

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR  
FLEXÍVEIS**

Autor : Aparecido Nivaldo Módenes

Orientador: Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani

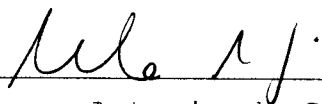
Dissertação de Mestrado submetida à  
Universidade Estadual Maringá, como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Mestre em Engenharia Química.

**MARINGÁ**  
**1995**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

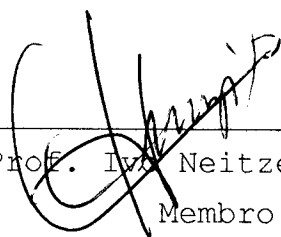
Esta é a versão definitiva da dissertação de Mestrado submetida por Aparecido Nivaldo Módenes, à Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia Química em 18 de dezembro de 1995.

COMISSÃO JULGADORA:



---

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



---

Prof. Ivo Neitzel, D.Sc.  
Membro



---

Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Ao corpo docente do Programa de Engenharia Química e em especial ao Prof. Mauro A. S. S. Ravagnani pela orientação na elaboração do presente trabalho.

A CAPES pelo auxílio financeiro.

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | 01 |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....                                | 04 |
| <b>3. CONCEITOS BÁSICOS</b> .....                                    | 12 |
| 3.1 INTRODUÇÃO .....   | 13 |
| 3.2 SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR .....                    | 14 |
| 3.2.1 Localização do Ponto de Estrangulamento Energético (PEE) ..... | 14 |
| 3.2.1.1 Curvas Compostas .....                                       | 14 |
| 3.2.1.2 Tabela do Problema .....                                     | 17 |
| 3.2.2 Considerações sobre o PEE .....                                | 21 |
| 3.2.3 Representação de Grade .....                                   | 23 |
| 3.2.4 Método do Ponto de Estrangulamento .....                       | 23 |
| 3.2.5 Número Mínimo de Unidades .....                                | 27 |
| 3.2.6 Identificação e Quebra de Laços de Troca Térmica .....         | 29 |
| 3.3 OTIMIZAÇÃO DO $\Delta T_{min}$ ANTES DA SÍNTESE DA REDE .....    | 32 |
| 3.3.1 Área de Transferência de Calor .....                           | 33 |
| 3.3.2 Custo Total Anual .....  | 35 |
| 3.3.2.1 Custo de Capital .....                                       | 35 |
| 3.3.2.2 Custo de Consumo de Utilidades .....                         | 36 |
| 3.4 ANÁLISE DA FLEXIBILIDADE .....                                   | 38 |
| 3.4.1 <i>Downstream Paths</i> .....                                  | 40 |
| <b>4. PROGRAMA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO</b> .....                  | 43 |
| 4.1 INTRODUÇÃO .....   | 44 |
| 4.2 PROGRAMA PRINCIPAL .....   | 45 |
| 4.3 MÓDULO OTIMIZAÇÃO DO $\Delta T_{min}$ .....                      | 47 |
| 4.4 MÓDULO TABELA DO PROBLEMA .....                                  | 49 |
| 4.5 MÓDULO SÍNTESE DA REDE .....                                     | 51 |
| 4.6 MÓDULO IDENTIFICAÇÃO E QUEBRA DE LAÇOS .....                     | 54 |
| 4.7 MÓDULO ANÁLISE DA FLEXIBILIDADE .....                            | 56 |
| 4.7.1 Restauração das Variáveis Controladas .....                    | 58 |
| <b>5. CASOS ESTUDADOS</b> .....                                      | 61 |
| 5.1 INTRODUÇÃO .....   | 62 |
| 5.2 CASO N <sup>o</sup> 1 .....                                      | 63 |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.3 CASO N <sup>o</sup> 2 .....        | 65        |
| 5.4 CASO N <sup>o</sup> 3 .....        | 71        |
| 5.4.1 Solução 1.....                   | 72        |
| 5.4.2 Solução 2.....                   | 75        |
| <b>6. CONCLUSÕES .....</b>             | <b>80</b> |
| 6.1 CONCLUSÕES .....                   | 81        |
| 6.2 SUGESTÕES .....                    | 84        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b> | <b>85</b> |

## LISTA DE FIGURAS

| Figura  | pag. |
|---|------|
| 3.1 - Diagrama TH para uma corrente .....   | 14   |
| 3.2 - Diagrama TH para uma rede composta por duas correntes .....                       | 15   |
| 3.3 - Diagrama TH para três correntes .....   | 16   |
| 3.4 - Curva Composta quente .....   | 16   |
| 3.5 - Diagrama TH .....   | 17   |
| 3.6 - Diagrama de fluxo de calor para as sub-redes do TC3 .....                         | 21   |
| 3.7 - Diagrama de Grade .....   | 23   |
| 3.8 - Trocas no Ponto de Estrangulamento .....  | 24   |
| 3.9 - Projeto da rede para a região acima do PEE .....                                  | 25   |
| 3.10 - Identificação de um laço de troca térmica .....                                  | 30   |
| 3.11 - Quebra do laço de troca térmica .....  | 30   |
| 3.12 - Restauração do $\Delta T_{min}$ .....  | 31   |
| 3.13 - Variação do custo anual com o $\Delta T_{min}$ .....                             | 32   |
| 3.14 - Forma de abordagem do problema proposta por AHMAD (1985) .....                   | 33   |
| 3.15 - Intervalos de entalpia .....   | 34   |
| 3.16 - Influência dos custos reais e estimados no valor do $\Delta T_{min}$ ótimo ..... | 36   |
| 3.17.a - <i>Downstream Paths</i> .....  | 41   |
| 3.17.b - Quebra de <i>Downstream Path</i> .....   | 41   |
| 3.17.c - Inserção de elemento contra-corrente .....                                     | 41   |
| 3.18 - Aplicação de manipulações .....  | 42   |
| 4.1 - Diagrama de blocos para o programa desenvolvido .....                             | 45   |
| 4.2 - Diagrama de blocos para o módulo otimização do $\Delta T_{min}$ .....             | 47   |
| 4.3 - Diagrama de blocos para o módulo Tabela do Problema .....                         | 49   |
| 4.4.a - Diagrama de blocos para a síntese acima do PEE .....                            | 52   |
| 4.4.b - Diagrama de blocos para a síntese abaixo do PEE .....                           | 53   |
| 4.5 - Diagrama de blocos para identificação e quebra de laços .....                     | 54   |
| 4.6 - Diagrama de blocos para a análise da flexibilidade .....                          | 57   |
| 4.7 - Diagrama de blocos para a restauração das variáveis controladas .....             | 57   |
| 5.1 - Diagrama custo x $\Delta T_{min}$ para o Caso 1 .....                             | 64   |
| 5.2 - Rede projetada para o Caso Base .....   | 66   |
| 5.3 - Rede após inserida a perturbação .....  | 67   |
| 5.4 - Solução por inspeção .....  | 67   |

| <b>Figura</b>  | <b>pag.</b> |
|--|-------------|
| 5.5 - Análise após instalação do <i>by-pass</i> no trocador nº 1 .....                                 | 68          |
| 5.6 - Solução mais econômica .....   | 69          |
| 5.7 - Rede obtida através da análise da flexibilidade - Solução 1 .....                                | 73          |
| 5.8 - “Configuração ótima” dada por FLOUDAS e GROSSMANN (1987) .....                                   | 74          |
| 5.9 - Rede sintetizada para o caso base .....  | 75          |
| 5.10 - Matriz incidência para a rede da Figura 5.9 .....   | 76          |
| 5.11 - Rede obtida através da análise da flexibilidade seguida da quebra<br>de laços - Solução 2 ..... | 77          |

**LISTA DE QUADROS E TABELAS**

| <b>Quadro</b>   | <b>pag.</b> |
|---|-------------|
| 5.1 - Dados das utilidades e de custo para o Caso 2 ..... | 66          |
| 5.2 - Dados das utilidades e de custo para o Caso 3 ..... | 72          |

| <b>Tabela</b>   | <b>pag.</b> |
|---|-------------|
| 3.1 - Dados de entrada para o TC3 .....   | 18          |
| 3.2 - Tabela do problema para o TC3 .....   | 18          |
| 5.1 - Dados de entrada para o Caso 1 .....  | 63          |
| 5.2 - Comparação dos resultados do Caso 1 com a literatura .....                  | 64          |
| 5.3 - Dados de entrada das correntes para o Caso 2 .....                          | 65          |
| 5.4 - Dados de custo obtidos para o Caso Base e para as modificações .....        | 69          |
| 5.5 - Análise de custo das modificações .....                                     | 69          |
| 5.6 - Comparação dos resultados para o Caso 2 .....                               | 70          |
| 5.7 - Dados de entrada das correntes para o Caso 3 .....                          | 71          |
| 5.8 - Dados referentes às trocas para cada período de operação - solução 1 .....  | 73          |
| 5.9 - Dados de custo referentes à solução 1 .....                                 | 74          |
| 5.10 - Comparação dos resultados para o Caso 3 - solução 1 .....                  | 75          |
| 5.11 - Dados referentes às trocas para cada período de operação - solução 2 ..... | 77          |
| 5.12 - Dados de custo referentes à solução 2 .....                                | 78          |
| 5.13 - Comparação dos resultados para o Caso 3 - solução 2 .....                  | 78          |



## NOMENCLATURA

|                 |   |
|-----------------|---|
| a -             | constante da equação do custo                                       |
| A -             | área de troca térmica da rede                                       |
| $A_{MIN}$ -     | área mínima de troca térmica  |
| b -             | constante da equação do custo                                       |
| c -             | constante da equação do custo                                       |
| C -             | variável controlada   |
| CENER -         | custo relativo às utilidades  |
| CEQ -           | custo relativo ao capital   |
| $CEQ_{ANUAL}$ - | custo anual relativo ao capital                                     |
| CF -            | custo da utilidade fria   |
| CP -            | produto entre $C_p$ e vazão mássica                                 |
| $C_p$ -         | calor específico da corrente  |
| CPC -           | capacidade térmica das correntes frias                              |
| CPH -           | capacidade térmica das correntes quentes                            |
| CQ -            | custo da utilidade quente   |
| $CT_{ANUAL}$ -  | custo total anual   |
| $D_k$ -         | deficit de calor no intervalo k                                     |
| $E_k$ -         | calor suprido por aquecimento no intervalo k                        |
| $FT_i$ -        | fator de correção para a MLDT do intervalo i                        |
| H -             | entalpia  |
| $h_j$ -         | coeficiente de transferência de calor convectivo da corrente j      |
| HOP -           | horas de operação da planta por ano                                 |
| i -             | taxa de atratividade  |
| L -             | número de laços de troca térmica na rede                            |
| m -             | número de correntes   |
| $MLDT_i$ -      | média logarítmica da diferença de temperatura para cada intervalo i |
| MPE -           | método do ponto de estrangulamento                                  |
| MRE -           | máxima recuperação de energia                                       |
| n -             | número de intervalos  |
| N -             | número de correntes   |
| NC -            | número de correntes frias   |
| NCE -           | número de correntes cruzando o PEE                                  |
| NH -            | número de correntes quentes   |

|                    |  |
|--------------------|--|
| NMU -              | número mínimo de unidades de troca térmica                     |
| P -                | perturbação  |
| PEE -              | ponto de estrangulamento energético                            |
| PL -               | programação linear   |
| PLMI -             | programação linear mista com inteiros                          |
| PNL -              | programação não linear   |
| PNLMI -            | programação não linear mista com inteiros                      |
| Q -                | calor trocado  |
| $Q_{Cmin.}$ -      | utilidade fria mínima necessária                               |
| $Q_{Hmin.}$ -      | utilidade quente mínima necessária                             |
| $q_j$ -            | energia transferida pelas correntes j                          |
| RTC -              | rede de trocadores de calor                                    |
| S -                | número de problemas independentes na rede                      |
| $Sk$ -             | calor removido por resfriamento no intervalo k                 |
| SR(k) -            | sub-rede k   |
| T -                | tempo de vida útil dos equipamentos                            |
| $T_E$ -            | temperatura de entrada   |
| $T_S$ -            | temperatura de saída   |
| U -                | número de unidades de troca térmica                            |
| $U_{MIN}$ -        | número mínimo de unidades de troca térmica                     |
| $U_{MIN,MRE}$ -    | número mínimo de unidades para a máxima recuperação de energia |
| UTF -              | consumo da utilidade fria                                      |
| UTQ -              | consumo da utilidade quente                                    |
| $\Delta H$ -       | variação de entalpia   |
| $\Delta T_{min}$ - | diferença de temperatura mínima entre os terminais do trocador |

## RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um programa computacional para a síntese de redes de trocadores de calor flexíveis. O programa desenvolvido utiliza os conceitos da Análise Pinch para projetar a rede para apenas um período de operação (denominado Caso Base), sendo feita uma análise da flexibilidade para obter o projeto final envolvendo todos os demais períodos. Na síntese da rede para o Caso Base são definidos inicialmente os seus objetivos com relação ao custo global mínimo,  $\Delta T_{\min}$  ótimo, área mínima de troca térmica, número mínimo de trocadores de calor e a demanda de utilidades quentes e frias. Em seguida a rede é sintetizada utilizando-se o Método do Ponto de Estrangulamento Energético. Depois de sintetizada a rede é evoluída, identificando e quebrando os possíveis laços de troca térmica. Após a evolução da rede, faz-se a análise da flexibilidade. Esta análise tem como objetivo adaptar o caso base para os demais períodos com o menor custo global (equipamentos e energia), ou seja, obter o *trade-off* entre custo de equipamentos e custo de energia para a rede final, que inclui todos os períodos de operação. Alguns exemplos de casos citados na literatura foram testados e os resultados obtidos confrontados, mostrando a consistência e aplicabilidade da técnica desenvolvida.

## ABSTRACT

In this work a computational program was developed for the synthesis of flexible heat exchanger networks. The program uses the concepts of Pinch Analysis to design project the network to only one operating period (named Base Case) and uses the a flexibility analysis to achieve the final design for all the other periods. In the heat exchanger network synthesis, initially are defined for the Base Case, the objectives with respect the minimum global cost, the optimum  $\Delta T_{min}$ , the minimum exchange area, the minimum number of units and the hot and cold utilities. The network is synthesized by using the Pinch Design Method. After this, the network is evolved, identifying and breaking loops. After the evolution, it is made the flexibility analysis. This analysis has as objective to adapt the Base Case to the others periods with a fewer global cost, getting the trade-off between the capital and the energy cost to the final network, for all the periods of operation. Some examples of the literature were used to test and compare the results, showing the developed technique consistence and its applicability.

## **1 - INTRODUÇÃO**

Geralmente em processos industriais, existe um conjunto de correntes que precisam ser resfriadas, denominadas correntes quentes, e um outro conjunto, composto por correntes que precisam ser aquecidas, denominadas de correntes frias. O aquecimento das correntes frias pode ser feito utilizando-se a energia recuperada das correntes quentes. No entanto, quando a energia total disponível nas correntes quentes não for igual à energia requerida pelas correntes frias, e se houver restrições termodinâmicas impostas pelas temperaturas das correntes, a temperatura final pode ser atingida mediante o uso de energia externa ao processo, normalmente fornecida por uma corrente auxiliar denominada utilidade. O aquecimento e o resfriamento de diversas correntes são feitos utilizando-se um conjunto de equipamentos denominado rede de trocadores de calor (RTC).

Essencialmente a tarefa de síntese de RTC consiste em encontrar uma seqüência praticável de troca de calor em que pares de correntes são combinadas, tal que a rede seja ótima em relação ao custo de unidades e energia, ou seja, custo total.

A rede ótima pode ser encontrada calculando-se o custo anual de todas as redes possíveis. No entanto, devido ao grande número de combinações possíveis entre as diversas correntes, foram propostos métodos visando diminuir a dimensão do problema. Atualmente, existem duas importantes correntes que estudam o problema de forma independente: a dos métodos matemáticos, utilizando técnicas de programação linear e não linear, e a baseada em conceitos termodinâmicos, conhecida por Análise Pinch.

Na obtenção da RTC utilizando a Análise Pinch, três etapas bem distintas devem ser seguidas: a definição das metas ou pré-análise, a síntese da rede e a evolução da mesma. A primeira etapa envolve a determinação do consumo mínimo de utilidades, da área mínima de transferência de calor, do número mínimo de unidades e do custo global anual. A segunda envolve a definição dos cruzamentos entre as correntes e o seqüenciamento dos trocadores. A terceira etapa envolve a evolução da rede obtida, fazendo com que a mesma chegue aos valores definidos na primeira etapa com relação a energia e capital.

As redes de trocadores de calor flexíveis operam em diferentes condições de operação, ou seja, são redes que suportam mudanças nas condições de operação do processo tais como: variações nas temperaturas de entrada e saída e vazões das correntes de processo.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para a síntese de redes de trocadores de calor flexíveis. O caminho escolhido, devido à simplicidade na aplicação e pela fácil interação com o usuário, foi a Análise Pinch.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura em síntese de redes de trocadores de calor, onde são abordados os principais trabalhos publicados na área.

No capítulo 3 são apresentados alguns conceitos fundamentais para o entendimento da Análise Pinch, sendo apresentado um estudo detalhado sobre o Método do Ponto de Estrangulamento, utilizado na síntese da rede. Ainda neste capítulo são abordados conceitos como *Downstream Paths*, utilizados na análise da flexibilidade.

No capítulo 4 é demonstrado o programa computacional desenvolvido, na sua forma modular. Neste capítulo são apresentados os módulos contendo os procedimentos de síntese, evolução da rede, otimização do  $\Delta T_{min}$  antes da síntese, e por fim, um procedimento para a análise da flexibilidade, que pode ser aplicado tanto na síntese de novas redes, como em redes que sofreram mudanças nas condições de operação após sua instalação.

No capítulo 5 é feito o estudo de casos utilizando o programa desenvolvido, sendo feita uma discussão e comparação com os resultados obtidos por outros trabalhos encontrados na literatura.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre o trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## **2 - REVISÃO DA LITERATURA**



A síntese de rede de trocadores de calor é um dos ramos da síntese de processos mais estudados, sendo um assunto de grande interesse industrial devido às possibilidades de diminuir os custos de operação e capital de uma planta.

O assunto é debatido, principalmente, por duas grandes escolas que agrupam os métodos para a síntese de RTC. De um lado, os métodos matemáticos, que utilizam técnicas de programação linear e não linear, e de outro, os métodos ligados à aplicação da Análise Pinch à síntese de RTC. Basicamente será dada ênfase aos métodos provindos da aplicação da Análise Pinch, uma vez que esta foi a metodologia por nós escolhida no desenvolvimento deste trabalho.

A mais recente e completa revisão sobre o assunto é apresentada por GUNDERSEN e NAESS (1988), onde são apresentados métodos de síntese de RTC até o ano de sua publicação. Poucas publicações posteriores apresentam novidades sobre o assunto. Segundo os autores, o primeiro autor a considerar a formulação do problema da síntese de redes de trocadores de calor foi Hwa em 1965, utilizando a técnica de programação separável para revolver o problema. Os reais pioneiros nesta área foram Rudd e seus colaboradores na Universidade de Wisconsin, e Hohmann que desenvolveu seu trabalho com Lockhart na Califórnia. Conforme os autores, Hohmann foi o primeiro a introduzir o critério do consumo mínimo de utilidades antes da síntese da rede, no ano de 1971, em sua tese de doutorado. Além deste critério, propôs também uma regra para a determinação do número mínimo de trocadores de calor. O trabalho de Hohmann teve pouco reconhecimento na época, um vez que até então trabalhava-se exclusivamente com métodos matemáticos, para os quais seu trabalho trouxe pouca contribuição. No entanto, os conceitos por ele introduzidos foram muito bem aproveitados posteriormente no desenvolvimento da Análise Pinch. Vários pesquisadores propuseram depois diferentes métodos para a síntese de RTC.

UMEDA et al. (1978) apresentaram um método de conceituação termodinâmica, onde utilizaram uma forma gráfica para representar o balanço de energia da rede. Trata-se de um diagrama temperatura contra energia, onde eram plotadas as curvas representando a energia disponível para as correntes quente e fria. Neste diagrama, identificaram um ponto de estrangulamento na rede onde as trocas de calor eram limitadas. Esta metodologia permitia prever a rede de área mínima, tanto para coeficientes globais de troca térmica constantes como variáveis. Eles também determinaram que a máxima recuperação de energia na rede estava relacionada com a localização do Ponto de Estrangulamento

Energético, e que o grau de recuperação de calor na rede estava intimamente ligado à diferença mínima de temperatura permissível na rede ( $\Delta T_{min}$ ).

LINNHOFF e FLOWER (1978) propuseram um método para a síntese de RTC. Tendo um embasamento termodinâmico, este método foi fundamental para o desenvolvimento da Análise Pinch, pois além do método do intervalo de temperatura, apresentam uma ferramenta muito utilizada na Análise Pinch, a Tabela do Problema ou *Problem Table*. O método proposto é composto por duas etapas. Na primeira, o problema é dividido em intervalos de temperatura. Para cada intervalo é sintetizada uma sub-rede. As sub-redes são agrupadas, formando-se uma rede preliminar. Utilizando-se um procedimento tabular, denominado Tabela do Problema ou *Problem Table*, identifica-se as demandas para as utilidades quentes e frias para a máxima recuperação de energia. Na segunda etapa, as redes preliminares são evoluídas utilizando algumas técnicas evolutivas.

LINNHOFF et al. (1979) apresentaram em detalhes os principais pontos tratados na síntese de RTC. Abordaram questões como o significado do  $\Delta T_{min}$ , o número mínimo de unidades, o uso de utilidades, divisão de correntes e trocas cíclicas, restrições e modificações de dados.

LINNHOFF et al. (1982) abordaram conceitos importantes utilizados na síntese de RTC, além dos conceitos abordados por LINNHOFF et al. (1979). Introduziram também, conceitos como a grande curva composta, sendo explicada em função da cascata de calor. As aplicações envolvem múltiplas utilidades e modificações no processo.

LINNHOFF e HINDMARSH (1983) apresentaram um método de projeto de redes de trocadores de calor. Denominado Método do Ponto de Estrangulamento ou *Pinch Design Method*, este método utiliza a Tabela do Problema para determinar a Máxima Recuperação de Energia (MRE) e o Ponto de Estrangulamento Energético (PEE). O problema é então dividido em duas regiões, uma acima e outra abaixo do PEE. Segundo os autores, estas regiões são independentes e pode-se realizar a síntese para cada região separadamente. O método apresenta critérios para orientar a alocação de trocadores, de modo a garantir a MRE na rede. Quando há mais de uma possibilidade de troca, o projetista, baseado em sua experiência, tem a liberdade de escolher a opção que for mais conveniente ao processo.

SU e MOTARD (1984) desenvolveram uma técnica algorítmica evolutiva para RTC. A técnica é baseada na identificação e quebra de todos os laços de troca térmica da

rede inicial, inclusive prevendo a divisão de correntes, se necessário. O método pode reduzir o número de trocadores de calor da rede sem aumentar o consumo de utilidades.

AHMAD e LINNHOFF (1986) apresentaram a aplicação de técnicas de otimização de sistemas integrados de energia antes da síntese da rede. Utilizaram uma planta de solventes químicos para a aplicação da técnica, comparando-a com técnicas convencionais. As condições econômicas são variadas para examinar sua influência sobre o projeto.

LINNHOFF e KOTJABASAKIS (1986) apresentaram conceitos de operabilidade e *Downstream Paths* como meio de avaliar a influência de perturbações (mudanças em vazões e/ou temperaturas de entrada) sobre as correntes de processo. Partindo destes conceitos e propondo estratégias de controle poder-se-ia avaliar a flexibilidade de redes de trocadores de calor. Sugeriram também um procedimento para projetos preliminares em que a síntese da rede, a análise da flexibilidade e a estratégia de controle eram solucionados simultaneamente.

KOTJABASAKIS e LINNHOFF (1986) desenvolveram um método para a síntese de redes de trocadores de calor flexíveis, onde a rede é sintetizada para apenas um período de operação, denominado caso base. A partir do caso base, através de um balanço de energia em cada trocador e variações em condições operacionais são geradas tabelas, denominadas Tabelas de Sensitividade. Estas tabelas relacionam as temperaturas de entrada e saída das correntes, a área de troca térmica, capacidade térmica das correntes e calor trocado no trocador em estudo. Através destas tabelas faz-se a análise da flexibilidade obtendo-se uma rede final que leva ao menor custo de capital com o menor custo de energia, ou seja, à solução mais econômica.

FLOUDAS e GROSSMANN (1986) apresentaram um procedimento para a síntese de redes de trocadores de calor flexíveis para operações multiperíodicas. Neste caso são conhecidas as condições do processo e alguns períodos são pré-definidos. A rede ótima é encontrada levando-se em consideração o custo de equipamentos e custo de utilidades para todos os períodos. Foi utilizada uma adaptação do modelo do transbordo com programação linear mista com inteiros (PLMI) para operações multiperíodicas. Utilizando este modelo como base, os autores propuseram um procedimento sistemático para sintetizar a rede com o objetivo de obter uma estrutura que seja flexível a todos os períodos de operação, envolvendo o menor número de unidades.

FLOUDAS e GROSSMANN (1987a) apresentaram uma extensão do procedimento proposto para síntese de redes de trocadores de calor para operações multiperíodicas. Eles mostraram que a síntese automática destas redes pode ser realizada através de uma formulação de programação não linear (PNL), que é baseada em uma superestrutura que inclui opções de todas as possíveis estruturas para um dado grupo de combinações estabelecidas para os diferentes períodos. Os autores propuseram uma representação gráfica para esta superestrutura, que pode ser otimizada automaticamente proporcionando estruturas de redes praticáveis que caracterizam o custo mínimo de investimento, número mínimo de unidades e custo mínimo de utilidades para cada período.

FLOUDAS e GROSSMANN (1987b) propuseram também uma estratégia de síntese de redes de trocadores de calor que apresenta o custo mínimo de utilidades, o número mínimo de unidades e o custo mínimo de investimento e tem a capacidade de manipular saltos incertos de vazões e temperaturas de saída das correntes de processo. Os autores mostram que as técnicas de síntese para operações multiperíodicas PLMI e PNL, apresentadas por FLOUDAS e GROSSMANN (1986) e FLOUDAS e GROSSMANN (1987a) podem ser efetivamente unidas para problemas de análise de flexibilidade. O problema é decomposto em dois estágios. O primeiro prediz as combinações e o segundo deriva a configuração da rede. A cada estágio, as técnicas de síntese são combinadas com a análise da flexibilidade para testar a praticabilidade do projeto final e especificar parâmetros incertos, mostrando que propriedades especiais podem ser exploradas para realizar a análise da flexibilidade.

LINNHOF e EASTWOOD (1987) realçaram a aplicação da Análise Pinch em um processo individual e num contexto global, discutindo aspectos como eficiência, flexibilidade e economia de custo de capital.

KOTJABASAKIS (1988) em sua tese de doutorado reuniu os conceitos de *Downstream Paths* e Tabelas de Sensitividade (*Sensitivity Tables*) para sintetizar redes de trocadores de calor flexíveis. O autor utiliza a Análise Pinch para sintetizar a rede para um período de operação e aplica as Tabelas de Sensitividade na análise da flexibilidade, apresentando uma comparação destas técnicas com outras presentes na literatura, mostrando as vantagens de sua metodologia sobre as encontradas em outros trabalhos da literatura. Apresenta ainda uma estratégia para a minimização do custo relacionado a incrustações em redes de trocadores de calor.

PETHE et al. (1989) apresentaram uma técnica matricial para a identificação de laços de troca térmica em uma rede existente. A técnica consiste na construção de uma matriz incidência para representar a rede a ser evoluída. As linhas da matriz são as correntes de processo, incluindo as utilidades, enquanto que as colunas são os trocadores de calor, incluindo os aquecedores e resfriadores. Cada equipamento é identificado por um +1 para a corrente quente e -1 para a corrente fria. Os demais elementos das colunas são nulos. A partir daí um tratamento matricial é utilizado para identificar todos os laços presentes na malha.

LINNHOFF e AHMAD (1990) e AHMAD et al. (1990) apresentaram uma metodologia para a síntese de RTC com custo próximo do ótimo. O procedimento é baseado na fixação dos objetivos com relação ao custo, antes da síntese da rede. No primeiro trabalho é utilizado um modelo simples para o custo de capital. No segundo, um modelo de custo mais abrangente é apresentado, explorando diferenças entre coeficientes de película para reduzir a área da rede, equações não lineares para o custo, trocadores não inteiramente em contracorrente e materiais de construção e tipos de trocadores não uniformes.

PIOVESANI (1990) em sua dissertação de mestrado apresenta um método para a obtenção do valor ótimo da diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{\min}$  ótimo) independente da síntese da rede, analisando a influência de coeficientes de película na obtenção do valor ótimo do  $\Delta T_{\min}$ . O valor do  $\Delta T_{\min}$  ótimo é obtido estabelecendo-se metas para o consumo mínimo de utilidades, número mínimo de unidades, número mínimo de trocadores de calor, área mínima de transferência de calor e custo total anual.

CERDÁ et al. (1990) propuseram uma nova metodologia para a síntese ótima de redes de trocadores de calor flexíveis. Uma nova versão da cascata de calor que assume um *pinch* contínuo é desenvolvido para determinar: (1) Os objetivos de recuperação de calor para serem alcançados pela rede. (2) As temperaturas *pinch* dominantes que obrigam as trocas de calor e definem as subredes problemas. Constituindo assim, a construção de blocos de uma formulação matemática PLMI, através do qual, uma rede estruturalmente flexível, apresentando o menor número de unidades, é encontrada.

CERDÁ e GALLI (1990) incorporaram novas características para o algoritmo sistemático apresentado em CERDÁ et al. (1990) para torná-lo capaz de solucionar problemas de síntese de RTC não convexas com grandes distúrbios de temperatura,

permitindo a identificação do *pinch-jump* e avaliação das temperaturas intermediárias na qual a descontinuidade aparece. Nas condições do *pinch-jump*, um par de temperaturas *pinch* simultâneas é observada, requerendo novas unidades para atingir a máxima recuperação de energia. A aplicação do método para vários exemplos não convexos produziu redes com menor número de unidades e sempre com o uso mínimo de utilidades.

GALLI e CERDÁ (1991) apresentaram uma aproximação algorítmica para a síntese de RTC flexíveis que leva em conta mudanças nas temperaturas de entrada e vazões das correntes. O procedimento de síntese inclui quatro passos principais: (1) Um problema de PL é desenvolvido para descobrir uma pequena e discreta coleção de *pinch points* dominantes que controlam o projeto da rede. (2) O conhecimento da coleção de *pinch points* permite a obtenção de uma formulação de PLMI que proporciona uma rede ótima a nível de unidades. (3) As condições de projeto para a síntese da rede toda a nível de estruturas é estabelecida através do uso de um teste de *pinch-jump* de PLMI. (4) A estrutura de toda sub-rede é sequencialmente encontrada, usando, frequentemente uma técnica de síntese para condições de correntes fixas.

PAPALEXANDRI e PISTIKOPOULOS (1993) desenvolveram um modelo de programação não linear mista com inteiros (PNLMI) para redes de trocadores de calor flexíveis. O modelo é baseado em uma representação de uma superestrutura da rede para operações multiperiódicas, contendo todas as possíveis alternativas para todos os períodos. Os períodos correspondem a condições de operações críticas identificadas através da solução de um subproblema da análise da flexibilidade para a rede existente. A solução do problema proporciona uma superestrutura de rede flexível e eficiente energeticamente.

LINNHOFF (1993) apresenta o estado de arte da aplicação da Análise Pinch aos processos industriais, sugerindo a utilização do termo *Pinch Analysis* ao invés de *Pinch Technology* até então utilizado. Apresenta ainda oito áreas onde o desenvolvimento é mais recente.

LINNHOFF (1994) seguindo a terminologia do artigo anterior, apresenta a utilização da Análise Pinch com ênfase na redução dos custos de capital e emissão de poluentes.

RAVAGNANI (1994), em sua tese de doutorado, desenvolveu um programa computacional para a síntese de redes de trocadores de calor incorporando o dimensionamento termo-hidráulico dos equipamentos. A rede é sintetizada utilizando-se o

Método do Ponto de Estrangulamento Energético e depois evoluída. Na evolução da rede, o autor desenvolveu um algoritmo para a identificação e quebra de possíveis laços de troca térmica, onde foi utilizada a matriz incidência proposta por PETHE et al. (1989) juntamente com o critério dos níveis de laços de SU e MOTARD (1984). Após a evolução, os trocadores são dimensionados levando-se em consideração as perdas de carga e os fatores de incrustação permitidos.

AGUILERA e NASINI (1995) apresentaram um teste de flexibilidade onde somente variações nas taxas de calor foram admitidas. Este teste é uma mistura de PLMI com considerações operacionais ao mesmo tempo, que podem ser incorporados dentro de procedimentos de síntese de redes de trocadores de calor flexíveis que combinam técnicas de síntese e análise de flexibilidade.

Desta revisão podemos observar que o estudo de redes de trocadores de calor está tendendo a buscar resultados cada vez mais próximos dos casos encontrados na prática. A Análise Pinch tem se mostrado uma boa metodologia, pois pode absorver novos conceitos sem a necessidade do desenvolvimento de uma nova metodologia, ao contrário dos métodos matemáticos. Com relação à análise da flexibilidade, apesar da existência de poucos trabalhos desenvolvidos, nota-se uma predominância de métodos envolvendo técnicas de otimização matemática. A grande contribuição no estudo de redes flexíveis utilizando a Análise Pinch foi o trabalho de KOTJABASAKIS (1988), onde o autor mostra as vantagens de sua metodologia quando comparadas com outros trabalhos da literatura e as vantagens de métodos utilizando a Análise Pinch sobre os métodos que utilizam técnicas de otimização matemática.

### **3 - CONCEITOS BÁSICOS**



### 3.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos teóricos utilizados na síntese de redes de trocadores de calor (RTC).

Conceitos como Tabela do Problema, Diagrama TH, Diagrama de Grade, Número Mínimo de Unidades e Laços de Troca Térmica são apresentados visando a obtenção de uma rede com o menor custo global, ou seja, obter uma rede com a máxima recuperação energética e com o menor número de unidades de troca térmica.

No segundo tópico será abordada a otimização da Diferença Mínima de Temperatura ( $\Delta T_{min}$ ) antes da síntese da rede, onde serão apresentados conceitos relativos à área mínima de transferência de calor, custo de capital, custo de energia e custo total anual.

No terceiro e último tópico será abordada a flexibilidade da rede, onde também serão apresentados os conceitos de *Downstream Paths* utilizados na análise da flexibilidade da rede.

### 3.2 - SÍNTESE DE REDES DE TROCADORES DE CALOR

Essencialmente a tarefa de síntese de RTC consiste em encontrar uma seqüência praticável de troca de calor em que pares de correntes são combinadas, tal que a rede seja ótima em relação ao custo de unidades e energia, ou seja, custo total. Neste trabalho será utilizado para a síntese da rede o Método do Ponto de Estrangulamento (MPE), provindo da Análise Pinch, proposto por LINNHOFF E HINDMARSH (1983), onde a seqüência de trocas de calor é estabelecida a partir do Ponto de Estrangulamento Energético (PEE) até as extremidades das regiões termodinamicamente independentes. Mais detalhes sobre esta metodologia serão fornecidos a seguir.

#### 3.2.1 - Localização do Ponto de Estrangulamento Energético

Sendo a síntese da rede baseada no PEE, o primeiro passo é então, a sua localização, pois é a partir deste ponto que a rede é sintetizada. A localização do PEE juntamente com as demandas de utilidades quentes e frias pode ser encontrada através das Curvas Compostas ou utilizando o procedimento da Tabela do Problema ou *Problem Table*.

##### 3.2.1.1 - Curvas Compostas

O diagrama TH pode ser utilizado para representar a possibilidade de recuperação de energia no processo. Alguns métodos para a síntese de RTC são baseados nos diagramas TH, como o apresentado por LINNHOFF e FLOWER (1978). A Figura 3.1 mostra o diagrama TH para apenas uma corrente de processo.

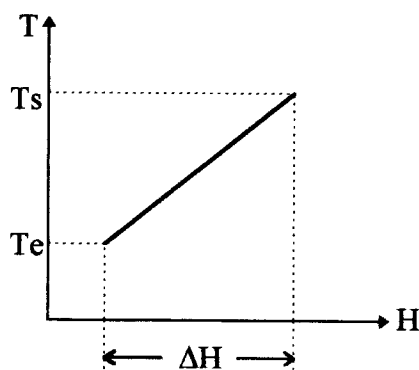


Figura 3.1 - Diagrama TH para uma corrente

A energia total recebida por uma corrente fria com capacidade térmica (CP) constante, sendo aquecida desde a temperatura de entrada  $T_E$  até a temperatura de saída  $T_S$  é igual à sua variação de entalpia, ou seja:

$$Q = \int_{T_E}^{T_S} CP \, dt = CP \cdot (T_S - T_E) = \Delta H \quad (3.1)$$

Na Figura 3.2 é apresentado o diagrama TH para uma rede composta por duas correntes, uma quente e uma fria. Devido aos limites termodinâmicos, a temperatura da corrente quente deverá ser superior à temperatura da corrente fria em todos os pontos.

Como pode ser observado na Figura 3.2 o  $\Delta T_{min}$  representa a menor diferença de temperatura entre as duas curvas. A energia recuperada é a energia transferida entre as correntes, sendo que o aquecimento adicional da corrente fria é feito por utilidades quentes e o resfriamento final da corrente quente é feito por utilidades frias.

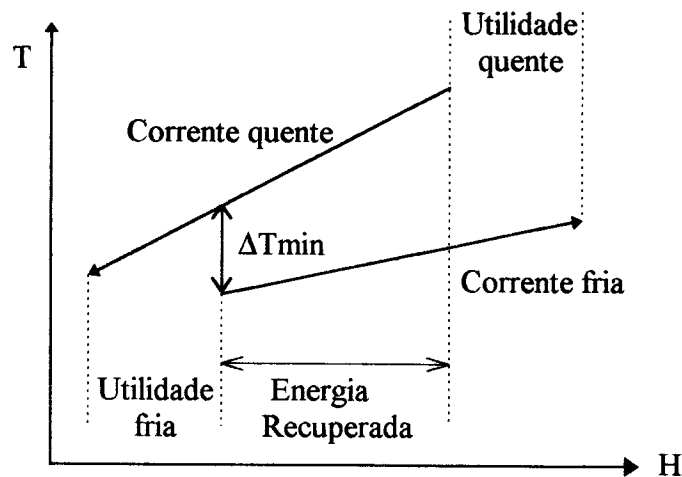


Figura 3.2 - Diagrama TH para uma rede composta por duas correntes

Para redes com diversas correntes, pode-se construir o mesmo gráfico agrupando-se as correntes quentes de acordo com seus respectivos intervalos de temperatura/energia térmica trocada. O procedimento é análogo para correntes frias.

Na Figura 3.3 são desenhadas três correntes quentes separadamente. As temperaturas dos intervalos ( $T_1$  a  $T_5$ ) são definidas pelas temperaturas de entrada e saída das correntes.

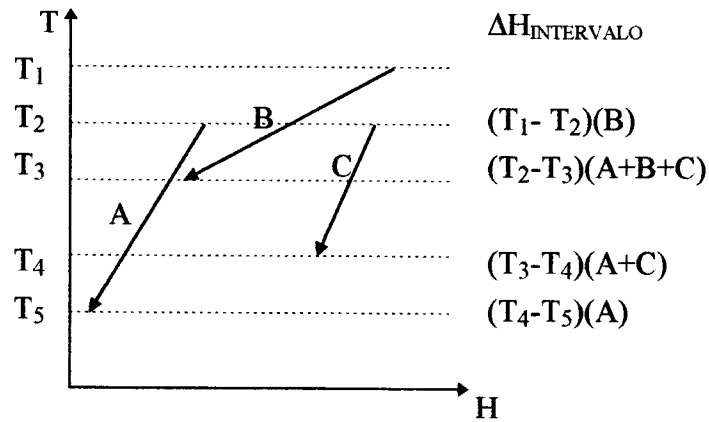


Figura 3.3 - Diagrama TH para três correntes

Como pode ser visto na Figura 3.3, no primeiro intervalo só está presente o fluido B. Desta forma, a energia disponível nesse intervalo é dada por:

$$\Delta H = CP_B \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.2)$$

No segundo intervalo estão presentes as três correntes e a energia disponível é dada por:

$$\Delta H = (CP_A + CP_B + CP_C) \cdot (T_2 - T_3) \quad (3.3)$$

O processo é repetido para os demais intervalos, resultando em uma única curva para as três correntes, denominada Curva Composta, mostrada na Figura 3.4.

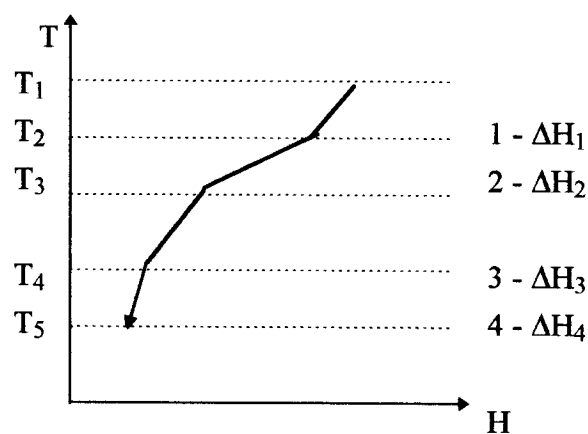


Figura 3.4 - Curva Composta quente

Para as correntes frias repete-se o procedimento de maneira análoga. As Curvas Compostas Quente e Fria podem ser plotadas em um diagrama TH, desde que fixada uma diferença mínima de temperatura entre as correntes de processo. Uma curva composta típica pode ser vista na Figura 3.5.

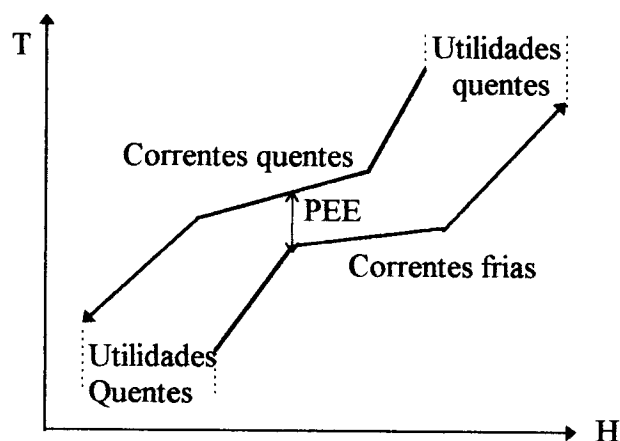


Figura 3.5 - Diagrama TH

Como pode ser observado na Figura 3.5, a abertura horizontal superior entre as curvas compostas representa a necessidade de utilidades quentes, e a abertura inferior representa a necessidade de utilidades frias. A região entre estas duas aberturas representa a máxima recuperação de energia que pode haver entre as correntes.

O ponto onde as duas curvas são mais próximas, ou seja, o ponto onde a diferença de temperatura entre as curvas é mínima ( $\Delta T_{min}$ ) é denominado de PEE, e limita o grau de integração energética possível no processo, representando um gargalo do ponto de vista da recuperação de energia.

### 3.2.1.2 - Tabela do Problema

A Tabela do Problema ou *Problem Table* apresentada por LINNHOFF E FLOWER (1978) é uma forma alternativa ao diagrama TH para identificar o PEE, bem como as demandas de utilidades quentes e frias e a temperatura do PEE para um determinado valor do  $\Delta T_{min}$ .

O procedimento para a construção da Tabela do Problema será ilustrado utilizando-se um problema exemplo apresentado por LINNHOFF e HINDMARSH (1978). Os dados de entrada das correntes são apresentados na Tabela 3.1. O problema exemplo é chamado Teste Caso nº 3 (TC3).

Tabela 3.1 - Dados de entrada para o TC3

| Número e tipo de corrente | CP (kW/ °C) | T <sub>E</sub> (°C) | T <sub>S</sub> (°C) | Carga de calor CP(T <sub>E</sub> -T <sub>S</sub> ) (kW) |
|---------------------------|-------------|---------------------|---------------------|---|
| (1) quente                | 2,0         | 150                 | 60                  | 180,0   |
| (2) quente                | 8,0         | 90                  | 60                  | 240,0   |
| (3) fria                  | 2,5         | 20                  | 125                 | -262,5  |
| (4) fria                  | 3,0         | 25                  | 100                 | -225,0  |
|                           |             |                     |                     | $\Sigma = -67,5$  |

O resultado do procedimento do algoritmo da Tabela do Problema, quando aplicado para o TC3 com um  $\Delta T_{min}$  de 20 °C, é mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tabela do Problema para o TC3

| Sub-redes | Correntes e Temperaturas   |     |       |                              | Deficit | Acúmulo |        | Fluxo de calor |       |
|-----------|----------------------------|-----|-------|------------------------------|---------|---------|--------|----------------|-------|
|           | Correntes frias<br>(3) (4) |     | T(°C) | Correntes quentes<br>(1) (2) |         | entrada | saída  | entrada        | saída |
|           |                            |     | 150   |                              |         |         |        |                |       |
| SR1       |                            | 125 | 145   |                              | -10,0   | 0,0     | 10,0   | 107,5          | 117,5 |
| SR2       | ↑                          | 100 | 120   |                              | +12,5   | 10,0    | -2,5   | 117,5          | 105,0 |
| SR3       | ↑                          | 70  | 90    |                              | +105,0  | -2,5    | -107,5 | 105,0          | 0,0   |
| SR4       |                            | 40  | 60    | ↓ ↓                          | -135,0  | -107,5  | 27,5   | 0,0            | 135,0 |
| SR5       |                            | 25  |       |                              | +82,5   | 27,5    | -55,0  | 135,0          | 52,5  |
| SR6       |                            | 20  |       |                              | +12,5   | -55,0   | -67,5  | 52,5           | 40,0  |

Na Tabela 3.2 os dados das correntes são mostrados na esquerda, divididos entre 6 intervalos de temperatura, correspondendo a sub-redes e portanto chamados de SR1 - SR6. Estes intervalos são definidos pelo fornecimento de temperaturas de entrada e de saída das correntes de processo. Por exemplo, a SR3 é definida pela temperatura de saída da corrente nº 4 e a temperatura de entrada da corrente nº 2.

Note que para assegurar a praticabilidade da completa troca de calor entre correntes quentes e frias, estas são separadas por um  $\Delta T_{min}$ . Por exemplo, o limite superior de SR3 é definido pela corrente fria nº 4 a 100°C enquanto a corrente quente neste ponto é de 120°C.

A praticabilidade da completa troca de calor entre todas as correntes quentes e frias é uma importante característica do algoritmo da Tabela do Problema. Isto significa que cada sub-rede pode ser uma rede de deficiência ou excedente de calor, mas nunca ambos. Estes déficits ou excessos são mostrados na coluna 1 da Tabela 3.2. A convenção do sinal é tal que um excesso é negativo e um déficit é positivo. Este déficit  $D_k$  é a diferença entre a entrada quente  $E_k$ , que corresponde ao calor suprido por aquecimento, e o calor de saída  $S_k$ , que é, o calor removido pelo resfriamento. Para a sub-rede K, o termo  $D_k$  pode ser calculado por meio da equação:

$$D_k = E_k - S_k = (T_k - T_{k+1}) \cdot (\sum CP_{FRIO} - \sum CP_{QUENTE}) \quad (3.4)$$

O somatório somente inclui as correntes presentes em SR(k). Assim a equação (3.4) é somente um balanço de entalpia.  $D_k$  pode ser positivo ou negativo, dependendo se o CP das correntes quentes for menor ou maior do que o das correntes frias. Se  $D_k$  for positivo, será necessário mais aquecimento do que resfriamento.

O calor excedente de uma sub-rede a alta temperatura pode ser usado para satisfazer o déficit de calor de outra sub-rede. O cálculo de calor que pode ser transferido desta maneira é dado pelas equações (3.5) e (3.6), e é mostrado nas colunas 2 e 3 da Tabela 3.2, sendo assumido que a energia que entra por meios externos é zero (representado na Tabela 3.2 por um zero colocado para SR1, na coluna 2).

Assim o cálculo da máxima quantidade de calor disponível para SR(k+1) é dado por:

$$E_{k+1} = S_k \quad (3.5)$$

E a máxima produção de calor da SR(k+1) é dado por:

$$S_{k+1} = S_k - D_{k+1} \quad (3.6)$$

Desta maneira, temos que o calor que entra em cada sub-rede é dado pelos valores na coluna 2 e o calor que sai de cada sub-rede na coluna 3.

As colunas 4 e 5 são baseadas na mesma seqüência de cálculo das colunas 2 e 3. A única diferença é que o maior valor negativo da coluna 3 é introduzido como a entrada para SR1. Este “maior valor negativo” corresponde ao calor mínimo necessário para a rede toda, ou seja, o mínimo de utilidades quentes necessário para toda a rede.

Devido à lógica sobre a qual a Tabela do Problema é baseada, três valores nas colunas 3, 4 e 5 têm um significado não somente para as sub-redes as quais eles pertencem, mas também para todo o problema. São eles:

- A base inferior na coluna 3 denota o resfriamento necessário para todo o problema, baseia-se no balanço de entalpia total. Também apresentado na Tabela 3.1.
- O topo da coluna 4 é a energia (aquecimento) necessária para todo o problema.
- A base da coluna 5 é correspondente ao resfriamento necessário para todo o problema.

Os resultados para a Tabela do Problema analisado na Tabela 3.2 são mostrados em forma de diagrama na Figura 3.6. Cada sub-rede é mostrada com todo o fluxo de calor calculado pelo algoritmo da Tabela do Problema. Nota-se que o fluxo de calor da SR3 para SR4 é zero, enquanto que todos os outros são positivos. O ponto do zero representa o fluxo de calor no PEE.



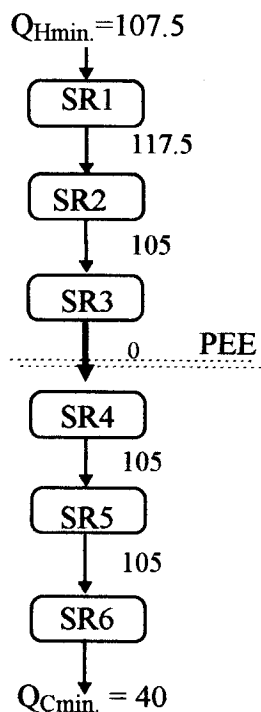


Figura 3.6 - Diagrama de fluxo de calor para as sub-redes do TC3

Em resumo, o seguinte procedimento é usado:

1- Identifica-se as temperaturas das correntes de processo, distribuindo-as em intervalos de temperaturas, chamados de sub-redes.

2- Um balanço de entalpia, dada pela equação (3.4), deve ser aplicado para cada sub-rede, cujos resultados são mostrados na coluna 1.

3- As colunas 2 e 3 são calculadas por meio das equações (3.5) e (3.6), assumindo  $E_1 = 0$ .

4- As colunas 4 e 5 são produzidas por meio das equações (3.5) e (3.6), adicionando a  $E_1$  o maior valor negativo na entrada na coluna 3. Se não existir entrada negativa na coluna 3 as colunas 4 e 5 serão idênticas às colunas 2 e 3.

### 3.2.2 - Considerações sobre o PEE

O PEE permite que o problema possa ser dividido em duas regiões, uma acima (extremidade quente) e uma abaixo (extremidade fria) do PEE.

A região acima do ponto de estrangulamento compreende todas as correntes ou partes de correntes que estejam acima da temperatura do PEE. Nesta região o subsistema atua como um sumidouro de calor, requerendo somente processos de troca e aquecimentos (utilidades quentes), não sendo necessário que ocorram resfriamentos.

A região abaixo do ponto de estrangulamento compreende todas as correntes ou partes das correntes que estejam abaixo da temperatura do PEE. Nesta região o subsistema atua como uma fonte de calor e requer somente processos de troca e resfriamento (utilidades frias), não sendo necessário aquecimentos.

A definição destas duas regiões tem implicações importantes. Se utilidades frias forem utilizadas acima do PEE, será necessário que sejam adicionadas utilidades quentes, pois esta região atua como sumidouro de calor, e estaríamos aumentando a sua necessidade térmica ao acrescentar uma utilidade fria. Desta forma, o consumo energético do sistema seria aumentado.

O mesmo ocorre com a região abaixo do PEE. Se forem acrescentadas utilidades quentes será necessário que utilidades frias sejam incluídas para receber o calor disponível nas utilidades quentes acrescentadas.

Não deve existir transferência de calor através do PEE. Se ocorrer a transferência de calor de uma corrente quente acima do PEE para uma corrente fria situada abaixo do PEE, os balanços térmicos de ambas as regiões serão afetados. Neste caso haverá necessidade de acrescentar utilidades quentes para satisfazer o balanço térmico acima do PEE e de acrescentar utilidades frias para satisfazer o balanço térmico abaixo do PEE.

Assim, para que o consumo de energia em uma rede seja mínimo, deverão ser obedecidos os seguintes princípios:

- Não usar utilidades frias acima do PEE;
- Não usar utilidades quentes abaixo do PEE;
- Não transferir calor através do PEE.

Estas regras formam a base para o método utilizado na síntese de RTC, e que será discutido posteriormente.

### 3.2.3 - Representação de Grade

Existem varias alternativas para a representação esquemática da RTC. A representação adotada neste trabalho será o Diagrama de Grade ou *Grid Diagram*, sugerida por LINNHOFF e FLOWER (1978).

Nesta forma de representação as correntes quentes são agrupadas no topo, simbolizadas por setas dirigidas da esquerda para a direita, de sua temperatura de entrada para temperatura de saída. As correntes frias, abaixo, têm as setas dirigidas da direita para a esquerda, em contra-corrente. Um exemplo deste tipo de representação é apresentado na Figura 3.7.

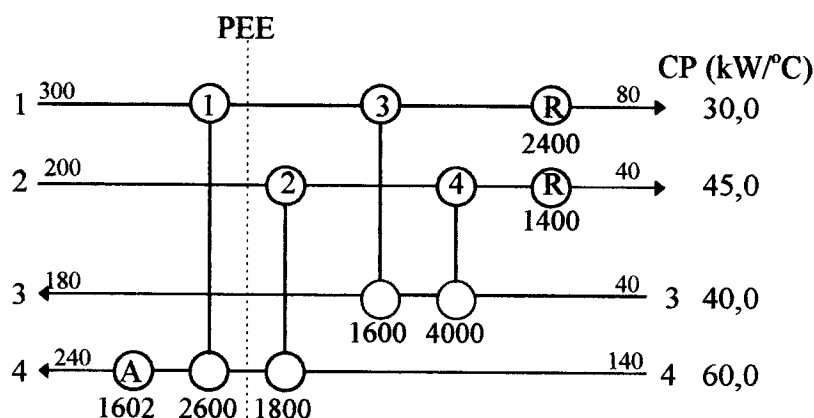


Figura 3.7 - Diagrama de Grade

Os trocadores de calor são representados por dois círculos sobre as correntes combinadas conectados por uma linha vertical. Aquecimentos são representados na grade por círculos sobre correntes frias e resfriamentos por círculos sobre as correntes quentes. O PEE é mostrado como uma linha vertical pontilhada. Abaixo de cada troca encontra-se a quantidade de energia transferida. As temperaturas intermediárias, iniciais e finais também devem aparecer entre os trocadores.

### 3.2.4 - Método do Ponto de Estrangulamento

Neste trabalho, para a síntese de RTC com a Máxima Recuperação de Energia (MRE) será utilizado o método proposto por LINNHOFF e HINDMARSH (1983), conhecido por Método do Ponto de Estrangulamento (MPE).

Este método reconhece a divisão do PEE e inicia a síntese a partir do PEE separadamente para os dois problemas restantes, acima e abaixo do PEE.

Para a aplicação do MPE são necessários os dados de cada corrente com relação a temperatura e capacidade térmica e a escolha de um  $\Delta T_{min}$ . Utilizando-se a Tabela do Problema ou o diagrama TH, identifica-se o PEE e as demandas de utilidades quentes e frias. O problema é então dividido em duas regiões, acima e abaixo do PEE. Sintetiza-se a rede para cada uma destas regiões, iniciando-se pelo PEE e caminhando-se no sentido contrário a ele. Desta forma, evita-se o problema de transferir calor através do PEE.

O objetivo do projeto não é somente a identificação de um custo ótimo, mas também, a segurança e a controlabilidade da rede. Por discriminação entre combinações ótimas, o projetista pode conduzir seu projeto usando sua experiência em processos, para obter maior segurança, controlabilidade e praticidade da rede. No desenvolvimento do MPE este benefício tem sido reconhecido, pois o método não diz ao projetista quais as combinações a fazer, mas previamente informa-lhe as suas opções. Nas regiões próximas do PEE, combinações essenciais são identificadas usando regras heurísticas, que informam o projetista se existem opções de avaliação no PEE e se é necessário a divisão de correntes.

A identificação de combinações essenciais no PEE, de avaliações de opções de projeto e a necessidade de dividir correntes, são alcançados pela aplicação de regras heurísticas. No desenvolvimento destas regras é feita referência para trocas no ponto de estrangulamento, também chamado de *pinch matches*.

A Figura 3.8.a representa uma troca no ponto de estrangulamento. Na Figura 3.8.b a troca 2 não representa uma troca no ponto de estrangulamento, ou seja, não se trata de um *pinch match*.

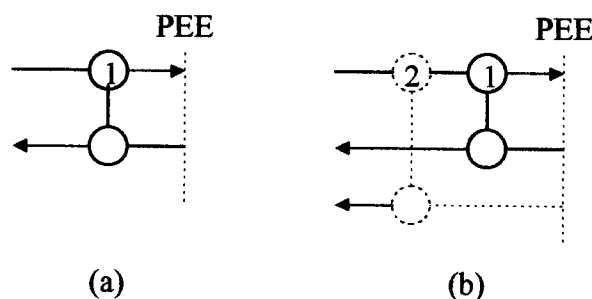


Figura 3.8 - Trocas no ponto de estrangulamento

A primeira regra diz respeito a populações de correntes no PEE. A população de correntes quentes e frias tem sido tal que ele permitirá algumas medidas de troca compatíveis com a utilidade mínima usada.

Considere um projeto na região acima do PEE como apresentado na Figura 3.9.a. Utilidades frias acima do PEE violariam o objetivo de utilidades mínimas. Todavia, cada corrente quente tem de ser esfriada até a temperatura do PEE por processos de troca. Isto é mostrado na Figura 3.9.a por situar *pinch matches* entre a corrente quente nº 2 e a corrente fria nº 4, e entre a corrente quente nº 3 e a corrente fria nº 5. Nota-se, no entanto, que não podem ocorrer combinações com outras corrente frias sem violação do  $\Delta T_{\min}$ . Seria então necessário utilidades frias acima do PEE para que a corrente fria nº 1 pudesse chegar à temperatura do PEE. Em tal circunstância observa-se que os dados originais da corrente no PEE não são compatíveis com um projeto onde se tem vazões mínimas para as utilidades.

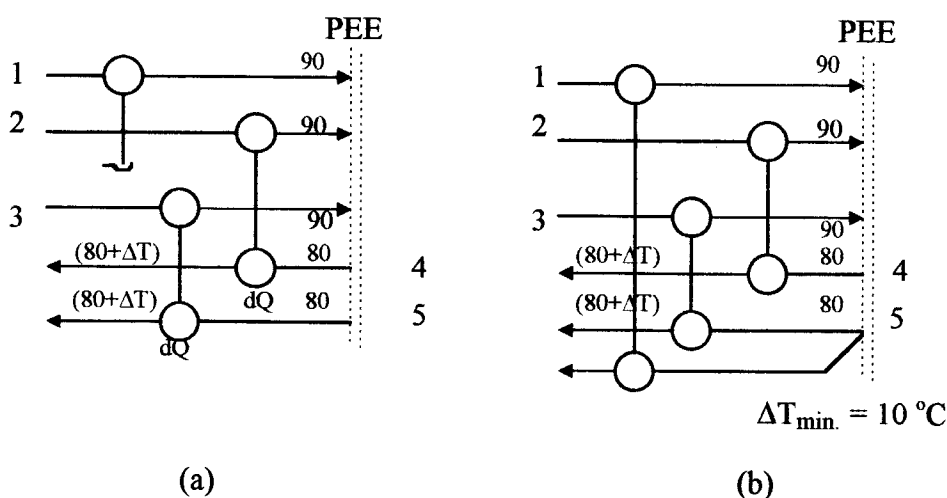


Figura 3.9 - Projeto da rede para a região acima do PEE

Quando esta incompatibilidade ocorre, as correntes no PEE necessitam de "correções" por divisão de correntes, como mostrado na Figura 3.9.b. Na divisão de uma corrente fria, uma ramificação fria adicional é criada, permitindo um *pinch match* com a corrente quente nº 1.

Para resumir, a população de correntes na região acima do PEE é compatível com o projeto de utilidades mínimas somente se a troca no ponto de estrangulamento for base para cada corrente quente. Assim deve ocorrer a desigualdade:

$$NH \leq NC \quad (3.7.a)$$

Onde:

NH é o número de correntes quentes ou ramificações,

NC é o número de correntes frias ou ramificações.

A divisão de correntes pode ser necessária para assegurar que a desigualdade seja cumprida.

O argumento aplicado para a região abaixo do PEE é análogo. Para evitar utilidades quentes, cada corrente fria deve ser conduzida para a temperatura do PEE por processos de troca. Como resultado, o *pinch match* é necessário para cada corrente fria no PEE, e isto é possível somente se ocorrer a desigualdade:

$$NH \geq NC \quad (3.7.b)$$

Uma outra divisão de correntes pode ser necessária, para assegurar que a desigualdade seja cumprida.

A segunda regra básica a ser observada diz respeito à relação entre as capacidades térmicas das correntes. É necessário que as capacidades térmicas das correntes se aproximando do PEE sejam menores ou iguais às das correntes se afastando do PEE, a fim de que não haja violação do  $\Delta T_{min}$  fixado no início do projeto. Assim:

Para a troca na região acima do PEE:

$$CPH \leq CPC \quad (3.8.a)$$

Para a troca na região abaixo do PEE:

$$CPH \geq CPC \quad (3.8.b)$$

Onde:

CPH é a capacidade térmica das correntes quentes ou correntes ramificadas;

CPC é a capacidade térmica das correntes frias ou correntes ramificadas.

Caso esta relação entre as capacidades térmicas não seja obedecida, deve-se utilizar a divisão de correntes para resolver o problema.

A terceira e última regra a ser observada na aplicação do MPE é a das capacidades térmicas globais, que estabelece que o somatório das capacidades térmicas das correntes frias restantes não pode ser menor que as capacidades térmicas das correntes que trocam calor, corrente quente e corrente fria, respectivamente. Caso contrário, uma delas deve ser dividida.

Esta regra é utilizada tanto acima como abaixo do PEE, e a corrente a ser dividida é escolhida de modo a satisfazer esta regra. A sua aplicação evita que o  $\Delta T_{min}$  seja violado em uma outra etapa da síntese.

Após terem sido realizados todos os cruzamentos possíveis nas duas regiões, as duas sub-redes sintetizadas acima e abaixo do PEE são acopladas, formando uma única rede, com a garantia da obtenção da MRE. Esta rede deve, posteriormente, sofrer alguns refinamentos para a minimização do seu custo global.

### 3.2.5 - Número Mínimo de Unidades

O custo de capital de uma RTC é fortemente afetado pelo número de unidades envolvidas. Além dos equipamentos em si, alguns outros fatores que estão a eles relacionados, como por exemplo, fundações, tubulações, válvulas, bocais, controle, manutenção e mão de obra, certamente irão influenciar no custo global da rede. Assim, para diminuir o custo de uma rede, ela deve conter o menor número possível de unidades.

O número mínimo de unidades (NMU) é um dos objetivos na obtenção da rede que pode ser facilmente fixado antes da sua síntese. Este valor é obtido através do Teorema de Euler para redes, cuja adaptação às RTC, proposta por LINNHOFF et al. (1982), estabelece que:

$$U = N + L - S \quad (3.9)$$

Onde:

U é o número de unidades de troca térmica;

N é o número de correntes, incluindo as utilidades;

L é o número de laços de troca térmica na rede;

S é o número de problemas independentes na rede.

O número de problemas independentes representa o número de sub-redes que pode ser obtido quando numa rede uma corrente quente e uma corrente fria se satisfazem termicamente, ou seja, quando a corrente quente dispõe da exata quantidade de energia que a corrente fria necessita para ser satisfeita.

O laço de troca térmica pode ser definido como um caminho fechado que pode ser traçado dentro da rede, partindo-se de um trocador e chegando-se a este mesmo trocador.

As redes normalmente encontradas na prática são inteiramente conectadas, e, portanto,  $S=1$ . O NMU é obtido quando não há laços de troca térmica na rede, ou seja,  $L=0$ . Desta forma, o NMU é dado pela regra abaixo:

$$U_{\text{MIN}} = N - 1 \quad (3.10)$$

Quando se aplica o MPE, obtém-se uma rede com a MRE. Esta rede é obtida dividindo-se o problema em duas regiões, uma abaixo e outra acima do PEE. Desta forma, a equação (3.10) deve ser aplicada para cada região termodinamicamente independente. Assim, o NMU para a MRE é dado por:

$$U_{\text{MIN, MRE}} = U_{\text{MIN}} \text{ acima do PEE} + U_{\text{MIN}} \text{ abaixo do PEE} \quad (3.11)$$

Se ocorrer a transferência de  $\alpha$  unidades de energia através do PEE, o consumo de utilidades quente e fria aumentará também em  $\alpha$  unidades e as regiões não serão mais termodinamicamente independentes. Assim, a equação 3.10 deverá ser aplicada para a rede como um todo, ignorando-se a existência do PEE. O NMU para essa situação (sendo  $S=1$ ) será menor ou igual ao valor encontrado quando a recuperação de energia é máxima. Isso acontece porque no cálculo de  $U_{\text{MIN, MRE}}$  as correntes que cruzam o PEE são contadas duas vezes.

AHMAD (1985) demonstrou que em cada rede com MRE, o número de laços de troca térmica é igual ao número de correntes cruzando o PEE (NCE) menos 1, ou seja:

$$U_{\text{MIN, MRE}} = U_{\text{MIN}} - \text{NCE} - 1 \quad (3.12)$$

Portanto o  $U_{\text{MIN, MRE}}$  será igual a  $U_{\text{MIN}}$  se o número de laços for nulo.



### 3.2.6 - Identificação e Quebra de Laços de Troca Térmica

Após a síntese da rede com MRE se busca obter o NMU. Para tanto, técnicas evolutivas devem ser utilizadas logo após a obtenção da rede com a finalidade de identificar os prováveis laços de troca térmica entre os trocadores. A quebra destes laços representa a diminuição do número de trocadores de calor, pois para cada laço rompido temos a eliminação de um trocador de calor na rede.

No entanto, a eliminação de um trocador certamente levará a uma violação do  $\Delta T_{min}$ . Esta violação pode ser aceitável, dependendo das condições em que a rede vai operar e de quanto é esta violação. Para os casos em que não é permitida a violação do  $\Delta T_{min}$ , os laços só poderão ser rompidos permitindo-se a transferência de energia através do PEE, o que aumenta o consumo de utilidades quentes e frias. A restauração do  $\Delta T_{min}$  é feita descobrindo-se um caminho ou *path* entre uma utilidade quente e uma fria, passando por um trocador de calor.

SU e MOTARD (1984) apresentaram uma técnica algorítmica evolutiva para a síntese da rede baseada na identificação e quebra de todos os laços de troca térmica da rede inicial, inclusive prevendo a divisão de correntes, se necessário. O método reduz o número de trocadores da rede, redistribuindo a quantidade de energia do trocador a ser eliminado para os demais trocadores do laço. Para a identificação dos laços, os autores sugeriram o critério dos níveis de laço. Um laço de nível N é aquele que envolve N correntes quentes e N correntes frias. Desta forma, um laço de nível 1 envolve uma corrente quente e uma corrente fria, um laço de nível 2 duas correntes quentes e duas correntes frias, e assim sucessivamente. O nível máximo para os laços em uma rede é o menor valor entre o número de correntes quentes e frias.

PETHE et al. (1989) utilizaram para a identificação dos laços a construção de uma matriz incidência para representar a rede a ser evoluída. As linhas da matriz são as correntes de processo, incluindo as utilidades, enquanto que as colunas são os trocadores de calor, incluindo os aquecedores e resfriadores. Cada equipamento é identificado por um +1 para a corrente quente e -1 para a corrente fria. Os demais elementos das colunas são nulos. A partir daí um tratamento matricial é utilizado para identificar todos os laços presentes na malha.

Neste trabalho será utilizado para a identificação e quebra de laços em RTC, o algoritmo desenvolvido por RAVAGNANI (1994), onde a matriz incidência proposta por PETHE et al. (1989) juntamente com o critério dos níveis de laços de SU e MOTARD (1984) de não alterar o consumo de utilidades foram utilizados.

Um exemplo para a quebra de laços de troca térmica é apresentado na Figura 3.10 e 3.11, e a restauração do  $\Delta T_{min}$  por meio de um *path* entre uma utilidade quente e uma fria na Figura 3.12.

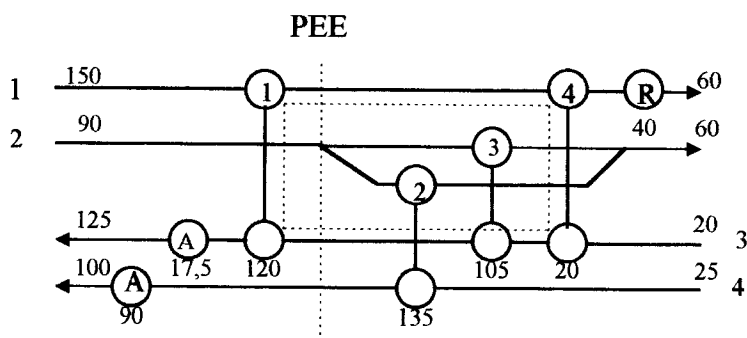


Figura 3.10 - Identificação de um laço de troca térmica

A Figura 3.10 mostra um laço de troca térmica entre os trocadores 1 e 4. Como o trocador 4 possui uma quantidade de calor menor do que o trocador 1, ele é escolhido para ser eliminado. Assim, como apresentado na Figura 3.11, as 20 unidades de energia disponíveis no trocador 4 são incorporadas ao trocador 1. Esta operação, no entanto, viola o  $\Delta T_{min}$  de 20 °C no trocador 1 em 2 °C.

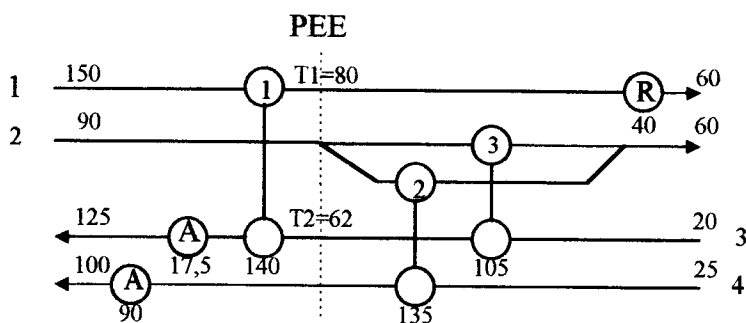


Figura 3.11 - Quebra do laço de troca térmica

Todavia, o  $\Delta T_{min}$  pode ser restaurado utilizando-se um *path*, mostrado na Figura 3.12. Assim cria-se um caminho entre o aquecedor A da corrente 3 e o resfriador R,

passando pelo trocador 1, onde  $X$  unidades de energia são acrescentadas no aquecedor e no resfriador e retiradas no trocador 1. Fixando-se  $T_2$  em  $60\text{ }^\circ\text{C}$  verifica-se que para elevar a temperatura  $T_1$  a  $82\text{ }^\circ\text{C}$  a quantidade  $X$  deve ser igual a 4 unidades de energia.

A restauração do  $\Delta T_{\min}$  requer a transferência de energia através do PEE, o que ocasiona o acréscimo na demanda de utilidades. Desta forma, é sempre necessário avaliar se este acréscimo de energia compensa a diminuição do custo de capital pela remoção do trocador na rede.

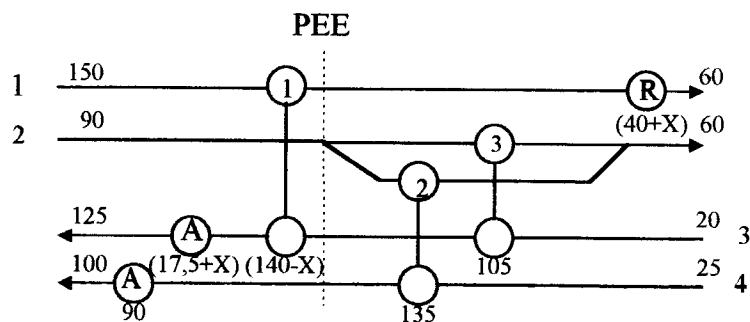


Figura 3.12 - Restauração do  $\Delta T_{\min}$

### 3.3 - OTIMIZAÇÃO DO $\Delta T_{min}$ ANTES DA SÍNTESE DA REDE

A característica básica de uma RTC é o *trade-off* entre custo de energia e capital, ou seja, a procura da máxima recuperação de energia com menor custo de capital. A diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{min}$ ) determina a máxima recuperação de calor e então, a mínima necessidade de aquecimento e resfriamento externo. Quando o  $\Delta T_{min}$  aumenta, aumenta também a demanda por utilidades, mas, também diminui a área de troca térmica. Assim, o custo total anual é minimizado para algum valor de  $\Delta T_{min}$ , como pode ser observado na Figura 3.13.

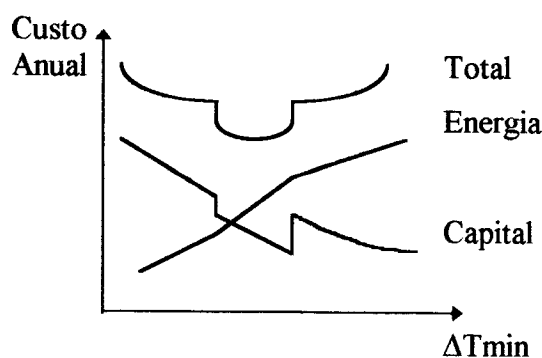


Figura 3.13 - Variação do custo anual com o  $\Delta T_{min}$

No entanto, a Figura 3.13 também mostra que a demanda de utilidades e a área de troca térmica podem freqüentemente mudar para caminhos complexos com a mudança do  $\Delta T_{min}$ . O NMU pode também mudar. Assim, o custo de capital é afetado pela estrutura da rede, bem como pelo tamanho dos trocadores, existindo um *trade-off* entre energia consumida, área total de troca e número mínimo de unidades.

Usualmente o problema é tratado admitindo-se um valor inicial para o  $\Delta T_{min}$ , que geralmente é baseado em experiência anterior. Em seguida, é desenvolvida a síntese e a otimização da rede, onde é encontrada a configuração dos equipamentos que forneça o menor custo total anual. O processo é então repetido para diversos valores de  $\Delta T_{min}$ , chegando-se ao valor de menor custo global. Como os processos de síntese e otimização são extremamente complexos, esse roteiro de cálculo é muito trabalhoso. Além disso, a rapidez de convergência dependerá do valor inicial do  $\Delta T_{min}$ .

AHMAD e LINNHOFF (1984) propuseram um procedimento que simplifica muito o problema. Conforme mostra a Figura 3.14, o valor ótimo do  $\Delta T_{min}$  é calculado à priori e a partir deste, a síntese da rede é desenvolvida. O cálculo é feito estabelecendo-se metas para o consumo de utilidades, número de unidades, área de transferência de calor e custo total anual. Algumas dessas metas, tais como o consumo de utilidades e o número de unidades foram discutidas anteriormente, as demais serão apresentadas a seguir.

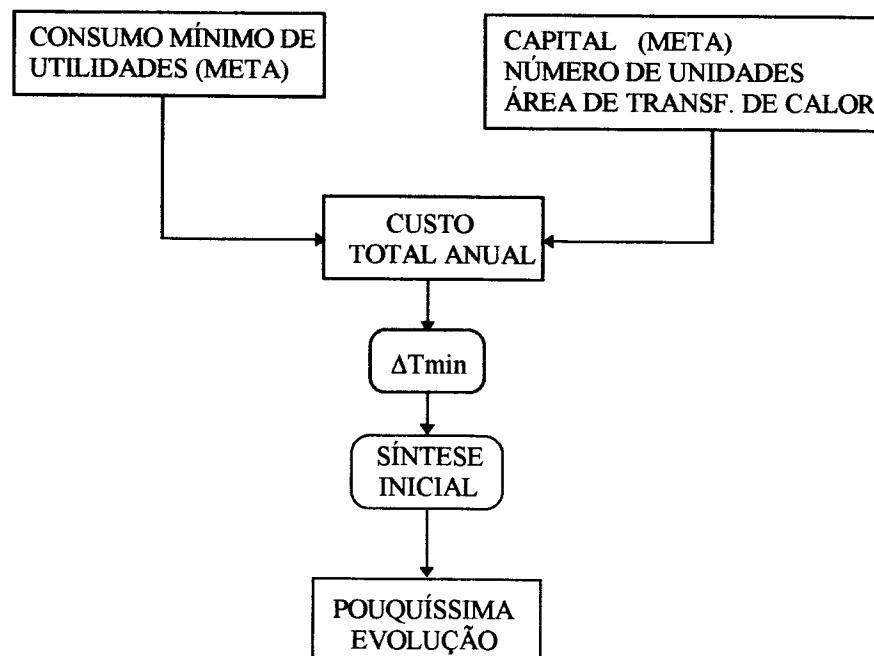


Figura 3.14 - Forma de abordagem do problema proposta por AHMAD (1985)

### 3.3.1 - Área de Transferência de Calor

Para um determinado conjunto de correntes quentes e frias, depois de fixada a MRE, é possível encontrar a área mínima de troca térmica para a rede a ser sintetizada. Este cálculo é baseado no diagrama TH conforme mostra a Figura 3.15. Os intervalos de entalpia no diagrama TH são obtidos para cada mudança de inclinação nas curvas compostas. Aplicando o escoamento em contracorrente às curvas compostas, TOWNSEND E LINNHOFF (1984) chegaram a seguinte expressão para a área mínima:

$$A_{MN} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{MLDT_i} \cdot \left( \sum_{j=1}^m \frac{q_j}{h_j} \right)_i \quad (3.13)$$

Que ampliada para levar em conta o número de cascos em série, é dada por:

$$A_{\text{MIN}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{FT}_i \cdot \text{MLDT}_i} \cdot \left( \sum_{j=1}^m q_j \right)_i \quad (3.14)$$

Onde:

$n$  = número de intervalos;

$m$  = número de correntes;

$q_j$  = energia transferida pelas correntes  $j$  (quentes e frias) existentes no intervalo  $i$ , conforme Figura 3.15;

$h_j$  = coeficiente de transferência de calor convectivo (incluindo incrustação) das correntes  $j$ , também presentes no intervalo  $i$ ;

$\text{MLDT}_i$  = média logarítmica da diferença de temperatura para cada intervalo, calculada para o escoamento em contracorrente.

$\text{FT}_i$  = fator de correção para o MLDT do intervalo  $i$ .

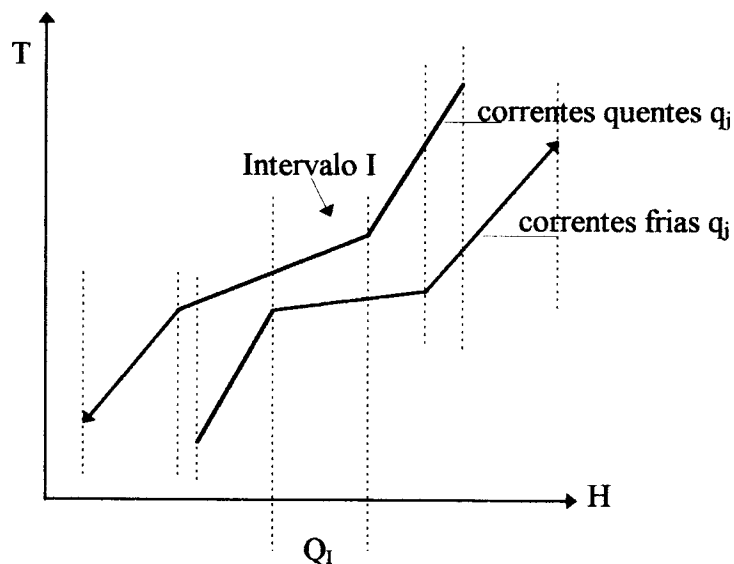


Figura 3.15 - Intervalos de Entalpia

O valor calculado pela equação (3.14) só representará a área mínima absoluta se os coeficientes de película das correntes forem iguais. Entretanto, segundo AHMAD (1985) e

TOWNSEND E LINNHOFF (1984), para diferenças nos coeficientes, de uma ordem de magnitude de até dez vezes, o valor calculado será maior que o mínimo em torno de 10%, o que é perfeitamente aceitável, uma vez que a área mínima para ser obtida exige, normalmente, uma estrutura extremamente complexa, que raramente seria usada na prática.

### 3.3.2 - Custo Total Anual

O custo total anual compreende duas parcelas: uma relativa ao capital (custo dos equipamentos) e outra relativa ao consumo de utilidades.

#### 3.3.2.1 - Custo de Capital

O custo de capital de uma RTC é função da área de transferência de calor e do número de equipamentos de troca térmica. Desta forma, uma boa estimativa para o custo de capital depende da maneira como estas variáveis estão relacionadas. Geralmente, o custo de capital está relacionado aos trocadores da seguinte forma:

$$CEQ = a + b \cdot A^c \quad (3.15)$$

Onde  $A$  é a área de troca térmica e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes, sendo que  $0 < c \leq 1$ .

Os valores das constantes variam bastante com o período (época) e portanto o custo relativo aos equipamentos só pode ser calculado de maneira aproximada. AHMAD (1985) observou, entretanto, que na determinação do valor ótimo do  $\Delta T_{min}$ , o cálculo preciso, em valores absolutos, do custo relativo ao capital é de importância secundária. O mais importante é que as características das curvas dos custos estimados para capital e energia sejam preservados quando da determinação dos custos reais. Essa situação é ilustrada na Figura 3.16.

O custo total da rede, relativo aos trocadores, será a soma dos custos de cada trocador. No entanto, na fase de determinação do  $\Delta T_{min}$  ótimo a rede ainda não é conhecida e o custo deverá ser estimado em função da área mínima e do número de unidades.

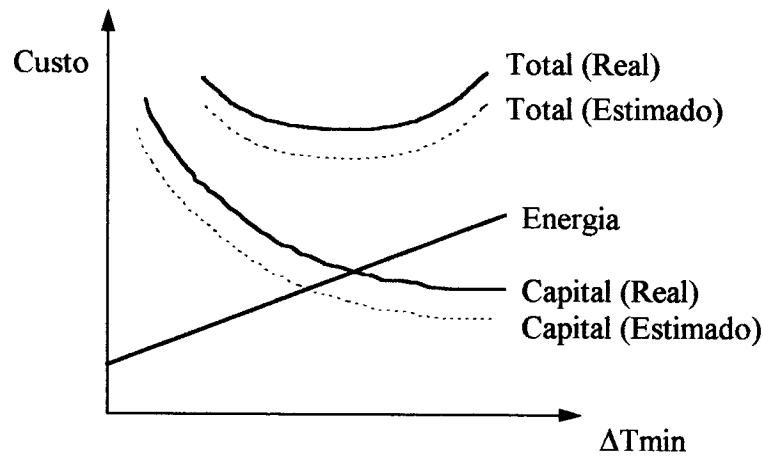


Figura 3.16 - Influência dos custos Reais e Estimados no valor do  $\Delta T_{min}$  ótimo

Segundo AHMAD (1985), o custo relativo ao capital pode ser dado por:

$$CEQ = U_{MIN} \cdot \left[ a + b \cdot \left( \frac{A_{MIN}}{U_{MIN}} \right)^c \right] \quad (3.16)$$

Onde:

$U_{MIN}$  = número mínimo de unidades;

$A_{MIN}$  = área mínima de transferência de calor;

$a, b, c$  = constantes

O custo anual relativo ao capital é calculado utilizando-se uma taxa de atratividade  $i$  e assumindo-se um tempo de vida útil para os equipamentos  $T$ , no qual o capital será depreciado. Assim:

$$CEQ_{ANUAL} = CEQ \cdot \frac{1}{T} \cdot (1+i)^T \quad (3.17)$$

### 3.3.2.1 - Custo de Consumo de Utilidades

O custo relativo às utilidades é calculado em função dos custos e consumos mínimos das utilidades quente e fria:



$$CENER = HOP \cdot \left( \sum_{i=1}^n (UTQ \cdot CQ) + \sum_{i=1}^m (UTF \cdot CF) \right) \quad (3.18)$$

Onde:

HOP = horas de operação da planta por ano

UTQ = consumo da utilidade quente kW

UTF = consumo da utilidade fria kW

CQ = custo da utilidade quente (dólares/kW)

CF = custo da utilidade fria (dólares/kW)

Assim, o custo total anual é dado por:

$$CT_{ANUAL} = CEQ_{ANUAL} + CENER \quad (3.19)$$

### 3.4 - ANÁLISE DA FLEXIBILIDADE

Geralmente em processos industriais as condições de operação da planta não são fixas, podendo ocorrer variações nestas condições, tais como vazões e temperaturas de entrada e saída de uma determinada corrente. Assim, se a RTC não estiver projetada para suportar estas variações, isto poderá comprometer todo o processo. Em alguns casos estas variações poderão levar a um aumento das utilidades usadas, e conseqüentemente um aumento no custo do processo. Em outros casos, onde se tem uma corrente que não possua um aquecedor ou resfriador, estas variações poderão causar mudanças nas temperaturas de saída das correntes pertencentes à rede, podendo-se com isto, inviabilizar o processo.

Assim, faz-se necessário levar em consideração as variações nas condições de operação do processo na síntese da rede. As RTC que suportam tais variações são conhecidas como redes flexíveis.

O projeto de redes flexíveis é em primeiro lugar um problema econômico. O problema maior não é saber o quanto uma rede é flexível, mas sim, quanto esta flexibilidade irá custar, ou seja, a quantidade de flexibilidade que um processo industrial exige é uma função de quanto ela custará. A metodologia desenvolvida neste trabalho busca obter um *trade-off* entre flexibilidade requerida, custo de capital e custo energético, buscando-se sempre uma rede que seja flexível para todo o processo estudado, contendo o menor custo de capital e custo energético possíveis.

Na síntese de redes flexíveis utilizando-se a Análise Pinch, a solução normalmente adotada é conduzir a região de projeto pinch para cada período, procurando estruturas comuns. O grau de flexibilidade requerido é então obtido através da instalação de desvios ou *by-pass* nos trocadores de calor e por ajustes nos fluxos das utilidades. O que ocorre neste caso, é que, além de um tempo demasiadamente longo (pois temos que projetar a rede para cada período de operação), a solução adotada (geralmente a que nos parece mais óbvia), pode nem sempre ser a mais econômica.

KOTJABASAKIS (1988) propõe duas ferramentas adicionais para a síntese de redes flexíveis, *Downstream Paths* (conecções ininterruptas entre uma perturbação e uma variável controlada) e as Tabelas de Sensitividade (*Sensitive Table*). Utilizando-se estes conceitos, pode-se propor alterações na rede (aumento da área de troca térmica, aumento de utilidades ou utilização de desvios ou *by-pass*) para torná-la flexível.

Com a utilização de *Downstream Paths* é possível determinar o caminho seguido por uma perturbação causada na rede, e assim, analisar a sua influência. Com as Tabelas de Sensitividade, determina-se as variações nos parâmetros da rede (temperaturas, vazões e efetividade), causados por perturbações quantificadas. Os resultados são tabelados. Para verificar a influência de uma determinada perturbação, consulta-se a tabela. Com isto evita-se a simulação da rede.

A proposta de KOTJABASAKIS (1988) foi eliminar a síntese de redes flexíveis por inspeção, considerando que a aplicação de ambas as metodologias levariam à geração de redes flexíveis com custos menores que as geradas por inspeção. No entanto, para problemas com elevado número de trocadores, o número de tabelas é muito grande, dificultando a solução do problema, e a análise por inspeção se torna mais simples.

Neste trabalho foi desenvolvido um método computacional onde se utiliza a Análise Pinch para projetar a rede para apenas um período de operação (denominado caso base), sendo feita uma análise da flexibilidade para obter o projeto final envolvendo todos os demais períodos. Esta análise tem como objetivo adaptar o caso base para os demais períodos com o menor custo global (equipamentos e energia), ou seja, obter o *trade-off* entre custo de equipamentos e custo de energia para a rede final, que inclui todos os períodos de operação.

Para tanto, foram utilizados os conceitos de *Downstream Paths*, onde os novos modos de operação foram descritos como desvios do caso base. Estes desvios, denominados perturbações (P), envolvem mudanças em temperaturas de entradas e/ou vazões das correntes. As temperaturas objetivo (de saída) que devem ser controladas foram denominadas variáveis controladas (C).

As trocas com utilidades (aquecimentos e resfriamentos) são manipuladas através de ajustes de suas vazões. Desta forma, o uso de utilidades para a manipulação das temperaturas de saída normalmente seria a escolha preferida quando possível. Em alguns casos grande parte das temperaturas de saída são mantidas desta maneira, mas, no caso das correntes onde não se possui nenhum aquecedor ou resfriador, a instalação de um novo equipamento pode não ser a escolha mais econômica para solucionar o problema. Deste modo, tentamos manter estas temperaturas através de modificações nas trocas já existentes numa determinada rede.

O primeiro passo do método é estudar o comportamento da rede após ter sido inserida uma perturbação, verificando principalmente o que ocorre com as variáveis controladas. Isto é feito assumindo-se que as áreas de todos os trocadores permaneçam inalteradas e considerando como variáveis controladas somente aquelas em que as correntes às quais pertençam não disponham de trocas com utilidades. Assim, aplica-se os conceitos de *Downstream Paths* para a identificação das trocas que influenciam estas variáveis.

O passo seguinte é restaurar as temperaturas de saída e identificar qual é a troca mais conveniente para realizar esta modificação, ou seja, qual é a mudança na rede que após a restauração das temperaturas de saída nos levará ao menor custo global. Este procedimento é aplicado para todos os períodos de operação separadamente.

Desta forma, podemos chegar à rede final com menor tempo de projeto e menor custo global.

### 3.4.1 - *Downstream Paths*

*Downstream Paths* são conexões ininterruptas (no sentido do escoamento do fluido) entre uma perturbação e uma variável controlada, apresentados na Figura 3.17.a. Os desvios denotados como perturbações (P) envolvem mudanças em temperaturas de entradas e/ou vazões das correntes. As temperaturas objetivo (de saída) que devem ser controladas foram denotadas variáveis controladas (C).

Usando o conceito de *Downstream Paths* é fácil identificar qual o efeito de uma perturbação sobre uma variável controlada, ou seja, se uma perturbação afeta ou não uma determinada variável controlada.

Através de modificações na rede podemos romper o efeito de uma perturbação sobre uma variável controlada. Estas modificações podem ser:

- Quebrar os *Downstream Paths*. A Figura 3.17.a mostra dois *Downstream Paths* de P na corrente nº 4 para C na corrente nº 3. Se a temperatura e outras limitações permitirem o projeto da Figura 3.17.b (com a troca nº 3 removida), podemos parar a propagação de P ao longo do *path* 1.
- Inserir um elemento contra-corrente. Se temperaturas e outras limitações permitirem o projeto da Figura 3.17.c (as trocas nº 2 e nº 4 foram efetuadas na corrente nº 2), o *path* nº 2 é bloqueado através da inserção de um elemento contra corrente.

- Aplicar manipulações. A Figura 3.18 mostra que existe um *Downstream Path* para todas as 4 trocas de calor em C na corrente nº 3. Então, um *by-pass* sobre alguma das quatro trocas poderia potencialmente ser usado para manter C neste desejado valor.

Para saber qual a mudança no projeto que poderia ser a melhor alternativa, deve-se conhecer os *trade-offs* econômicos envolvendo energia e capital para cada modificação.

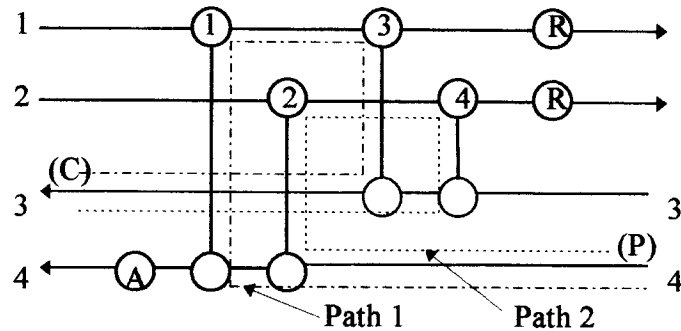


Figura 3.17.a - *Downstream Paths*

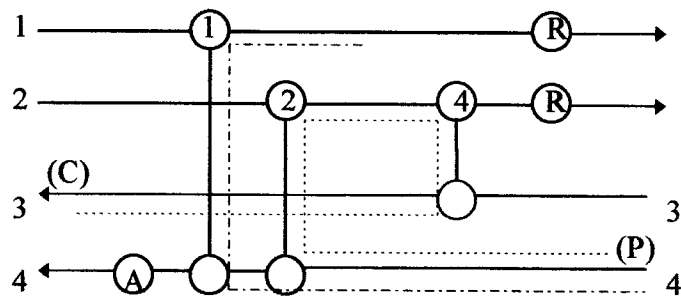


Figura 3.17.b - Quebra de *Downstream Path*

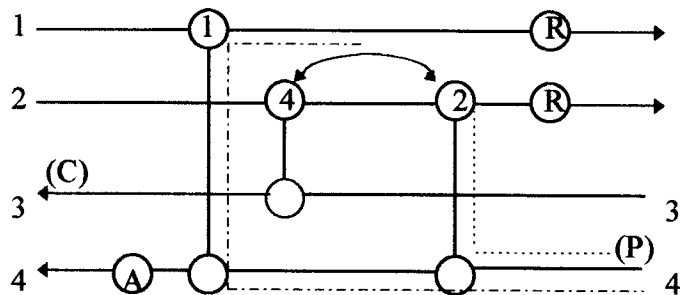


Figura 3.17.c - Inserção de elemento contra-corrente

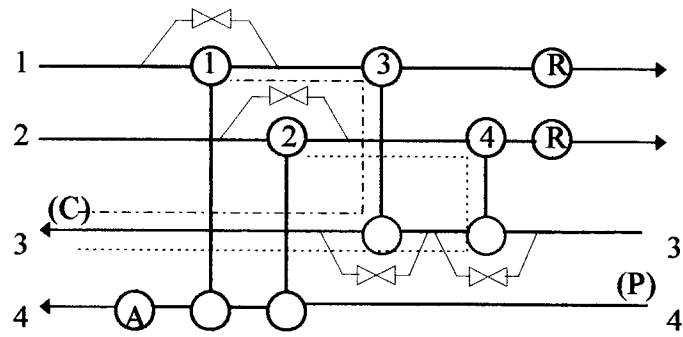


Figura 3.18 - Aplicação de manipulações

## **4 - PROGRAMA COMPUTACIONAL DESARROLLADO**

## 4.1 - INTRODUÇÃO

Através da metodologia descrita no capítulo anterior foi desenvolvido um programa computacional visando obter uma rede que, além de ser ótima em relação a MRE e o NMU, seja flexível quanto a variações nas condições de processo, ou seja, que se adapte a estas variações sem que haja a necessidade de mudança física na rede após a sua instalação.

O programa foi desenvolvido em linguagem *FORTRAN 77*, no sistema operacional *MS-DOS*, podendo ser utilizado em microcomputadores do tipo 486 ou superiores. O programa foi desenvolvido em forma modular, sendo composto por um programa principal e cinco módulos.

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os diagramas de bloco referentes ao programa principal e aos módulos a ele vinculados.



## 4.2 - PROGRAMA PRINCIPAL

O programa principal, além de acionar os demais módulos, lê os dados de entrada e fornece a saída dos resultados obtidos.

A Figura 4.1 mostra o diagrama de blocos referente ao programa desenvolvido, onde são acionados sequencialmente o programa principal e os módulos: otimização do  $\Delta T_{min}$ , tabela do problema, síntese da rede, identificação e quebra de laços e análise da flexibilidade.

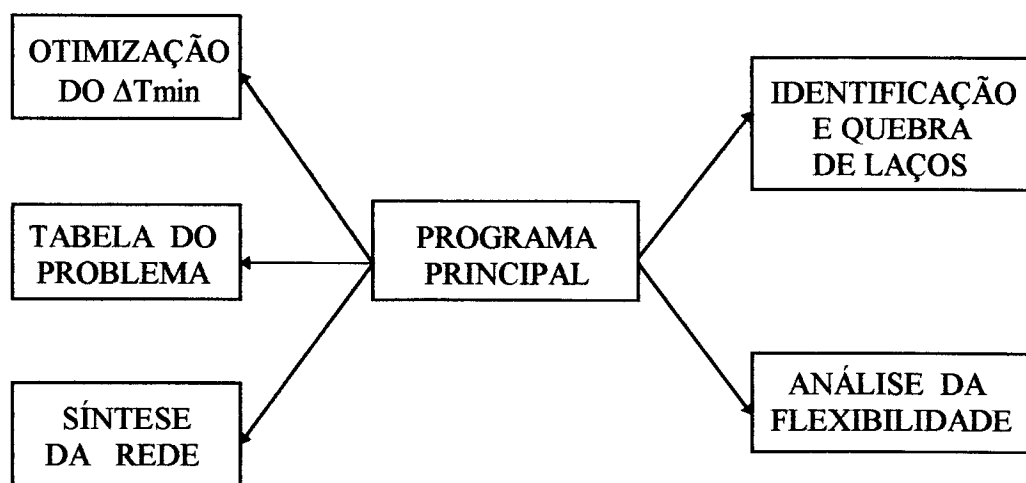


Figura 4.1 - Diagrama de blocos para o programa desenvolvido

Todas as propriedades físicas devem ser fornecidas na temperatura média aritmética entre as temperaturas de entrada e de saída das correntes de processo.

Os dados de entrada referentes às correntes a serem inseridos são:

- número de correntes quentes e frias;
- temperatura de entrada e saída em  $^{\circ}\text{C}$ ;
- produto entre vazão mássica e  $C_p$  em  $\text{W}/^{\circ}\text{C}$ ;
- coeficiente de transferência de calor convectivo em  $\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- fator de incrustação em  $\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$

Havendo diferentes períodos de operação, além dos dados acima, deverá ser inserida a duração dos mesmos em meses/ano.

Para as utilidades, além dos dados mencionados acima, deverão ser inseridos os custos em US\$/kWhr.

Também deverão ser inseridas as constantes **a**, **b** e **c** da equação de custo dos trocadores, a taxa de atratividade, o tempo de vida útil dos equipamentos (em anos) e o número de horas de funcionamento da planta por ano.

Inseridos estes dados, tem-se a alternativa de entrar com um valor para o  $\Delta T_{min}$  ou obter o seu valor ótimo acionando o módulo otimização do  $\Delta T_{min}$ .

Em seguida, é acionado o módulo tabela do problema, onde após a sua construção, determina-se o consumo mínimo de energia e divide-se o problema em duas regiões, uma acima e outra abaixo do PEE. Feito isto, o programa principal irá acionar o módulo síntese da rede, onde será realizado o procedimento de síntese para as duas regiões, obtendo-se assim a rede para a MRE, que deverá ser evoluída. Esta evolução é feita no módulo identificação e quebra de laços.

Ocorrendo mais de um período de funcionamento no processo, será acionado o módulo análise da flexibilidade, onde a rede será adaptada aos demais períodos do processo.

Os resultados são fornecidos em forma de tabelas, podendo ser impresso a tabela do problema, a rede evoluída contendo as temperaturas de entrada e saída, as áreas e o calor trocado para cada trocador, além do CP da corrente quente e fria à qual pertence cada trocador. No caso de processos com mais de um período, também são impressos em uma tabela a área de troca térmica e o calor trocado nos trocadores para cada período, a área instalada de cada trocador, o custo das utilidades, o custo dos trocadores e o custo global da rede, finalizando a aplicação do programa.

### 4.3 - MÓDULO OTIMIZAÇÃO DO $\Delta T_{min}$

Este módulo tem por finalidade, a partir dos dados de entrada, encontrar o  $\Delta T_{min}$  ótimo antes da síntese da rede. O diagrama de blocos referente a este módulo é apresentado na Figura 4.2.

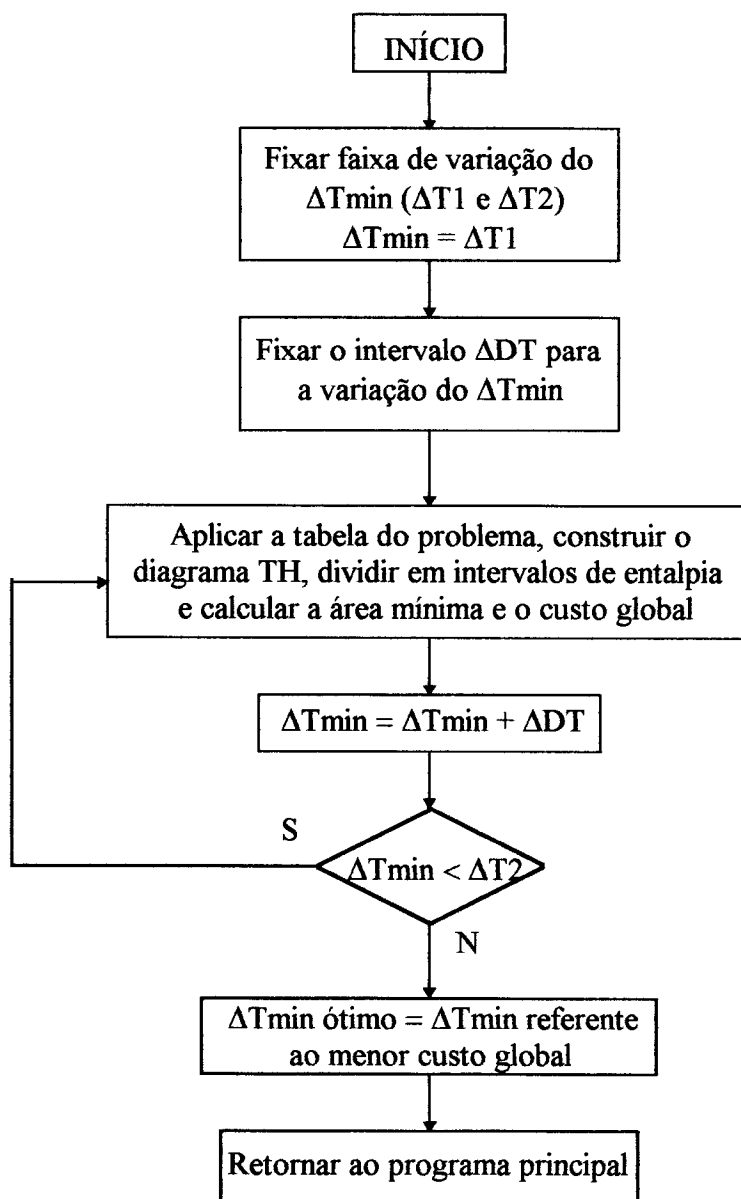


Figura 4.2 - Diagrama de blocos para o módulo otimização do  $\Delta T_{min}$ .

Inicialmente define-se a faixa de variação para o  $\Delta T_{min}$  e o intervalo ( $\Delta DT$ ) em que vai ocorrer esta variação. Em seguida, faz-se uma varredura nesta faixa iniciando pelo menor valor ( $\Delta T_1$ ). Aplica-se a tabela do problema para identificar o PEE e as demandas de

utilidades. Após isto, o diagrama TH é construído e subdividido em intervalos entálpicos, sendo as temperaturas correspondentes às curvas compostas para cada intervalo encontradas através das equações das retas correspondentes a cada segmento de reta, nestes intervalos. As correntes pertencentes a cada intervalo são identificadas por comparação entre as suas temperaturas de entrada e saída, com as temperaturas de cada intervalo.

Feito isto, calcula-se a área de troca térmica e o custo global. Na primeira iteração o valor do  $\Delta T_{min}$  é assumido como sendo o menor valor da faixa de variação para o  $\Delta T_{min}$  ( $\Delta T_1$ ), sendo aumentado em um  $\Delta DT$  a cada iteração. Este procedimento é repetido até que o valor do  $\Delta T_{min}$  atinja o maior valor na faixa de variação do  $\Delta T_{min}$  ( $\Delta T_2$ ). Em seguida, faz-se uma varredura para encontrar o menor custo global. O valor do  $\Delta T_{min}$  ótimo é tomado como sendo o valor do  $\Delta T_{min}$  referente ao menor custo global. Feito isto, retorna-se ao programa principal onde o valor do  $\Delta T_{min}$  ótimo será utilizado na síntese da rede.

#### 4.4 - MÓDULO TABELA DO PROBLEMA

Neste módulo ocorre a construção da tabela do problema, onde encontra-se o PEE, determina-se o consumo mínimo de energia e divide-se o problema em duas regiões, uma acima e outra abaixo do PEE. O diagrama de blocos referente a este módulo se encontra na Figura 4.3.

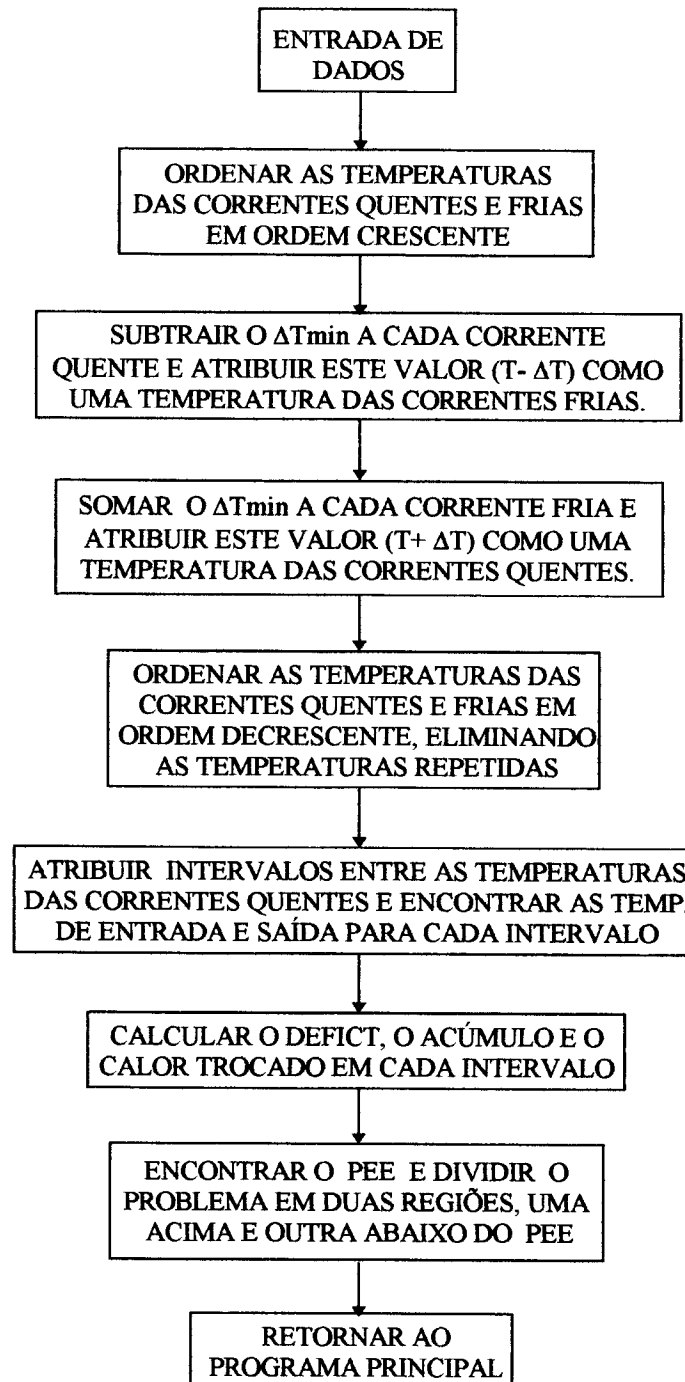


Figura 4.3 - Diagrama de blocos para o módulo tabela do problema.

Após a entrada de dados, o primeiro passo deste procedimento é a ordenação das temperaturas em ordem crescente. Feito isto, a cada temperatura das correntes quentes deve-se subtrair o valor do  $\Delta T_{\min}$  e atribuir este novo valor ( $T - \Delta T_{\min}$ ) como sendo mais uma das temperaturas das correntes frias. O mesmo deve ser feito para as temperaturas das correntes frias, só que agora somando o valor do  $\Delta T_{\min}$  a cada temperatura e atribuindo este valor como sendo mais uma das temperaturas das correntes quentes. Em seguida, ordena-se as temperaturas das correntes quentes e frias em ordem decrescente, eliminando as temperaturas repetidas.

Os intervalos entre as temperaturas são assumidos como sendo sub-redes, nos quais a temperatura de entrada de cada sub-rede é dada pela temperatura do intervalo  $i$  e a temperatura de saída de cada sub-rede é dada pela temperatura do intervalo  $i+1$ .

Sendo encontrados os intervalos com suas respectivas temperaturas de entrada e saída, faz-se um balanço de entalpia, utilizando-se as equações descritas no capítulo anterior. Calcula-se então, o deficit, o acúmulo e o fluxo de calor para cada sub-rede.

Após a construção da tabela, verifica-se nesta a quantidade de utilidades quentes e frias necessárias para todo o problema. Verifica-se também a localização do PEE. A partir deste ponto, divide-se o problema em duas regiões, uma acima e outra abaixo do PEE. Retorna-se ao programa principal, onde será acessado o módulo para a síntese da rede.

#### 4.5 - MÓDULO SÍNTESE DA REDE

Na síntese de RTC utilizando a Análise Pinch, após a aplicação da Tabela do Problema, onde é encontrado o PEE, o problema é dividido em duas regiões, uma acima e outra abaixo do PEE.

Este módulo tem a finalidade de aplicar o procedimento para a síntese da rede na região acima e abaixo do PEE. Os diagramas de bloco referentes a estes procedimentos encontram-se nas Figuras 4.4.a e 4.4.b, respectivamente.

Para a síntese da rede acima do PEE, o primeiro passo é verificar se o número de correntes frias é igual ou maior que número de correntes quentes. Se não for, uma corrente fria deve ser dividida. Deve-se repetir este procedimento até que o número de correntes quentes e frias sejam iguais. Em seguida, escolhe-se as correntes quente e fria (ambas devem pertencer ao PEE) para a alocação do trocador, visando sempre que possível eliminar a corrente quente. Esta escolha deve ser feita de acordo com a experiência do projetista, tendo-se como objetivos maior segurança, controlabilidade e praticidade da rede.

Feito isto, é verificado se o valor do CP da corrente fria é maior ou igual ao da corrente quente. Caso não seja, a corrente quente deverá ser dividida. Verifica-se também, se o somatório dos CP das correntes frias restantes é maior ou igual que o das correntes quentes. Se não for, a corrente fria deve ser dividida. Se alguma corrente, quente ou fria, for dividida, aloca-se um trocador e retorna-se ao início. Se não ocorrer nenhuma divisão, aloca-se um trocador. Repete-se este procedimento até que não haja mais correntes quentes. Se restarem correntes frias, estas deverão ser supridas termicamente com o uso de utilidades quentes.

Terminado o projeto para a região acima do PEE, aplica-se o procedimento para a síntese da rede na região abaixo do PEE, sendo análogo ao descrito anteriormente.

Inicialmente é verificado se o número de correntes quentes é igual ou maior que número de correntes frias. Se não for, uma corrente quente deve ser dividida. Deve-se repetir este procedimento até que o número de correntes quentes seja igual ao número de correntes frias.

Em seguida, escolhe-se as correntes quente e fria pertencentes ao PEE para a alocação do trocador. Verifica-se então se o valor do CP da corrente quente é maior ou igual que o da corrente fria. Caso não seja, a corrente fria deve ser dividida. Verifica-se

também, se o somatório dos CP das correntes quentes restantes é maior ou igual que o das correntes frias. Sendo menor, a corrente quente deve ser dividida. Se alguma corrente, quente ou fria, for dividida, aloca-se um trocador e retorna-se ao início. Não ocorrendo nenhuma divisão, aloca-se um trocador. Repete-se este procedimento até que não haja mais correntes frias. Restando correntes quentes, estas deverão ser supridas termicamente com o uso de utilidades frias.

Feito isto, os projetos acima e abaixo são unidos, resultando em uma rede final com a MRE.

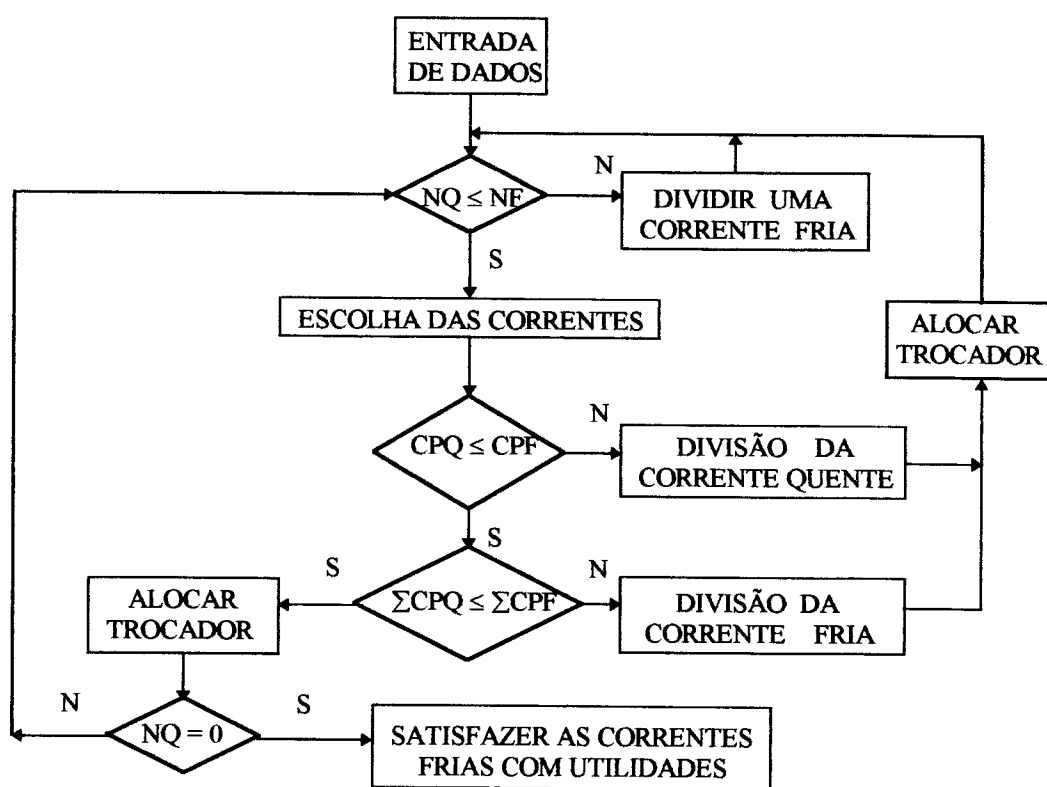


Figura 4.4.a - Diagrama de blocos para a síntese acima do PEE



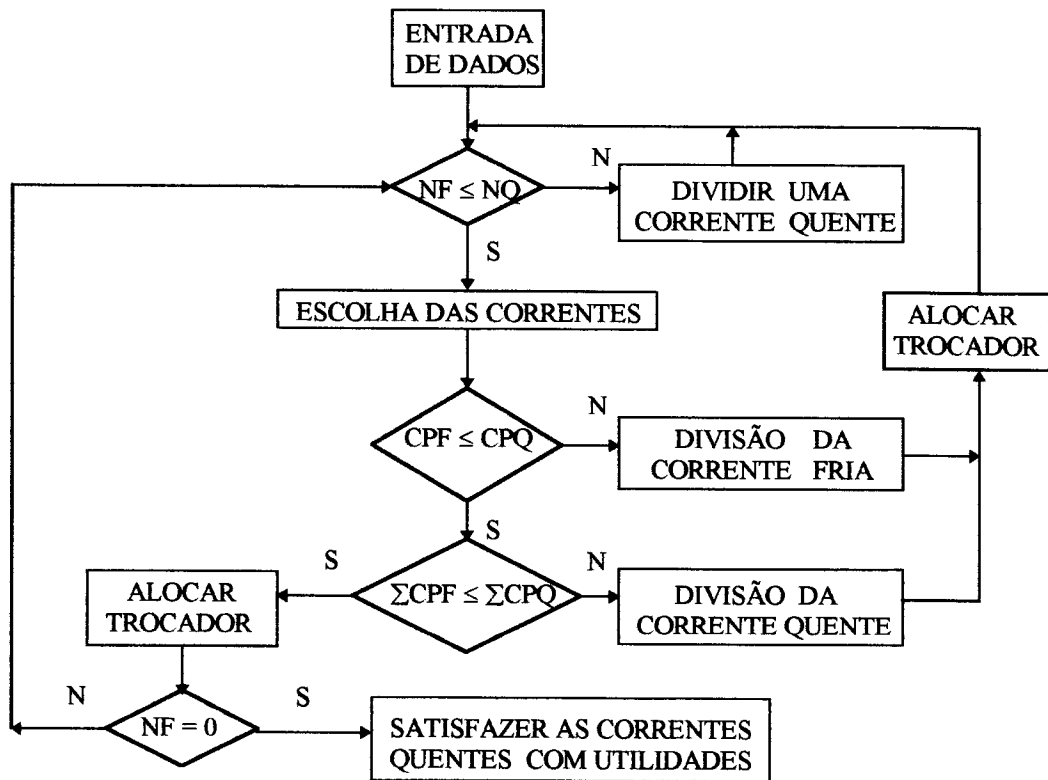


Figura 4.4.b - Diagrama de blocos para a síntese abaixo do PEE

#### 4.6 - MÓDULO IDENTIFICAÇÃO E QUEBRA DE LAÇOS

O procedimento de síntese descrito anteriormente nos garante a MRE, mas não garante o NMU. Isto pode ser alcançado através da quebra de laços de troca térmica, pois para cada laço rompido, reduz-se um trocador na rede.

Neste módulo, para identificação e quebra de laços, utiliza-se o procedimento desenvolvido por RAVAGNANI (1994). Neste trabalho são utilizadas a matriz incidência proposta por PETHE et al. (1989) juntamente com os critérios dos níveis de laços de SU e MOTARD (1984).

A Figura 4.5 mostra o diagrama de blocos equivalente ao algoritmo utilizado nesta subrotina, onde,  $N$  é o nível atual e  $M$  é o nível máximo. Sendo que, um laço de nível  $N$  é aquele que envolve  $N$  correntes quentes e  $N$  correntes frias. O nível máximo para os laços em uma rede é o menor valor entre o número de correntes quentes e frias.

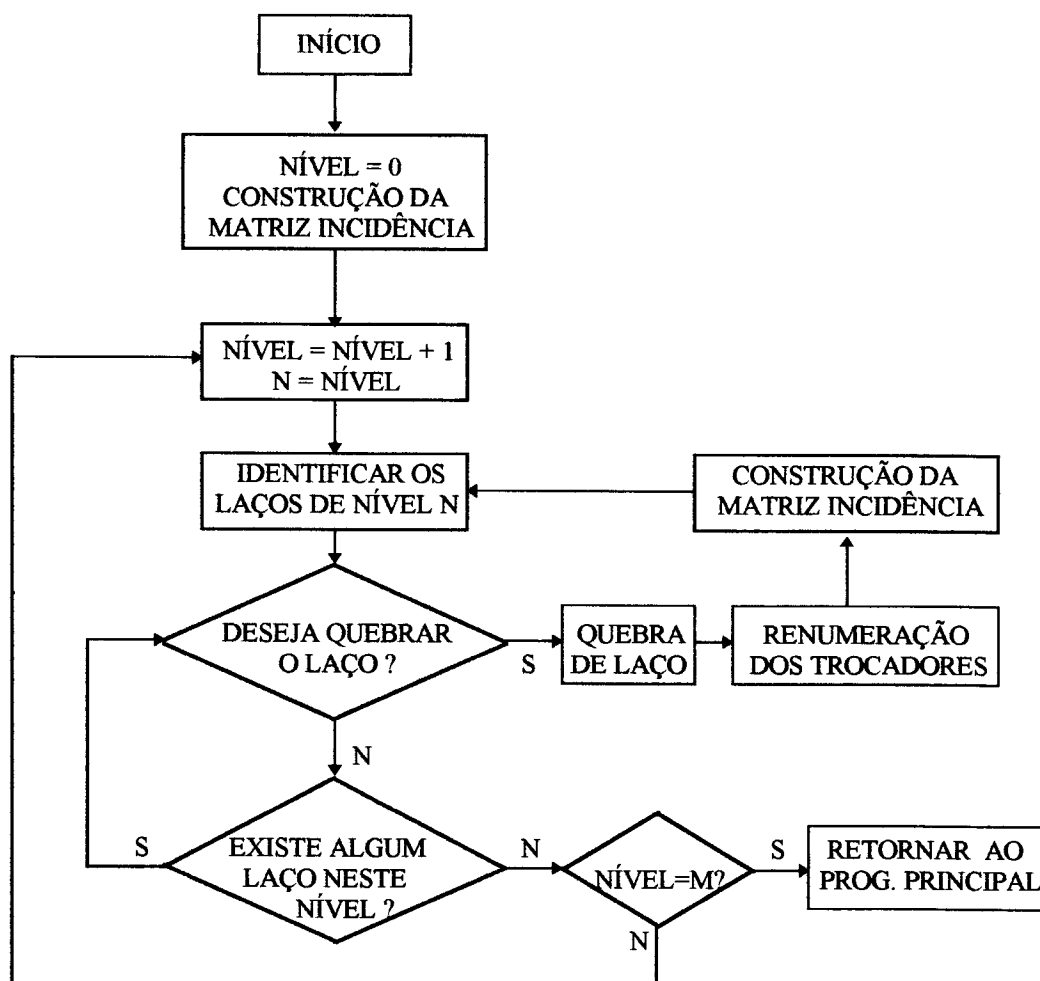


Figura 4.5 - Diagrama de blocos para identificação e quebra de laços

Neste procedimento, inicialmente constrói-se a matriz incidência a partir da rede proposta e que deve ser evoluída. Esta matriz é montada de forma que as linhas representam as correntes de processo, incluindo as utilidades, e as colunas representam os trocadores de calor, incluindo os aquecedores e resfriadores. Cada equipamento é identificado na matriz pelo símbolo +1 para a corrente quente e -1 para a corrente fria. Os demais elementos da coluna são nulos. Assim, com um tratamento matricial identifica-se todos os laços existentes na malha .

O procedimento de busca se inicia com os laços de nível 1 partindo-se do primeiro trocador, ou seja, da primeira coluna da matriz. Identifica-se a corrente quente, aquela que contiver o elemento +1. Em seguida, identifica-se a corrente fria, com elemento -1. Partindo-se para o segundo trocador, identifica-se suas correntes, verificando se este tem a mesma corrente fria do trocador 1, ou seja, se ambos os trocadores possuírem em uma mesma linha o símbolo -1, testa-se a corrente quente. Se não for a mesma corrente, um outro trocador deve ser testado. Sendo a corrente quente e a corrente fria comuns aos dois trocadores, existe um laço de energia entre os dois equipamentos que pode ser rompido. Para romper estes laços, elimina-se o trocador com menor quantidade de energia trocada, sendo esta quantidade transferida ao outro trocador pertencente ao laço. No entanto, deve-se verificar se os limites físicos dos trocadores estão sendo respeitados, como por exemplo diferenças de temperaturas negativas nos terminas do trocador. Isto faz com que o laço não possa ser rompido. Neste caso, o procedimento deve ser reiniciado buscando-se novos laços de nível 1.

Após o rompimento de um laço, os trocadores são renumerados e uma nova matriz incidência é construída. Repete-se este procedimento até que todos os trocadores tenham sido testados. Parte-se então para a busca de laços de nível 2 e assim sucessivamente até que se atinja o nível M, que é o máximo possível.

O procedimento para os demais níveis é análogo ao do laço de nível 1, considerando-se apenas o aumento no número de trocadores envolvidos, sendo que o número de trocadores envolvidos em um nível é igual ao dobro do nível.

Quando se atinge o nível máximo, retorna-se ao programa principal.

#### 4.7 - MÓDULO ANÁLISE DA FLEXIBILIDADE

Este módulo tem por finalidade fazer a análise da flexibilidade em redes com operações multiperiódicas. Esta análise pode ser aplicada tanto no projeto de novas redes como para os casos em que ocorrem mudanças nas condições de operação após a rede ter sido instalada.

No primeiro caso, ou seja, no projeto da rede, a solução normalmente adotada é conduzir a região de projeto pinch para cada período, procurando estruturas comuns. Neste trabalho utiliza-se a análise pinch para projetar a rede para apenas um período de operação (denominado caso base), sendo feita a análise da flexibilidade para obter o projeto final envolvendo os demais períodos pré estabelecidos. Esta análise tem como objetivo adaptar o caso base para os demais períodos com o menor custo global, ou seja, obter um bom resultado no balanço entre custo de equipamentos e custo de energia para a rede final, que inclui todos os períodos de operação.

Para os casos em que ocorrem mudanças nas condições de operação da planta, após a instalação da rede de trocadores, o grau de flexibilidade requerido é obtido através da instalação de desvios ou *by-pass* nos trocadores de calor e por ajuste nas taxas de utilidades, mantendo-se a área dos trocadores inalteradas. A análise da flexibilidade para este caso, tem como objetivo, promover modificações na rede a fim de adaptá-la às novas condições de operação, verificando-se sempre qual é a modificação que nos levará ao menor custo global.

Para tanto, foram utilizados conceitos de operacionalidade e *downstream paths*, expostos no capítulo anterior, onde os novos modos de operação foram descritos como desvios do caso base (caso para o qual a rede foi inicialmente projetada). Estes desvios denotados como perturbações (P), envolvem mudanças em temperaturas de entradas e/ou vazões das correntes. As temperaturas objetivo (de saída) que devem ser controladas foram denotadas variáveis controladas (C).

O diagrama de blocos referente ao método desenvolvido neste módulo pode ser visto na Figura 4.6.

O primeiro passo do procedimento é o cálculo da área dos trocadores para o caso base (área B). Em seguida, insere-se a perturbação e calcula-se as temperaturas de saída e a área dos trocadores (área P). Verifica-se então se a área de cada trocador no caso em que

ocorre a perturbação (área P) é igual à área do respectivo trocador no caso base (área B). Esta comparação deve ser feita apenas para os trocadores de calor, deixando os resfriadores e aquecedores para serem analisados no final.

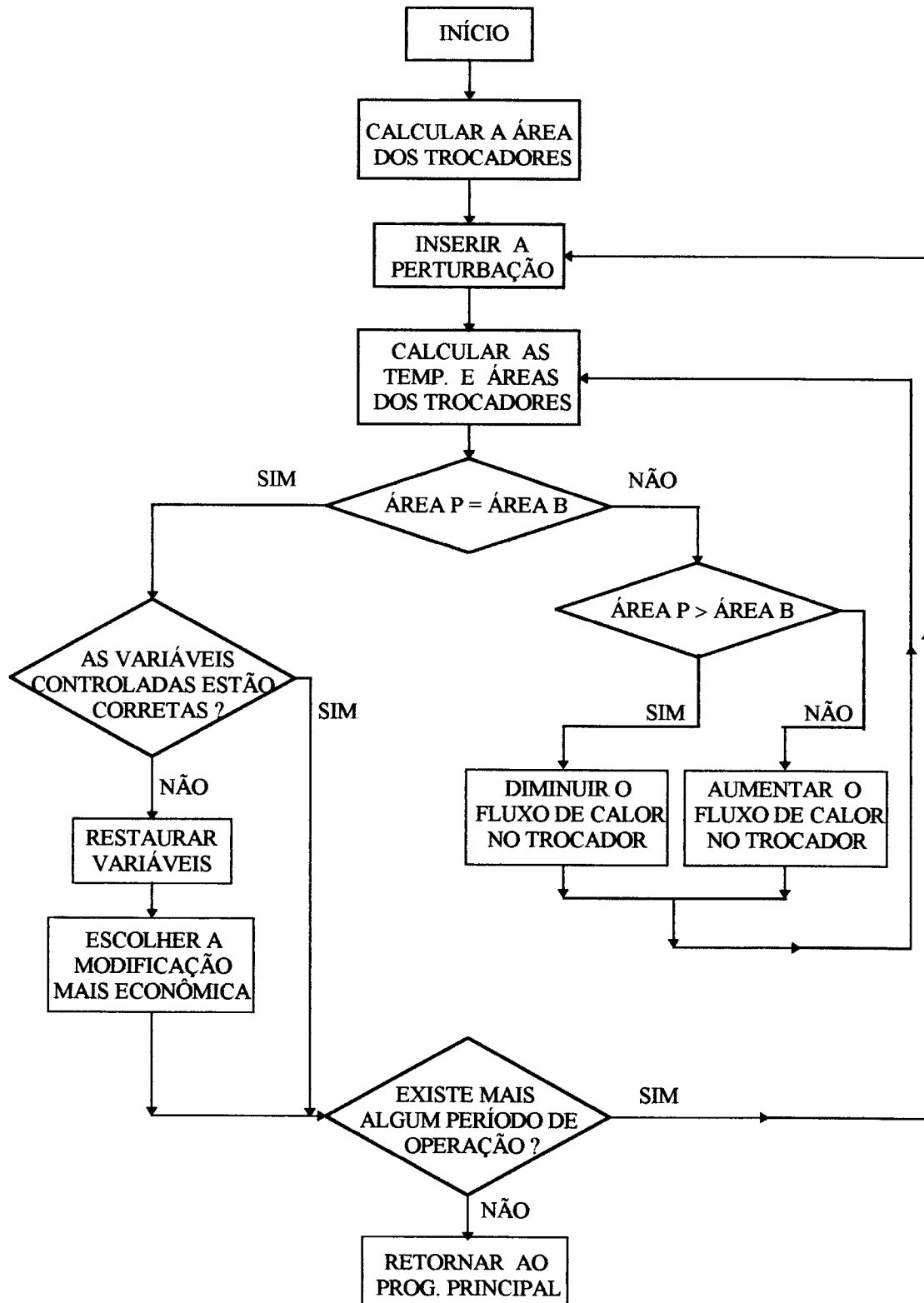


Figura 4.6 - Diagrama de blocos para a análise da flexibilidade

Não ocorrendo a igualdade entre a área B e a área P para algum dos trocadores, deve-se verificar para este trocador, se a sua área P é maior ou menor que a sua área B. Sendo maior, deve-se diminuir o fluxo de calor neste trocador. Caso contrário, aumenta-se o fluxo de calor. Feito isto, calcula-se novamente a área e as temperaturas de saída dos trocadores. Repete-se este procedimento até que ocorra a igualdade entre a área B com a área P para cada trocador.

Ocorrendo a igualdade, verifica-se então se as variáveis controladas estão corretas, ou seja, se as temperaturas de saída das correntes, que necessitam ser controladas, estão corretas. Existindo alguma temperatura de saída que não esteja de acordo com o esperado, deve-se restaurar estas temperaturas.

O método para a restauração das variáveis controladas, para uma melhor compreensão, será mostrado separadamente.

O passo seguinte, após a restauração das variáveis controladas é a identificação da troca mais conveniente para realizar esta modificação, ou seja, qual é a mudança na rede que após a restauração das temperaturas de saída nos levará ao menor custo global.

Feito isto, verifica-se se existem mais perturbações, ou seja, se existem outros períodos de operação. Existindo outros períodos, repete-se o procedimento. Não havendo mais perturbações, retorna-se ao programa principal, onde são impressos os resultados finais, encerrando a aplicação do programa.

#### **4.7.1 - Restauração das Variáveis Controladas**

Este algoritmo é parte do módulo análise da flexibilidade, e, está sendo mostrado separadamente, apenas com o objetivo de facilitar a sua compreensão.

Tendo-se que as trocas com utilidades são facilmente manipuladas através de ajustes dos fluxos destas utilidades, o seu uso para a manipulação das temperaturas de saída normalmente é a escolha preferida, quando possível. Em alguns casos, grande parte das temperaturas de saída são mantidas desta maneira. No caso de correntes que não possuem nenhum aquecedor ou resfriador, a instalação de um novo equipamento pode não ser a escolha mais econômica para solucionar o problema. Deste modo, tenta-se manter estas temperaturas através de modificações nas trocas já existentes na rede.

Isto pode ser feito assumindo-se que as áreas de todos os trocadores permaneçam inalteradas e considerando como variáveis controladas somente aquelas em que as correntes às quais pertençam não disponham de trocas com utilidades. Assim, aplica-se os conceitos de *downstream paths* para a identificação das trocas que influenciam estas variáveis.

Com isto, desenvolveu-se um algoritmo para a restauração de variáveis controladas, cujo diagrama de blocos é mostrado na Figura 4.7.

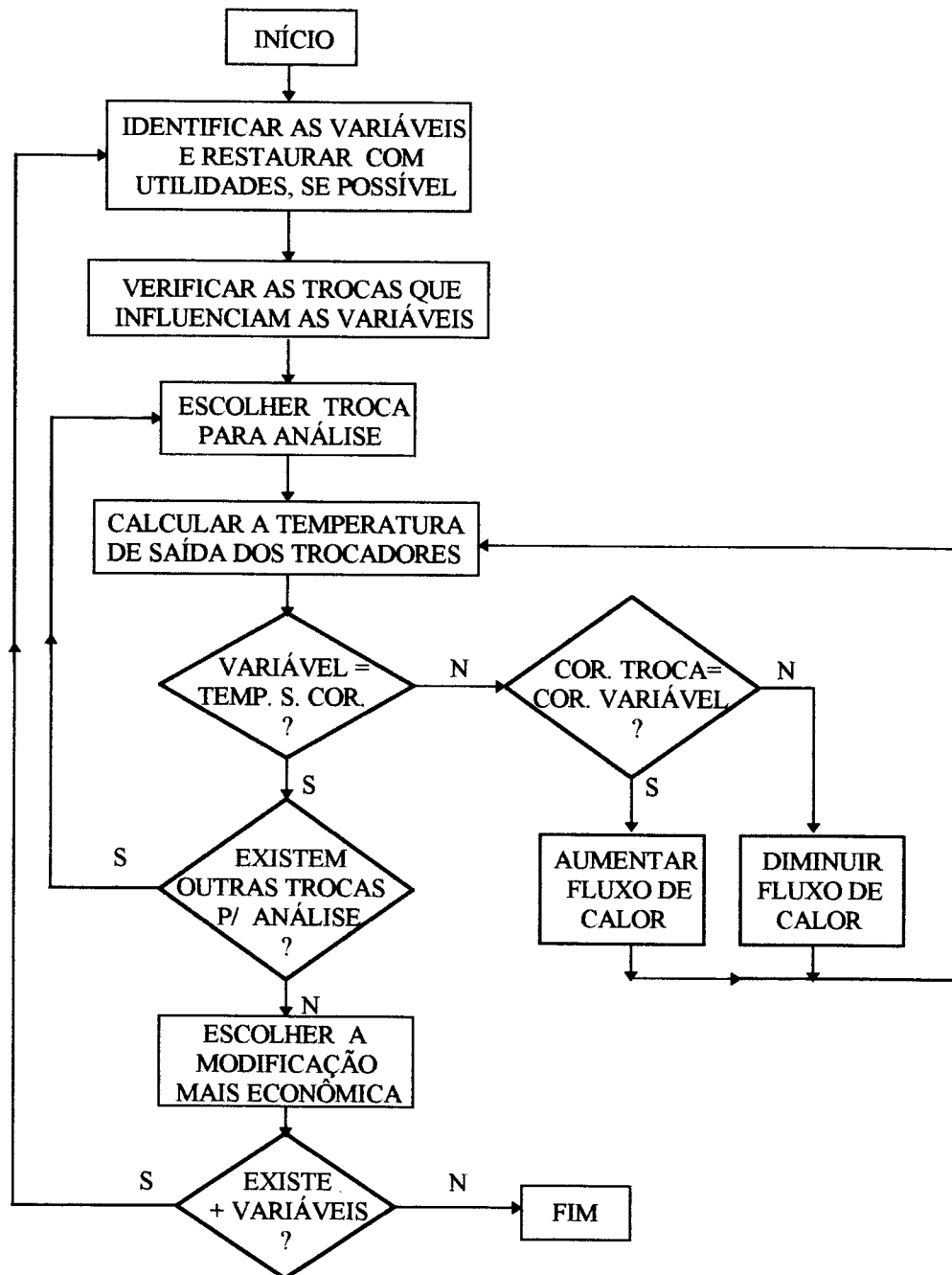


Figura 4.7 - Diagrama de blocos para a restauração das variáveis controladas

O primeiro passo é a identificação das variáveis controladas. Se suas correntes possuem trocas com utilidades, elas devem ser restauradas com ajustes dos fluxos destas utilidades. Feito isto, considera-se como variáveis controladas, somente aquelas cujas correntes às quais pertençam não disponham de trocas com utilidades. Assim, aplica-se o conceito de *Dowstream Paths* para cada uma destas variáveis, a fim de identificar quais as trocas que exercem influência sobre o seu valor. Escolhe-se uma troca para análise.

Em seguida, calcula-se as temperaturas de saída dos trocadores. Verifica-se então se a troca escolhida pertence à mesma corrente que a variável em questão. Se pertencer, aumenta-se o fluxo de calor (através do aumento da área do trocador). Caso contrário, deve-se diminuir o fluxo de calor (através da instalação de um *by-pass*). Repete-se este procedimento até que a variável controlada se torne igual à temperatura de saída da corrente à qual pertença.

Este procedimento deve ser repetido para todas as trocas que influenciam a variável controlada. Feito isto, escolhe-se a modificação que leva ao menor custo global.

Repete-se este procedimento para todas as variáveis controladas.



## **5 - CASOS ESTUDADOS**

## 5.1 - INTRODUÇÃO

Tendo-se a necessidade de avaliação do programa desenvolvido, será feita neste capítulo, a apresentação de alguns exemplos de cálculo extraídos da literatura, a fim de comparar os resultados obtidos.

Devido ao fato da maioria dos exemplos encontrados na literatura tratarem apenas de problemas específicos, os casos estudados neste capítulo serão aplicados em módulos do programa separados.

O primeiro caso é utilizado na aplicação do programa para a otimização do  $\Delta T_{min}$ . Em seguida, são apresentados dois casos para o teste da análise da flexibilidade. O primeiro se trata da aplicação da análise da flexibilidade em uma rede existente, já em funcionamento. O segundo será utilizado na aplicação do programa para a síntese de uma rede com vários períodos de operação.

## 5.2 - CASO Nº 1

Este caso tem por finalidade, mostrar a utilização do programa desenvolvido na obtenção do valor ótimo da diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{\text{min}} \text{ ótimo}$ ). Este caso foi apresentado por LINNHOFF e AHMAD (1990).

Trata-se de um problema com quatro correntes de processo quentes e cinco frias. As utilidades são óleo quente e água fria. Os dados de entrada são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Dados de entrada para o Caso 1

| Dados das correntes  |                             |                  |   |                        |  |
|--|-----------------------------|------------------|---|------------------------|--|
| Correntes  | CP<br>(MW°C <sup>-1</sup> ) | Entalpia<br>(MW) | Temp.<br>entrada<br>(°C)                      | Temp.<br>saída<br>(°C) | Coefficiente de<br>transferência de<br>calor convectivo<br>(MWm <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> ) |
| 1 quente   | 0,10                        | -28,70           | 327   | 140                    | 0,50E-03   |
| 2 quente   | 0,16                        | -9,60            | 220   | 160                    | 0,40E-03   |
| 3 quente   | 0,06                        | -9,60            | 220   | 60                     | 0,14E-03   |
| 4 quente   | 0,40                        | -46,00           | 160   | 45                     | 0,30E-03   |
| 5 fria   | 0,10                        | 20,00            | 100   | 300                    | 0,35E-03   |
| 6 fria   | 0,07                        | 9,03             | 35  | 164                    | 0,70E-03   |
| 7 fria   | 0,35                        | 8,55             | 85  | 138                    | 0,50E-03   |
| 8 fria   | 0,06                        | 6,60             | 60  | 170                    | 0,14E-03   |
| 9 fria   | 0,20                        | 32,00            | 140   | 300                    | 0,60E-03   |
| Dados das utilidades   |                             |                  |   |                        |  |
| Utilidade quente (óleo quente)                                     |                             |                  |   |                        |  |
| Temperatura de entrada   |                             |                  | 330 °C  |                        |  |
| Temperatura de saída   |                             |                  | mínima fixada em 250 °C                       |                        |  |
| Coefficiente de transferência de calor convectivo                  |                             |                  | 0,50E-03 (MWm <sup>2</sup> °C <sup>-1</sup> ) |                        |  |
| Utilidade fria (água fria)   |                             |                  |   |                        |  |
| Temperatura de entrada   |                             |                  | 15 °C   |                        |  |
| Temperatura de saída   |                             |                  | máxima fixada em 30 °C                        |                        |  |
| Coefficiente de transferência de calor convectivo                  |                             |                  | 0,50E-03 (MWm <sup>2</sup> °C <sup>-1</sup> ) |                        |  |
| Dados de custo   |                             |                  |   |                        |  |
| Custo dos trocadores (US\$) = 10000 + 350 x Área (m <sup>2</sup> ) |                             |                  |   |                        |  |
| Tempo de vida da planta: 5 (anos)                                  |                             |                  |   |                        |  |
| Taxa de atratividade: 0 (%)  |                             |                  |   |                        |  |
| Custo anual da utilidade quente: 60000 (US\$MW.ano <sup>-1</sup> ) |                             |                  |   |                        |  |
| Custo anual da utilidade fria: 6000 (US\$MW.ano <sup>-1</sup> )    |                             |                  |   |                        |  |

Através dos dados obtidos pelo programa computacional, chegou-se ao valor do  $\Delta T_{\text{min}} \text{ ótimo} = 26 \text{ °C}$ . Este resultado pode ser melhor visualizado na Figura 5.1, onde é apresentado o diagrama custo x  $\Delta T_{\text{min}}$ .

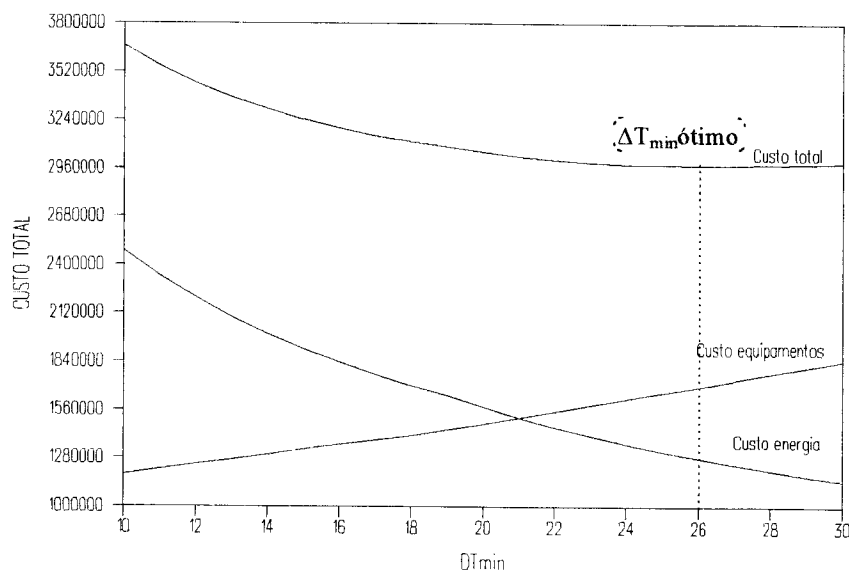


Figura 5.1 - Diagrama Custo x  $\Delta T_{min}$  para o Caso 1

Em uma comparação dos resultados obtidos na aplicação deste programa com os obtidos por LINNHOFF e AHMAD (1990), apresentada na Tabela 5.2, verifica-se a igualdade no valor do  $\Delta T_{min}$ . Verifica-se também que o custo total anual, a área de troca térmica e a demanda de utilidades quentes são muito próximas, o que garante a confiabilidade nos resultados obtidos pelo programa desenvolvido.

Tabela 5.2 - Comparação dos resultados do Caso 1 com a literatura

|   | Neste trabalho      | LINNHOFF e AHMAD (1990) |
|---|---------------------|-------------------------|
| $\Delta T_{min}$ otimizado ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 26,0                | 26,0                    |
| Área de troca ( $\text{m}^2$ )                    | 16986               | 16984                   |
| Utilidade quente (W)                              | $25,04 \times 10^6$ | $25,04 \times 10^6$     |
| Custo mínimo (US\$/ano)                           | $2,91 \times 10^6$  | $2,89 \times 10^6$      |

De acordo com os resultados obtidos, a otimização do  $\Delta T_{min}$  mostrou-se um importante passo na síntese de redes, pois ela nos leva a redes com um menor custo global. A otimização no entanto, depende da forma da função de custo. Se esta não preservar as características dos custos reais, pode-se chegar a valores de  $\Delta T_{min}$  diferentes do  $\Delta T_{min}$  ótimo real.

### 5.3 - CASO Nº 2

Este caso foi apresentado por KOTJABASAKIS e LINNHOFF (1986), e é usado para ilustrar a análise da flexibilidade em redes já instaladas, ou seja, em funcionamento. Trata-se de uma rede que foi projetada para uma determinada operação e que devido a mudanças no processo necessita uma alteração no modo de operação para aproximadamente 3 meses/ano. O caso para o qual a rede foi inicialmente projetada é mostrada na Figura 5.2 (denominada operação do Caso Base). Esta rede possui duas correntes quentes, duas correntes frias e sete unidades de troca térmica, sendo quatro trocadores de calor, dois resfriadores e um aquecedor. As utilidades são vapor e água fria. Os dados de entrada para o Caso Base (Caso A) e para o modo alternativo de operação, pelo qual a flexibilidade é requerida (Caso B), são dados na Tabela 5.3. Os dados de custo para o capital a ser instalado e os dados das utilidades são apresentados no Quadro 5.1.

O objetivo da aplicação da análise da flexibilidade para este caso é manter as temperaturas de saída das correntes para o Caso B, ou seja, promover modificações na rede a fim de adaptá-la ao novo caso de operação, optando-se sempre para a modificação que nos leva ao menor custo global.

Tabela 5.3 - Dados de entrada das correntes para o Caso 2

| Número da corrente | Temp. entrada (°C) | Temp. saída (°C) | CP (kW/°C) |
|--------------------|--------------------|------------------|------------|
| A                  |                    |                  |            |
| 1                  | 300                | 80               | 30,0       |
| 2                  | 200                | 40               | 45,0       |
| 3                  | 40                 | 180              | 40,0       |
| 4                  | 140                | 280              | 60,0       |
| B                  |                    |                  |            |
| 1                  | 270                | 80               | 30,0       |
| 2                  | 200                | 40               | 45,0       |
| 3                  | 20                 | 180              | 40,0       |
| 4                  | 140                | 280              | 72,0       |

A - caso base (caso A)

B - caso de operação alternativa (caso B) para 3 meses/ano

$\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Quadro 5.1 - Dados das utilidades e de custo para o Caso 2

|   |  |
|---|--|
| <b>Custo da Área de Transferência de Calor:</b>           |  |
| Custo de instalação :                                     | $20000+300(A)^{0,95}$                  |
| A:  | área de troca em $m^2$                 |
| Tempo de vida útil dos equipamentos :                     | 3 anos                                 |
| Assumindo:  |  |
| se $Ft \geq 0,8$  | $\rightarrow 1-2$                      |
| se $Ft < 0,8$   | $\rightarrow 1-1$                      |
| <b>Custo das Utilidades:</b>                              |  |
| Vapor a alta pressão :                                    | 600psig, 254°C                         |
| Custo:  | 6 libras/tonelada : 12,75 libras/MW hr |
| Vapor a baixa pressão :                                   | 40psig, 140°C                          |
| Custo:  | 2 libras/tonelada : 3,38 libras/MW hr  |
| Água fria :   |  |
| Temperatura de entrada :                                  | 20°C                                   |
| Temperatura de saída :                                    | 40°C                                   |
| Custo:  | 0,38 libras/MW hr                      |
| Tempo de operação anual :                                 | 8000 horas/ano                         |
| <b>Coefficiente de Transferência de Calor Convectivo:</b> |  |
| Correntes de Processo:                                    | 0,2 $kW/m^2^{\circ}C$                  |
| Vapor:  | 6,0 $kW/m^2^{\circ}C$                  |
| Água fria:  | 2,0 $kW/m^2^{\circ}C$                  |

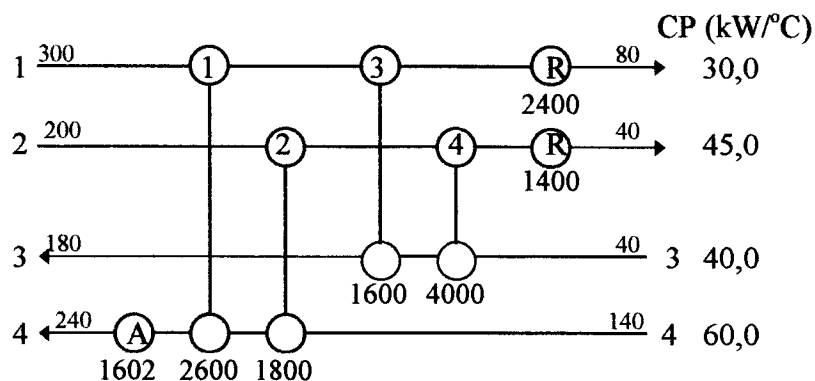


Figura 5.2 - Rede projetada para o Caso Base (KOTJABASAKIS e LINNHOFF-1986)

Após inserida a perturbação o primeiro passo é a restauração das temperaturas de saída através de trocas com utilidades. Isto pode ser visto na Figura 5.3. As demais temperaturas (neste caso a temperatura de saída da corrente nº 3) não podem ser mantidas desta maneira. A instalação de um aquecedor poderia ser a solução, mas geralmente, esta é

a escolha menos econômica. Assim, tenta-se manter esta temperatura através de modificações na estrutura da rede.

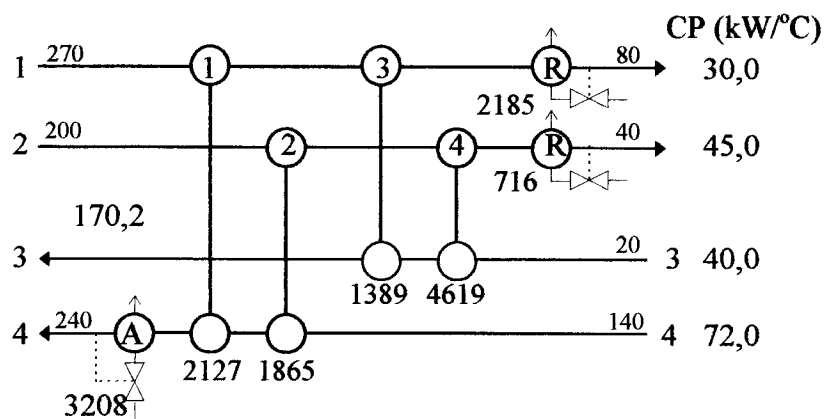


Figura 5.3 - Rede após inserida a perturbação

Se tentássemos resolver este problema por inspeção, como na Figura 5.4, a solução mais óbvia seria a instalação de uma área extra sobre o trocador nº 3, pois com o aumento da área tem-se um aumento no fluxo de calor trocado e conseqüentemente um aumento na temperatura de saída da corrente nº 3. Assim, para o caso de operação normal (Caso A) o *by-pass* seria aberto e para o Caso B seria fechado. Outra solução provável seria a troca nº 4, mas verifica-se que mesmo com área infinita esta troca não pode aumentar a temperatura de saída da corrente nº 3 o suficiente para que se atinja 180 °C.

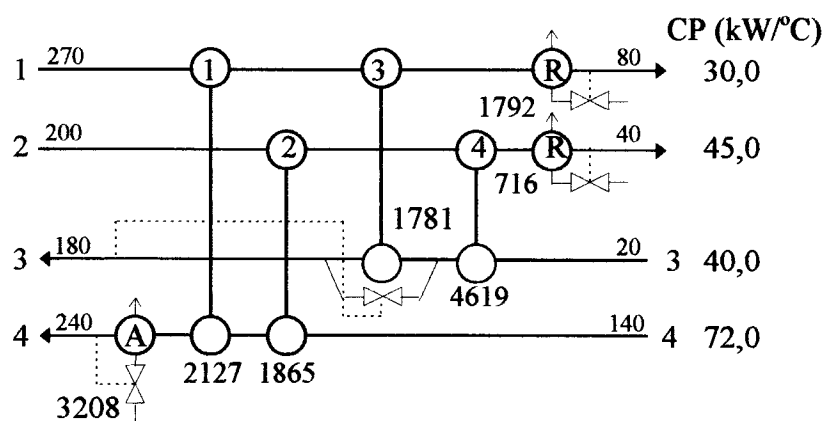


Figura 5.4 - Solução por inspeção

Utilizando-se a análise de flexibilidade verifica-se que esta não é a única solução possível. Aplicando-se os conceitos de *downstream paths* verifica-se que todas as trocas têm influência na temperatura de saída da corrente nº 3. Assim, além das duas trocas analisadas anteriormente, pode-se encontrar soluções para o problema nas trocas nº 1 e nº 2.

Analisando a troca nº 1, ilustrado na Figura 5.5, verifica-se que se reduzirmos o fluxo de calor neste trocador através da instalação de um *by-pass*, ocorrerá um aumento na temperatura de entrada do trocador nº 3 e conseqüentemente um aumento em seu fluxo de calor, sem que ocorra modificação no tamanho deste trocador. Deve-se, no entanto, verificar que uma redução no fluxo de calor deste trocador significa um aumento no fluxo de calor do aquecedor da corrente nº 4 e no resfriador da corrente nº 1, com conseqüente aumento em ambas as utilidades, quente e fria. Para esta solução, no Caso A o *by-pass* seria totalmente fechado e no Caso B seria aberto.

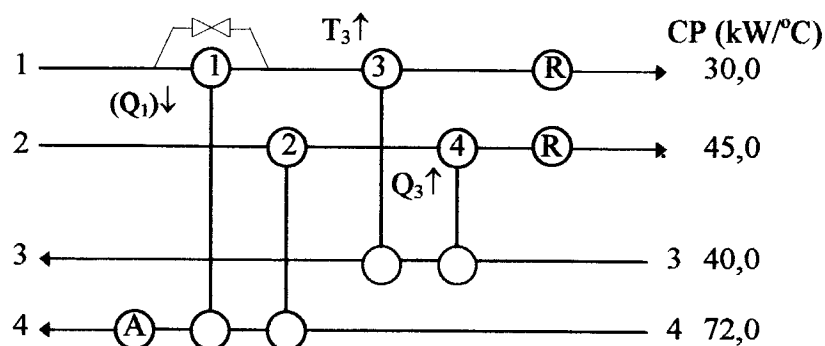


Figura 5.5 - Análise após instalação do *by-pass* no trocador nº 1

A próxima troca a ser analisada é a nº 2. Verifica-se nesta troca que mesmo se baixarmos o fluxo de calor para zero, ou seja, se o trocador for completamente *by-passado*, não poderemos obter a influência necessária para aumentarmos a temperatura de saída da corrente nº 3.

Os dados de custos obtidos para o caso base e para cada solução do Caso B encontram-se na Tabela 5.4

Através de uma análise de custo das possíveis soluções, mostrada na Tabela 5.5, verifica-se que a solução mais econômica é a instalação de um *by-pass* no trocador nº 1, como mostrado na Figura 5.6.



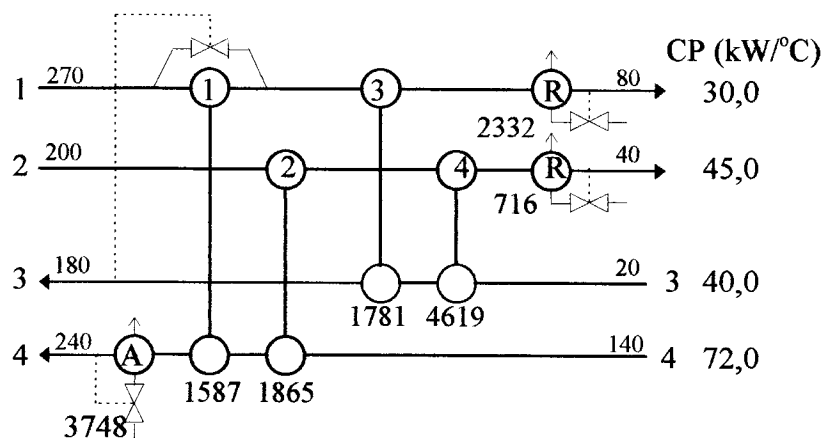


Figura 5.6 - Solução mais econômica

Tabela 5.4 - Dados de custo obtidos para o Caso Base e para as modificações

| Tipo de operação                 | Custo com Energia (libras/ano) | Custo com Trocadores (libras/ano) | Custo Total Anual (libras/ano) |
|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Caso base                        | 174752                         | 344004                            | 518756                         |
| Aumento da área do trocador nº 3 | 334819                         | 437682                            | 772501                         |
| <i>By-pass</i> no trocador nº1   | 391592                         | 361354                            | 752937                         |

Tabela 5.5 - Análise de custo das modificações

| Modificações no Projeto          | Custo Total Anual (libras/ano) | Custo Adicional (libras/ano) | Acréscimo sobre o caso base (%) |
|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Caso base                        | 518756                         | -----                        | 0                               |
| Aumento da área do trocador nº 3 | 652451                         | 133695                       | 26                              |
| <i>By-pass</i> no trocador nº1   | 590307                         | 71551                        | 14                              |

Uma comparação entre os resultados obtidos na aplicação deste programa e os obtidos por KOTJABASAKIS e LINNHOFF (1986) é apresentada na Tabela 5.6. Como pode ser observado nesta tabela, a solução obtida como sendo a mais econômica é idêntica à obtida por KOTJABASAKIS e LINNHOFF (1986), com a vantagem de que o difícil trabalho de manipulação das Tabelas de Sensitividade, que devem ser realizados para cada

trocador, fica totalmente descartado, com um tempo de execução do programa extremamente rápido.

Tabela 5.6 - Comparação dos resultados para o Caso 2

| Modificações no Projeto          | Este Trabalho<br>Custo Adicional<br>(libras/ano) | KOTJABASAKIS e<br>LINNHOFF (1986)<br>Custo Adicional<br>(libras/ano) | Diferença<br>(%) |
|----------------------------------|--|--|------------------|
| Aumento da área do trocador nº 3 | 133695   | 138000   | 3,1              |
| <i>By-pass</i> no trocador nº1   | 71551  | 87200  | 17,9             |

O método utilizado por KOTJABASAKIS e LINNHOFF (1986) -Tabelas de Sensitividade- devido às dificuldades já citadas na sua utilização, trabalha com erros na ordem de 10%.

Neste sentido, os resultados obtidos garantem a confiabilidade e eficácia do programa desenvolvido.

### 5.4 - CASO Nº 3

Este caso tem por finalidade demonstrar a aplicação do programa desenvolvido na síntese de RTC para operações multiperíodicas. Trata-se de um problema em que a planta é requerida para operar em três diferentes condições de operação. Este caso foi proposto por FLOUDAS e GROSSMANN (1987) e depois utilizado por KOTJABASAKIS (1988).

O problema possui 2 correntes quentes e duas correntes frias. As utilidades são água fria e vapor. Os dados referentes aos 3 períodos de operação são apresentados nas Tabelas 5.7(a)-(c). Os dados dos custos são apresentados no Quadro 5.2. Foi utilizado um  $\Delta T_{min}$  de 10 °C, não sendo utilizado o seu valor otimizado apenas por efeito de comparação dos resultados com os obtidos em outros trabalhos encontrados na literatura.

Tabela 5.7 - Dados de entrada das correntes para o Caso 3

| A                              |                    |                  |            |
|--------------------------------|--------------------|------------------|------------|
| PERÍODO 1 (1/3 do tempo total) |                    |                  |            |
| Número da corrente             | Temp. entrada (°C) | Temp. saída (°C) | CP (kW/°C) |
| 1                              | 249                | 100              | 10,55      |
| 2                              | 259                | 128              | 12,66      |
| 3                              | 96                 | 170              | 9,144      |
| 4                              | 106                | 270              | 15,00      |

| B                              |                    |                  |            |
|--------------------------------|--------------------|------------------|------------|
| PERÍODO 2 (1/3 do tempo total) |                    |                  |            |
| Número da corrente             | Temp. entrada (°C) | Temp. saída (°C) | CP (kW/°C) |
| 1                              | 229                | 120              | 7,032      |
| 2                              | 239                | 148              | 8,44       |
| 3                              | 96                 | 170              | 9,144      |
| 4                              | 106                | 270              | 15,00      |

| C                              |                    |                  |            |
|--------------------------------|--------------------|------------------|------------|
| PERÍODO 3 (1/3 do tempo total) |                    |                  |            |
| Número da corrente             | Temp. entrada (°C) | Temp. saída (°C) | CP (kW/°C) |
| 1                              | 249                | 100              | 10,55      |
| 2                              | 259                | 128              | 12,66      |
| 3                              | 116                | 150              | 6,096      |
| 4                              | 126                | 250              | 10,00      |

Quadro 5.2 - Dados das utilidades e de custo para o Caso 3

|  |
|--|
| <p><i>Custo da Área de Transferência de Calor:</i><br/> Custo de instalação: <math>4333(A)^{0,6}</math><br/> A: área de troca em <math>m^2</math><br/> Tempo de vida útil dos equipamentos: 3 anos</p> <p><i>Custo das Utilidades:</i><br/> Vapor: <math>300^{\circ}C</math><br/> Custo: <math>171,428 \times 10^{-4}</math> US\$/kW hr<br/> Água fria :<br/> Temperatura de entrada: <math>30^{\circ}C</math><br/> Temperatura de saída: <math>50^{\circ}C</math><br/> Custo : <math>60,576 \times 10^{-4}</math> \$/kW hr<br/> Tempo de operação anual : 8000 horas/ano</p> <p><i>Coefficiente de Transferência de Calor Convectivo:</i><br/> Correntes de Processo: <math>2,0 \text{ kW}/m^2^{\circ}C</math><br/> Vapor: <math>1,33 \text{ kW}/m^2^{\circ}C</math><br/> Água fria: <math>0,5 \text{ kW}/m^2^{\circ}C</math> (*)<br/> : <math>0,353 \text{ kW}/m^2^{\circ}C</math> (**)</p> <p>(*) se trocar calor com a corrente nº 1<br/> (**) se trocar calor com a corrente nº 2</p> |
|--|

Quando se usa a Análise Pinch em síntese de RTC para operações multiperíodicas, a solução normalmente adotada é conduzir a região de projeto para cada período, procurando estruturas comuns.

Neste trabalho a rede será projetada apenas para um período de operação, denominado Caso Base, sendo feita uma análise da flexibilidade para obter o projeto final envolvendo os demais períodos.

Para uma melhor compreensão dos módulos desenvolvidos serão apresentadas duas soluções para este problema. Na solução 1, será apresentada uma rede obtida através da análise da flexibilidade após a síntese utilizando a Análise Pinch. Na solução 2 será apresentada uma rede na qual será feita uma evolução antes da aplicação da análise da flexibilidade.

#### 5.4.1 - Solução 1

Aplicando-se a Análise Pinch sintetiza-se a RTC apenas para o período 1. Em seguida, aplicando-se a análise da flexibilidade para os períodos 2 e 3, obtêm-se a rede



Tabela 5.9 - Dados de custo referentes à solução 1

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Custo com trocadores (US\$/ano) | 223146 |
| Custo com energia (US\$/ano)    | 132331 |
| Custo total (US\$/ano)          | 355477 |

Uma comparação entre os resultados obtidos na aplicação deste programa com os obtidos por FLOUDAS e GROSSMANN (1987) e por KOTJABASAKIS (1988) é apresentada na Tabela 5.10. A rede apresentada como sendo a configuração ótima por FLOUDAS e GROSSMANN (1987) é mostrada na Figura 5.8. A rede obtida pelos métodos convencionais utilizando a Análise Pinch (onde se projeta a rede para cada período e depois encontra-se uma estrutura em comum) apresentada por KOTJABASAKIS (1988) é a mesma obtida por este programa e pode ser vista na Figura 5.7.

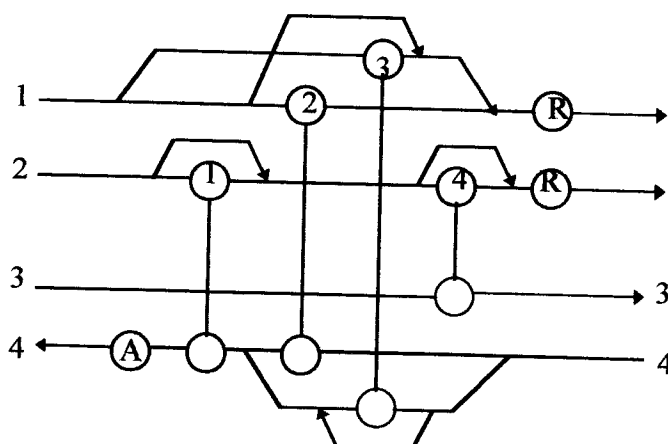


Figura 5.8 - "Configuração ótima" dada por FLOUDAS e GROSSMANN (1987)

Como pode ser observado na Tabela 5.10 os resultados obtidos por este programa nos apresentam uma solução com uma área total instalada 17,4% abaixo da encontrada por FLOUDAS e GROSSMANN (1987), representando um economia de 9,9% no custo total.

Comparando os dados obtidos neste programa com os apresentados por KOTJABASAKIS (1988), verifica-se valores muito próximos, o que garante a confiabilidade nos resultados obtidos pelo programa.

Tabela 5.10 - Comparação dos resultados para Caso 3 - solução 1

|   | Área instalada (m <sup>2</sup> ) | Custo com energia (US\$/ano) | Custo com Capital (US\$/ano) | Custo Total (US\$/ano) |
|---|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| FLOUDAS e GROSSMANN (1987)  | 282,0                            | 125109                       | 269400                       | 394509                 |
| KOTJABASAKIS (1988)   | 204,9                            | 132900                       | 223300                       | 356200                 |
| Solução 1 - deste Trabalho  | 204,8                            | 132331                       | 223146                       | 355477                 |
| Solução 1 como uma porcentagem da solução de FLOUDAS e GROSSMANN (1987) | 72,6%                            | 105,8%                       | 82,8%                        | 90,1%                  |
| Solução 1 como uma porcentagem da solução de KOTJABASAKIS (1988)        | 100%                             | 99,6%                        | 99,9%                        | 99,8%                  |

#### 5.4.2 - Solução 2

Nesta solução aplica-se a Análise Pinch para sintetizar a RTC para o período 1, como na solução anterior. Após a rede ter sido sintetizada para o Caso Base é feita a evolução, ou seja, a identificação e quebra de laços de troca térmica.

Aplicando-se a regra ( $NMU=N-1$ ), verifica-se que o NMU para o caso base é seis, já que temos quatro correntes de processo, duas quentes e duas frias, além de duas utilidades frias e uma utilidade quente. A rede sintetizada para o caso base, mostrada na Figura 5.9, possui sete unidades, uma a mais que o NMU. Isto demonstra que existe um laço de troca térmica que pode ser rompido.

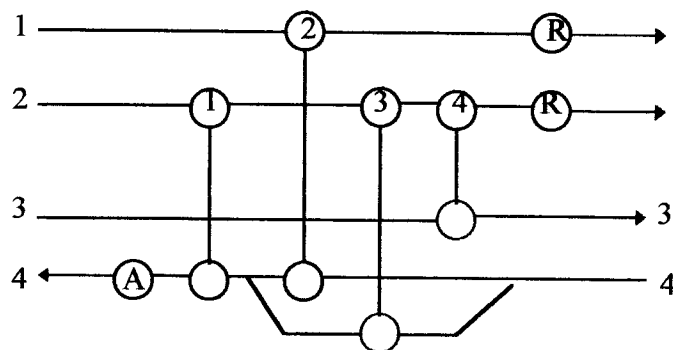


Figura 5.9 - Rede sintetizada para o caso base

Como pode ser verificado na matriz incidência, na Figura 5.10, existe um laço de troca térmica entre os trocadores 1 e 3. Como o trocador 1 tem uma carga térmica de 126,6 kW, menor que a de 798,0 kW do trocador 3, o trocador 1 deve ser eliminado.

Deve-se ressaltar que na evolução de redes, onde será feita a análise da flexibilidade posteriormente, não se recomenda o rompimento de laços nos quais aquecedores e/ou resfriadores devam ser eliminados. Isto porque no projeto da rede para os períodos posteriores poderá ocorrer a necessidade da utilização destas trocas para ajustes de temperaturas. Se estas trocas forem eliminadas, isto dificultará a operabilidade dos períodos posteriores, pois quando não se tem aquecedor ou resfriador em uma determinada corrente o controle de sua temperatura de saída tem que ser feita através de modificações nos trocadores pertencentes à rede. Assim, quanto menor o número de aquecedores e resfriadores em uma determinada rede, maior será o número de trocadores envolvidos em ajustes de temperaturas e maior será o grau de dificuldade de operabilidade da rede.

|                | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|
| 1              | 0  | +1 | 0  | 0  | +1 | 0  | 0  |
| 2              | +1 | 0  | +1 | +1 | 0  | +1 | 0  |
| 3              | 0  | 0  | 0  | -1 | 0  | 0  | 0  |
| 4              | -1 | -1 | -1 | 0  | 0  | 0  | -1 |
| Refrigerante 1 | 0  | 0  | 0  | 0  | -1 | 0  | 0  |
| Refrigerante 2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | -1 | 0  |
| Aquecimento    | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | +1 |

Figura 5.10 - Matriz incidência para a rede da Figura 5.9

Após a identificação e quebra de laços aplicando-se a análise da flexibilidade para os períodos 2 e 3, obteve-se a rede final mostrada na Figura 5.11, onde o grau de flexibilidade requerido é alcançado através da instalação de *by-pass* em volta de todos os trocadores de calor e por ajuste de vapor e água fria. Os dados referentes às trocas para cada período são apresentados na Tabela 5.11.

No período 1 toda a área instalada dos trocadores de calor é utilizada. Durante os períodos 2 e 3 são utilizados os *by-pass* com ajustes convenientes nas taxas de fluxo, de acordo com o verificado na Tabela 5.11. Os dados de custo referentes a esta solução são apresentados na Tabela 5.12.





Tabela 5.12 - Dados de custo referentes à solução 2

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Custo com trocadores (US\$/ano) | 201807 |
| Custo com energia (US\$/ano)    | 140082 |
| Custo total (US\$/ano)          | 341889 |

Uma comparação entre os resultados das soluções 1 e 2 obtidos por este programa com os obtidos por KOTJABASAKIS (1988) (utilizando Tabelas de Sensitividade) é apresentada na Tabela 5.13. A rede obtida através das Tabelas de Sensitividade apresentada por KOTJABASAKIS (1988) é a mesma obtida por este programa e pode ser vista na Figura 5.11.

Tabela 5.13 - Comparação dos resultados para caso 3 - solução 2

|  | Área instalada (m <sup>2</sup> ) | Custo com energia (US\$/ano) | Custo com Capital (US\$/ano) | Custo Total (US\$/ano) |
|--|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Tabelas de Sensitividade KOTJABASAKIS (1988)                           | 157,4                            | 144100                       | 182900                       | 327000                 |
| Solução 1 - deste Trabalho   | 204,8                            | 132331                       | 223146                       | 355477                 |
| Solução 2 - deste Trabalho   | 190,8                            | 140082                       | 201807                       | 341889                 |
| Solução 2 como uma porcentagem da solução 1                            | 93,2%                            | 105,9%                       | 90,4%                        | 96,2%                  |
| Solução 2 como uma porcentagem da solução com Tabelas de Sensitividade | 121,2%                           | 97,2%                        | 110,3%                       | 104,6%                 |

Como pode ser observado na Tabela 5.13, os resultados obtidos na solução 2 nos levam a uma área total instalada 6,8% abaixo da encontrada na solução 1, pois esta possui um trocador de calor a menos, refletindo em um decréscimo de 10% no custo de capital. Mesmo ocorrendo um aumento de 5,9% no custo energético, a solução 2 nos leva a uma economia de 3,8% no custo total em relação à solução anterior. Apesar da diferença no custo total entre as duas soluções ser muito próxima, a solução 2 nos leva a uma economia com tubulações, válvulas e fundações, que não estão incluídos no cálculo do custo total,

nos levando também a uma rede com melhor operabilidade, pois possui um trocador de calor a menos que a solução 1.

Comparando os dados obtidos na solução 2 com os obtidos pelas Tabelas de Sensitividade, apresentados por KOTJABASAKIS (1988), verifica-se uma área total instalada 21,2% maior na solução obtida por este programa, representado um aumento de 10,3% no custo de capital, mas, com um decréscimo de 2,8% no custo com energia, levando a um custo total 4,6% maior que o obtido pelas Tabelas de Sensitividade.

Esta proximidade nos resultados demonstra a boa aplicabilidade da técnica desenvolvida.

## **6 - CONCLUSÕES**

## 6.1 - CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados obtidos podemos chegar a algumas conclusões. A primeira é em relação à escolha da utilização da Análise Pinch para a síntese da RTC. Foi uma escolha bem acertada, pois desenvolveu-se um programa computacional de fácil utilização e de forma interativa, onde o usuário percebe o que está ocorrendo durante a síntese, permitindo-lhe a tomada de decisões. Assim, o projetista pode conduzir seu projeto usando sua experiência de processos, para obter maior segurança, controlabilidade e praticidade da rede. Isto certamente não teria ocorrido se fosse escolhido outra metodologia, como por exemplo os métodos matemáticos. Neste caso, pela própria natureza dos métodos, teríamos desenvolvido um programa com pouca ou nenhuma interação com o usuário.

A otimização do  $\Delta T_{min}$  mostrou-se um importante passo na síntese de RTC, pois leva a redes com mínimas necessidades de evolução. A etapa da otimização do  $\Delta T_{min}$  ou mesmo o cálculo do custo global, no entanto, dependem amplamente da função de custo que se tem no processo. Assim, deve-se abordar de forma cautelosa o tratamento dado aos métodos que otimizam o custo global da rede, pois qualquer variação em alguma das constantes da equação do custo pode levar a valores muito diferentes para o  $\Delta T_{min}$  ótimo, e, conseqüentemente para o custo global da rede. Portanto, é muito importante que se preserve as características das curvas dos custos estimados para capital e energia, a fim de que não se obtenha um  $\Delta T_{min}$  diferente do  $\Delta T_{min}$  real.

A utilização de um algoritmo de identificação e quebra de possíveis laços de troca térmica nos permite chegar a malhas com um menor número de unidades, podendo com isto reduzir o custo global da rede. A metodologia utilizada neste trabalho se mostrou muito eficiente, pois o fato de se quebrar o laço assim que ele é identificado evita que se tenha laços dependentes, como ocorre em outros procedimentos que identificam todos os laços antes de quebrá-los. Outro ponto importante desta metodologia é a interação com o usuário, pois se ocorrer a violação do  $\Delta T_{min}$  durante a eliminação de um trocador, o usuário tem a opção de aceitar ou não a violação no  $\Delta T_{min}$ , podendo mantê-lo, restaurá-lo através do aumento de utilidades quente e fria ou manter o laço de troca térmica.

Com relação à análise da flexibilidade, através dos resultados obtidos, no segundo exemplo (Caso nº 2), podemos dizer que estes foram satisfatórios devido à proximidade

com os obtidos pelas Tabelas de Sensitividade apresentadas por KOTJABASAKIS e LINNHOFF (1986). Em casos como este exemplo, em que ocorrem mudanças nas condições de operação da planta, após a instalação da RTC, é muito importante que se faça uma análise da flexibilidade antes que se adote uma solução, pois pelos métodos convencionais, poderíamos optar por uma solução que a princípio nos parece óbvia, e que nem sempre é a mais econômica. Porém, com a análise da flexibilidade, foi obtida a solução que leva ao menor custo de capital (equipamentos) com o mínimo consumo de energia, ou seja, a solução mais econômica. A metodologia desenvolvida neste trabalho se mostrou muito eficiente para solucionar problemas deste tipo, adotando-se sempre como solução a opção de projeto mais econômica.

Na síntese de redes para processos com múltiplos períodos de operação, apresentado no terceiro exemplo (Caso nº 3), através da comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os apresentados por FLOUDAS e GROSSMANN (1987), podemos comprovar a eficiência da Análise Pinch em relação aos métodos matemáticos. Isto porque nos leva a redes flexíveis com menor custo global. Uma outra vantagem desta metodologia sobre os métodos matemáticos é o fato do projetista poder acompanhar a síntese passo a passo, podendo alterar o rumo do projeto quando lhe convier. Nos métodos matemáticos as restrições são fixas e não podem ser mudadas a menos que o problema seja reformulado.

Na comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os apresentados por KOTJABASAKIS (1988) verifica-se resultados muito próximos, o que garante a confiabilidade da técnica desenvolvida.

Outra consideração a ser feita neste trabalho com relação às Tabelas de Sensitividade apresentadas no trabalho de KOTJABASAKIS e LINNHOFF (1986) é que a metodologia adotada aqui é muito mais simples, pois evita os problemas encontrados na aplicação das Tabelas de Sensitividade, representados pela necessidade de geração de uma tabela para cada trocador, e a subsequente análise manual de cada tabela. Neste trabalho estes problemas são evitados, pois o método analisa quais são as melhores opções de projeto, deixando para o projetista apenas a escolha da opção que melhor lhe convier.

Uma outra vantagem com relação aos métodos convencionais é o fato da necessidade de gerar a rede para apenas um período de operação, pois o método sintetiza a rede para apenas um período adaptando-a para os demais, diferente do que ocorre em outros métodos nos quais se deve projetar a rede para cada período e depois procurar

estruturas comuns. O que ocorre nestes casos é que além de um tempo demasiadamente longo, corre-se o risco de se obter uma rede super dimensionada, o que elevará o custo final da rede. Neste trabalho isto não ocorre, pois a rede é projetada para o caso base com a MRE e o menor número de unidades possíveis, sendo feita uma análise de custo para os demais períodos para saber qual é a mudança no projeto que nos levará a um menor custo total. Assim, se houver um aumento na área de algum trocador é porque este aumento será mais econômico que um aumento das utilidades usadas, e vice-versa.

A análise da flexibilidade se mostrou uma importante ferramenta não só na síntese de redes com múltiplos períodos de operação, mas também no estudo de modificações de redes quando ocorrem mudanças nas condições de operação após a instalação da rede.

Portanto, podemos afirmar que a técnica desenvolvida neste trabalho é bastante eficiente, não só pelos resultados que podem ser obtidos, mas também pela simplicidade e facilidade de aplicação.

## 6.2 - SUGESTÕES

Neste trabalho não houve a pretensão de esgotar todas as questões relacionadas à síntese de RTC. Objetivou-se a Análise da Flexibilidade. Desta forma, muitos pontos ainda podem ser abordados ou aprimorados.

Na determinação da área mínima de transferência de calor, o coeficiente de transferência de calor convectivo de cada corrente foi considerado constante. Entretanto, em muitas situações práticas, os coeficientes de transferência de calor convectivo podem variar consideravelmente com a temperatura e com a vazão. Assim, seria importante analisar a influência destas variações.

Um outro ponto que poderia ser melhorado é o desenvolvimento de uma metodologia computacional que permita abordar problemas onde seja possível o cálculo de redes com fluidos mudando de fase ou com calor específico variável, condições essas normalmente não consideradas na literatura.

Por fim, outro ponto a ser melhorado, é o dimensionamento termo-hidráulico dos trocadores, levando em conta fatores como perda de carga e incrustação das correntes. Estas considerações poderiam levar a projetos de redes mais próximas da realidade comumente encontrada na indústria.



---

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AGUILERA, N.; NASINI, G. Flexibility test for heat exchanger networks with uncertain flowrates. *Computers and Chemical Engineering*, v. 19, n. 9, p. 1007-1017, 1995.
- AHMAD, S.; LINNHOFF, B. Overall cost targets for heat exchange networks. *ICHEME Anual Res. Meeting, Bath*, p. 51-56, 1984.
- AHMAD, S.; LINNHOFF, B. Supertarget: optimisation of a chemical solvents plant: different process structures for different economics. *ASME Winter Meeting, Anaheim*, p. 15-21, Dec. 1986.
- AHMAD, S.; LINNHOFF, B.; SMITH, R. Cost optimum heat exchange networks, 2. targets and design for detailed capital cost models. *Computers and Chemical Engineering*, v. 14, n. 7, p. 751-767, 1990.
- CERDÁ, J.; GALLI, M. R.; CAMUSSI, N.; ISLA, M. A. Synthesis of flexible heat exchanger networks - I. Convex networks. *Chemical Engineering Science*, v. 14, n. 2, p. 197-211, 1990.
- CERDÁ, J.; GALLI, M. R. Synthesis of flexible heat exchanger networks- II. Nonconvex Networks with large temperature variations. *Chemical Engineering Science*, v. 14, n. 2, p. 213-225, 1990.
- FLOUDAS, C. A.; GROSSMANN, I. E. Synthesis of flexible heat exchanger networks for multiperiod operation. *Computers and Chemical Engineering*, v. 11, n. 2, p. 153-168, 1986.
- FLOUDAS, C. A.; GROSSMANN, I. E. Automatic generation of multiperiod heat exchanger networks configurations. *Computers and Chemical Engineering*, v. 11, n. 2, p. 123-142, 1987a.
- FLOUDAS, C. A.; GROSSMANN, I. E. Synthesis of flexible heat exchanger networks with uncertain flowrates and temperatures. *Computers and Chemical Engineering*, v. 11, n.4, p. 319-336, 1987b.
- GALLI, M. R.; CERDÁ, J. Synthesis of flexible heat exchanger networks- III. Temperature and flowrate variations. *Chemical Engineering Science*, v. 15, n. 1, p. 7-24, 1991.
- GUNDERSEN, T.; NAESS, L. The synthesis of cost optimal heat exchanger networks: an industrial review of the state of the art. *Computers and Chemical Engineering*, v. 12, n. 6, p. 503-530, 1988.

- KOTJABASAKIS, E. *Design of flexible heat exchanger networks*. Manchester, 1988. Ph.D. thesis - UMIST.
- KOTJABASAKIS, E.; LINNHOFF, B. Sensitivity tables for the design of flexible processes (1): How much contingency in heat exchanger networks is cost-effective?. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 64, p. 197-211, May 1986.
- LINNHOFF, B. Pinch Analysis: A state-of-art overview. *Transactions of the IChemE*, v. 71, Part A, p.503-522, Sep. 1993.
- LINNHOFF, B. Use pinch analysis to knock down capital costs and emissions. *Chemical Engineering Progress*, p. 32-57, Aug. 1994.
- LINNHOFF, B.; AHMAD, S. Cost optimum heat exchange networks-1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost. *Computers and Chemical Engineering*, v. 14, n. 7, p. 729-750, 1990.
- LINNHOFF, B.; EASTWOOD, A. R., Overall site optimization by pinch technology. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 65, p. 408-414, Sep. 1987.
- LINNHOFF, B.; FLOWER, J.R. Synthesis of heat exchanger networks. Part I: systematic generation of energy optimal networks. *AIChE Journal*, v. 24, n. 4, p. 633-642, 1978.
- LINNHOFF, B; HINDMARSH, E. The pinch method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, v. 38, n. 5, p. 745-763, 1983.
- LINNHOFF, B.; KOTJABASAKIS, E. Downstream paths for operable process designs. *Chemical Engineering Progress*, p. 23-27, May 1986.
- LINNHOFF, B.; MASON, D.R., WARDLE, I. Understanding heat exchanger networks. *Computers and Chemical Engineering*, v. 3, p. 295-302, 1979.
- LINNHOFF, B.; TOWNSEND, D. W.; BOLAND, D.; HEWITT, G.F.; TOMAS, B. E. A.; GUY, A. R.; MARSLAND, R.H. A user guide on process integration for the efficient use of energy. *The Institute of Chemical Engineering*, 1982.
- PETH, S.; SINGH, R.; KNOPT, F. C. A simple technique for locating loops in heat exchanger networks. *Computers and Chemical Engineering*, v. 13, n. 7, p. 859-860, 1989.

- PAPALEXANDRI, K. P.; PISTIKOPOULOS, E. N. A multiperiod MINLP model for improving the flexibility of heat exchanger networks. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 2, p. S111-S116, 1993.
- PIOVESANI, P. D. Influência dos coeficientes de película na otimização de redes de trocadores de calor. Rio de Janeiro: UFRJ. COPPE, 1990. *Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Mecânica)* - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.
- RAVAGNANI, M. A. S. S. Projeto e otimização de redes de trocadores de calor. Campinas: UNICAMP, 1994. *Tese (Doutorado em Engenharia Química)* - Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- SU, J.; MOTARD, R. L. Evolutionary synthesis of heat exchanger networks. *Computers and Chemical Engineering*, v. 8, n. 2, p. 67-80, 1984.
- TOWNSEND, D.W.; LINNHOFF, B. Surface área targets for heat exchanger networks. *ICHEME Annual Res. Meeting, Bath*, 1984.
- UMEDA, T.; ITOH, J.; SHIROKO, H. Heat exchanger systems syntese. *Chemical Engineering Progress*, v. 74, p. 70-76, 1978.