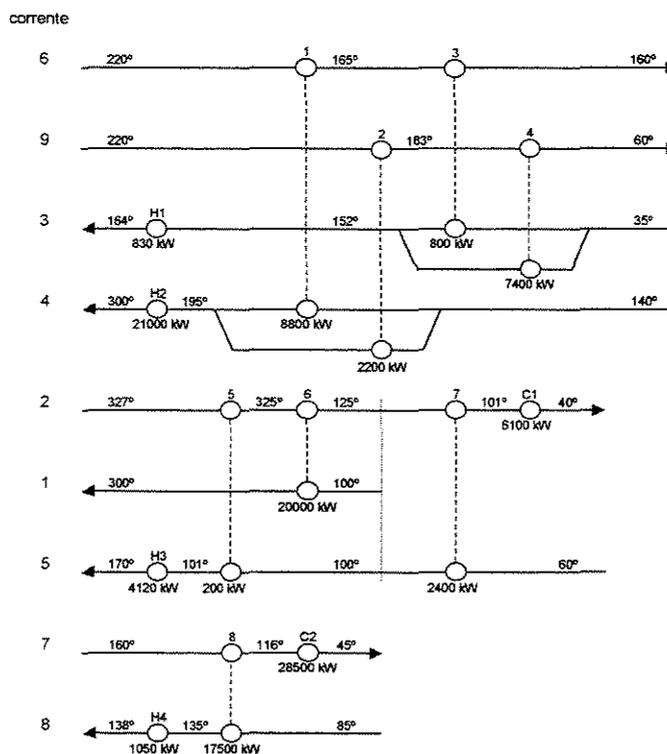


Figura 5.8 Rede de trocadores de calor típica sintetizada em função da configuração indicada na tabela 5.7

O conceito de matriz de restrições, apresentado na seção anterior, pode também ser aplicado para favorecer a reunião de correntes num mesmo conjunto. Dessa maneira, nessa

matriz, há a possibilidade de se incluir penalidades e favorecimentos, resultando numa grande flexibilidade.

5.4 Conclusões

Na síntese de uma rede de trocadores de calor, existem alguns aspectos operacionais importantes que devem ser levados em conta, tais como *layout*, questões de segurança, partida e parada da planta, etc. É recomendável se realizar integrações locais, mantendo áreas de integridade, pois isso propicia benefícios em termos de custo com bombeamento, operacionalidade e simplicidade da planta (Polley G. T. e Heggs P. J., 1999).

No capítulo 3 desse trabalho foi proposta uma técnica de decomposição a fim de se obter subgrupos independentes de correntes, que tendessem a gerar redes de trocadores de calor simples. Nesse capítulo a metodologia foi estendida, tendo como objetivo a possibilidade de incluir restrições na associação de correntes.

As restrições foram colocadas diretamente na função objetivo a ser minimizada. Quando se quer evitar que duas correntes façam parte de um mesmo subgrupo, atribui-se uma penalidade na função objetivo sempre que isso ocorrer. Dessa forma, é possível se colocar penalidades leves, devido a *layout*, por exemplo, ou penalidades mais severas, devido a questões de segurança, por exemplo.

Existem casos em que é interessante que duas ou mais correntes façam parte de um mesmo subgrupo para favorecer a integração local, mantendo áreas de integridade. Nessa situação, é atribuído na função objetivo um favorecimento. O conceito de favorecimento também é útil quando existem correntes que apresentam variação no *CP* e devem ser mantidas num mesmo subgrupo.

Foi sugerido o conceito de matriz de restrições, em que são colocadas quaisquer penalidades ou favorecimentos para que as correntes estejam ou não num mesmo subgrupo. Esse enfoque matemático é bastante flexível pois permite incluir no projeto da rede de trocadores aspectos operacionais e de segurança, valorizando a experiência do projetista, já que o mesmo pode determinar a ordem de grandeza de cada restrição.

Nesse capítulo foram mostrados alguns exemplos de penalidades e outros de favorecimentos para as correntes da planta de aromáticos. Em todos os exemplos foram sintetizadas redes de trocadores cujos custos totais desviaram-se em menos do que 2% em relação às metas estipuladas.

Capítulo 6 - Estudo de caso

6.1 Introdução

A aplicação das regras e procedimentos da Tecnologia *Pinch* pode levar a redes de trocadores complexas, como exemplificado no capítulo 1. Foi sugerida nesse trabalho uma metodologia para a decomposição das correntes de um processo em diferentes subgrupos independentes, a fim de se obter redes mais simples, como discutido no capítulo 3. No capítulo 4 foi enfocada a influência do número máximo de correntes por subgrupo nas metas otimizadas de energia, área e custo. Foi comentada também nesse capítulo a influência de um ΔT_{min} uniforme e de um ΔT_{min} variável nas metas de cada subgrupo. Na síntese de uma rede de trocadores, é importante levar em conta aspectos operacionais. Esse tema foi discutido no capítulo 5, em que se propôs incluir esses aspectos através de uma matriz de restrições.

Até esse ponto, para exemplificar toda a metodologia desenvolvida, tomou-se como exemplo uma planta de aromáticos (Ahmad S. e Linnhoff B., 1989), com 9 correntes de processo (tabela 1.1). Nesse capítulo, alguns pontos da técnica de decomposição são aplicados a uma unidade de fracionamento de óleo cru, com 24 correntes de processo.

6.2 Exemplo: unidade de fracionamento de óleo cru

O fracionamento de óleo cru em suas diferentes frações é uma operação comum em refinarias. Um fluxograma típico desse processo é representado, de forma simplificada, na figura 6.1 (Shokoya C. G., 1992).

Nota-se que nesse fluxograma não há integração energética entre as correntes de processo. O óleo cru é a principal corrente fria enquanto que as correntes que saem da coluna de destilação compõem as correntes quentes do processo. Além do óleo e dessas correntes quentes, existem outras 16 correntes que não foram representadas no fluxograma e que fazem parte do estudo de integração energética da planta. Na tabela 6.1 são indicados alguns dados para todas correntes desse processo (Shokoya C. G., 1992). Quando não há integração energética entre as correntes, o consumo de utilidade fria e quente é de

respectivamente 141500 kW e 156750 kW, calculado em função das variações de entalpia das correntes e indicado na tabela 6.2.

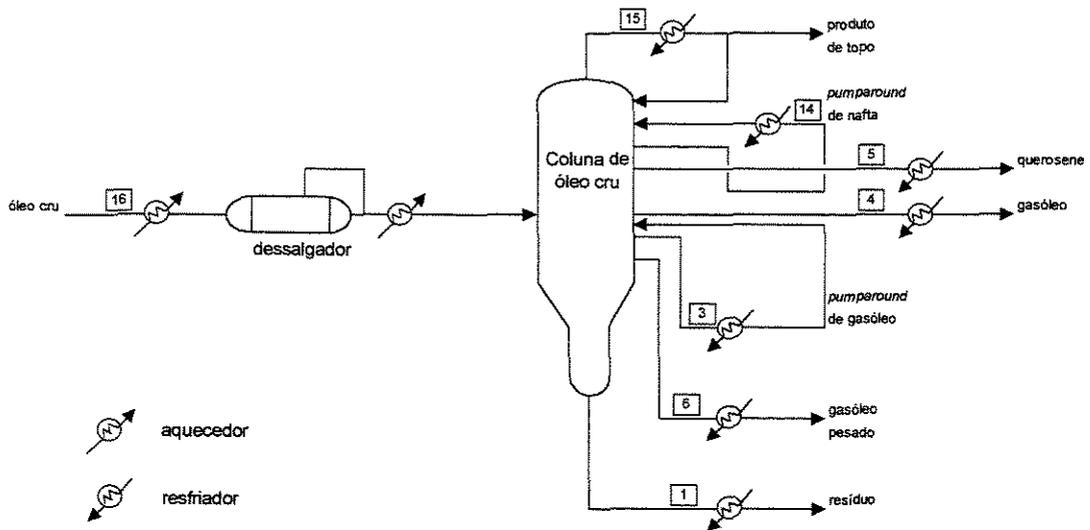


Figura 6.1 Fluxograma típico de uma unidade de fracionamento de óleo cru

Na figura 6.2 é indicada uma rede de trocadores de calor, reproduzida dos trabalhos de Shokoya C. G. (1992), para promover a integração energética entre as correntes anteriormente citadas. Segundo a autora, essa rede estava instalada numa refinaria do Reino Unido.

Tabela 6.1 Dados das correntes da unidade de fracionamento de óleo cru

corrente	tipo	$T_{entrada} / (^{\circ}\text{C})$	$T_{saída} / (^{\circ}\text{C})$	$CP / (\text{kW}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
1	quente	362	300	140
		300	250	136
		250	200	126
		200	150	108
		150	85	97
2	quente	85	65	17
3	quente	301	200	61
		200	150	55
		150	100	51
		100	38	41
4	quente	274	180	34
		180	90	29
		90	29	27
5	quente	252	180	158
		180	132	151
6	quente	345	290	20
		290	218	18
7	quente	223	150	24
		150	27	20
8	quente	115	47	59
9	quente	55	38	19
10	quente	71	55	303
11	quente	147	108	80
12	quente	64	46	194
13	quente	136	30	40
14	quente	154	145	171
		145	120	781
		120	100	483
15	quente	100	90	616
		90	42	73
16	fria	10	60	252
		60	120	267
		120	150	305
		150	170	315
		170	250	340
		250	372	485
17	fria	273	274	2465
18	fria	149	157	807
19	fria	115	125	424
20	fria	42	111	80
21	fria	43	136	40
22	fria	190	410	2
23	fria	90	93	519
24	fria	215	225	242

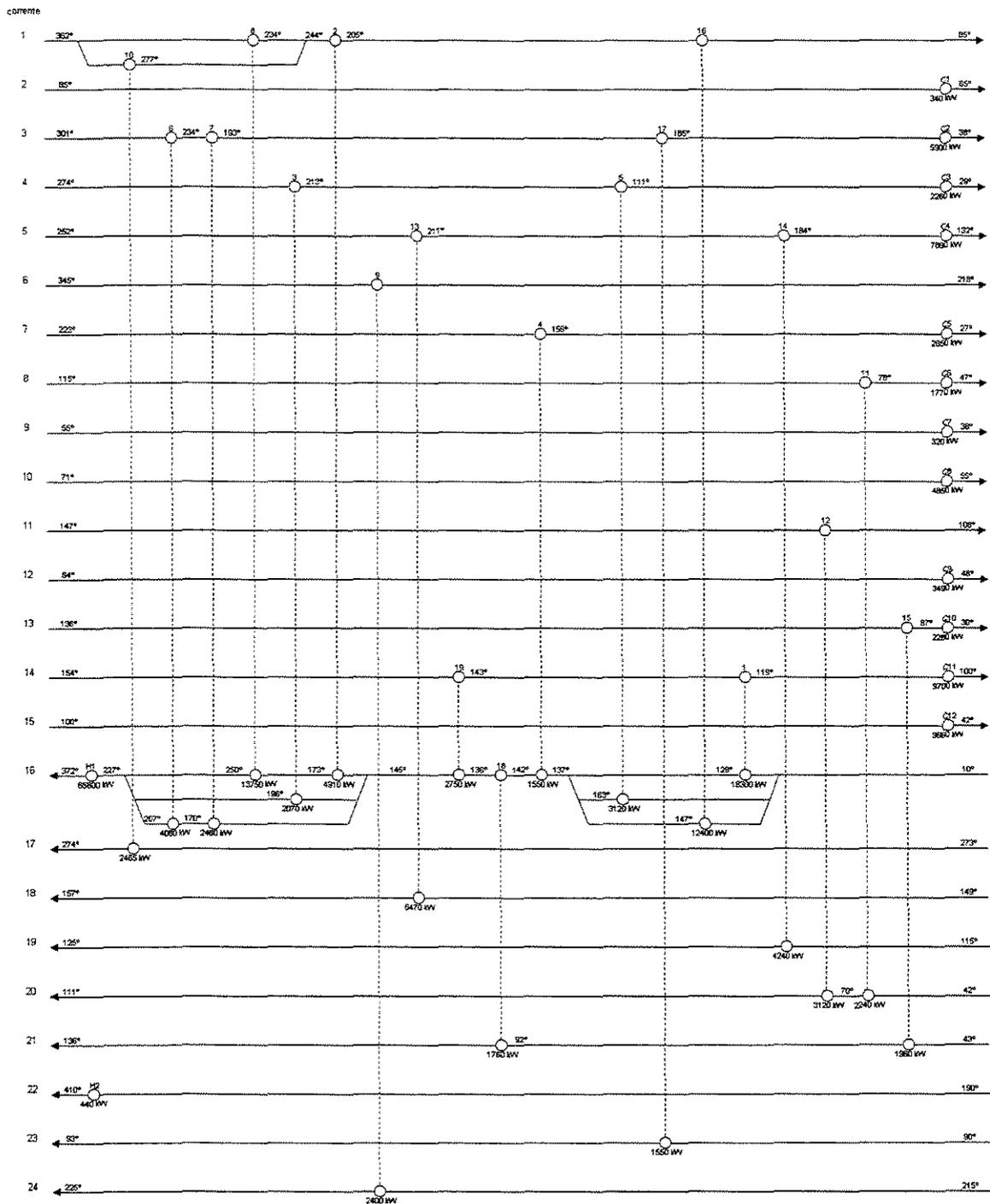


Figura 6.2 Rede de trocadores de calor para uma unidade de fracionamento de óleo cru

Vê-se que a rede de trocadores de calor indicada na figura 6.2, que opera com um ΔT_{min} de 4°C, é consideravelmente complexa. Além disso, o trocador de calor número 18 foi alocado de maneira inadequada, entre duas correntes frias. Na tabela 6.2 são indicados o consumo de utilidade quente e fria e o número de trocadores de calor para essa rede e

também para o caso em que todas as correntes têm suas necessidades energéticas supridas por utilidades. Pode-se observar que a planta indicada na figura 6.2 proporcionou uma economia de mais de 57% de utilidade quente.

Tabela 6.2 Consumo de energia e número de trocadores para a rede indicada na figura 6.2 e para o processo não integrado

	Processo não integrado	Rede indicada na figura 6.2
Q_C / kW	141500	51100
Q_H / kW	156750	66240
número de trocadores	24	33

6.3 Decomposição das correntes da unidade de fracionamento de óleo cru

Quando todas as correntes da planta de fracionamento foram integradas num único subgrupo, deram origem a uma rede de trocadores complexa, conforme se viu na figura 6.2.

A idéia dessa seção é decompor as correntes em subgrupos independentes, de modo a se obter redes simples e de fácil síntese, e que ainda sejam energeticamente eficientes.

Pode-se observar na tabela 6.1 que algumas das correntes da planta, como a corrente 16, de óleo cru, por exemplo, apresentam uma grande variação do CP em função da temperatura. Nesse caso, a corrente é tratada como se fosse composta de vários segmentos lineares, em que cada um deles possui CP constante, como comentado na seção 5.3. Raciocinando-se dessa maneira, pode-se considerar as 24 correntes da unidade de fracionamento como compostas por 44 segmentos lineares, como se pode observar na tabela 6.1 se forem contabilizados cada um dos intervalos de temperatura.

A decomposição em subgrupos passa a ser feita então para os segmentos que constituem as correntes, e não mais para as correntes. A restrição a ser aplicada é que todos os elementos que compõem uma corrente obrigatoriamente têm que estar num mesmo subgrupo, a fim de que a corrente seja mantida.

A influência do número máximo de segmentos por subgrupo nas metas otimizadas do consumo de utilidade quente é indicada na figura 6.3, para um ΔT_{min} uniforme de 4°C e com a restrição de que cada corrente esteja num único subgrupo.

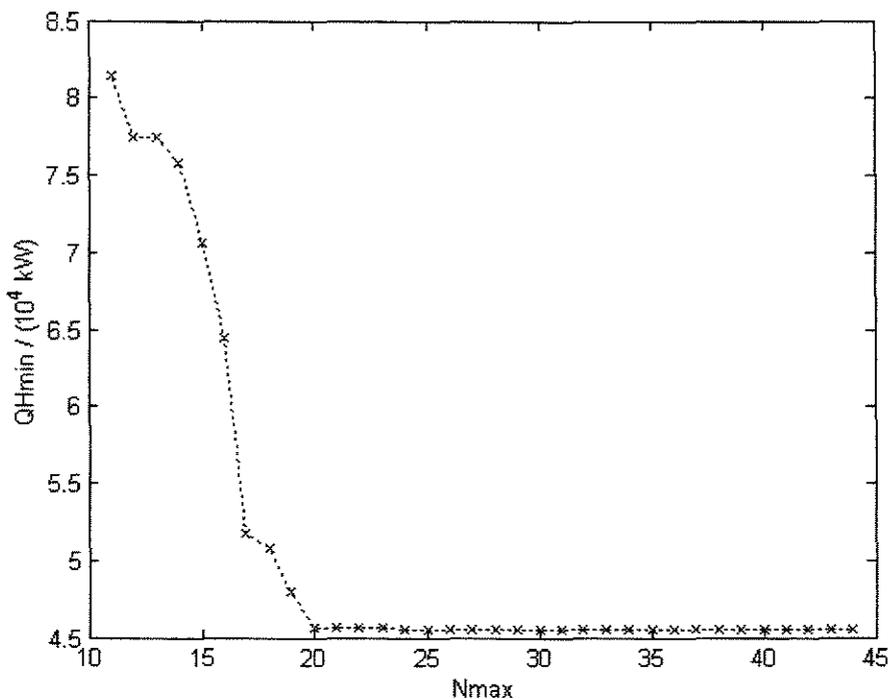


Figura 6.3 Influência do número máximo de segmentos que constituem uma corrente sobre as metas otimizadas do consumo de utilidade quente para um ΔT_{min} uniforme de 4°C

As correntes 1 e 16 são compostas de 5 e 6 segmentos, respectivamente, e são as que mais apresentam intervalos de temperatura em que o CP varia, como pode-se observar na tabela 6.1. Dessa maneira, não há sentido em se estudar N_{max} menor do que 11, já que se estaria impedindo a possível integração entre as correntes 1 e 16.

É importante notar que a integração total, com todas as correntes reunidas num mesmo subgrupo, não é vantajosa nesse caso pois Q_{Hmin} é constante desde N_{max} igual a 20 até N_{max} igual a 44.

O consumo de utilidade quente da planta indicada na figura 6.2 é de 66240 kW. Pode-se ver que a configuração que mais se aproxima desse consumo energético é quando $N_{max}=16$, correspondendo a um consumo mínimo de utilidade quente de 64500 kW. Esse

consumo é ligeiramente menor do que o da rede apresentada na figura 6.2. A configuração de correntes implícita quando $N_{max}=16$ é indicada na tabela 6.3.

Tabela 6.3 Configuração de correntes da unidade de fracionamento de óleo cru que leva a um Q_{Hmin} ótimo com um ΔT_{min} uniforme de 4°C

subgrupo	correntes										
1	1	14	7	16							
2	2	4	5	6	8	9	10	22	23	24	
3	3	11	12	13	15	17	18	19	20	21	
Metas de utilidade quente / kW	64500										
Metas de utilidade fria / kW	49155										

É sintetizada a seguir, na figura 6.4, uma rede de trocadores de calor baseada na configuração indicada na tabela 6.3.

Pode-se observar, na figura 6.2, que a corrente 16 é uma das mais problemáticas. Ela é inicialmente dividida em três partes, a fim de trocar calor com as correntes 14, 1 e 4. Em seguida, troca calor com a corrente 7, no trocador de calor número 4. Vai para o trocador 18, que está alocado entre duas correntes frias. Segue para o trocador 19 onde é associada com a corrente 14, novamente. Sofre nova divisão em três partes, em que troca calor com as correntes 1, 3 e 4, até sofrer um aquecimento final no aquecedor H1.

Analisando-se a corrente 16 na rede de trocadores representada na figura 6.4, a situação é completamente diferente. A corrente de óleo cru é inicialmente aquecida pela corrente 1 e em seguida pela corrente 14. Sofre em seguida uma divisão em duas partes e troca calor com as correntes 1 e 7. Antes de ir para a coluna de óleo cru, sofre um aquecimento final em H1.

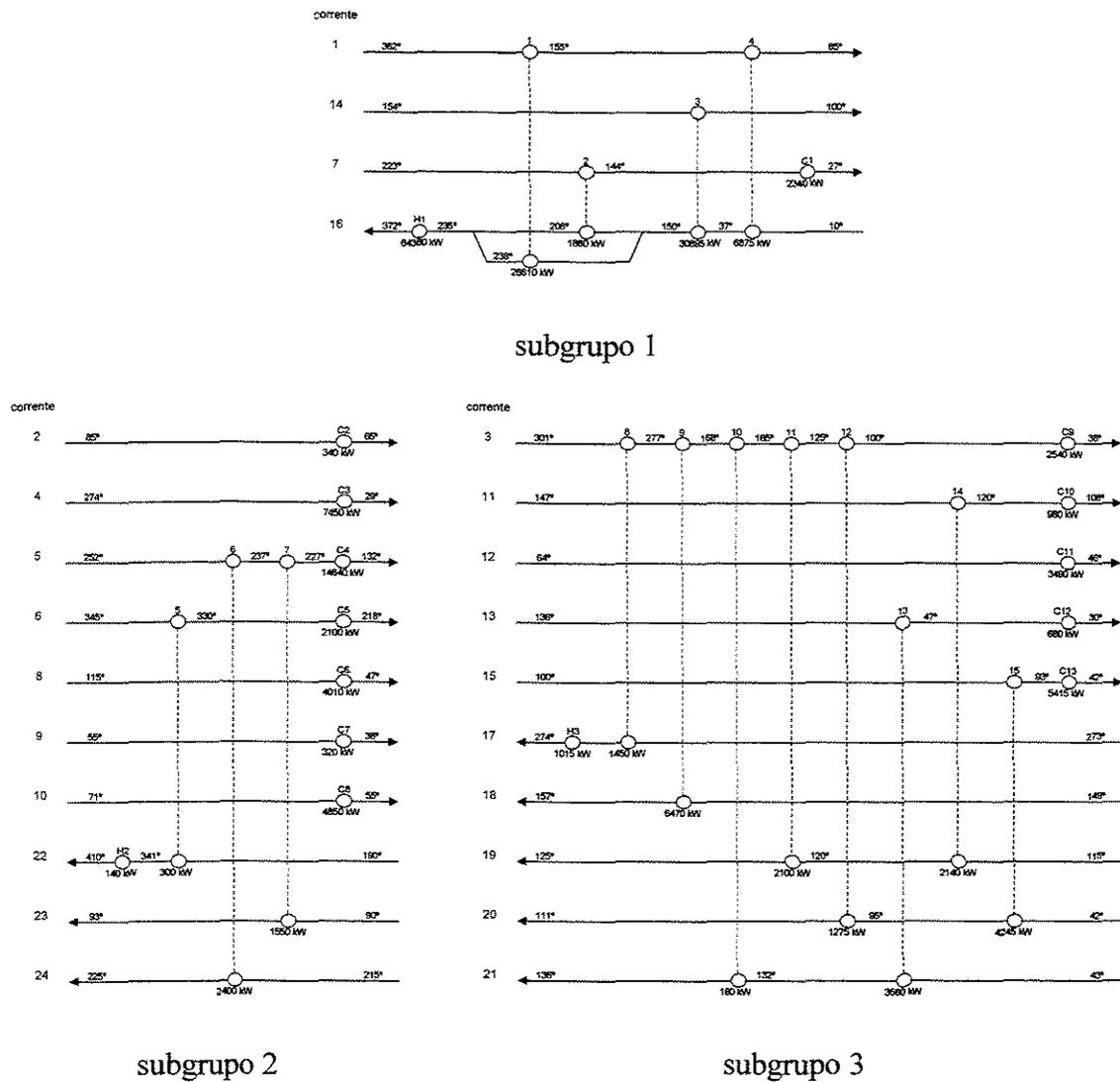


Figura 6.4 Rede de trocadores que leva a um mínimo consumo energético em função da configuração indicada na tabela 6.3, com um ΔT_{min} uniforme de 4°C

Em função da corrente 16, pode-se afirmar que a rede da figura 6.2 é consideravelmente mais complexa do que a rede da figura 6.4. Na tabela 6.4 são comparados o consumo energético e o número de trocadores para a rede indicada na figura 6.2 e para a rede indicada na figura 6.4, com as correntes decompostas em subgrupos. O balanço de energia é aproximado devido a alguns arredondamentos nos cálculos efetuados na rede da figura 6.2 (Shokoya C. G., 1992)

Tabela 6.4 Comparação do consumo de energia e número de trocadores para a rede de trocadores indicada na figura 6.2 e para a rede indicada na figura 6.4

	Processo não integrado	Rede indicada na figura 6.2	Rede indicada na figura 6.4
Q_C / kW	141500	51100	49155
Q_H / kW	156750	66240	64500
número de trocadores	24	33	31

6.4 Conclusões

Nesse capítulo alguns aspectos da técnica de decomposição foram aplicados a uma unidade de fracionamento de óleo cru, com 24 correntes de processo, das quais muitas apresentavam variação do CP em função da temperatura (tabela 6.1). Em função dessa variação, as correntes passaram a ser tratadas como se fossem compostas por vários segmentos lineares, um para cada mudança no CP .

Estudou-se o efeito que o número máximo de segmentos por subgrupo tinha sobre as metas otimizadas de energia, como se vê na figura 6.3, para um ΔT_{min} uniforme de 4°C . Essa curva apresenta um comportamento semelhante às curvas representadas nas figuras 4.7, 4.13 e 4.20, ou seja, a de que a integração de muitas correntes num subgrupo não é muito vantajosa pois não existe grande diminuição no valor da função objetivo, seja ela as metas de custo ou as metas de energia.

Além disso, quando há muitas correntes num subgrupo, a tendência é que essas correntes dêem origem a uma rede de trocadores complicada. Isso foi evidenciado na rede de trocadores indicada na figura 6.2 (Shokoya C. G., 1992). Foi proposta uma rede de trocadores alternativa, obtida através da decomposição das correntes em três subgrupos independentes, como indicado na figura 6.4. É interessante notar essa rede, além de ser mais simples do que a rede representada na figura 6.2, ainda tem um consumo energético ligeiramente menor, como visto na tabela 6.4.

Capítulo 7 - Conclusões e propostas para futuros trabalhos

7.1 Conclusões finais

Foi desenvolvida na década de oitenta a Tecnologia *Pinch*, proposta por Linnhoff e colaboradores (1982) e que representou um grande avanço na área de integração de processos. Essa tecnologia permite a obtenção do consumo mínimo de utilidades e a determinação de metas de área e de custo para uma rede de trocadores de calor. Além disso, na Tecnologia *Pinch* também foram sugeridas regras que possibilitam a síntese de redes de trocadores cujos custos têm normalmente um desvio menor do que 10% em relação às metas estipuladas.

Entretanto, os procedimentos e regras da Tecnologia *Pinch* podem levar a plantas consideravelmente complexas e em alguns casos até mesmo perigosas (Polley G. T. e Heggs P. J., 1999). Isso é decorrente do fato que muitas correntes integradas tendem a gerar redes de trocadores complicadas.

Foi sugerida nessa tese uma técnica de decomposição do problema, em que as correntes do processo não mais são integradas num único conjunto e sim integradas em subgrupos, com um número limitado de correntes em cada um deles, a fim de se obter redes de trocadores mais simples. Essa metodologia já tinha sido adotada por Polley G. T. e Heggs P. J. (1999), sendo a decomposição feita somente com base na experiência do projetista da rede. Nesse trabalho, foi proposto um enfoque matemático para a decomposição das correntes em diferentes subgrupos.

Para cada configuração de correntes nos subgrupos, correspondem diferentes metas de energia, área e custo, dado o ΔT_{min} (equação 3.4). O fato de se limitar o número máximo de correntes em cada subgrupo tende a gerar redes simples, mas é interessante também que esses subgrupos sejam energeticamente eficientes ou tenham baixo custo.

A determinação da configuração que levava a um mínimo nas metas ou de energia, ou de área ou de custo foi feita através do *Simulated Annealing*, um método de otimização aleatório, aplicável a funções discretas (capítulo 3).

Foi analisada a influência do número máximo de correntes por subgrupo tanto nas metas otimizadas de energia, área e custo. Demonstrou-se que muitas correntes integradas num mesmo subgrupo não possibilitam uma grande diminuição na função objetivo que se está minimizando (figuras 4.7, 4.13, 4.20 e 6.3). Além disso, há um aumento da complexidade da rede de trocadores quando existem muitas correntes num subgrupo (figuras 4.18, 4.19 e tabela 4.30).

Fez-se também a otimização do ΔT_{min} uniforme em todos os subgrupos (figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26). Em seguida, foi otimizado o ΔT_{min} em cada subgrupo (tabelas 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34). Houve significativa diminuição nas metas de custo em ambos os casos, quando comparadas com as metas para um ΔT_{min} de 25°C (tabela 4.35). As metas de custo previstas quando se realiza a otimização com um ΔT_{min} variável são ligeiramente menores do que quando se faz a otimização com um ΔT_{min} uniforme. Entretanto, o tempo computacional requerido é consideravelmente maior.

Na síntese de uma rede de trocadores de calor, é importante levar em conta aspectos operacionais tais como *layout*, controlabilidade, questões de segurança, áreas de integridade, etc. Nesse trabalho, esses aspectos foram incluídos através do conceito de matriz de restrições (tabela 5.5), colocadas diretamente na função objetivo a ser minimizada (capítulo 5). Foram mostrados alguns exemplos para uma planta de aromáticos (tabelas 5.2, 5.3, 5.4, 5.6 e 5.7) e a técnica foi aplicada também a uma unidade de fracionamento de óleo cru, em que existiam muitas correntes com CP variável (seção 6.3).

Em todas as redes sintetizadas como exemplos nesse trabalho, as metas de custo apresentaram um desvio inferior a 2%.

7.2 Propostas para futuros trabalhos

Discutiu-se nos capítulos 1 e 5 que redes de trocadores de calor mais simples têm melhor controlabilidade e se comentou, qualitativamente, o efeito que uma perturbação numa determinada corrente teria sobre as outras correntes da rede. Um trabalho interessante para ser realizado seria mostrar quantitativamente que redes mais simples de fato são mais fáceis para se controlar do que redes complexas.

Uma outra aplicação da técnica de decomposição proposta nesse trabalho seria no *retrofit* de plantas. A metodologia originalmente sugerida por Polley G. T. e Heggs P. J. (1999) foi estendida e aplicada com sucesso em *retrofit*, nos trabalhos de Amidpour M. e Polley G. T. (2001).

Referências Bibliográficas

AHMAD S., HUI D. C. W., Heat Recovery Between Areas of Integrity, Computers Chem. Eng., 1991

AMIDPOUR M., POLLEY G. T., Dealing With Piping Constraints in Heat Exchanger Network Synthesis, IChemE Symposium on Process Integration and Fluid Separations, 1994

AMIDPOUR M., POLLEY G. T., Application of Problem Decomposition in Process Integration, Transactions IChemE, p. 53-63, 1997

AMIDPOUR M., POLLEY G. T., Structural Targeting: the better way to heat exchanger network retrofits, Chemical Engineering Progress, 2001

AHMAD S., LINNHOFF B. Supertargeting: Different Process Structures for Different Economics, Journal of Energy Resources Technology, p. 131-136, 1989

HEWITT G. F., SHIRES G. L., BOTT T. R. *Process Heat Transfer*, CRC Press, p. 1-10, 1995

KREYSZIG, E. *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, p. 989-1104, 1999

LINDFIELD G., PENNY J., *Numerical Methods Using Matlab*, Prentice Hall, p. 338-376, 1999

LINNHOFF B., FLOWER J.R. A thermodynamic approach to practical process network design, 72ª reunião anual AIChE, 1979

LINNHOFF B., TOWNSEND D. W., BOLAND D., HEWITT G. F., THOMAS B. E. A., GUY A. R., MARSLAND R. H. *A user guide on process integration for the efficient use of energy*, IChemE – Warwick Printing Company Ltd., 1982

POLLEY G. T., HEGGS P. J. Don't Let the Pinch Pinch You, Chemical Engineering Progress, 1999

SANTOS L. C., ZEMP R. J., *Síntese de sistemas de recuperação de energia para trocadores do tipo casco e tubos com restrições de troca térmica*, Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2000, Tese (Mestrado)

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

SHOKOYA C. G. *Retrofit of heat exchanger networks for debottlenecking and energy savings*, University of Manchester, Inglaterra, 1992, Tese (Doutorado)

SMITH R. *Chemical Process Design*, McGraw-Hill, 1995

UMEDA T. Heat Exchange System Synthesis, Chemical Engineering Progress, 1978