



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**



**Desenvolvimento de um programa computacional
em Scilab[®] baseado no método *Pinch* de integração
energética**

Marina Garcia Resende

**São Carlos – SP
2013**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**



**Desenvolvimento de um programa computacional em Scilab®
baseado no método *Pinch* de integração energética**

**Marina Garcia Resende
Aluna de Pós-Graduação**

**Prof. Dr. Wu Hong Kwong
Orientador PPGEQ/UFSCar**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, na área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**São Carlos – SP
2013**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

R433dp Resende, Marina Garcia.
Desenvolvimento de um programa computacional em
Scilab® baseado no método *Pinch* de integração energética
/ Marina Garcia Resende. -- São Carlos : UFSCar, 2013.
81 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2013.

1. Engenharia de processos. 2. Otimização matemática.
3. Análise *Pinch*. 4. Trocadores de calor. I. Título.

CDD: 660 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
MARINA GARCIA RESENDE APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SÃO CARLOS, EM 25 DE FEVEREIRO DE 2013.

BANCA EXAMINADORA:

Wu Hong Kwong

Wu Hong Kwong
Orientador, UFSCar

Ronaldo Guimarães 65

Ronaldo Guimarães Corrêa
UFSCar

Nivaldo Aparecido Corrêa

Nivaldo Aparecido Corrêa
USP

A Deus
A meus pais e irmão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado a força necessária para terminar este trabalho e proporcionar tantas alegrias em minha vida.

A meus pais, Josué e Silvana, pelo apoio, incentivo, compreensão e amor incondicionais.

A meu irmão Guilherme, pela companhia e paciência durante nossa estadia em São Carlos.

Ao Pedro, por todo carinho, amor, apoio e boas ideias sempre na hora certa.

Ao meu orientador, professor Dr. Wu Hong Kwong, pela orientação, grande apoio e bons conselhos durante o mestrado, tornando-se uma referência para minha carreira.

A toda minha família que, mesmo distante, sempre torce pelo meu sucesso.

Aos meus grandes amigos de Uberlândia, em especial Rosiane, Renata, Verônica, Natália Luiza e Rafael, pela gentileza, carinho e estarem sempre dispostos a me ouvir e ajudar com palavras amigas.

Aos amigos que fiz em São Carlos, em especial Paula e Gleyce, que tornaram essa caminhada mais fácil e alegre.

Aos meus professores, da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) e também aos do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar), pois sem eles eu não teria chegado até aqui.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro durante o mestrado.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para realização deste trabalho.

*“Nós somos aquilo que fazemos repetidas vezes, repetidamente.
A excelência, portanto, não é um feito, mas um hábito.”*

Aristóteles

RESUMO

A crescente preocupação com impactos ambientais causados por atividades humanas tem levado cientistas a buscar alternativas para amenizar a situação. No que se refere a indústrias químicas, um dos focos principais dessa preocupação é a economia de energia. Através de vários estudos realizados ao longo dos anos, surgiu então a ideia da tecnologia *Pinch*, uma das principais e mais eficientes técnicas de integração energética existente. É baseada na divisão do problema em dois sistemas através do ponto *Pinch*, nos quais são realizados reprojeto e/ou sínteses de Redes de Trocadores de Calor (RTC) separadamente, fundamentados em princípios da Termodinâmica. No entanto, por vezes, os cálculos necessários a essa metodologia podem ser demorados e tediosos. Por esta razão, há a necessidade do uso de *softwares* para efetuar mais rapidamente os cálculos iniciais do método *Pinch*, facilitando, então, o futuro projeto de redes de trocadores de calor. O objetivo deste trabalho foi criar um programa computacional em linguagem Scilab[®], para aplicação dos princípios básicos da análise *Pinch*. Cinco estudos de caso foram apresentados para ilustrar e testar o desempenho do novo programa. Ademais, são apresentadas algumas das principais propriedades relativas a esta técnica, mostrando-se bastante interessantes e inspiradoras para a realização de novas pesquisas dentro da área. Através deste trabalho, conclui-se que a análise *Pinch* é uma maneira relativamente simples e eficaz para síntese de RTC, podendo ser utilizada para a resolução de uma vasta gama de problemas. Desta forma, é possível uma recuperação energética aliada à economia de capital, possibilitando um acordo de qualidade entre meio ambiente e lucratividade das indústrias químicas. Ademais, o programa computacional implementado em Scilab[®] mostrou-se uma ferramenta bastante eficiente para aplicação do método, facilitando o aprendizado da tecnologia *Pinch* por usuários iniciantes e também sendo útil para projetistas mais experientes, apresentando resultados satisfatórios no que se refere à otimização energética do processo.

Palavras-chave: Análise *Pinch*. Redes de Trocadores de Calor. Scilab[®]. Projeto. Otimização.

ABSTRACT

The increasing concern about environmental impacts caused by human activities has led scientists to look for ways to settle the situation. As regards chemical industries, one of the main focuses of this concern is the energy saving. Over several studies down the years, the idea of *Pinch* technology has risen up as one of the main and most efficient techniques of energy integration so far. It is based on the division of the problem into two systems starting from *Pinch* point, in which retrofits and/or synthesis of heat exchanger networks are realized separately, grounded on Thermodynamics principles. Nevertheless, at times, the calculation needed for this methodology can be tedious and time consuming. For that effect, there is the need to use software's to execute faster the initial calculations that *Pinch* method demands, in order to make it easier the future project of heat exchanger networks. The purpose of this work was to create a computer program in Scilab[®] language, for application of basic principles of *Pinch* analysis. Five case studies were presented to illustrate and test the performance of the new program. Furthermore, some of the main properties of this technique are presented, proving to be very interesting and inspiring for the rising or new researches in the area. From this work, it can be concluded that *Pinch* analysis is a relatively simple and efficient way to the retrofit and synthesis of heat exchanger networks, being able to be used in the solution of a several range of problems. Thus, energy savings associated to capital savings are possible, making it easier to exist a quality deal between the environment and profitability of chemical industries. Besides, the new program implemented in Scilab[®] has shown up to be a really efficient tool in the application of the method, facilitating the learning of users recent presented to *Pinch* technology and also being useful to more experienced designers, presenting satisfactory results regarding energy optimization of processes.

Keywords: *Pinch* Analysis. Heat Exchanger Networks. Scilab[®]. Project. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Esquema simplificado de um processo.	11
Figura 3.2 – Fluxograma do processo para o exemplo em questão.....	13
Figura 3.3 – Diagrama de intervalos de temperatura para o exemplo em questão.....	15
Figura 3.4 – População de correntes em cada intervalo de temperatura.	16
Figura 3.5 – Diagramas em cascata.....	17
Figura 3.6 – Diagrama de temperatura versus entalpia referente aos dados da Tabela 3.1.....	18
Figura 3.7 – Diagrama de temperatura versus entalpia com $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	20
Figura 3.8 – Curvas compostas referentes às correntes quentes.	21
Figura 3.9 – Curvas compostas quentes e frias do processo.	22
Figura 3.10 – Curva composta para o exemplo da Tabela 3.2 para um $\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	23
Figura 3.11 – Transferências de calor.	24
Figura 3.12 – Exemplo de gráfico de energia versus ΔT_{\min}	26
Figura 3.13 – Diagrama de grade para o processo referente aos dados da Tabela 3.2.....	27
Figura 3.14 – Rede que atinge as metas energéticas para o exemplo da Tabela 3.2.....	29
Figura 3.15 – Algoritmo para divisão de correntes a temperaturas acima do ponto <i>Pinch</i>	31
Figura 3.16 – Algoritmo para divisão de correntes a temperaturas abaixo do ponto <i>Pinch</i>	31
Figura 3.17 – Rede de mínimo consumo energético, gerada com base nos dados da Tabela 3.3 ($\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$).	32
Figura 3.18 – Rede de mínimo consumo de utilidades proposta com os dados da Tabela 3.4.	34
Figura 3.19 – Quebra de loop da rede e violação da diferença mínima de temperatura e também do ponto <i>Pinch</i>	35
Figura 3.20 – Rede obtida após restauração da diferença mínima de temperatura.	36
Figura 4.1 – Comando de execução do aplicativo <i>Scinotes</i>	38
Figura 4.2 – Caixa de diálogo interativa para inserção do número total de correntes do processo.....	38
Figura 4.3 – Janela interativa para inserção de dados de correntes frias.....	39
Figura 4.4 – Programação para leitura das variáveis de entrada através do Excel®(correntes quentes).40	
Figura 4.5 – Programação para leitura das variáveis de entrada através do Excel®(correntes frias). ...	40
Figura 4.6 – Fluxograma resumido da programação utilizada para gerar a grande curva composta e o diagrama da Tabela Problema	42
Figura 4.7 – Fluxograma resumido da primeira parte da programação utilizada para gerar as curvas compostas do processo.	43
Figura 4.8 – Fluxograma resumido da segunda parte do algoritmo para geração de curvas compostas quentes.....	43

Figura 4.9 – Fluxograma resumido da segunda parte do algoritmo para geração de curvas compostas frias.....	44
Figura 5.1 – Inserção da primeira variável de entrada: número total de correntes do processo.....	46
Figura 5.2 – Segunda variável de entrada: número total de correntes quentes.	46
Figura 5.3 – Inserção da variável “número total de correntes frias”.....	46
Figura 5.4 – Entrada da variável “diferença mínima de temperatura entre as correntes” (em °C).	46
Figura 5.5 – Inserção dos dados de entrada referentes à primeira corrente quente.....	47
Figura 5.6 – Inserção dos dados de entrada referentes à primeira corrente fria.	47
Figura 5.7 – Curvas compostas quentes e frias para o primeiro estudo de caso.	48
Figura 5.8 – Grande curva composta para o primeiro estudo de caso.....	48
Figura 5.9 – Diagrama em cascata da Tabela Problema, ponto <i>Pinch</i> e quantidades mínimas de consumo energético externo para o primeiro caso.	49
Figura 5.10 – Localização das correntes no diagrama de grade referente ao primeiro caso.	50
Figura 5.11 – Sugestão de rede de mínimo consumo energético desenhada com o auxílio do <i>software Hint</i> [®]	50
Figura 5.12 – Curvas compostas quentes e frias para o segundo estudo de caso.....	53
Figura 5.13 – Grande curva composta referente ao segundo estudo de caso.	53
Figura 5.14 – Diagrama em cascata da Tabela Problema para o segundo estudo de caso.	54
Figura 5.15 – Temperatura <i>Pinch</i> e quantidades mínimas de aquecimento e resfriamento externos fornecidas através do <i>Scilab</i> [®]	54
Figura 5.16 – Localização das correntes de processo para o segundo caso.	55
Figura 5.17 – Rede de máxima recuperação energética para o segundo caso construída no <i>software Hint</i>	56
Figura 5.18 – Curvas compostas quentes e frias para o terceiro estudo de caso.	57
Figura 5.19 – Grande curva composta referente ao terceiro estudo de caso.	58
Figura 5.20 – Diagrama em cascata da Tabela Problema para o terceiro estudo de caso.	58
Figura 5.21 – Temperatura <i>Pinch</i> e quantidades mínimas de aquecimento e resfriamento externos obtidos através do <i>Scilab</i> [®]	59
Figura 5.22 – Localização das correntes de processo para o terceiro caso.	59
Figura 5.23 – Rede de mínimo consumo energético para o terceiro caso, desenhada com o auxílio do <i>software Hint</i>	60
Figura 5.24 – Curvas compostas referentes ao quarto exemplo.....	62
Figura 5.25 – Grande curva composta para o quarto estudo de caso.	63
Figura 5.26 – Representação do diagrama em cascata da Tabela Problema para o quarto exemplo. ...	63
Figura 5.27 – Temperatura <i>Pinch</i> do processo e quantidades mínimas de resfriamento e aquecimento para o quarto caso.....	64

Figura 5.28 – Localização obtida através da rotina para as correntes do diagrama de grade do processo para o quarto caso.....	64
Figura 5.29 – Rede obtida com o auxílio do <i>software</i> Hint para o terceiro caso.	65
Figura 5.30 – Curvas compostas quentes e frias para o quinto estudo de caso.....	68
Figura 5.31 – Grande curva composta referente ao quinto estudo de caso.	68
Figura 5.32 – Diagrama em cascata da Tabela Problema obtido para o quinto estudo de caso.....	69
Figura 5.33 – Temperatura <i>Pinch</i> do processo e quantidades mínimas de utilidades quentes e frias...	69
Figura 5.34 – Localização das correntes no diagrama de grade para o quinto caso.....	70
Figura 5.35 – Valores referentes ao quinto caso para um $\Delta T_{\min} = 5^{\circ}\text{C}$	71
Figura 5.36 – Rede de trocadores de calor de máxima recuperação energética para o quinto caso (para temperaturas acima do ponto <i>Pinch</i>).....	72
Figura 5.37 – Rede de trocadores de calor de máxima recuperação energética para o quinto caso (para temperaturas abaixo do ponto <i>Pinch</i>).....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados relativos ao exemplo da Figura 3.1.	12
Tabela 3.2 - Dados relativos ao fluxograma da Figura 3.2.	13
Tabela 3.3 – Dados para geração da rede da Figura 3.17.....	32
Tabela 3.4 – Dados para geração da rede da Figura 3.17.....	33
Tabela 5.1 – Dados utilizados para o primeiro estudo de caso.	45
Tabela 5.2 – Dados referentes aos trocadores da Figura 5.11.	51
Tabela 5.3 – Comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho e dados da literatura para o primeiro caso.	52
Tabela 5.4 – Dados referentes ao segundo estudo de caso.....	52
Tabela 5.5 – Dados referentes aos trocadores de calor presentes na rede da Figura 5.17.....	56
Tabela 5.6 – Variáveis de entrada para o terceiro estudo de caso.....	57
Tabela 5.7 – Dados referentes aos trocadores de calor da Figura 5.22.	61
Tabela 5.8 – Variáveis de entrada para o quarto estudo de caso.	62
Tabela 5.9 – Dados referentes à rede de trocadores de calor da Figura 5.29.	65
Tabela 5.10 – Dados referentes ao quinto estudo de caso.....	66
Tabela 5.11 – Dados referentes aos trocadores de calor das Figuras 5.36 e 5.37.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATM	Area Target Method
GAMS [®]	General Algebraic Modeling System
GCC	Grande Curva Composta
HENS	Heat Exchanger Network Synthesis
HS	Harmonic Search (Busca Harmônica)
Hint	Heat Integration
ICI	Imperial Chemical Industries
ISO	International Organization for Standardization
MRE	Máxima Recuperação Energética
PDM	<i>Pinch</i> Design Method
PEE	Ponto de Estrangulamento Energético
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
RTC	Redes de Trocadores de Calor
Scilab [®]	Scientific Laboratory

LISTA DE SÍMBOLOS

C1	Corrente fria número 1	[-]
CP	Capacidade calorífica da corrente	[ML ² T ⁻³ θ ⁻¹]
CU17	Utilidade fria número 17	[-]
<i>cp</i>	Calor específico	[L ² T ⁻² θ ⁻¹]
ΔH	Carga calorífica da corrente	[ML ² T ⁻³]
<i>h</i>	Coeficiente de transferência de calor	[MT ⁻³ θ ⁻¹]
H1	Corrente quente número 1	[-]
HU7	Utilidade quente número 7	[-]
L	Quantidade de <i>loops</i> presente em uma RTC	[-]
<i>m</i>	Vazão mássica	[MT ⁻¹]
N	Número total de correntes do processo	[-]
<i>Q</i>	Fluxo de calor	[ML ² T ⁻³]
<i>š</i>	Número de problemas independentes em uma RTC	[-]
S	Temperatura deslocada (<i>shifted temperature</i>)	[θ]
ΔT _{mín}	Diferença mínima de temperatura entre as correntes de um processo	[θ]
ΔT	Diferença entre as temperaturas de saída e entrada de um processo	[θ]
T	Temperatura	[θ]
T1	Trocador de calor número 1	[-]
<i>U_n</i>	Número de trocadores de calor em uma RTC	[-]

SUBSCRITOS

C	Corrente fria
E	Entrada
EF	Entrada da corrente fria
EQ	Entrada da corrente quente

H	Corrente quente
i	Corrente $i = 1...n$
n	Número total de correntes do processo
REC	Recuperado
S	Saída
SF	Saída da corrente fria
SQ	Saída da corrente quente
t	Total

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
SUMÁRIO.....	x
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
CAPÍTULO 3. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA ANÁLISE PINCH.....	11
3.1 Noções iniciais	11
3.2 Quantidades mínimas de calor de utilidades para o processo.....	13
3.3 O método algébrico: <i>Problem Table</i> (Tabela Problema).....	15
3.4 Os métodos gráficos.....	18
3.4.1 Diagrama de temperatura versus entalpia	18
3.4.2 Curvas compostas.....	21
3.4.3 Grande curva composta (GCC).....	22
3.5 O significado do ponto <i>Pinch</i>	23
3.6 Problemas limiares.....	25
3.7 Projeto de redes de trocadores de calor	26
3.7.1 Cálculo do número mínimo de trocadores de calor em uma RTC	27
3.7.2 Cálculo da área de uma rede de trocadores de calor	28
3.7.3 Considerações importantes para projeto de RTC.....	28
3.7.4 Alguns aspectos relevantes para otimização do projeto de RTC	30

CAPÍTULO 4. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA EM SCILAB®	37
4.1 Sobre o Scilab®	37
4.2 Entrada de dados	38
4.3 Algoritmo em cascata da Tabela Problema e grande curva composta.....	41
4.4 Curvas compostas quentes e frias e diagrama de grade	42
CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1 Primeiro estudo de caso (GUNDERSEN, 2000)	45
5.2 Segundo estudo de caso (BOGATAJ e KRAVANJA, 2012).....	52
5.3 Terceiro estudo de caso (KHORASANY e FESANGHARY, 2009)	57
5.4 Quarto estudo de caso (BJÖRK e NORDMAN, 2005)	61
5.5 Quinto estudo de caso (YU et al., 2000).....	66
CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	76
6.1 Conclusão.....	76
6.2 Trabalhos futuros	76
CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Desde meados do século XVIII, com a Revolução Industrial iniciada na Inglaterra, os processos produtivos vêm sofrendo mudanças a níveis sociais, econômicos e tecnológicos. Ao longo dos anos, estes progressos ocasionaram danos ao meio ambiente, causando constante preocupação em ambientalistas e cientistas. A urgência de aliar o progresso tecnológico industrial às necessidades do meio ambiente tornou-se, então, tema-chave de pesquisas realizadas em todo o mundo, nos mais diversos campos da ciência (DEZORDI, 2008).

No âmbito dos processos químicos industriais, vários trabalhos e descobertas têm contribuído para a aliança entre meio ambiente e progresso tecnológico, desde melhoramentos relacionados ao tratamento de resíduos até o reprojeto de plantas químicas visando minimizar os danos causados à natureza.

Além disso, em 15 de Junho de 2011, foi publicada pela *International Organization for Standardization*, a ISO 50001. Esta é uma nova norma de gestão energética, que foi criada com o objetivo de influenciar empresas para que estas alcancem uma redução de, no mínimo, 60% de seus consumos energéticos. Empresas públicas e privadas deverão, então, estabelecer planos para a implementação, manutenção e melhoria da utilização de seus recursos energéticos (CROFT, 2012). Para tanto, podem realizar a aplicação de técnicas de integração energética.

Dentro deste contexto, dois tipos de metodologias são mais comumente utilizados para minimizar o uso de energia em processos. O primeiro consiste em formular um problema de otimização utilizando técnicas de programação não linear inteira mista (PNLIM). Trata-se de um método simultâneo utilizado para síntese de redes de trocadores de calor, no qual se evita a decomposição da rede em subproblemas, sendo esta obtida diretamente, levando em consideração contribuições de custo e operação. Alguns modelos levam em consideração princípios termodinâmicos (RAVAGNANI e SUÁREZ, 2012).

A outra tecnologia utilizada é a do ponto *Pinch*, também chamado ponto de estrangulamento energético, método sequencial utilizado para minimizar o consumo de energia em redes de trocadores de calor. Através do uso de princípios termodinâmicos e de otimização de processos, a tecnologia *Pinch* mostra-se uma ferramenta eficiente de integração energética, capaz de economizar energia e capital em uma planta de processos químicos (LINNHOFF e HINDMARSH, 1983).

Por ser um método sequencial (no qual um problema é dividido em vários subproblemas), a análise *Pinch* não garante que a rede obtida pelo usuário tenha um custo global mínimo na primeira etapa de resolução, porém garante que a rede opere utilizando o mínimo consumo de energia possível, obtendo bons resultados (RAVAGNANI e SUÁREZ, 2012). Além disso, possibilita que o projetista tenha acesso a todos os parâmetros do processo, podendo otimizá-los da forma que lhe seja mais conveniente durante todas as etapas de resolução do problema.

É importante ressaltar que a aplicação de técnicas de integração energética não se restringe somente a trocadores de calor, mas também a outros tipos de operações unitárias, nas quais a transferência de calor está presente (um reator com camisa de refrigeração, por exemplo). No entanto, o foco deste trabalho é a aplicação do método *Pinch* de integração energética a correntes de processo em RTC.

Por conseguinte, faz-se necessária a continuação de estudos científicos a fim de explorar as propriedades da análise *Pinch*, bem como a descoberta de melhoramentos para a mesma, sempre tendo como principal objetivo a economia energética de acordo com os limites impostos pelo meio ambiente.

No entanto, os cálculos requeridos pela metodologia *Pinch* de integração energética podem ser tediosos e consumir muito tempo (MARTÍN e MATO, 2008). Por esse motivo, ao longo dos anos, vários pacotes computacionais foram desenvolvidos, objetivando-se minimizar este tempo de cálculos. Alguns dos principais *softwares* existentes para integração energética podem ser citados:

- *AspenTech*[®]: os pacotes *Aspen Exchange Design & Rating* (EDR), *Aspen HYSYS*[®] e *Aspen Energy Analyser*[®], podem ser utilizados para análises de integração energética. É um pacote de *softwares* pagos e necessita prévio conhecimento do usuário para utilizá-los (ASPEN TECHNOLOGY, Inc., 2012);
- *ProSimPlus*[®]: também é um *software* que possui pacotes para integração energética através da análise *Pinch*. Também é um programa pago e necessita prévio treinamento para ser utilizado (PROSIM, Inc., 2012);
- *PinCH*[®]: também desenvolve análises de integração energética baseadas na metodologia *Pinch*. Também não é um *software* livre. Gera a rede de trocadores de calor automaticamente (PinCH, Inc., 2012);

- *Hint (Heat Integration)*: é um *software* livre que permite ao usuário construir sua própria rede de trocadores de calor, não a gerando automaticamente como os três *softwares* anteriormente citados. Ideal para estudantes e projetistas que desejem iniciar e/ou aprofundar os conhecimentos na análise *Pinch* de integração energética, possibilitando ao usuário o contato com cada etapa do projeto da rede de trocadores de calor (MARTÍN e MATO, 2008).

Existem outros *softwares* que trabalham com integração energética. No entanto, estes são os mais conhecidos. Logo, para economizar tempo e otimizar o trabalho, é preciso que o usuário possa usufruir destes *softwares* a seu bel-prazer e também é necessário que novos *softwares* sejam continuamente criados.

Portanto, é de fundamental importância que projetistas e iniciantes entendam mais a fundo os princípios da metodologia de integração energética (no caso, a análise *Pinch*), pois apenas dessa forma será possível adquirir experiência para conseguir extrair o melhor de cada programa. Com *softwares* que fornecem a rede automaticamente este contato não é tão intenso.

Deste modo, procurando facilitar o entendimento de iniciantes e profissionais sobre os princípios da análise *Pinch* de integração energética, foi desenvolvido um programa computacional utilizando o *software* Scilab[®], com o objetivo de esclarecer os princípios básicos da tecnologia *Pinch* e possibilitar ao usuário o contato direto com cada etapa antes da síntese de trocadores, propriamente dita. Trata-se de um programa desenvolvido *in house*, ou seja, permite que o usuário faça modificações quando achar necessário. O *software* Scilab[®] foi escolhido como base para criação do programa, pois dispõe de ótimos pacotes de cálculo numérico para resolução de problemas de engenharia em geral, além de ser um *software* livre.

O principal objetivo deste trabalho é apresentar o programa desenvolvido em Scilab[®], mostrar cada etapa de desenvolvimento do mesmo e demonstrar sua utilização através de resultados obtidos em cinco estudos de caso, com variados números de correntes de processo. Totalmente baseado na análise *Pinch* de integração energética, o programa possibilita uma maior interação do usuário com princípios básicos da análise, como curvas compostas, grande curva composta, Tabela Problema, dentre outros.

Também são sintetizadas redes de trocadores de calor para cada exemplo. É importante ressaltar que são apenas sugestões de redes com consumo mínimo de utilidades, e

o programa em Scilab[®] não fornece a rede automaticamente, sendo esta tarefa realizada pelo próprio usuário.

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, objetivando apresentar bons argumentos para utilização do novo programa criado e ressaltar a importância da integração energética para a engenharia química e de processos.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução geral do tema, atendo-se apenas a apresentar ao leitor o que será tratado no trabalho e os objetivos do mesmo.

No Capítulo 2, o leitor se deparará com uma breve revisão bibliográfica, ou seja, uma coletânea dos principais trabalhos relacionados ao tema que foram publicados ao longo dos anos.

O Capítulo 3 trata dos principais conceitos da análise *Pinch*, possibilitando ao leitor um contato mais direto com o método e um bom entendimento para que possa compreender melhor o funcionamento do programa.

O Capítulo 4 apresenta uma descrição detalhada do funcionamento do programa desenvolvido em Scilab[®], explicitando cada etapa de desenvolvimento do mesmo.

No Capítulo 5, são apresentados cinco estudos de caso, desde problemas simples até em grande escala, procurando familiarizar ainda mais o leitor com os conceitos da análise *Pinch* e permitir a comparação de resultados fornecidos pelo programa com alguns obtidos na literatura.

O Capítulo 6 traz a conclusão geral do trabalho e apresenta, também, sugestões de projetos futuros relacionados ao tema deste trabalho.

Finalmente, o Capítulo 7 lista todas as referências bibliográficas consultadas para elaboração deste trabalho.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo consiste em uma coletânea dos principais trabalhos relacionados com a metodologia *Pinch* de integração energética, desde sua criação até os dias atuais.

Durante os últimos 50 anos, a síntese e o reprojeto de Redes de Trocadores de Calor (RTC) foram amplamente estudados, principalmente devido à crescente necessidade de minimizar o consumo energético aliado ao custo de processos industriais. Um dos primeiros trabalhos introduzidos na literatura sobre o assunto é de 1944, no qual o autor Ten Broeck¹ (*apud* FURMAN e SAHINIDIS, 2002) trata da escolha de um método economicamente viável para a seleção do tamanho de cada unidade de uma bateria de trocadores de calor.

A importância do tema começou a ganhar maior relevância na década de 60, na qual vários trabalhos acerca da síntese de redes de trocadores de calor foram desenvolvidos. Em 1961, Westbrook² (*apud* FURMAN e SAHINIDIS, 2002) introduziu um método de programação matemática para síntese de RTC. No entanto, no ano de 1965, o trabalho de Hwa³ (*apud* FURMAN e SAHINIDIS, 2002) foi o primeiro a realizar uma síntese propriamente dita, utilizando o conceito de superestrutura.

Foi proposto, então, o primeiro trabalho a tratar de forma acurada e propor a definição formal da síntese de RTC (MASSO e RUDD, 1969). O método consistia na aplicação de regras heurísticas em programação computacional, com o objetivo de gerar a RTC. Porém, devido a sua simplicidade, o método não levava em consideração aspectos relevantes para a síntese de redes, como a divisão de correntes. Contudo, embora não abordasse a síntese mais a fundo, o trabalho é de grande importância histórica, sendo considerado o primeiro trabalho de destaque na área.

Já no início dos anos 70, o trabalho de Hohmann⁴ (*apud* FURMAN e SAHINIDIS, 2002) forneceu a base para a criação da tecnologia *Pinch*, alguns anos mais tarde. Apresentou o primeiro conceito ligado a curvas compostas para cálculo da demanda mínima de utilidades antes da síntese da rede, além de propor um método para estimar o número mínimo de trocadores de calor em um sistema de integração energética.

¹ BROECK, T. H. Economic selection of exchanger sizes. **Ind. Eng. Chem.**, v. 36, n. 1, p. 64-67, 1944.

² WESTBROOK, G. T. Use this method to size each stage for best operation. **Hydrocarbon Processing Pet. Ref.**, v. 40, n. 9, p. 2012-206, 1961.

³ HWA, C. S. **Mathematical formulation and optimization of heat exchanger networks using separable programming**. AIChE: Nova Iorque, 1965. 5p.

⁴ HOHMANN, E. C. **Optimum network for heat exchange**. PhD Dissertation – University of Southern California, Los Angeles, CA, 1971.

Os passos seguintes para a criação da tecnologia *Pinch* seriam dados ainda no final da década de 70. Descobriu-se que havia um ponto de maior proximidade entre as curvas compostas e no qual ocorria um estrangulamento energético. Este ponto foi, então, denominado ponto *Pinch*, estando relacionado com a máxima recuperação energética. O conceito de ΔT_{\min} (diferença mínima de temperatura entre as correntes do processo) também foi levado em consideração, concluindo-se que este estava intimamente ligado com o grau de recuperação térmica (UMEDA *et al.*, 1978).

Naquela época, empresas continuavam enfrentando desafios no que se refere à economia de energia. Uma empresa britânica em particular, a ICI (*Imperial Chemical Industries*), buscava uma solução para um problema relacionado a um aumento de demanda de energia. A solução foi incorporar o método desenvolvido por LINNHOFF e FLOWER (1978), com a utilização de intervalos de temperatura para formação de sub-redes de trocadores e da Tabela Problema (*Problem Table*), que avaliaria as demandas mínimas de energia para uma RTC. A aplicação do método foi um sucesso, gerando economia de energia e evitando o gasto com o custo de capital que seria necessário para implantação de uma nova fornalha para atender às demandas energéticas da empresa (KEMP, 2007).

No último ano da década de 70, foi proposto um trabalho que evidenciava a importância da análise termodinâmica na integração energética de processos, começando a traçar os caminhos que levariam à base dos conceitos da análise *Pinch* (LINNHOFF e FLOWER, 1979).

Entretanto, o PDM (*Pinch Design Method*) só foi formalmente proposto no início da década de 80, em um dos trabalhos de maior relevância já realizado sobre a análise *Pinch* (LINNHOFF e HINDMARSH, 1983). O principal diferencial foi a abordagem do problema de síntese de RTC. A Máxima Recuperação Energética (MRE) era definida pela Tabela Problema e pelo Ponto de Estrangulamento Energético (PEE). A estratégia do PDM era dividir o problema em duas regiões independentes (pelo PEE), nas quais seriam alocados os trocadores de calor segundo regras preestabelecidas. O método garantia a mínima utilização de energia, porém não garantia o número mínimo de trocadores de calor. A nova técnica dava ao projetista liberdade para montar a rede de acordo com as especificações inerentes a cada tipo de processo.

Ainda no mesmo ano, houve a descoberta de um método que levava à predição do custo mínimo de utilidades (PAPOULIAS e GROSSMANN, 1983). Através de técnicas de programação computacional aliadas a métodos matemáticos, foi criado o Modelo de

Transbordo, com o qual formularam o problema da quantidade mínima de utilidades e também do número mínimo de combinações possíveis entre os trocadores de calor.

Com a necessidade de economizar tempo e otimizar o uso das técnicas da análise *Pinch*, foi criado um programa computacional chamado HENS (*Heat Exchanger Network Synthesis*), o qual fornecia resultados próximos ao ótimo no que se refere à função objetivo de custo total (KLEMEŠ e PTÁČNÍK, 1985). Pode-se observar que, já na metade da década de 80, a aliança entre tecnologia *Pinch* e a programação computacional começava a ser firmada.

Uma das principais hipóteses levada em consideração para aplicação dos princípios da tecnologia *Pinch* é não permitir transferência de calor no ponto *Pinch*. Uma das desvantagens dessa hipótese é o resultado de redes contendo mais que o mínimo de unidades de trocadores de calor, o que pode acarretar o aumento nos custos de investimento do projeto. Para amenizar este problema, desenvolveu-se uma abordagem que promove um relaxamento desta hipótese, utilizando desta vez, três temperaturas para formular o problema do pseudo ponto *Pinch*, objetivando otimizar, ao mesmo tempo, a rede e as combinações possíveis entre as correntes de processo. A técnica mostrou-se eficiente e pôde ser comprovada em três exemplos (CIRIC e FLOUDAS, 1990).

Procurando aliar a minimização do custo total com a menor quantidade de energia em um processo, foi proposta uma metodologia que levava em conta a aliança entre estas duas variáveis, o que possibilitou o encontro de soluções próximas ao ótimo. Consistia em fixar metas de custo e otimizá-las antes do projeto propriamente dito, garantindo a obtenção de redes operando com o mínimo consumo energético e com o menor custo possível (AHMAD e LINNHOFF, 1990; LINNHOFF *et al.*, 1990).

Após vários estudos sobre a tecnologia *Pinch*, esta foi aplicada a áreas de integração de uma planta química, que consistem em regiões divididas estrategicamente em um processo, cada uma responsável por uma tarefa específica dentro da cadeia produtiva. Foi um trabalho pioneiro no que se refere à aplicação de integração energética em áreas de integração. Baseando-se em princípios termodinâmicos, o trabalho considerou as pequenas interconexões que poderiam ser realizadas entre as áreas, de forma que fosse obtida a quantidade mínima de energia possível. Apesar de não garantir a solução ótima para outras variáveis, como o custo, por exemplo, o trabalho teve grande relevância e provou mais uma vez a eficiência do método *Pinch* de integração energética (AHMAD e HUI, 1991).

Até então, diversas abordagens para a solução do problema de síntese (*grassroot*) de redes de trocadores de calor foram desenvolvidas, sendo aplicadas, também, ao reprojeto (*retrofit*) das mesmas. Todavia, nem todos os métodos utilizados para síntese são diretamente aplicáveis a reprojeto. Foi proposto, então, um método baseado na tecnologia *Pinch*, específico para aplicação a reprojeto de RTC, levando em consideração vários parâmetros que podem afetar o custo total da rede (CARLSSON *et al.*, 1993).

A integração energética de processos químicos já havia sido amplamente estudada até o momento. No entanto, a maioria das descobertas atinha-se à análise de processos de produção isolados, não levando em consideração a planta como um todo. O trabalho de HUI e AHMAD (1994) objetivou, portanto, a integração energética entre diferentes unidades de processo dentro de uma planta. Utilizando conceitos da tecnologia *Pinch*, foi possível realizar a integração das áreas de processo e otimizar, de forma satisfatória, um sistema de utilidades comum a todos estes setores. Para tanto, foi desenvolvido um método gráfico.

Ainda no final da década de 90, uma nova abordagem para otimização de redes de trocadores de calor foi desenvolvida. Trata-se de uma utilização de *Hypertarget* (metodologia que utiliza conceitos da análise *Pinch* e modelagem e programação matemática de forma conjunta), desenvolvendo um modelo de programação conceitual, o chamado *Area Target Model (ATM)*. Um método sequencial para síntese de redes de trocadores de calor é proposto, no qual o ATM é responsável pela determinação dos pares de correntes que trocarão calor entre si (BRIONES e KOKOSSIS,1999a). Também no mesmo ano, os mesmo autores propõem a aplicação do método criado também ao reprojeto de RTC, obtendo resultados satisfatórios (BRIONES e KOKOSSIS,1999b).

Várias inovações na tecnologia *Pinch* já haviam sido feitas até então, bem como esta forma de integração energética já havia sido aplicada em diversos casos reais. Um exemplo relevante foi a aplicação da tecnologia *Pinch* em uma planta química de produção de amônia. Houve uma redução de 17,6% no consumo de combustível para combustão, comprovando, mais uma vez, a eficiência do método *Pinch* (LABABIDI *et al.*, 2000).

Outro exemplo de inovação foi a criação de um algoritmo que propunha ao usuário a obtenção de curvas compostas e grandes curvas composta de uma forma mais simplificada do que o algoritmo comum utilizado para obter a Tabela Problema (ÖZKAN e DINÇER, 2001). O novo código recebeu o nome de DarboTEK, compilado no Visual Basic 3.0. Obtiveram resultados satisfatórios em seu estudo de caso. Mais uma vez, vê-se um exemplo de aplicação

da análise *Pinch* com um melhoramento em um de seus principais conceitos, no caso, a Tabela Problema.

Outra aplicação foi executada em uma rede de trocadores de calor de uma planta de ácido nítrico, com o objetivo de reduzir a quantidade de água de resfriamento e vapor de média pressão. Três trocadores de calor foram substituídos por novos, o que causou um ligeiro aumento de energia com vapor de alta potência. O método mostrou-se, mais uma vez, eficiente, com a redução dos custos energéticos e um tempo de recuperação de capital em torno de 14 meses e meio (MATIJASEVIÆ e OTMAÉIMÆ, 2002).

Dada a importância do estudo da integração energética em plantas petrolíferas, foram realizadas pesquisas para avaliar a influência das incertezas de dados do processo no estudo de integração energética em uma bateria de trocadores de calor de pré-aquecimento de óleo cru para uma coluna de destilação atmosférica. Foram feitas variações nos dados relativos ao problema e novas simulações. Foram notadas mudanças no potencial de retorno financeiro (QUEIROZ *et al.*, 2007).

CASTIER (2007) propõe um método eficiente de extensão do método de cálculo mínimo de utilidades, garantindo o aumento da eficiência termodinâmica da rede de trocadores de calor e, ao mesmo tempo, garantindo a redução de custo das próprias utilidades.

A tecnologia *Pinch* foi aplicada também a um *flash* solar multiestágio, com o objetivo de otimizar a performance de um processo de dessalinização. Foram estudadas três diferentes situações: água destilada não sendo descarregada em cada estágio central; descarregada em todos os estágios; e descarregada a cada cinco estágios, com as mesmas temperaturas e os mesmos pontos *Pinch*. Com a experiência, concluiu-se que não era necessário o bombeamento de água em estágios centrais e devia-se manter a mesma diferença de temperatura em cada estágio (HOU *et al.*, 2008).

No contexto de aplicações computacionais, foi publicado um trabalho que apresentava as principais características do *software* Hint. O *software* apresenta algumas vantagens, como facilidade de entendimento e possibilidade de interação com todas as etapas da análise *Pinch* (MARTÍN e MATO, 2008).

De modo a melhorar o desempenho e obter a máxima recuperação energética da área industrial de Kashima, no Japão, foi aplicada a tecnologia *Pinch* (*area-wide Pinch technology*). O trabalho provou que o uso correto de ferramentas da análise *Pinch* para áreas industriais de grande escala pode trazer resultados satisfatórios (MATSUDA *et al.*, 2009).

Um pouco mais tarde, a análise *Pinch* foi aplicada para determinação do mínimo consumo energético possível para um ciclo de Cu-Cl (cobre-cloro). Todo o aquecimento e fluxos de refrigeração (real ou potencial) são apresentados como perfis de temperatura de energia de fluxo, sendo combinadas em curvas compostas envolvendo todo o ciclo (GHANDEHARIUN *et al.*, 2012).

No mesmo ano, BOGATAJ e KRAVANJA (2012) introduziram, em seu trabalho, um novo conceito de superestrutura aumentada, denominada *stage-wise* (estágio-sábio), reforçada por uma subestrutura agregada. O problema de síntese de trocadores de calor é então formulado como um PNLIM (Programação Não Linear Inteira Mista). A estratégia para solução do problema global recai, então, na resolução de um único problema de PNLIM convexo, que incorpora frações lineares e não lineares de termos lineares fracionais não convexos presentes no problema de PNLIM não convexo. Além disso, também é apresentado um algoritmo para identificar pontos ótimos locais.

No que se refere à energia solar, também pode ser observada a presença da tecnologia *Pinch* de integração energética. De modo a otimizar o aproveitamento de energia de uma indústria de laticínios, que utiliza energia termosolar, a análise *Pinch* foi aplicada juntamente com a análise de exergia. A utilização das duas ferramentas em conjunto levou a resultados significativos de economia energética (QUIJERA e LABIDI, 2013).

ESCOBAR e TRIERWEILER (2013) desenvolveram um trabalho no qual utilizaram as principais abordagens (sequencial e simultânea) para resolver um problema de síntese de redes de trocadores de calor, elaborando um problema de otimização matemática com funções objetivo e suas restrições. Utilizaram o *software* GAMS® (*General Algebraic Modeling System*) para programação matemática e otimização. Além disso, foram mostradas também as soluções de diversos casos de RTC da literatura utilizando a metodologia *Pinch*, no que se refere ao mínimo consumo energético, tornando este trabalho de grande importância para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Até os dias atuais, a análise *Pinch* de integração energética se faz cada vez mais presente como ferramenta para otimização de sistemas energéticos. Vários melhoramentos em seus princípios básicos já foram feitos ao longo dos anos, provando que sempre é possível melhorar o desempenho de processos, adequando-os às atuais necessidades energéticas, econômicas e ambientais.

CAPÍTULO 3. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA ANÁLISE PINCH

3.1 Noções iniciais

O principal objetivo da análise *Pinch* (também conhecida como tecnologia *Pinch*) é promover a integração energética do processo, de modo a reduzir ao máximo os gastos com utilidades quentes e frias. Para tanto, baseando-se em análises termodinâmicas, a tecnologia *Pinch* é capaz de fornecer a rede de trocadores de calor com menor consumo energético. A princípio, para um melhor entendimento do método, é necessário ter em mente algumas definições importantes, como o conceito de correntes quentes e frias.

Em todos os processos químicos, algumas correntes precisam ser resfriadas e outras, conseqüentemente, aquecidas. A Figura 3.1 mostra o esquema de um processo simples, composto por duas correntes, a partir do qual será possível esclarecer a definição de correntes quentes e frias.

Figura 3.1 – Esquema simplificado de um processo.



Fonte: Adaptado de Kemp (2007, p.15).

Cada uma das correntes de processo da Figura 3.1 possui uma classificação distinta. Observando-se a corrente de alimentação, nota-se que, para a entrada no reator, é preciso que esteja a uma temperatura igual a 200 °C. No entanto, a temperatura de alimentação é igual a 20 °C. Logo, é necessário que esta corrente seja **aquecida**, por isso a presença de um aquecedor (*heater*). Quando uma corrente de processo necessita aquecimento, como no exemplo dado, esta é chamada de **corrente fria**.

Na saída do reator, pode-se observar que a corrente de produto sai a uma temperatura de 150 °C. Todavia, é preciso que o produto esteja a 50 °C. Ocorre, então, o **resfriamento** da corrente em questão, para atender às especificações do produto. Toda corrente que precisa ser resfriada em um processo, é chamada de **corrente quente**.

Para uma análise de integração energética inicial do processo, é necessário levar em consideração os dados representados na Tabela 3.1. Nesta mesma tabela, nota-se uma nomenclatura muito utilizada na análise *Pinch*, o CP (capacidade calorífica da corrente). Para obter o CP, é necessário apenas multiplicar a vazão mássica da corrente e seu respectivo calor específico, em unidades compatíveis. Logo, o calor disponível na corrente pode ser calculado apenas multiplicando-se o CP da mesma com a diferença de suas temperaturas de saída e entrada.

Além disso, nota-se que ambas as correntes necessitam ceder ou adquirir 180 kW para atingirem suas respectivas temperaturas requeridas de entrada no reator (corrente fria) e saída do produto (corrente quente).

Vapor d'água e água de resfriamento poderiam ser utilizados para suprir as necessidades de aquecimento e resfriamento do processo, respectivamente. No entanto, quanto maior o uso de utilidades no processo, maior será o custo, o que vai completamente contra os objetivos de sustentabilidade industrial, que procuram sempre minimizar ao máximo o consumo de energia (SMITH, 2005).

A partir daí surge o questionamento: será possível a colocação de um trocador de calor entre as correntes, de modo a diminuir o gasto com utilidades quentes e frias (ou seja, o gasto de energia requerida pelo processo, gerada por aquecedores e resfriadores, por exemplo)?

Em um primeiro momento, pode-se pensar que a inserção de um trocador de calor no processo, de modo a permitir que a corrente quente doe todo o calor necessário à corrente fria já resolveria todo o problema. No entanto, por limitações de temperatura, isto não pode ocorrer. De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, é impossível que uma corrente quente a 150 °C seja capaz de trocar calor com uma corrente fria a 200 °C (KEMP, 2007).

Tabela 3.1 – Dados relativos ao exemplo da Figura 3.1.

Classificação das correntes	Vazão mássica (kg/s)	Calor específico (kJ/kgK)	Capacidade calorífica da corrente (CP) (kW/K)	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Carga calorífica (ΔH) (kW)
Corrente Fria	0,25	4,0	1,0	20,0	200,0	180,0
Corrente Quente	0,4	4,5	1,8	150,0	50,0	-180,0

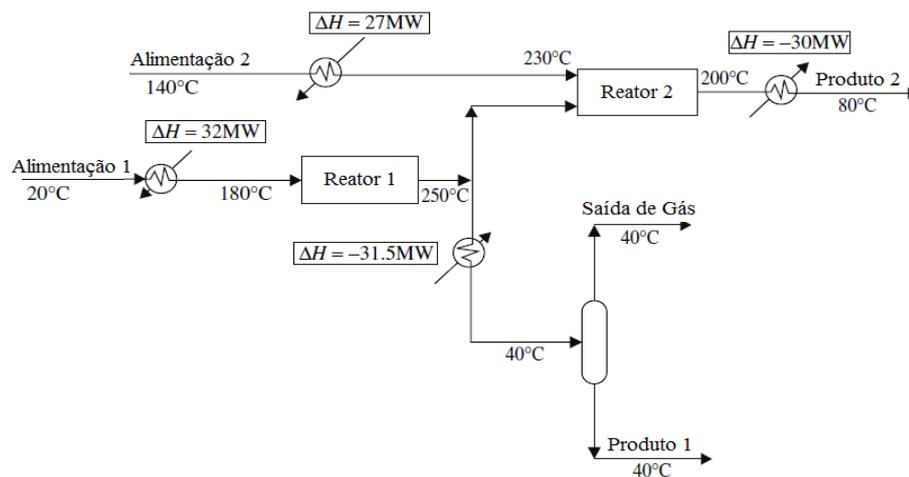
Fonte: Adaptado de Kemp (2007, p.16).

Deste modo, surge a necessidade de um método de integração energética capaz de calcular a quantidade de calor que poderá ser recuperada no processo, respeitando as limitações termodinâmicas deste. A tecnologia *Pinch*, então, entra em cena, tratando de calcular, primeiramente, as estimativas mínimas de resfriamento e aquecimento do processo em questão.

3.2 Quantidades mínimas de calor de utilidades para o processo

A Figura 3.2 mostra o exemplo de um processo composto por quatro correntes, duas quentes e duas frias. A partir dos dados fornecidos pela Tabela 3.2, é possível calcular as quantidades mínimas de calor necessárias para aquecimento e resfriamento do processo (SMITH, 2005).

Figura 3.2 – Fluxograma do processo para o exemplo em questão.



Fonte: Smith (2005, p.358).

Tabela 3.2 - Dados relativos ao fluxograma da Figura 3.2.

Corrente	Tipo	Capacidade calorífica da corrente (CP) (MW/K)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	Carga calorífica (ΔH) (MW)
1 – Alimentação do Reator 1	Fria	0,2	20,0	180,0	32,0
2 – Produto do Reator 1	Quente	0,15	250,0	40,0	-31,5
3 – Alimentação do Reator 2	Fria	0,3	140,0	230,0	27,0
4 – Produto do Reator 2	Quente	0,25	200,0	80,0	-30,0

Fonte: Adaptado de Smith (2005, p. 359).

O cálculo do calor disponível em cada corrente pode ser efetuado segundo a Equação 3.1,

$$Q_i = \dot{m}_i cp_i \Delta T_i \quad (3.1)$$

onde:

Q_i = fluxo de calor para a corrente i , em MW;

\dot{m}_i = vazão mássica da corrente i , em kg/s;

cp_i = calor específico da corrente i , em MJ/kgK;

ΔT_i = diferença de entre as temperaturas de saída e entrada da corrente i , em °C.

A partir dos dados fornecidos pela Tabela 3.2 e utilizando a Equação 3.1, torna-se possível o cálculo do calor disponível para troca térmica em cada uma das correntes em questão. Efetuando-se os cálculos, nota-se que os resultados são idênticos à última coluna da Tabela 3.2. Portanto, a carga calorífica de cada corrente é sempre igual ao calor disponível para troca térmica na mesma.

De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, pode-se calcular a quantidade mínima de calor a ser suprida por utilidades segundo a Equação 3.2,

$$Q_T = \sum_1^n Q_i \quad (3.2)$$

onde:

Q_T = fluxo total de calor do processo, em MW;

Efetuando-se os cálculos, obtém-se um resultado igual a $-2,5$ MW, o que demonstra um déficit de utilidades frias. Conclui-se que as correntes quentes possuem um excesso de calor. Os gastos totais com utilidades são os seguintes:

- Utilidades frias: 61,5 MW, para suprir as correntes quentes;
- Utilidades quentes: 59 MW, para suprir as correntes frias.

Estas são as quantidades máximas de calor se não fosse requerida uma análise de integração energética no processo. Para o cálculo das quantidades mínimas de utilidades quentes e frias necessárias, a análise *Pinch* dispõe de duas ferramentas: os métodos gráficos (diagrama de temperatura versus entalpia, curvas compostas e grande curva composta) e o método analítico (*Problem Table* ou Tabela Problema). Este será o primeiro a ser apresentado neste trabalho, os métodos gráficos serão vistos na sequência.

3.3 O método algébrico: *Problem Table* (Tabela Problema)

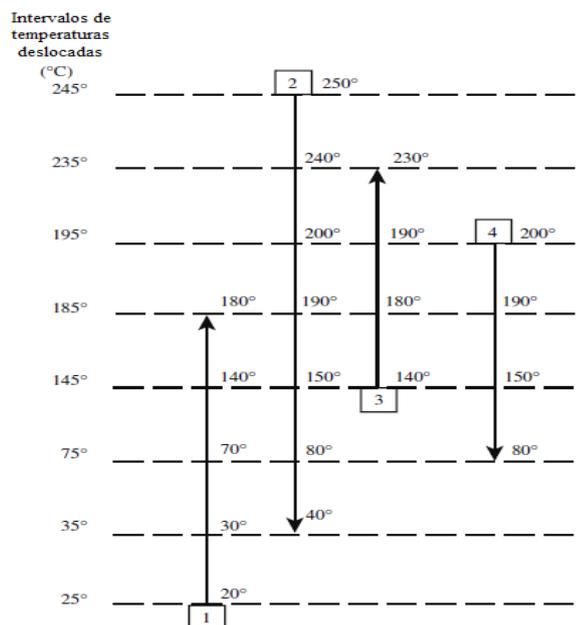
A Tabela Problema é uma técnica algébrica da tecnologia *Pinch*, que fornece a quantidade mínima de energia que será necessária para as utilidades quentes e frias do processo (LINNHOFF e FLOWER, 1978). Primeiramente, o problema é dividido em intervalos de temperatura (formados pelas temperaturas de entrada e saída de cada corrente de processo), nos quais serão feitos balanços de entalpia para garantir o máximo de troca térmica possível em cada intervalo.

No entanto, para certificar que a integração energética seja termodinamicamente possível, é necessário que haja uma diferença de temperatura entre as correntes que seja diferente de zero (ΔT_{\min}). Isto é garantido através da utilização de *shifted temperatures* (temperaturas deslocadas), ou seja, deve ocorrer uma diminuição de $\frac{1}{2}\Delta T_{\min}$ nas temperaturas das correntes quentes e um aumento de $\frac{1}{2}\Delta T_{\min}$ nas temperaturas das correntes frias. A Figura 3.3 exemplifica o procedimento descrito.

Esta configuração de temperaturas garante a possibilidade de transferência de calor dentro de qualquer um dos intervalos. Por conseguinte, cada intervalo terá ou um déficit ou um superávit de carga térmica, mas nunca os dois ao mesmo tempo. Os balanços de entalpia para cada intervalo i podem ser calculados de acordo com a Equação 3.3.

$$\Delta H_i = (S_i - S_{i+1}) \left(\sum_1^n CP_{\text{correntes quentes}} - \sum_1^n CP_{\text{correntes frias}} \right) \quad (3.3)$$

Figura 3.3 – Diagrama de intervalos de temperatura para o exemplo em questão.



Fonte: Adaptado de Smith (2005, p.367).

Figura 3.4 – População de correntes em cada intervalo de temperatura.

Intervalo de Temperatura (°C)	População de Correntes	$\Delta T_{Intervalo}$ (°C)	$\sum CP_C - \sum CP_H$ MW·K ⁻¹	$\Delta H_{Intervalo}$ (MW)	Superávit / Déficit
245	2				
235		10	-0.15	-1.5	Superávit
195	4	40	0.15	6.0	Déficit
185		10	-0.1	-1.0	Superávit
145	3	40	0.1	4.0	Déficit
75		70	-0.2	-14.0	Superávit
35		40	0.05	2.0	Déficit
25	1	10	0.2	2.0	Déficit

Fonte: Adaptado de Smith (2005, p.367).

Ainda sobre a Equação 3.3, tem-se:

S_i = temperatura deslocada da corrente i , em °C;

ΔH_i = carga calorífica da corrente i , em MW;

CP = capacidade calorífica de cada corrente, em MW/K.

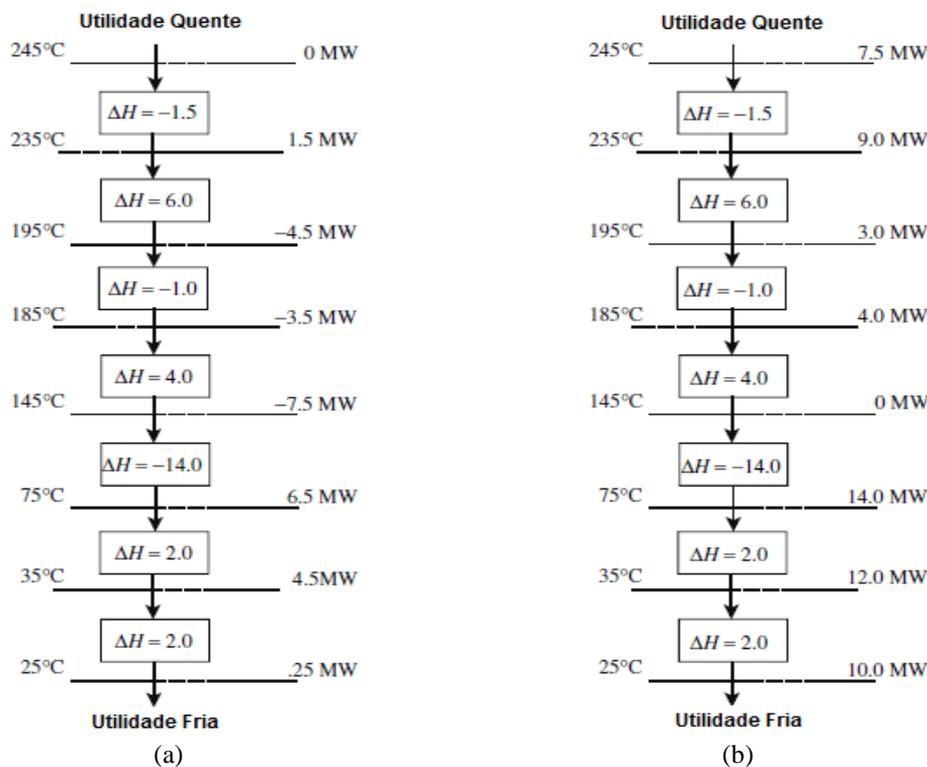
A Figura 3.4 mostra os resultados da aplicação da Equação 3.3 a cada intervalo de temperatura. Observa-se que, para cada intervalo, há um déficit ou superávit de calor. Uma rede de trocadores viável poderia ser proposta baseada no pressuposto de que todos os intervalos que possuem um superávit de calor cedessem o mesmo para utilidades frias, e todos os intervalos de déficit adquirissem calor de utilidades quentes. No entanto, isto não seria uma ideia sensata, porque envolveria ceder e adquirir calor a temperaturas inapropriadas (KEMP, 2007).

Para resolver este problema, é necessário explorar outra característica dos intervalos de temperatura. Para garantir a possibilidade de troca térmica sem ferir os conceitos termodinâmicos, é preciso iniciar a análise do primeiro intervalo, compreendido entre as maiores temperaturas. Nota-se que há um superávit de calor de 1,5 MW, que poderia ser cedido para uma utilidade fria. Porém, ao invés de ter este gasto a mais com utilidades, este calor pode ser cedido para o intervalo seguinte. Logo, através deste procedimento, há uma transferência de calor em *cascata*, como é mostrado na Figura 3.5. Portanto, pode-se concluir que *qualquer quantidade de calor disponível no intervalo i é suficientemente quente para fornecer calor ao intervalo $i+1$* (KEMP, 2007).

Partindo então do primeiro intervalo (assumindo previamente que nenhum calor seja fornecido externamente), este cede 1,5 MW para o segundo, que precisaria de 6,0 MW para compensar o déficit de calor. Tem-se no processo, portanto, um déficit de 4,5 MW do segundo para o terceiro intervalo. Este, por sua vez, possui um superávit de energia igual a 1,0 MW, diminuindo o déficit de calor do processo de 4,5 MW para 3,5 MW, do terceiro para o quarto intervalo. O procedimento em *cascata* é o mesmo até o término dos intervalos, cujos resultados a serem obtidos são apresentados na Figura 3.5, onde a variável ΔH_i é medida em MW.

Figura 3.5 – Diagramas em cascata.

(a) Inviável; (b) Viável.



Fonte: Adaptado de Smith (2005, p.368).

Observando a Figura 3.5a, nota-se que os valores de algumas cargas térmicas são negativos, o que é inviável. Para tornar o procedimento em cascata viável, deve ser adicionado calor até que a quantidade de calor transferida entre os intervalos seja no mínimo igual a zero. O menor valor de quantidade de calor necessário para que isto ocorra é igual à maior quantidade de carga térmica da Figura 3.5a, ou seja, 7,5 MW, que será o valor da mínima quantidade de calor que deverá ser fornecida por utilidades quentes ao primeiro intervalo (SMITH, 2005).

A Figura 3.5b mostra os novos valores do procedimento em cascata após a adição de 7,5 MW de utilidade quente no primeiro intervalo. É observado que, na temperatura deslocada de 145°C, não há transferência de calor. Este é o chamado ponto de estrangulamento energético (PEE) ou ponto *Pinch*. O valor de 10,0 MW no final da cascata representa a mínima quantidade de utilidade fria para o processo.

Portanto, a Tabela Problema mostra ser uma ferramenta muito eficiente para solucionar o cálculo das mínimas quantidades de utilidades necessárias a um processo, além de colocar em evidência também a temperatura *Pinch*. Este método pode ser implementado manualmente, no entanto, a complexidade do problema pode prejudicar o projetista, principalmente referente ao tempo para resolução. Logo, é aconselhável a utilização de *softwares* que fornecem a Tabela Problema automaticamente, como o programa desenvolvido neste trabalho.

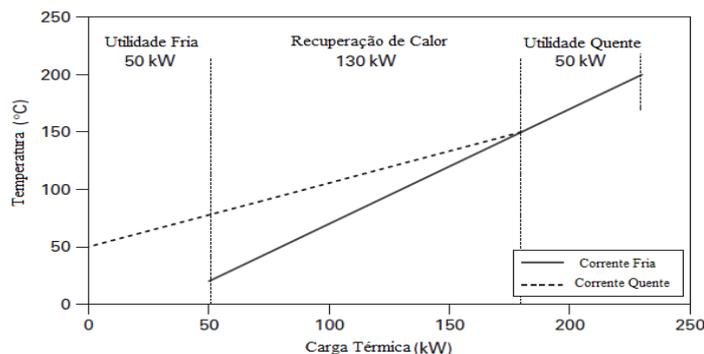
Outro método através do qual podem ser obtidas as quantidades mínimas para aquecimento e resfriamento do processo são os diagramas de temperatura *versus* entalpia, que levarão à construção das curvas compostas e, finalmente, da grande curva composta. Este procedimento será apresentado na próxima seção.

3.4 Os métodos gráficos

3.4.1 Diagrama de temperatura versus entalpia

Para ilustrar a relação entre temperatura e entalpia das correntes quentes e frias de um processo, considerou-se, primeiramente, um problema simples, cujos dados estão representados na Tabela 3.1. Um diagrama de temperatura *versus* entalpia é um método muito útil de visualização da quantidade de calor disponível para troca térmica entre as correntes envolvidas.

Figura 3.6 – Diagrama de temperatura versus entalpia referente aos dados da Tabela 3.1.



Fonte: Adaptado de Kemp (2007, p.17).

Primeiramente, considera-se a Figura 3.6. Trata-se do diagrama para o processo da Tabela 3.1, com uma diferença de temperatura igual a zero entre as correntes. Para a construção do diagrama, é preciso calcular a quantidade de calor presente em cada corrente. Este resultado é fornecido pela Equação 3.4. Já a inclinação da reta é representada através da Equação 3.5. Assumindo um CP constante, com estes dois resultados, é possível construir diagramas a fim de obter as quantidades de energia relevantes ao problema para valores distintos de diferença de temperatura entre as correntes, começando, então, o processo para obtenção da rede de MER (Máxima Recuperação Energética).

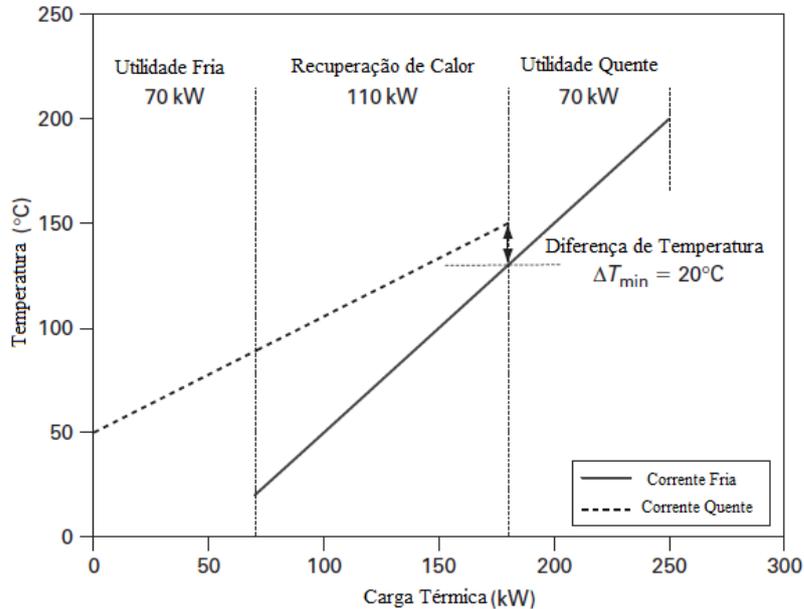
$$Q = \int_{T_S}^{T_E} CP dT = CP(T_S - T_E) = \Delta H \quad (3.4)$$

$$\frac{dT}{dQ} = \frac{1}{CP} \quad (3.5)$$

Ainda analisando a Figura 3.6, nota-se que a corrente fria, representada pela linha cheia, não pode ser movida mais para a direita, representando um caso limite para este problema. As cargas térmicas de utilidades e recuperação de calor mostradas seriam, então, as menores e maiores possíveis, respectivamente. Ou seja, seriam recuperados 130 kW e a demanda de utilidades quentes e frias seria igual a 100 kW no total. No entanto, não é uma situação viável, visto que a diferença mínima de temperatura entre as correntes não pode ser zero, pois isto implicaria um trocador de calor de área infinita.

Portanto, para resolver este problema, é preciso realizar uma movimentação das curvas, para que a diferença de temperatura entre as mesmas seja diferente de zero (Figura 3.7)). O ΔT_{min} entre as correntes agora é igual a 20 °C. O efeito da movimentação da curva que representa as correntes frias resultou em um aumento de utilidades quentes e frias de 20 kW, de forma que, neste caso, 110 kW poderiam ser recuperados entre as correntes (KEMP, 2007). A partir destes resultados, conclui-se que, quanto maior a diferença de temperatura entre as correntes, menor será a quantidade de calor que poderá ser recuperada entre as mesmas.

Figura 3.7 – Diagrama de temperatura versus entalpia com $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Duas conclusões importantes podem ser tiradas através destas observações:

- A escolha do ΔT_{\min} implicará em uma **meta energética** a ser seguida pelo projetista, pois está ligada com a quantidade total de utilidades que podem ser requeridas pelo sistema. Portanto, é necessário fazê-la com cautela, levando em consideração qual é o objetivo principal que se quer atingir com a análise de integração energética;
- Outro aspecto importante a ser observado é que, se a quantidade de utilidade quente é aumentada em β unidades, a quantidade de utilidades frias será aumentada também em β unidades, o que pode ser melhor explicado comparando-se as Figuras 3.6 e 3.7. Nota-se que, após a inserção de um ΔT_{\min} , o consumo de utilidades quentes e frias (que antes era igual a 50 kW para ambas), aumentou em 20 kW para ambas utilidades, sendo agora necessária uma quantidade de energia igual a 70 kW para suprir cada uma das utilidades. Esta observação será de grande valia na parte de otimização da rede de trocadores de calor, uma das últimas etapas de resolução do problema.

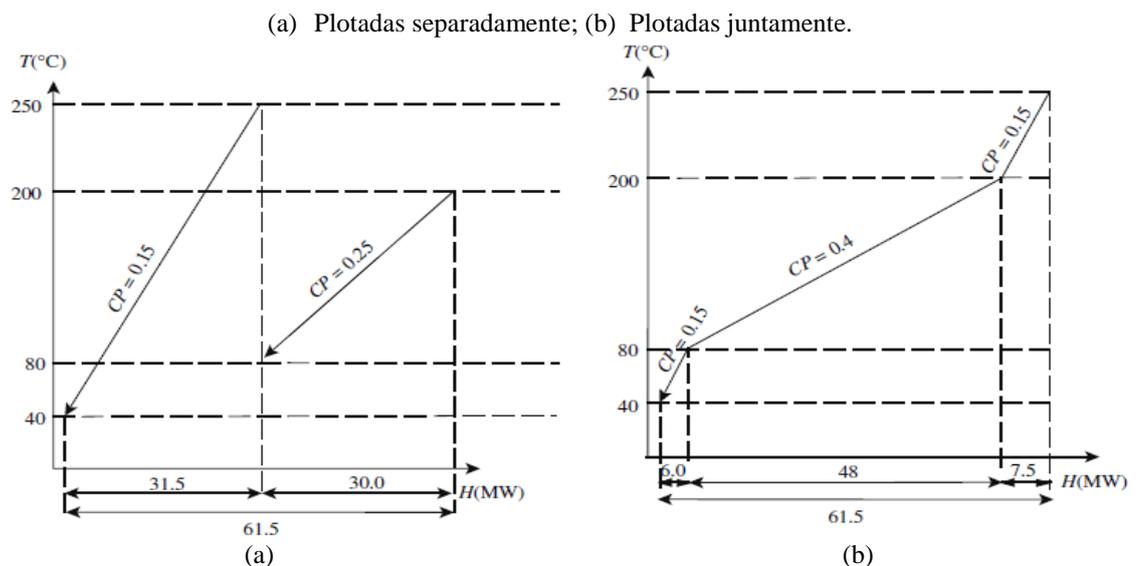
O diagrama temperatura *versus* entalpia pode ser utilizado apenas para analisar duas correntes de processo, uma quente e uma fria. Quando o processo possuir um número maior de correntes, um método gráfico específico é utilizado para análise das quantidades mínimas

de utilidades e máximas de troca térmica entre as correntes. São as chamadas *curvas compostas*.

3.4.2 Curvas compostas

Os dados utilizados para exemplificar o processo de construção das curvas compostas estão representados na Tabela 3.2. Observando-se o gráfico da Figura 3.8a, é possível identificar o comportamento das duas correntes quentes do processo, plotadas separadamente. O objetivo da curva composta é promover uma visão geral do processo através da junção destes comportamentos e representar as curvas de todas as correntes quentes (ou frias) do processo de forma conjunta, como na Figura 3.8b, onde a variável CP é medida em MW/K.

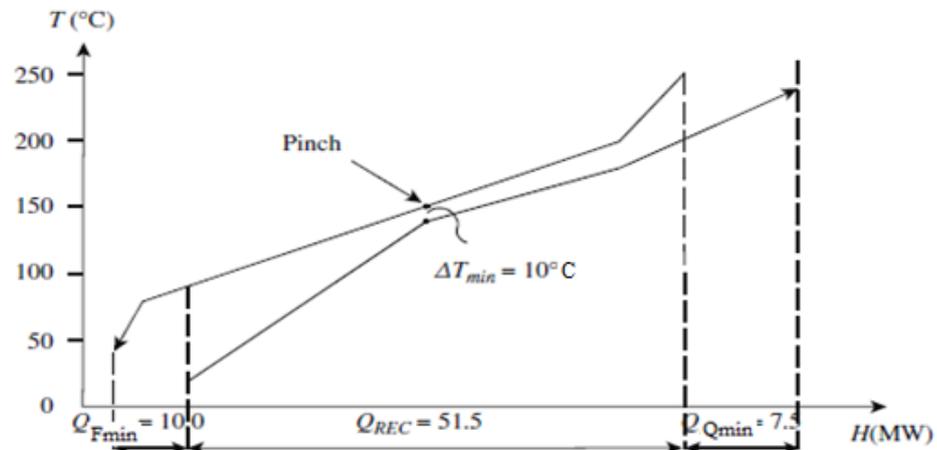
Figura 3.8 – Curvas compostas referentes às correntes quentes.



Fonte: Smith (2005, p.359).

O procedimento para se obter o gráfico da Figura 3.8b é simples. Basta somar os CP de todas as correntes presentes em cada intervalo. Desta forma, é possível obter também a carga térmica para cada intervalo de temperatura, possibilitando uma análise do processo como um todo. A curva composta quente representa apenas uma corrente que é equivalente à soma de todas as correntes quentes presentes no processo em termos de temperatura e entalpia (SMITH, 2005). A curva composta fria é obtida de maneira análoga. Nesta etapa da análise, é possível plotar as duas curvas compostas (quente e fria) em um só gráfico, como mostra a Figura 3.9.

Figura 3.9 – Curvas compostas quentes e frias do processo.



Fonte: Adaptado de Smith (2005, p.360).

O ΔT_{\min} pode ocorrer em qualquer região entre as curvas, não apenas em uma das extremidades. É importante ressaltar também que, para cada ΔT_{\min} , existe uma quantidade máxima de energia que pode ser recuperada entre as correntes e uma quantidade mínima de energia requerida por utilidades. Porém, geralmente, apesar de se ter muitos pontos de maior aproximação entre as curvas, a diferença mínima de temperatura ocorre apenas em um ponto de maior proximidade, o chamado ponto de estrangulamento energético (PEE) ou ponto *Pinch*. A importância prática deste será tratada com mais profundidade na seção 3.5 deste Capítulo. Por hora, é necessário ter em mente que os trocadores de calor que operam nas temperaturas *Pinch* devem operar com a diferença mínima de temperatura previamente estabelecida, de modo a garantir a MER.

Estabelecidas as curvas compostas de cada tipo de corrente, é possível também agrupá-las de modo a obter uma só curva, que também revelará o ponto *Pinch*, as quantidades mínimas de utilidades quentes e frias e a máxima recuperação energética entre as correntes, de acordo com o ΔT_{\min} escolhido. Esta curva possui grande importância e é conhecida por *grande curva composta*.

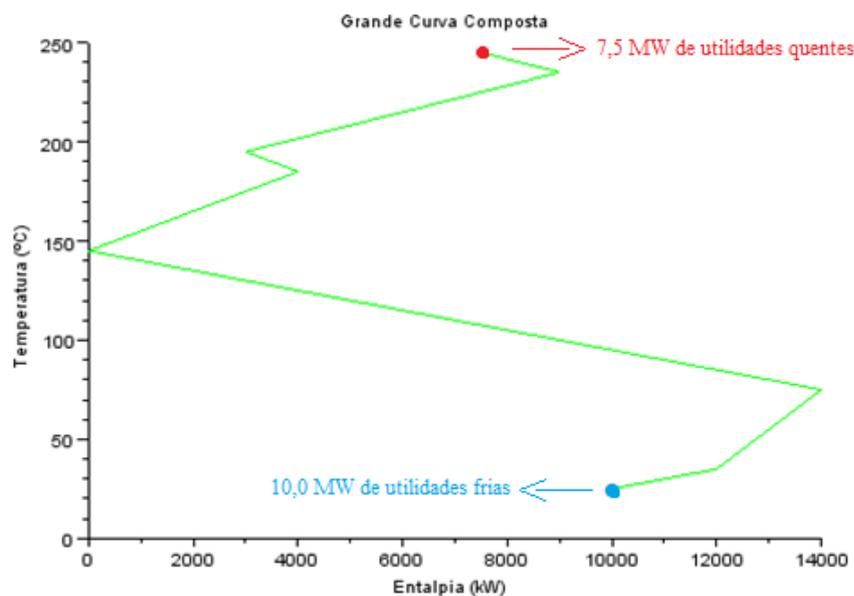
3.4.3 Grande curva composta (GCC)

A grande curva composta (GCC) é a curva de temperaturas deslocadas (*shifted temperatures*) versus o requerimento de utilidades. Analisando-a, o projetista pode observar a diferença entre o calor disponível nas correntes quentes e o calor requerido pelas correntes frias em relação ao ponto *Pinch* a uma dada temperatura deslocada. Em suma, trata-se de uma

representação gráfica da Tabela Problema (*Problem Table*). A Figura 3.10 mostra a GCC do exemplo em questão.

Porém, ademais de fornecer a quantidade de calor requerida pelo processo, a GCC também indica a quais temperaturas essas quantidades são necessárias. O ponto *Pinch* também pode ser facilmente localizado, ou seja, onde a GCC toca o eixo vertical, indicando que não há calor requerido àquela temperatura.

Figura 3.10 – Curva composta para o exemplo da Tabela 3.2 para um $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Portanto, até então, pode-se concluir que a escolha de **metas energéticas** é de fundamental importância para a tecnologia *Pinch*, pois se trata de cálculos base para a continuação da análise. Logo, a Tabela Problema, as curvas compostas e a GCC são ferramentas essenciais para este método. Portanto, o entendimento do funcionamento e construção de cada uma delas é de extrema importância para o projetista. Além disso, é necessário também que seja entendido o real significado do ponto de estrangulamento energético, um dos focos principais deste tipo de análise de integração energética.

3.5 O significado do ponto Pinch

Já foi observado que, dada uma diferença mínima de temperatura entre as correntes, é possível fixar metas energéticas para um processo. O valor do ΔT_{\min} e sua localização entre as curvas compostas possuem importantes implicações para o projeto da rede de trocadores de

calor. Geralmente, esta diferença de temperatura é observada em um ponto entre as curvas compostas quente e fria, o chamado ponto *Pinch* (SMITH, 2005).

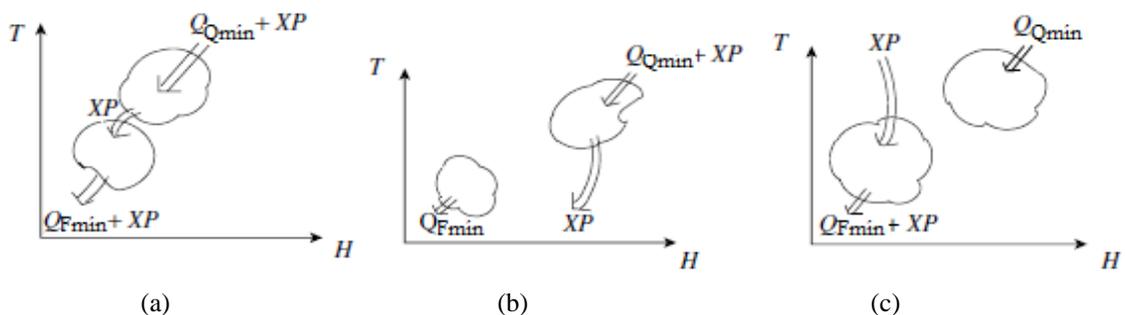
A partir deste ponto, é possível dividir o problema em duas partes: acima e abaixo do ponto *Pinch*, em termos de temperatura (Figura 3.11a). As temperaturas acima do *Pinch*, o processo funciona como um sumidouro de calor, visto que calor é apenas recebido e só pode haver utilidades quentes. Por outro lado, a temperaturas abaixo da temperatura *Pinch*, o processo funciona como fonte de calor, doando todo o calor que não pôde ser transferido pelos trocadores a uma utilidade fria.

Há possibilidade de transferência de calor entre essas duas partes? A Figura 3.11b mostra que é possível, pois a temperatura *Pinch* referente às correntes quentes da Tabela 3.1 é igual a 150 °C, e às frias, 140 °C. Transferir calor entre os sistemas significa que as correntes quentes doarão calor a temperaturas maiores ou iguais a 150 °C para correntes frias cujas temperaturas serão menores ou iguais a 140 °C. Até então, não há problemas e a situação é viável.

Por outro lado, pensando na mesma situação a temperaturas abaixo do ponto *Pinch*, vê-se que a situação não pode ocorrer (Figura 3.11c). Isto se deve ao fato de que, correntes quentes a temperaturas menores que 150 °C teriam que doar calor a correntes frias com temperaturas maiores que 140 °C, o que é termodinamicamente impossível (se não houver violação da diferença mínima de temperatura).

Figura 3.11 – Transferências de calor.

(a) Através do *pinch*; (b) Utilidade fria acima do *pinch*; (c) Utilidade quente abaixo do *pinch*.



Fonte: Adaptado de Smith (2005, p.362).

Outros efeitos análogos podem ocorrer se houver o uso inadequado de utilidades. As utilidades são apenas necessárias quando o balanço energético em cada uma das partes do processo não fechar. Deste modo, não é aconselhável que se use, por exemplo, utilidades

quentes abaixo do ponto *Pinch*, pois acarretaria a necessidade de uma quantidade ainda maior de energia para que o sistema esteja balanceado termicamente.

Em vista dos fatos apresentados, uma boa hipótese a ser considerada na síntese de redes de trocadores de calor é assumir que nenhum trocador tenha uma diferença de temperatura menor que o ΔT_{min} entre as curvas compostas. Além disto, o projetista deve ter em mente as “três regras de ouro” para atingir um projeto com o consumo mínimo de energia com utilidades (KEMP, 2007):

- Não transferir calor através do ponto *Pinch*;
- Não usar utilidades frias em temperaturas acima do ponto *Pinch*;
- Não usar utilidades quentes em temperaturas abaixo do ponto *Pinch*.

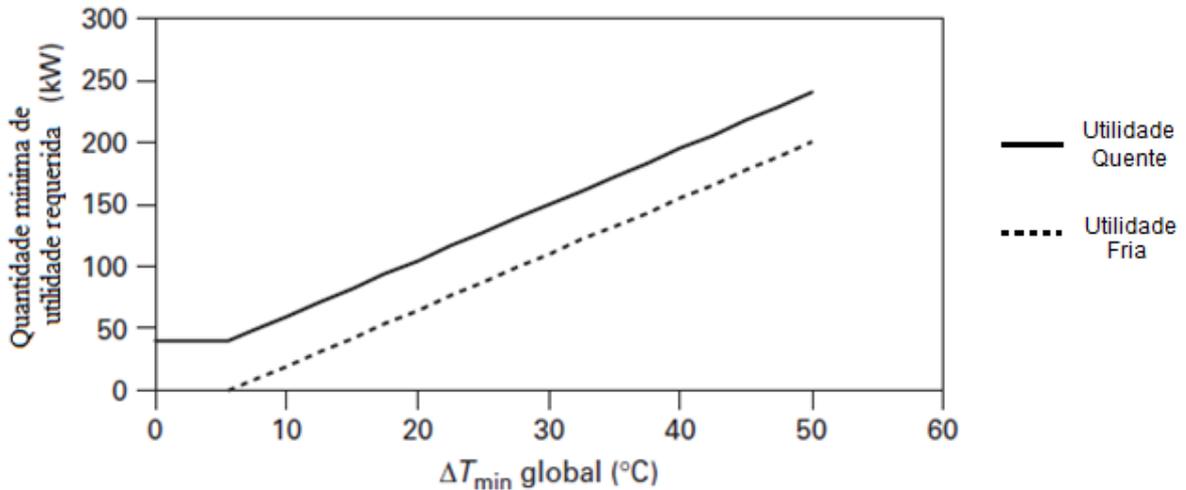
Estas regras são necessárias e suficientes para garantir que as metas energéticas serão atingidas. Porém, nem todos os problemas de integração energética possuem um ponto *Pinch* que os dividem em duas partes. Estes casos são chamados de *problemas limiaries*.

3.6 Problemas limiaries

Como já foi afirmado anteriormente, o ponto *Pinch* não ocorre em todos os problemas de redes de trocadores de calor. Alguns problemas não apresentam o ponto até que suas diferenças mínimas de temperatura sejam aumentadas ou diminuídas a uma temperatura limiar.

Em vários processos químicos, utilidades quentes e frias sempre são necessárias. Por exemplo, considera-se o gráfico representado na Figura 3.12. Mesmo que o ΔT_{min} fosse reduzido a zero (acarretando um valor infinito de capital), a necessidade de ambas as utilidades continuaria. No entanto, isto não ocorre em todos os problemas. A Figura 3.12 mostra que, conforme a diferença mínima de temperatura é reduzida, é atingido um ponto no qual não há necessidade de utilidade quente. Para todos os valores menores que este ΔT_{min} , é necessário apenas um valor constante de utilidade fria. O valor de ΔT_{min} a partir do qual um dos tipos de utilidade não é mais necessário é chamado $\Delta T_{threshold}$ ou ΔT_{limiar} . Se houver um deslocamento no qual as curvas compostas se aproximem ainda mais, reduzindo, então, a diferença mínima de temperatura, isto não ocasionará uma mudança nas quantidades de utilidades. Esta é a característica marcante dos problemas limiaries (KEMP, 2007).

Figura 3.12 – Exemplo de gráfico de energia versus ΔT_{min} .



Fonte: Adaptado de Kemp (2007, p.54).

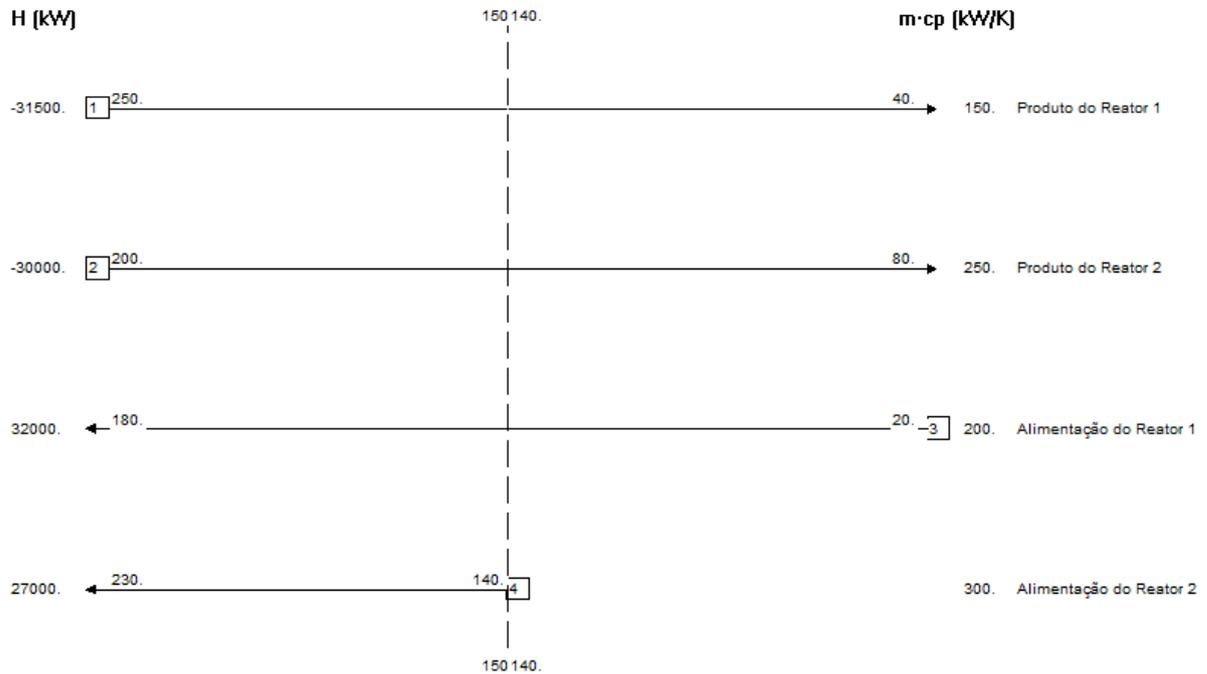
Há vários casos especiais de problemas relacionados ao ponto *Pinch*, como os problemas limiares. No entanto, este capítulo se atentará apenas aos problemas nos quais há apenas um ponto *Pinch*, visto que a síntese de rede de trocadores de calor através da análise *Pinch* segue praticamente as mesmas regras para diversos tipos de problemas de integração energética. Como se trata de um problema de otimização, o projetista deve ter em mente que há várias soluções possíveis para o problema, e caberá a ele decidir qual a melhor forma de aplicar a metodologia à sua rede. A junção do bom entendimento dos conceitos da análise *Pinch* e da intuição do projetista possibilita, então, que seja iniciada a síntese de redes de trocadores de calor.

3.7 Projeto de redes de trocadores de calor

Após estabelecer as metas energéticas do processo, pode-se iniciar o processo de construção da rede. A representação para correntes de processo mais utilizada é o *diagrama de grade*, apresentado na Figura 3.13. Através dele, é possível identificar todas as correntes do processo e ter uma visão geral do mesmo.

No diagrama de grade, as correntes são representadas por linhas horizontais, cujo sentido varia de acordo com o tipo de corrente (quentes: da esquerda para a direita; frias: da direita para a esquerda). Os trocadores de calor serão representados por circunferências interligadas por uma linha vertical, colocados nos pares de correntes que trocarão calor entre si.

Figura 3.13 – Diagrama de grade para o processo referente aos dados da Tabela 3.2.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Um projeto inicial poderia considerar suprir a entalpia de todas as correntes apenas com utilidades quentes e frias, de acordo com suas necessidades. No entanto, este projeto inicial não atenderia às metas energéticas previamente calculadas e acarretaria custos capitais e operacionais muito maiores. Logo, é preciso projetar a rede de máxima recuperação energética. Há a possibilidade de uma estimativa inicial do número de trocadores de calor para a rede de máxima recuperação energética? A resposta é afirmativa e o procedimento para alcançar este objetivo será mostrado a seguir.

3.7.1 Cálculo do número mínimo de trocadores de calor em uma RTC

Hohmann⁵ (*apud* FURMAND e SAHINIDIS, 2002) observou que o número mínimo de unidades de trocadores de calor era, geralmente, uma função do número de correntes e utilidades do processo, expresso pela Equação 3.6,

$$Un_{min} = N - 1 \quad (3.6)$$

onde:

Un_{min} = número mínimo de unidades de trocadores de calor em uma rede;

⁵ HOHMANN, E. C. **Optimum network for heat Exchange**. PhD Dissertation – University of Southern California, Los Angeles, CA, 1971.

N = número de correntes no processo.

No entanto, um pouco mais tarde, foi aplicado o teorema de Euler para a rede de trocadores, e o número mínimo de unidades passou a ser descrito pela Equação 3.7 (LINNHOFF *et al.*, 1982),

$$Un_{\min} = N + L - \dot{S} \quad (3.7)$$

onde:

N = número de correntes no processo;

L = número de loops energéticos presentes no processo;

\dot{S} = número de problemas independentes no processo.

Porém, é necessário cautela na aplicação da Equação 3.7, visto que nem sempre é válida, apenas fornece uma boa aproximação do número total de unidades térmicas do processo, ou seja, trocadores de calor, *heaters* e *coolers*.

3.7.2 Cálculo da área de uma rede de trocadores de calor

O algoritmo mais utilizado para prever a área total de uma rede de trocadores de calor é baseado em um método proposto por Townsend e Linnhoff ⁶ (*apud* SERNA e JIMÉNEZ, 2004), intitulado *Bath Formula*, que consiste em assumir que haja uma transferência de calor vertical entre as curvas compostas do processo, traçando uma linha vertical em todos os pontos nos quais as inclinações entre as mesmas se alterarem.

No entanto, foi descoberto mais tarde por Linnhoff e Ahmad (1990) que o método só é válido se o coeficiente de transferência de calor por convecção (ou coeficiente de película) for igual em todas as correntes de processo. Dito isto, o método fornece uma boa aproximação, porém não apresenta resultados ótimos, cabendo ao projetista realizar uma análise crítica dos mesmos.

3.7.3 Considerações importantes para projeto de RTC

A metodologia do ponto *Pinch* para projeto de redes de trocadores de calor conta com algumas regras básicas:

- **Primeiro passo:** dividir o problema no ponto *Pinch* e projetar cada parte separadamente;
- **Segundo passo:** começar o projeto a partir do *Pinch* e ir adiante;

⁶ TOWNSEND, D.W.; LINNHOFF, B. Surface area targets for heat exchangers networks. In: I. Chem. E. 11th Annual Res. Meeting, Bath, Reino Unido, 1984.

- **Terceiro passo:** imediatamente adjacente ao ponto *Pinch*, obedecer às restrições das Equações 3.8 (acima do *Pinch*) e 3.9 (abaixo do *Pinch*);

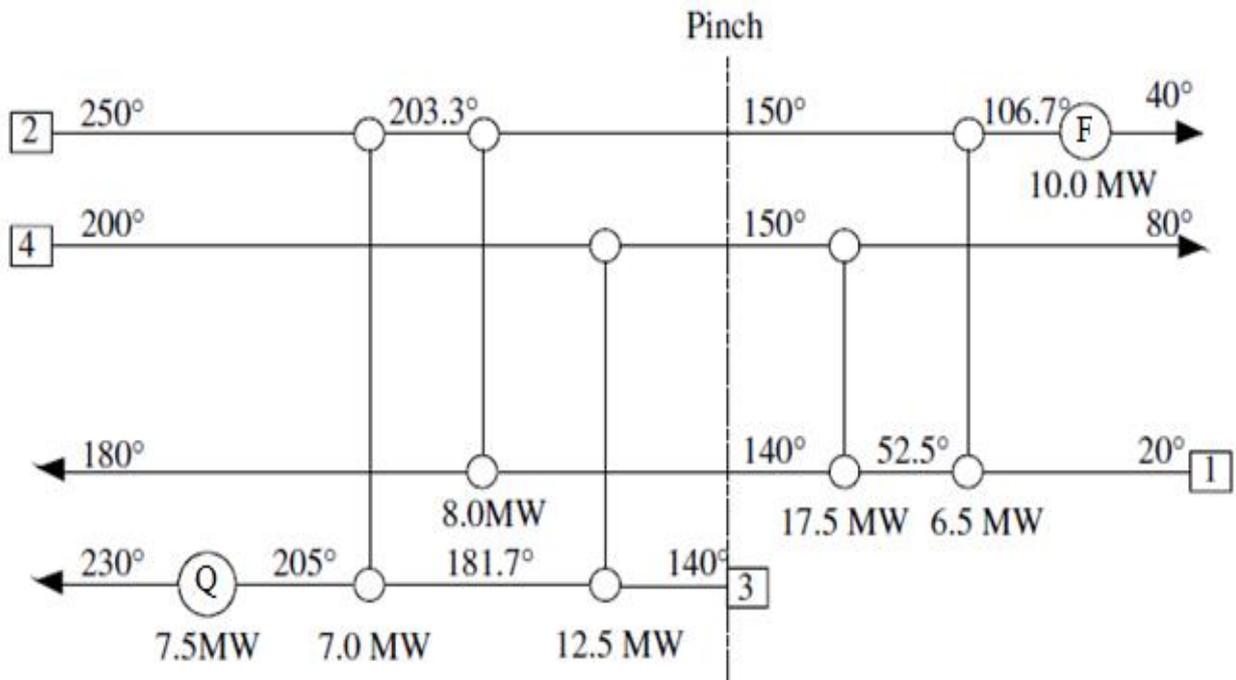
$$CP_{Quentes} \leq CP_{Frias} \quad (3.8)$$

$$CP_{Quentes} \geq CP_{Frias} \quad (3.9)$$

- **Quarto passo:** maximizar as cargas das trocas térmicas o máximo possível;
- **Quinto passo:** fornecer calor externo somente a temperaturas acima do *Pinch* e resfriamento externo apenas a temperaturas abaixo do *Pinch*.

Obedecendo a todos os passos citados anteriormente, a Figura 3.14 mostra a rede de maior recuperação energética para o exemplo da Tabela 3.2, com diferença mínima de temperatura igual a 10°C. As letras F e Q representam utilidades frias e quentes, respectivamente. Nota-se que foram necessários 10,0 MW de utilidades frias e 7,5 MW de utilidades quentes, valores que podem ser verificados no gráfico da grande curva composta da Figura 3.10. Além disso, cinco trocadores de calor foram utilizados, obtendo-se, então, uma das possíveis redes de mínimo consumo de utilidades.

Figura 3.14 – Rede que atinge as metas energéticas para o exemplo da Tabela 3.2.



Fonte: Adaptado de Smith (2005, p.363).

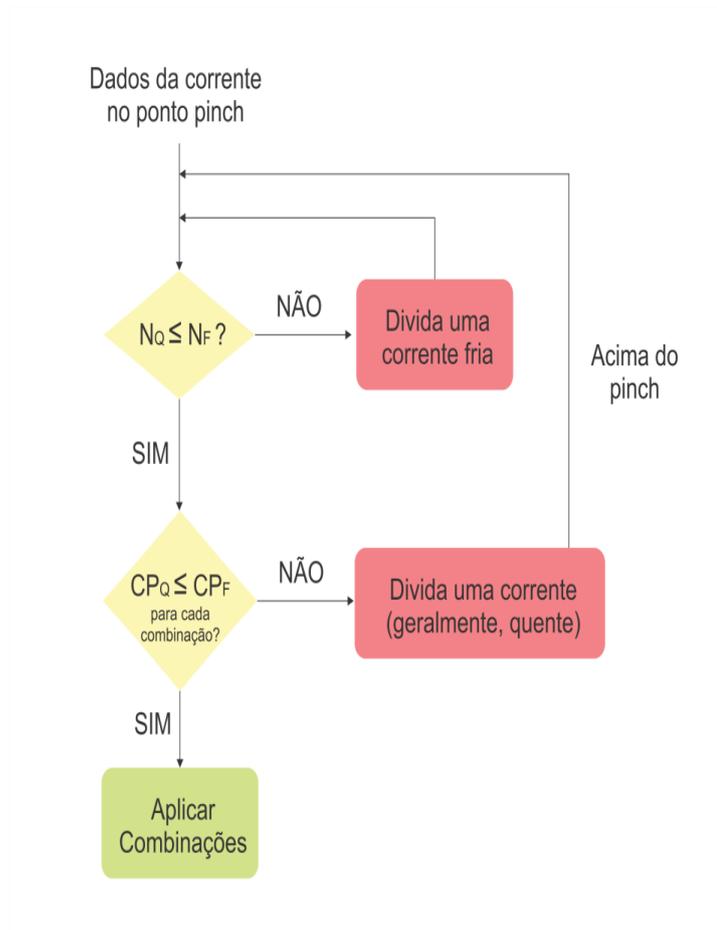
3.7.4 Alguns aspectos relevantes para otimização do projeto de RTC

Com o objetivo de otimizar a rede de máxima recuperação energética, às vezes é preciso lançar mão de algumas práticas usuais, como a divisão de correntes e a quebra de *loops* e caminhos energéticos (*paths*).

A divisão de correntes procura sempre obter a melhor combinação entre os trocadores de calor de uma rede, sempre respeitando a diferença mínima de temperatura estabelecida. Quando algum par de correntes não obedece às restrições impostas pelas Equações 3.8 e 3.9, é aconselhável que o projetista realize a divisão de correntes. O algoritmo utilizado para tal divisão difere em temperaturas acima e abaixo do *Pinch*. O método que deve ser realizado em cada uma destas partes do problema está ilustrado nas Figuras 3.15 e 3.16, nas quais N_Q e N_F representam o número de correntes quentes e frias do processo, respectivamente.

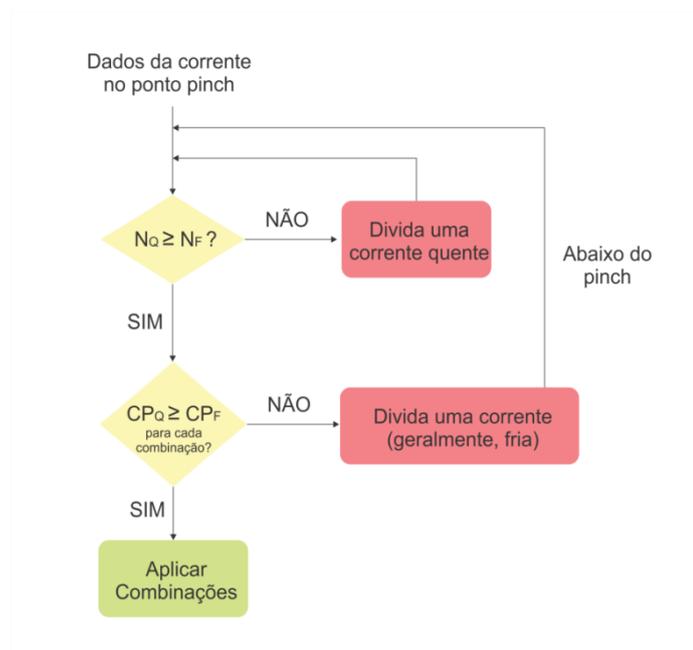
Um exemplo de divisão de correntes de modo a alcançar a rede de mínimo consumo de utilidades pode ser observado na Figura 3.17 gerada com base nos dados da Tabela 3.3.

Figura 3.15 – Algoritmo para divisão de correntes a temperaturas acima do ponto *Pinch*.



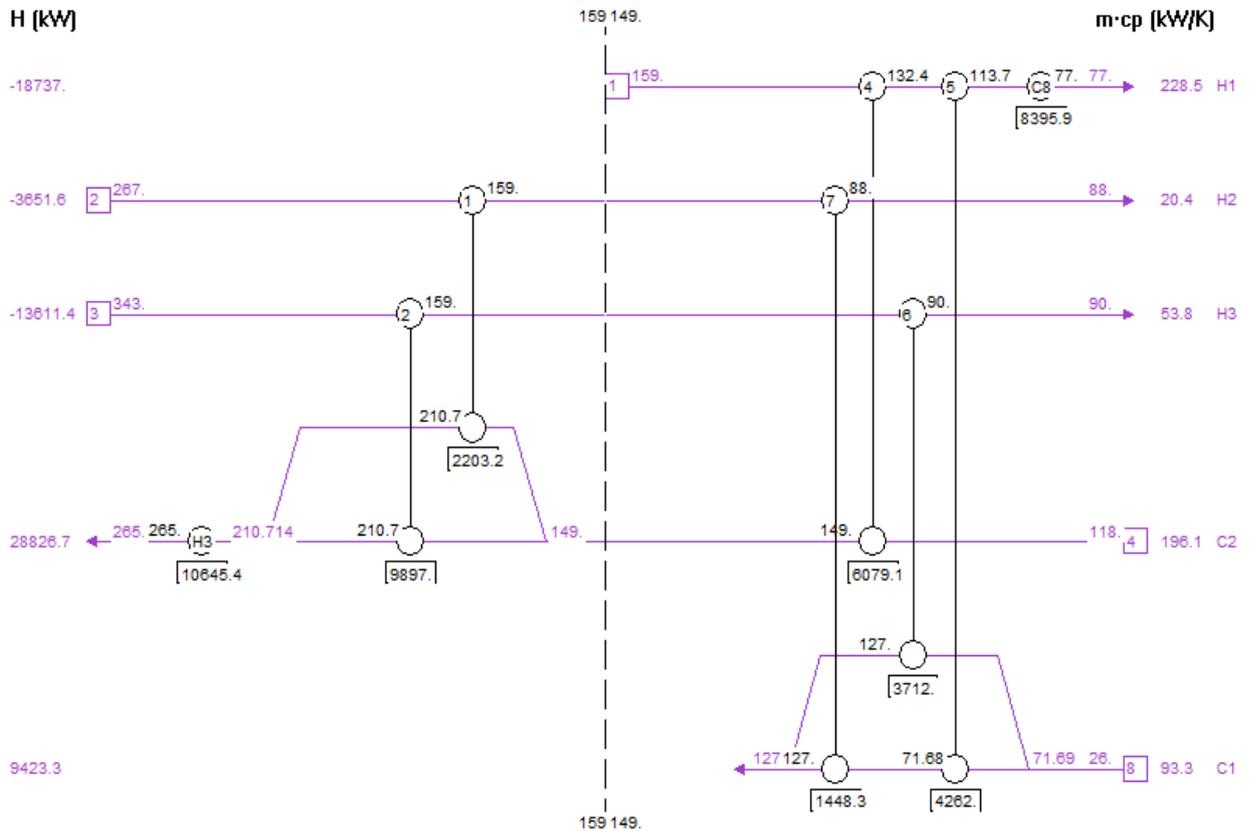
Fonte: Adaptado de Kemp (2007, p.111).

Figura 3.16 – Algoritmo para divisão de correntes a temperaturas abaixo do ponto *Pinch*.



Fonte: Adaptado de Kemp (2007, p.111).

Figura 3.17 – Rede de mínimo consumo energético, gerada com base nos dados da Tabela 3.3 ($\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$).



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Tabela 3.3 – Dados para geração da rede da Figura 3.17.

Corrente	Vazão da corrente (kg/s)	Calor específico (kJ/kg°C)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
H1	228,5	1,0	159,0	77,0
H2	20,4	1,0	267,0	88,0
H3	53,8	1,0	343,0	90,0
HU	----	1,0	500,0	499,0
C1	93,3	1,0	26,0	127,0
C2	196,1	1,0	118,0	265,0
CU	----	1,0	20,0	40,0

Fonte: Adaptado de Ciric e Floudas (1989).

A partir da Figura 3.17, pode-se observar que o número de correntes quentes a temperaturas acima do ponto *Pinch* era maior do que o número de correntes frias acima do *Pinch*. Logo, obedecendo-se ao algoritmo da Figura 3.15, ocorreu a divisão da corrente fria C1, tornando possível a troca de calor desta com as duas correntes quentes acima do *Pinch*. O

contrário ocorreu abaixo do ponto *Pinch*, no qual havia três correntes quentes e duas frias. No entanto, para este caso, apesar do número de correntes quentes ser maior, houve a necessidade de dividir uma corrente fria, para que fosse respeitada a Equação 3.9. Dessa maneira, foi possível obter como resultado uma rede de trocadores de calor com consumo mínimo de utilidades.

Outra técnica para otimizar as RTC é a quebra de *loops*. Estes podem ser definidos como conjuntos de interconexões energéticas dentro de uma rede de trocadores de calor. Inicia-se em um dos trocadores da rede e termina-se neste mesmo trocador, podendo ou não passar por alguma utilidade térmica. Quando há *loops* no processo, isso significa que há a presença de um trocador de calor extra no processo. Geralmente, algumas regras heurísticas são seguidas para a quebra de um *loop* (ASSIS, 2006):

- Quebrar o *loop* que contiver o trocador de menor carga térmica;
- Remover este trocador do processo;
- Caso este *loop* cruze o ponto *Pinch*, provavelmente haverá uma violação na diferença mínima de temperatura. Se isto ocorrer, há necessidade de revisão da rede usando caminhos energéticos (*paths*), que consistem em uma conexão entre resfriadores e aquecedores, usada para deslocar quantidade de energia. Este deslocamento se dá através da adição de calor por uma das utilidades e a consequente remoção do mesmo valor em outra, objetivando-se equilibrar termicamente a rede de trocadores de calor e suas utilidades.

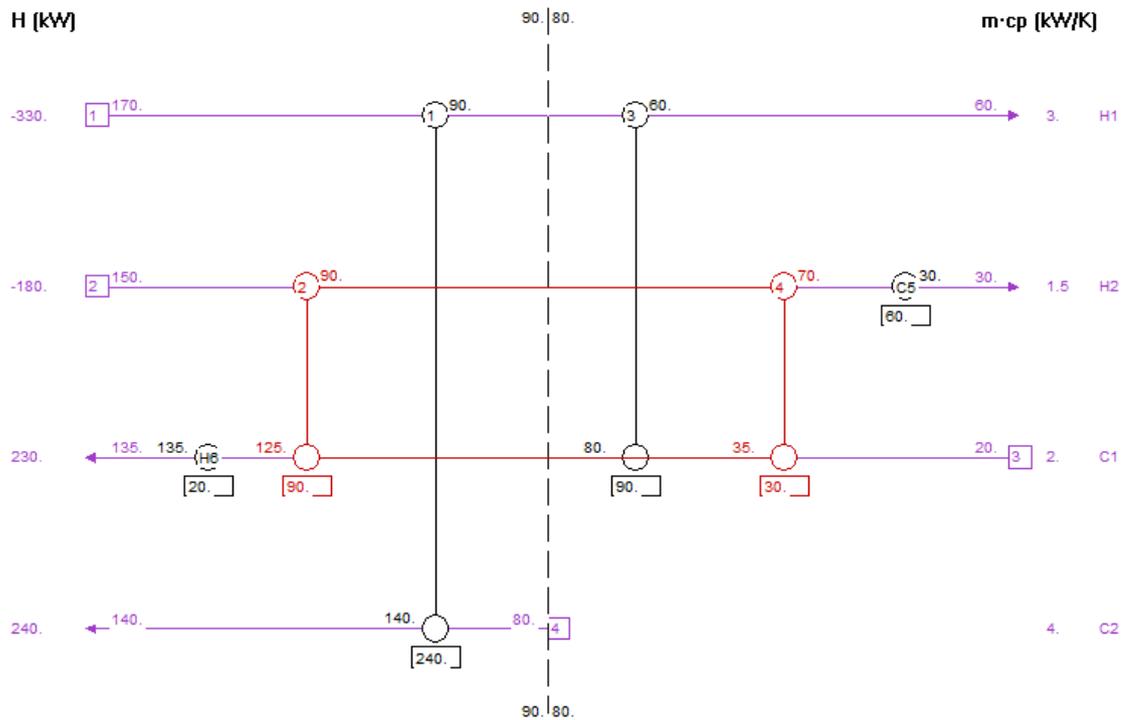
Observando-se os dados da Tabela 3.4, é possível obter uma rede de máxima recuperação energética como é mostrado na Figura 3.18.

Tabela 3.4 – Dados para geração da rede da Figura 3.18.

Corrente	Vazão da corrente (kg/s)	Calor específico (kJ/kgK)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
H1	3,0	1,0	170,0	60,0
H2	1,5	1,0	150,0	30,0
C1	2,0	1,0	20,0	135,0
C2	4,0	1,0	80,0	140,0

Fonte: Adaptado de Kemp (2007).

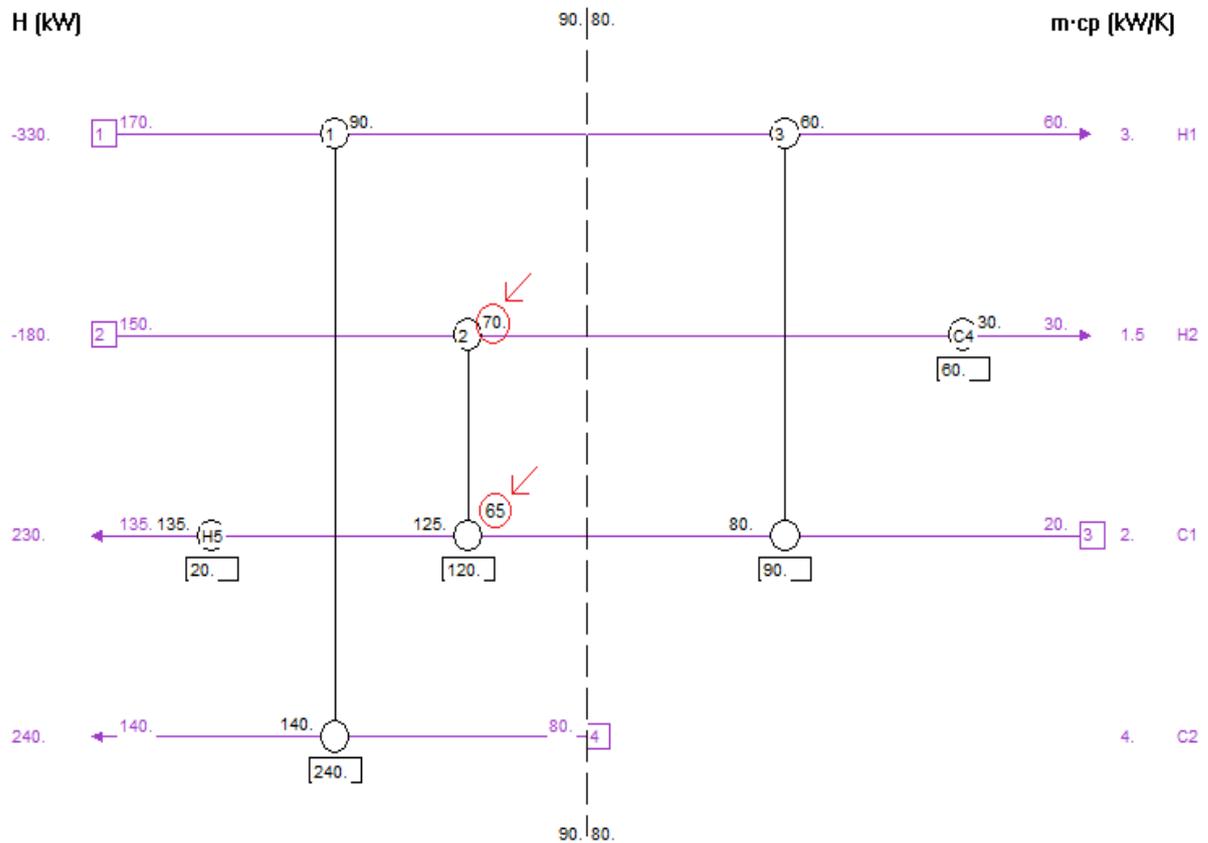
Figura 3.18 – Rede de mínimo consumo de utilidades proposta com os dados da Tabela 3.4.



Fonte: Adaptado de Kemp (2007).

Um *loop* presente na rede (destacado em vermelho) é identificado entre os trocadores de números 2 e 4, (Figura 3.18). Para eliminá-lo, é preciso escolher zerar a carga energética de um dos trocadores, passando-a para outro trocador presente no *loop*. O trocador de número 4 foi escolhido para ser eliminado, passando então 30 kW para o trocador 2, como é mostrado na Figura 3.19.

Figura 3.19 – Quebra de loop da rede e violação da diferença mínima de temperatura e também do ponto *Pinch*.

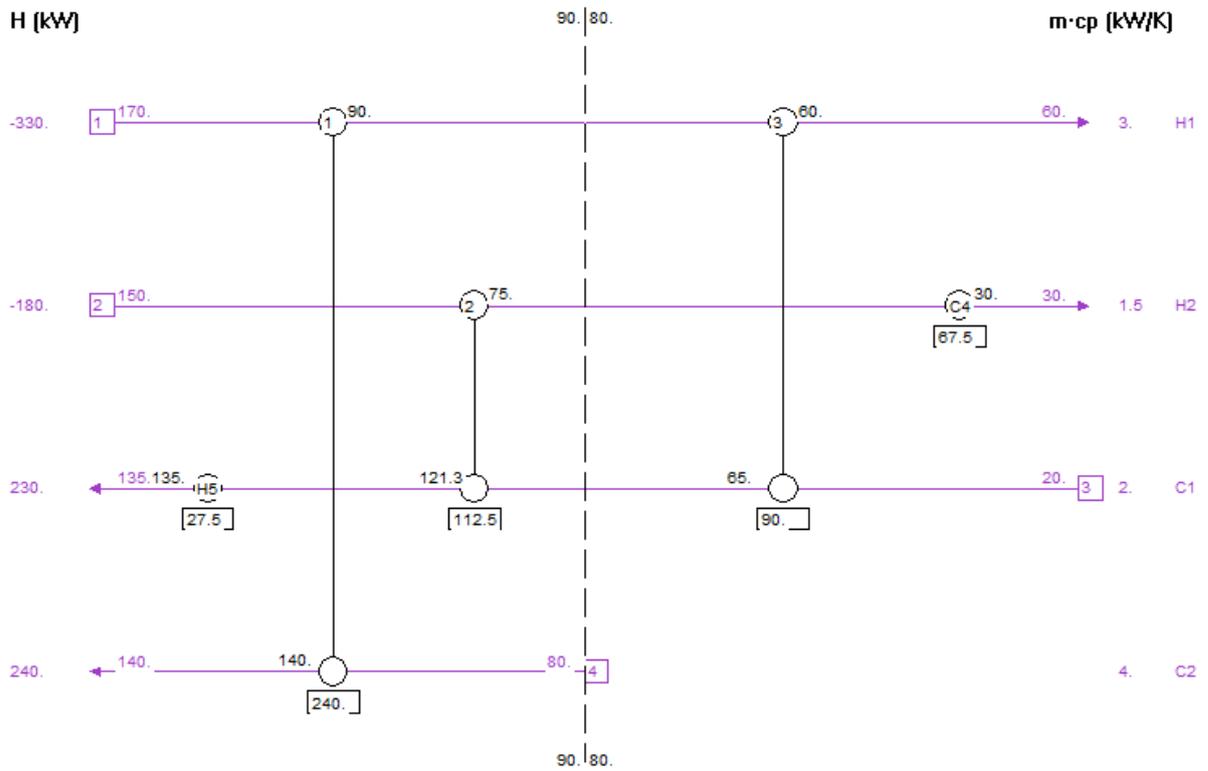


Fonte: Adaptado de Kemp (2007).

Ainda na Figura 3.19, observa-se que as temperaturas de entrada da corrente fria (65°C) e saída da corrente quente (70°C) do trocador número 2 foram alteradas, o que levou a uma violação do ΔT_{\min} entre as correntes H2 e C1, que deve ser restaurado. A temperatura de entrada da corrente quente sendo igual a 70°C e a de entrada da corrente fria sendo igual a 65°C provocaram as violações descritas neste parágrafo.

Então, como resolver mais este problema? A resposta está em explorar os caminhos energéticos da rede (*paths*). Através de balanços de entalpia entre o *heater* e o *cooler* presentes na rede, é possível restaurar a diferença mínima de temperatura e, dessa forma, eliminar completamente o *loop* sem violar os princípios da análise *Pinch*. Para tanto, foram cedidos 7,5 kW para cada utilidade. Deste modo, o ΔT_{\min} entre as correntes foi restaurado, resultado na rede mostrada na Figura 3.20, com 27,5 kW de utilidades quentes e 67,5 kW de utilidades frias (KEMP, 2007).

Figura 3.20 – Rede obtida após restauração da diferença mínima de temperatura.



Fonte: Adaptado de Kemp (2007).

Há ainda inúmeras formas de otimização e diminuição de unidades de trocadores de calor em uma rede. No entanto, este trabalho se atentará a fornecer apenas os principais conceitos relacionados à síntese de redes de trocadores de calor utilizando a análise *Pinch*.

CAPÍTULO 4. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA EM SCILAB®

Utilizando-se o *software* Scilab®, foi desenvolvido um programa computacional com o objetivo de gerar informações sobre a aplicação da metodologia *Pinch* de integração energética.

Baseado em dois algoritmos principais (KEMP, 2007), o programa fornece como resultado as curvas compostas quentes e frias do processo, a grande curva composta, o diagrama em cascata da Tabela Problema, a temperatura *Pinch* do processo e as quantidades mínimas de resfriamento e aquecimento necessárias ao problema.

Além disso, o programa proporciona também a localização de cada corrente no diagrama de grade do processo, possibilitando que o usuário compreenda melhor o problema e possa partir para as próximas etapas, dentre estas a síntese de uma rede de trocadores de calor.

Este capítulo visa apresentar todas as etapas de desenvolvimento do programa em Scilab®, desde a especificação das variáveis de entrada e a forma como podem ser inseridas até a obtenção dos resultados pretendidos.

4.1 Sobre o Scilab®

O Scilab® é um *software* livre e de código aberto, sendo amplamente utilizado como plataforma de cálculos científicos em geral. Proporciona um eficaz ambiente computacional para aplicações científicas e de engenharia. É compatível com GNU/Linux, Mac OS X e Windows XP/Vista/7 (deve-se atentar aos requisitos do sistema). Sua versão mais atual é a 5.4.0.

É um *software* completo e possibilita ao usuário ter acesso às mais diversas funções matemáticas, além de estruturas de dados avançadas e funções gráficas 2-D e 3-D. Também possui outras várias funcionalidades, como pacotes para cálculos de estatística, otimização de variáveis, sistemas de controle e orientação ao objeto (*Xcos*), dentre vários outros (SCILAB ENTERPRISES, 2013).

Por ser um *software* livre e possuir as mais diversas funcionalidades, o Scilab® foi escolhido como linguagem de programação para este trabalho. Utilizando o editor *Scinotes*, foi possível realizar a programação matemática do programa proposto, usufruindo sempre de funções matemáticas já programadas e prontas para uso do Scilab®, como a *gsort()* (função

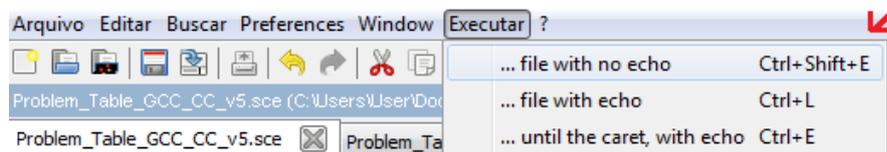
que organiza os dados de um vetor em ordem crescente ou decrescente, dependendo da sintaxe).

O Scilab® possibilita que o usuário insira dados de entrada das mais variadas maneiras. Neste trabalho, duas formas de inserção são possíveis. Uma delas é através do uso de janelas interativas, utilizando, principalmente, os comandos *x_dialog()* e *x_mdialog()*. A outra é através da leitura de dados inseridos no *software* Excel®, utilizando os comandos *xls_open()* e *xls_read()*. A seção 4.2 trata de forma mais abrangente como ocorre a inserção das variáveis de entrada pelo usuário.

4.2 Entrada de dados

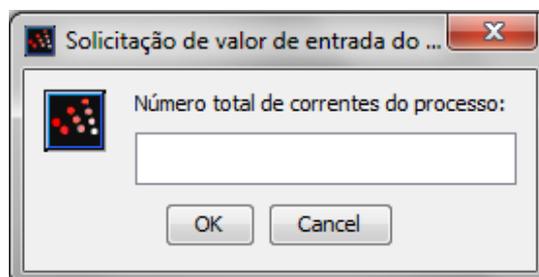
Antes de obter os resultados pretendidos, o usuário deve inserir as variáveis de entrada referentes ao problema em questão, o que pode ser feito de duas maneiras. A primeira delas é através de janelas interativas. Para tanto, basta que o usuário acione o comando *executar*, presente no menu do *Scinotes* (Figura 4.1), ou pressione as teclas de atalho *Ctrl + Shift + E*. Após o comando, surgirá na tela a primeira janela interativa, na qual o usuário deverá inserir o número total de correntes do processo (excetuando-se o número de utilidades), ou seja, a primeira variável de entrada (Figura 4.2).

Figura 4.1 – Comando de execução do editor *Scinotes*.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 4.2 – Caixa de diálogo interativa para inserção do número total de correntes do processo.



Fonte: Acervo pessoal.

Posteriormente, o usuário deve fornecer o número total de correntes quentes e frias e a diferença mínima de temperatura entre estas correntes (deve ser previamente escolhida pelo próprio usuário), preferencialmente na escala Celsius. Cabe ao projetista realizar a

transformação de unidades do problema para que este seja consistente, pois o programa não realiza esta transformação.

Os próximos dados de entrada estão relacionados às correntes quentes. É necessário inserir o nome da corrente, temperaturas de entrada e saída (ambas na escala Celsius), vazão mássica (kg/s) e calor específico (kJ/kg°C). Inseridos todos estes dados, parte-se, então, para os dados das correntes frias, cujas variáveis de entrada são análogas às de correntes quentes (Figura 4.3).

Figura 4.3 – Janela interativa para inserção de dados de correntes frias.

The image shows a standard Windows-style dialog box with a title bar that reads 'Solicitação de múltiplos valores do Scilab'. Inside the dialog, there is a small icon of a cluster of red and white dots. Below the icon, the text 'Dados para corrente fria:' is displayed. This is followed by five vertically stacked input fields, each with a label to its left: 'Nome', 'Temperatura de entrada(°C)', 'Temperatura de saída(°C)', 'Vazão mássica(kg/s)', and 'Calor específico(kJ/kg°C)'. At the bottom of the dialog, there are two buttons: 'OK' and 'Cancel'.

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

As caixas de diálogo interativas foram programadas através dos comandos `x_dialog()` e `x_mdialog()` do Scilab®. Os valores fornecidos pelo usuário foram transformados de *string* para valores numéricos com o comando `evstr()`. Os valores relacionados às correntes quentes e frias foram convertidos em vetores, o número total de correntes, diferença mínima de temperatura e número total de correntes quentes e frias, respectivamente, mantiveram seus valores escalares.

A outra forma de entrada de dados é através de uma planilha do *software* Excel®. A inserção dos dados para correntes quentes e frias deve ser feita separadamente, uma planilha para as quentes e outra para as frias. Primeiramente, o usuário deverá inserir na planilha os dados referentes às correntes quentes do processo da seguinte maneira: na primeira coluna da planilha, todas as temperaturas de entrada das correntes, começando pelas correntes quentes; na segunda coluna, todas as temperaturas de saída, seguindo a ordem de correntes da primeira coluna; na terceira, todos os valores de vazões mássicas; na quarta, todos os valores de calores específicos das correntes, sempre seguindo a ordem da primeira coluna. Após a inserção dos

valores, o usuário deverá salvar o arquivo e fechá-lo. O processo para os dados de correntes frias é análogo.

Uma vez inseridos no Excel[®] todos os valores acima citados, o usuário deverá abrir o editor *Scinotes* e indicar o local onde está salvo o arquivo de dados, digitando-o no espaço destacado na Figura 4.4 (para os dados de correntes quentes) e na Figura 4.5 (para os dados de correntes frias).

Figura 4.4 – Programação para leitura das variáveis de entrada através do Excel[®](correntes quentes).

```
//Entrada de dados
//Variáveis de entrada
//Decodificando o arquivo ole, extraindo e abrindo o fluxo de dados do Excel
[fd, SST, Sheetnames, Sheetpos] = xls_open('C:\Users\User\Documents\Pasta1.xls');
//Lendo a primeira folha de dados
[Value, TextInd] = xls_read(fd, Sheetpos(1));
n=1;
for m=1:ncq
    [TEQ(n)] = Value(m, 1);
    [TSQ(n)] = Value(m, 2);
    [vmq(n)] = Value(m, 3);
    [cpq(n)] = Value(m, 4);
    m=m+1;
    n=n+1;
end
//Fechando o fluxo da planilha
mclose(fd)
```

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 4.5 – Programação para leitura das variáveis de entrada através do Excel[®](correntes frias).

```
//Decodificando o arquivo ole, extraindo e abrindo o fluxo de dados do Excel
[fd, SST, Sheetnames, Sheetpos] = xls_open('C:\Users\User\Desktop\Arquivos para dissertação\Pasta2.xls');
//Lendo a primeira folha de dados
[Value, TextInd] = xls_read(fd, Sheetpos(1));
n=1;
for m=1:ncf
    [TEF(n)] = Value(m, 1);
    [TSF(n)] = Value(m, 2);
    [vmf(n)] = Value(m, 3);
    [cpf(n)] = Value(m, 4);
    m=m+1;
    n=n+1;
end
//Fechando o fluxo da planilha
mclose(fd)
```

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Feito isto, após salvar as modificações, o usuário deverá executar o programa e inserir as variáveis de entrada em caixas de diálogo, do número total de correntes de processo até a diferença mínima de temperatura entre as correntes. Após estas etapas, os resultados

serão gerados automaticamente. Ocorre a abertura de duas janelas gráficas (curvas compostas quentes e frias e grande curva composta), enquanto que os resultados restantes podem ser verificados na tela inicial do Scilab[®]. As seções 4.3 e 4.4 tratam dos algoritmos utilizados para gerar todos estes resultados.

4.3 Diagrama em cascata da Tabela Problema e grande curva composta

O algoritmo que gera o Diagrama em cascata é baseado no processo descrito por Kemp (2007). Inicialmente, após a escolha de um $\Delta T_{\text{mín}}$ pelo usuário, foi subtraído o valor de $\Delta T_{\text{mín}}/2$ de todas as temperaturas de correntes quentes e adicionado $\Delta T_{\text{mín}}/2$ a todas as temperaturas de correntes frias, encontrando, assim, todas as chamadas temperaturas deslocadas (*shifted temperatures*) de todas as correntes.

Em seguida, um vetor de todas as temperaturas deslocadas do problema foi criado, sendo este organizado em ordem decrescente com a utilização do comando *gsort()*. Iniciando-se da maior temperatura e da seguinte a esta, foram criados laços através dos quais foi possível identificar quantas e quais correntes estavam presentes em cada intervalo de temperaturas.

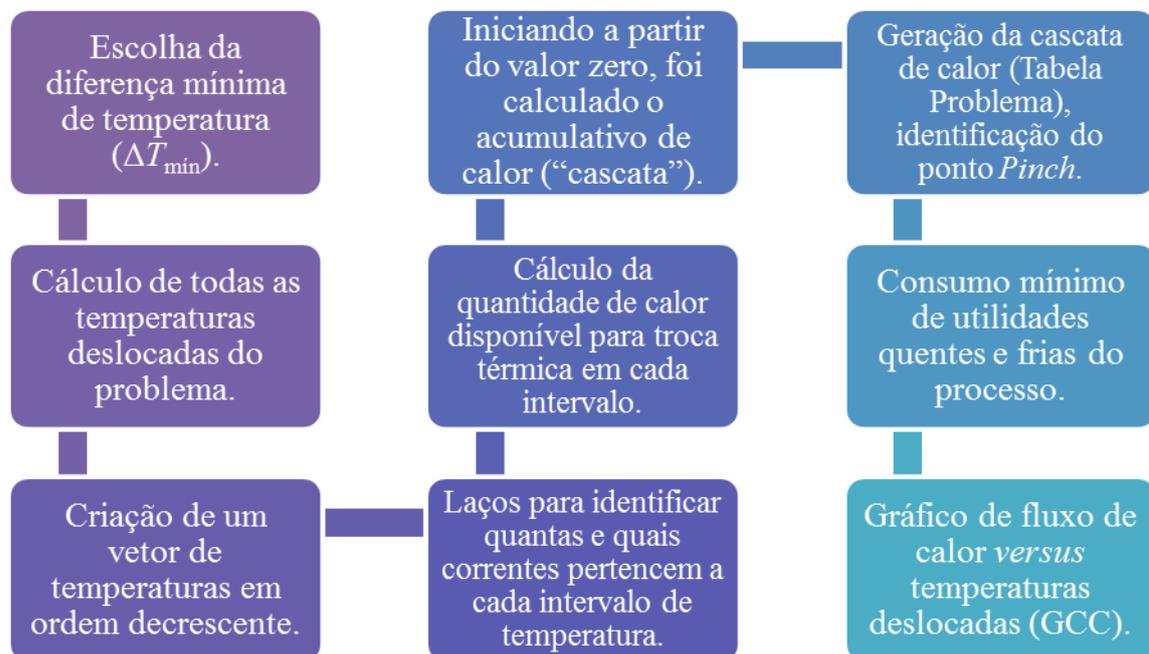
Logo após esta etapa, sabendo-se quais correntes pertenciam a cada intervalo, foram somadas todas as capacidades caloríficas de todas as correntes quentes (CP_{quentes}) e subtraídas as de todas as correntes frias (CP_{frias}), de modo a encontrar a quantidade de calor total disponível para troca térmica em cada intervalo. Para encontrar essa quantidade, a capacidade calorífica total do intervalo ($CP_{\text{quentes}} - CP_{\text{frias}}$) foi multiplicada à diferença entre as temperaturas de cada intervalo. Lembrando que esta quantidade poderia ser positiva (calor disponível para troca térmica no intervalo) ou negativa (calor requerido no intervalo).

Iniciando a partir do valor zero para a temperatura mais alta, foi calculado o acumulativo de quantidade de calor em cada intervalo de temperatura, de modo a obter uma “cascata” (acumulativo de calor passando através de um dado valor de temperatura deslocada). Essa cascata de calor poderia possuir valores negativos e ser termodinamicamente inviável. Para evitar este problema, dentre os valores obtidos na cascata, foi destacado o menor (maior valor negativo ou zero), e este foi adicionado ao primeiro intervalo da cascata, gerando então novos valores termodinamicamente viáveis. A partir dessa mudança, todas as quantidades de calor foram acrescidas deste valor mínimo, e o intervalo que antes possuía este mínimo, agora era igual a zero.

Portanto, agora com valores termodinamicamente viáveis, foi obtida a cascata com os dados da Tabela Problema, fornecendo o quanto de calor estava disponível para troca térmica em cada intervalo, a temperatura *Pinch* do processo (temperatura na qual a quantidade de calor era zero), e o consumo mínimo de utilidades quentes e frias do processo. Através de comandos como *disp()* e *printf()*, é possível que o usuário acompanhe cada parte deste processo, principal diferencial acrescentado ao algoritmo proposto por Kemp (2007).

Finalmente, a grande curva composta consiste no gráfico do fluxo de calor (cascata – eixo horizontal) *versus* temperaturas deslocadas (eixo vertical). Um fluxograma resumindo o algoritmo implementado pode ser observado na Figura 4.6. O comando utilizado para gerar o gráfico foi *plot2d()*. A seção 4.4 trata do algoritmo implementado para geração das curvas compostas quentes e frias do processo e também como foi realizada a localização das correntes no diagrama de grade.

Figura 4.6 – Fluxograma resumido da programação utilizada para gerar a grande curva composta e o diagrama da Tabela Problema .



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

4.4 Curvas compostas quentes e frias e diagrama de grade

O algoritmo utilizado para o desenvolvimento do programa em Scilab[®] é bastante semelhante ao que foi descrito na seção 4.3 (KEMP, 2007). Em primeiro lugar, as temperaturas de todas as correntes quentes e frias são listadas em ordem crescente (comando *gsort()*). Após esta etapa, são identificadas quantas e quais correntes pertencem a cada

intervalo de temperatura. É calculada, então, a quantidade total de calor em cada intervalo para correntes quentes e frias, separadamente. A partir desta etapa, o procedimento é diferente para cada tipo de corrente. Um breve resumo deste algoritmo pode ser observado na Figura 4.7.

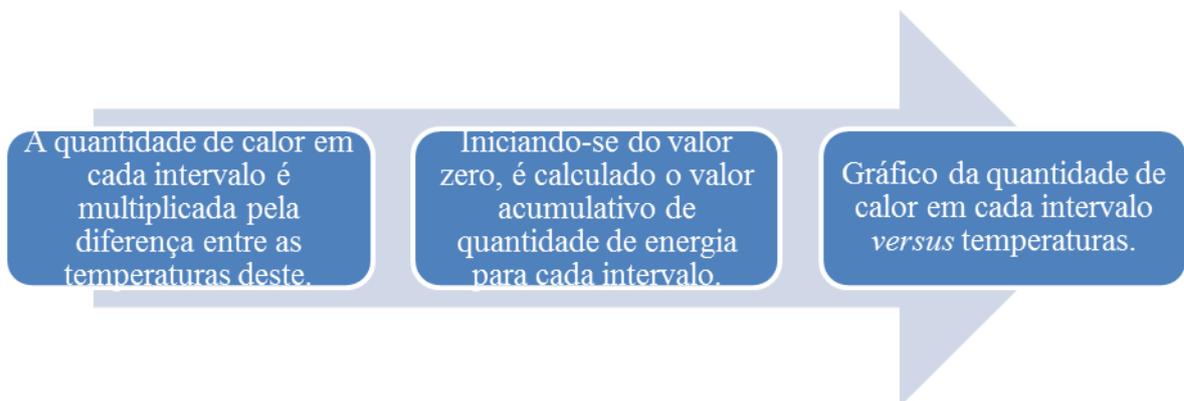
Figura 4.7 – Fluxograma resumido da primeira parte da programação utilizada para gerar as curvas compostas do processo.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Para correntes quentes (Figura 4.8), depois de calculada a quantidade de calor em cada intervalo, esta é multiplicada pela diferença entre as temperaturas do intervalo correspondente. Iniciando de um valor zero para a menor temperatura, foi calculado o valor acumulativo de quantidade de calor para cada intervalo. O valor obtido no intervalo final representa a carga calorífica total devido às correntes quentes do processo. O gráfico da curva composta quente é representado pela quantidade de calor acumulada em cada intervalo (eixo horizontal) *versus* o vetor que consiste em todas as temperaturas das correntes quentes juntamente com as temperaturas das correntes frias acrescidas de ΔT_{min} (eixo vertical). Este gráfico é implementado através do comando *plot2d()*.

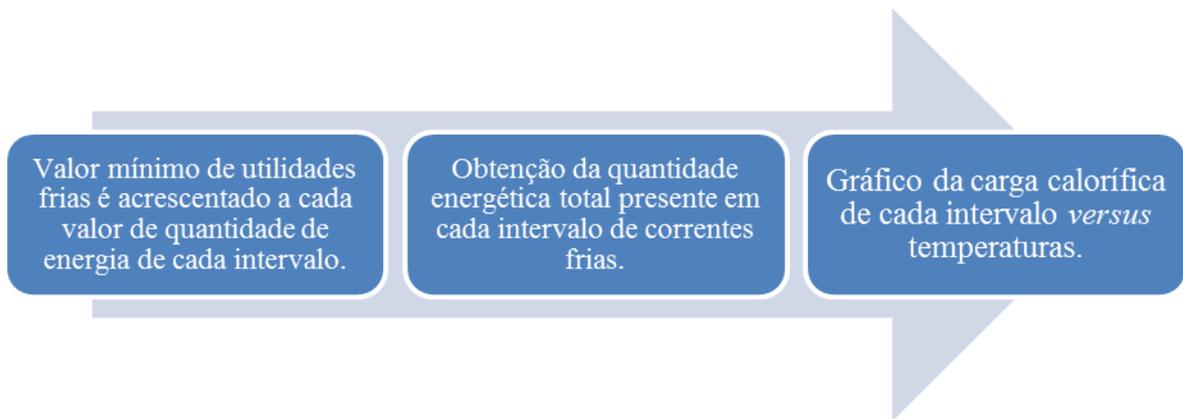
Figura 4.8 – Fluxograma resumido da segunda parte do algoritmo para geração de curvas compostas quentes.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Para as correntes frias (Figura 4.9), após a etapa de cálculo da quantidade de calor em cada intervalo, o valor de consumo mínimo de utilidade fria, obtido através do algoritmo da Tabela Problema (ver 4.3), foi acrescentado a cada uma destas quantidades, obtendo-se a carga calorífica total presente em cada intervalo de correntes frias. O gráfico da curva composta referente a estas correntes é dado por esta carga calorífica de cada intervalo (eixo horizontal) *versus* as temperaturas de todas as correntes frias em conjunto com as temperaturas das correntes quentes subtraídas do valor de ΔT_{min} (eixo vertical). O comando *plot2d()* também foi utilizado para geração desta curva.

Figura 4.9 – Fluxograma resumido da segunda parte do algoritmo para geração de curvas compostas frias.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

A localização das curvas no diagrama de grade do processo foi implementada através de um algoritmo simples, utilizando o laço *if*. Foram feitas comparações entre as temperaturas de cada corrente e a temperatura *Pinch* do processo, possibilitando fornecer a localização de cada uma no diagrama de grade. É importante ressaltar que são dadas apenas as localizações como “acima do ponto *Pinch*”, “abaixo do ponto *Pinch*” e “acima e abaixo do ponto *Pinch*”, com a utilização do comando *printf()*.

A visualização de todos os resultados obtidos com a implementação dos algoritmos descritos nas seções deste Capítulo estão disponíveis no Capítulo 5, mediante a apresentação de cinco estudos de caso, comprovando a eficiência do programa desenvolvido em Scilab® neste trabalho.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo trata da apresentação e discussão dos resultados de cinco exemplos aplicados ao programa computacional desenvolvido no *software* Scilab® versão 5.3. Além das utilidades quentes e frias, o primeiro exemplo possui quatro correntes e foi proposto por Gundersen (2000). O segundo caso trata de um problema composto por nove correntes, mencionado por Bogataj e Kravanja (2012). Os terceiro e quarto exemplos tratam de problemas que possuem dez (KHORASANY e FESANGHARY, 2009) e quinze (BJÖRK e NORDMAN, 2005) correntes, respectivamente. O último caso é uma problema de grande escala, composto por trinta e sete correntes de processo proposto por Yu *et al.* (2000), derivado de uma planta de etileno.

Para fins de comparação, foram utilizados resultados obtidos na literatura. Para ilustrar sugestões de sínteses de redes de trocadores de calor para cada exemplo, foi utilizado o *software* livre Hint (*Heat Integration*). A discussão é realizada logo após a apresentação dos resultados.

5.1 Primeiro estudo de caso (GUNDERSEN, 2000)

Este primeiro exemplo é composto por um total de quatro correntes, sendo duas delas quentes e duas frias, mais uma utilidade quente e uma fria. Os dados referentes a este processo podem ser observados na Tabela 5.1.

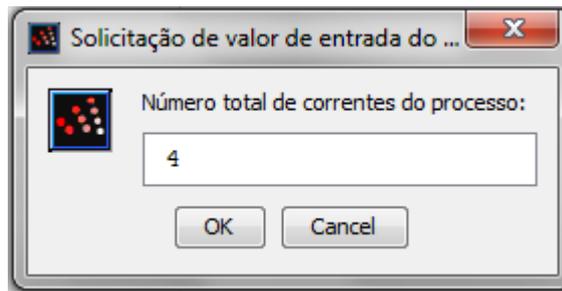
Tabela 5.1 – Dados utilizados para o primeiro estudo de caso.

Corrente	T_E (°C)	T_S (°C)	CP (kW/°C)
H1	270	160	18
H2	220	60	22
C1	50	210	20
C2	160	210	50
CU	15	20	---
HU	250	250	---

Fonte: Adaptado de Gundersen (2000).

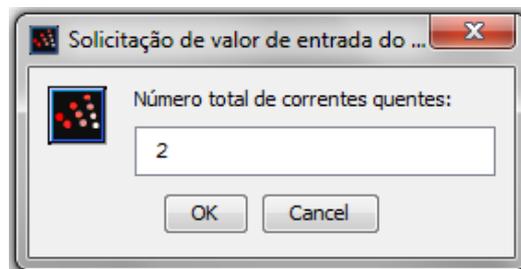
Primeiramente, foram inseridas na rotina as primeiras variáveis de entrada requeridas, ou seja, número total de correntes do processo (Figura 5.1), número de correntes quentes (Figura 5.2) e frias (Figura 5.3), respectivamente e diferença mínima de temperaturas entre as correntes do problema (Figura 5.4). Para este exemplo, foi usado um $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$.

Figura 5.1 – Inserção da primeira variável de entrada: número total de correntes do processo.



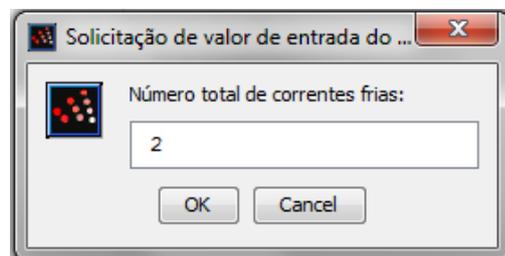
Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.2 – Segunda variável de entrada: número total de correntes quentes.



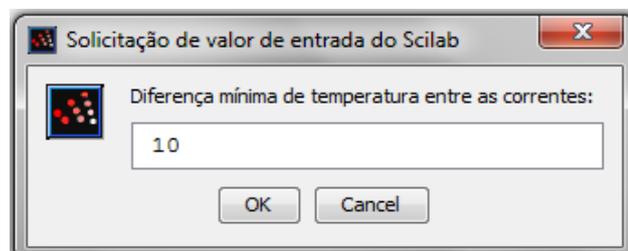
Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.3 – Inserção da variável “número total de correntes frias”.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.4 – Entrada da variável “diferença mínima de temperatura entre as correntes” (em °C).



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Após esta primeira etapa, dependendo do número de correntes quentes e frias, novas janelas interativas surgirão, para que o usuário insira todos os dados referentes às correntes de processo, como é mostrado nas Figuras 5.5 e 5.6.

Figura 5.5 – Inserção dos dados de entrada referentes à primeira corrente quente.

Solicitação de múltiplos valores do Scilab

Dados para corrente quente:

Nome	H1
Temperatura de entrada(°C)	270
Temperatura de saída(°C)	160
Vazão mássica(kg/s)	18
Calor específico(kJ/kg°C)	1.0

OK Cancel

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.6 – Inserção dos dados de entrada referentes à primeira corrente fria.

Solicitação de múltiplos valores do Scilab

Dados para corrente fria:

Nome	C1
Temperatura de entrada(°C)	50
Temperatura de saída(°C)	210
Vazão mássica(kg/s)	20
Calor específico(kJ/kg°C)	1.0

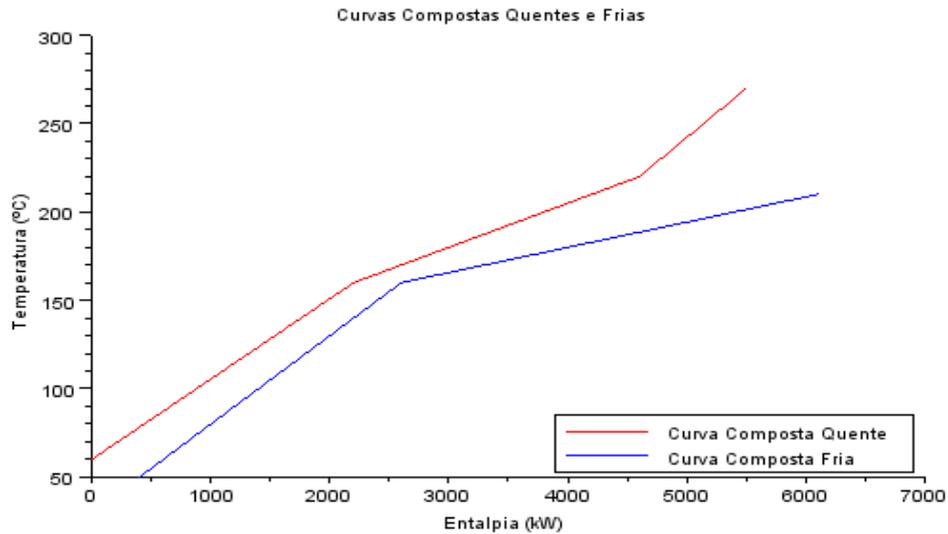
OK Cancel

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Uma observação importante que deve ser levada em consideração é o fato de o exemplo em questão não fornecer valores independentes de vazão mássica e calor específico de cada corrente, e sim um valor resultante da multiplicação dos mesmos, simbolizado pela sigla “CP”. Como o algoritmo proposto prevê a inserção destes dois valores separadamente, um artifício válido é o usuário utilizar-se do valor “1,0” (elemento neutro de multiplicação) para preencher um dos campos (calor específico ou vazão mássica), e inserir o valor fornecido pelo exemplo no outro campo. Este artifício não altera os resultados fornecidos pelo programa.

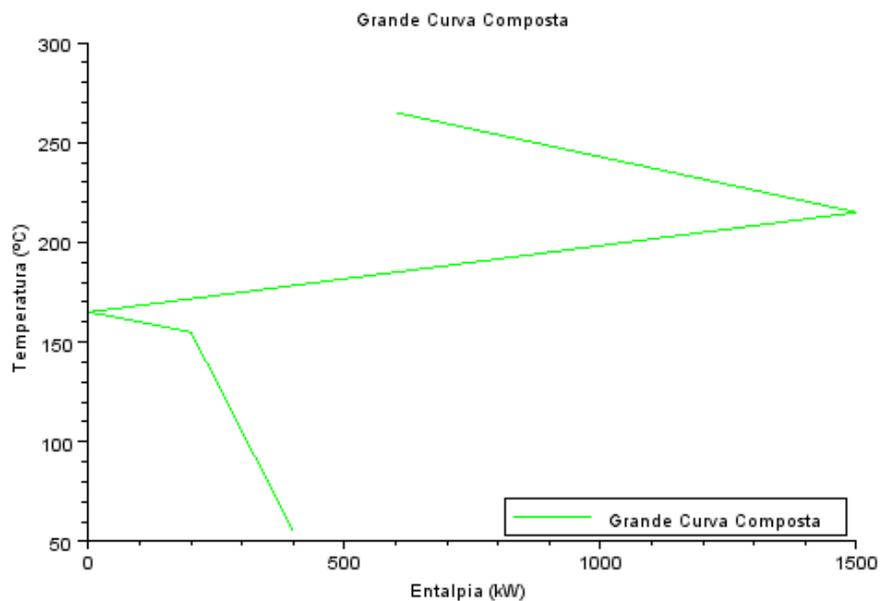
Seguidamente à inserção de todas as variáveis de entrada do processo, são geradas, automaticamente, as curvas compostas quentes e frias e a grande curva composta do problema, representadas, respectivamente, pelas Figuras 5.7 e 5.8.

Figura 5.7 – Curvas compostas quentes e frias para o primeiro estudo de caso.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.8 – Grande curva composta para o primeiro estudo de caso.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Também é possível observar na tela inicial do *software* Scilab® o diagrama em cascata da Tabela Problema, a temperatura *Pinch* do processo e as quantidades mínimas de aquecimento e resfriamento requeridas pelo mesmo (Figura 5.9). Além disso, é dada também

a localização das correntes no diagrama de grade do processo (se estão acima ou abaixo do ponto *Pinch*), o que pode ser verificado na Figura 5.10.

Figura 5.9 – Diagrama em cascata da Tabela Problema, ponto *Pinch* e quantidades mínimas de consumo energético externo para o primeiro caso.

```

-----
Resultado final do desenvolvimento do diagrama da Tabela Problema:

T (°C) --- Q (kW)

265 ----- 600

215 ----- 1500

165 ----- 0

155 ----- 200

55 ----- 400

-----

Temperatura pinch do processo --> 165 °C

-----

Quantidade mínima de aquecimento externo --> 600 kW

Quantidade mínima de resfriamento externo --> 400 kW

-----

```

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

A partir de todos estes resultados fornecidos pelo programa, o usuário terá todos os dados necessários para realizar a síntese de uma rede de trocadores de calor baseada no consumo mínimo de energia, de acordo com os princípios da análise *Pinch*. Na Figura 5.11, pode ser observada uma sugestão de rede de consumo mínimo, de acordo com os dados obtidos, e na Tabela 5.2 são mostrados os resultados referentes a cada trocador de calor, ou seja, a quantidade de calor que está sendo trocada em cada um deles.

Figura 5.10 – Localização das correntes no diagrama de grade referente ao primeiro caso.

Localização das correntes no Diagrama de Grade do processo:

Corrente quente 1 ---> acima e abaixo do Pinch.

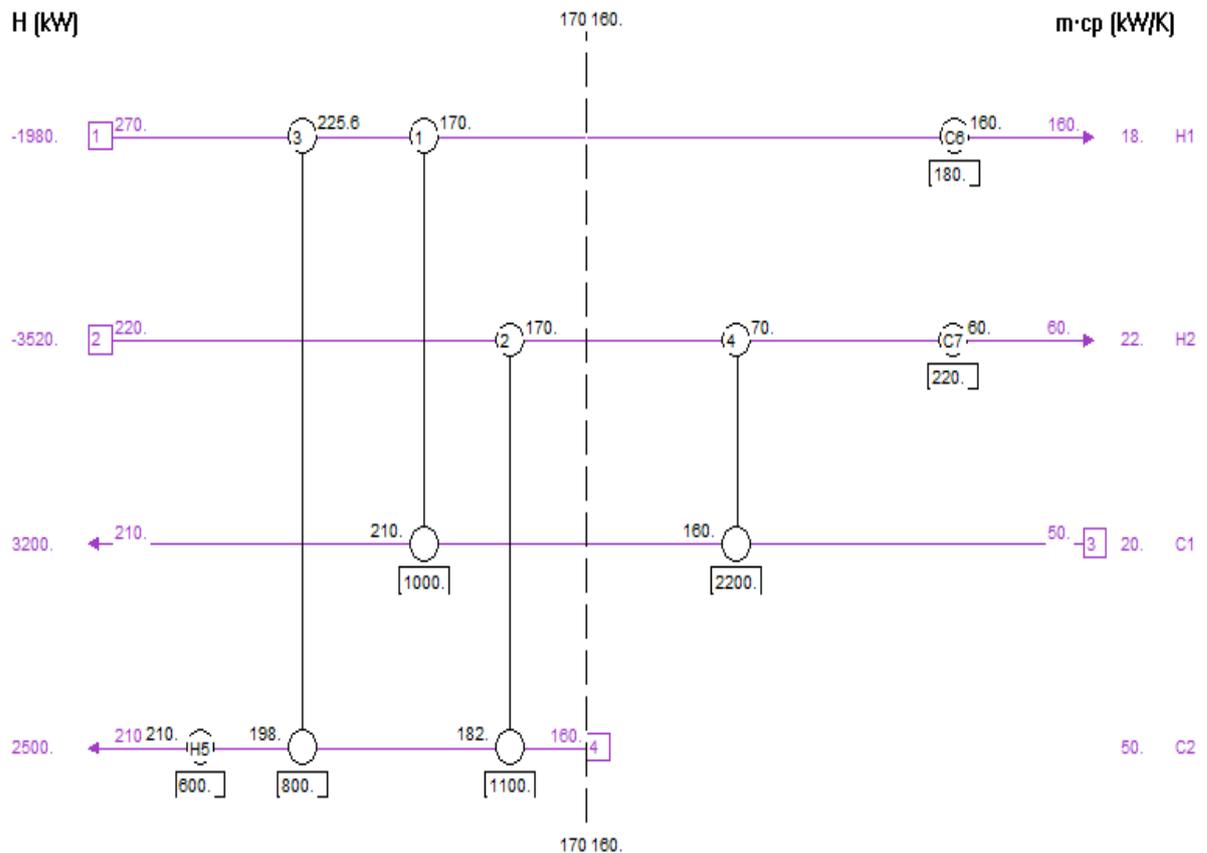
Corrente quente 2 ---> acima e abaixo do Pinch.

Corrente fria 2 ---> acima do Pinch.

Corrente fria 1 ---> acima e abaixo do Pinch.

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.11 – Sugestão de rede de mínimo consumo energético desenhada com o auxílio do *software Hint*®.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Tabela 5.2 – Dados referentes aos trocadores da Figura 5.11.

Identificação do trocador	Entalpia transferida (kW)	T _{EQ} (°C)	T _{SQ} (°C)	T _{EF} (°C)	T _{SF} (°C)
T1	1000,0	225,6	170,0	160,0	210,0
T2	1100,0	220,0	170,0	160,0	182,0
T3	800,0	270,0	225,6	182,0	198,0
T4	2200,0	170,0	70,0	50,0	160,0
HU5	600,0	---	---	198,0	210,0
CU6	180,0	170,0	160,0	---	---
CU7	220,0	70,0	60,0	---	---

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

É importante ressaltar que o foco deste trabalho é apenas obter uma sugestão de rede de trocadores de calor com máxima recuperação energética, isto é, com consumo mínimo de utilidades calculado pelo programa desenvolvido. A este, a minimização de área e custo totais não foram aplicados. Logo, a rede proposta pela Figura 5.11 não garante áreas e custos totais mínimos.

O *software* Hint não gera a rede de mínimo consumo de utilidades automaticamente. Cabe ao usuário desenvolver a rede que melhor lhe convier. Neste caso, o Hint funcionou apenas como uma ferramenta para ilustrar a construção de uma rede de mínimo consumo energético, com a utilização de resultados fornecidos pelo programa em Scilab®.

Em um dos estudos de caso apresentados por Escobar e Trierweiler (2013) para ilustrar a eficiência do método de otimização desenvolvido, foram utilizados os dados de Gundersen (2000). No entanto, para fins comparativos, obtiveram, além dos resultados gerados para a programação matemática desenvolvida, também os resultados gerados utilizando, como base, a tecnologia *Pinch*. A Tabela 5.3 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos por Escobar e Trierweiler (2013) e pelo programa desenvolvido em Scilab® neste trabalho, tendo como base apenas o método *Pinch* de integração energética.

Tabela 5.3 – Comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho e dados da literatura para o primeiro caso.

Variáveis	Programa em Scilab®	Escobar e Trierweiler (2013)
ΔT_{\min} (°C)	10	10
Quantidade mínima de utilidades quentes (kW)	600	600
Quantidade mínima de utilidades frias (kW)	400	400
Temperatura <i>Pinch</i> (°C)	165	165

Fonte: Acervo pessoal (2012) e Escobar e Trierweiler (2013).

A igualdade verificada entre os resultados deste trabalho e da literatura era esperada, visto que ambos utilizaram o método *Pinch* para resolução do problema. Tal constatação mostra que o programa desenvolvido em Scilab® apresenta resultados satisfatórios.

5.2 Segundo estudo de caso (BOGATAJ e KRAVANJA, 2012)

O segundo exemplo é composto por nove correntes (quatro quentes e cinco frias), além de duas utilidades (uma delas quente e outra fria). Os dados relativos a este problema estão representados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Dados referentes ao segundo estudo de caso.

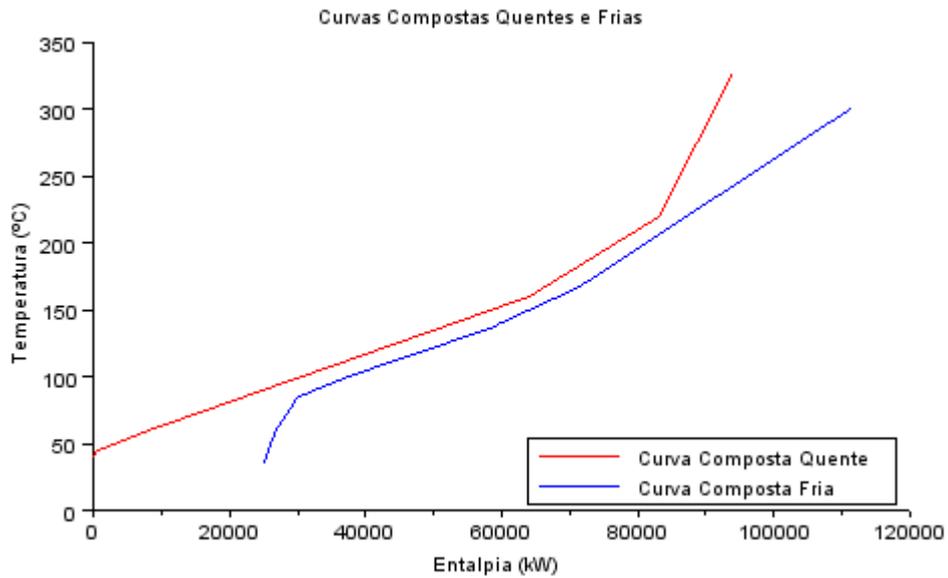
Corrente	T_E (°C)	T_S (°C)	CP (kW/°C)
H1	327	40	100
H2	220	160	160
H3	220	60	60
H4	160	45	400
C1	100	300	100
C2	35	164	70
C3	85	138	350
C4	60	170	60
C5	140	300	200
HUT	330	250	---
CUT	15	30	---

Fonte: Adaptado de Bogataj e Kravanja (2012).

Os resultados fornecidos pelo programa estão representados pelas Figuras 5.12 (curvas compostas quentes e frias), 5.13 (grande curva composta), 5.14 (diagrama em cascata da Tabela Problema) e 5.15 (temperatura *Pinch* e quantidades externas energéticas mínimas

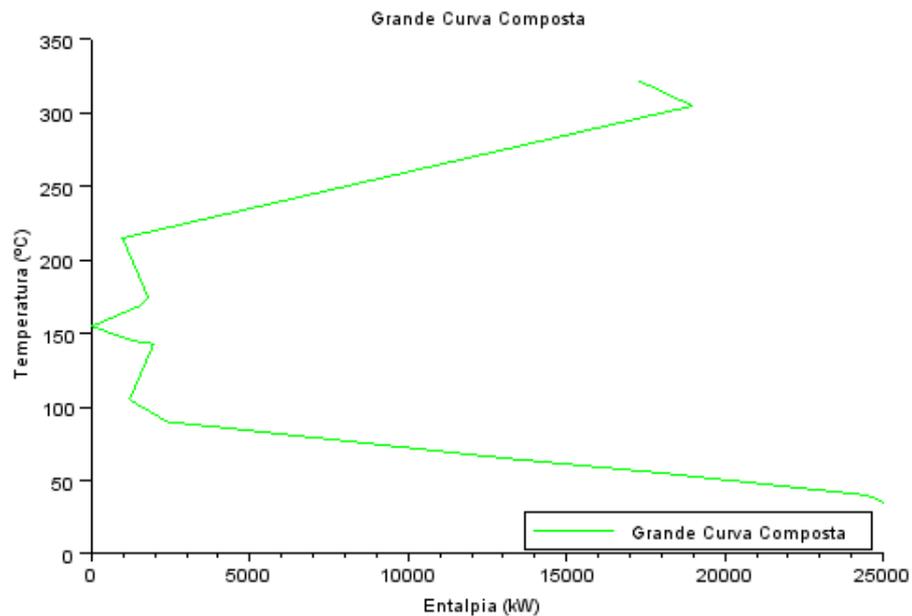
para o processo). A localização das correntes no diagrama de grade do processo pode ser observada na Figura 5.16. Para este exemplo, foi usado um $\Delta T_{\text{mín}} = 10^\circ\text{C}$.

Figura 5.12 – Curvas compostas quentes e frias para o segundo estudo de caso.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.13 – Grande curva composta referente ao segundo estudo de caso.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.14 – Diagrama em cascata da Tabela Problema para o segundo estudo de caso.

Resultado final do desenvolvimento do diagrama da Tabela Problema:

T (°C)	Q (kW)
322	17280
305	18980
215	980
175	1780
169	1540
155	0
145	1300
143	1960
105	1200
90	2400
65	13150
55	18050
40	24500
35	25000

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.15 – Temperatura *Pinch* e quantidades mínimas de aquecimento e resfriamento externos fornecidas através do Scilab®.

Temperatura pinch do processo --> 155 °C

Quantidade mínima de aquecimento externo --> 17280 kW

Quantidade mínima de resfriamento externo --> 25000 kW

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.16 – Localização das correntes de processo para o segundo caso.

```

-----
Localização das correntes no Diagrama de Grade do processo:

Corrente quente 2 ---> acima do Pinch.

-----

Corrente quente 1 ---> acima e abaixo do Pinch.

Corrente quente 3 ---> acima e abaixo do Pinch.

-----

Corrente quente 4 ---> abaixo do Pinch.

-----

-----

Corrente fria 1 ---> acima e abaixo do Pinch.

Corrente fria 2 ---> acima e abaixo do Pinch.

Corrente fria 4 ---> acima e abaixo do Pinch.

Corrente fria 5 ---> acima e abaixo do Pinch.

-----

Corrente fria 3 ---> abaixo do Pinch.

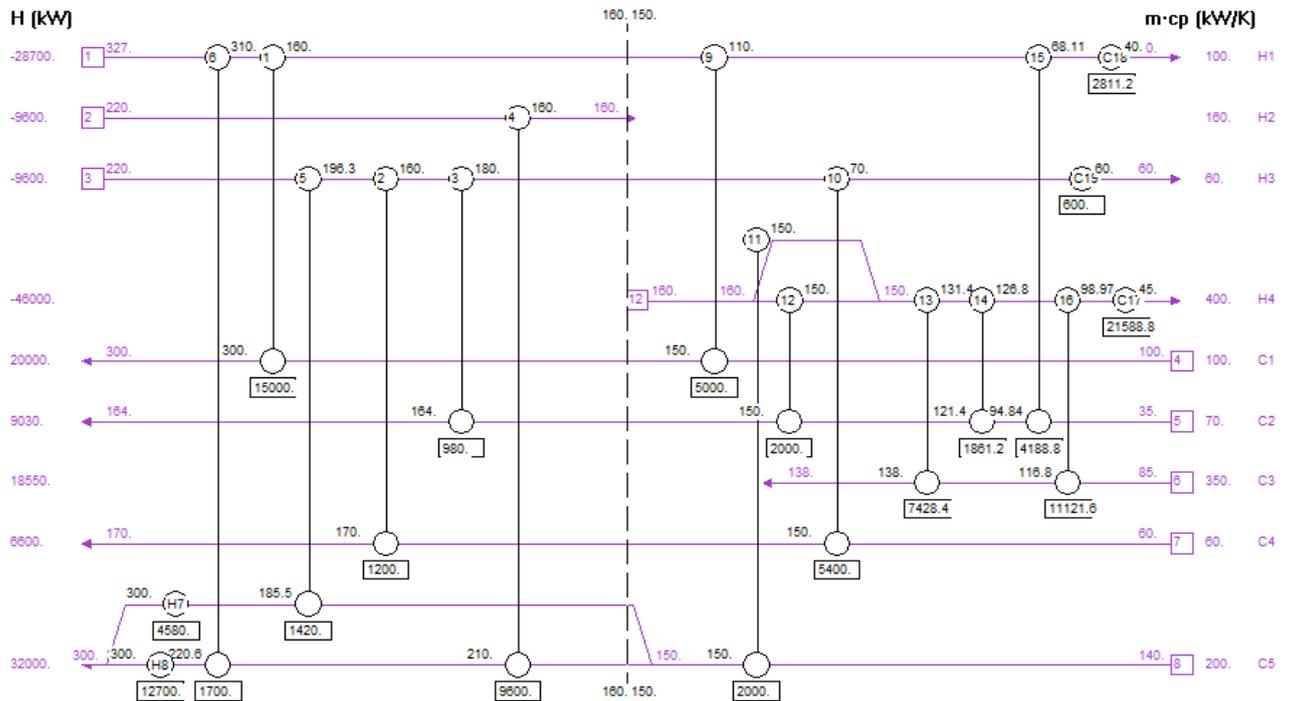
-----

```

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Os resultados de quantidade mínima de utilidades quentes e frias obtidos por Bogataj e Kravanja (2012) foram 23630 kW e 31349 kW, respectivamente. Nota-se que estes são maiores do que os obtidos com o programa desenvolvido neste trabalho, que foram de 17280 kW (utilidades quentes) e 25000 kW (utilidades frias). Isso se deve à utilização de diferentes métodos de programação matemática, visto que Bogataj e Kravanja não utilizaram como base o método *Pinch* de integração energética (utilizaram métodos simultâneos de programação matemática), estratégia esta utilizada neste trabalho.

Uma rede de consumo mínimo de utilidades é proposta na Figura 5.17, e os dados referentes aos trocadores de calor pertencentes a esta rede podem ser verificados na Tabela 5.5.

Figura 5.17 – Rede de máxima recuperação energética para o segundo caso construída no *software* Hint.

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Tabela 5.5 – Dados referentes aos trocadores de calor presentes na rede da Figura 5.17.

Identificação do trocador	Entalpia transferida (kW)	T_{EQ} (°C)	T_{SQ} (°C)	T_{EF} (°C)	T_{SF} (°C)
T1	15000	310,0	160,0	150,0	300,0
T2	1200	180,0	160,0	150,0	170,0
T3	980	196,3	180,0	150,0	164,0
T4	9600	220,0	160,0	150,0	210,0
T5	1420	220,0	196,3	150,0	185,5
T6	1700	327,0	310,0	210,0	220,6
HU7	4580	---	---	185,5	300,0
HU8	12700	---	---	220,6	300,0
T9	5000	160,0	110,0	100,0	150,0
T10	5400	160,0	70,0	60,0	150,0
T11	2000	160,0	150,0	140,0	150,0
T12	2000	160,0	150,0	121,4	150,0
T13	7428,4	150,0	131,4	116,8	138,0
T14	1861,2	131,4	126,8	94,8	121,4
T15	4188,8	110,0	68,1	35,0	94,8
T16	11121,6	126,8	98,9	85,0	116,8
CU17	21588,8	98,9	45,0	---	---
CU18	2811,2	68,1	40,0	---	---
CU19	600	70,0	60,0	---	---

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

5.3 Terceiro estudo de caso (KHORASANY e FESANGHARY, 2009)

O terceiro problema-teste consiste em um processo composto por dez correntes, sendo seis quentes e quatro frias, além de uma utilidade quente e outra fria. Os dados referentes a este caso podem ser observados na Tabela 5.6.

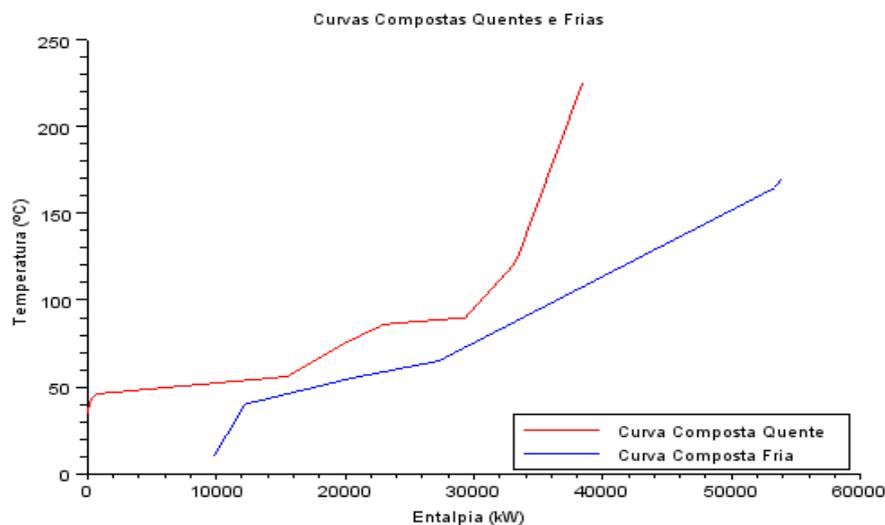
Tabela 5.6 – Variáveis de entrada para o terceiro estudo de caso.

Corrente	T_E (°C)	T_S (°C)	CP (kW/°C)
H1	85	45	156,3
H2	120	40	50,0
H3	125	35	23,9
H4	56	46	1250,0
H5	90	86	1500,0
H6	225	75	50,0
C1	40	55	466,7
C2	55	65	600,0
C3	65	165	180,0
C4	10	170	81,3
HU	200	198	---
CU	15	20	---

Fonte: Adaptado de Khorasany e Fesanghary (2009).

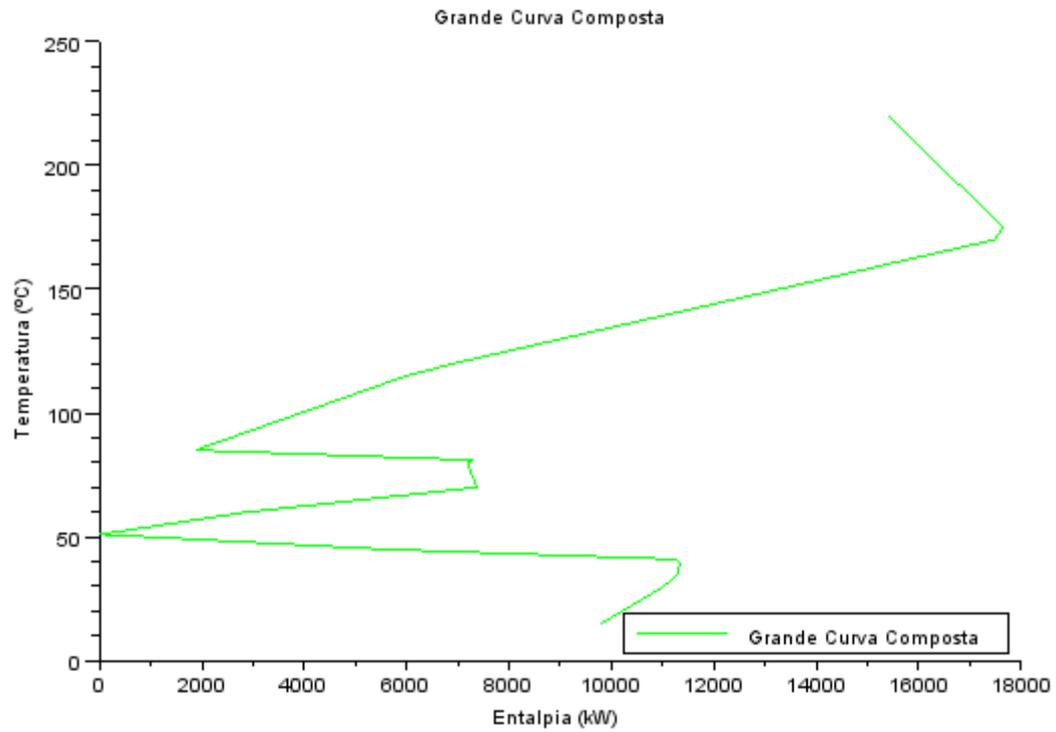
As Figuras 5.18 até 5.21 apresentam, respectivamente, as curvas compostas quentes e frias do processo, a grande curva composta, o diagrama em cascata da Tabela Problema e a temperatura *Pinch* e quantidades mínimas de utilidades quentes e frias para o processo em questão. A localização das correntes no diagrama de grade do processo pode ser observada na Figura 5.22. Foi utilizado um $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ para este exemplo.

Figura 5.18 – Curvas compostas quentes e frias para o terceiro estudo de caso.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.19 – Grande curva composta referente ao terceiro estudo de caso.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.20 – Diagrama em cascata da Tabela Problema para o terceiro estudo de caso.

Resultado final do desenvolvimento do diagrama da Tabela Problema:

T (°C) --- Q (kW)

220 ----- 15399.7

60 ----- 2860.2

175 ----- 17649.7

51 ----- 0

170 ----- 17493.2

45 ----- 5593.2

120 ----- 6928.2

41 ----- 11188.8

115 ----- 5991.2

40 ----- 11337.7

85 ----- 1869.2

35 ----- 11300.7

81 ----- 7319.6

30 ----- 11013.7

80 ----- 7182.2

15 ----- 9794.2

70 ----- 7371.2

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.21 – Temperatura *Pinch* e quantidades mínimas de aquecimento e resfriamento externos obtidos através do Scilab®.

```

-----
Temperatura pinch do processo --> 51 °C
-----
Quantidade mínima de aquecimento externo --> 15399.7 kW
Quantidade mínima de resfriamento externo --> 9794.2 kW
-----

```

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.22 – Localização das correntes de processo para o terceiro caso.

```

-----
Localização das correntes no Diagrama de Grade do processo:
Corrente quente 5 ---> acima do Pinch.
Corrente quente 6 ---> acima do Pinch.
-----
Corrente quente 1 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente quente 2 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente quente 3 ---> acima e abaixo do Pinch.
-----
Corrente quente 4 ---> abaixo do Pinch.
-----
Corrente fria 2 ---> acima do Pinch.
Corrente fria 3 ---> acima do Pinch.
-----
Corrente fria 1 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente fria 4 ---> acima e abaixo do Pinch.
-----

```

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Uma rede de mínimo consumo energético é proposta na Figura 5.23. Observa-se uma ligeira violação na diferença mínima de temperatura entre as correntes no trocador T6, pois a diferença entre a temperatura de saída da corrente quente (75°C) e a temperatura de entrada da corrente fria (66,8°C) é menor que 10°C (neste caso, é igual a 8,2°C). No entanto, como isto não afetou o consumo mínimo de utilidades para construção da rede, foco da otimização deste estudo, esta violação é permitida. Perlingeiro (2005) também propõe uma rede ótima na qual há ligeira violação da diferença mínima de temperatura, utilizando diferentes critérios para otimização de custos.

Deste modo, de acordo com as necessidades do usuário, pode haver pequenas variações no ΔT_{\min} do processo, dependendo do que se quiser otimizar. É importante ressaltar também que a metodologia *Pinch* de integração energética é um método sequencial, ou seja, são várias etapas de resolução até se encontrar a solução ótima. Desta forma, para que alguns critérios de otimização sejam seguidos, são necessárias algumas ligeiras violações. Na Tabela 5.7, podem ser observados os dados de cada trocador de calor da rede de mínimo consumo energético proposta.

Figura 5.23 – Rede de mínimo consumo energético para o terceiro caso, desenhada com o auxílio do *software Hint*.

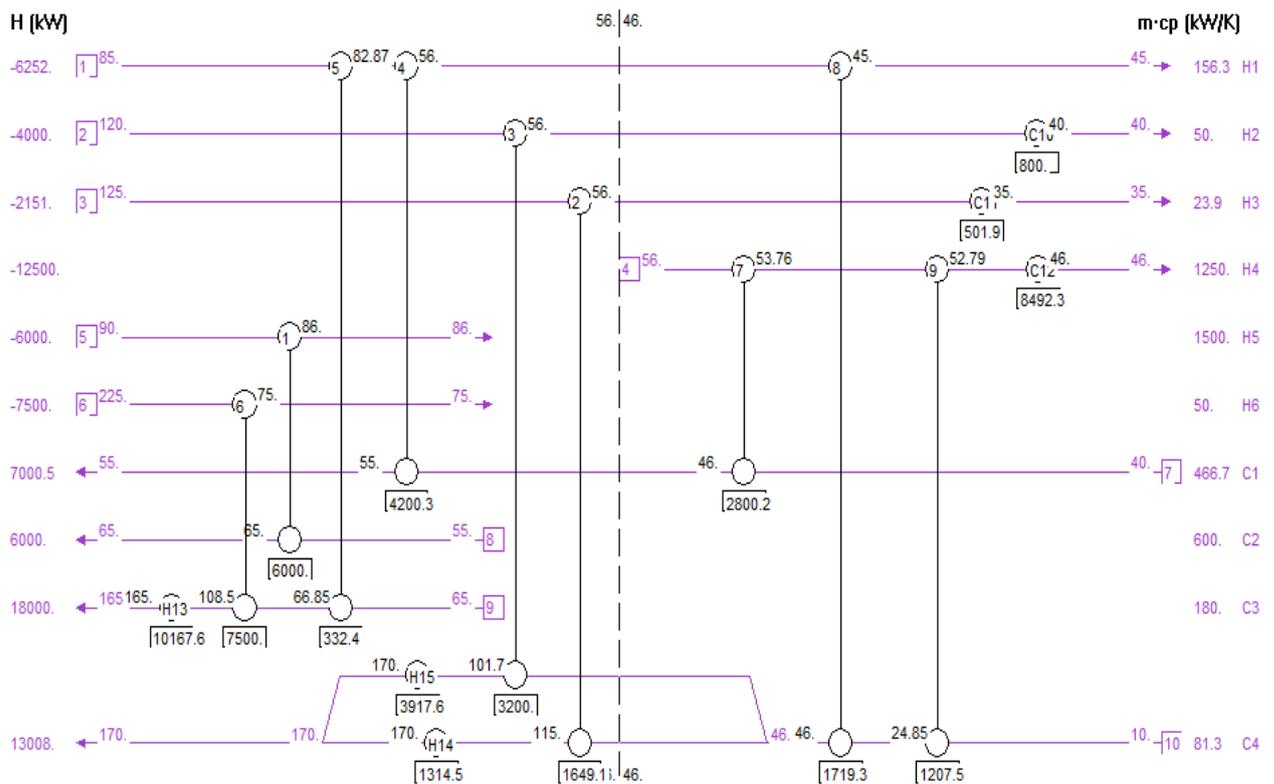


Tabela 5.7 – Dados referentes aos trocadores de calor da Figura 5.22.

Identificação do trocador	Entalpia transferida (kW)	T _{EQ} (°C)	T _{SQ} (°C)	T _{EF} (°C)	T _{SF} (°C)
T1	6000,0	90,0	86,0	55,0	65,0
T2	1649,1	125,0	56,0	46,0	115,0
T3	3200,0	120,0	56,0	46,0	101,7
T4	4200,3	82,9	56,0	46,0	55,0
T5	332,4	85,0	82,9	65,0	66,8
T6	7500	225,0	75,0	66,8	108,5
T7	2800,2	56,0	53,8	40,0	46,0
T8	1719,3	56,0	45,0	24,8	46,0
T9	1207,5	53,7	52,8	10,0	24,8524
CU10	800,0	56,0	40,0	---	---
CU11	501,9	56,0	35,0	---	---
CU12	8492,3	52,8	46,0	---	---
HU13	10167,6	---	---	108,5	165,0
HU14	1314,5	---	---	115,0	170,0
HU15	3917,6	---	---	101,7	170,0

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Ainda na Figura 5.23, os trocadores de calor são representados pelas circunferências interligadas por linhas horizontais. As utilidades são representadas por circunferências simples, cujos símbolos em seus interiores representam o nome dado a cada utilidade.

Khorasany e Fesanghary (2009) propuseram uma metodologia híbrida, utilizando um algoritmo de busca harmônica (*HS*) juntamente com programação quadrática sequencial (*SQP*), buscando sintetizar redes de trocadores de calor com custo ótimo. Aplicando essa nova proposta aos dados da Tabela 5.6, obtiveram, respectivamente, os seguintes resultados: 19605 kW de utilidades quentes e 14000 kW de utilidades frias.

Ahmad (1985), no entanto, apresentou resultados ainda menores, pois buscava minimizar o custo e também o consumo energético, obtendo um consumo de 15400 kW de utilidades quentes e 9796 kW, de frias, praticamente o mesmo obtido neste trabalho, que foi de 15399,7 kW (utilidades quentes) e 9794,2 kW (utilidades frias). Ahmad (1985) baseou-se no método *Pinch*, o que justifica a proximidade dos resultados.

5.4 Quarto estudo de caso (BJÖRK e NORDMAN, 2005)

O quarto exemplo é composto por quinze correntes (oito quentes e sete frias) e duas utilidades (uma quente e uma fria), cujos dados estão representados na Tabela 5.8.

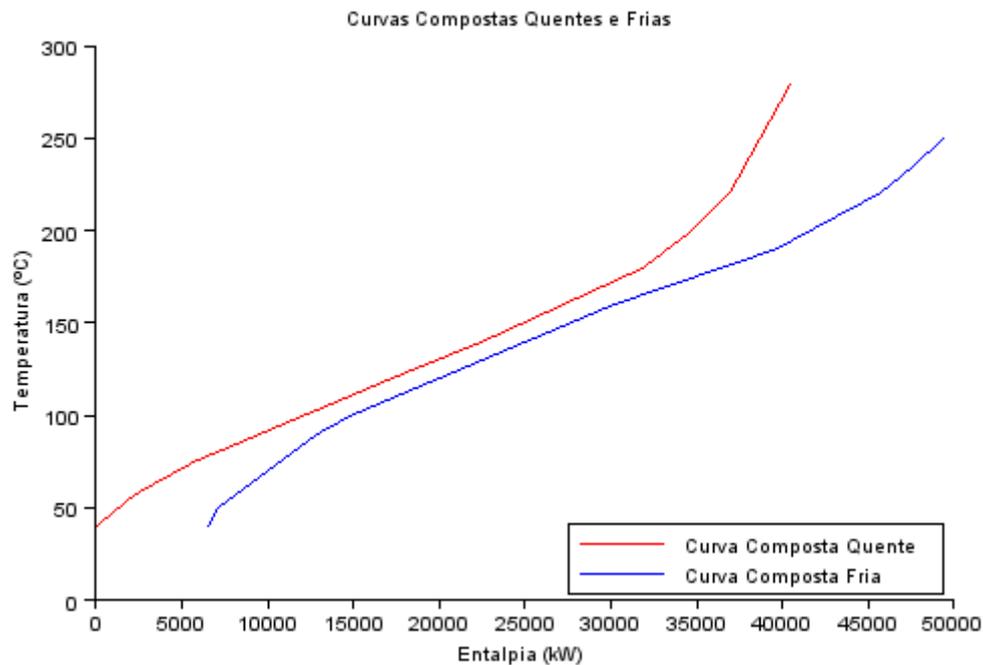
Tabela 5.8 – Variáveis de entrada para o quarto estudo de caso.

Corrente	T_E (°C)	T_S (°C)	CP (kW/°C)
Hot 1	180	75	30
Hot 2	280	120	60
Hot 3	180	75	30
Hot 4	140	40	30
Hot 5	220	120	50
Hot 6	180	55	35
Hot 7	200	60	30
Hot 8	120	40	100
Cold1	40	230	20
Cold 2	100	220	60
Cold 3	40	190	35
Cold 4	50	190	30
Cold 5	50	250	60
Cold 6	90	190	50
Cold 7	160	250	60
CU	25	40	---
HU	325	325	---

Fonte: Adaptado de Björk e Nordman (2005).

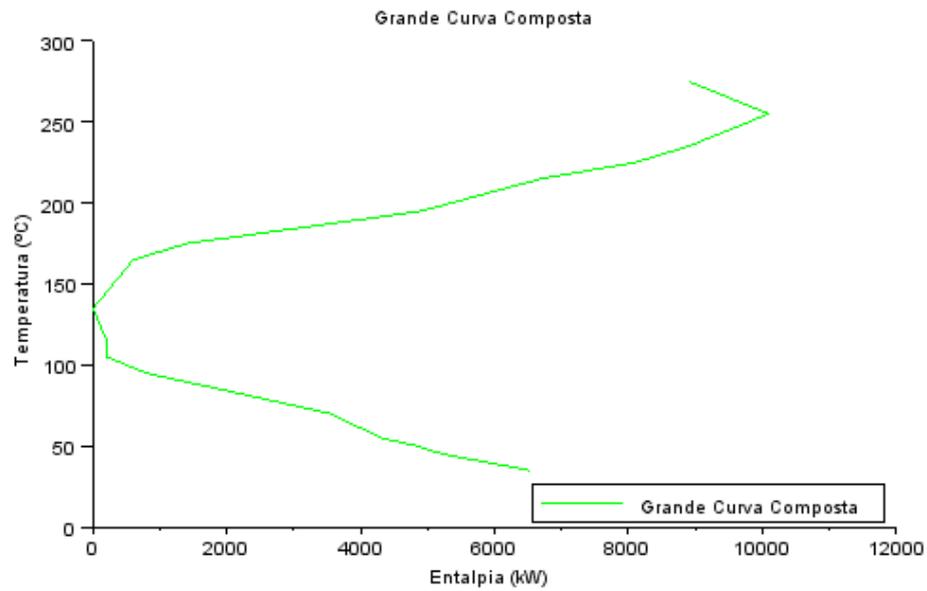
Nas Figuras 5.24 até 5.28, são apresentados os resultados obtidos pelo programa desenvolvido em Scilab[®] referentes a este exemplo. Foi utilizada uma diferença mínima de temperatura igual a 10°C. A rede de consumo mínimo de utilidades está representada na Figura 5.29 e os dados relativos a seus trocadores estão na Tabela 5.9.

Figura 5.24 – Curvas compostas referentes ao quarto exemplo.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.25 – Grande curva composta para o quarto estudo de caso.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.26 – Representação do diagrama em cascata da Tabela Problema para o quarto exemplo.

 Resultado final do desenvolvimento do diagrama da Tabela Problema:

T (°C)	Q (kW)	T (°C)	Q (kW)
275	8900	115	200
255	10100	105	200
235	8900	95	800
225	8100	70	3550
215	6700	55	4300
195	4900	50	4850
175	1400	45	5225
165	600	35	6525
135	0		

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.27 – Temperatura *Pinch* do processo e quantidades mínimas de resfriamento e aquecimento para o quarto caso.

```

-----
Temperatura pinch do processo --> 135 °C
-----
Quantidade mínima de aquecimento externo --> 8900 kW
Quantidade mínima de resfriamento externo --> 6525 kW
-----

```

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

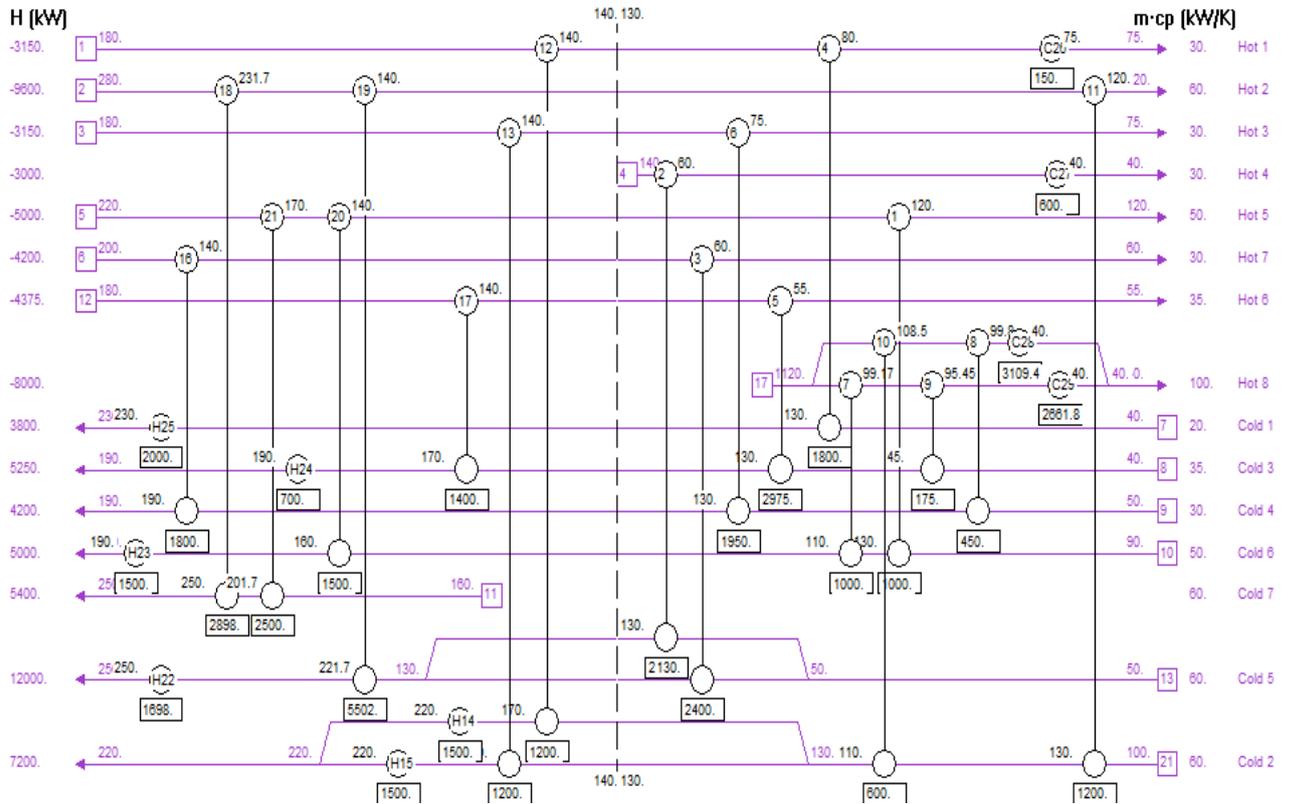
Figura 5.28 – Localização obtida através da rotina para as correntes do diagrama de grade do processo para o quarto caso.

```

-----
Localização das correntes no Diagrama de Grade do processo:
-----
Corrente quente 1 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente quente 2 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente quente 3 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente quente 5 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente quente 6 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente quente 7 ---> acima e abaixo do Pinch.
-----
Corrente quente 4 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 8 ---> abaixo do Pinch.
-----
-----
Corrente fria 7 ---> acima do Pinch.
-----
Corrente fria 1 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente fria 2 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente fria 3 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente fria 4 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente fria 5 ---> acima e abaixo do Pinch.
Corrente fria 6 ---> acima e abaixo do Pinch.
-----

```

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.29 – Rede obtida com o auxílio do *software* Hint para o terceiro caso.

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Tabela 5.9 – Dados referentes à rede de trocadores de calor da Figura 5.29.

Identificação do trocador	Entalpia transferida (kW)	T_{EQ} (°C)	T_{SQ} (°C)	T_{EF} (°C)	T_{SF} (°C)
T1	1000	140,0	120,0	110,0	130,0
T2	2400	140,0	60,0	50,0	130,0
T3	2400	140,0	60,0	50,0	130,0
T4	1800	140,0	80,0	40,0	130,0
T5	2975	140,0	55,0	45,0	130,0
T6	1950	140,0	75,0	65,0	130,0
T7	1000	120,0	99,2	90,0	110,0
T8	450	108,5	99,8	50,0	65,0
T9	175	99,1	95,5	40,0	45,0
T10	600	120,0	108,5	100,0	110,0
T11	1200	140,0	120,0	110,0	130,0
T12	1200	180,0	140,0	130,0	170,0
T13	1200	180,0	140,0	130,0	170,0
HU14	1500	---	---	170,0	220,0
HU15	1500	---	---	170,0	220,0
T16	1800	200,0	140,0	130,0	190,0
T17	1400	180,0	140,0	130,0	170,0

T18	2898	280,0	231,7	201,7	250,0
T19	5502	231,7	140,0	130,0	221,7
T20	1500	170,0	140,0	130,0	160,0
T21	2500	220,0	170,0	160,0	201,7
HU22	1698	---	---	221,7	250,0
HU23	1500	---	---	160,0	190,0
HU24	700	---	---	170,0	190,0
HU25	2000	---	---	130,0	230,0
CU26	150	80,0	75,0	---	---
CU27	600	60,0	40,0	---	---
CU28	3109,4	99,8	40,0	---	---
CU29	2661,8	95,5	40,0	---	---

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Assim como ocorreu com o terceiro caso, na rede proposta para o quarto estudo de caso há uma ligeira violação da diferença mínima de temperatura (10°C) nos trocadores T7 ($\Delta T = 9,2^{\circ}\text{C}$, com violação de $0,8^{\circ}\text{C}$) e T10 ($\Delta T = 8,5^{\circ}\text{C}$, com violação de $1,5^{\circ}\text{C}$). No entanto, essa violação pode ser permitida desde que síntese da rede em escala real continue viável.

Escobar e Trierweiler (2013) também utilizaram os dados de Björk e Nordman (2005) para seu terceiro estudo de caso, obtendo um consumo mínimo de utilidade fria igual a 6525 kW e 8900 kW de utilidade quente, para uma diferença mínima de temperatura também igual a 10°C e uma temperatura *Pinch* de 135°C . Estes resultados foram exatamente iguais aos obtidos no programa desenvolvido em Scilab[®], comprovando mais uma vez a validade do programa para calcular os consumos mínimos de utilidades de uma rede de trocadores de calor.

5.5 Quinto estudo de caso (YU et al., 2000)

Este exemplo trata de um problema de grande escala, possuindo vinte e uma correntes quentes e dezesseis correntes frias, derivadas de uma planta de etileno. Os dados das correntes podem estar listados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Dados referentes ao quinto estudo de caso.

Corrente	T_E ($^{\circ}\text{C}$)	T_S ($^{\circ}\text{C}$)	CP (kW/K)
H1	175,0	150,0	196,9
H2	168,0	55,0	6,8
H3	190,0	175,0	1053,1
H4	160,0	135,0	256,1
H5	102,0	40,0	651,9

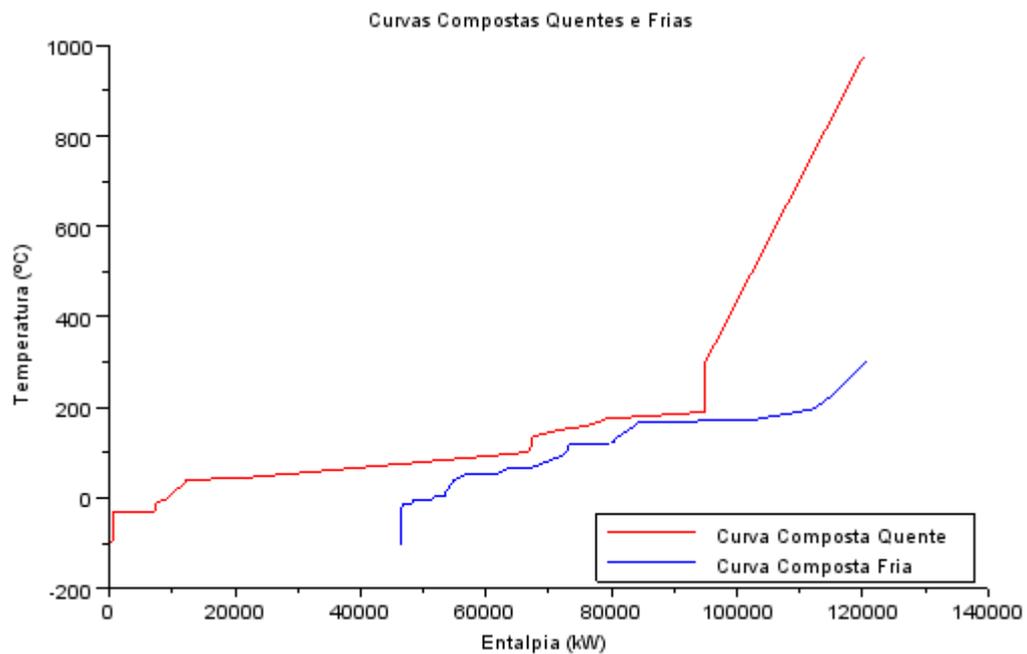
H6	170,0	40,0	6,12
H7	98,4	40,0	37,9
H8	97,4	40,0	39,9
H9	98,4	40,0	33,9
H10	40,0	25,0	43,5
H11	25,0	10,0	46,1
H12	104,7	40,0	8,9
H13	80,0	40,0	21,0
H14	40,0	25,0	22,6
H15	25,0	-7,4	47,9
H16	57,5	40,0	20,5
H17	0,0	-11,7	155,5
H18	-96,2	-99,0	188,9
H19	-28,6	-30,8	3040,9
H20	44,7	40,0	1129,1
H21	976,0	300,0	37,3
C1	10,0	160,0	32,8
C2	170,0	170,5	31592
C3	120,0	120,5	12804
C4	170,0	170,5	27334
C5	170,0	222,0	30,8
C6	68,0	90,0	35,4
C7	-15,0	-14,5	2896,0
C8	122,0	122,5	772,0
C9	2,40	2,6	8125,0
C10	68,0	68,5	6482,0
C11	-5,0	-4,5	6524,0
C12	52,0	53,0	4666,0
C13	175,0	196,0	300,0
C14	40,0	99,0	110,0
C15	33,90	79,9	16,5
C16	130,0	302,0	73,9

Fonte: Adaptado de Yu *et al.* (2000).

A partir da Figura 5.30 (curvas compostas quentes e frias), podem-se observar os resultados fornecidos pelo programa relativos à grande curva composta (Figura 5.31), diagrama em cascata da Tabela Problema (Figura 5.32), temperatura *Pinch* e quantidades

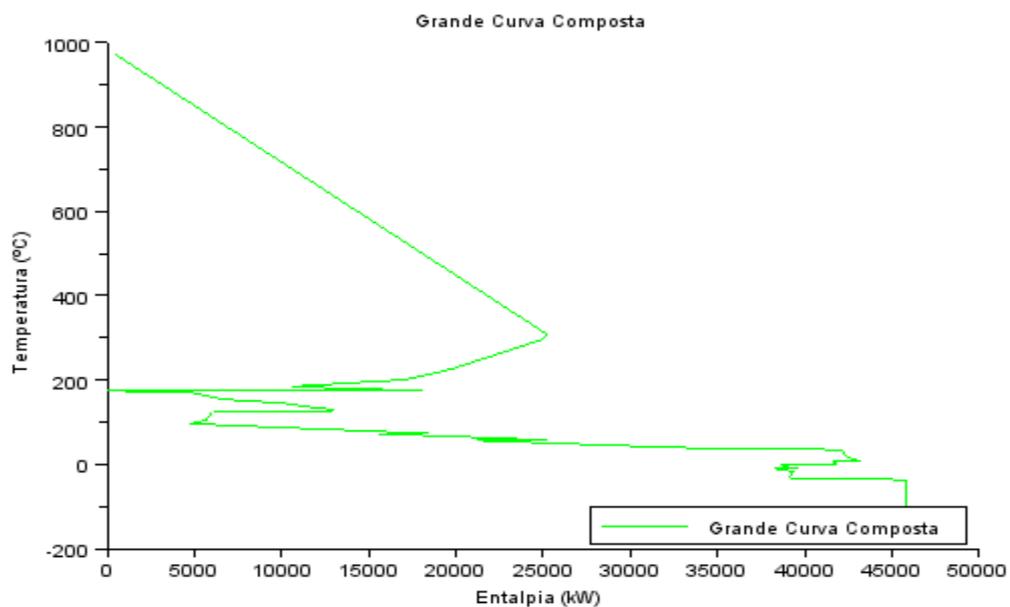
mínimas de utilidades quentes e frias (Figura 5.33) e, finalmente, a localização das correntes no diagrama de grade do processo (Figura 5.34).

Figura 5.30 – Curvas compostas quentes e frias para o quinto estudo de caso.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.31 – Grande curva composta referente ao quinto estudo de caso.



Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.32 – Diagrama em cascata da Tabela Problema obtido para o quinto estudo de caso.

 Resultado final do desenvolvimento do diagrama da Tabela Problema:

T(°C) --- Q(kW)	130 ----- 12925.5	57 ----- 21230.6	-12.4 ----- 38747.7
971 ----- 11365.1	127.5 ----- 12875.7	52.5 ----- 24142.8	-16.7 ----- 39346.7
307 ----- 36137.4	127 ----- 12479.7	50 ----- 25811.9	-28.9 ----- 39145.7
295 ----- 35698.9	125.5 ----- 12449.9	45 ----- 29116.1	-33.6 ----- 39145.7
227 ----- 30676.7	125 ----- 6037.91	39.7 ----- 33201.5	-35.8 ----- 45835.7
201 ----- 27954.5	104 ----- 5619.65	35 ----- 42131.4	-101.2 ----- 45835.7
185 ----- 21479.3	99.7 ----- 5061.01	20 ----- 42383	-104 ----- 46364.7
180 ----- 24721.2	97 ----- 4734.14	15 ----- 42606.8	-----
175.5 ----- 28988.8	95 ----- 5795.79	7.6 ----- 43181	
175 ----- 0	93.4 ----- 6588.53	7.4 ----- 41571.5	
170 ----- 4896.08	92.4 ----- 7155.92	5 ----- 41757.7	
165 ----- 5511.4	84.9 ----- 11710.5	0.5 ----- 41899.2	
163 ----- 5704.12	75 ----- 17559.4	0 ----- 38653	
155 ----- 6529.31	73.5 ----- 18477.1	-5 ----- 38810.2	
145 ----- 10121.6	73 ----- 15542	-9.5 ----- 39652.8	
135 ----- 11744.7	58 ----- 25249.4	-10 ----- 38298.4	

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.33 – Temperatura *Pinch* do processo e quantidades mínimas de utilidades quentes e frias.

 Temperatura pinch do processo --> 175 °C

 Quantidade mínima de aquecimento externo --> 11365.1 kW
 Quantidade mínima de resfriamento externo --> 46364.7 kW

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Figura 5.34 – Localização das correntes no diagrama de grade para o quinto caso.

Localização das correntes no Diagrama de Grade do processo:

Corrente quente 21 ---> acima do Pinch.	Corrente quente 13 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 1 ---> abaixo do Pinch.
-----	Corrente quente 14 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 3 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 3 ---> acima e abaixo do Pinch.	Corrente quente 15 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 6 ---> abaixo do Pinch.
-----	Corrente quente 16 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 7 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 1 ---> abaixo do Pinch.	Corrente quente 17 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 8 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 2 ---> abaixo do Pinch.	Corrente quente 18 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 9 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 4 ---> abaixo do Pinch.	Corrente quente 19 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 10 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 5 ---> abaixo do Pinch.	Corrente quente 20 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 11 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 6 ---> abaixo do Pinch.	-----	Corrente fria 12 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 7 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 2 ---> acima do Pinch.	Corrente fria 14 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 8 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 4 ---> acima do Pinch.	Corrente fria 15 ---> abaixo do Pinch.
Corrente quente 9 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 5 ---> acima do Pinch.	-----
Corrente quente 10 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 13 ---> acima do Pinch.	
Corrente quente 11 ---> abaixo do Pinch.	Corrente fria 16 ---> acima e abaixo do Pinch.	

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

Yu *et al.* (2000) não utilizaram o método *Pinch* de integração energética como base para os cálculos de mínimo consumo de utilidades. Desenvolveram uma programação matemática baseada na utilização conjunta de dois algoritmos de otimização. Através deste desenvolvimento, obtiveram um total de 44,5 MW de utilidades frias e 9,6 MW de utilidades quentes.

A rede de máxima recuperação energética, de acordo com princípios da análise *Pinch*, deveria operar com um mínimo de 11,4 MW de utilidades frias e 46,3 MW de utilidades quentes (resultado obtido neste trabalho). A razão pela qual os resultados de Yu *et al.* (2000) são menores que os apresentados pelo programa em Scilab[®] é a ocorrência de várias violações na diferença mínima de temperatura entre as correntes nos trocadores. Para este trabalho, foi utilizada uma diferença igual a 10°C. No trabalho de Yu *et al.* (2000), a diferença mínima de um dos trocadores (alocado entre as correntes H5 e C12, segundo a rede gerada pelo algoritmo genético juntamente com o *simulated annealing*), chegou a 3°C. Ou seja, com uma violação brusca da diferença mínima de temperatura, há um maior reaproveitamento energético, conseqüentemente, uma maior economia em utilidades. No entanto, os princípios da tecnologia *Pinch* requerem a mínima violação possível do $\Delta T_{\text{mín}}$.

Portanto, os valores obtidos neste trabalho são os mínimos gastos de utilidades, para um $\Delta T_{\text{mín}} = 10^\circ\text{C}$. Para uma rede de trocadores de calor com $\Delta T_{\text{mín}} = 5^\circ\text{C}$, por exemplo, o algoritmo desenvolvido neste trabalho apresenta os valores da Figura 5.35. Nota-se que são menores que os obtidos por Yu *et al.* (2000), garantindo, dessa forma, o menor consumo de utilidades quentes e frias possível para um dado conjunto de correntes de processo.

Figura 5.35 – Valores referentes ao quinto caso para um $\Delta T_{\text{mín}} = 5^\circ\text{C}$.

```

-----
Temperatura pinch do processo --> 172.5 °C
-----
Quantidade mínima de aquecimento externo --> 6099.77 kW
Quantidade mínima de resfriamento externo --> 41099.3 kW
-----

```

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

A seguir, nas Figuras 5.36 e 5.37, é apresentada uma proposta de síntese de rede de trocadores de calor utilizando o consumo mínimo de utilidades para um $\Delta T_{\text{mín}} = 10^\circ\text{C}$. O *software* Hint foi utilizado para ilustrar a alocação dos trocadores na rede. Na Figura 5.36 é apresentada a rede de trocadores de calor para temperaturas acima da temperatura *Pinch* do processo. Já na Figura 5.37, a rede é desenvolvida para temperaturas abaixo do ponto *Pinch*. A rede foi assim dividida apenas para uma melhor visualização do leitor. Os dados referentes a todos os trocadores de calor das Figuras 5.36 e 5.37 estão listados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Dados referentes aos trocadores de calor das Figuras 5.36 e 5.37.

Identificação do trocador	Entalpia transferida (kW)	T _{EQ} (°C)	T _{SQ} (°C)	T _{EF} (°C)	T _{SF} (°C)
T1	9748,8	976,0	714,7	170,0	302,0
T2	6300	714,7	545,8	175,0	196,0
T3	4923	545,8	413,8	170,0	170,2
T4	1604	413,8	370,8	170,0	222,0
T5	2641,4	370,8	300,0	170,4	170,5
HU6	495,1	---	---	170,5	170,5
T7	6402	160,0	135,0	120,0	120,5
T8	385,9	180,0	175,0	122,0	122,5
T9	2954,2	180,0	175,0	130,0	170,0
T10	4923	175,0	150,0	10,0	160,0
T11	962,6	180,0	175,0	90,2	99,0
T12	778	180,0	175,9	68,0	90,0
T13	10530,6	190,0	180,0	170,0	170,4
T14	1875	98,4	48,9	-33,9	79,9
T15	5527,4	102,0	85,0	40,0	90,3
T16	3241	102,0	82,1	68,0	68,5
T17	4666	102,0	73,4	52,0	53,0
T18	3262	44,7	41,8	-5,0	-4,5
T19	1625	97,4	56,7	2,4	2,6
T20	1448	98,4	55,8	-15,0	-14,5
CU21	767	168,0	55,0	---	---
CU22	795	170,0	40,0	---	---
CU23	341	48,9	40,0	---	---
CU24	665	56,7	40,0	---	---
CU25	536	55,8	40,0	---	---
CU26	652	40,0	25,0	---	---
CU27	692	25,0	10,0	---	---
CU28	573	104,7	40,0	---	---
CU29	840	80,0	40,0	---	---
CU30	339	40,0	25,0	---	---
CU31	1553	25,0	-7,4	---	---
CU32	358	57,5	40,0	---	---
CU33	1819	0,0	-11,7	---	---
CU34	529	-96,2	-99,0	---	---
CU35	6690	-28,6	-30,8	---	---

CU36	2045	41,8	40,0	---	---
CU37	184,6	175,9	175,0	---	---
CU38	14681,1	85,0	40,0	---	---
CU39	6863,2	82,1	40,0	---	---
CU40	54381,3	73,4	40,0	---	---
HU41	10867,6	---	---	170,2	170,5

Fonte: Acervo pessoal, 2012.

O quinto estudo de caso deve ser analisado com cautela. É possível observar valores de temperaturas muito altos (976,0°C, por exemplo) ou muito baixos (-104,0°C, por exemplo). Considerando um caso real de aplicação de integração energética, estes valores são inconsistentes e a aplicação em escala industrial do caso se tornaria inviável. É importante ressaltar que este trabalho é focado em apresentar os resultados fornecidos pelo programa desenvolvido em Scilab[®], e este exemplo foi escolhido, pois, contém um grande número de correntes de processo. A sugestão de rede apresentada é apenas uma primeira tentativa, necessitando de otimização e/ou reprojeto. É preciso sempre utilizar o bom senso físico de engenheiro e a experiência com projetos para analisar corretamente a viabilidade real de um projeto.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusão

A análise *Pinch* mostrou-se uma técnica bastante eficiente para o cálculo do consumo mínimo de utilidades térmicas de um processo com organização de trocadores de calor em rede. Além disso, a técnica implementada em Scilab[®] apresentou grande economia de tempo de resolução dos problemas de estudo.

O programa desenvolvido é de fácil implementação, podendo ser aplicado desde a atividades didáticas até a projetos finais de redes de trocadores de calor.

Ademais, o programa apresentou resultados consistentes e satisfatórios tanto para problemas simples quanto para problemas de grande escala, gerando as curvas compostas quentes e frias do processo, a grande curva composta, a “cascata” de fluxo de calor gerada pelo algoritmo da Tabela Problema, a temperatura *Pinch* do processo e também o consumo mínimo de utilidades quentes e frias para uma diferença de temperatura escolhida pelo usuário. Além disso, também fornece a localização das correntes do processo no diagrama de grade, facilitando o projeto de uma rede de trocadores de calor.

O programa em questão também permite que o usuário insira facilmente os dados de entrada através de janelas interativas ou comunicando-se com o programa Excel[®]. As duas formas são de fácil entendimento e possibilitam ao usuário a liberdade de escolha.

Finalizando, o programa também tem flexibilidade, permitindo ao usuário acesso às linhas de comando do mesmo através do *software* Scilab[®], podendo realizar mudanças da forma que desejar, possibilitando o contato com cada etapa de desenvolvimento dos princípios da análise *Pinch* até antes da síntese de redes de trocadores de calor.

6.2 Trabalhos futuros

Para dar continuidade a este trabalho, as próximas etapas são sugeridas:

- Implementação de algoritmos para cálculo da área total de uma rede de trocadores de calor, bem como custos de capital e operacional desta, já considerando valores de coeficiente de transferência de calor;
- Geração automática de uma sugestão de rede de trocadores de calor baseada em regras heurísticas juntamente com princípios da análise *Pinch*, visando otimizar simultaneamente custo e áreas totais e também consumo energético;

- Criação de uma interface própria para o programa computacional, sem a necessidade de utilização do Scilab[®] como *software* de suporte.

CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, S. **Heat exchanger networks: Cost trade-offs in energy and capital**. UMIST, Manchester, Reino Unido, 1985.
- AHMAD, S.; HUI, D. C. W. Heat recovery between areas of integrity. **Computers and Chemical Engineering**, v. 15, n. 12, p. 809-832, 1991.
- AHMAD, S.; LINNHOFF, B. Cost optimum heat exchanger networks – 1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost. **Computers and Chemical Engineering**, v. 14, n. 7, p. 729-750, 1990.
- ASPEN TECHNOLOGY, Inc. Disponível em: <<http://www.aspentech.com/>>. Acesso em: 24 set. 2012.
- ASSIS, A. J. **Análise e otimização de processos químicos**. Uberlândia: UFU/Faculdade de Engenharia Química/Núcleo de Simulação, Controle e Otimização de Processos, 2006. Apostila.
- BJÖRK, K. M.; NORDMAN, R. Solving large-scale retrofit heat exchanger network synthesis problems with mathematical optimization methods. **Chemical Engineering and Processing**, v. 44, p. 869-876, 2005.
- BOGATAJ, M.; KRAVANJA, Z. An alternative strategy for global optimization of heat exchanger networks. **Applied Thermal Engineering**, v. 43, p. 75-90, 2012.
- BRIONES, V.; KOKOSSIS, A. C. Hypertargets: a conceptual programming approach for the optimization of industrial heat exchanger networks – I. Grassroot design and network complexity. **Chemical Engineering Science**, v. 54, p. 519-539, 1999a.
- BRIONES, V.; KOKOSSIS, A. C. Hypertargets: a conceptual programming approach for the optimization of industrial heat exchanger networks – II. Retrofit design. **Chemical Engineering Science**, v. 54, p. 541-561, 1999b.
- CARLSSON, A.; FRANCK, P.; BERNTSSON, T. Design better heat exchanger network retrofits. **Chem. Eng. Prog.**, v. 89, n. 3, p. 87-96, 1993.
- CASTIER, M. Pinch analysis revisited: new rules for utility targeting. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, p. 1653-1656, 2007.
- CIRIC, A. R.; FLOUDAS, C. A. Application of the simultaneous match-network optimization approach to the pseudo-pinch problem. **Computers and Chemical Engineering**, v. 14, n. 3, p. 241-250, 1990.
- CROFT, N. APCER BRASIL. **O modelo de gestão de energia de acordo com a norma ISO 50001**. Disponível em: <<http://www.apcer.com.br>>. Acesso em: 30 set. 2012.
- DEZORDI, L. L. **Fundamentos de economia**. Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2008. 164 p.

- ESCOBAR, M.; TRIERWEILER, J. O. Optimal heat exchanger network synthesis: A case study comparison. **Applied Thermal Engineering**, v. 51, p. 801-826, 2013.
- FURMAN, K. C.; SAHINIDIS, N. V. A critical review and annotated bibliography for heat exchanger network synthesis in the 20th century. **Ind. Eng. Chem**, v. 41, p. 2335-2370, 2002.
- GHANDEHARIUN, S.; ROSEN, M. A.; NATERER, G. F.; WANG, Z. Pinch analysis for recycling thermal energy in the Cu-Cl cycle. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, p. I6535-I6541, 2012.
- GUNDERSEN, T. **A process integration**. PRIMER, SINTEF Energy Research, International Energy Agency, 2000.
- HOU, S.; ZHANG, Z.; HUANG, Z.; XIE, A. Performance optimization of solar multi-stage flash desalination process using pinch technology. **Desalination**, v. 220, p. 524-530, 2008.
- HUI, C. W.; AHMAD, S. Total site heat integration using the utility system. **Computers and Chemical Engineering**, v. 18, n. 8, p. 729-742, 1994.
- KEMP, I. C. **Pinch analysis and process integration**: a user guide on process integration for the efficient use of energy. 2. ed. Grã-Bretanha: ELSEVIER, 2007. 396 p.
- KHORASANY, R. M.; FESANGHARY, M. A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks. **Computers and Chemical Engineering**, v. 33, p. 1363-1330, 2009.
- KLEMEŠ, J.; PTÁČNÍK, R. Computer-aided synthesis of heat exchange network. **Heat Recovery Systems**, v. 5, n. 5, p. 425-435, 1985.
- LABABIDI, H. M. S.; ALATIQUI, I. M.; NAYFEH, L. J. Energy retrofit study of an ammonia plant. **Applied Thermal Engineering**, v. 20, p. 1495-1503, 2000.
- LINNHOF, B. *et al.* **A user guide on process integration for the efficient use of energy**. The Institute of Chemical Engineers, Londres, 1982.
- LINNHOF, B.; FLOWER, J. R. Synthesis of heat exchanger networks – I. Systematic generation of energy optimal networks. **AIChE Journal**, v. 24, n.4, p. 663-642, 1978.
- LINNHOF, B.; FLOWER, J. R. Thermodynamic analysis in the design of process networks. **Computers and Chemical Engineering**, v. 3, p. 283-291, 1979.
- LINNHOF, B.; HINDMARSH, E. The pinch design method for heat-exchanger networks. **Chemical Engineering Science**, v. 38, n. 5, p. 745-763, 1983.

- LINNHOFF, B.; AHMAD, S.; SMITH, R. Cost optimum heat exchanger networks – 2. Targets and design for detailed capital cost models. **Computers and Chemical Engineering**, v. 14, n. 7, p. 751-767, 1990.
- MÁRTIN, A.; MATO, F. A. Hint: an educational software for heat exchanger network design with the pinch method. **Education for Chemical Engineers**, v. 3, p. e6-e14, 2008.
- MASSO, A. H.; RUDD, D. F. The synthesis of systems design – II. Heuristic structuring. **AIChE Journal**, v. 15, p. 10-17, 1969.
- MATIJAŠEVIČ, L.; OTMAČIČ, H. Energy recovery by pinch technology. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, p. 477-484, 2002.
- MATSUDA, K.; HIROCHI, Y.; TATSUMI, H.; SHIRE, T. Applying heat integration total site based pinch technology to a large industrial area in Japan to further improve performance of highly efficient process plants. **Energy**, v. 34, p. 1687-1692, 2009.
- ÖZKAN, S.; DİNÇER, S. Application for pinch design of heat exchanger networks by use of a computer code employing an improved problem algorithm table. **Energy Conversion and Management**, v. 42, p. 2043-2051, 2001.
- PAPOULIAS, S. A.; GROSSMANN, I. E. A structural optimization approach in process synthesis – II – Heat recovery networks. **Computers and Chemical Engineering**, v. 7, n. 6, p. 707-721, 1983.
- PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 198 p.
- PinCH, Inc. **PinCH saves energy and cost**. Disponível em: < <http://www.pinch-analyse.ch/>>. Acesso em: 24 set. 2012.
- ProSim, Inc. **ProSim software & services in process simulation**. Disponível em: < <http://www.prosim.net/fr/index.php>>. Acesso em: 24 set. 2012.
- QUEIROZ, E. M.; AHÓN, V. R. R.; COSTA, A. L. H. Incertezas na síntese de redes de trocadores de calor: estudos de caso. In: PDPETRO, 4., 2007, Campinas. **Resumo...** Campinas, 2007. Disponível em: < http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_ABS_4_2_0198-3.pdf>. Acesso em: 23 jan 2012.
- QUIJERA, J. A.; LABIDI, J. Pinch and exergy based thermosolar integration in a dairy process. **Applied Thermal Engineering**, v. 50, p. 464-474, 2013.
- RAVAGNANI, M. A. S. S.; SUÁREZ, J. A. C. **Redes de trocadores de calor**. 1 ed. Brasil: Eduem, 2012.
- SERNA, M.; JIMÉNEZ, A. An area targeting algorithm for the synthesis of heat exchanger networks. **Chemical Engineering Science**, v. 59, p. 2517-2520, 2004.

SCILAB – Open source software for numerical computation. Disponível em: <<http://www.scilab.org>>. Acesso em: 20 jan 2013.

SMITH, R. **Chemical process design and integration**. 2. ed. Inglaterra: John Wiley and Sons Ltd. 687 p.

UMEDA, T.; ITOH, J. SHIROKO, K. Heat exchanger system synthesis. **Chem. Eng. Prog.**, v. 74, n. 7, p. 70-76, 1978.

YU, H.; FANG, H.; YAO, P.; YUAN, Y. A combined genetic algorithm/simulated annealing algorithm for large scale system energy integration. **Computers & Chemical Engineering**, v. 24, p. 2023-2035, 2000.