INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE UNIDADES DE DESTILAÇÃO E COQUEAMENTO: ESTUDO DE *RETROFIT* E DE ASPECTOS DE PROCESSO

THIAGO PAULO AMARAL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

ESCOLA DE QUÍMICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

THIAGO PAULO AMARAL

INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE UNIDADES DE DESTILAÇÃO E COQUEAMENTO: ESTUDO DE *RETROFIT* E DE ASPECTOS DE PROCESSO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadores:
Fernando Luiz Pellegrini Pessoa – D.Sc.
Eduardo Mach Queiroz – D.Sc.

Rio de Janeiro

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

A485i Amaral, Thiago Paulo.

Integração Energética de Unidades de Destilação e Coqueamento: Estudo de *Retrofit* e de Aspectos de Processo/ Thiago Paulo Amaral. – 2013.
110 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2013.

Orientadores: Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa

1. Integração Energética. 2. Rede de Trocadores de Calor. 3. Metodologia *Pinch*. 4. *Retrofit*. 5. Integração entre Unidades. 6. Unidade de Destilação. 7. Unidade de Coqueamento. – Dissertações. I. Queiroz, Eduardo Mach (Orient.). II. Pessoa, Fernando Luiz Pellegrini (Orient.). III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química. IV. Título.

CDD: 665.53

INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE UNIDADES DE DESTILAÇÃO E COQUEAMENTO: ESTUDO DE *RETROFIT* E DE ASPECTOS DE PROCESSO

THIAGO PAULO AMARAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado por:

_____
Eduardo Mach Queiroz – D.Sc.
(Orientador)

_____
Fernando Luiz Pellegrini Pessoa – D.Sc.
(Orientador)

_____
Verônica Maria de Araújo Calado, D.Sc.

_____
Fabio dos Santos Liporace, D.Sc.

_____
Rogerio Geaquinto Herkenhoff, D.Sc.

Escola de Química
Universidade Federal do Rio de Janeiro
2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Marcos e Nilde, que com dificuldades, mas também com muito amor e carinho, cuidaram tão bem de mim e de meus irmãos, provendo tudo o que foi necessário para que pudéssemos realizar nossos estudos. Tudo que sou hoje como pessoa e todas as minhas conquistas pessoais e profissionais eu devo a vocês.

A minha esposa Vanice, por ser minha mulher, minha amiga e companheira, e que dentre tantas obrigações profissionais, ainda consegue se desdobrar para cuidar de mim, de nossa filha e de nosso lar. Obrigado por ser parte da minha vida.

A minha filha Maria Eduarda, que enche meus dias de alegria desde que veio ao mundo. Tudo que faço hoje e até o fim de meus dias é para você.

Aos meus orientadores Fernando Pellegrini e Eduardo Mach, por toda contribuição ao trabalho e pela paciência com a “avalanche” de e-mails com as inúmeras dúvidas.

Ao meu gerente Washington Geraldelli, pelo incentivo para realização do Mestrado e por todo apoio durante a realização do mesmo.

A todos os colegas da gerência CS, principalmente aos do grupo de Coque e aos do grupo de Integração Energética, pelo espírito de equipe em me substituir nas atividades que não pude realizar durante as horas de dedicação ao Mestrado.

A PETROBRAS, por incentivar seus funcionários a continuarem seus estudos, acreditando que a capacitação contínua é a melhor forma de fazer com que nossa empresa atinja seus objetivos e contribua para o crescimento de nosso país.

RESUMO

Amaral, Thiago Paulo. **Integração Energética de Unidades de Destilação e Coqueamento: Estudo de *Retrofit* e de Aspectos de Processo**. Orientadores: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Eduardo Mach Queiroz; Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013. Dissertação (Mestre em Ciências).

A integração energética, através da síntese de redes de trocadores de calor eficientes, é um atributo essencial para o projeto e operação de plantas industriais nos dias de hoje. A metodologia *pinch* tem provado ser uma ferramenta poderosa para atingir este objetivo. Estudos de *retrofit* consistem na melhoria de eficiência energética de redes existentes. A integração energética entre unidades pode levar a grande redução de consumo energético, porém aspectos como a flexibilidade e a operacionalidade das unidades devem ser levados em consideração. As Unidades de Destilação Atmosférica e à Vácuo (UDAV) e as Unidades de Coqueamento Retardado (UCR) apresentam elevado consumo energético em refinarias de petróleo, devido às altas vazões processadas e altas temperaturas envolvidas.

Este trabalho apresenta um estudo de *retrofit* de uma UDAV e uma UCR, assim como a integração energética em conjunto destas unidades. A integração entre as unidades foi realizada através da variação de temperatura de uma corrente de processo comum a ambas, utilizando esta abordagem em conjunto com um procedimento de *retrofit* (baseado na metodologia *pinch*) disponível na literatura. O objetivo foi verificar a adequabilidade dos métodos utilizados para os casos industriais estudados, através da avaliação técnica e econômica dos resultados obtidos.

Além disso, também é apresentado um estudo de integração energética de uma UCR, levando em conta os aspectos de processo típicos desta unidade na síntese da rede de trocadores e modificações nestes de forma a melhorar a eficiência energética da unidade.

Palavras-chave: Integração Energética. Rede de Trocadores de Calor. Metodologia *Pinch*. *Retrofit*. Integração entre unidades. Unidade de Destilação. Unidade de Coqueamento.

ABSTRACT

Amaral, Thiago Paulo. **Heat Integration of Crude Distillation and Delayed Coking Units: Retrofit and Process Aspects Study**. Supervisors: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa and Eduardo Mach Queiroz; Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013. Dissertation (Master on Science).

Heat integration, by means of an efficient heat exchanger network, is an essential feature for design and operation of industrial plants nowadays. Pinch method has been proving to be a powerful tool to reach this goal. Retrofit studies consist on energy efficiency improvement of existing heat exchanger network. Heat integration among plants can lead to great energy savings, but their flexibility and operability shall be considered. Crude Distillation Units and Delayed Coking Units are great energy consumers in a petroleum refinery, due to high flowrates and high temperatures involved.

This work presents a Crude Distillation and Delayed Coking retrofit study, as well as the heat integration between these two plants. Heat integration between units was achieved by temperature variation of a process stream common for both units, using this approach together with a retrofit procedure (based on pinch method) available in literature. The goal was to verify if the methodologies were applicable to some industrial cases by evaluating technical and economical results.

Furthermore, this work also presents a Delayed Coking heat integration study, considering typical process aspects of this unit on heat exchanger network synthesis and process modifications in order to improve energy efficiency.

Keywords: Heat Integration. Heat Exchanger Network. Pinch Method. Retrofit. Integration between plants. Crude Distillation. Delayed Coking.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Fator de reutilização de área	Adimensional
ΔH	Diferença de entalpia	(Gcal / h)
ΔT	Diferencial de temperatura	(°C)
a	Coeficiente da equação de custo de trocadores	(US$)
A	Área de troca térmica de trocador	(m^2)
A_o	Área total de troca térmica em rede existente	(m^2)
A_{add}	Área adicional requerida de troca térmica	(m^2)
A_e	Área efetiva de troca térmica em rede existente	(m^2)
A_{min}	Área mínima de troca térmica requerida para rede nova	(m^2)
A_s	Área típica de cascos adicionais	(m^2)
b	Coeficiente da equação de custo de trocadores	(US$ / m^2)
C	Custo de trocador de calor	(US$)
C_0	Custo de reutilização da rede existente	(US$)
C_a	Custo total de área de troca térmica	(US$)
C_{add}	Custo de área adicional de troca térmica	(US$)
C_{cap}	Custo de capital da rede	(US$ / ano)
C_t	Custo total de trocadores	(US$)
CP	Taxa de capacidade calorífica	(Gcal / h °C)
C_{ns}	Custo médio dos novos cascos	(US$)
e	Coeficiente da equação de custo de trocadores	Adimensional
f	Fator de anualização	Adimensional
HTC	Coeficiente de transferência de calor	(kcal / h m^2 °C)
i	Taxa de atratividade anual	%
n	Vida útil	Anos
N_{add}	Número estimado de cascos adicionais	Adimensional
Q_f	Consumo de utilidade fria	(Gcal / h)
Q_h	Consumo de utilidade quente	(Gcal / h)
T	Temperatura	(°C)
X_p	Medida de aproximação do limite termodinâmico	Adimensional

LISTA DE ABREVIATURAS

SIGLA	Descrição
AtHENS	*Automatic Heat Exchanger Network Synthesis* (*software* para síntese de redes de trocadores de calor)
GC	Gás Combustível
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
PTT	*Pinch Technology Toolbox (software* para síntese de redes de trocadores de calor)
RPA	*Remaining Problem Analysis* (análise do problema remanescente)
RV	Resíduo de Vácuo
SPRINT	*Software* para síntese de redes de trocadores de calor
UCR	Unidade de Coqueamento Retardado
UDAV	Unidade de Destilação Atmosférica e à Vácuo

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Exemplo de curva composta 16
Figura 3.2: Exemplo de grande curva composta 18
Figura 3.3: Custos x ΔT mínimo 19
Figura 4.1: Projeto novo de UCR – Custos x ΔT mínimo 30
Figura 4.2: Caso original - Grande curva composta (ΔT mínimo = 20°C) 32
Figura 4.3: Caso original - Esquema da rede obtida 33
Figura 4.4: Caso original - Esquema da nova rede obtida 36
Figura 4.5: Caso modificado 1 - Grande curva composta (ΔT mínimo = 20°C) 40
Figura 4.6: Caso modificado 1 - Esquema da rede obtida 41
Figura 4.7: Caso modificado 2 - Grande curva composta (ΔT mínimo = 20°C) 43
Figura 4.8: Caso modificado 2 - Esquema da rede obtida 44
Figura 4.9: Caso modificado 3 - Grande curva composta (ΔT mínimo = 20°C) 46
Figura 4.10: Caso modificado 3 - Esquema da rede obtida 47
Figura 5.1: Esquema da rede existente da UCR 51
Figura 5.2: *Retrofit* UCR - Grande curva composta (ΔT mínimo = 26,7°C) 54
Figura 5.3: *Retrofit* UCR - Esquema da rede reestruturada 1 55
Figura 5.4: *Retrofit* UCR - Esquema da rede reestruturada 2 56
Figura 5.5: *Retrofit* UCR - Esquema da rede reestruturada 3 57
Figura 5.6: Esquema da rede existente da UDAV 61
Figura 5.7: *Retrofit* UDAV - Grande curva composta (ΔT mínimo = 24,9°C) 64
Figura 5.8: *Retrofit* UDAV – Esquema da rede reestruturada 1 65
Figura 5.9: *Retrofit* UDAV – Esquema da rede reestruturada 2 66
Figura 5.10: *Retrofit* conjunto – Grande curva composta UCR, variando T de entrada do RV 69
Figura 5.11: *Retrofit* conjunto – Grande curva composta UDAV, variando T de saída do RV 71
Figura 5.12: *Retrofit* conjunto – Esquema da rede reestruturada 1 para a UCR 74
Figura 5.13: *Retrofit* conjunto – Esquema da rede reestruturada 2 para a UCR 76
Figura 5.14: *Retrofit* conjunto – Esquema da rede reestruturada para a UDAV 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Parâmetros de projeto para trocadores 27
Tabela 3.2: Dados de processo e econômicos das utilidades 28
Tabela 4.1: Projeto novo de UCR – Dados das correntes 29
Tabela 4.2: ΔT mínimo x Custo total, com desvios em relação ao ótimo 31
Tabela 4.3: Caso original - Parâmetros da rede obtida 33
Tabela 4.4: Comparação entre a rede obtida antes e após otimização 34
Tabela 4.5: Comparação entre as redes obtidas para o caso original 37
Tabela 4.6: Comparação entre as redes obtidas antes e após otimização 37
Tabela 4.7: Comparação entre as redes do caso original e modificado 1 42
Tabela 4.8: Caso modificado 2 – corrente fria adicionada (vapor a ser gerado) 43
Tabela 4.9: Comparação das redes anteriores com o caso modificado 2 45
Tabela 4.10: Caso modificado 3 – corrente fria C3 com metade do ΔH total 46
Tabela 4.11: Comparação entre as redes de todos os casos analisados 48
Tabela 4.12: Comparação entre as redes otimizadas 49
Tabela 5.1: *Retrofit* UCR – Dados das correntes 51
Tabela 5.2: Dados dos trocadores da rede existente da UCR 52
Tabela 5.3: Consumos de utilidades da rede existente da UCR 52
Tabela 5.4: *Retrofit* UCR – resultados do *targeting* 53
Tabela 5.5: *Retrofit* UCR - Dados da rede reestruturada 1 55
Tabela 5.6: *Retrofit* UCR - Dados da rede reestruturada 2 56
Tabela 5.7: *Retrofit* UCR - Dados da rede reestruturada 3 57
Tabela 5.8: *Retrofit* UDAV – Dados das correntes 60
Tabela 5.9: Dados dos trocadores da rede existente da UDAV 62
Tabela 5.10: Consumos de utilidades da rede existente da UDAV 62
Tabela 5.11: *Retrofit* UDAV – Resultados do *targeting* 63
Tabela 5.12: *Retrofit* UDAV - Dados da rede reestruturada 1 65
Tabela 5.13: *Retrofit* UDAV - Dados da rede reestruturada 2 67
Tabela 5.14: *Retrofit* conjunto – Resultados do *targeting* da UCR, variando T de RV 72
Tabela 5.15: *Retrofit* conjunto – Resultados do *targeting* da UDAV, variando T de RV 73
Tabela 5.16: *Retrofit* Conjunto – Somatório dos custos totais, variando a T de RV ... 74
Tabela 5.17: *Retrofit* conjunto - Dados da rede reestruturada 1 para a UCR 75
Tabela 5.18: *Retrofit* conjunto - Dados da rede reestruturada 2 para a UCR 76
Tabela 5.19: *Retrofit* conjunto - Dados da rede reestruturada para a UDAV 78
Tabela 5.20: *Retrofit* unidades isoladas x unidades em conjunto (previsto x obtido) 79

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Objetivo do trabalho 2
1.2. Descrição dos próximos capítulos 3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
2.1. Síntese de redes 4
2.2. Retrofit 7
2.3. Integração entre unidades 10
2.4. Aplicações em Unidades de Destilação e de Coqueamento Retardado 13
3. METODOLOGIA 15
3.1. Método pinch 15
3.1.1 Etapa de *targeting* 15
3.1.2 Etapa de síntese da rede 19
3.2. Método para retrofit 22
3.3. Método para integração entre unidades 25
3.4. Parâmetros de projeto 26
4. INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE PROJETO NOVO DE UCR 29
4.1. Caso original 30
4.2. Caso modificado 1 – análise sem refervedor da desbutanizadora 38
4.3. Caso modificado 2 – análise com geração de vapor 42
4.4. Caso modificado 3 – análise refervedor processo + utilidade 45
5. OTIMIZAÇÃO DE REDES DE TROCADORES DE CALOR DE UNIDADES EXISTENTES (*RETROFIT*) 50
5.1. Retrofit da UCR 50
5.2. Retrofit da UDAV 59
5.3. Retrofit da UCR e UDAV em conjunto 68
5.3.1 Etapa de *targeting* (definição da temperatura ótima de RV) 68
5.3.2 Etapa de síntese da rede da UCR 74
5.3.3 Etapa de síntese da rede da UDAV 77
5.4. Comparação dos resultados 79
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 84
APÊNDICE: DADOS DAS REDES OBTIDAS 87

1. INTRODUÇÃO

A integração energética é um ramo da Engenharia de Processos que começou a ser estudado em maior intensidade nos anos 70, após a crise mundial de petróleo. Até então, a energia proveniente do petróleo era considerada barata, não sendo portanto sua economia motivo de grandes preocupações. Em épocas mais recentes, a globalização, levando ao aumento de competitividade em todos os setores industriais, e as restrições ambientais, reduzindo cada vez mais a tolerância em relação à emissão de poluentes, consolidaram de vez o conceito de eficiência energética no projeto e operação de plantas industriais.

Neste contexto, as redes de trocadores de calor têm papel de grande importância na redução do consumo energético de uma planta industrial, resultando em menores custos operacionais. Basicamente, consistem no aproveitamento da energia de correntes de processo que precisam ser resfriadas (correntes quentes) para fornecer calor as que necessitam ser aquecidas (correntes frias). Esta troca de energia é realizada em equipamentos denominados trocadores de calor. Com isso, a síntese de redes de trocadores de calor é a procura do ponto ótimo entre o custo dos equipamentos e a correspondente redução do consumo de utilidades. Em outras palavras, o objetivo da síntese é a procura da rede que apresente o mínimo custo total, sendo este a soma do custo de capital e custo operacional.

Como os processos industriais, em geral, possuem um grande número de correntes quentes e frias, a síntese de redes de trocadores se torna um problema de complexidade elevada, devido às inúmeras redes que podem ser obtidas através das várias combinações possíveis entre as correntes disponíveis. Além disso, outros aspectos tornam a síntese de redes desafiadora, tais como as diversas possibilidades de projeto dos trocadores (tipo de material, configuração de escoamento), as propriedades físicas das correntes (que podem variar com a temperatura), as limitações de pressão, aspectos de operacionalidade, flexibilidade, entre outros.

Estes fatores levaram a um grande interesse de diversos pesquisadores pelo tema nos últimos 40 anos (como por exemplo PONTON e DONALDSON (1974), LINNHOFF e HINDMARSH (1983), YEE e GROSSMANN (1990), LIPORACE (2000) e HERKENHOFF (2008)). Neste período, uma vasta literatura foi publicada, incluindo

abordagens dos mais diferentes tipos, e de onde se podem observar duas principais linhas de pesquisa: a termodinâmica e a de programação matemática, cada qual com suas vantagens e desvantagens.

Além da síntese de redes de trocadores para projetos novos, outra área de grande interesse para a indústria e também tema de muitos trabalhos é a de melhoria de eficiência de redes já existentes, usualmente denominada *retrofit*. Este tipo de projeto pode ser aplicado tanto para projetos antigos, que não foram projetados originalmente sob os conceitos de integração energética, como também para projetos que mudaram de condição operacional e/ou sofreram aumento de carga, levando a necessidade de readaptação para voltar à condição ideal de eficiência energética. Para este tipo de projeto, além das mesmas dificuldades encontradas para a síntese de redes novas, adicionalmente se enfrenta a questão da própria rede existente, que na prática se constitui em uma grande restrição ao problema de integração.

Tanto para projetos novos como para projetos de *retrofit*, normalmente a integração energética é conduzida individualmente para cada unidade ou sistema de uma determinada planta industrial. Porém, a integração energética entre duas ou mais unidades pode se tornar vantajosa, apresentando um efeito sinérgico, ou seja, a integração conjunta apresentar custo global menor que a soma dos custos individuais de cada unidade integrada energeticamente de forma isolada. Por outro lado, muitos fatores podem levar a desencorajar este tipo de abordagem, uma vez que a flexibilidade e a operacionalidade das plantas podem ser afetadas. Apesar das dificuldades, este tema também tem sido de grande interesse na área de integração energética, devido à significante redução de energia que esta abordagem pode resultar.

1.1. Objetivo do trabalho

O objetivo principal desta dissertação é realizar um estudo de melhoria de eficiência energética (*retrofit*) das redes de trocadores de calor de uma Unidade de Destilação de Petróleo Atmosférica e a Vácuo (UDAV) e uma Unidade de Coqueamento Retardado (UCR) de uma refinaria brasileira. Serão estudadas formas de integrar energeticamente as unidades (UDAV e UCR) individualmente e também serão exploradas as oportunidades de integração em conjunto. Serão utilizadas

metodologias disponíveis na literatura, adaptando-as para os casos industriais de estudo. As redes obtidas serão comparadas no que diz respeito aos aspectos técnicos e econômicos de cada uma das soluções propostas, com o intuito de se verificar a adequabilidade das metodologias.

Antes de efetuar os estudos de *retrofit*, objetivando mostrar a aplicação da metodologia *pinch* tradicional em um projeto novo típico de UCR, será efetuada a integração energética levando-se em conta aspectos de processo deste tipo de unidade e de modo a selecionar as modificações de processo que resultem em uma melhor eficiência energética.

1.2. Descrição dos próximos capítulos

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos relativos à integração energética, focando principalmente nos que tratam sobre *retrofit* e nos que estudam a integração conjunta entre diferentes unidades de processo. No capítulo 3, são apresentadas as metodologias que serão utilizadas no trabalho, detalhando suas vantagens e limitações. Nos capítulos 4 e 5, as metodologias foram aplicadas a três casos industriais. No capítulo 4, é apresentada a integração energética de um projeto novo de UCR, discutindo alguns aspectos típicos relativos ao estudo de integração deste tipo de unidade. No capítulo 5, é apresentado um estudo de melhoria de eficiência energética (*retrofit*) de uma UCR e de uma UDAV existente. As unidades foram avaliadas isoladamente e em seguida foram exploradas oportunidades de integração conjunta entre estas unidades. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos e por fim, as referências bibliográficas utilizadas na realização do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Síntese de redes

Inicialmente, as tentativas de resolução do problema de síntese de redes de trocadores de calor foram realizadas através de regras baseadas na experiência prévia dos projetistas, as chamadas regras heurísticas. Dentro desta linha se destacaram os trabalhos de PONTON e DONALDSON (1974) e RUDD *et al.* (1973). Porém a utilização destes métodos não garantia a obtenção de um custo ótimo, até porque este era até então desconhecido e não existia uma regra heurística que obtivesse sempre os melhores resultados.

A linha de pesquisa com base em conceitos termodinâmicos iniciou-se por volta da década de 70 utilizando os conceitos da primeira e segunda lei da termodinâmica. As técnicas geralmente utilizam a estratégia sequencial, sendo realizado um acompanhamento passo a passo para a resolução do problema, com a interferência do projetista. O principal método desta linha de pesquisa é a metodologia *pinch*, apresentada por LINNHOFF e HINDMARSH (1983). Esta metodologia não só calcula metas de projeto (consumo mínimo de utilidades, área mínima de troca, entre outras) como também apresenta regras de fácil uso para a obtenção destas metas. Este, ainda hoje, é o método mais utilizado e difundido para a síntese de redes novas e possui ampla aceitação industrial.

Apesar da metodologia *pinch* se caracterizar pela construção manual e gradual da rede, alguns trabalhos procuraram automatizar o processo de montagem, ainda tendo como base os conceitos do método tradicional. LIPORACE (1996) propôs em sua dissertação de mestrado um método para síntese automática de redes com o consumo mínimo de utilidades, com uma modificação da regra original do método para a síntese ao redor do *pinch* e utilizando regras heurísticas para a síntese afastada deste. Posteriormente, em sua tese de doutorado, LIPORACE (2000) apresentou uma metodologia para a evolução estrutural desta rede através de um procedimento de identificação e eliminação dos ciclos formados na rede original e posteriormente restaurando o diferencial mínimo de temperatura dos trocadores. Os algoritmos propostos nestes trabalhos foram reunidos no *software Automatic Heat Exchanger Network Synthesis* (AtHENS).

Outro procedimento baseado na metodologia *pinch* foi proposto por OLIVEIRA (2001) em sua tese de doutorado. O procedimento apresentado consiste na síntese de redes incorporando aspectos de controle ainda em sua fase de concepção. O método parte de uma rede inicial com mínimo consumo de utilidades (obtida pela metodologia *pinch* tradicional). Em seguida esta rede é evoluída, tornando as redes resultantes controláveis (adaptando-as a um determinado cenário de perturbações) e utilizando seus custos totais como parâmetro para a quebra ou não dos ciclos. O procedimento foi capaz de gerar redes controláveis e com custos aceitáveis nos exemplos estudados. Os resultados mostraram ainda o compromisso existente entre o custo inicial dos equipamentos e as características de controle da rede.

A linha de procedimentos com base na chamada programação matemática, apesar de ter sido iniciada antes, teve um maior impulso a partir da década de 90, principalmente devido à evolução dos computadores e a melhoria dos métodos numéricos. A abordagem parte de uma superestrutura da rede que pode conter todas (ou quase todas) as possíveis combinações de trocas entre as correntes e a posterior otimização desta, tendo normalmente como função objetivo o custo total da rede. Este tipo de abordagem tem como vantagem a possibilidade de realmente se obter o ótimo global. Outra vantagem é facilitar o uso a usuários com pouca experiência, desde que haja uma ferramenta de fácil interação. Por outro lado, devido a geralmente este tipo de abordagem se traduzir em um método automatizado, com pouca ou nenhuma interação com o usuário, pode levar a soluções não viáveis tecnicamente, caso as restrições necessárias não sejam consideradas corretamente. Outra desvantagem é que como geralmente a função objetivo é não linear, os modelos matemáticos para resolução desta são de complexidade elevada, podendo aumentar muito o esforço computacional.

Dentre alguns dos primeiros trabalhos desenvolvidos nesta linha podem-se citar FLOUDAS *et al.* (1986), que utilizaram programação não-linear para a síntese automática de configurações ótimas de redes, e YEE e GROSSMANN (1990) que utilizaram programação não-linear inteira mista para a síntese de redes, a partir de uma superestrutura com algumas modificações. MIZUTANI (2003), em sua tese de doutorado, também utilizou programação matemática para realizar a síntese de redes de trocadores com o projeto detalhado dos mesmos. O método consiste na

proposta de um modelo de projeto ótimo dos trocadores através da resolução de um problema não-linear inteiro misto e a inclusão deste modelo em uma superestrutura, que será objeto de otimização, também através de programação matemática, resultando no projeto final da rede.

Outro método muito utilizado para lidar com a não-linearidade da função objetivo deste tipo de problema é um método estocástico denominado *simulated* annealing, sendo DOLAN *et al.* (1989) os primeiros a utilizar esta técnica para a síntese de redes.

Um painel bem amplo sobre as publicações dos trabalhos na área, tanto da linha baseada em conceitos termodinâmicos como da linha baseada em programação matemática, assim como um histórico da evolução destes métodos pode ser encontrado em um extenso levantamento bibliográfico realizado por FURMAN e SAHINIDIS (2002). A grande maioria dos trabalhos mais recentes sobre síntese de redes está mais focado em assuntos específicos e não tanto no desenvolvimento da metodologia.

Como exemplo recente ainda focado no desenvolvimento da metodologia de síntese pode ser citado o trabalho de SILVA (2009), que propôs um método para obtenção de redes de trocadores de calor com custo mínimo de investimento. O método baseia-se em um modelo de otimização de superestruturas, sendo a solução obtida utilizando um método matemático conhecido como enxame de partículas. A metodologia ainda incorpora um modelo para dimensionamento rigoroso, tanto térmico quanto hidráulico, dos trocadores de calor. Foram avaliados casos de literatura e um caso real, sendo o método capaz de obter redes de menor custo.

Outro exemplo recente também focado no desenvolvimento da metodologia é o trabalho de SANTANA (2012), que apresentou um método para síntese de redes de trocadores de calor que é um híbrido da metodologia *pinch* com métodos de programação matemática e procedimentos evolutivos. A síntese é feita gradualmente, porém o programa sugere automaticamente a próxima troca a ser realizada, através da otimização da superestrutura remanescente. Isto permite que sejam levadas em conta as restrições de processo sem necessidade de formulação matemática das mesmas, tornando o modelo matemático menos complexo. Para os exemplos estudados, foram obtidas redes energeticamente eficientes, baratas e simples.

2.2. Retrofit

O estudo de *retrofit* tem como objetivo otimizar uma rede já existente, para isso procurando aumentar a recuperação de energia utilizando o máximo possível os trocadores já existentes, ou seja, adicionando o mínimo possível de área nova de troca térmica. As abordagens utilizadas para o problema de *retrofit* têm sido as mesmas utilizadas para a síntese de novas redes, porém ao contrário desta última, ainda não existe uma técnica que possua uma grande aprovação no meio industrial (HERKENHOFF, 2008). Este fato é uma das grandes motivações desta tese, estudar a aplicabilidade de um dado método para um caso industrial real e complexo.

Alguns dos primeiros trabalhos publicados nesta área investiram na mesma metodologia consagrada para a síntese de novas redes: a metodologia *pinch.* LINNHOFF e WIHTRELL (1986) utilizaram o método *pinch* para realizar o *retrofit* de uma unidade industrial de produção de etileno, conseguindo reduzir o custo de utilidades. TJOE e LINNHOFF (1986) desenvolveram uma metodologia para *retrofit* de redes que inicialmente calcula uma área ótima de troca térmica, baseada na metodologia *pinch,* e a seguir a relaciona com a área existente. A reestruturação da rede é realizada através de reposicionamento de trocadores e eventual adição de área nova de troca, tendo como parâmetro principal de avaliação o tempo de retorno de investimento demandado pelas modificações.

Também na linha termodinâmica, LAKSHMANAN e BANARES-ALCANTARA (1996) desenvolveram uma ferramenta para a realização de *retrofit* de redes através de inspeção. A ferramenta, denominada *Retrofit Thermodynamic Diagram*, consiste em um diagrama onde as correntes são representadas por retângulos de tamanho proporcional a taxa de capacidade calorífica de cada corrente e os trocadores por linhas que unem estes retângulos. A utilização deste diagrama em conjunto com algumas heurísticas permite a escolha das melhores modificações na rede, de forma a reduzir o consumo de utilidades. Os autores aplicaram o método em casos da literatura obtendo melhores resultados. Uma vantagem da metodologia destacada pelos autores é que a lógica envolvida em cada modificação pode ser facilmente entendida e documentada, ao contrário dos métodos de programação matemática, que geralmente operam como uma “caixa preta”. Esta vantagem poderia inclusive contribuir para uma melhor aceitação da metodologia no meio industrial.

LIPORACE (2002) propôs um método para *retrofit* de redes, adaptando para este tipo de problema a metodologia desenvolvida pelo próprio (LIPORACE, 2000). O método consiste inicialmente na obtenção de uma rede como “nova” seguindo a metodologia original, ou seja, obtendo a rede com mínimo consumo de utilidades e evoluindo-a, identificando e quebrando os ciclos conforme economicamente indicado. Em seguida, a rede obtida é comparada com a existente, de forma a identificar as similaridades estruturais entre ambas, definindo assim um conjunto de restrições de combinação, ou seja, obrigatoriedades de troca entre correntes. Por fim, é sintetizada e evoluída uma rede contendo estas similaridades, sendo esta o resultado final do processo de *retrofit*.

A linha de pesquisa matemática também foi utilizada para abordar os problemas de *retrofit*. CIRIC e FLOUDAS (1990) utilizaram um modelo não-linear inteiro misto para otimizar uma superestrutura, incorporando aspectos como seleção de pares de correntes, cálculos de cargas térmicas, trocadores novos e aumento de área para trocadores existentes. YEE e GROSSMANN (1991) propuseram um método em duas etapas, onde na primeira é analisada a viabilidade de cada modificação proposta e na segunda é realizada uma otimização, baseada em programação não-linear inteira mista.

Alguns trabalhos procuraram unir aspectos de ambas as linhas, como por exemplo ASANTE e ZHU (1996), que propuseram um método automático para a realização de *retrofit* de redes utilizando a análise termodinâmica da topologia da rede em conjunto com técnicas de programação matemática. O método se divide em dois estágios: no primeiro são identificadas as modificações mais promissoras na topologia da rede, ou seja, aquelas que se traduzem em uma maior recuperação de energia. Para esta identificação, é introduzido o conceito de ponto de estrangulamento da rede (*network pinch*), que é um trocador da rede que limita a recuperação de energia da mesma. No segundo estágio, a rede resultante da etapa anterior é otimizada através de programação matemática, minimizando o custo adicional de área. Apesar de não obter uma solução ótima global, o método resulta em soluções próximas da ótima e tem como vantagem soluções mais simples, além de possibilitar uma maior interação do usuário.

Mais recentemente, de forma a superar as limitações inerentes a abordagem de ASANTE e ZHU (1996), SMITH *et al.* (2010) propuseram modificações a mesma,

além de estendê-la de forma a também considerar correntes onde as propriedades térmicas variam com a temperatura. A metodologia combina as modificações estruturais na rede e a otimização de custo em uma única etapa, de forma a não perder as configurações mais promissoras em termos de custo. Com isso, o *retrofit* se torna um problema de programação não-linear, sendo a técnica de *simulated annealing* escolhida para sua resolução, devido às vantagens dos métodos estocásticos para a resolução deste tipo de problema.

Apesar de nos últimos anos os trabalhos envolvendo programação matemática terem superado em quantidade os da linha termodinâmica, devido as facilidades computacionais, ainda são encontrados trabalhos recentes envolvendo a linha termodinâmica. HERKENHOFF (2008) propôs um método para *retrofit* de redes baseado no método tradicional *pinch*. O método consiste no estabelecimento prévio dos objetivos de projeto (*targeting*) considerando a presença da área existente, e na posterior remontagem da rede manualmente, utilizando as mesmas regras de síntese e ferramentas do método *pinch* tradicional. Quando comparado ao método tradicional de TJOE e LINNHOFF (1986), que também se utiliza da linha termodinâmica e de remontagem manual da rede, o método proposto apresenta objetivos mais ambiciosos e aplicação mais extensa, uma vez que também contempla casos de aumento de carga. O método foi aplicado a alguns exemplos complexos, tendo apresentado vantagens em relação ao método tradicional.

Como trabalho recente na linha termodinâmica também pode ser citado LI e CHANG (2010), que propuseram um método sistemático para a redução do consumo de utilidades em redes existentes baseado na metodologia *pinch*. O método consiste primeiro em identificar as trocas térmicas que atravessam o *pinch*, dividir as cargas térmicas em duas, antes e depois do *pinch*, e em seguida recombinar as correntes de acordo com uma sistemática derivada da própria metodologia *pinch*. Os trocadores existentes são reaproveitados ao máximo, ajudando a manter o custo de investimento em níveis aceitáveis. O método foi utilizado em dois casos clássicos da literatura.

WANG *et al.* (2012) apresentaram uma abordagem para realização de *retrofit* de redes através do aprimoramento das trocas térmicas existentes. A metodologia tem como vantagem não resultar em modificações estruturais, que geralmente são de difícil implementação devido aos custos envolvidos. Um modelo matemático foi

desenvolvido para a avaliação do desempenho de trocadores de calor casco e tubo, além de quatro regras heurísticas para a identificação dos trocadores mais apropriados para a melhoria de troca térmica, resultando em uma grande melhoria da recuperação energética de um caso industrial analisado.

2.3. Integração entre unidades

Existem três formas de se realizar a integração energética entre duas ou mais unidades de processo (ZHANG et al., 2011). A primeira, denominada de integração direta, consiste em considerar as correntes quentes e frias das unidades (ou parte delas) como um sistema único, de forma que correntes quentes de uma unidade podem ceder calor para correntes frias de outra unidade e vice-versa. Esta abordagem apesar de geralmente representar as maiores reduções no consumo energético tem como desvantagem a perda de flexibilidade de operação das unidades. Isto porque ao atrelar a operação de diferentes plantas, qualquer problema operacional em uma das unidades poderia afetar a outra, levando a grandes perdas de produção. Além disso, a própria distância entre as unidades pode se tornar uma restrição, levando a altos custos de tubulação e de bombeamento, custos estes que podem não ser compensados pela redução do consumo energético.

A segunda abordagem pode ser entendida como uma integração indireta, ou seja, é utilizado um fluido intermediário como forma de integração entre as unidades. Este fluido pode ser um fluido térmico ou uma utilidade, como por exemplo, vapor d'água. Neste esquema, a influência da operação de uma unidade sobre a outra é reduzida, pois as possíveis perturbações seriam amortecidas pelo fluido intermediário, que circula em circuito fechado entre as unidades. A desvantagem desta abordagem é que em geral esta representa maior custo de investimento quando comparada a integração direta, devido ao maior número de equipamentos envolvidos, uma vez que as trocas térmicas entre unidades são realizadas em duas etapas: corrente quente para fluido intermediário e deste para a corrente fria.

A terceira forma é utilizar como ponto de integração energética entre unidades as correntes de processo que as unem (correntes que são produzidas por uma unidade e enviadas como carga para outra). Estas correntes, de uma forma geral, são resfriadas nas unidades onde são geradas e enviadas para tancagem, antes de

seguirem para a unidade seguinte e serem novamente aquecidas. Esta filosofia mantém certa independência na operação destas unidades, porém resulta em baixa eficiência energética do sistema como um todo. Uma maior temperatura de envio para a unidade seguinte pode resultar em menor consumo de utilidade fria na unidade a montante, porém aumentando o consumo desta mesma utilidade na unidade a jusante. Por outro lado, esta maior temperatura de envio também pode resultar em maior consumo de utilidade quente na unidade a montante e reduzir este consumo na unidade a jusante. Portanto, existe uma temperatura ótima de envio desta corrente, onde o consumo de utilidades global de ambas as unidades será mínimo. Este consumo corresponde a um mínimo local, pois será superior ao mínimo global, obtido na forma direta de integração. Em outras palavras, este será o mínimo consumo de utilidades possível de ser obtido ao se adotar esta forma de integração entre unidades (via temperatura da corrente de processo que une as unidades).

Muitos autores têm utilizado programação matemática, geralmente em conjunto com os conceitos termodinâmicos da metodologia *pinch*, para realizar a integração energética entre unidades. RODERA e BAGAJEWICZ (1999) propuseram um modelo para a integração direta ou indireta entre duas unidades, introduzindo o conceito de transferência de calor assistida e não-assistida entre as unidades. A metodologia tem como produto a determinação da quantidade de calor a ser transferida de uma planta a outra de modo a obter a máxima redução no consumo energético total das plantas, além da identificação dos intervalos de temperatura onde estas trocas devem ocorrer. Ela também utiliza programação matemática para a determinação do ponto ótimo de localização do fluido intermediário, quando a integração indireta for adotada. Posteriormente, os mesmos autores generalizaram a metodologia para múltiplas unidades (BAGAJEWICZ e RODERA, 2000) e propuseram um modelo matemático para a obtenção de uma rede de trocadores multipropósito (que operem isoladas ou integradas a outra unidade), que apresente o consumo energético previsto na fase de *targeting* (RODERA e BAGAJEWICZ, 2001).

KRALJ *et al.* (2005) apresentaram uma metodologia para o *retrofit* e posterior integração energética de unidades em três etapas. Na primeira, é realizada a otimização energética da planta isoladamente, ou seja, somente dentro da própria

unidade. Na fase seguinte, são verificadas as possibilidades de transferência de calor entre as unidades. De posse das informações das etapas 1 e 2, a etapa 3 consiste na construção de uma superestrutura contendo os melhores candidatos para integração entre unidades, além das unidades integradas e não integradas (originais) internamente. Os passos iniciais servem para redução das possibilidades, diminuindo a complexidade do modelo e facilitando a otimização. Finalmente, uma programação não-linear inteira mista é utilizada para obter a melhor configuração.

BECKER *et al.* (2010) utilizaram programação linear inteira mista para propor um método para a síntese de redes incluindo restrição de troca entre correntes. Segundo os autores, a metodologia pode ser generalizada para casos complexos, por exemplo, a integração de múltiplas unidades com diferentes localizações. A metodologia consiste na divisão das correntes de processo em sub-sistemas, onde a troca direta de calor somente é permitida para as correntes no interior de cada sub-sistema, enquanto a troca entre correntes de diferentes sub-sistemas só pode ser realizada através de um fluido intermediário. A natureza combinatorial do problema de síntese de redes é então reduzida, facilitando a otimização via programação matemática. A metodologia foi aplicada com êxito para um caso da indústria de papel.

FENG *et al.* (2011) desenvolveram uma estratégia de integração energética de forma a obter esquemas de *retrofit* para unidades petroquímicas. A estratégia consiste basicamente em inicialmente estabelecer o limite para a integração, se esta de dará individualmente em cada unidade ou envolvendo duas ou mais unidades. Esta definição se baseia na comparação do potencial de economia de energia de cada unidade em separado e do sistema como um todo. Caso a diferença entre estas potenciais reduções seja grande, o sistema como um todo seria o limite e portanto a integração entre unidades deve ser considerada. Do contrário, o limite se torna cada unidade, devendo o *retrofit* ser realizado individualmente para cada uma. Após estas definições, as modificações nas redes de trocadores foram realizadas manualmente por inspeção, identificando as trocas que desrespeitam as regras da metodologia *pinch* e propondo modificações para as mesmas.

Utilizando o método de integração pela variação da temperatura de correntes que interligam unidades de processo, ZHANG *et al.* (2011) generalizaram o conceito para múltiplas unidades e múltiplas correntes. Foi proposto um método que utiliza

como base a grande curva composta e a curva composta somente das correntes de interligação, calculando a temperatura ótima das correntes de integração através de um método de programação matemática linear inteira mista. O método foi aplicado em dois casos industriais, resultando em uma redução do consumo de utilidades total das plantas.

2.4. Aplicações em Unidades de Destilação e de Coqueamento Retardado

As Unidades de Destilação Atmosférica e a Vácuo (UDAV) e as Unidades de Coqueamento Retardado (UCR) possuem um consumo energético alto, principalmente devido as altas vazões processadas nestas unidades. Este consumo energético torna-se ainda maior com o processamento de petróleos mais pesados, o que têm sido cada vez mais frequente no cenário brasileiro e mundial, devido ao custo menor deste tipo de petróleo. Estes fatores levaram o estudo da integração energética destas unidades a possuir grande interesse industrial, resultando na publicação de muitos trabalhos nos últimos anos.

Trabalhos de integração energética de UDAVs sempre foram muito comuns na literatura, devido às maiores oportunidades envolvidas no pré-aquecimento do petróleo cru e a diversidade de correntes quentes geradas. Como exemplo de trabalho recente, pode-se citar CASTRO *et al.* (2012) que realizaram um estudo de *retrofit* em uma bateria de pré-aquecimento de cru de uma UDAV. Devido à restrições econômicas, de espaço físico na unidade e de cronograma do projeto, a melhoria de eficiência energética da rede de trocadores foi obtida através apenas do aprimoramento da troca térmica em alguns trocadores, sem mudança de topologia. As oportunidades de melhoria foram identificadas por inspeção, resultando em um aumento de 8°C na temperatura final do petróleo cru, com consequente redução de 7% no consumo de utilidade quente no forno atmosférico. A avaliação econômica apresentou um tempo de retorno de três anos, sendo as expectativas do projeto confirmadas após a implementação das modificações e a partida da planta. Outros exemplos que podem ser citados são os trabalhos de PROMVITAK et al. (2009a, 2009b), que no primeiro trabalho utilizaram programação matemática para realizar o projeto novo da rede de trocadores de calor de uma UDAV, tendo como função objetivo o mínimo consumo de utilidades e mínimo número de trocadores e no

segundo utilizaram conceitos da metodologia *pinch* e programação matemática para realizar o *retrofit* da rede de trocadores de uma UDAV existente.

Já trabalhos envolvendo a integração energética de UCRs isoladamente não são muito comuns. Dentre os poucos, pode-se citar o trabalho de CHEN *et al.* (2004), que realizaram uma análise exergética em uma UCR existente. A análise indicou a bateria de pré-aquecimento como um dos pontos de ineficiência energética da planta, sendo utilizado o método *pinch* para otimizá-la, aumentando a temperatura final da carga fresca e aumentando a geração de vapor da planta.

Em relação a UCRs, são mais comuns na literatura trabalhos envolvendo a integração energética destas em conjunto com outras unidades, principalmente com UDAVs. PLESU *et al.*(2003) estudaram um caso industrial envolvendo a integração entre uma UDAV e uma UCR. Os autores optaram pela integração indireta, via sistema de utilidades. Também utilizaram a corrente de resíduo de vácuo (RV) como ponto de integração energética entre as unidades, uma vez que como esta é uma corrente gerada na UDAV e enviada como carga para a UCR, torna-se uma candidata natural para este tipo de análise. Utilizando a metodologia *pinch*, foi identificado um potencial de geração de vapor de baixa por parte da UCR, vapor este que poderia ser utilizado na UDAV, reduzindo o consumo externo desta utilidade.

BULASARA *et al.* (2009) propuseram em seu artigo o *revamp* da bateria de trocadores de calor de uma UDAV utilizando duas correntes quentes da UCR, ou seja, utilizando a forma de integração direta entre as unidades. Foi utilizada a metodologia tradicional de *pinch* manualmente para a confecção da nova rede, tentando maximizar a reutilização de trocadores existentes. Segundo os autores, os resultados se mostraram promissores, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

KUBOSKI *et al.* (2010) optaram pela forma de integração entre a UDAV e a UCR através da corrente de processo RV. Foi estudada a influência da temperatura de envio do RV diretamente da UDAV para a UCR sobre os custos totais e o consumo de utilidades de ambas as unidades, considerando um projeto conceitual de unidades novas e utilizando a abordagem *pinch*.

3. METODOLOGIA

3.1. Método pinch

O método *pinch* é uma metodologia de base termodinâmica consagrada para síntese de redes de trocadores de calor novas, embora seus conceitos tenham sido estendidos também para projetos de *retrofit* de redes de trocadores de calor, assim como para outras áreas, tais como otimização de sistemas de água, de hidrogênio, processos de separação, entre outros.

Neste item, será apresentada uma breve descrição da metodologia, focando principalmente nas ferramentas e conceitos utilizados ao longo deste trabalho. Uma descrição detalhada da metodologia pode ser consultada em LINNHOFF e HINDMARSH (1983) ou SMITH (2005).

O método consiste em um procedimento dividido em duas partes. Na primeira, denominada de *targeting*, são estabelecidas as metas de projeto, antes mesmo de se iniciar a síntese da rede propriamente dita, somente utilizando os dados de processo das correntes envolvidas e dados econômicos. Este conhecimento prévio das metas de projeto permite o estudo de diferentes cenários de forma simples e rápida. A segunda parte da metodologia consiste na síntese da rede, apresentando algumas regras que permitem que a rede obtida apresente as metas de projeto definidas na etapa anterior, sendo esta rede posteriormente evoluída de forma a minimizar ainda mais seu custo total.

3.1.1 Etapa de *targeting*

Nesta etapa, são definidas as metas do projeto, tanto em termos de consumo de utilidades (custo operacional) como em termos de área e número de unidades de troca térmica necessária (custo de capital). Além da definição das metas de projeto, esta etapa pode ter como produto a definição do ΔT mínimo ótimo da rede. O ΔT mínimo ótimo está associado ao mínimo custo total (soma do custo operacional e custo de capital) previsto para a rede. O ΔT mínimo adotado na etapa inicial será utilizado na etapa posterior, de forma a se obter uma rede satisfazendo as metas de projeto definidas anteriormente.

Uma das principais ferramentas utilizadas nesta etapa são as curvas compostas. Estas consistem na representação das correntes quentes e frias do processo em um diagrama temperatura x variação de entalpia. Considerando-se calor específico constante, cada corrente quente/fria ao ser representada individualmente no diagrama se apresenta como uma reta de inclinação igual ao inverso da taxa de capacidade calorífica (CP, definido como o produto entre vazão e calor específico de cada corrente). Para a obtenção da curva composta quente/fria, basta dividir o diagrama em intervalos de temperatura e somar o CP de cada corrente presente em cada um destes intervalos, obtendo a nova inclinação da reta para este intervalo.

As curvas compostas quente e fria podem ser representadas em um mesmo diagrama e deslocadas horizontalmente, de forma que a área de superposição entre ambas as curvas representa a troca de calor entre as correntes de processo. A parcela das curvas fora da área de superposição representa o consumo de utilidades, conforme pode ser visto no exemplo da Figura 3.1.

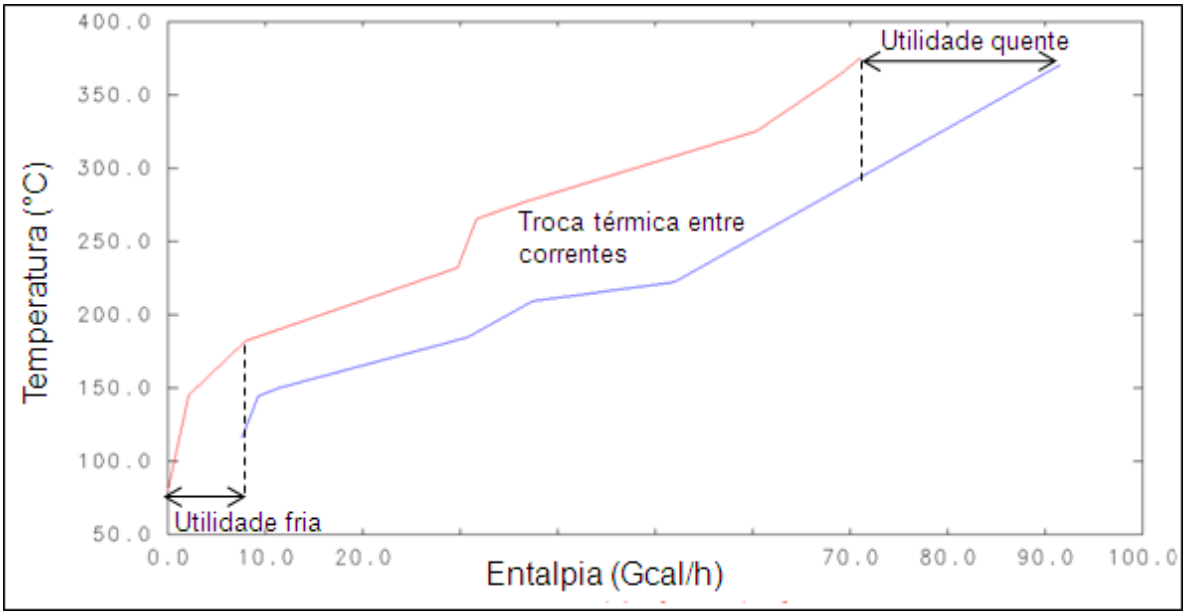

Figura 3.1: Exemplo de curva composta

Pode-se observar que existe um ponto do diagrama onde as curvas mais se aproximam, sendo a distância vertical entre as curvas neste ponto correspondente a um ΔT. Quando este valor é igual ao ΔT utilizado na etapa de *targeting*, os valores

dos consumos de utilidades são iguais aos mínimos correspondentes anteriormente determinados e este local define o chamado ponto de *pinch* do problema. Ao se deslocar horizontalmente as curvas de forma a aproximá-las, pode-se presumir que a área de superposição entre as curvas aumenta, ficando a área restante menor, ou seja, aumenta-se a recuperação de calor entre as correntes de processo e reduz-se o consumo de utilidades. Esta aproximação das curvas resulta em um novo ΔT mínimo, menor que o anterior (curvas mais próximas). Ao se afastar as curvas, o efeito contrário se observa, ou seja, menor será a recuperação de calor entre as correntes de processo e maior será o consumo de utilidades. Com isso, nota-se que existe uma relação direta entre o ΔT mínimo e o consumo de utilidades. Uma vez conhecido o custo de cada uma das utilidades, pode-se construir um gráfico ΔT mínimo x custo de utilidades, sendo que de forma geral, quanto maior o ΔT mínimo, maior o consumo/custo de utilidades.

Outra forma de representação das correntes quentes e frias de um processo é a chamada grande curva composta (do inglês *grand composite curve)*. Esta também consiste em um diagrama temperatura x variação de entalpia, sendo que as temperaturas utilizadas são alteradas, acrescendo ou diminuindo metade do ΔT mínimo adotado às temperaturas reais das correntes. Este diagrama representa graficamente a cascata de energia, onde é calculado o “saldo” de energia em cada intervalo de temperatura, sendo que a energia que sobra em determinado intervalo pode ser utilizado pelo intervalo inferior. A temperatura de *pinch* (em termos de temperatura alterada) e o consumo de utilidades também são observados neste gráfico. Um exemplo de grande curva composta pode ser visto na Figura 3.2, sendo correspondente ao mesmo problema representado pelas curvas compostas da Figura 3.1.

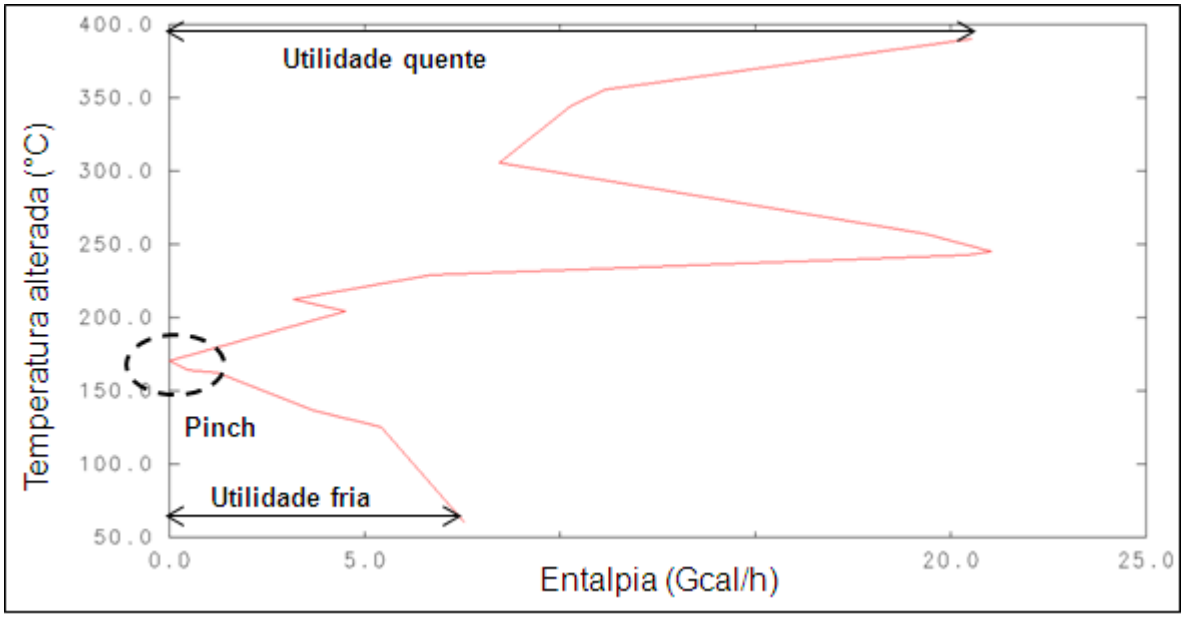

Figura 3.2: Exemplo de grande curva composta

Uma vez conhecidas as metas de consumo de energia do problema, estas representando o custo operacional esperado da rede, resta a determinação do custo de capital, representado pela área de troca térmica necessária, de forma a compor o custo total esperado pelo projeto. Como será visto adiante, a área de troca requerida também guarda uma relação como o ΔT mínimo, fazendo com que esta variável possa ser otimizada através da minimização do custo total da rede.

A estimativa da área de troca é realizada através das curvas compostas e dos coeficientes de transferência de calor de cada corrente. As curvas compostas são divididas em intervalos de temperatura com CP constante. O método admite uma troca de calor vertical em cada um destes intervalos, com isso sendo conhecidas as temperaturas terminais, calor trocado e coeficiente global de troca, e portanto podendo-se estimar a área de troca de cada intervalo. O somatório das áreas dos intervalos resulta na área de troca total requerida. Este método traz uma série de simplificações, que naturalmente reduzem sua precisão, mas ainda assim mantém uma estimativa razoável para os objetivos desta etapa.

A área requerida será dividida entre o número de trocadores de calor utilizados. Naturalmente se imagina que um número mínimo de trocadores seria desejado para se obter um menor custo de capital. Este número mínimo também pode ser estimado pelo número de correntes quentes e frias do sistema e pelo número de utilidades. Com isso, através de equações de custo de trocadores de

calor, pode-se obter o custo de capital equivalente a área mínima requerida estimada. Este custo de capital pode ser anualizado, através de matemática financeira, de forma a ficar na mesma base do custo operacional, compondo com este o custo total anualizado estimado para o problema.

Como a estimativa de área é realizada através das curvas compostas, obviamente esta irá variar de acordo com o ΔT mínimo adotado. Com isso, pode-se construir um gráfico ΔT mínimo x custo de capital, sendo que de forma geral, quanto maior o ΔT mínimo, menor será a área mínima requerida, pois maior será a força motriz disponível, facilitando as trocas térmicas entre as correntes. Representando portanto em um mesmo gráfico os custos operacionais, custo de capital e o custo total, observa-se que este último possui um ponto de mínimo, sendo o ΔT mínimo correspondente a este ponto o valor a ser adotado para a síntese da rede na etapa seguinte. Um gráfico genérico deste tipo é apresentado na Figura 3.3.

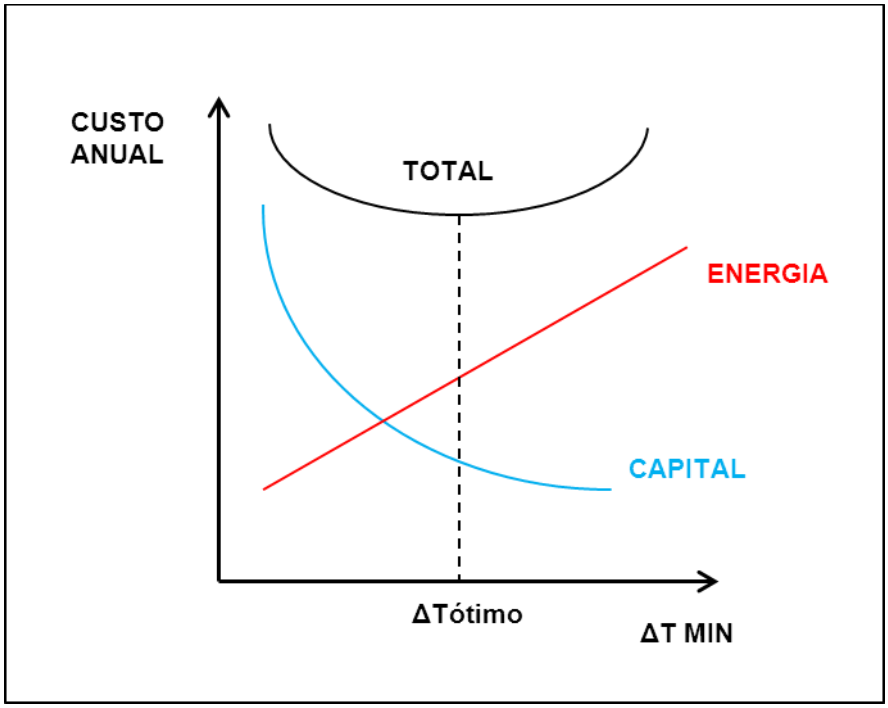

Figura 3.3: Custos x ΔT mínimo

3.1.2 Etapa de síntese da rede

Superada a primeira etapa, onde são determinadas tanto as metas de energia quanto a meta de custo de capital, correspondentes a um determinado ΔT mínimo,

prossegue-se com a segunda etapa da metodologia *pinch*, que se caracteriza pela síntese da rede propriamente dita. Para esta etapa, a metodologia *pinch* fornece regras que, sendo seguidas, permitem que a rede obtida atenda as metas definidas na primeira etapa.

A regra básica desta etapa é não haver transferência de calor através do *pinch*, tanto entre correntes de processo quanto pelo uso inapropriado de utilidades (utilidade fria acima do *pinch* ou utilidade quente abaixo). Como a meta de energia está ligada a um determinado ΔT mínimo, outra regra implícita é não haver nenhum trocador com *approach* menor que o ΔT mínimo adotado.

A construção da rede pode ser resumida em cinco passos, descritos brevemente a seguir:

- Dividir o problema em duas regiões, acima e abaixo do *pinch*. Estas duas regiões são tratadas isoladamente, de forma a garantir que não haja troca de calor através do *pinch.*
- Para cada região, deve-se primeiro selecionar as trocas das correntes próximas ao *pinch*, para em seguida selecionar as trocas das correntes mais afastadas. Isto porque as correntes que “tocam” o *pinch* são as que apresentam possibilidade mais restrita de troca térmica, pois apresentam *approach* igual ao ΔT mínimo. Esta abordagem deve ser adaptada na ocorrência de problemas especiais, tais como problemas sem *pinch* ou com vários *pinches*.
- A escolha das trocas térmicas entre as correntes que “tocam” o *pinch* deve respeitar algumas restrições de CP, de forma a não violar o ΔT mínimo adotado na extremidade do equipamento afastada do *pinch*. Ao selecionar uma troca térmica entre duas destas correntes, uma das extremidades deste trocador possuirá *approach* igual ao ΔT mínimo. Como o CP das correntes está ligado a inclinação de suas retas quando representadas no diagrama T x ΔH, os CPs devem ser tais que as retas se afastem, aumentando o ΔT ao longo do trocador e com isso atendendo ao ΔT mínimo adotado. Portanto, na região acima do *pinch*, o CP da corrente quente deve ser menor que o CP da corrente fria, valendo o inverso para as correntes abaixo do *pinch*. Existe também uma regra de número de correntes, onde a quantidade de correntes

que “partem” do *pinch* deve ser maior que a quantidade de correntes que “chegam” ao *pinch*, de modo a evitar o uso de utilidades inapropriadamente. Com isso, tanto a regra de CP como a de número de corrente podem levar a necessidade de divisão de algumas correntes.

- As cargas térmicas em cada troca selecionada devem ser obtidas através da heurística de *tick-off*, que recomenda que a carga térmica da troca seja a máxima possível, de forma a reduzir o número de unidades, ajudando a manter o custo de capital baixo.
- Restando apenas as correntes afastadas do *pinch*, normalmente existe uma maior liberdade para a escolha das trocas entre as correntes. Isto porque como estas correntes não estão tão limitadas em termos de ΔT quanto às correntes que “tocam” o *pinch*, suas trocas podem não respeitar as restrições de CP e ainda assim continuar a não violar o ΔT mínimo adotado, dependendo da carga térmica escolhida. Esta maior liberdade permite ao projetista observar outros aspectos na escolha das trocas para estas correntes “afastadas” do *pinch*, tais como a operabilidade, *layout*, etc. Finalmente, a rede final é obtida através da junção das duas redes obtidas, acima e abaixo do *pinch*.

Uma ferramenta que pode ser utilizada durante a montagem da rede é a técnica conhecida como análise do problema remanescente (do inglês *remaining problem analysis*, RPA). A técnica consiste na realização de um novo *targeting* após a escolha de cada trocador, porém utilizando apenas as correntes restantes. Isto permite a “previsão” de como se comportará o restante da rede após a escolha de determinada troca. Esta técnica é particularmente importante para as correntes afastadas do *pinch*, onde o grau de liberdade na escolha das trocas é maior, porém uma determinada escolha ou a utilização de uma carga térmica inadequada pode prejudicar o restante da rede, seja em consumo de utilidades ou em custo de capital.

Ao se construir a rede segundo as etapas descritas, obtém-se uma configuração que apresentará o mínimo consumo de utilidades (máxima recuperação de energia) para o ΔT mínimo adotado e custo de capital baixo, mas seu custo total, via de regra, ainda pode ser otimizado, através da redistribuição de cargas térmicas nos trocadores. As divisões de corrente, os *loops* (dois ou mais

trocadores que conectam as mesmas correntes) e *paths* (trocadores que unem duas utilidades distintas) que normalmente aparecem nesta rede inicial fornecem os graus de liberdade necessários para a minimização do custo total, onde várias técnicas podem ser utilizadas com este fim. Nesta etapa, a restrição inicial de não haver troca térmica através do *pinch* não mais se aplica, já que em última instância, o objetivo principal é obter uma rede com o custo mínimo total. Quanto ao respeito ao ΔT mínimo, cabe ao projetista nesta etapa de otimização decidir mantê-lo ou não, lembrando que há uma restrição mínima para o ΔT de *approach* no projeto de trocadores.

3.2. Método para retrofit

Conforme já mencionado, existem alguns métodos para *retrofit* de redes desenvolvidos a partir de adaptações da metodologia *pinch*. Neste trabalho foi utilizada uma destas metodologias, apresentada na tese de doutorado de HERKENHOFF(2008) e descrita a seguir.

A metodologia guarda grande semelhança com o método *pinch* tradicional, adaptando cada uma das etapas do método para levar em conta a presença da área da rede existente. Por ser uma área já instalada, esta não possui custo (ou ao menos possui custo menor que a área nova), e portanto a sua inserção nos conceitos do método *pinch* deve ser diferenciada.

Ao se reutilizar a área dos trocadores existentes em uma nova condição de processo, é de se esperar que as áreas não sejam exatamente às indicadas pelo método *pinch* em cada serviço, podendo ser menores ou maiores que o requerido. Desta maneira, existe uma ineficiência na utilização da área existente que deve ser levada em consideração na fase de *targeting* desta metodologia. O método introduz portanto um fator α, chamado de fator de reutilização da área existente. Através do fator α, calcula-se a área existente efetiva (A_e) correspondente a área original (Ao), de acordo com a equação abaixo.

$$A_e = \alpha\, A_0 \qquad \textit{(Eq. 3.1)}$$

Segundo o autor, o fator α pode se situar na faixa de 80 a 90%, mas também cita que este valor pode variar bastante conforme o caso, não estendendo muito a discussão a respeito da escolha de um valor apropriado. Intuitivamente, pode-se

imaginar que para uma mesma área total existente, quanto maior o número de unidades, menor o valor de área de cada unidade. Com isso, é maior a probabilidade de se conseguir aproximar-se da área requerida em determinada troca, podendo com isso serem adotados valores maiores para o fator α. De forma inversa, se esta mesma área total existente estiver dividida em poucas unidades, estes possuirão maior área individual, sendo portanto mais difícil atender exatamente as áreas requeridas em cada troca térmica, devendo serem adotados valores menores para o fator α. É claro que devido a esta certa subjetividade na escolha de seu valor, o próprio fator α se constitui em mais um grau de liberdade para a metodologia de *retrofit.*

Uma vez calculada a área efetiva existente, pode ser calculada para cada nível de consumo de utilidades (ou seja, para cada ΔT mínimo), a área adicional requerida (A_{add}) por diferença em relação a área mínima da rede nova correspondente (A_{min}), de acordo com a equação abaixo.

$$A_{add} = A_{min} - A_e \qquad \textit{(Eq. 3.2)}$$

O custo da área adicional pode ser estimado, de forma a se estimar o custo de capital necessário ao cumprimento dos objetivos da fase de *targeting*. Para isso é necessário conhecer o número estimado de cascos adicionais (N_{add}), que pode ser obtido através da equação abaixo, onde é utilizada a área típica dos cascos adicionais (A_s). Esta área típica de cada casco adicional pode ser considerada como a área máxima por casco (critério de projeto já utilizado neste tipo de trabalho) ou como a área média por casco da rede existente.

$$N_{add} = (A_{add} \;\; A_s) + 1 \qquad \textit{(Eq.3.3)}$$

O custo da área adicional (C_{add}) é calculado através da equação abaixo, utilizando o custo médio dos novos cascos (C_{ns}), este último sendo calculado através da equação de custo de trocadores adotada, referente a um trocador com área igual a área média dos novos cascos (A_{add} / N_{add}).

$$C_{add} = N_{add}\, C_{ns} \qquad \textit{(Eq.3.4)}$$

Por fim, o custo total de área (C_a) pode ser calculado pela equação abaixo, sendo a soma do custo de área adicional (C_{add}) aos custos de reutilização da rede existente (C_0), caso estes existam. Neste custo de reutilização podem ser

considerados possíveis serviços de manutenção que os trocadores existentes possam precisar, além de eventuais investimentos requeridos para a readaptação destes às novas condições. Durante a etapa seguinte, de remontagem da rede, este custo pode e deve ser individualizado, de acordo com a facilidade de adaptação e as condições de cada trocador. Porém, nesta fase de *targeting*, apenas o custo total da área original é necessário.

$$C_a = C_{add} + C_0 \qquad \textit{(Eq.3.5)}$$

Tendo calculado um custo total de área, que deve ser anualizado de forma a ficar na mesma base que os custos de utilidades, têm-se todos os parâmetros necessários para realizar a otimização do ΔT mínimo, de forma idêntica à metodologia *pinch* tradicional, ou seja, através da minimização do custo total anual, conforme já apresentado na Figura 3.3.

A etapa seguinte, de remontagem da rede, é realizada utilizando as mesmas regras do método tradicional, também de forma a atingir os objetivos da fase de *targeting* e utilizando agora um ΔT mínimo que foi otimizado para a condição de *retrofit*, ou seja, levando em conta a área existente e sua condição de uso. A ideia é a rede ser remontada como se fosse uma rede nova, porém os trocadores existentes estão disponíveis para a utilização, como em um “banco” de trocadores. Os trocadores existentes neste “banco” não incrementam custo de capital a rede (ou ao menos incrementam custo mais baixo que os trocadores novos, conforme o custo de reutilização que pode ser definido individualmente para cada trocador). O projetista tem a liberdade de utilizá-los conforme melhor lhe convir, e é claro que a maior similaridade possível com a rede original deve ser buscada, de forma a minimizar outros custos envolvidos.

Outras ferramentas do método tradicional também ficam disponíveis ao projetista, como a técnica RPA, que vai auxiliando a remontagem da rede, monitorando o seu custo final a cada troca sugerida. A rede inicial também pode ser otimizada numericamente, de forma a minimizar seu custo total, através da redistribuição de cargas térmicas. Apenas um cuidado adicional deve ser tomado desta vez, pois como a rede geralmente é remontada buscando similaridade com a original, a remoção de determinado serviço ou de alguma divisão de corrente resultante da otimização pode não ser interessante para redes existentes.

3.3. Método para integração entre unidades

Os métodos de síntese ou *retrofit* de redes são realizados para um determinado conjunto de correntes quentes e frias, conjunto este que representa uma dada condição de processo. Porém muitas condições de processo não possuem limites tão rígidos, possuindo liberdade para variar dentro de determinadas faixas. Esta possível flexibilidade destas condições pode ser explorada de forma a melhorar a recuperação energética de um processo. Em plantas industriais, vazões, temperaturas e pressões, seja de correntes de processo ou de equipamentos, geralmente fornecem o grau de liberdade necessário para este tipo de análise.

Para uma dada curva composta, pode-se observar que qualquer modificação de processo que resulte em aumento de carga térmica total de corrente quente acima do *pinch* ou de corrente fria abaixo resultará em decréscimo de consumo de utilidades. O oposto também é verdadeiro, ou seja, modificações que resultem em diminuição de carga térmica de corrente quente abaixo do *pinch* ou de corrente fria acima também reduzirão consumo de utilidades. Este fato é conhecido como *plus-minus principle*, e pode ser utilizado como referência para as modificações de processo adequadas, visando economia em utilidades. Uma das maneiras práticas de se implementar este princípio é deslocando correntes quentes de baixo para cima do *pinch* ou correntes frias de cima para baixo do *pinch*, modificando por exemplo, seus níveis de temperatura.

Como as modificações de processo visando redução de utilidades modificam a disposição das curvas compostas, é de ser esperar que os custos de capital também sejam alterados, normalmente aumentando-os, devido a redução de força motriz (diferença de temperatura) entre as curvas. Com isso, um novo ponto de mínimo em relação ao custo total (e consequentemente um novo ΔT mínimo ótimo) deve ser obtido após as modificações, realizando uma nova etapa de *targeting*. Como já citado, esta é uma das vantagens da realização desta etapa: verificar o impacto das modificações de processo de forma rápida, antes da construção ou remontagem da rede propriamente dita.

Estendendo a análise para mais de uma unidade, o conceito também pode ser utilizado para minimizar o consumo energético global deste conjunto de unidades. Em unidades consecutivas, onde a corrente de entrada de uma unidade é

corrente de saída de outra, a temperatura desta corrente geralmente fornece o grau de liberdade necessário para aplicação deste conceito. Estas correntes normalmente são resfriadas na unidade onde são produzidas, enviadas para tancagem e em seguida enviadas como carga para a unidade seguinte, onde são novamente aquecidas. Intuitivamente, imagina-se que ao sair mais quente da unidade onde é produzida reduzirá utilidade fria nesta unidade e utilidade quente na unidade seguinte. Por outro lado, poderá aumentar a utilidade quente na unidade onde é produzida e a utilidade fria na unidade seguinte. O que vai definir a ocorrência e o grau destes eventos será a posição relativa desta corrente em relação ao *pinch* em cada uma das unidades e para onde a modificação de temperatura a deslocará.

O método de integração entre unidades que será utilizado neste trabalho será através da variação de temperatura da corrente de resíduo de vácuo (RV). Esta corrente é produzida na UDAV, sendo em seguida enviada como carga para a UCR. Sua influência tanto nos custos operacionais como no custo de capital será estudada, de forma a verificar a temperatura que resulte no menor custo global de *retrofit* para ambas as unidades.

3.4. Parâmetros de projeto

Os parâmetros de projeto utilizados para os casos industriais analisados são apresentados neste item.

Serão considerados trocadores tipo casco & tubos, em arranjo multipasse. Para este tipo de trocador, usualmente se utiliza algum parâmetro para seleção do número de cascos em série. Será utilizado o parâmetro X_p, que de maneira geral, limita a troca térmica em cada casco a um máximo percentual do limite termodinâmico. Outro parâmetro de projeto utilizado em relação aos trocadores é a máxima área por casco, para evitar trocadores de tamanho exagerado e facilitar a manutenção e transporte. Os valores adotados para estes parâmetros são apresentados na Tabela 3.1.

O custo de cada trocador (C, em US$) é calculado pela equação típica 3.6, apresentada abaixo, que utiliza a área de troca térmica (A, em m^2), e algumas constantes, que geralmente são características de cada do tipo de trocador e material utilizado. As constantes utilizadas são apresentadas na Tabela 3.1.

$$C = a + bA^e \qquad \textit{(Eq. 3.6)}$$

O custo de capital da rede (C_{cap}, em US$/ano), é calculado através da anualização do custo total de trocadores (C_t), pela equação 3.7. O fator de anualização (f), é calculado pela equação 3.8, através da definição de uma vida útil (n, em anos) estimada para os trocadores e de uma taxa de atratividade anual (i). Os valores utilizados para estes parâmetros são apresentados na Tabela 3.1.

$$C_{cap} = f\ C_t \qquad \textit{(Eq. 3.7)}$$

$$f = \frac{i\ (i+1)^n}{(1+i)^{n-1}} \qquad \textit{(Eq. 3.8)}$$

Tabela 3.1: Parâmetros de projeto para trocadores

Parâmetro Xp	0,90
Área máxima por casco (m^2)	700
Constantes da equação de custo	
a	0
b	37098
e	0,558
Vida útil (n, anos)	10
Taxa de atratividade anual (i, %)	8,5

Para o cálculo dos custos operacionais, relativos ao consumo de utilidades, foram considerados os parâmetros apresentados na Tabela 3.2. Foi considerada água de resfriamento como utilidade fria e gás combustível, queimado nos fornos industriais, como utilidade quente. Em alguns casos também foi considerado vapor d'água, tanto como utilidade quente como sendo gerado na rede de trocadores da unidade. Seus parâmetros também são apresentados na Tabela 3.2. Para cálculo do custo dos trocadores com água de resfriamento ou com vapor d'água, também são apresentados os coeficientes de transferência de calor (HTC) destas correntes.

Tabela 3.2: Dados de processo e econômicos das utilidades

Água de resfriamento	
T entrada (°C)	30
T saída (°C)	45
Custo (US$/Gcal)	6,501
HTC (kcal/h m^2 °C)	1342
Gás combustível	
Custo (US$/Gcal)	20,206
Vapor d'água	
Temperatura (°C)	250
Calor latente (kcal/kg)	409,7
Custo (US$/ton)	7,0
HTC (kcal/h m^2 °C)	2174

4. INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE PROJETO NOVO DE UCR

Neste capítulo, é apresentado um estudo de integração energética de um projeto novo de UCR. Será utilizada a metodologia *pinch* tradicional, abordando os aspectos de processo que devem ser considerados no projeto de uma rede de trocadores de calor deste tipo de unidade. Também serão utilizadas as ferramentas da metodologia de modo a selecionar as modificações de processo possíveis de serem realizadas que melhorem os objetivos típicos de projeto da rede, tais como consumo de utilidades (custo operacional), investimento, custo total, etc.

O estudo foi realizado com o auxílio do *software* SPRINT (desenvolvido pela Universidade de Manchester), utilizando-o para realizar a etapa de *targeting*, obtenção dos diagramas e montagem manual das redes. Também foi utilizada uma ferramenta do *software* que permite otimizar numericamente a rede mantendo a topologia, conforme será detalhado a seguir.

Para a síntese das redes, foram utilizados dados típicos de uma UCR, retirados de um balanço material e energético realizado em um simulador de processos. Os dados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Projeto novo de UCR – Dados das correntes

Correntes	T origem (°C)	T alvo (°C)	CP (Gcal/h °C)	ΔH (Gcal/h)	HTC (kcal/ h m^2 °C)
H1	232	145	0,0954	8,30	1200
H2	265	145	0,0275	3,30	620
H3	364	80	0,0326	9,26	880
H4	232	182	0,2800	14,00	1300
H5	325	265	0,2733	16,40	1580
H6	375	265	0,1064	11,70	1210
H7	375	277	0,0816	8,00	1150
C1	150	370	0,2677	58,89	1500
C2	144	184	0,300	12,00	1240
C3	209	222	0,848	11,02	1240
C4	116	150	0,0597	2,03	800

A tabela apresenta as correntes quentes (cor vermelha) e frias (cor azul), com suas respectivas temperaturas de origem e temperaturas alvo, taxas de capacidades caloríficas (CP) e cargas térmicas (ΔH). São apresentados ainda os coeficientes de

transferência de calor (HTC) de cada corrente, que serão utilizados para cálculo da área de troca de cada trocador. A corrente fria C1 representa a carga da unidade, que será enviada ao forno de coqueamento após o preaquecimento com as correntes de processo. As correntes C2 e C3 representam refervedores de duas torres presentes na unidade, conforme será detalhado a seguir.

4.1. Caso original

Inicialmente, foi realizada a etapa de *targeting*, de modo a determinar as metas de consumo de utilidades (custo de utilidades), área mínima de troca / número mínimo de unidades (custo de capital) e consequentemente, ΔT mínimo ótimo a ser adotado na confecção da rede. Para isto, foram utilizados os dados de processo da Tabela 4.1 e os dados econômicos de utilidades e dos trocadores, apresentados no item 3.4. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.1.

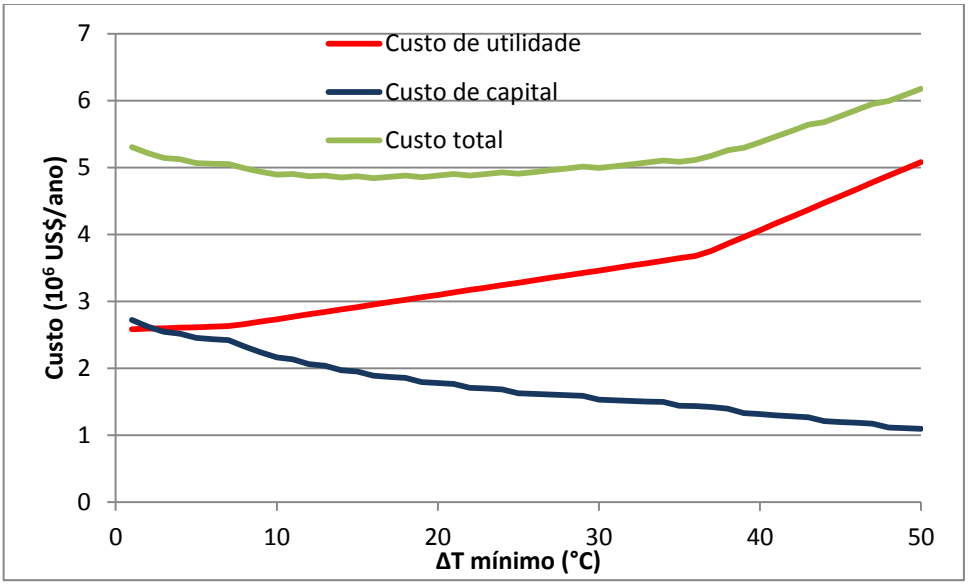

Figura 4.1: Projeto novo de UCR – Custos x ΔT mínimo

Conforme o esperado, observa-se que o custo de utilidades aumenta com o aumento do ΔT mínimo, acontecendo o inverso com o custo de capital, que diminui com o aumento do ΔT mínimo, resultando na existência de um ponto de mínimo na curva correspondente ao custo total da rede. Pelo formato da curva de custo total, observa-se que esta se apresenta bastante horizontal na região próxima ao ponto mínimo, ou seja, existe uma faixa de ΔT mínimo com custos muito próximos ao custo

mínimo. Este comportamento é típico em problemas de otimização do ΔT e pode ser melhor visualizado na Tabela 4.2, onde são apresentados dados relativos a faixa de ΔT mínimo entre 10 e 30°C, com seus respectivos custos totais e o desvio em relação ao custo ótimo.

Tabela 4.2: ΔT mínimo x Custo total, com desvios em relação ao ótimo

ΔT mínimo (°C)	Custo total (10^6 US$/ano)	Desvio (%)
10	4,89	1,1%
11	4,90	1,3%
12	4,87	0,6%
13	4,88	0,8%
14	4,85	0,2%
15	4,87	0,6%
16	4,84	0,0%
17	4,86	0,4%
18	4,88	0,8%
19	4,86	0,3%
20	4,88	0,8%
21	4,90	1,3%
22	4,88	0,8%
23	4,90	1,3%
24	4,93	1,8%
25	4,91	1,3%
26	4,93	1,9%
27	4,96	2,4%
28	4,99	3,0%
29	5,01	3,5%
30	4,99	3,1%

Pela tabela, pode-se observar que o ΔT mínimo ótimo propriamente dito é 16°C. Porém, observa-se que nesta faixa o custo total associado a cada ΔT mínimo não varia mais que 3,5% em relação ao mínimo. Esta diferença é muito pequena, principalmente considerando que a estimativa da área mínima de troca (e consequentemente do custo de capital) é calculada com uma precisão da ordem de 10%. Com isso, existe uma flexibilidade na escolha do ΔT mínimo, uma vez que a escolha de outro valor que não o ótimo dentro desta faixa não resultará em grande diferença em relação ao custo mínimo. Para as redes sintetizadas a seguir, será adotado o ΔT mínimo de 20°C, de forma a simplificar a montagem das mesmas. O ΔT mínimo de 20°C apresenta diferença em relação ao custo mínimo inferior a 1%.

Uma vez selecionado o ΔT mínimo, podem ser construídas as curvas compostas, de modo a identificar os consumos mínimos de utilidades correspondentes, bem como as temperaturas de *pinch*. A grande curva composta relativa ao caso original (Tabela 4.1), para o ΔT mínimo de 20°C, é apresentada na Figura 4.2.

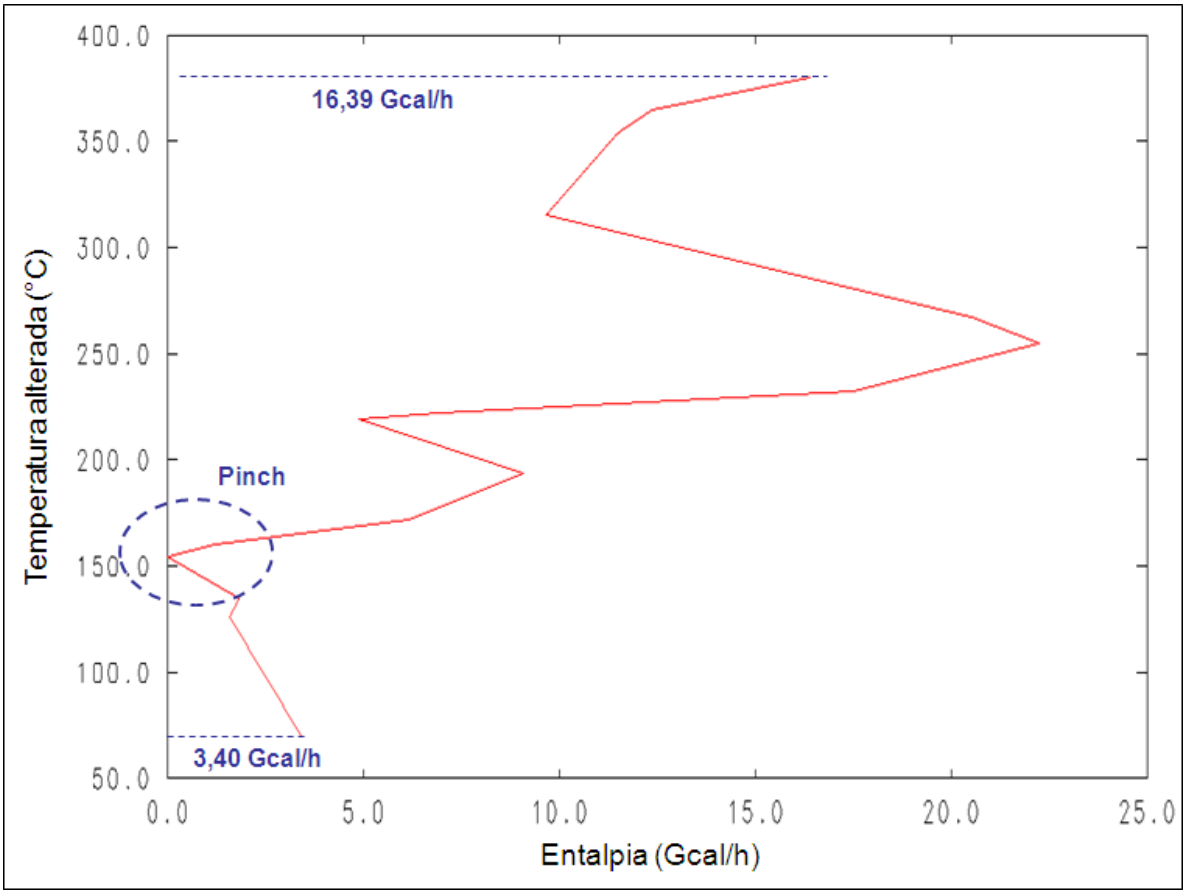

Figura 4.2: Caso original - Grande curva composta (ΔT mínimo = 20°C)

Observa-se pela figura que para o ΔT mínimo adotado, a temperatura de *pinch* alterada é igual 154°C, ou seja, 164°C na escala das correntes quentes e 144°C na escala das correntes frias. O consumo mínimo de utilidades é de 16,39 Gcal/h e 3,40 Gcal/h para as utilidades quente e fria, respectivamente.

A seguir, foi construída a rede de trocadores, utilizando as regras de síntese fornecidas pelo método *pinch* (apresentadas no item 3.1.2). A rede obtida é apresenta na Figura 4.3. O círculo vermelho com a letra “H” representa a carga térmica atendida pela utilidade quente (forno) e os círculos azuis com a letra “C” representam os resfriadores finais (trocadores com utilidade fria).

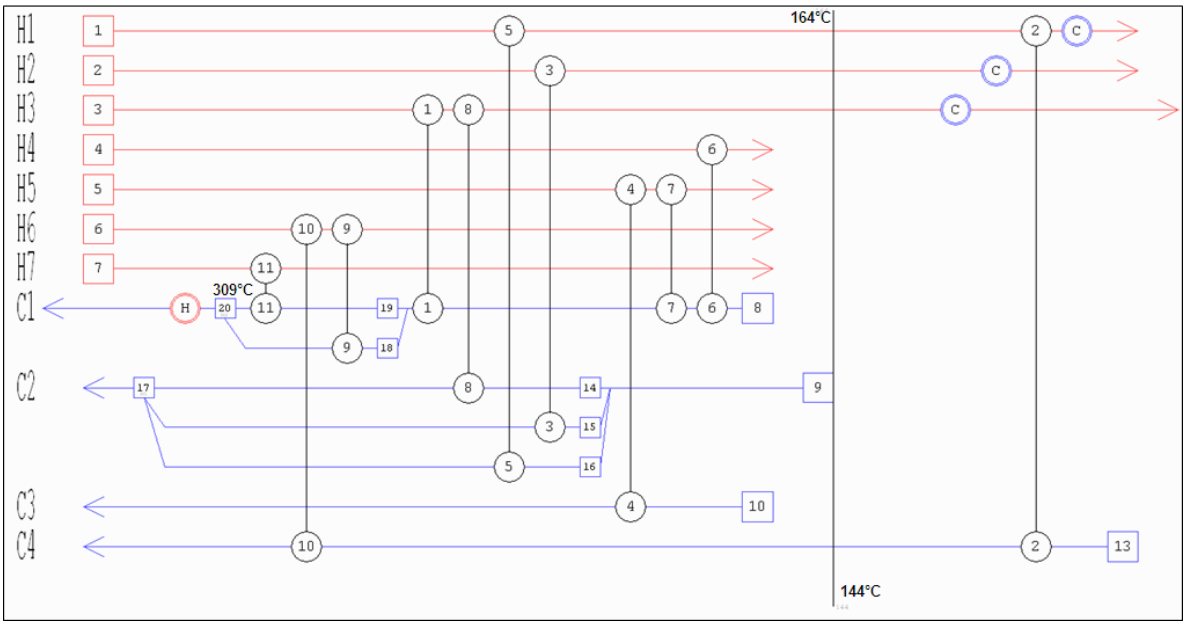

Figura 4.3: Caso original - Esquema da rede obtida

Pode-se observar que foram obtidos um total de 14 unidades de troca térmica (11 de processo e 3 de utilidades, além do forno), estando apenas um trocador de processo abaixo do *pinch*. Também se observa que foi necessário dividir algumas correntes frias, de forma a respeitar a regra de número de correntes acima do *pinch*. A divisão das correntes, tanto neste exemplo como no restante do capítulo, foi feita em igual vazão, desde que continuasse respeitando as restrições de CP, quando na escolha dos pares de troca. Foi atingida uma temperatura de 309°C para a carga da unidade (corrente fria C1).

Na Tabela 4.3 é apresentado um resumo dos principais parâmetros associados à esta primeira rede obtida (rede com mínimo consumo de utilidades).

Tabela 4.3: Caso original - Parâmetros da rede obtida

CASO	**Original**
ΔT mínimo (°C)	20
Área processo (m2)	2903
N° trocadores / cascos	14 / 23
Custo capital (US$/ano)	**1,88**
Consumo util. quente (Gcal/h)	16,39
Consumo util. fria (Gcal/h)	3,40
Custo util. quente (10^6US$/ano)	2,90
Custo util. fria (10^6US$/ano)	0,19
Custo utilidade total (10^6US$/ano)	**3,10**
Custo total (10^6US$/ano)	**4,98**

Observa-se que como foram seguidas as regras do método, a rede apresentou exatamente o mínimo consumo de utilidades previsto na fase de *targeting* para o ΔT mínimo de 20°C. O custo de capital apresentou-se ligeiramente superior ao previsto, sendo responsável por um custo total maior, mas superior em apenas 2% ao previsto, de 4,88 x 10^6 US$/ano, o que é bastante aceitável e comum nesta metodologia.

Por fim, ainda de acordo com o método, a rede obtida pode ser otimizada numericamente, mantendo a estrutura da rede. Foi utilizado um procedimento de otimização presente no SPRINT, baseado em um modelo de programação não-linear. Esta ferramenta do *software* permite otimizar a rede sem modificar sua estrutura, para isso variando as frações de vazão nos divisores de corrente, as cargas térmicas nos trocadores ou ambas ao mesmo tempo. A função objetivo utilizada foi mínimo custo total, mas o *software* também permite a escolha de outras, tais como mínimo custo de capital ou mínimo custo (ou consumo) de utilidades. A otimização também pode ser feita adotando-se o mesmo ΔT mínimo (que geralmente apresenta pouco ganho) ou permitindo ΔTs menores, sendo esta última a filosofia adotada.

O resultado da otimização é apresentado na Tabela 4.4, comparando seus resultados com a rede obtida anteriormente. Apesar de o método manter a estrutura da rede, alguns trocadores ou divisões de corrente podem deixar de existir, caso sua carga térmica ou fração de vazão seja zerada na otimização. Todavia isto não ocorreu neste exemplo, tendo a rede otimizada apresentado exatamente a mesma estrutura da rede anterior (Figura 4.3).

Tabela 4.4: Comparação entre a rede obtida antes e após otimização

CASO	**Original**	**Original ot.**
ΔT mínimo (°C)	20	17,8
Área processo (m2)	2903	2828
N° trocadores / cascos	14 / 23	14 / 20
Custo capital (US$/ano)	**1,88**	**1,73**
Consumo utilidade quente (Gcal/h)	16,39	16,29
Consumo utilidade fria (Gcal/h)	3,40	3,30
Custo utilidade quente (10^6US$/ano)	2,90	2,88
Custo utilidade fria (10^6US$/ano)	0,19	0,19
Custo utilidade total (10^6US$/ano)	**3,10**	**3,07**
Custo total (10^6US$/ano)	**4,98**	**4,80**

Como já citado, ao se otimizar numericamente uma rede obtida pelo método *pinch,* algumas das regras como não violar o ΔT mínimo ótimo (caso este esteja afastado do ΔT mínimo de projeto dos trocadores) ou não transferir calor através do *pinch* passam a não ser mais restrições, uma vez que com a estrutura inicial obtida, o que importa para a otimização é o mínimo custo. Com isso, a rede otimizada apresentou um ΔT mínimo menor, resultando em menor consumo energético e também menor área de troca. O número de trocadores foi o mesmo, porém foram necessários três cascos a menos. Isto ocorreu porque a redistribuição das cargas térmicas e da fração das correntes nos divisores foi capaz de melhorar a força motriz nos trocadores, conseguindo trocar mais carga térmica com menos área e menos cascos, reduzindo simultaneamente o custo de utilidades e o de capital. Estes fatores levaram a uma redução de 3,8% no custo total.

Uma característica das regras para escolha dos pares de correntes em cada trocador do método *pinch* é que estas permitem certo grau de liberdade nestas escolhas, principalmente para as correntes afastadas do *pinch*. Com isso, podem-se obter várias estruturas de rede, todas com o mínimo consumo de utilidades, mas com custos de capital diferentes, e consequentemente com o custo total também diferente entre si.

Como uma tentativa de demonstração deste fato, foi feita a síntese de outra rede, escolhendo outros pares de corrente para alguns trocadores. Não foi utilizado um critério específico para as novas escolhas dos pares, apenas nas trocas em que as regras do método permitiam mais de uma opção, procurou-se escolher um par diferente da configuração anterior. A nova rede obtida, com o mínimo consumo de utilidades (correspondente ao ΔT mínimo de 20°C), é apresentada na Figura 4.4.

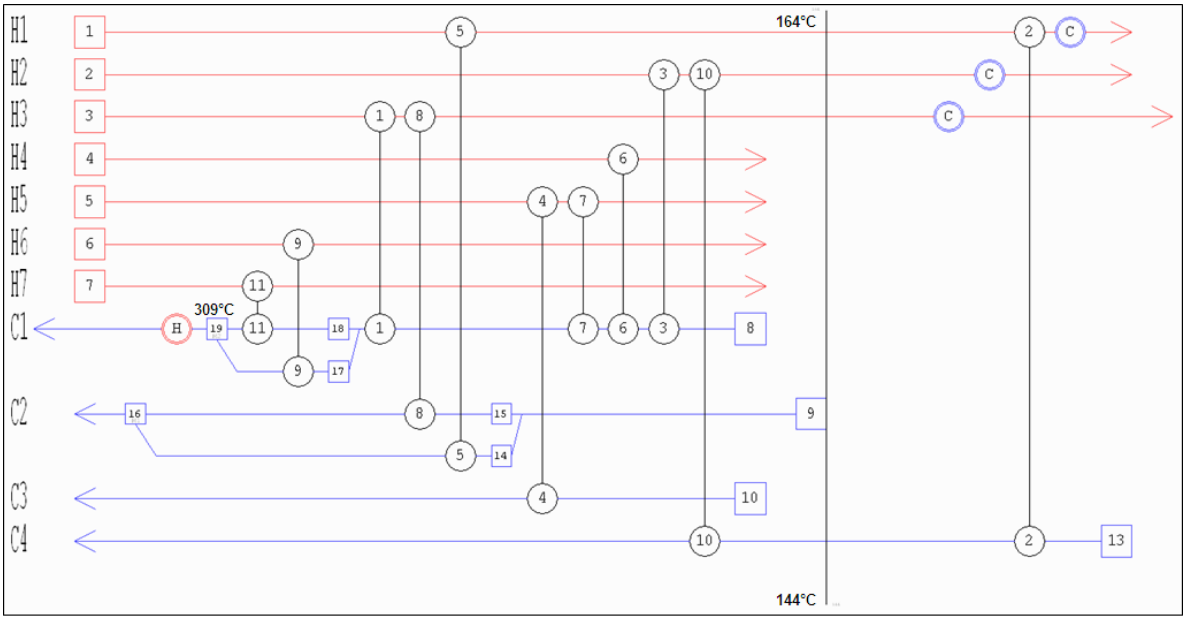

Figura 4.4: Caso original - Esquema da nova rede obtida

Nota-se que a rede é bem semelhante a anterior, também apresentando um total de 14 trocadores (11 de processo e 3 de utilidades, além do forno). Uma das diferenças foi na corrente fria C2, que na rede anterior possuía três trocadores em paralelo e na rede atual ficou com apenas dois trocadores, também em paralelo. Esta diferença pode ser considerada como uma vantagem em termos de processo, uma vez que menos divisões de corrente trazem menos complexidade à rede, facilitando tanto a construção como a operação. Outras diferenças ocorreram no preaquecimento de carga da unidade (corrente fria C1), que apresentou um trocador a mais e na corrente fria C4, que nesta rede apresentou troca com a corrente quente H2, ao invés de H6.

Na Tabela 4.5, é apresentada uma comparação entre os principais parâmetros das duas redes obtidas para o caso original.

Tabela 4.5: Comparação entre as redes obtidas para o caso original

CASO	**Original 1**	**Original 2**
ΔT mínimo (°C)	20	20
Área processo (m2)	2903	2986
N° trocadores / cascos	14 / 23	14 / 21
Custo capital (US$/ano)	**1,88**	**1,83**
Consumo utilidade quente (Gcal/h)	16,39	16,39
Consumo utilidade. fria (Gcal/h)	3,40	3,40
Custo utilidade quente (10^6US$/ano)	2,90	2,90
Custo utilidade fria (10^6US$/ano)	0,19	0,19
Custo utilidade total (10^6US$/ano)	**3,10**	**3,10**
Custo total (10^6US$/ano)	**4,98**	**4,93**

A rede 2 apresenta custo total menor que a rede 1, devido a um menor custo de capital. Este fato ocorreu porque apesar da rede 2 apresentar maior área de troca, esta foi capaz de aproveitar melhor os ΔTs de *approach* nos trocadores, resultando em um menor número de cascos em série para alguns deles. Em outras palavras, a rede 2 apresentou trocas térmicas mais eficientes, pois foi capaz de trocar a mesma carga térmica que a rede 1 em um menor número total de cascos (21, contra 23 cascos na rede 1).

Assim como realizado com a rede 1, a rede 2 foi otimizada numericamente, sendo seus resultados apresentados na Tabela 4.6, em comparação com os resultados das redes anteriores. A rede 2 otimizada apresentou a mesma estrutura da rede anterior (Figura 4.4), ou seja, nenhum trocador nem fração de corrente foi removida pela otimização.

Tabela 4.6: Comparação entre as redes obtidas antes e após otimização

CASO	**Original 1**	**Original 1 ot.**	**Original 2**	**Original 2 ot.**
ΔT mínimo (°C)	20	17,8	20	9,1
Área processo (m2)	2903	2828	2986	3219
N° trocadores / cascos	14 / 23	14 / 20	14 / 21	14 / 20
Custo capital (US$/ano)	**1,88**	**1,73**	**1,83**	**1,87**
Consumo utilidade quente (Gcal/h)	16,39	16,29	16,39	15,81
Consumo utilidade fria (Gcal/h)	3,40	3,30	3,40	2,82
Custo utilidade quente (10^6US$/ano)	2,90	2,88	2,90	2,80
Custo utilidade fria (10^6US$/ano)	0,19	0,19	0,19	0,16
Custo utilidade total (10^6US$/ano)	**3,10**	**3,07**	**3,10**	**2,96**
Custo total (10^6US$/ano)	**4,98**	**4,80**	**4,93**	**4,83**

Observa-se que a rede 2 otimizada apresentou menor custo de utilidades, porém às custas de um maior custo de capital, quando comparado a rede 2 com o ΔT mínimo de 20°C, resultando em um custo total inferior em 2,1%. Quando se comparam as redes otimizadas, os resultados se invertem, ou seja, a rede 1 passa a possuir menor custo total que a rede 2 (embora muito próximos).

Estas pequenas diferenças entre os custos das redes obtidas (inferiores a 5%) podem se anular ou até mesmo se inverter quando for realizado o projeto detalhado dos trocadores. Com isso, a escolha da rede mais adequada pode levar em conta outros aspectos além do custo, tais como menor complexidade, facilidade de operação, questões de *layout*, ou tantas outras quanto o projetista achar necessário.

4.2. Caso modificado 1 – análise sem refervedor da desbutanizadora

Na síntese de redes de trocadores de calor, as particularidades de cada processo devem ser levadas em consideração de forma a se obter o melhor projeto. Ou seja, a rede deve apresentar o menor custo total possível, mas obviamente as necessidades de processo devem ser atendidas, prioritariamente aos aspectos econômicos.

A UCR possui uma seção que opera de forma semi-contínua. Conforme as reações vão acontecendo no interior dos reatores, o coque formado, por ser sólido, vai enchendo o equipamento, até que quando completo, deve ser interrompido o envio de carga para este tambor. Neste momento, outro reator deve passar a receber carga, de modo a garantir a continuidade operacional da unidade. Por isso os reatores de coque devem operar sempre em pares, de forma que, enquanto um reator está enchendo, outro reator do par está passando por várias etapas de remoção de coque e preparação para novamente receber carga, completando o ciclo.

A fracionadora recebe os efluentes gasosos gerados nos reatores e tem a função de separá-los nas várias frações de petróleo formadas. Esta opera de forma contínua, pois está sempre recebendo carga de pelo menos um dos reatores do par. Porém, os efluentes provenientes dos reatores sofrem variações de vazão e composição ao longo das várias etapas características do ciclo dos reatores, de tal

forma que estas variações causam perturbações na operação da fracionadora. Por mais que existam controles regulatórios que tentam amenizar estas oscilações, sempre acaba sendo verificado certo grau de variação, principalmente nas temperaturas e na vazão dos produtos da fracionadora.

Com isso, devido a esta característica inerente da UCR, certos cuidados devem ser observados no projeto da rede de trocadores de calor deste tipo de unidade. As correntes quentes da unidade são geradas na fracionadora, portanto as oscilações de temperatura e vazão destas resultarão em instabilidade de carga térmica nos trocadores correspondentes. Dentre os trocadores da unidade, os refervedores das torres retificadora de nafta e desbutanizadora (representados pelas cargas térmicas das correntes frias C2 e C3 da Tabela 4.1) são os mais sensíveis a este tipo de oscilação, pois qualquer mudança de carga térmica resultará em instabilidade de operação nas respectivas torres. A estabilidade de operação na desbutanizadora torna-se particularmente importante devido ao fato desta produzir correntes finais (GLP e nafta leve), pois qualquer instabilidade poderá resultar em perda de especificação destes produtos, não havendo unidades subsequentes para correção dos desvios.

Uma forma de conferir estabilidade para a desbutanizadora seria desvincula-la totalmente da fracionadora, fazendo com que sua carga térmica seja atendida por uma utilidade quente, por exemplo, vapor d'água. Esta será a modificação de processo avaliada neste item. Com este trocador já definido, a corrente correspondente a este serviço pode ser retirada da análise, realizando um novo estudo de *pinch* para as correntes restantes. A nova tabela de dados, portanto é idêntica a Tabela 4.1, apenas eliminando os dados referentes a corrente fria C3, sendo este novo caso de estudo denominado "caso modificado 1".

Com a alteração de dados de processo, um novo *targeting* deve ser realizado, de forma a determinar o novo ΔT mínimo ótimo. Neste caso, o resultado foi de 22°C. Porém, assim como no caso anterior, na região em torno do ponto de custo mínimo, a curva de custo total se apresenta bem plana, ou seja, a escolha de outro valor de ΔT mínimo próximo ao ótimo não resultará em um custo muito diferente do mínimo. Com isso, foi adotado mais uma vez o valor de 20°C, de forma a facilitar a comparação com as redes obtidas no item anterior. Para o ΔT mínimo de 20°C, o

custo total previsto é apenas 1% superior ao custo mínimo previsto, para o ΔT mínimo ótimo de 22°C.

As novas metas de consumo de energia podem ser verificadas através da grande curva composta do caso modificado 1, representada para o ΔT mínimo de 20°C e apresentada na Figura 4.5.

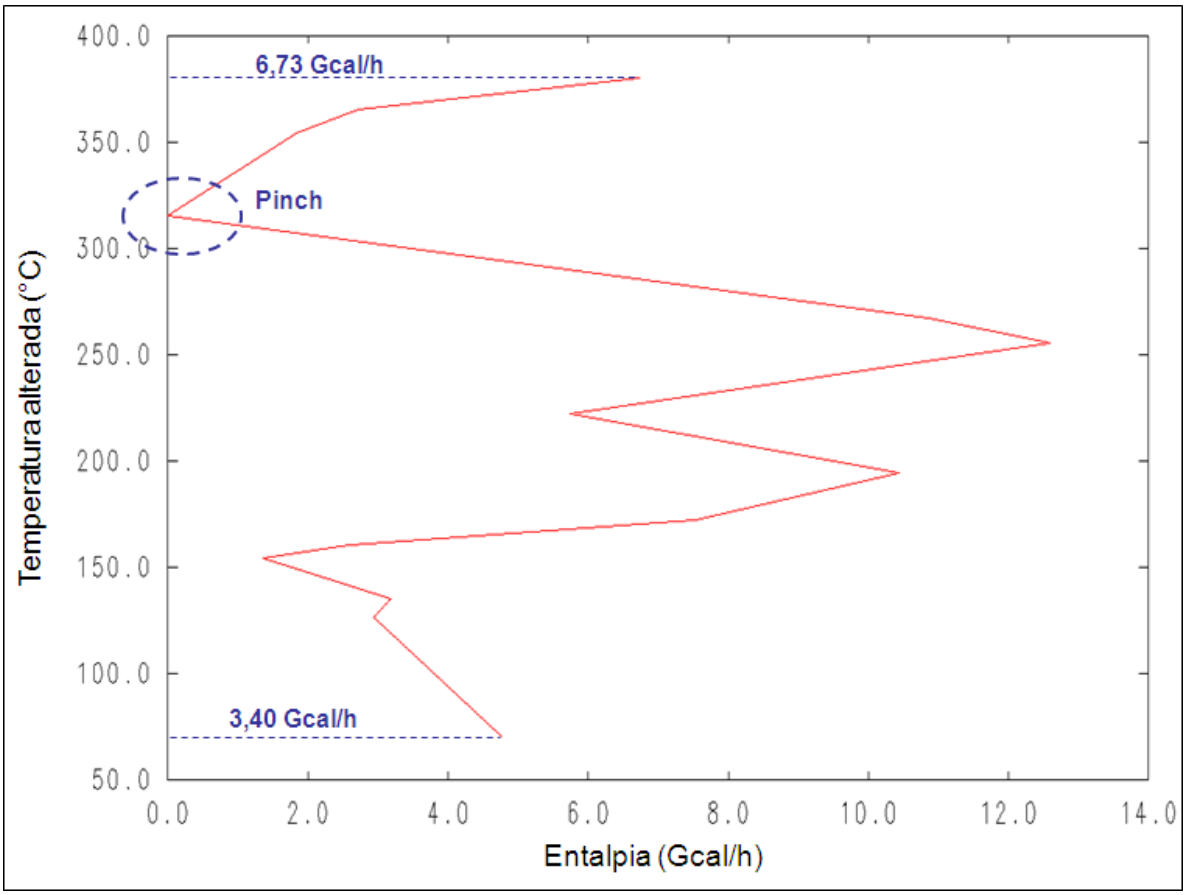

Figura 4.5: Caso modificado 1 - Grande curva composta (ΔT mínimo = 20°C)

Conforme esperado, o consumo de utilidade quente foi reduzido quando comparado ao caso original, pois a corrente fria C3 retirada da análise encontrava-se acima do *pinch*. Segundo a teoria do *plus-minus principle*, a redução de carga térmica de corrente fria acima do *pinch* resulta em redução do consumo de utilidade quente, neste caso de 16,39 Gcal/h no caso original para 6,73 Gcal/h. A utilidade fria apresentou um ligeiro aumento (de 3,40 Gcal/h no caso original para 4,75 Gcal/h), devido a modificação da temperatura de *pinch* no caso modificado 1 em relação ao caso original.

Foi realizada então a síntese da rede para o caso modificado 1, sendo a rede obtida apresentada na Figura 4.6. Não está representado nesta rede o trocador da corrente fria C3, que terá sua carga térmica atendida com uma utilidade quente, mas tanto o custo do trocador quanto da utilidade serão considerados nos custos associados à rede. A utilidade escolhida foi vapor d'água de 250°C, de acordo com os dados já apresentados na Tabela 3.2.

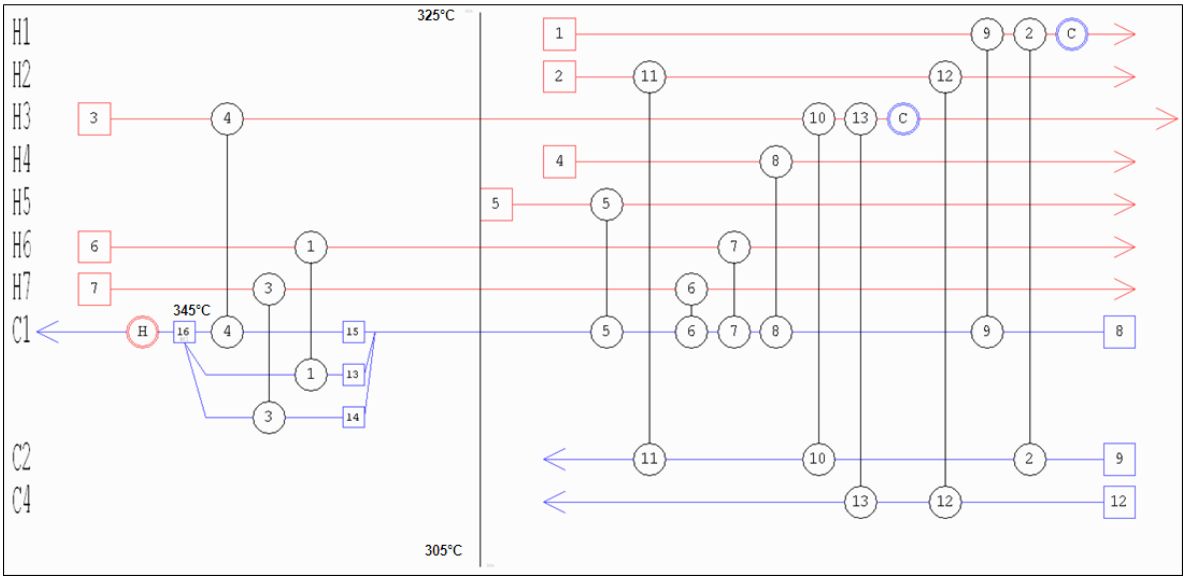

Figura 4.6: Caso modificado 1 - Esquema da rede obtida

Pode-se observar que como a temperatura de *pinch* foi modificada, a rede obtida apresentou-se bastante diferente em relação às redes correspondentes ao caso original. A nova rede apresentou um total de 16 trocadores, sendo 13 de processo e 3 de utilidades (2 resfriadores finais e o refervedor com vapor d'água), além do forno. Foi possível aquecer a carga da unidade (corrente fria C1) até um valor de temperatura superior ao caso original (345°C, enquanto no caso original foi de 309°C), resultado do menor consumo de utilidade quente previsto.

Na Tabela 4.7 é apresentada uma comparação entre os principais parâmetros das redes do caso original e do caso modificado 1, para o ΔT mínimo de 20°C. Foram adicionados à tabela os dados relativos ao vapor d'água, utilidade quente usada como fonte quente para o refervedor da desbutanizadora (corrente fria C3) na rede do caso modificado 1.

Tabela 4.7: Comparação entre as redes do caso original e modificado 1

CASO	Original 1	Original 2	Modificado 1
ΔT mínimo (°C)	20	20	20
Área processo (m2)	2903	2986	3975
N° trocadores / cascos	14 / 23	14 / 21	16 / 23
Custo capital (US$/ano)	**1,88**	**1,83**	**2,31**
Consumo utilidade quente - GC (Gcal/h)	16,39	16,39	6,73
Consumo utilidade fria (Gcal/h)	3,40	3,40	4,75
Consumo utilidade quente - vapor (Gcal/h)	-	-	11,02
Custo gás combustível (10^6US$/ano)	2,90	2,90	1,19
Custo utilidade fria (10^6US$/ano)	0,19	0,19	0,27
Custo vapor (10^6US$/ano)	-	-	1,65
Custo utilidade total (10^6US$/ano)	**3,10**	**3,10**	**3,11**
Custo total (10^6US$/ano)	**4,98**	**4,93**	**5,43**

Apesar da rede do caso modificado 1 possuir consumo de gás combustível no forno menor que as redes do caso original, o custo do vapor de média utilizado no refervedor da desbutanizadora foi o principal responsável por tornar o custo de utilidade total desta rede praticamente igual ao das outras redes. Apesar de o vapor ser uma utilidade mais barata que o gás combustível, a redução do consumo deste último foi de 9,66 Gcal/h, enquanto foi consumido 11,02 Gcal/h de vapor. Este fato em conjunto com um custo também maior de capital, fez com que a rede do caso modificado 1 apresentasse maior custo total que as redes anteriores. Com isso, foi necessária uma rede de custo mais elevada (cerca de 10% superior) de forma a atender uma necessidade de processo, a estabilidade na desbutanizadora.

4.3. Caso modificado 2 – análise com geração de vapor

Com o objetivo de tentar reduzir o custo da rede do caso modificado 1, o vapor consumido no refervedor da desbutanizadora poderia ser gerado na própria rede. Isto eliminaria o custo desta utilidade e continuaria a conferir estabilidade a desbutanizadora, pois as oscilações de temperatura das correntes quentes da fracionadora seriam amortecidas pelo *header* de vapor. Com isso, neste item foi criado o “caso modificado 2”, onde a corrente fria C3 da Tabela 4.1 foi substituída por uma corrente fria representando o vapor a ser gerado, com carga térmica igual a requerida pela corrente fria C3. Os dados referentes a esta nova corrente fria, são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Caso modificado 2 – corrente fria adicionada (vapor a ser gerado)

Correntes	T origem (°C)	T alvo (°C)	CP (Gcal/h °C)	ΔH (Gcal/h)	HTC (kcal/ h m^2 °C)
VAPOR	249	250	11,0198	11,02	2174

O *targeting* realizado para o caso modificado 2 resultou em um ΔT mínimo ótimo de 17°C. Porém mais uma vez o ΔT mínimo adotado será o de 20°C, de forma a facilitar a comparação e sabendo que este se encontra bem próximo ao custo ótimo (apenas 0,3% superior). A grande curva composta do caso modificado 2 é apresentada na Figura 4.7.

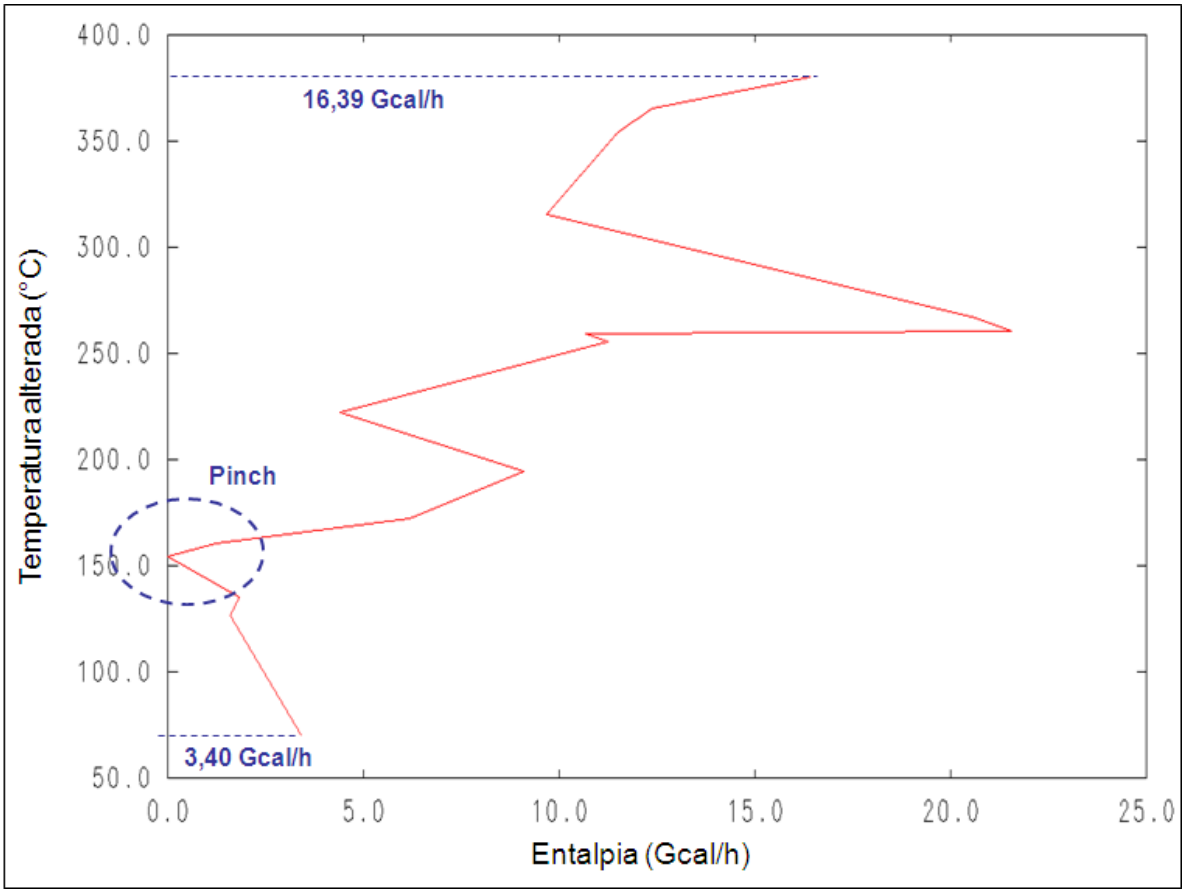

Figura 4.7: Caso modificado 2 - Grande curva composta (ΔT mínimo = 20°C)

Como esperado, observa-se que a temperatura de *pinch* e o consumo mínimo de utilidades retornaram aos valores do caso original, pois foi criada uma corrente fria com a mesma carga térmica do refervedor da desbutanizadora, apenas em um nível de temperatura diferente, mas ainda se localizando acima do *pinch*.

A rede obtida para o caso modificado 2 é apresentada na Figura 4.8. Assim como no item anterior, o trocador da corrente fria C3 com o vapor gerado (refervedor da desbutanizadora) não foi representado na rede, mas seu custo de capital deverá ser considerado nos custos.

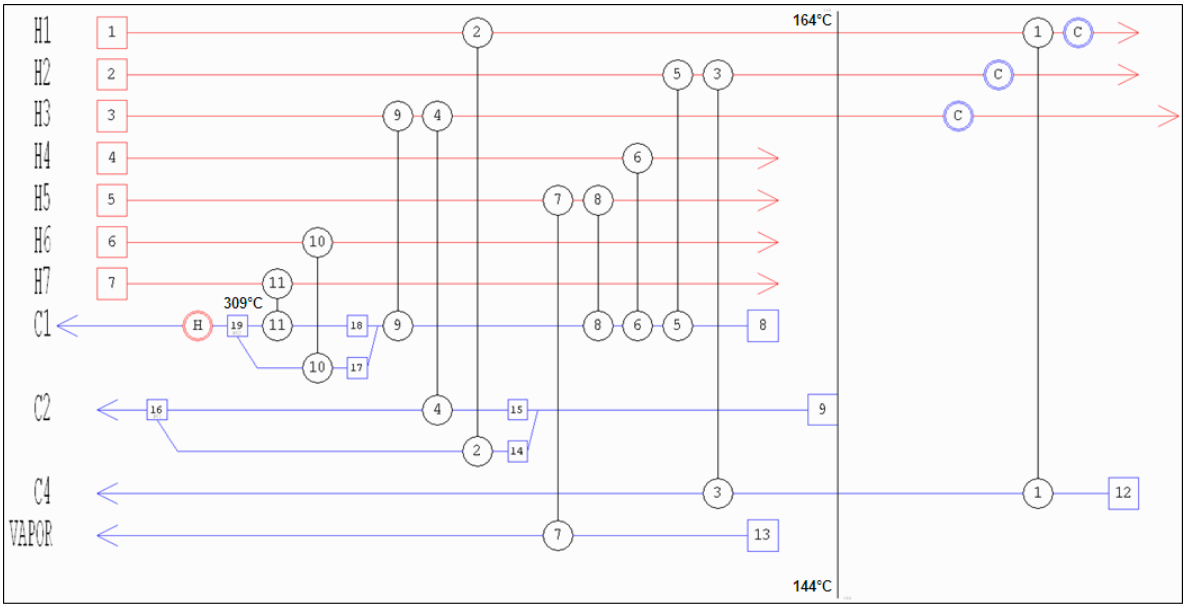

Figura 4.8: Caso modificado 2 - Esquema da rede obtida

Pode-se observar que a rede se apresentou bastante semelhante à rede 2 do caso original, com o mesmo número de trocadores de processo, de resfriadores finais, divisões de corrente e pares de troca. A única diferença é que agora a corrente quente H5, ao invés de ceder calor diretamente ao refervedor da desbutanizadora, gera o vapor que em seguida servirá como fonte quente para o refervedor (como já citado, este último não está representado na figura). Também se nota que foi obtida a mesma temperatura para a carga da unidade (corrente fria C1) das redes do caso original.

A comparação dos parâmetros das redes anteriores com a rede obtida para o caso modificado 2 é apresentada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Comparação das redes anteriores com o caso modificado 2

CASO	Original 1	Original 2	Modificado 1	Modificado 2
ΔT mínimo (°C)	20	20	20	20
Área processo (m2)	2903	2986	3975	3033
N° trocadores / cascos	14 / 23	14 / 21	16 / 23	15 / 22
Custo capital (US$/ano)	**1,88**	**1,83**	**2,31**	**1,99**
Consumo utilidade quente - GC (Gcal/h)	16,39	16,39	6,73	16,39
Consumo utilidade fria (Gcal/h)	3,40	3,40	4,75	3,40
Consumo utilidade quente - vapor (Gcal/h)	-	-	11,02	-
Custo gás combustível (10^6US$/ano)	2,90	2,90	1,19	2,90
Custo utilidade fria (10^6US$/ano)	0,19	0,19	0,27	0,19
Custo vapor (10^6US$/ano)	-	-	1,65	-
Custo utilidade total (10^6US$/ano)	**3,10**	**3,10**	**3,11**	**3,10**
Custo total (10^6US$/ano)	**4,98**	**4,93**	**5,43**	**5,09**

A rede do caso modificado 2 apresentou uma redução de custo em relação à rede do caso modificado 1, devido ao fato de gerar o próprio vapor consumido, mas ainda assim custo maior que a redes do caso original, devido à um maior custo de capital. Este maior custo de capital ocorreu devido à integração indireta entre a corrente quente H5 e o refervedor da desbutanizadora (corrente fria C3), através do vapor. Ou seja, o serviço antes realizado em um único trocador (H5 x C3) agora é realizado em dois trocadores (H5 gerando VAPOR e VAPOR aquecendo C3). Com isso, a rede obtida para o caso modificado 2 atende ao requisito de processo, com um custo superior em apenas 3%, quando comparada as redes do caso original.

4.4. Caso modificado 3 – análise refervedor processo + utilidade

Uma última modificação de processo será analisada neste item. Outra forma de se conferir maior estabilidade ao refervedor da desbutanizadora é sua carga térmica ser parte atendida por uma corrente de processo e parte pelo vapor. Desta forma, a oscilação de carga térmica do trocador de processo poderia ser compensada pelo trocador com utilidade. Portanto, o “caso modificado 3” consiste na redução da carga térmica da corrente fria C3 da Tabela 4.1. O valor escolhido foi uma redução de 50%, ou seja, metade da carga térmica será atendida por uma corrente de processo e a outra metade pelo vapor. Os dados referentes a corrente fria C3 com os dados alterados, são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Caso modificado 3 – corrente fria C3 com metade do ΔH total

Correntes	T origem (°C)	T alvo (°C)	CP (Gcal/h °C)	ΔH (Gcal/h)	HTC (kcal/ h m^2 °C)
C3	209	222	0,4238	5,51	1240

O *targeting* para este caso resultou em um ΔT mínimo ótimo exatamente de 20°C, que será o adotado para as análises seguintes. A grande curva composta é apresentada na Figura 4.9.

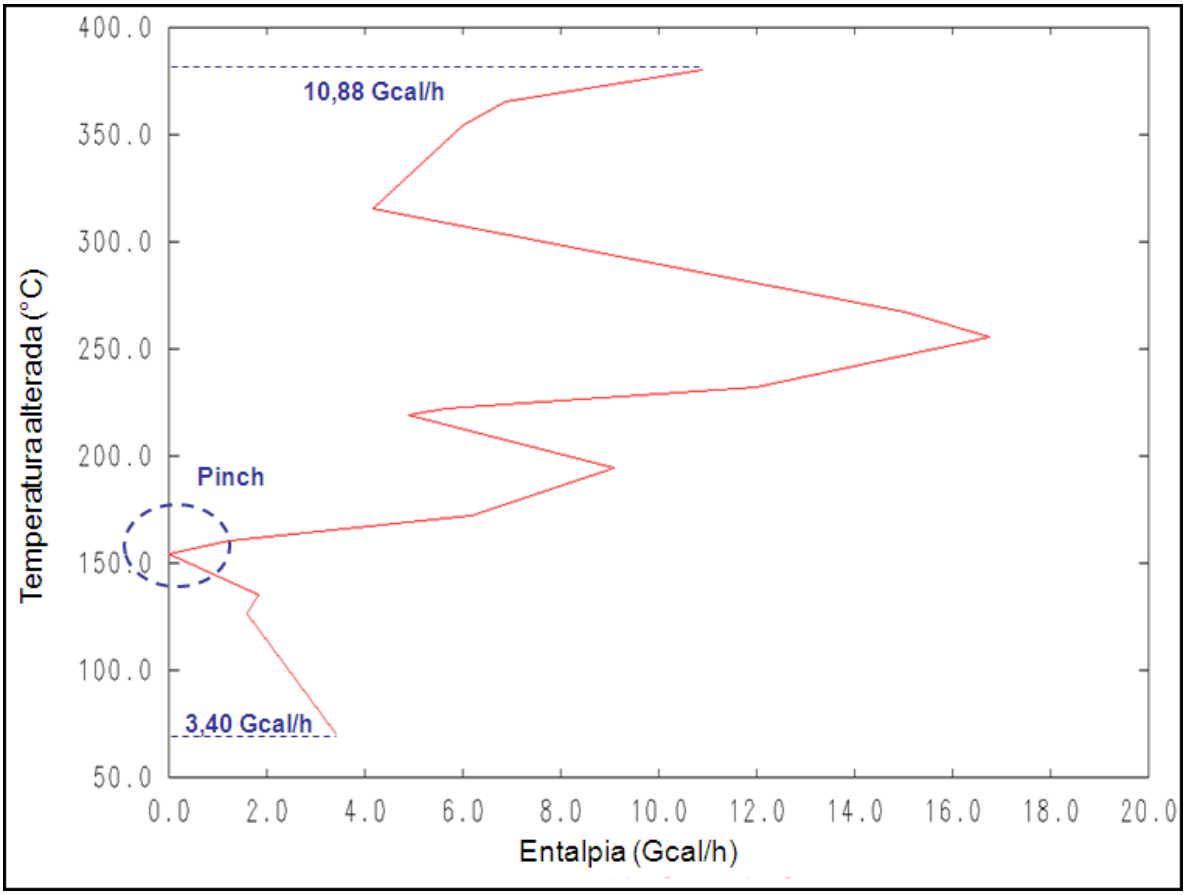

Figura 4.9: Caso modificado 3 - Grande curva composta (ΔT mínimo = 20°C)

Observa-se que a temperatura de *pinch* manteve-se idêntica ao caso original. Assim, a redução do consumo de utilidade quente é exatamente igual a redução da carga térmica da corrente fria acima do *pinch* (corrente C3), valor igual a 5,51 Gcal/h, conforme a teoria do *plus-minus principle*. O consumo de utilidade fria manteve-se idêntico ao caso original.

A rede obtida para o caso modificado 3 é apresentada na Figura 4.10. Mais uma vez e assim como nos itens anteriores, o trocador com os 50% restantes da carga térmica do refervedor da desbutanizadora e que será atendido com vapor não foi representado na rede, mas seu custo de capital e de utilidade será contabilizado nos custos.

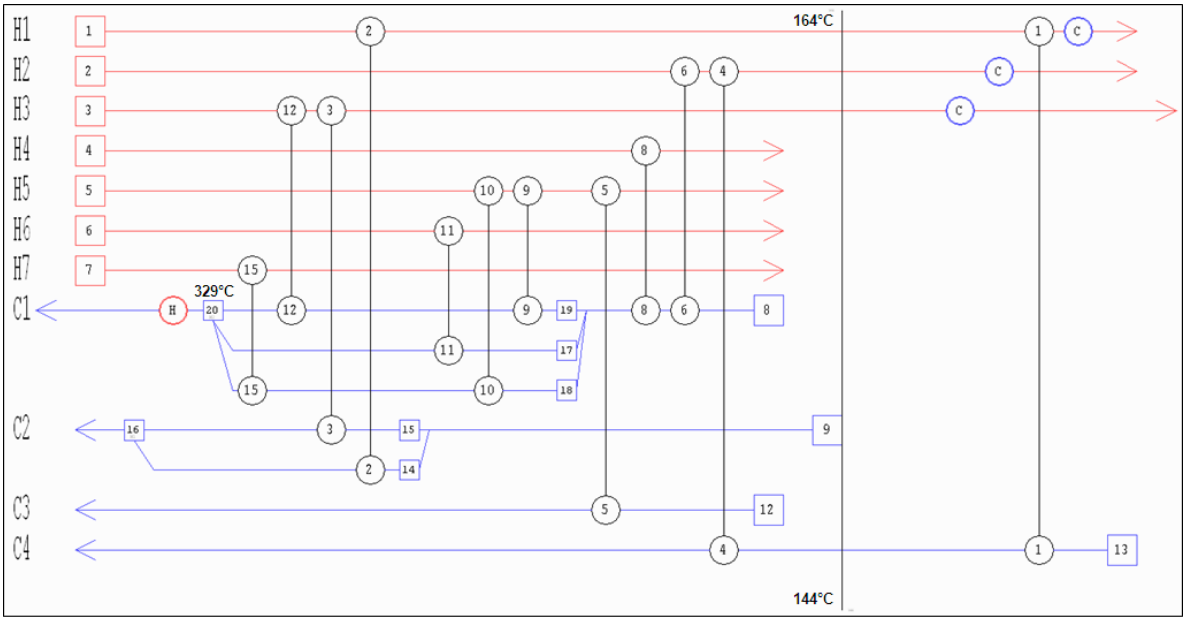

Figura 4.10: Caso modificado 3 - Esquema da rede obtida

Nota-se que mais uma vez a corrente quente H5 foi utilizada como fonte quente para a parcela de processo do refervedor da desbutanizadora, porém agora restando mais carga térmica para ceder a carga da unidade (corrente fria C1). Foi necessário mais um ramal para a carga da unidade, que foi aquecida até 329°C.

A comparação dos parâmetros das redes de todos os casos analisados é apresentada na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Comparação entre as redes de todos os casos analisados

CASO	**Orig. 1**	**Orig. 2**	**Modif. 1**	**Modif. 2**	**Modif. 3**
ΔT mínimo (°C)	20	20	20	20	20
Área processo (m2)	2903	2986	3975	3033	3416
N° trocadores / cascos	14 / 23	14 / 21	16 / 23	15 / 22	16 / 26
Custo capital (US$/ano)	**1,88**	**1,83**	**2,31**	**1,99**	**2,24**
Consumo utilidade quente - GC (Gcal/h)	16,39	16,39	6,73	16,39	10,88
Consumo utilidade fria (Gcal/h)	3,40	3,40	4,75	3,40	3,40
Consumo utilidade quente - vapor (Gcal/h)	-	-	11,02	-	5,51
Custo gás combustível (10^6US$/ano)	2,90	2,90	1,19	2,90	1,93
Custo utilidade fria (10^6US$/ano)	0,19	0,19	0,27	0,19	0,19
Custo vapor (10^6US$/ano)	-	-	1,65	-	0,82
Custo utilidade total (10^6US$/ano)	**3,10**	**3,10**	**3,11**	**3,10**	**2,95**
Custo total (10^6US$/ano)	**4,98**	**4,93**	**5,43**	**5,09**	**5,19**

Observa-se que a rede do caso modificado 3 apresentou um custo total ligeiramente superior a rede do caso modificado 2, devido a um maior custo de capital. Porém, quando comparada a própria rede do caso modificado 2 e às redes do caso original, apresenta o menor custo de utilidades total. Com isso, a vantagem econômica desta rede viria em forma de um menor custo de operação ao longo do tempo. Com isso, a rede obtida para o caso modificado 3 atende ao requisito de processo, com um custo superior em apenas 5%, quando comparada as redes do caso original e com o menor custo de utilidades dentre todas as redes.

Por fim, as redes obtidas para os casos modificados 1, 2 e 3 também podem ser otimizadas numericamente (utilizando a ferramenta disponível no SPRINT), de forma a reduzir ainda mais seus custos, mantendo a topologia e variando apenas as frações das correntes nos divisores e as cargas térmicas. Para as redes otimizadas dos casos modificado 1 e 2 as estruturas se apresentaram idênticas às redes anteriores correspondentes. Apenas no caso modificado 3 a otimização resultou na eliminação de um trocador (resfriador final da corrente H1), ficando a rede otimizada com uma unidade de troca a menos. Os resultados são apresentados na Tabela 4.12, com os respectivos novos ΔT mínimo para cada caso.

Tabela 4.12: Comparação entre as redes otimizadas

CASO	**Orig. 1 ot.**	**Orig. 2 ot.**	**Modif. 1 ot.**	**Modif. 2 ot.**	**Modif. 3 ot.**
ΔT mínimo (°C)	17,8	9,1	13,8	9,1	12,4
Área processo (m2)	2828	3219	3867	3266	3512
N° trocadores / cascos	14 / 20	14 / 20	16 / 23	15 / 21	15 / 25
Custo capital (US$/ano)	**1,73**	**1,87**	**2,29**	**2,03**	**2,19**
Consumo utilidade quente - GC (Gcal/h)	16,29	15,81	6,57	15,81	10,27
Consumo utilidade fria (Gcal/h)	3,30	2,82	4,60	2,82	2,78
Consumo utilidade quente - vapor (Gcal/h)	-	-	11,02	-	5,51
Custo gás combustível (10^6US$/ano)	2,88	2,80	1,16	2,80	1,82
Custo utilidade fria (10^6US$/ano)	0,19	0,16	0,26	0,16	0,16
Custo vapor (10^6US$/ano)	-	-	1,65	-	0,82
Custo utilidade total (10^6US$/ano)	**3,07**	**2,96**	**3,08**	**2,96**	**2,80**
Custo total (10^6US$/ano)	**4,80**	**4,83**	**5,36**	**4,99**	**4,99**

Observa-se que as tendências foram praticamente mantidas, com a rede do caso modificado 1 sendo a de maior custo, as redes do caso original com os menores custos e as redes dos casos modificados 2 e 3 com custo intermediário. Porém as redes otimizadas dos casos modificado 2 e 3 apresentaram custo total idêntico entre si, continuando a rede do caso modificado 3 com menor custo de utilidades, o que mais uma vez indica certa vantagem econômica desta última em relação a rede do caso modificado 2.

5. OTIMIZAÇÃO DE REDES DE TROCADORES DE CALOR DE UNIDADES EXISTENTES (*RETROFIT*)

Neste capítulo, é apresentado um estudo de otimização energética das redes de trocadores de calor de duas unidades existentes, uma Unidade de Coqueamento Retardado (UCR) e uma Unidade de Destilação Atmosférica e a Vácuo (UDAV). As unidades serão inicialmente otimizadas individualmente, e em seguida serão otimizadas de forma conjunta, utilizando a temperatura da corrente de processo que as interligam como forma de integração energética entre unidades. Será feita uma comparação das duas opções, de forma a verificar se a forma de análise integrada apresenta sinergia em relação a opção de otimização de cada unidade isoladamente. Também será avaliada a aplicabilidade das metodologias utilizadas, tanto de *retrofit* como de integração de unidades, para este tipo de estudo.

O estudo foi realizado com o auxílio do *software* PTT (desenvolvido na PETROBRAS), que possui o algoritmo para realização da metodologia proposta para o *retrofit* (que realiza o *targeting* levando em conta a rede existente, segundo determinada eficiência de reutilização). Além disso, o *software* também disponibiliza facilidades para a remontagem da rede manualmente, permitindo a alocação de trocadores existentes e trocadores novos, diferenciando-os em relação ao custo. Também contém o algoritmo para realização da análise do problema remanescente, fazendo o acompanhamento dos objetivos da rede a cada trocador alocado.

5.1. Retrofit da UCR

Neste item, é apresentado o estudo de *retrofit* para uma UCR. Os dados de processo necessários para o estudo foram retirados de uma UCR existente com configuração típica, através de medições de campo e complementando com dados obtidos de um simulador de processos. As correntes e seus respectivos dados são apresentados na Tabela 5.1, onde se pode observar as correntes quentes (cor vermelha) e as frias (cor azul). Algumas correntes apresentam mais de uma faixa de temperatura, de forma a representar melhor à variação das propriedades (CP e HTC) com a temperatura. A primeira corrente fria (RV) é o resíduo de vácuo, carga da unidade, que normalmente é pré-aquecida em uma bateria de trocadores de

calor, sendo em seguida enviada ao forno de coqueamento. Esta corrente é produzida na UDAV e enviada a UCR.

Tabela 5.1: *Retrofit* UCR – Dados das correntes

Correntes	T origem (°C)	T alvo (°C)	CP (Gcal/h °C)	ΔH (Gcal/h)	HTC (kcal/ h m^2 °C)
H1	236	195	0,02998	1,2291	790,5
	195	60	0,02625	3,5432	809,7
H2	328	202	0,03792	4,7784	865,8
	202	60	0,03098	4,3992	490,2
H3	374	219	0,01933	2,9962	578,0
	219	60	0,01557	2,4764	292,8
H4	236	161	0,08933	6,7000	665,2
H5	328	192	0,04825	6,5625	499,4
H6	380	300	0,05283	4,2260	1129,9
RV	170	200	0,15040	4,5120	336,1
	200	360	0,16476	26,3611	840,3
C1	130	161	0,21613	6,7000	725,2
C2	173	191	0,36458	6,5625	655,2

A rede de trocadores existente é apresentada na Figura 5.1 abaixo. Observa-se que o RV é enviado ao forno com temperatura de 251°C. Na Tabela 5.2 são apresentados os dados relativos aos trocadores existentes da rede, enquanto na Tabela 5.3 é apresentado o consumo de utilidades da rede existente com seus respectivos custos e o ΔT mínimo atual da rede.

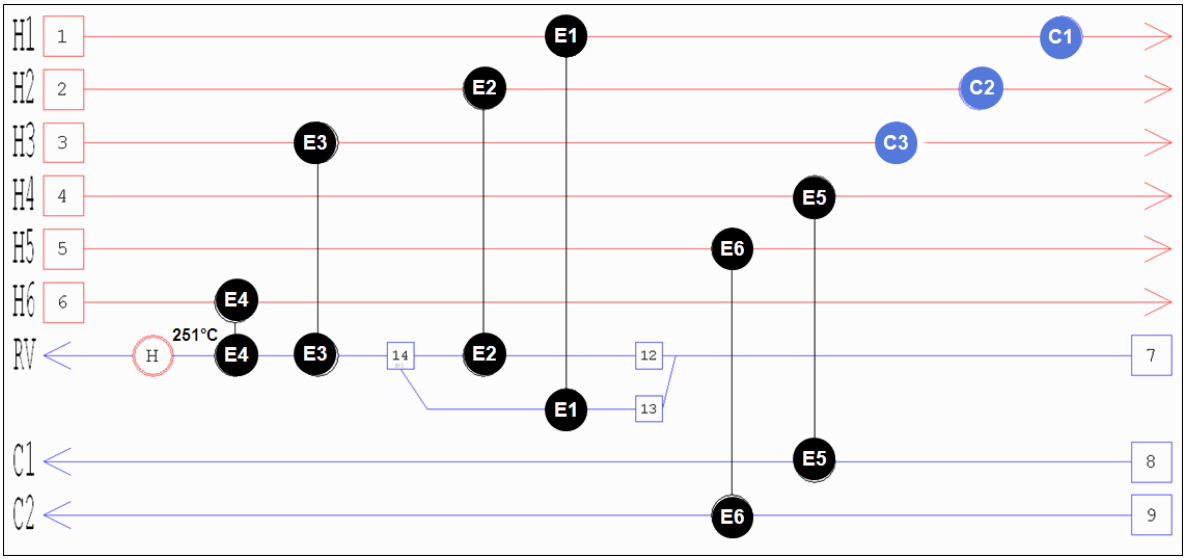

Figura 5.1: Esquema da rede existente da UCR

Tabela 5.2: Dados dos trocadores da rede existente da UCR

Trocador	Correntes	N° Cascos	Área total (m^2)
E1	RV x H1	1	183
E2	RV x H2	1	331
E3	RV x H3	1	300
E4	RV x H6	1	102
E5	H4 x C1	1	489
E6	H5 x C2	1	471
C1	Resfriador H1	1	99
C2	Resfriador H2	1	223
C3	Resfriador H3	2 (série)	232

Tabela 5.3: Consumos de utilidades da rede existente da UCR

ΔT min (°C)	10,0
Utilidade quente (Gcal/h)	17,9
Utilidade fria (Gcal/h)	10,7
Custo utilidade quente (10^6US$/ano)	3,171
Custo utilidade fria (10^6US$/ano)	0,609
Custo utilidade total (10^6US$/ano)	3,780

Uma vez conhecidas as características da rede existente, prosseguiu-se com a etapa seguinte, a realização do *targeting* para o caso de *retrofit* da rede. Foi realizado o procedimento apresentado do item 3.2, onde se caracteriza o custo de capital como o custo relativo à área adicional necessária para adequar a rede à nova condição, reaproveitando a área existente segundo uma determinada eficiência de reutilização α, que neste caso foi adotada como 0,75. Como já citado, este fator pode-se situar na faixa de 0,80 a 0,90, segundo o autor do método. Porém, como a UCR tem poucas unidades de troca térmica, também se inferiu que este valor deveria ser menor, devido a maior dificuldade de se atingir exatamente a área requerida em cada troca. O custo de reutilização da rede foi considerado igual a zero, ou seja, nenhum serviço de manutenção e/ou adaptação dos trocadores existentes é necessário para sua utilização nas novas condições. Os resultados do *targeting* para o caso de *retrofit* da UCR existente são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: *Retrofit* UCR – resultados do *targeting*

ΔT mínimo ótimo (°C)	26,7
Utilidade quente (Gcal/h)	14,3
Utilidade fria (Gcal/h)	7,1
Custo utililidades (10^6US$/ano)	2,928
Custo capital (10^6US$/ano)	0,549
Custo Total (10^6US$/ano)	3,477

Pela tabela, observa-se que foi obtido um ΔT mínimo ótimo de 26,7°C, resultando em uma redução do consumo de utilidades de 20,3% para a utilidade quente e 34,1% para a utilidade fria. Esta redução representa uma economia de 852.000 US$/ano em custo de utilidades em relação à rede existente. O custo de capital por ano apresentado na tabela corresponde a um investimento total de 3,603 milhões de dólares, resultando em um tempo de retorno de 4,2 anos.

Na Figura 5.2, observa-se a grande curva composta relativa ao ΔT mínimo de 26,7°C, com os respectivos consumos mínimos de utilidade quente e fria. Observa-se que a temperatura *pinch* alterada ficou em 143,3°C, correspondendo a 156,7°C na escala das correntes quentes e 130°C na escala das correntes frias.

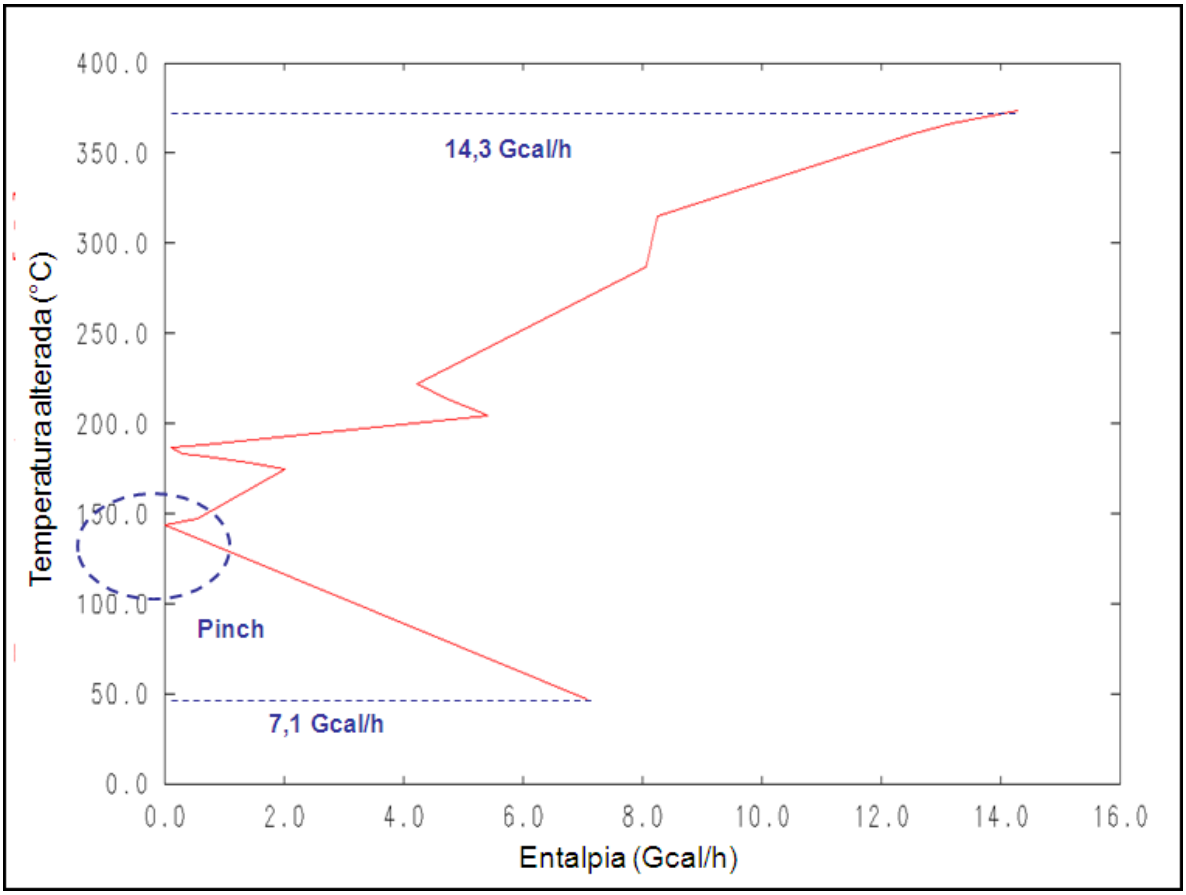

Figura 5.2: *Retrofit* UCR - Grande curva composta (ΔT mínimo = 26,7°C)

Prosseguindo com a metodologia proposta, a etapa seguinte consiste na montagem da rede da mesma forma que o método tradicional *pinch* indicaria, com a diferença de reutilizar os trocadores existentes ao máximo possível, de forma a se obter o consumo de utilidades e o custo de capital (investimento) previstos na etapa de *targeting*.

Foi então obtida uma rede reestruturada para a UCR, apresentada na Figura 5.3. Os trocadores preenchidos em preto são trocadores existentes, enquanto os demais são trocadores novos. Os dados relativos à rede são apresentados na Tabela 5.5.

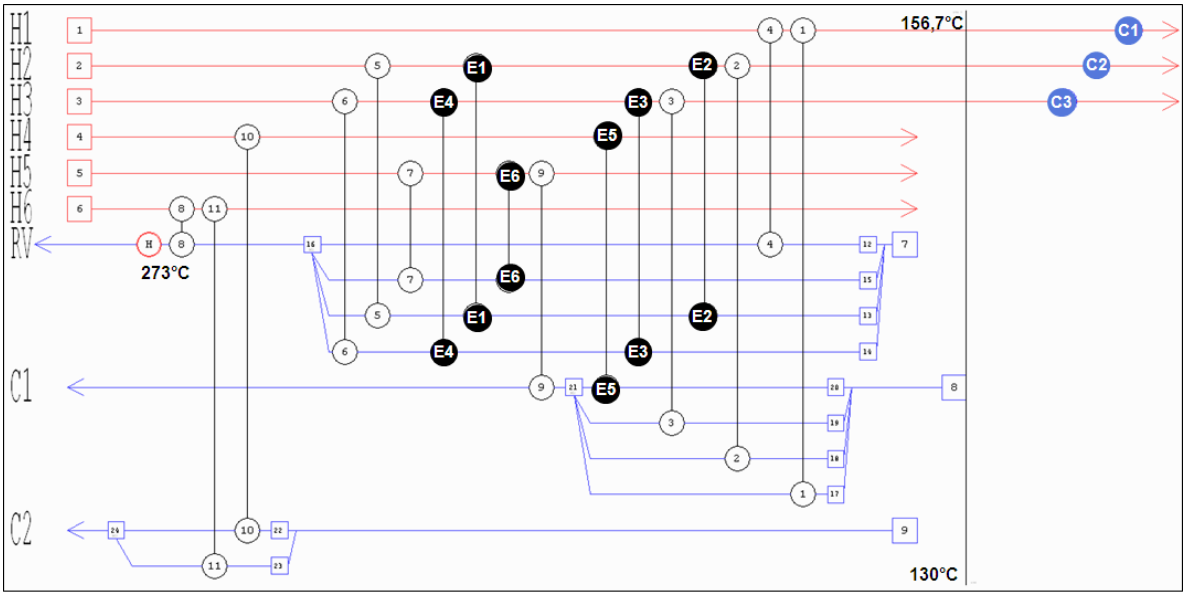

Figura 5.3: *Retrofit* UCR - Esquema da rede reestruturada 1

Tabela 5.5: *Retrofit* UCR - Dados da rede reestruturada 1

ΔT mínimo (°C)	26,7
Utilidade quente (Gcal/h)	14,3
Utilidade fria (Gcal/h)	7,1
Custo utilidades (10^6US$/ano)	2,928
Custo capital (10^6US$/ano)	1,157
Custo total (10^6US$/ano)	4,085

Observando a Figura 5.3, pode-se notar que foi necessária a criação de mais dois ramais para a corrente de RV, mais três ramais para a corrente C1 e mais um para a corrente C2, de modo a se respeitar as regras características da metodologia *pinch*. Os resfriadores finais foram todos aproveitados em suas posições originais, assim como os trocadores existentes E2 e E5. Os outros trocadores existentes, apesar de utilizados em posições diferentes da original, provavelmente não teriam maiores problemas, devido às novas temperaturas estarem próximas das antigas. O RV atingiu uma temperatura de 273°C antes do forno, o que representa um ganho de temperatura de 22°C em relação à rede original.

A rede proposta apresentou o consumo de utilidades previsto na etapa de *targeting*, representando uma economia de 852.000 US$/ano. Porém, o custo de capital foi superior ao previsto, sendo responsável por tornar o custo total 17,5% superior ao previsto, mesmo reutilizando todos os trocadores existentes. Este maior custo de capital corresponde a um investimento de 7,589 milhões de dólares,

resultando em um tempo de retorno de 8,9 anos, cerca do dobro do valor previsto pelo na etapa de *targeting*.

Com o intuito de se reduzir o investimento, obtendo resultados mais próximos aos previstos pelo *targeting*, foi realizada uma nova reestruturação da rede, sendo apresentada na Figura 5.4, com seus respectivos resultados na Tabela 5.6. Esta reestruturação foi realizada manualmente, apenas escolhendo trocas diferentes onde a metodologia indicava mais de uma opção e sempre sendo orientado pelas previsões dos objetivos indicadas pela análise do problema remanescente (RPA).

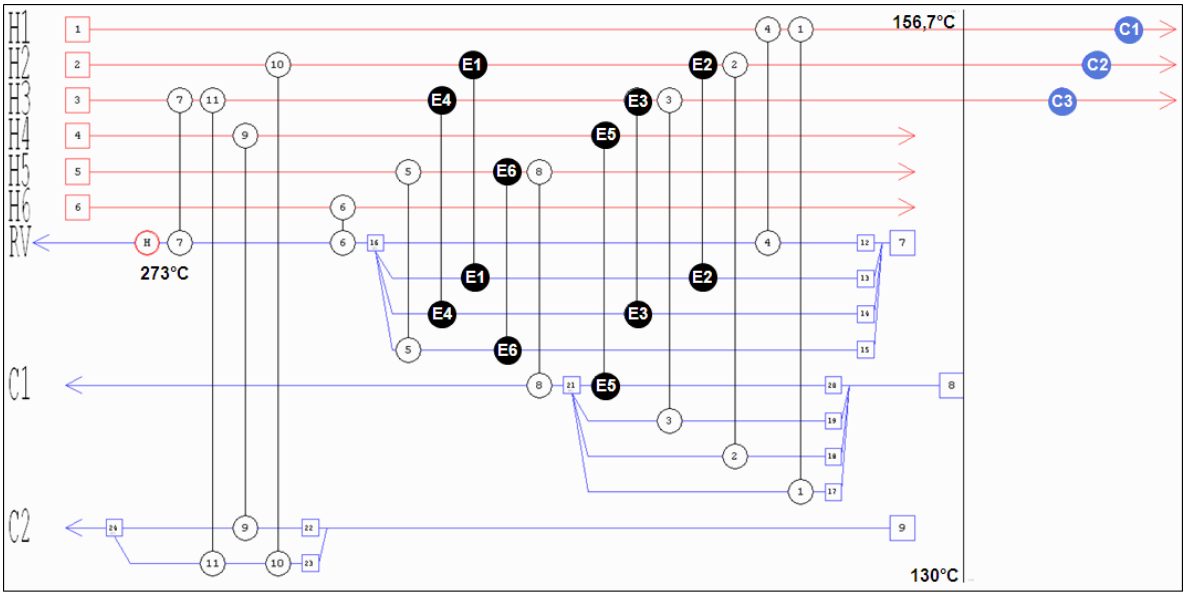

Figura 5.4: *Retrofit* UCR - Esquema da rede reestruturada 2

Tabela 5.6: *Retrofit* UCR - Dados da rede reestruturada 2

ΔT mínimo (°C)	26,7
Utilidade quente (Gcal/h)	14,3
Utilidade fria (Gcal/h)	7,1
Custo utilidades (10^6US$/ano)	2,928
Custo capital (10^6US$/ano)	1,030
Custo utilidades (10^6US$/ano)	3,958

Pode-se observar que a rede reestruturada 2 apresentou topologia bem semelhante à rede anterior. Mais uma vez o consumo de utilidades previsto foi obtido, porém desta vez com um menor investimento, reduzindo o desvio do custo total em relação ao previsto (ficou 13,8% superior ao previsto). O investimento total equivalente ao custo de capital anual foi de 6,756 milhões de dólares, resultando em

um tempo de retorno de 7,9 anos, diminuindo 1 ano em relação à rede anterior, mais ainda superior ao previsto.

Ainda com objetivo de redução do investimento, foi obtida uma terceira rede reestruturada também de forma manual, escolhendo novas trocas e realizando as divisões de corrente de forma diferente (sempre de acordo com as regras de síntese do método e sendo orientado pelo RPA). Com isso, foi obtida a rede apresentada na Figura 5.5, com seus respectivos dados na Tabela 5.7.

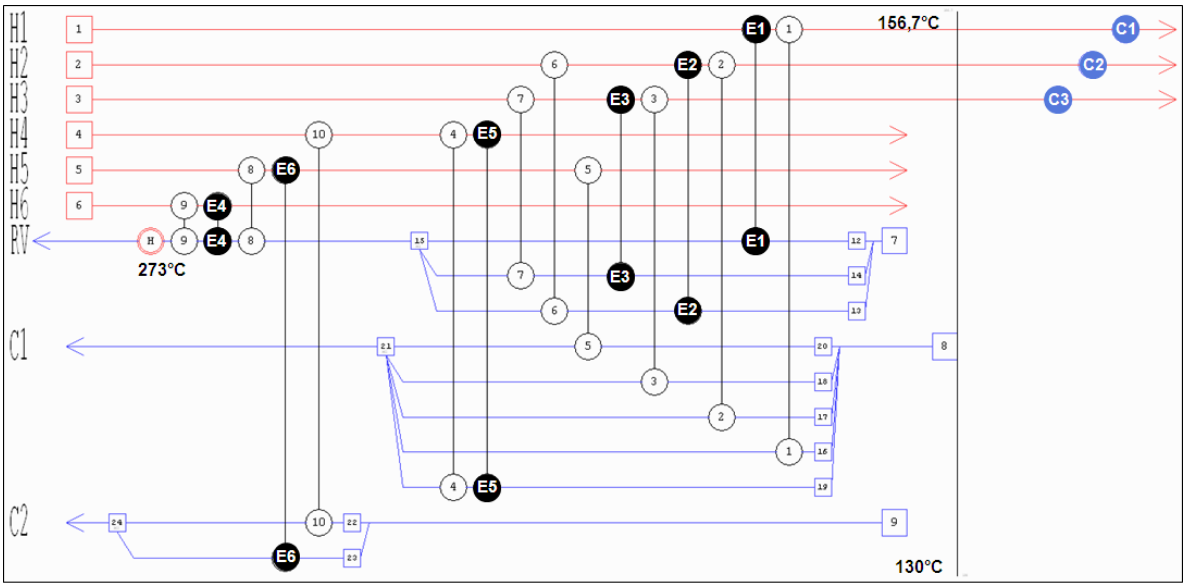

Figura 5.5: *Retrofit* UCR - Esquema da rede reestruturada 3

Tabela 5.7: *Retrofit* UCR - Dados da rede reestruturada 3

ΔT mínimo (°C)	24,2
Utilidade quente (Gcal/h)	14,3
Utilidade fria (Gcal/h)	7,1
Custo utilidades (10^6US$/ano)	2,928
Custo capital (10^6US$/ano)	0,824
Custo Total (10^6US$/ano)	3,752

Pode-se notar que a nova proposta de rede apresentou três ramais para o RV, porém aumentou um ramal para a corrente C1, que passou a ter cinco ramais. Todos os trocadores existentes foram reutilizados com suas correntes originais, o que representa uma grande vantagem em relação as redes anteriores. Porém, para isso foi necessário violar o ΔT mínimo em um trocador existente (E6), que precisou de um ΔT de 24,2°C de forma a fechar exatamente o balanço energético da rede.

Porém como é um trocador existente, que não possui custo, esta ligeira violação do ΔT mínimo ótimo a princípio não representa aumento de custo de capital total da rede. Os demais trocadores (principalmente os novos) apresentaram ΔT igual ou maior que o ótimo.

A rede novamente apresentou o consumo de utilidades previsto, porém com custo de capital menor, ficando o custo total apenas 7,9% acima do previsto. Mesmo assim, o investimento de 5,409 milhões de dólares, resultou em um tempo de retorno de 6,3 anos, mais próximo do esperado, porém ainda quase dois anos superior ao previsto na fase de *targeting*.

Para o caso de *retrofit* da UCR, se observou que o consumo de utilidades previsto na fase de *targeting* é obtido de maneira relativamente fácil, o mesmo não ocorrendo com o custo de capital, que apresentou desvio razoável em relação ao valor previsto, elevando o tempo de retorno esperado. Estes desvios até certo ponto são esperados, uma vez que a meta de área obtida no *targeting* não é uma previsão precisa, porém o que se observa em projetos novos são desvios menores que os obtidos neste estudo de *retrofit*. Estes maiores desvios podem ser explicados devido ao fato de, na etapa de *targeting*, ser considerada a reutilização sem restrição da área existente, ou seja, teoricamente os trocadores existentes poderiam ser utilizados em qualquer serviço. Este fato é inerente à própria natureza do método, pois a definição de metas em uma fase anterior à montagem da rede propriamente dita (filosofia da etapa de *targeting*) acaba não permitindo especificar estas restrições. Como já citado, na remontagem da rede procura-se modificar o mínimo possível a estrutura da rede original, tentando manter as divisões de corrente existentes e os trocadores em suas posições originais, evitando outros custos não previstos pela metodologia. Para o caso estudado, por exemplo, todos os trocadores de utilidades (resfriadores finais) foram mantidos em sua posição original. Esta prática é comum neste tipo de projeto, devido a evitar principalmente problemas de *layout* (uma vez que estes geralmente se localizam próximo ao limite de bateria das unidades) e para evitar custos de readaptação destes às novas condições de processo (geralmente diferentes da condição da água de resfriamento). Como estes trocadores correspondem a 23% do total da área existente, sua manutenção na posição original seria um dos principais motivos das distorções entre o custo de capital previsto e aos realmente obtidos nas redes reestruturadas.

5.2. Retrofit da UDAV

Neste item, é apresentado o estudo de *retrofit* para uma UDAV. Os dados de processo necessários para o estudo foram retirados de uma UDAV existente (com configuração típica e presente na mesma refinaria da UCR estudada no item anterior), através de medições de campo e complementados com dados calculados por um simulador de processos. As correntes e seus respectivos dados são apresentados na Tabela 5.8, onde se pode observar as correntes quentes (cor vermelha) e as frias (cor azul). Assim como no item anterior, algumas correntes apresentam mais de uma faixa de temperatura, de forma a representar melhor à variação das propriedades com a temperatura. A corrente quente RV1 representa o resíduo de vácuo, que necessita ser resfriado até a temperatura de 215°C, quando parte desta corrente retorna a torre de vácuo como *quench*, restando a corrente quente RV2, que após resfriamento até 170°C, é enviada a UCR (após armazenamento em tanque). A corrente fria C1 representa o petróleo cru antes da dessalgadora, a corrente fria C2 é o petróleo dessalgado, que é enviado para uma primeira torre de fracionamento (torre de pré-flash) e a corrente fria C3 é o cru pré-vaporizado (fundo da torre de pré-flash), que será enviada ao forno atmosférico.

Tabela 5.8: *Retrofit* UDAV – Dados das correntes

Correntes	T origem (°C)	T alvo (°C)	CP (Gcal/h °C)	ΔH (Gcal/h)	HTC (kcal/ h m^2 °C)
H1	166	102	0,08604	5,4891	556,0
	102	40	0,07668	4,7541	556,0
H2	185	111	0,07970	5,8657	801,6
	111	40	0,07060	5,0411	688,4
H3	239	140	0,06652	6,6056	833,3
	140	40	0,05672	5,6497	483,9
H4	296	167	0,06087	7,8031	714,3
	167	40	0,04989	6,3557	337,4
H5	124	100	0,59273	14,2255	810,8
	100	81	0,56830	10,7408	810,8
H6	297	190	0,21762	23,1983	810,8
H7	138	85	0,14139	7,4652	259,9
H8	309	249	0,49617	29,7208	562,9
	249	194	0,46371	25,2260	625,0
	194	140	0,42689	23,2227	531,3
RV1	360	310	0,20748	10,3742	198,8
	310	260	0,19599	9,7997	198,8
	260	215	0,18327	8,2931	228,3
RV2	215	170	0,13674	6,1189	126,9
C1	31	71	0,50976	20,2373	405,4
	71	110	0,55661	22,0418	440,4
	110	175	0,59406	38,4953	491,5
C2	164	170	0,70795	4,5309	498,8
	170	198	0,76435	20,9431	599,0
	198	251	0,91738	48,4377	513,0
C3	269	296	0,62926	16,9900	487,8
	296	340	0,65927	29,0080	555,6
C4	40	74	0,08489	2,9118	975,6
	74	109	0,08986	3,0911	975,6
	109	143	0,14062	4,8231	1250,0
C5	149	164	0,41958	6,0000	714,3
C6	177	182	0,56604	3,0000	739,4
C7	121	172	0,06809	3,5000	1250,0

A rede de trocadores existente é apresentada na Figura 5.6. Pode-se observar que a corrente C3 é enviada ao forno atmosférico com uma temperatura de 293°C. Na Tabela 5.9 são apresentados os dados relativos aos trocadores existentes da rede, enquanto na Tabela 5.10 é apresentado o consumo de utilidades da rede existente com seus respectivos custos e o ΔT mínimo atual da rede.

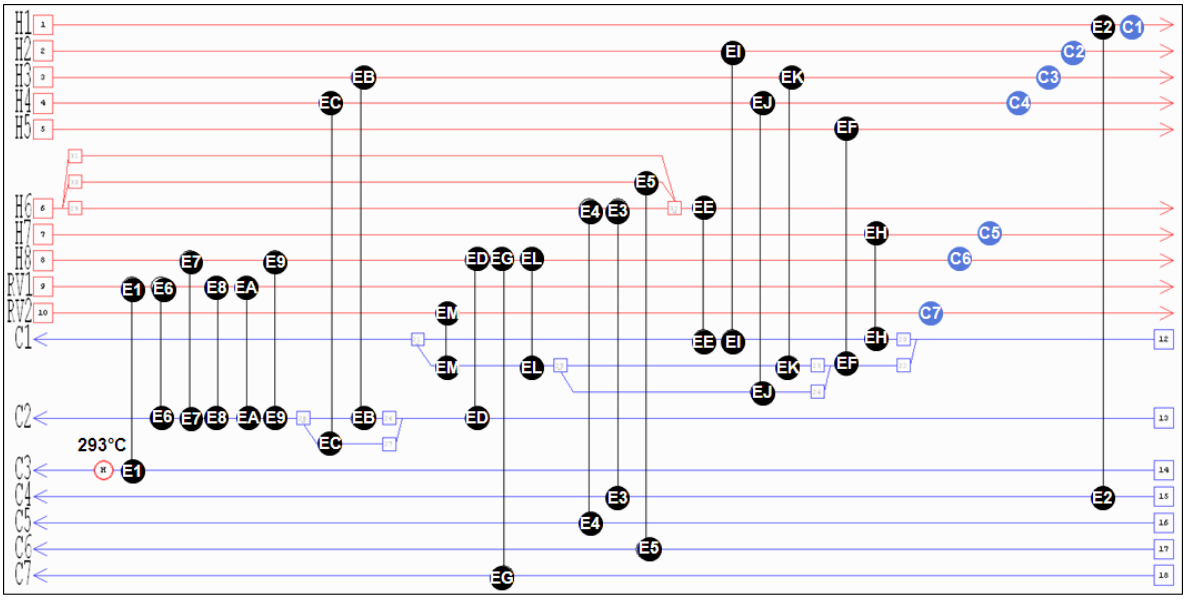

Figura 5.6: Esquema da rede existente da UDAV

Tabela 5.9: Dados dos trocadores da rede existente da UDAV

Trocador	Correntes	N° Cascos	Área total (m^2)
E1	RV1 x C3	4 (2ser/2par)	2908
E2	H1 x C4	2 (série)	554
E3	H6 x C4	1	191
E4	H6 x C5	1	286
E5	H6 x C6	1	208
E6	RV1 x C2	2 (paralelo)	1318
E7	H8 x C2	4 (paralelo)	2464
E8	RV1 x C2	2 (paralelo)	1230
E9	H8 x C2	2 (paralelo)	1158
EA	RV1 x C2	2 (paralelo)	1158
EB	H3 x C2	1	330
EC	H4 x C2	1	330
ED	H8 x C2	2 (paralelo)	1078
EE	H6 x C1	2 (série)	1362
EF	H5 x C1	4 (2ser/2par)	2560
EG	H8 x C7	1	460
EH	H7 x C1	1	390
EI	H2 x C1	2 (série)	752
EJ	H4 x C1	2 (paralelo)	548
EK	H3 x C1	2 (paralelo)	548
EL	H8 x C1	4 (2ser/2par)	2824
EM	RV2 x C1	2 (paralelo)	1368
C1	Resf. H1	1	151
C2	Resf. H2	1	151
C3	Resf. H3	2 (série)	240
C4	Resf. H4	2 (série)	318
C5	Resf. H7	2 (série)	392
C6	Resf. H8	1	175
C7	Resf. RV1	1	225

Tabela 5.10: Consumos de utilidades da rede existente da UDAV

ΔT mínimo (°C)	10,0
Utilidade quente (Gcal/h)	31,2
Utilidade fria (Gcal/h)	23,1
Custo utilidade quente (10^6US$/ano)	5,517
Custo utilidade fria (10^6US$/ano)	1,316
Custo utilidade Total (10^6US$/ano)	6,833

Em seguida foi realizado o *targeting* para o caso de *retrofit* da UDAV, com as mesmas considerações utilizadas no item anterior, exceto a eficiência de reutilização α, que neste caso foi adotada como 0,80. O valor adotado encontra-se dentro da faixa de 0,80 a 0,90 (citada pelo autor do método) e maior que o valor de 0,75

adotado pela UCR, uma vez que a UDAV possui mais trocadores, sendo teoricamente mais fácil de obter as áreas requeridas em cada troca. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: *Retrofit* UDAV – Resultados do *targeting*

ΔT mínimo ótimo (°C)	24,9
Utilidade quente (Gcal/h)	26,1
Utilidade fria (Gcal/h)	18,0
Custo utilidades (10^6US$/ano)	5,643
Custo capital (10^6US$/ano)	0,378
Custo Total (10^6US$/ano)	6,021

Pela tabela, observa-se que foi obtido um ΔT mínimo ótimo de 24,9°C, resultando em uma redução do consumo de utilidades de 16,3% para a utilidade quente e 22,1% para a utilidade fria. Esta redução representa uma economia de 1.190.000 US$/ano em custo de utilidades em relação à rede existente. O custo de capital por ano obtido na tabela corresponde a um investimento total de 2,483 milhões de dólares, resultando em um tempo de retorno de 2,1 anos.

Na Figura 5.7, observa-se a grande curva composta relativa ao ΔT mínimo de 24,9°C, com os respectivos consumos mínimos de utilidade quente e fria. Observa-se que a temperatura *pinch* alterada ficou em 296,6°C, correspondendo a 309°C na escala das correntes quentes e 284,1°C na escala das correntes frias.

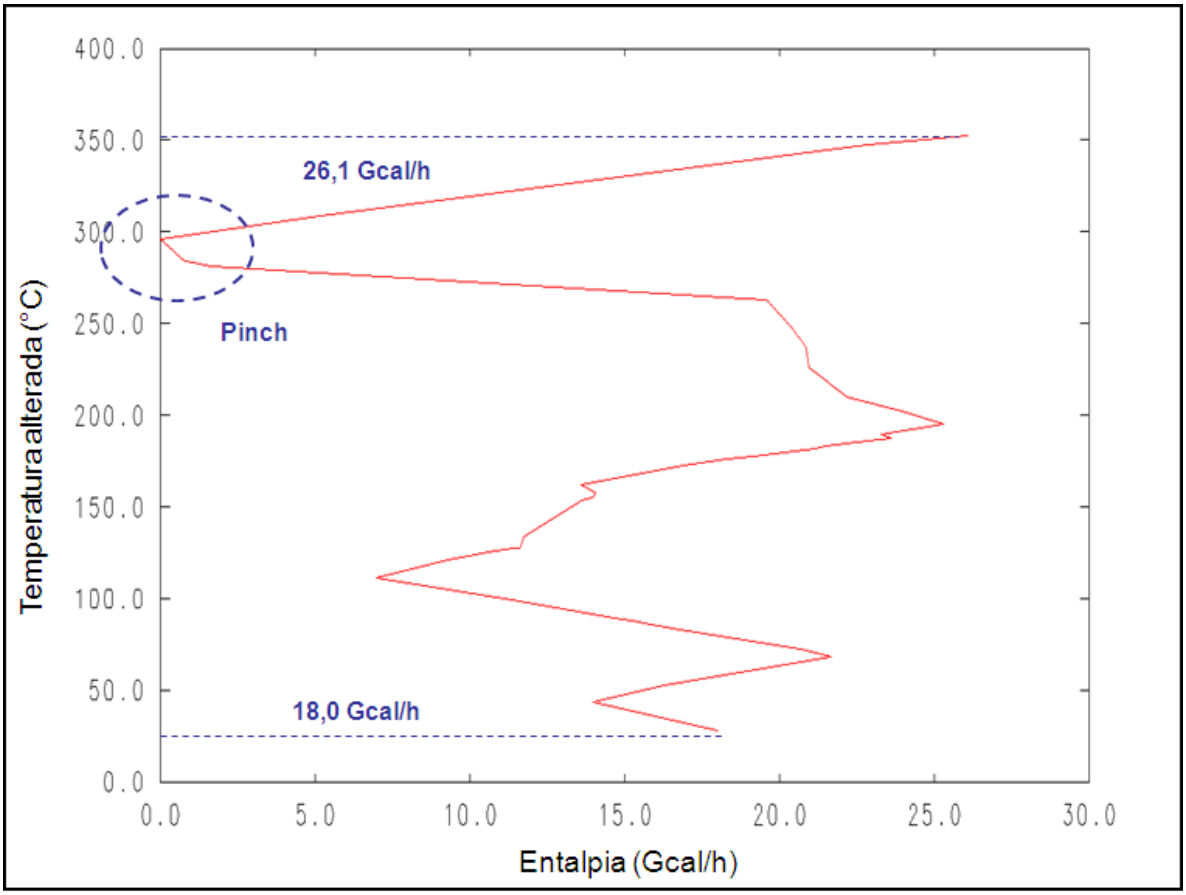

Figura 5.7: *Retrofit* UDAV - Grande curva composta (ΔT mínimo = 24,9°C)

Assim como no item anterior, foi realizada a montagem da rede através da metodologia *pinch*, reutilizando os trocadores existentes sempre que possível, na tentativa de se obter os objetivos previstos na etapa de *targeting*. Foi então obtida uma rede reestruturada para a UDAV, apresentada na Figura 5.8. Novamente os trocadores preenchidos em preto são trocadores existentes, enquanto os demais são trocadores novos. Os dados relativos à rede são apresentados na Tabela 5.12.

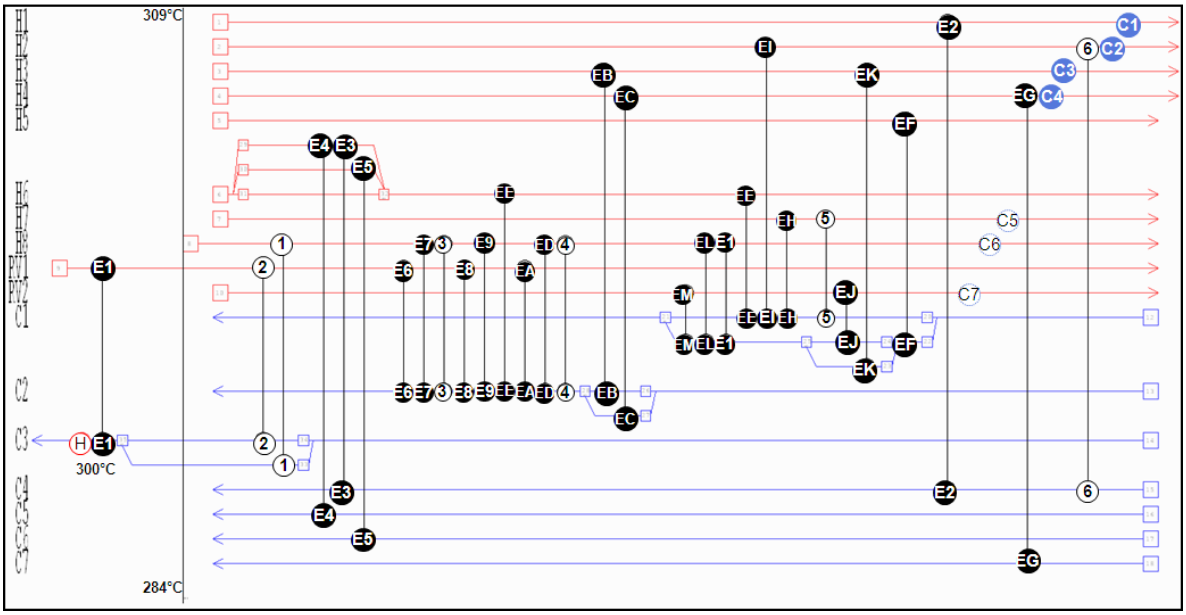

Figura 5.8: *Retrofit* UDAV – Esquema da rede reestruturada 1

Tabela 5.12: *Retrofit* UDAV - Dados da rede reestruturada 1

ΔT mínimo (°C)	24,1
Utilidade quente (Gcal/h)	26,1
Utilidade fria (Gcal/h)	18,0
Custo utilidades (10^6US$/ano)	5,643
Custo capital (10^6US$/ano)	1,285
Custo Total (10^6US$/ano)	6,928

Observando a Figura 5.8, pode-se notar que foram preservados ao máximo os ramais já existentes nas correntes e os trocadores existentes em suas posições originais, levando a rede a apresentar grande similaridade com a rede existente. Isto foi possível devido ao fato da maioria das correntes estarem afastadas do *pinch*, possuindo portanto maior flexibilidade na escolha das trocas térmicas. Foi apenas criado mais um ramal na corrente C3 (corrente que atravessa o *pinch*) e criados mais seis novos serviços. A corrente C3 (cru pré-vaporizado) atingiu uma temperatura de 300°C antes do forno, o que representa um ganho de temperatura de 7°C em relação à rede original. Tanto a corrente C1 como a C2 (petróleo cru antes da dessalgadora e cru dessalgado, respectivamente) mantiveram as temperaturas obtidas na rede existente. Estas correntes, por estarem abaixo do *pinch*, não devem ser complementadas com utilidades (regra de não existir utilidade quente abaixo do *pinch*). Os resfriadores finais C5, C6 e C7 tiveram sua carga

térmica zerada, pois as correntes correspondentes atingiram suas temperaturas alvo sem a necessidade destes. Foi necessário utilizar um ΔT ligeiramente menor que o ótimo (no valor de 24,1°C) para o trocador existente EA, de modo a fechar exatamente o balanço energético da rede.

A rede proposta apresentou o consumo de utilidades previsto na etapa de *targeting*, representando uma economia de 1.190.000 US$/ano. Porém, assim como no item anterior, o custo de capital foi superior ao previsto, levando o custo total a ficar 15,1% superior ao previsto. O custo de capital corresponde a um investimento de 8,429 milhões de dólares, resultando em um tempo de retorno de 7,1 anos, bem superior ao valor previsto.

Com objetivo de redução do investimento, para obter um valor mais próximo do previsto na etapa de definição de metas, foi obtida uma nova rede, de forma manual e ainda sob as regras de síntese do método. Porém nesta nova rede foi permitida a utilização de ΔT's menores que o ótimo para trocadores existentes. Assim como no item anterior, a ideia é que, como a violação do ΔT mínimo ótimo nos trocadores existentes não representa aumento de custo de capital, esta não apresente grandes desvios em relação ao custo de capital previsto. Com essa nova filosofia, foi obtida a rede apresentada na Figura 5.9, com seus respectivos dados na Tabela 5.13.

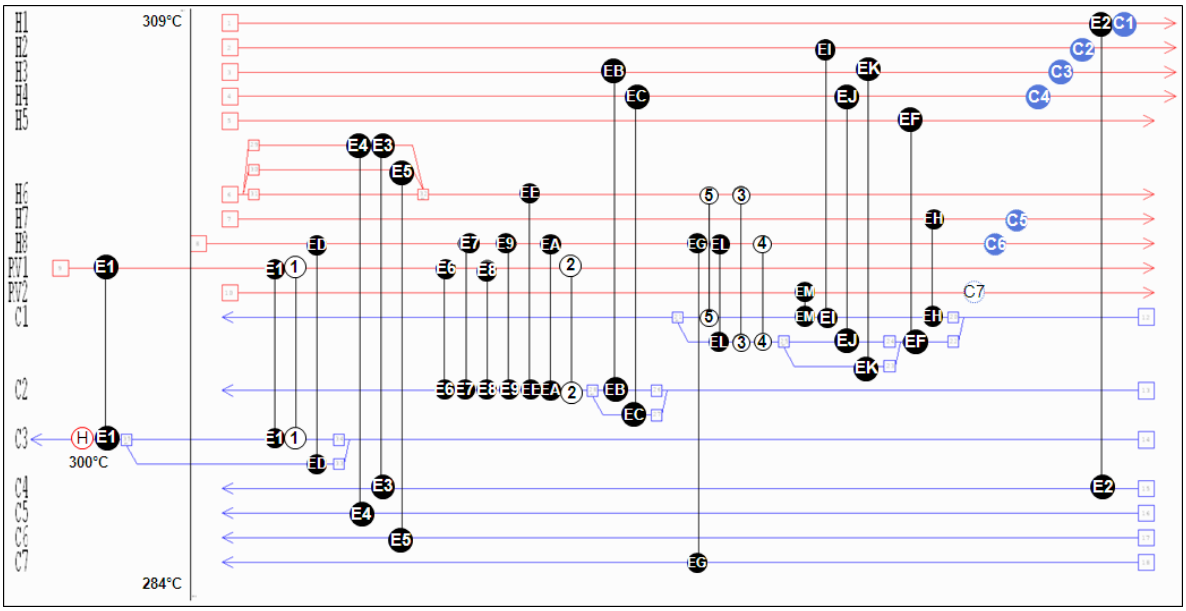

Figura 5.9: *Retrofit* UDAV – Esquema da rede reestruturada 2

Tabela 5.13: *Retrofit* UDAV - Dados da rede reestruturada 2

ΔTmin (°C)	13,3
Utilidade quente (Gcal/h)	26,1
Utilidade fria (Gcal/h)	18,0
Custo utilidades (10^6US$/ano)	5,643
Custo capital (10^6US$/ano)	0,891
Custo Total (10^6US$/ano)	6,534

Pode-se observar que mais uma vez foi possível obter uma rede de grande similaridade à rede existente. A liberação da utilização de ΔT's menores que o ótimo para trocadores existentes levou a rede a apresentar ΔT mínimo de 13,3°C, sendo o trocador existente EE responsável por este valor. Este menor ΔT para os trocadores existentes proporcionou uma maior troca térmica nos mesmos, sendo necessárias menos unidades novas de troca térmica e menor valor de área de troca adicional para montar a rede, quando comparado à rede anterior. Os trocadores novos continuaram a não violar o ΔT mínimo ótimo.

O consumo de utilidades previsto foi novamente obtido, porém com um menor custo de capital quando comparado a rede anterior, levando a uma redução do desvio do custo total (ficou apenas 8,5% superior ao previsto). O investimento total correspondente foi de 5,844 milhões de dólares, representando um tempo de retorno de 4,9 anos, reduzindo 2 anos em relação a rede anterior, mais ainda superior ao previsto na etapa de *targeting*.

Estes desvios podem ser explicados de forma análoga aos desvios obtidos para o *retrofit* da UCR. A preocupação em manter a máxima similaridade com a rede existente introduz restrições não previstas pelo método na fase de *targeting*, principalmente no que diz respeito aos resfriadores finais (para o *retrofit* da UDAV também foram mantidos em suas posições originais). Porém, no caso da UDAV, outro fator também contribui para estes desvios. Alguns trocadores existentes que foram mantidos em suas posições originais já possuíam excesso de área para a rede existente, ou seja, apenas parte da área estava sendo efetivamente utilizada. Isto porque estes trocadores possuem *by-pass* de controle, por serem refervedores de torres. Ao serem mantidos em suas posições originais, esta área continua sendo utilizada apenas em parte, sendo o restante de área "perdida". Como esta sutileza não é prevista pela metodologia na fase de *targeting*, isto contribuiu para um maior

desvio em relação ao custo de capital previsto. Esta área “perdida” representa cerca de 8% do total de área existente.

5.3. Retrofit da UCR e UDAV em conjunto

Neste item, é apresentado o estudo de *retrofit* de ambas as unidades (UCR e UDAV) em conjunto. A forma de integração entre unidades utilizada foi através da temperatura da corrente de processo que interliga as duas unidades, neste caso, a corrente de resíduo de vácuo (RV). Os dados de processo são os mesmos da Tabela 5.1 para a UCR e da Tabela 5.8 para a UDAV, a menos da temperatura de entrada da corrente RV na UCR e da temperatura de saída das correntes RV1 / RV2 da UDAV, que foram variadas de 170 a 360°C, conforme será apresentado a seguir.

A metodologia consiste em inicialmente determinar a temperatura ótima do RV, ainda na fase de *targeting*, utilizando a metodologia proposta para *retrofit*. Em seguida, foram obtidas as redes reestruturadas para cada unidade, utilizando o valor de temperatura determinado na etapa anterior e mais uma vez a metodologia proposta para o *retrofit*, sendo as novas metas de projeto as definidas pelo *targeting* na nova temperatura do RV.

5.3.1 Etapa de *targeting* (definição da temperatura ótima de RV)

Inicialmente será verificada a influência da temperatura de RV nos consumos mínimos de utilidades de cada uma das unidades. Serão comparadas as curvas compostas para cada temperatura de RV, mantendo um ΔT mínimo fixo, de modo a facilitar a comparação.

A Figura 5.10 apresenta as curvas da UCR para diferentes temperaturas de entrada de RV, utilizando um ΔT mínimo de 26,7°C (valor ótimo para a temperatura de entrada original do RV). A grande curva composta correspondente à temperatura original de entrada do RV (170°C) foi apresentada na Figura 5.2.

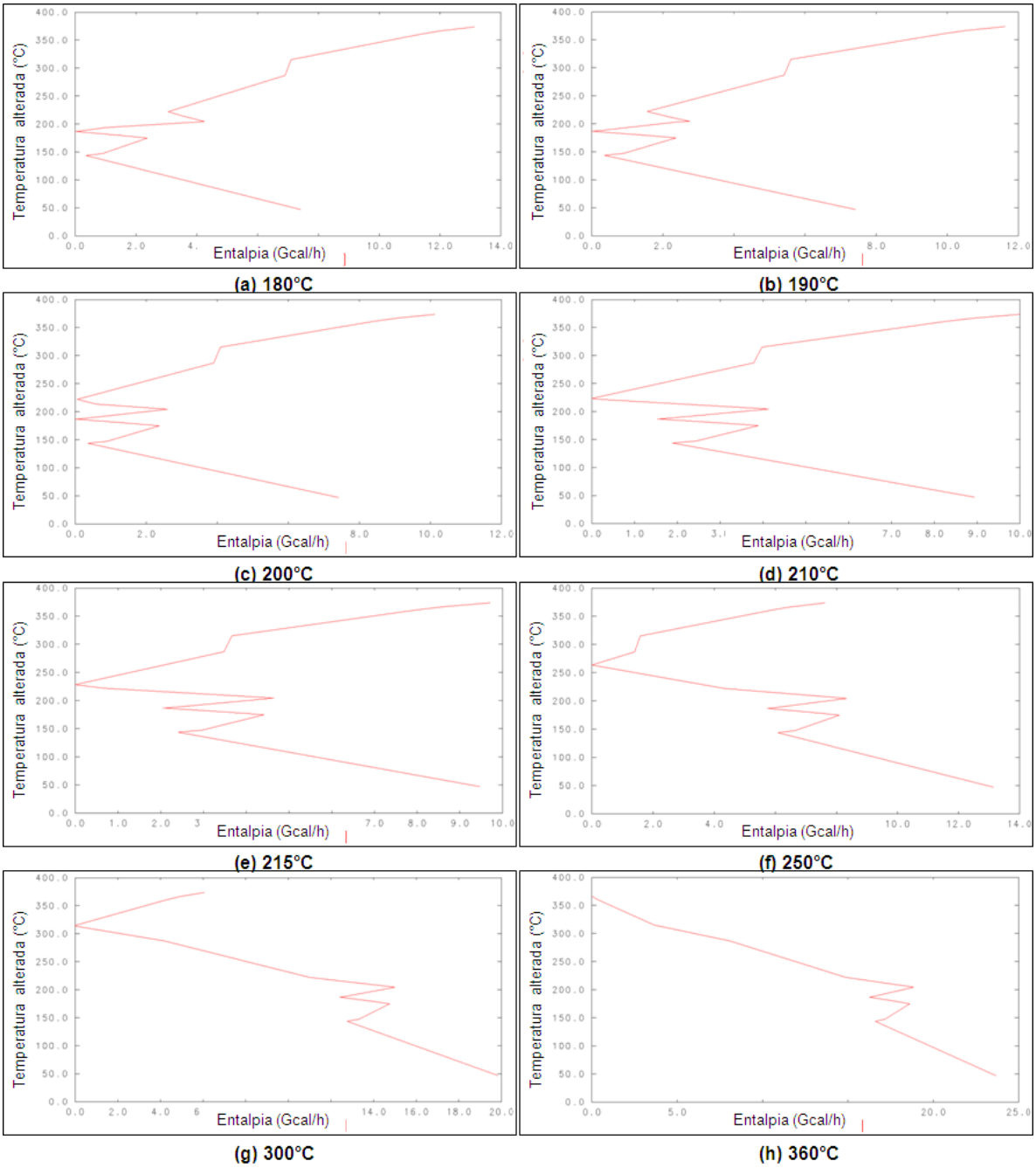

Figura 5.10: *Retrofit* conjunto – Grande curva composta UCR, variando T de entrada do RV

Para a temperatura de entrada do RV em 170°C (Figura 5.2), nota-se que a corrente de RV está acima do *pinch*, uma vez que a temperatura de *pinch* na escala das correntes frias é de 130°C. Com isso, como o aumento de sua temperatura de entrada significa redução de carga térmica, ao passar a temperatura de entrada para 180°C (Figura 5.10a), o consumo de utilidade quente é reduzido, conforme a teoria do *plus-minus principle*. Porém ao passar para 180°C também ocorre a modificação da temperatura de *pinch*, que passa a ser 173°C (escala das correntes frias),

levando a um pequeno aumento do consumo de utilidade fria. Portanto, a elevação da temperatura de entrada do RV de 170 para 180°C leva a uma redução de utilidade quente, devido a redução de carga térmica de corrente fria acima do *pinch*, e a um simultâneo aumento de utilidade fria, devido a modificação da temperatura de *pinch*. Nas temperaturas de 180, 190 e 200°C (Figura 5.10a, b, c), a temperatura de *pinch* não se modifica (valor de 173°C na escala das correntes frias). Com isso, o aumento da temperatura do RV leva apenas a redução do consumo de utilidade quente, mais uma vez devido à redução de carga térmica da corrente de RV, ficando constante o consumo de utilidade fria. Da temperatura de 210°C em diante, a temperatura de *pinch* passa a ser a própria temperatura de entrada da corrente de RV. Ou seja, para cada valor de temperatura de RV, uma nova temperatura de *pinch* é observada. Assim, para cada valor de temperatura de RV a partir de 210°C, a utilidade quente continua diminuindo, porém a fria vai aumentando, sendo que o aumento da utilidade fria é maior que a correspondente diminuição da quente. Por fim, na temperatura de 360°C, que consiste em receber a corrente de RV diretamente da UDAV (sem passar em nenhum trocador daquela unidade), resultaria em um problema sem *pinch*, levando a um consumo zero de utilidade quente, porém apresentando o maior consumo de utilidade fria dentre as temperaturas analisadas.

Intuitivamente, pode-se afirmar que a tendência geral observada é a esperada, pois como na UCR o RV é uma corrente fria de grande carga térmica, ao recebê-la mais quente na unidade tende-se a necessitar de menos utilidade quente para aquecê-la. Por outro lado, com menos carga térmica de corrente de processo fria disponível para resfriar as correntes quentes, tende-se a precisar de mais utilidade fria.

Análise semelhante foi realizada para a UDAV, sendo as curvas para cada temperatura de saída de RV apresentadas na Figura 5.11, utilizando um ΔT mínimo de 24,9°C (valor ótimo para a temperatura de saída original do RV). A grande curva composta correspondente à temperatura original de saída do RV (170°C) foi apresentada na Figura 5.7.

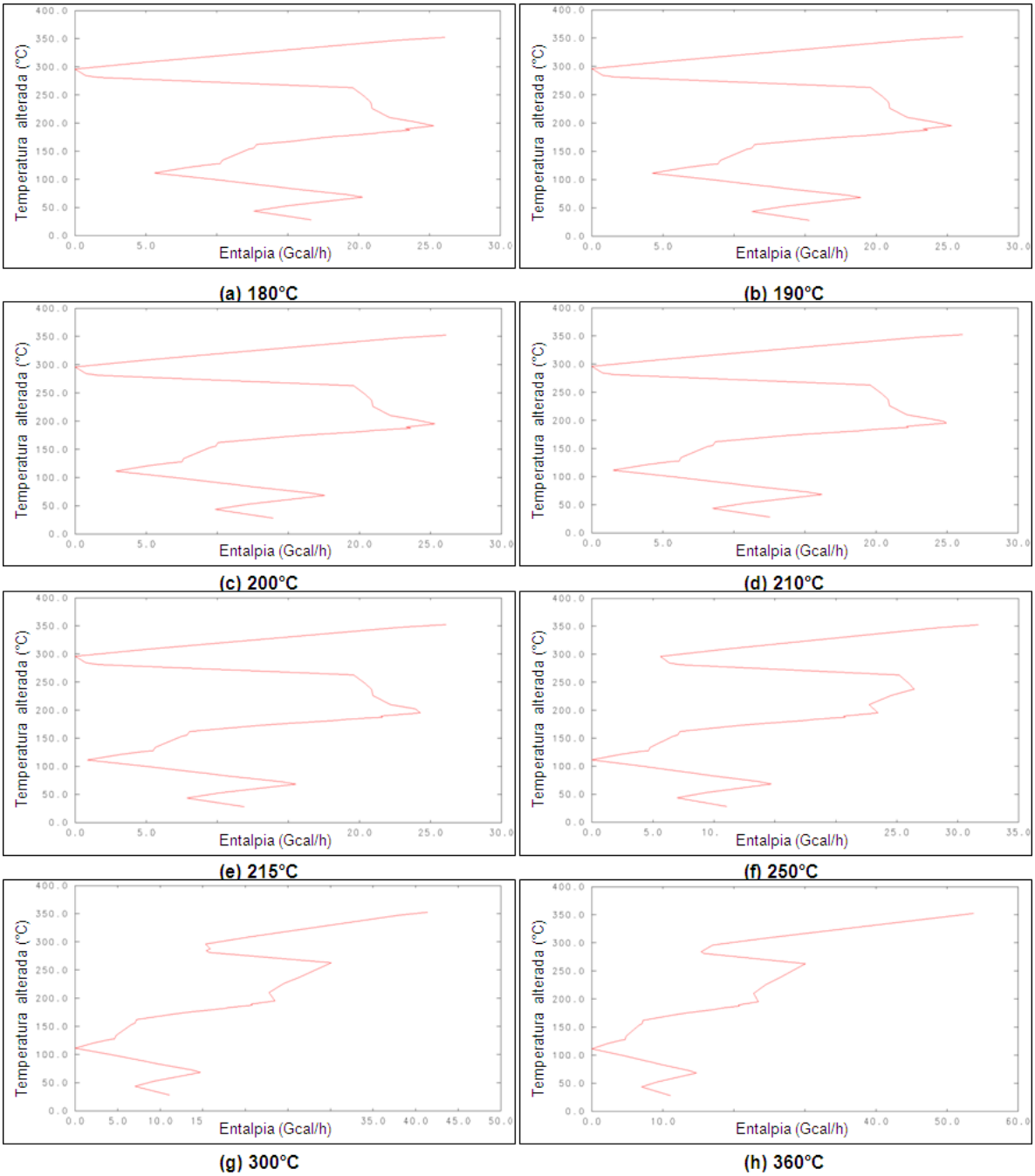

Figura 5.11: *Retrofit* conjunto – Grande curva composta UDAV, variando T de saída do RV

Para a temperatura de saída de RV em 170°C (Figura 5.7), nota-se que a maior parte da corrente de RV está abaixo do *pinch*, pois a temperatura de *pinch* na escala das correntes quentes é de 309°C. Portanto, com o aumento da temperatura de saída de RV (redução de carga térmica), observa-se a redução no consumo de utilidade fria, de acordo com a teoria do *plus-minus principle*. Do valor de 180 até 215°C (Figura 5.11a até Figura 5.11e), a temperatura de *pinch* não se modifica, sendo portanto reduzido o consumo de utilidade fria e mantido constante o consumo

de utilidade quente. A partir da temperatura de 250°C, a temperatura de *pinch* se modifica, passando a ser 124°C. Com isso, a situação se inverte, pois a corrente de RV passa a se localizar acima do *pinch*, o que significa que o aumento de sua temperatura de saída agora resulta em aumento de utilidade quente, mantendo a utilidade fria constante.

Também se pode afirmar que a tendência geral obtida para a UDAV foi a esperada, pois como o RV é uma corrente quente, a elevação de sua temperatura de saída leva a uma menor necessidade de resfriamento, reduzindo portanto o consumo de utilidade fria. Porém a sua carga térmica também é utilizada para aquecer as correntes frias da unidade e a redução desta leva a um aumento no consumo de utilidade quente. Até determinada temperatura (neste caso, 215°C), ainda é possível aquecer as correntes frias até o patamar anterior com as outras correntes, com isso têm-se apenas a vantagem da redução da utilidade fria, sem prejuízo no consumo de utilidade quente.

Em seguida, foi realizado o *targeting* para os casos de *retrofit* da UCR e da UDAV, variando a temperatura do RV. Assim como nos itens anteriores, a eficiência de reutilização da área existente (α) utilizada foi de 0,75 para a UCR e 0,8 para a UDAV. Os resultados da UCR são apresentados na Tabela 5.14, enquanto os resultados relativos a UDAV são apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.14: *Retrofit* conjunto – Resultados do *targeting* da UCR, variando T de RV

Temp. RV (°C)	**ΔTmin ótimo (°C)**	**Qh (Gcal/h)**	**Qf (Gcal/h)**	**Custo capital (10^6US$/ano)**	**Custo utilidade (10^6US$/ano)**	**Custo total (10^6US$/ano)**
170	26,7	14,3	7,1	0,549	2,928	3,477
180	25,6	12,9	7,2	0,608	2,689	3,297
190	25,1	11,3	7,1	0,694	2,397	3,091
200	28,9	10,6	7,9	0,589	2,325	2,914
210	25,5	9,9	8,8	0,472	2,248	2,720
215	28,8	9,9	9,7	0,334	2,306	2,640
250	27,9	7,7	13,3	0,055	2,125	2,180
300	12,4	3,8	17,5	0,059	1,667	1,726
360	-	-	23,6	0,020	1,347	1,367

Tabela 5.15: *Retrofit* conjunto – Resultados do *targeting* da UDAV, variando T de RV

Temp. RV (°C)	ΔTmin ótimo (°C)	Qh (Gcal/h)	Qf (Gcal/h)	Custo capital (10^6US$/ano)	Custo utilidade (10^6US$/ano)	Custo total (10^6US$/ano)
170	24,9	26,1	18,0	0,378	5,643	6,021
180	25,3	26,3	16,9	0,378	5,612	5,990
190	22,9	24,7	13,9	0,802	5,161	5,963
200	25,1	26,2	14,0	0,372	5,438	5,810
210	25,7	26,6	13,0	0,369	5,447	5,816
215	26,0	26,7	12,5	0,372	5,446	5,818
250	22,9	30,4	9,7	0,372	5,929	6,301
300	18,8	37,4	7,1	0,364	7,025	7,389
360	17,0	48,6	5,9	0,364	8,940	9,304

Para a UCR, pode-se concluir pela Tabela 5.14 que a tendência observada para o ΔT mínimo fixo foi mantida, ou seja, observa-se uma redução no consumo de utilidade quente com o aumento da temperatura de entrada do RV na unidade. Por outro lado o consumo de utilidade fria aumenta, porém como o custo da utilidade quente é superior ao da fria, o custo total de utilidades apresentou redução. Em relação ao custo de capital, este apresenta uma tendência de redução com o aumento da temperatura do RV. Com isso, a temperatura de 360°C apresentou o menor custo total para a UCR, pois apesar de ser o maior consumo de utilidade fria, não é necessária a utilização de utilidade quente. Nesta temperatura, o problema não apresenta *pinch*.

Para a UDAV, também se observa pela Tabela 5.15 que a tendência foi a mesma da análise com ΔT mínimo fixo. O consumo de utilidade fria reduz com o aumento da temperatura de saída do RV, enquanto o consumo de utilidade quente se mantém praticamente constante até cerca de 215°C, valor a partir do qual começa a aumentar de forma significativa. O custo de capital manteve-se praticamente constante, sendo a temperatura de 200°C a que resultou em um menor custo total para a UDAV.

A Tabela 5.16 mostra o somatório do custo total de cada uma das duas unidades para cada temperatura do RV. Pelos dados apresentados, pode-se observar que a temperatura de 215°C resulta no menor custo total conjunto para o *retrofit* das duas unidades, previsto pelo *targeting*. Esta portanto será a temperatura utilizada para a remontagem das redes na etapa seguinte.

Tabela 5.16: *Retrofit* Conjunto – Somatório dos custos totais, variando a T de RV

Temp. RV (°C)	Custo total UCR (10^6US$/ano)	Custo total UDAV (10^6US$/ano)	UCR + UDAV (10^6US$/ano)
170	3,477	6,021	9,498
180	3,297	5,990	9,287
190	3,091	5,963	9,054
200	2,914	5,810	8,724
210	2,720	5,816	8,536
215	2,640	5,818	8,458
250	2,180	6,301	8,481
300	1,726	7,389	9,115
360	1,367	9,304	10,671

5.3.2 Etapa de síntese da rede da UCR

Uma vez conhecida a temperatura ideal de envio do RV da UDAV para a UCR, prosseguiu-se com a remontagem das redes para cada unidade, de modo a se obter custos próximos aos previstos na etapa de *targeting*. Para a UCR, observa-se pela Tabela 5.14 que para a temperatura do RV de 215°C, o ΔT mínimo ótimo é de 28,8°C. Foi então obtida uma primeira rede reestruturada, sendo apresentada na Figura 5.12.

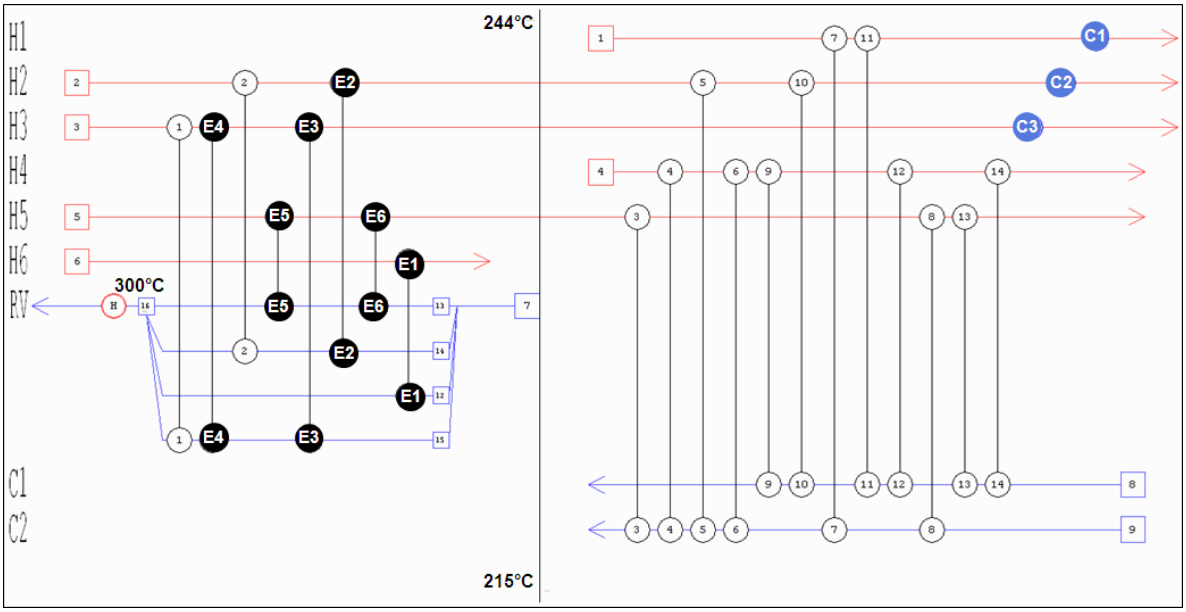

Figura 5.12: *Retrofit* conjunto – Esquema da rede reestruturada 1 para a UCR

Pode-se observar que os trocadores de processo existentes (trocadores E1 a E6) foram todos reutilizados na bateria de pré-aquecimento do RV. Na região abaixo do *pinch*, para satisfazer as cargas térmicas das correntes frias C1 e C2 respeitando

o ΔT mínimo de 28,8°C, foram necessários muitos trocadores em série, o que pode se caracterizar em um problema, caso as correntes não tenham pressão disponível suficiente para compensar a consequente maior perda de carga nos sistemas. Os parâmetros relativos a rede da Figura 5.12 são apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17: *Retrofit* conjunto - Dados da rede reestruturada 1 para a UCR

ΔT mínimo (°C)	28,8
Utilidade quente (Gcal/h)	9,9
Utilidade fria (Gcal/h)	9,7
Custo utilidades (10^6US$/ano)	2,306
Custo capital (10^6US$/ano)	0,880
Custo Total (10^6US$/ano)	3,186

Pela tabela, observa-se que o custo de utilidades previsto foi obtido, porém o custo de capital foi superior ao previsto na etapa de *targeting*, para a temperatura de entrada do RV na UCR de 215°C e ΔT mínimo de 28,8°C. Este maior custo de capital foi responsável por tornar o custo total da rede 20,7% superior ao custo total previsto.

Com o intuito de se obter uma rede mais simples e mais atrativa economicamente, foi realizada uma nova reestruturação da rede da UCR. Assim como nas propostas de *retrofit* das unidades isoladas, foi permitida a utilização de ΔT's menores que o ótimo principalmente para trocadores existentes, de forma a se obter uma rede com um número menor de modificações e com menos trocadores em série. O resultado desta abordagem pode ser verificado na Figura 5.13.

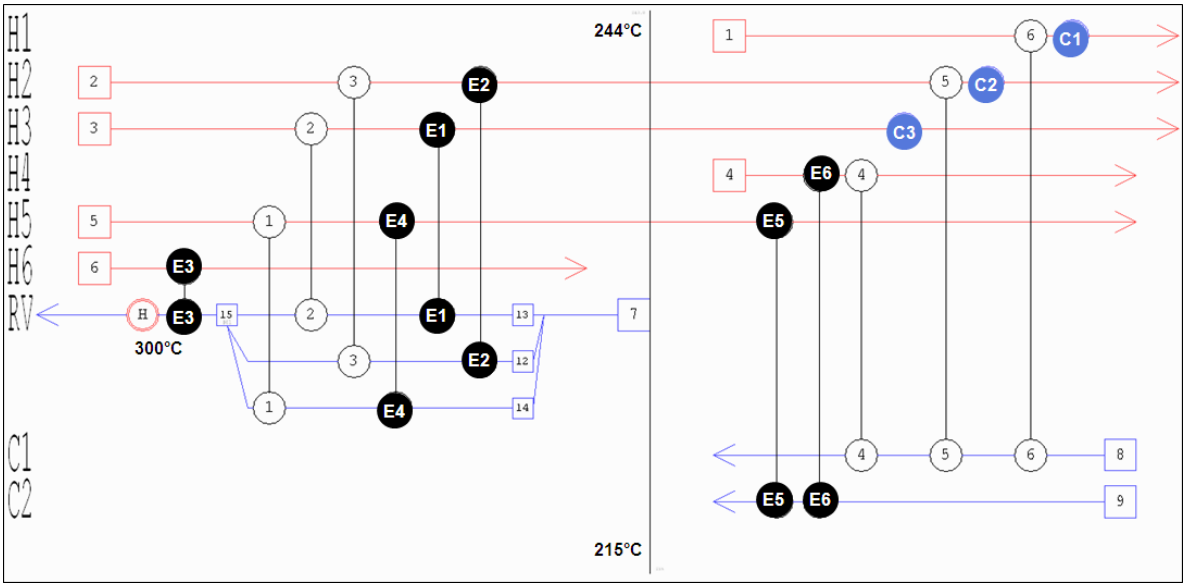

Figura 5.13: *Retrofit* conjunto – Esquema da rede reestruturada 2 para a UCR

A nova rede obtida para a UCR apresenta várias vantagens, em termos de simplicidade de processo, quando comparada a rede anterior (Figura 5.12). Foram obtidos menos trocadores em série para as correntes C1 e C2, minimizando um possível problema de limitação de perda de carga para estas correntes. Foi necessária a adição de apenas mais um ramal para a corrente de RV e os trocadores existentes foram aproveitados em condições muito mais parecidas com as originais, minimizando possíveis problemas de adequação destes trocadores às novas condições. Comparando-se com as redes obtidas no caso original (temperatura de entrada do RV em 170°C) esta rede também apresentou complexidade bem menor, com menos trocadores e menos divisões de correntes. Os dados relativos a esta rede são apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18: *Retrofit* conjunto - Dados da rede reestruturada 2 para a UCR

ΔT mínimo (°C)	7,4
Utilidade quente (Gcal/h)	9,9
Utilidade fria (Gcal/h)	9,7
Custo utilidades (10^6US$/ano)	2,306
Custo capital (10^6US$/ano)	0,584
Custo Total (10^6US$/ano)	2,890

Pelos dados, pode-se observar que a rede apresentou o mesmo custo de utilidades da rede anterior e consequentemente também o custo de utilidades

previsto na fase de *targeting*. O custo de capital foi reduzido em relação à rede anterior, porém para isso foi necessário um ΔT mínimo menor, igual a 7,4°C. Este ΔT foi obtido em um trocador existente (trocador E5), portanto não contribuindo para um aumento do custo de capital, uma vez que os trocadores existentes são reutilizados sem custo. Para os trocadores novos, apenas um (trocador 4) apresentou ΔT menor que o ótimo, ficando em 11,8°C. Mesmo assim, a rede apresentou custo total apenas 9,5% acima do custo previsto na fase de definição de metas. Este custo de capital anual corresponde a um investimento de 3,831 milhões de dólares, o que para a correspondente redução de custo de utilidades de 1,474 milhões de dólares por ano, resulta em um tempo de retorno de 2,6 anos. Este tempo de retorno é superior ao 1,5 anos previsto na fase de *targeting*, mas ainda assim é um valor bastante atrativo para projetos deste porte.

5.3.3 Etapa de síntese da rede da UDAV

Para a UDAV, observa-se pela Tabela 5.15 que, para a temperatura de saída do RV em 215°C, o ΔT mínimo ótimo é de 26,0°C. Foi então obtida uma rede reestruturada, sendo apresentada na Figura 5.14

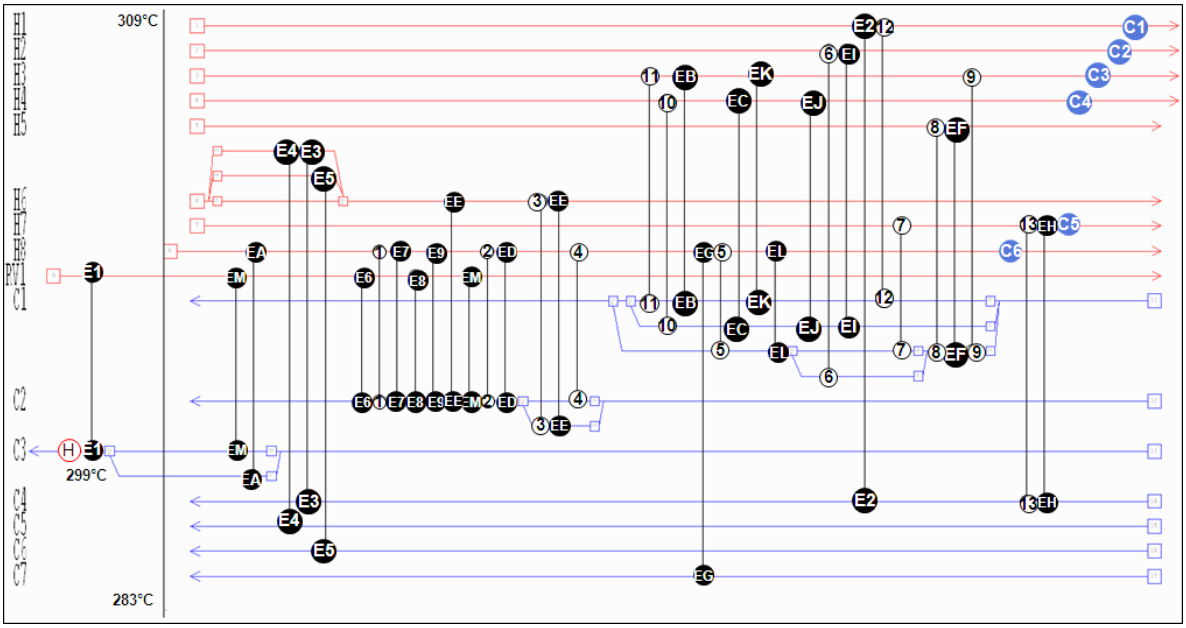

Figura 5.14: *Retrofit* conjunto – Esquema da rede reestruturada para a UDAV

Observa-se que foram necessárias mudanças mais profundas na rede de modo a se obter a redução prevista no consumo de utilidades. Foram adicionados 13 novas unidades de troca térmica, além de mais um ramal para a corrente C1. Os dados relativos à rede são apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: *Retrofit* conjunto - Dados da rede reestruturada para a UDAV

ΔTmin (°C)	26,0
Utilidade quente (Gcal/h)	26,7
Utilidade fria (Gcal/h)	12,5
Custo utilidades (10^6US$/ano)	5,446
Custo capital (10^6US$/ano)	1,681
Custo Total (10^6US$/ano)	7,127

Pela tabela, observa-se que o custo de utilidades previsto foi obtido, porém o custo de capital, assim como nos casos anteriores, foi superior ao previsto na fase de *targeting*, para a temperatura de saída do RV da UDAV de 215°C e ΔT mínimo de 26,0°C. Este maior custo de capital foi responsável por tornar o custo total da rede 22,5% superior ao custo total previsto. Este custo de capital anual corresponde a um investimento de 11,027 milhões de dólares, o que para a correspondente redução de custo de utilidades de 1,388 milhões de dólares por ano, resulta em um tempo de retorno de 7,9 anos, valor bem superior aos 1,8 anos previstos na fase de *targeting*.

Diferente da reestruturação da rede da UCR, onde foi possível reduzir o custo de capital permitindo trocas térmicas com ΔTs inferiores ao ótimo, para a UDAV não foi possível obter redes de custo de capital melhores, mesmo liberando este tipo de troca. A maior dificuldade de se obter melhores redes para a UDAV pode ser explicado analisando a grande curva composta para a temperatura de saída do RV em 215°C (Figura 5.11e). Nota-se que esta, apesar de manter a localização do *pinch* no mesmo ponto que no caso original, um segundo ponto também se aproxima bastante do eixo vertical, praticamente formando um segundo *pinch*. Com isso, a dificuldade de construção da rede ao redor do *pinch*, onde as opções de troca são mais restritas, se duplica, tornando a rede mais complexa e consequentemente, tornando o investimento maior para se obter a redução de utilidades prevista.

5.4. Comparação dos resultados

Na Tabela 5.20, encontram-se os dados relativos à otimização das redes de trocadores de calor das duas unidades, comparando as opções de *retrofit* das unidades isoladas e das unidades em conjunto, ou seja, considerando a temperatura de 215°C para o envio direto do RV de uma unidade a outra. São apresentados os resultados previstos na etapa de *targeting* e os obtidos de fato na construção das redes. Para os casos onde foram obtidas várias opções de rede, está sendo apresentado na tabela apenas o caso de melhor resultado econômico (menor tempo de retorno).

Tabela 5.20: *Retrofit* unidades isoladas x unidades em conjunto (previsto x obtido)

	ISOLADAS		CONJUNTO	
	PREVISTO	OBTIDO	PREVISTO	OBTIDO
Investimento UCR (10^6 US$)	3,603	5,409	2,190	3,831
Investimento UDAV (10^6 US$)	2,483	5,844	2,441	11,028
Economia utilidades UCR (10^6 US$/ano)	0,852	0,852	1,474	1,474
Economia utilidades UCR (%)	22,5%	22,5%	39,0%	39,0%
Economia utilidades UDAV (10^6 US$/ano)	1,190	1,190	1,388	1,388
Economia utilidades UDAV (%)	17,4%	17,4%	20,3%	20,3%
Investimento TOTAL (10^6 US$)	6,086	11,253	4,631	14,859
Economia utilidades TOTAL (10^6 US$/ano)	2,042	2,042	2,862	2,862
Economia utilidades TOTAL (%)	19,2%	19,2%	27,0%	27,0%
Tempo de retorno conjugado (anos)	3,0	5,5	1,6	5,2

Pela tabela, nota-se que para os resultados previstos pelo *targeting*, a opção de *retrofit* das unidades em conjunto apresenta grande vantagem em relação a opção de *retrofit* das unidades isoladas. Isto ocorre porque a opção em conjunto apresenta uma maior economia em utilidades, obtida com um menor investimento total em ambas as unidades, reduzindo o tempo de retorno pela metade. Isto seria possível devido ao envio de RV da UDAV para a UCR em uma temperatura mais adequada (no caso estudado, 215°C). Quando se comparam os resultados obtidos de fato nas redes reestruturadas, observa-se que em ambas as unidades a economia em utilidades prevista foi obtida, o que não ocorreu com o investimento correspondente previsto. Os investimentos obtidos foram significativamente maiores que os previstos, levando a opção de *retrofit* conjunto a se aproximar muito da opção de *retrofit* isolado, embora ainda apresente um tempo de retorno ligeiramente menor.

O grande responsável pelo maior investimento total na opção de *retrofit* conjunto foi da UDAV, devido ao seu investimento ter sido bem maior que o previsto na fase de *targeting*. Um dos fatores que contribuíram para este desvio foi a temperatura de RV escolhida para a opção de *retrofit* em conjunto ter praticamente formado um segundo *pinch*, o que tornou sua remontagem mais complexa. Além disso, todas as restrições para a remontagem da rede, tais como manutenção das divisões de corrente da rede original, manutenção dos resfriadores em suas posições originais, perda de utilização de área em alguns serviços, entre outras, também foram responsáveis por custos de capital superiores aos previstos na fase de *targeting*.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Inicialmente foi realizado um estudo de integração energética de um projeto novo de UCR através da metodologia *pinch* tradicional, de forma a demonstrar as potencialidades do método. O objetivo foi avaliar como aspectos de processo característicos deste tipo de unidade devem ser levados em consideração na síntese da rede de trocadores de calor e como modificações nestes parâmetros podem ser feitas visando uma melhor eficiência energética da unidade. Foram estudados vários casos, todos visando prover maior estabilidade à operação do refervedor de uma torre da unidade, fazendo uma integração indireta deste com correntes da seção semi-contínua da unidade. Chegou-se a conclusão que as redes mais promissoras técnica e economicamente foram a rede que gerava vapor na própria unidade e o utilizava como fonte quente para o refervedor e a rede que dividia o refervedor em dois, um sendo aquecido com corrente de processo e outro com vapor. Esta última rede apresentou ainda o menor consumo de utilidades (menor custo operacional) dentre todas as redes estudadas.

Em seguida, foi apresentado um estudo de otimização energética de duas unidades industriais existentes (*retrofit*), explorando as oportunidades de integração conjunta entre as unidades, utilizando metodologias disponíveis na literatura. A metodologia de *retrofit* utilizada foi a proposta por HERKENHOFF (2008), em sua tese de doutorado. Já a metodologia de integração de unidades utilizada foi através variação da temperatura de envio do RV de uma unidade a outra, assim como realizado por KUBOSKI *et al.*(2010), porém sendo adaptada para projetos de *retrofit*, ou seja, utilizando-a em conjunto com o método de *retrofit* mencionado.

O estudo de *retrofit* para as unidades isoladas foi realizado, possibilitando obter algumas opções de reestruturação das redes existentes de cada uma delas. Em todos os casos, a redução no consumo de utilidades prevista pelo *targeting* foi obtida, porém o mesmo não ocorreu com o custo de capital, que ficaram maiores que os previstos. Estes desvios podem ser explicados pela premissa de tentar manter as redes semelhantes ao máximo às redes existentes, de modo a minimizar custos não previstos pela metodologia. Essa premissa é mais forte em relação aos resfriadores finais, que foram mantidos em suas posições originais na montagem da

rede. A metodologia de *retrofit* proposta não diferencia trocadores de processo e trocadores de utilidades na reutilização da área existente, levando a prever um reaproveitamento maior que o realmente obtido quando se fixam os trocadores de utilidades nas posições originais. Apesar dos desvios, pode se considerar que a metodologia levou a obtenção de redes com atratividade econômica relativamente boa e total adaptação ao processo.

Já no caso de integração conjunta, também foi possível obter redes reestruturadas com a redução de consumo de utilidades prevista pelo método, porém mais uma vez com custos de capital maiores, devido às mesmas limitações citadas do método. Neste caso, especificamente para a UDAV, a temperatura ótima de envio do RV prevista pelo método gerou uma situação termodinâmica (existência de dois *pinches*) que elevou a dificuldade na remontagem da rede, levando a um maior desvio em relação ao custo de capital previsto, fato este não contemplado pela metodologia. Estes maiores custos levaram a aproximar os resultados do *retrofit* das unidades isoladas aos das unidades em conjunto, enfraquecendo as previsões da fase de *targeting*, que indicavam uma vantagem bem maior da opção integrada quando comparada as unidades isoladas.

Cabe ressaltar que as conclusões foram obtidas para os casos estudados e devem ser generalizadas com cuidado, pois a análise de outros casos pode levar a conclusões diferentes. Outro ponto a se ressaltar é que como as redes são montadas manualmente pelo projetista, não foram esgotadas todas as possibilidades de redes, sendo que melhores resultados poderiam ser obtidos com mais tentativas ou através de outros projetistas. Por fim, acredita-se que mesmo com os desvios observados, as metodologias utilizadas podem ser utilizadas não só para as unidades aqui estudadas (UDAV e UCR) assim como para quaisquer outras unidades industriais subsequentes, bastando para isso dispor dos dados necessários e tomar os cuidados devidos nas avaliações.

Como sugestões para trabalhos futuros, podem-se citar os itens abaixo:

- Modificação no procedimento proposto para o *retrofit*, separando a área existente entre área de processo e área de utilidades;

- Estudo do fator de reutilização de área α, de forma a propor uma metodologia para sua quantificação, em função da área existente e das restrições de remontagem da rede;
- Utilização de um método matemático (por exemplo, *simulated annealing*) para o estudo de *retrofit* e a integração entre as unidades estudadas;
- Utilização de um método termodinâmico automatizado, disponível no *software AtHENS* para o estudo de *retrofit* e integração entre as unidades estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASANTE, N.D.K., ZHU, X.X., 1996, An Automated Approach for Heat Exchanger Network Retrofit Featuring Minimal Topology Modifications, **Computers & Chemical Engineering**, v. 20 (Suppl.), p. S7 – S12.

BAGAJEWICZ, M., RODERA, H., 2000, Energy Savings in the Total Site Heat Integration across Many Plants, **Computers & Chemical Engineering**, v. 24, p. 1237 – 1242.

BECKER, H., GIRARDIN, L., MARÉCHAL, F., 2010, Energy Integration of Industrial Sites with Heat Exchange Restrictions, **20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20.**

BULASARA, V.K., UPPALURI, R., GHOSHAL, A.K., 2009, Revamp Study of Crude Distillation Unit Heat Exchanger Network: Energy Integration Potential of Delayed Coking Unit Free Hot Streams, **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 2271 – 2279.

CASTRO, A.V.S., KUBOSKI, C.L.M., BIAZI, D.H., OLIVEIRA, R.A., GERALDELLI, W., 2012, CDU Preheating Train Retrofit Keeping Heat Exchangers Network Topology, **AIChE Spring Meeting**, Houston – TX.

CHEN, Q.L., YIN, Q.H., WANG, S.P., HUA, B., 2004, Energy-Use Analysis and Improvement for Delayed Coking Units, **Energy**, v. 29, p. 2225 – 2237.

CIRIC, A.R., FLOUDAS, C.A., 1990, A Mixed Integer Nonlinear Programming Model for Retrofitting Heat Exchanger Networks, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 29, p. 239 – 251.

DOLAN, W. B., CUMMINGS, P. T., VAN, M. D. L., 1989, Process Optimization via Simulated Annealing: Application to Network Design, **AIChE Journal**, v. 35, n. 5, p. 725-736.

FENG, X., PU, J., YANG, J., CHU, K.H., 2011, Energy Recovery in Petrochemical Complexes through Heat Integration Retrofit Analysis, **Applied Energy**, v. 88, p. 1965 – 1982.

FLOUDAS, C. A., CIRIC A. R., GROSSMANN, I. E., 1986, Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations, **AIChE Journal**, v. 32, n. 2 , p. 276-290.

FURMAN, K.C., SAHINIDIS, N.V., 2002, A Critical Review and Annotated Bibliography for Heat Exchanger Network Synthesis in the 20th Century, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 41, n. 10, p. 2335 – 2370.

HERKENHOFF, R.G., 2008, **Uma Nova Estratégia para a Reestruturação de Redes de Trocadores de Calor**, Campinas: UNICAMP. Tese de Doutorado.

KRALJ, A.K., GLAVIC, P., KRAVANJA, Z., 2005, Heat Integration between Processes: Integrated Structure and MINLP Model, **Computers & Chemical Engineering**, v. 29, p. 1699 – 1711.

KUBOSKI, C.L.M., OLIVEIRA, R.A., CASTRO, A.V., GERALDELLI, W.O., 2010, Designing CDU Preheating Train Thermally Coupled to DCU through Vacuum Residue Temperature, **AIChE Spring Meeting**, San Antonio, TX.

LAKSHMANAN, R., BANARES-ALCANTARA, R., 1996, A Novel Visualization Tool for Heat Exchanger Retrofit, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 35, n.12, p. 4507-4522.

LI, B.H., CHANG, C.T., 2010, Retrofitting Heat Exchanger Networks Based on Simple Pinch Analysis, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 8, p. 3967-3971.

LINNHOFF, B., HINDMARSH, E., 1983, The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks, **Chemical Engineering Science**, v. 38, n. 5, p. 745-763.

LINNHOFF, B., WITHRELL, W.D., 1986, Pinch Technology Guides Retrofit, **Oil & Gas Journal** (April 7), p. 54 -65.

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

LIPORACE, F.S., 2000, **Síntese de Redes de Trocadores de Calor: Proposta de um Procedimento Automático e Estudo da Influência da Presença de Misturas que Mudam de Fase**, Rio de Janeiro: EQ/UFRJ. Tese de Doutorado.

LIPORACE, F.S., PESSOA, F.L.P., QUEIROZ,E.M., 2002, An Alternative Procedure to Retrofit an Industrial Plant. A Case Study, **Latin American Applied Research**, v. 32, p. 161-170.

MIZUTANI, F.T., 2003, **Síntese de Redes de Trocadores de Calor com o Projeto Detalhado das Unidades via Programação Matemática**, Rio de Janeiro: EQ/UFRJ. Tese de Doutorado.

OLIVEIRA, S.G., 2001, **Síntese de Redes de Trocadores de Calor com Considerações de Controle**, Rio de Janeiro: EQ/UFRJ. Tese de Doutorado.

PLESU, V., BUMBAC, G., IANCU, P., IVANESCU, I., POPESCU, D.C., 2003, Thermal Coupling between Crude Distillation and Delayed Coking Units, **Applied Thermal Engineering**, v. 23, p. 1857 – 1869.

PONTON, J.W., DONALDSON, R.A.B., 1974, A Fast Method for the Synthesis of Optimal Heat Exchanger Networks, **Computers & Chemical Engineering**, v. 13, n. 7, p. 859 – 860.

PROMVITAK, P., SIEMANOND, K., BUNLUESRIRUANG, S., RAGHAREUTAI, V., 2009a, Grassroots Design of Heat Exchanger Networks of Crude Distillation Unit, **Chemical Engineering Transactions**, v. 18, p. 219 – 224.

PROMVITAK, P., SIEMANOND, K., BUNLUESRIRUANG, S., RAGHAREUTAI, V., 2009b, Retrofit Design of Heat Exchanger Networks of Crude Distillation Unit, **Chemical Engineering Transactions**, v. 18, p. 99 – 104.

RODERA, H., BAGAJEWICZ, M.J., 1999, Targeting Procedures for Energy Savings by Heat Integration across Plants, **AIChE Journal**, v. 45, n. 8, p. 1721 – 1742.

RODERA, H., BAGAJEWICZ, M., J., 2001, Multipurpose Heat-Exchanger Networks for Heat Integration across Plants, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 40, p. 5585 -5603.

RUDD, D.F., POWERS, G.J., SIIROLA, J.J., 1973, **Process Synthesis**, New Jersey: Prentice-Hall Incorporation.

SANTANA, M.F., 2012, **Síntese Automática de Redes de Trocadores de Calor a partir de Análise *Pinch* e Programação Matemática**, Campinas: UNICAMP. Dissertação de Mestrado.

SILVA, A.P., 2009, **Projeto Ótimo de Redes de Trocadores de Calor Utilizando Técnicas Não Determinísticas**, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. Tese de Doutorado.

SMITH, R., 2005, **Chemical Process Design and Integration**. New York, John Wiley and Sons Ltd.

SMITH, R., JOBSON, M., CHEN, L., 2010, Recent Development in the Retrofit of Heat Exchanger Networks, **Applied Thermal Engineering**, v. 30, p. 2281 – 2289.

TJOE, T.N., LINNHOFF, B., 1986, Using Pinch Technology for Process Retrofit, **Chemical Engineering**, v. 93, n. 8, p. 47 – 60.

WANG, Y., PAN, M., BULATOV, I., SMITH, R., KIM, J.K., 2012, Application of Intensified Heat Transfer for the Retrofit of Heat Exchanger Network, **Applied Energy**, v. 89, p. 45 – 59.

YEE, T. F. e GROSSMANN, I. E., 1990, Simultaneous Optimization Models for Heat Integration – II – Heat Exchanger Network Synthesis, **Computers & Chemical Engineering**, v. 14, n. 10, p. 1165-1184.

YEE, T. F.; GROSSMANN, I. E., 1991, A Screening and Optimization Approach for the Retrofit of Heat-Exchanger Networks, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 30, n. 1, p.146-162.

ZHANG, B.J., LUO, X.L., CHEN, Q.L., HUI, C.W., 2011, Heat Integration by Multiple Hot Discharges/Feeds between Plants, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, p. 10744 – 10754.

APÊNDICE: DADOS DAS REDES OBTIDAS

Caso original (Figura 4.3):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
1	1	118	3,79	364	248	222	237
2	1	165	1,67	164	146	116	144
3	2	150	2,78	265	164	144	172
4	1	181	11,02	325	285	209	222
5	4	554	6,49	232	164	144	209
6	2	747	14,00	232	182	150	202
7	1	113	5,38	285	265	202	222
8	2	134	2,74	248	164	144	171
9	3	505	11,34	372	265	237	321
10	1	3	0,36	375	372	144	150
11	2	232	8,00	375	277	237	296
Resf. H1	1	3	0,14	146	145	-	-
Resf. H2	1	13	0,52	164	145	-	-
Resf. H3	1	93	2,73	164	80	-	-

Caso original (Figura 4.4):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
1	1	16	1,00	364	333	231	235
2	1	165	1,67	164	146	116	144
3	1	100	2,42	265	177	150	159
4	1	181	11,02	325	285	209	222
5	2	407	6,49	232	164	144	187
6	3	1038	14,00	232	182	159	211
7	1	134	5,38	285	265	211	231
8	2	176	5,51	333	164	144	181
9	3	498	11,70	375	265	235	323
10	1	45	0,36	177	164	144	150
11	2	226	8,00	375	277	235	295
Resf. H1	1	3	0,14	146	145	-	-
Resf. H2	1	13	0,52	164	145	-	-
Resf. H3	1	94	2,74	164	80	-	-

Caso modificado 1 (Figura 4.6):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
1	3	432	5,32	375	325	305	353
2	1	308	5,68	224	164	144	163
3	3	350	4,08	375	325	305	354
4	1	91	1,27	364	325	305	322
5	3	1272	16,39	325	265	244	305
6	1	98	3,92	325	277	229	244
7	1	130	6,38	325	265	205	229
8	2	861	14,00	232	182	153	205
9	1	16	0,80	232	224	150	153
10	1	162	4,63	325	183	163	178
11	1	88	1,69	265	204	178	184
12	1	130	1,61	204	145	116	143
13	1	34	0,42	183	170	143	150
Resf. H1	1	34	1,81	164	145	-	-
Resf. H3	1	99	2,94	170	80	-	-
Referv. C3*	1	341	11,02	-	-	209	222

*Não está representado na figura

Caso modificado 2 (Figura 4.8):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
1	1	165	1,67	164	146	116	144
2	2	407	6,49	232	164	144	187
3	1	45	0,36	177	164	144	150
4	2	176	5,51	333	164	144	181
5	1	100	2,42	265	177	150	159
6	3	1039	14,00	232	182	159	211
7	1	228	11,02	325	285	249	250
8	1	134	5,38	285	265	211	231
9	1	16	1,01	364	333	231	235
10	3	498	11,70	375	265	235	323
11	2	226	8,00	375	277	235	295
Resf. H1	1	3	0,14	146	145	-	-
Resf. H2	1	13	0,52	164	145	-	-
Resf. H3	1	94	2,74	164	80	-	-
Referv. C3*	1	341	11,02	-	-	209	222

*Não está representado na figura

Caso modificado 3 (Figura 4.10):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
1	1	165	1,68	164	146	116	144
2	2	407	6,49	232	164	144	187
3	2	176	5,51	333	164	144	181
4	1	45	0,36	177	164	144	150
5	1	135	5,51	285	265	209	222
6	1	100	2,42	265	177	150	159
8	3	1038	14,00	232	182	159	211
9	2	238	7,13	311	285	211	291
10	1	58	3,76	325	311	211	253
11	3	501	11,70	375	265	211	342
12	1	37	1,01	364	333	291	303
15	4	516	8,00	375	277	253	343
Resf. H1	1	3	0,14	146	145	-	-
Resf. H2	1	13	0,52	164	145	-	-
Resf. H3	1	94	2,74	164	80	-	-
Referv. C3*	1	171	5,51	-	-	209	222

*Não está representado na figura

Retrofit UCR – Rede reestruturada 1 (Figura 5.3):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
Trocadores existentes							
E1	1	183	1,66	279	235	205	243
E2	1	331	1,41	235	197	170	205
E3	1	300	0,77	241	197	170	208
E4	1	102	0,87	286	241	208	247
E5	1	489	3,53	200	161	130	156
E6	1	471	2,07	240	197	170	204
C1	1	99	2,54	157	60	-	-
C2	1	223	3,01	157	60	-	-
C3	2S	232	1,51	157	60	-	-
Trocadores novos							
1	2S	108	1,07	197	157	130	168
2	2S	156	1,25	197	157	130	165
3	2S	109	0,63	197	157	130	164
4	2S	186	1,17	236	197	170	208
5	2S	116	1,85	328	279	243	285
6	2S	137	1,70	374	286	247	325
7	2S	324	4,23	328	240	204	268
8	1	17	0,85	380	364	268	273
9	1	26	0,26	197	192	160	161
10	1	299	3,17	236	200	173	190
11	1	55	3,38	364	300	173	192

S - série P - paralelo

Retrofit UCR – Rede reestruturada 2 (Figura 5.4):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
Trocadores existentes							
E1	1	183	1,66	279	235	205	243
E2	1	331	1,41	235	197	170	205
E3	1	300	0,77	241	197	170	208
E4	1	102	0,87	286	241	208	247
E5	1	489	3,53	200	161	130	156
E6	1	471	2,07	240	197	170	204
C1	1	99	2,54	157	60	-	-
C2	1	223	3,01	157	60	-	-
C3	2S	232	1,51	157	60	-	-
Trocadores novos							
1	2S	109	1,07	197	157	130	168
2	2S	157	1,25	197	157	130	165
3	2S	110	0,63	197	157	130	164
4	2S	183	1,17	236	197	170	208
5	2S	324	4,23	328	240	204	268
6	1	121	4,23	380	300	246	272
7	1	5	0,18	374	365	272	273
8	1	27	0,26	197	192	160	161
9	1	299	3,17	236	200	173	190
10	1	40	1,85	328	279	173	183
11	1	37	1,52	365	286	183	192

S - série P - paralelo

Retrofit UCR – Rede reestruturada 3 (Figura 5.5):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
Trocadores existentes							
E1	1	183	1,17	236	197	170	193
E2	1	331	1,75	244	197	170	204
E3	1	300	2,06	308	197	170	210
E4	1	102	3,38	364	300	248	268
E5	1	489	3,35	198	161	130	168
E6	1	471	3,37	267	197	173	191
C1	1	99	2,54	157	60	-	-
C2	1	223	3,01	157	60	-	-
C3	2S	232	1,51	157	60	-	-
Trocadores novos							
1	2	109	1,07	197	157	130	168
2	2	157	1,25	197	157	130	165
3	2	110	0,63	197	157	130	164
4	1	17	0,18	200	198	168	170
5	1	15	0,26	197	192	130	136
6	2	157	3,17	328	244	204	262
7	1	32	1,28	374	308	210	233
8	1	178	2,93	328	267	230	248
9	1	17	0,85	380	364	268	273
10	1	299	3,17	236	200	173	190

S - série P - paralelo

Retrofit UDA – Rede reestruturada 1 (Figura 5.8):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
Trocadores existentes							
E1	3S	2181	10,63	360	309	284	300
E1	1	727	4,41	150	140	112	122
E2	2S	554	5,32	166	104	77	126
E3	1	191	2,35	220	190	126	143
E4	1	286	6,00	297	220	149	164
E5	1	208	3,00	297	220	177	182
E6	2P	1318	4,74	295	271	245	250
E7	4P	2464	24,64	295	245	218	245
E8	2P	1230	6,92	271	234	209	217
E9	2P	1158	6,77	242	227	202	209
EA	2P	1158	3,53	234	215	191	196
EB	1	330	3,32	239	189	164	173
EC	1	330	4,30	296	225	164	176
ED	2P	1078	10,43	227	205	177	191
EE	1	681	5,22	244	220	196	202
EE	1	681	6,62	220	190	130	177
EF	2S 2P	2560	24,97	124	81	31	93
EG	1	460	3,50	225	168	121	172
EH	1	390	2,96	138	117	68	90
EI	2S	752	5,52	185	116	90	130
EJ	2P	548	3,42	195	170	93	110
EK	2P	548	4,46	189	119	93	114
EL	2S 2P	2824	21,26	200	150	122	169
EM	2P	1368	2,70	215	195	169	175
C1	1	151	4,93	104	40	-	-
C2	1	151	2,23	72	40	-	-
C3	2S	240	4,48	119	40	-	-
C4	2S	318	6,36	168	40	-	-
C5	2S	392	0,00	85	85	-	-
C6	1	175	0,00	140	140	-	-
C7	1	225	0,00	170	170	-	-
Trocadores novos							
1	1	1052	6,66	309	295	269	284
2	1	778	2,65	309	295	269	284
3	1	242	1,77	245	242	217	218
4	1	280	2,24	205	200	174	177
5	1	601	4,51	117	85	31	68
6	2S	234	3,16	116	72	40	77

S - série P - paralelo

Retrofit UDA – Rede reestruturada 2 (Figura 5.9):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
Trocadores existentes							
E1	3P	2181	10,63	360	309	284	300
E1	1	727	2,51	309	296	270	284
E2	2S	554	7,16	166	80	40	117
E3	1	191	3,67	220	173	117	143
E4	1	286	6,00	297	220	149	164
E5	1	208	3,00	297	220	177	182
E6	2P	1318	5,77	295	266	244	251
E7	4P	2464	22,47	295	250	220	244
E8	2P	1230	5,94	266	234	213	220
E9	2P	1158	9,77	250	229	203	213
EA	2P	1158	10,07	229	207	182	195
EB	1	330	3,69	239	183	164	174
EC	1	330	6,08	296	196	164	180
ED	2P	1078	6,66	309	295	269	284
EE	2	1362	6,62	238	208	195	203
EF	2S 2P	2560	24,97	124	81	31	93
EG	1	460	3,50	207	200	121	172
EH	1	390	4,36	138	107	31	67
EI	2S	752	7,38	185	90	67	121
EJ	2P	548	4,49	196	112	93	114
EK	2P	548	4,71	183	108	93	115
EL	2S 2P	2824	15,76	200	163	140	175
EM	2P	1368	6,12	215	170	121	164
C1	1	151	3,08	80	40	-	-
C2	1	151	3,53	90	40	-	-
C3	2S	240	3,86	108	40	-	-
C4	2S	318	3,59	112	40	-	-
C5	2S	392	3,11	107	85	-	-
C6	1	175	0,86	142	140	-	-
C7	1	225	0,00	170	170	-	-
Trocadores novos							
1	1	24	0,09	296	295	269	270
2	1	510	3,53	234	215	177	182
3	1	152	2,37	201	190	135	140
4	1	1581	9,08	163	142	115	135
5	1	167	1,55	208	201	164	175

S - série P - paralelo

Retrofit conjunto UCR – Rede reestruturada 1 (Figura 5.12):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
Trocadores existentes							
E1	1	183	4,23	380	300	215	309
E2	1	331	1,67	288	244	215	256
E3	1	300	1,13	302	244	215	258
E4	1	102	1,34	372	302	258	309
E5	1	489	1,92	328	288	255	292
E6	1	471	2,13	288	244	215	255
C1	1	99	3,15	180	60	-	-
C2	1	223	3,58	175	60	-	-
C3	2S	232	2,96	244	60	-	-
Trocadores novos							
1	1	2	0,05	374	372	309	311
2	2S	111	1,51	328	288	256	293
3	1	120	1,33	244	216	187	191
4	1	188	2,29	236	210	181	187
5	1	89	1,43	244	206	177	181
6	1	46	0,46	210	205	176	177
7	1	68	1,02	236	202	173	176
8	1	3	0,03	216	215	173	173
9	1	193	2,29	205	179	150	161
10	1	80	0,99	206	175	146	150
11	1	34	0,60	202	180	143	146
12	1	96	1,07	179	167	138	143
13	1	58	1,15	215	192	133	138
14	1	52	0,58	167	161	130	133
S - série P - paralelo							

Retrofit conjunto UCR – Rede reestruturada 2 (Figura 5.13):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
Trocadores existentes							
E1	1	183	2,32	364	244	215	257
E2	1	331	2,35	306	244	215	258
E3	1	300	4,23	380	300	274	300
E4	1	102	0,90	263	244	215	231
E5	1	489	2,51	244	192	184	191
E6	1	471	4,05	236	190	173	184
C1	1	99	3,46	192	60	-	-
C2	1	223	3,26	165	60	-	-
C3	2S	232	2,96	244	60	-	-
Trocadores novos							
1	2S	335	3,15	328	263	231	289
2	1	5	0,20	374	364	257	261
3	1	39	0,83	328	306	258	273
4	1	503	2,65	190	161	149	161
5	1	154	2,74	244	165	136	149
6	1	44	1,31	236	192	130	136

S - série P - paralelo

Retrofit conjunto UDA – Rede reestruturada (Figura 5.14):

Trocador	N° Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
Trocadores existentes							
E1	2S 2P	2908	10,63	360	309	283	299
E2	2S	554	3,63	166	124	98	127
E3	1	191	2,19	220	192	127	143
E4	1	286	6,00	297	220	149	164
E5	1	208	3,00	297	220	177	182
E6	2P	1318	4,96	296	271	245	251
E7	2S 2P	2464	23,04	289	242	216	241
E8	2P	1230	6,83	271	235	209	216
E9	2P	1158	6,97	242	227	201	209
EA	2P	1158	6,21	309	296	269	283
EB	1	330	2,47	219	182	150	185
EC	1	330	3,28	243	190	148	194
ED	2P	1078	9,34	220	200	174	186
EE	1	681	5,34	245	221	195	201
EE	1	681	6,46	220	190	164	181
EF	2S 2P	2560	22,91	120	81	36	93
EG	1	460	3,50	199	191	121	172
EH	1	390	3,00	109	88	40	75
EI	2S	752	4,23	124	65	31	98
EJ	2P	548	3,54	190	124	98	148
EK	2P	548	3,71	182	124	98	150
EL	2S 2P	2824	18,66	185	141	114	155
EM	1	684	2,41	309	296	269	283
EM	1	684	3,36	235	216	190	195
C1	1	151	2,39	71	40	-	-
C2	1	151	1,79	65	40	-	-
C3	2S	240	2,95	92	40	-	-
C4	2S	318	4,17	124	40	-	-
C5	2S	392	0,45	88	85	-	-
C6	1	175	0,54	141	140	-	-
C7	1	225	0,00	-	-	-	-

Retrofit conjunto UDA – CONTINUAÇÃO (Figura 5.14):

Trocador	Nº Cascos	Área total (m^2)	Q (Gcal/h)	Te (°C)	Ts (°C)	Te (°C)	Ts (°C)
				Quente		Frio	
Trocadores novos							
1	1	273	3,61	296	289	241	245
2	1	307	3,30	227	220	186	190
3	1	16	0,22	221	220	181	182
4	1	53	0,51	200	199	164	165
5	1	328	2,51	191	185	155	161
6	1	469	4,89	185	124	98	120
7	1	447	2,01	138	124	98	107
8	1	271	2,06	124	120	93	98
9	1	111	1,79	124	92	31	36
10	1	243	3,18	296	243	194	239
11	1	133	1,34	239	219	185	204
12	2S	640	4,23	124	71	31	98
13	1	349	2,01	124	109	75	98
S - série P - paralelo							