

MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM PLANTAS DE PROCESSO COM INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

FLAVIO WALTZ MOREIRA E SILVA

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
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

FLAVIO WALTZ MOREIRA E SILVA

MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM PLANTAS DE PROCESSO COM
INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

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

2012

FICHA CATALOGRÁFICA

W241m Waltz, Flavio Moreira e Silva.

Minimização do Consumo de Água em Plantas de Processo com Integração Energética / Flavio Waltz Moreira e Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2012. xxix, 206 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2012.

Orientadores: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Eduardo Mach Queiroz

1. Minimização de água. 2. Integração de energia. 3. Plantas de processo. 4. Geração de efluentes. – Teses. I. Pessoa, Fernando Luiz Pellegrini (Orient.). II. Queiroz, Eduardo Mach (Orient.). III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química. IV. Título.

CDD: 333.79

MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM PLANTAS DE PROCESSO COM INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

FLAVIO WALTZ MOREIRA E SILVA

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 – Presidente da Banca)

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

Carlos Augusto Guimarães Perlingeiro, Ph.D.

Lídia Yokoyama, D.Sc.

Bernadete Elizardo Pereira da Costa Delgado, D.Sc.

Escola de Química
Universidade Federal do Rio de Janeiro
2012

AGRADECIMENTOS:

A **Deus** – que “não joga dados com o Universo.”(Albert Einstein).

“Na realidade, todas as coisas, todos os acontecimentos, para quem os sabe ler com profundidade, encerram uma mensagem que, em definitivo, remete para Deus.” (João Paulo II).

A meus pais Eleazar e Neide – Vocês abriram mão de muitas coisas por minha causa. Espero conseguir retribuir todo esse amor e carinho com eterna gratidão.

A minha irmã Marianna Waltz – Minha irmã coragem, minha bandeirante, só seguir seus passos que vou longe.

A meu filho Fabrício - Aprendi mais com você do que você pode imaginar. Saudações Tricolores.

A meus orientadores: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Eduardo Mach Queiroz – Já tinha desistido, mas vocês me apoiaram. Por isso meu muitíssimo obrigado.

A meus amigos do CAp-UERJ, da EQ/UFRJ, da RADIX, do Tae Kwon-do, de São Cristóvão, das peladas e da vida – acredito do fundo do coração que sou muito sortudo e abençoado, pois sou rico, praticamente milionário em amizades verdadeiras.

A meu querido Brasil – País do samba e do futebol, pátria do evangelho e, em breve, com nossos esforços somados, país DA ENGENHARIA.

RESUMO

Waltz, Flavio Moreira e Silva. **Minimização do Consumo de Água em Plantas de Processo com Integração Energética**. Orientadores: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Eduardo Mach Queiroz; Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2012. Dissertação (Mestre em Ciências).

Este trabalho apresenta, em dois estudos de casos distintos, os resultados obtidos na aplicação da metodologia para integração sequencial de água e energia, desenvolvida no Grupo de Integração de Processos Químicos – GIPQ – da Escola de Química - UFRJ. Esta metodologia está baseada na aplicação combinada do Diagrama de Fontes de Água – DFA – e da Tecnologia *Pinch* para análise energética. O primeiro caso analisado compara os resultados obtidos através da metodologia proposta com os obtidos por outros autores, que utilizaram diferente técnica de síntese combinada, tendo uma fábrica de papel jornal localizada na Malásia como fonte de dados reais. O segundo caso envolve o exemplo de uma indústria química e os resultados obtidos com a metodologia proposta também são comparados com os apresentados por outros autores que, nesse caso, utilizaram algoritmos matemáticos de otimização para resolução do problema. Nos dois estudos realizados, observa-se que a metodologia proposta apresenta resultados semelhantes, porém superiores aos dos outros autores sob o ponto de vista econômico, com a vantagem de utilizar cálculos simples.

Para análise dos resultados são utilizados índices econômicos e de processo, que em conjunto permitem uma avaliação mais completa das questões apresentadas. A decisão pela utilização ou não das propostas geradas em cada caso deve ser baseada nos critérios adotados por cada indústria e em fatores de mercado como: custo da energia, custo de água nova, preço de equipamentos, projetos e manutenções futuras.

Finalmente, conclui-se que a integração combinada de água e energia fornece ferramentas para o setor industrial decidir sobre estratégias e programas de eficiência energética e sustentabilidade. A abordagem feita pela ótica multidisciplinar de processo, manutenção, ambiental e financeira se mostra mais completa do que aquelas individuais e, ainda, a utilização de um procedimento algorítmico simples, baseado em regras heurísticas, mostra-se eficiente para resolução de problemas reais da indústria de processo.

Palavras-chave: Minimização de Água. Integração de Energia. Plantas de Processo. Geração de Efluentes.

ABSTRACT

Waltz, Flavio Moreira e Silva. **Water Consumption Minimization in Process Plants with Energy Integration**. Supervisors: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa and Eduardo Mach Queiroz; Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2012. Dissertation (Master on Science).

This work presents the results obtained by the application of the combined minimization of water and energy consumption methodology, developed by Chemical Process Integration Group – GIPQ - Escola de Química – UFRJ, in two different case studies. This methodology applies in sequence the Water Sources Diagram technique to solve the mass transfer problem and the *Pinch* Technology for energy analysis. The first case study compares the results obtained by the proposed methodology with those obtained by others colleagues that have used a different technique for water and energy combined synthesis, using a Malaysian's newsprint paper factory as source of real data. The second case uses data from a chemical industry and the results obtained by the proposed methodology are compared with the results predicted by others authors that have used mathematical optimization algorithm to solve the problem. In both case studies, the results obtained by the presented methodology are similar to those attained by the others authors, but better in the economic point of view, with the advantage of being simpler.

Process and economical indexes are used to compare and to analyze the results and together these perspectives allow a more complete analysis of the presented issues. The adoption or not of the actions proposed in each case must be decided facing the industries' criteria and market factors like: energy cost, water cost, equipment price, engineering and future maintenance cost.

Finally, this work indicates that the combined integration offers some valuable tools that empower the industrial sector to decide about energy efficiency and sustainability strategies and internal programs. The multidisciplinary path that includes process, maintenance, environmental and economic analysis presents itself as more complete than those with just a single perspective. Last but not least, the use of a simple method based upon heuristic rules presents itself very efficient to solve process industry's real problems.

Keywords: Water Minimization. Energy Integrations. Process Plants. Effluents Generation

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Parâmetro exponencial da equação de custo base do trocador, valor igual a 0.024 (estudo de caso 1).	Adimensional
A	Área de troca térmica necessária.	(m ²)
AP	Custo da água de processo (estudo de caso 2).	(US\$ / 1000 kg de água 0 ppm)
AR	Custo de água de resfriamento (estudo de caso 2).	(US\$ / 1000 kg de água 0 ppm)
BC	Custo base (<i>base cost</i>) do trocador de calor (estudo de caso 1).	(US\$)
C₀	Parâmetro de custo da equação de custo base do trocador, valor igual a US\$ 300 (estudo de caso 1).	(US\$)
CF	Custo de investimento fixo (estudo de caso 2).	(US\$)
C_{fi}	Concentração final no intervalo i.	(ppm) ou (mg/l)
C_p^e	Concentração da fonte externa p.	(ppm) ou (mg/l)
C_pⁱ	Concentração da fonte interna p.	(ppm) ou (mg/l)
C_{fi}	Concentração final do intervalo i.	(ppm) ou (mg/l)
C_{ii}	Concentração inicial do intervalo i.	(ppm) ou (mg/l)
C_{ij}	Concentração na qual a fonte interna j é usada no intervalo i.	(ppm) ou (mg/l)
CO	Custo operacional (estudo de caso 2).	(US\$)
c_p	Calor específico da água, como 1 cal/g°C ou 4,182 J/kg°C.	(cal/g°C) ou (J/kg°C)
CT	Custo total (estudo de caso 2).	(US\$)
Δm_{ki}	Quantidade de massa transferida em cada processo k e em cada intervalo i.	(g/s)
ΔT_{min}	Diferencial mínimo de troca térmica para os trocadores contracorrente dos problemas estudados.	(°C)
ΔT_{ln}	Média logarítmica da temperatura	(°C)
ETC	Custo por unidade de área (estudo de caso 2)	(US\$/m ²)
f_{jki}ⁱ	Vazão de água requerida da fonte de água interna j, pela operação k, no intervalo i.	(kg/s)
f_{pki}^e	Vazão de água requerida da fonte de água externa p, pela operação k, no intervalo i.	(kg/s)

f_k	Vazão mássica limite da corrente k.	(kg/s)
h_f	Coefficientes de transferência de calor na corrente fria.	(W/m ² °C)
h_q	Coefficientes de transferência de calor na corrente quente.	(W/m ² °C)
i	Índice do número do intervalo, de 1,..., N_{int} .	Adimensional
k	Índice do número da operação, de 1, ..., N_{op} .	Adimensional
M_{cp}	Capacidade calorífica média (equivalente a $M \times C_p$).	(kW/°C)
MF	Fator módulo = 1,83 (estudo de caso 1).	Adimensional
MPF	Fator de material e pressão = 0,80 (estudo de caso 1).	Adimensional
N_{fea}	Número de fontes externas de água.	Adimensional
$N_{fea,i}$	Número de fontes externas de água, em cada intervalo i.	Adimensional
N_{fia}	Número de possíveis fontes internas.	Adimensional
$N_{fia,i}$	Número de possíveis fontes internas, em cada intervalo i.	Adimensional
N_{int}	Número de intervalos de concentração.	Adimensional
N_{op}	Número de operações.	Adimensional
Q_T	Carga térmica total do trocador de calor, proveniente do balanço energético.	(W)
Q	Quantidade térmica da corrente.	(kW)
S_0	Parâmetro de área unitária da equação de custo base do trocador, valor igual a 0.511 m ² (estudo de caso 1).	(m ²)
T_e	Temperatura de entrada da corrente.	(°C)
T_s	Temperatura de saída da corrente.	(°C)
TEF	Temperatura de entrada fria.	(°C)
TEQ	Temperatura de entrada quente.	(°C)
TSF	Temperatura de saída fria.	(°C)
TSQ	Temperatura de saída quente.	(°C)
U	Coefficiente de troca térmica.	(W/m ² °C)
UF	Fator de Atualização (<i>update factor</i>) = 3,62 (estudo de caso 1).	Adimensional
VA	Custo do vapor de aquecimento (estudo de caso 2).	(US\$/BTU)

Lista de Abreviaturas

SIGLA	Descrição
DAF	Dissolved Air Flotation (Flotação de Ar Dissolvido)
DFA	Diagrama de Fontes de Água
DIP	De-Inking Plant (Planta de Descoloração)
GIPQ/EQ	Grupo de Integração de Processos Químicos da Escola de Química
LINGO	Software para modelagem e resolução de problemas de otimização linear e não linear.
MILP	Mixed integer linear programming (Programação Linear Inteira Mista).
MINLP	Mixed integer nonlinear programming (Programação Não-Linear Inteira Mista).
MNI	Malaysia Newsprint Industry
Mtoe	Million tons of oil equivalent (Milhões de toneladas de equivalente petróleo).
OECD/IEA	Organization for Economic Cooperation and Development / International Energy Agency.
ONU	Organização das Nações Unidas.
ppm	parte por milhão.
PE	Ponto de Estrangulamento Energético ou <i>pinch</i> .
QC	Consumo de Utilidade Fria – artigo Manan <i>et al</i> (2009).
QH	Consumo de Utilidade Quente – artigo Manan <i>et al</i> (2009).
RCF	Recycle Fiber Plant (Planta de Fibra Reciclada)
RETM	Rede de Equipamentos de Transferência de Massa.
SCTMTC	Síntese Combinada de Equipamentos de Transferência de Massa e Transferência de Calor.
SWE	Simultaneous Water and Energy Minimization (Minimização Simultânea de Água e Energia).
TRI	Tempo de Retorno de Investimento.
UF	Consumo de Utilidade Fria.
UQ	Consumo de Utilidade Quente.

Lista de Figuras

Figura 1 – Aumento da População Mundial - Fonte: United Nations Population Division (2006).	1
Figura 2 – Consumo Mundial de Água (Fonte: <i>Federal Environment Agency, Germany</i> , 2012)	2
Figura 3 – Demanda Mundial de Energia (Fonte: OECD/IEA - World Energy Outlook 2010)	2
Figura 4 – Custos de Produção por Categoria (Indústria de Papel e Celulose – Statistics Canada, 1998)	8
Figura 5 – Processo produtivo da MNI.	10
Figura 6 - Diagrama de utilização de água atual da MNI.	10
Figura 7 – Diagrama de utilização de água sugerido por metodologia SWE.	14
Figura 8 – Diagrama de fontes de água (passo 1).	15
Figura 9 – Diagrama de fontes de água, com operações (passo 2).	16
Figura 10 – Diagrama de fontes de água, com operações (passo 3) – quantidade de massa transferida indicada entre parêntesis.	16
Figura 11 – Diagrama de fontes de água, com operações (passo 4) - vazões em t/h indicadas nas setas.	18
Figura 12 – Diagrama de fontes de água, com demandas de resfriamento e aquecimento em destaque.	19
Figura 13 - Diagrama de Intervalos de Temperatura.	21
Figura 14 - Diagrama de Integração (sem cascata e com cascata).	22
Figura 15 - Diagrama de Curvas Compostas	23
Figura 16 - Grande Curva Composta	24
Figura 17 – Rede de Trocadores de Calor	27
Figura 18 – Diagrama de utilização de água sugerido pela metodologia SCTMTC.	29
Figura 19 – Primeiro diagrama obtido pelo algoritmo MINLP.	36
Figura 20 – Segundo diagrama obtido pelo algoritmo MINLP – com restrições de engenharia.	36
Figura 21 – Diagrama de fontes de água, com operações (passo 4) - vazões em t/h indicadas nas setas.	39
Figura 22 – Diagrama de fontes de água, com demandas de resfriamento e aquecimento em destaque.	40
Figura 23 - Diagrama de Intervalos de Temperatura.	42
Figura 24 - Diagrama de Integração (sem cascata e com cascata).	43
Figura 25 - Diagrama de Curvas Compostas	45
Figura 26 - Grande Curva Composta	46
Figura 27 - Diagrama de Intervalos de Temperatura – correntes de efluentes concentradas.	48
Figura 28 - Diagrama de Integração (sem cascata e com cascata) – efluentes concentrados.	49

Figura 29 - Diagrama de Curvas Compostas – efluentes concentrados.	50
Figura 30 - Grande de Curva Composta – efluentes concentrados.	51
Figura 31 - Diagrama de utilização de água sugerido pela metodologia SCTMTC.	56

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Correntes consumidoras de água para o estudo de caso da planta da MNI.	11
Tabela 2 – Correntes fontes de água para o estudo de caso da planta da MNI.	11
Tabela 3 – Utilidades para aquecimento QH e para refrigeração QC da planta da MNI.	12
Tabela 4 – Custos unitários das utilidades da MNI.	12
Tabela 5 – Parâmetros comparativos custos MNI e sugeridos por metodologia SWE.	13
Tabela 6 – Variação na carga de trocadores de calor.	13
Tabela 7 – Correntes e demandas térmicas.	19
Tabela 8 – Correntes e demandas térmicas.	20
Tabela 9 – Resultados das integrações energéticas.	22
Tabela 10 e Tabela 11 – Dados para construção do Diagrama de Curvas Compostas	23
Tabela 12 – Dados para construção da Grande Curva Composta.	24
Tabela 13 – Demandas acima do <i>pinch</i> .	25
Tabela 14 – Trocadores acima do <i>pinch</i>	25
Tabela 15 – Demandas abaixo do <i>pinch</i>	25
Tabela 16 – Trocadores abaixo do <i>pinch</i>	26
Tabela 17 – Resultados SCTMTC em comparação com os resultados SWE e situação atual da planta MNI.	28
Tabela 18 – Custo dos trocadores de calor necessários para resolução do problema.	31
Tabela 19 – Dados do Processo – estudo de caso 2.	34
Tabela 20 – Comparação dos resultados de Savulescu (1999) e Leewongwanawit <i>et al</i> (2004)	37
Tabela 21 – Correntes e demandas térmicas (correntes efluentes distribuídas).	41
Tabela 22 – Resultados das integrações energéticas.	43
Tabela 23 – Dados para construção do Diagrama de Curvas Compostas	44
Tabela 24 – Dados para construção da Grande Curva Composta.	46
Tabela 25 – Correntes e demandas térmicas (correntes efluentes distribuídas).	47
Tabela 26 – Resultados das integrações energéticas.	49
Tabela 27 e 28 – Dados para construção do Diagrama de Curvas Compostas – efluentes concentrados.	50
Tabela 29 – Dados para construção do Grande Curva Composta – efluentes concentrados	51
Tabela 30 – Demandas acima do <i>pinch</i> .	52

Tabela 31 – Demandas acima do <i>pinch</i> , ao redor do ponto de estrangulamento.	52
Tabela 32 – Demandas acima do <i>pinch</i> , afastada do ponto de estrangulamento.	53
Tabela 33 – Trocadores acima do <i>pinch</i>	53
Tabela 34 – Necessidades abaixo do <i>pinch</i>	54
Tabela 35 – Necessidades abaixo do <i>pinch</i> – correntes concentradas	54
Tabela 36 – Trocador abaixo do <i>pinch</i> – correntes concentradas	54
Tabela 37 – Custo dos trocadores de calor necessários para resolução do problema, metodologia SCTMTC.	59
Tabela 38 – Custo dos trocadores de calor, Leewongwanawit <i>et al</i> , rede 1.	60
Tabela 39 - Custo dos trocadores de calor, Leewongwanawit <i>et al</i> , rede 2.	60
Tabela 40 – Comparativo das redes sugeridas SCTMTC versus Leewongwanawit <i>et al</i> .	60

Sumário

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
I.1 – Crescimento populacional e custo de insumos.....	1
I.2 – Revisão bibliográfica.....	3
I.3 – Objetivos da dissertação	5
I.4 – Apresentação da organização da dissertação.....	7
CAPÍTULO II - METODOLOGIA PROPOSTA PARA SCTMTC.....	8
II.1 – Introdução	8
II.2 – Caracterização do problema.....	8
II.3 – A planta e o processo	9
II.4 - Resultados do trabalho de Manan <i>et al</i> (2009) - metodologia SWE	12
II.5 - Método SCTMTC	14
II.5.1 - Síntese da rede de águas	14
II.5.2 - Análise energética.....	19
II.6 - Resultados com método SCTMTC.....	28
II.7 – Conclusões do estudo de caso 1.....	31
CAPÍTULO III - ESTUDO DE CASO 2 – Savulescu (1999).....	33
III.1 – Introdução.....	33
III.2 – Dados do processo	34
III.3 - Resultados do trabalho base (algoritmo MINLP).....	35
III.4 - Método SCTMTC.....	37
III.4.1 - Síntese da rede de águas	38
III.4.2 - Análise energética	40
III.5 - Resultados com método SCTMTC.....	55
III.6 – Conclusões do estudo de caso 2.....	61
CAPÍTULO IV - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	62
IV.1 – Conclusões.....	62

IV.2 – Sugestões e comentários finais	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I.1 – Crescimento populacional e custo de insumos

A Figura 1 exibe o gráfico da População Mundial desde 1800 até o valor previsto para 2054. Nele, é possível perceber o grande crescimento populacional estimado.

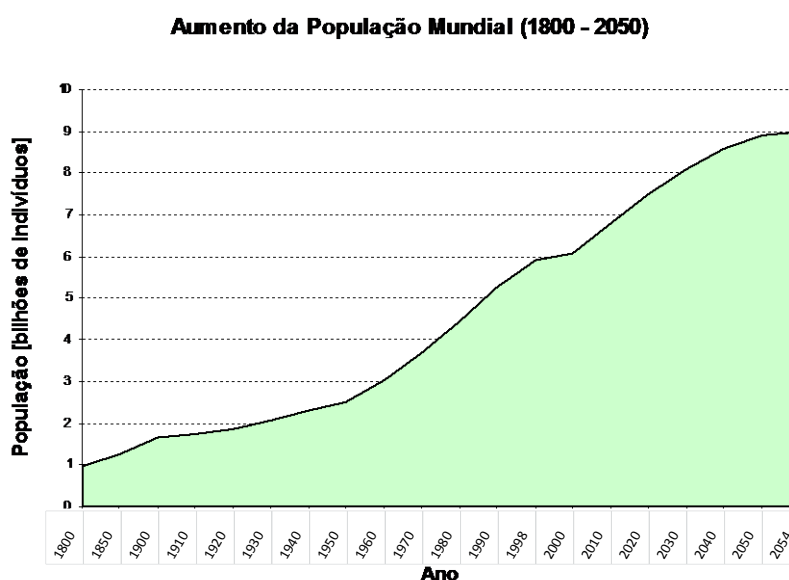


Figura 1 – Aumento da População Mundial - Fonte: United Nations Population Division (2006).

O crescimento projetado para os próximos anos implica num aumento, diretamente proporcional, da demanda por água e energia. Além desse fator, outros concomitantes devem ser considerados como: aumento da poluição, escassez de fontes de água doce, efeito estufa, guerras e, mais recentemente, crises econômicas.

As Figuras 2 e 3 apresentam as demandas estimadas de água e energia nos próximos anos. Além do aumento da população mundial, a mudança do perfil de consumo, o maior acesso a tecnologia e a bens de consumo contribuem para a maior demanda por energia e água. Pela primeira vez na história, a população urbana superou a rural. Países como China e Índia, as duas maiores populações do mundo, crescem a taxas acima de 5% ao ano. Em 1978, 18 % da população da China era urbana, hoje esse número está bem próximo de 50%. A cada ano 20 milhões de chineses migram para as cidades (Yergin, 2011).

O crescimento dessas demandas indica o muito provável aumento dos preços desses insumos, mesmo quando se considera nas análises o desenvolvimento de novas tecnologias para tratamento de água e para geração de energia.

No caso da água, acrescenta-se, ainda, que a contaminação da mesma pode reduzir sua disponibilidade, principalmente a água subterrânea. Legislações específicas

têm sido elaboradas, e o reuso de água tornou-se prática constante nas indústrias (Higa *et al*, 2007).

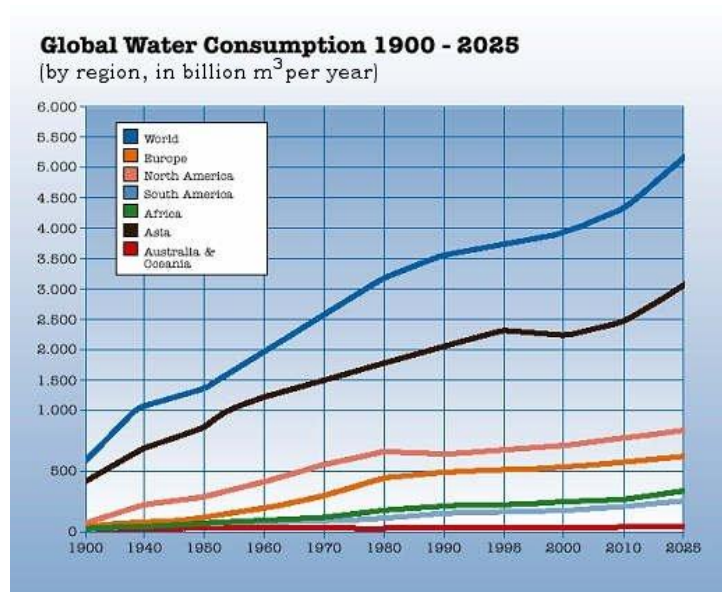


Figura 2 – Consumo Mundial de Água (Fonte: *Federal Environment Agency, Germany, 2012*)

O consumo de água quadruplicou nos últimos 50 anos. Muitos países já enfrentam situação de escassez de água, totalizando uma população de quase meio bilhão de pessoas com acesso restrito a esse recurso. Previsões apresentam um quadro preocupante, onde, em 2050, metade da população mundial enfrentará problemas para obtenção de água potável (Fonte: *Federal Environment Agency, Germany, 2012*).

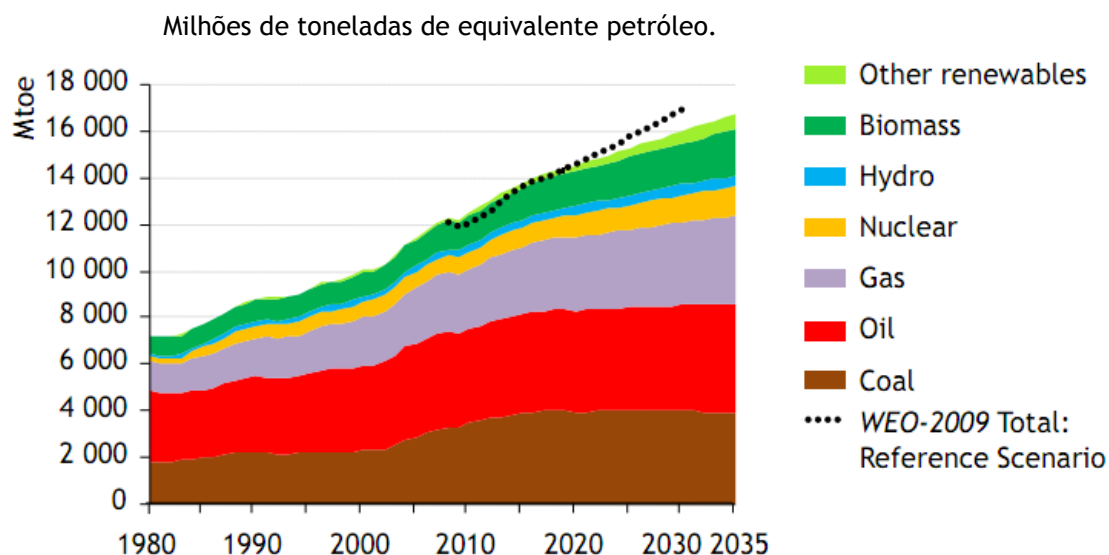


Figura 3 – Demanda Mundial de Energia (Fonte: *OECD/IEA - World Energy Outlook 2010*)

Frente a esses dados, é fácil entender a grande preocupação dos diversos setores industriais pela busca por processos mais eficientes e que utilizem insumos como a água e energia (em suas diferentes formas) de maneira mais adequada. Várias linhas de

pesquisa e estudo tecnológico têm sido desenvolvidas para abordar esse tema, e podem ser organizados em dois grupos:

- Energias renováveis, como por exemplo: solar, eólica, biocombustíveis, hidrelétrica, geotérmica e maremotriz (Yergin, 2011) e (Jacobson *et al*, 2009).
- Eficiência Energética, ou ampliando o conceito: Eficiência da Planta e Sustentabilidade, que utiliza, de forma conjunta: melhorias de processo, inovações tecnológicas e atitudes comportamentais para reduzir desperdícios (Hahn *et al*, 2009), durante todo ciclo de vida da planta de processo.

Os esforços despendidos nessa dissertação podem ser incluídos no segundo grupo e visam possibilitar melhorias nos processos industriais, através da minimização:

- Do consumo de energia na geração de utilidades (vapor e água de refrigeração),
- Da geração de efluentes aquosos, a partir do menor consumo de água nova; reuso, reciclo e regeneração de correntes aquosas no processo.

Para atingir esse objetivo é utilizada Tecnologia de *Pinch* Energético e estudo de redes de trocadores de calor em conjunto com metodologia para minimização do consumo de água com base no Diagrama de Fontes de Água.

I.2 – Revisão bibliográfica

A minimização da utilização de água nova, bem como a redução de resíduos líquidos (aquosos) é uma importante área da integração de processos. A crescente demanda por processos industriais mais sustentáveis incentivou pesquisas em todo o mundo para o desenvolvimento de métodos e técnicas com foco nesses problemas.

Diversas técnicas e estudos foram realizados ao longo das últimas duas décadas, com resultados cada vez melhores, técnicas mais abrangentes e exemplos em diversas indústrias, incluindo casos de apenas um contaminante, como também multi-contaminantes.

Os procedimentos existentes para a minimização de utilização de água nova e redução de resíduos aquosos podem ser divididos em duas escolas principais, a primeira baseada em algoritmos matemáticos de otimização (lineares e não lineares) e a segunda baseada em regras heurísticas e conceitos termodinâmicos (Módenes, 1999). Esta segunda é de aplicação mais simples para os engenheiros de processo, porém sem garantir a obtenção do ótimo global. Cabe aqui ressaltar que também nos problemas não-lineares a existência de múltiplos ótimos locais também dificulta a obtenção da solução ótima global utilizando a primeira abordagem.

Todas essas técnicas se baseiam no fato de que nem todos os processos de uma determinada planta de processo necessitam de água nova, sem nenhuma concentração de contaminantes. Grande parte dos processos aceita água com uma determinada concentração de contaminantes, maior do que zero (0 ppm). Dessa forma, é possível a reutilização de água que sai de um processo em outros cuja demanda não seja tão restritiva (Módenes *et al*, 2003).

Os trabalhos de Módenes *et al* (2003) e Higa *et al* (2007) apresentam resultados de técnicas para redução do consumo de água e minimização de geração de efluentes aquosos, considerando multi-contaminantes em refinarias de petróleo. Módenes *et al* (2003) apresenta uma metodologia baseada em Tecnologia *Pinch*, síntese de redes de equipamentos de transferência de massa (RETM), reuso de água e avaliação econômica. Nesse caso, foi realizada uma analogia entre a síntese de rede de trocadores de calor com a RETM. Já Higa *et al* (2007) em seu trabalho utilizou o procedimento DFA, conforme proposto por Gomes *et al* (2007) e aplicado em diversos problemas múltiplos componentes por Delgado (2008) na geração de fluxogramas com regeneração, reuso de água, múltiplas fontes de água, perda de massa em evaporadores e adaptações específicas para o processo de refino.

Em vários problemas foi detectada a necessidade de se analisar a temperatura das correntes e suas demandas por aquecimento e resfriamento. Esse grau de liberdade novo incentivou o desenvolvimento de técnicas de minimização simultânea de água e energia. A partir da década de 90, os primeiros trabalhos de síntese combinada foram desenvolvidos e publicados na literatura, como foi o caso de Edgar *et al* (1993). Essas metodologias podem ser organizadas de uma maneira análoga àquelas de minimização de água: a) metodologias baseadas em regras heurísticas, Tecnologia *Pinch* e termodinâmica e b) as baseadas em algoritmos computacionais de otimização. Savulescu (1999) em sua tese apresentou uma metodologia onde a síntese das redes de água é seguida pela definição da rede de trocadores de calor, através da combinação de princípios de análise de Tecnologia *Pinch* para água e energia.

Mais recentemente diversos trabalhos apresentaram novas metodologias para minimização simultânea. Dong *et al* (2008) em seu trabalho utilizam o conceito de *state-space*, introduzido, em 1992, por Bagajewicz e Manousiouthakis (1992) e, em 1998, por Bagajewicz *et al*, para definir o problema que é resolvido por um algoritmo de minimização não linear - MINLP (*mixed-integer nonlinear programming*). Boix *et al* (2012) apresentam uma metodologia dividida em duas etapas: a primeira utiliza MILP (*mixed-integer linear programming*) para resolver o problema de síntese de redes de água e energia; e a segunda utiliza MINLP para otimizar a melhor rede obtida na primeira etapa, considerando a questão de integração energética. Chew *et al* (2011) utilizam o software LINGO para minimização simultânea de água e energia numa planta real de papel e celulose.

De forma geral, diversas metodologias foram desenvolvidas e um esforço contínuo para sua evolução tem sido objeto de trabalho de diversos grupos de pesquisa.

É importante ressaltar que os resultados obtidos pelos métodos de síntese combinada tendem a ser melhores que aqueles individuais para síntese de redes de água ou de redes de trocadores de calor.

O ponto de partida desta dissertação foi o trabalho de Stelling (2004), que apresentou um novo procedimento de análise simultânea de utilização de água, através do diagrama de fontes de água (DFA), e de energia, com base na Tecnologia de *Pinch* energético. Tal técnica, denominada síntese combinada de redes de equipamentos de transferência de massa e de trocadores de calor, ou SCTMTC, apresentada por Stelling (2004), foi baseada na combinação dos trabalhos de Liporace (1996) e Gomes (2002). Esse procedimento apresenta uma solução para problemas de SCTMTC baseada em regras heurísticas e que considera a temperatura ótima de operação de equipamentos de processo, múltiplas fontes de água, vários contaminantes na corrente aquosa, regeneração e reciclo. Em seu trabalho Stelling (2004) comparou, utilizando vários problemas apresentados na literatura, seus resultados com aqueles obtidos por outros autores com outros métodos, utilizando para isso índices econômicos.

O procedimento de SCTMTC de Stelling (2004) não se propõe a encontrar a solução ótima dos problemas estudados, mas sim apresentar uma solução onde exista minimização de insumos (água, vapor e água refrigerada) através de uma técnica menos complexa do que as técnicas de minimização por algoritmos matemáticos de otimização, que muitas vezes exigem grande capacidade computacional e tempo para resolução, apresentando também muitas vezes dificuldades numéricas para a obtenção da solução final.

Seguindo essa linha comparativa e com intuito de confrontar os resultados da metodologia SCTMTC com aqueles obtidos por outras metodologias de síntese combinada para minimização de água e energia, bem como testar modificações na metodologia anteriormente proposta, utiliza-se no presente trabalho os processos apresentados por Manan *et al* (2009) e Leewongwanawit *et al* (2004). O primeiro descreve a aplicação de metodologia para minimização combinada baseada em regras heurísticas, metodologia cascata para desenho da rede de água e análise gráfica termodinâmica para definição da rede de trocadores de calor. A técnica apresentada por Manan *et al* (2009) é denominada SWE (*simultaneous water and energy minimization*) e é aplicada num estudo de caso que utiliza dados reais de uma planta de papel jornal. O segundo trabalho (Leewonkwanawit *et al*, 2004) descreve a utilização de um algoritmo computacional para minimização não linear de um problema de síntese combinada de água e energia, utilizando como exemplo dados simplificados de uma indústria química apresentados por Savulescu (1999).

I.3 – Objetivos da dissertação

Os objetivos principais do presente trabalho são listados a seguir:

1. Aplicar a metodologia de SCTMTC proposta por Stelling (2004) em plantas de processo com grande consumo de água e energia e com potencial de redução como, por exemplo, aquelas do setor de celulose e papel. De uma forma geral, o que se percebe na indústria são ciclos de grande investimento no aumento da produção, seguidos de períodos de investimento em melhorias e otimização do processo. Ou seja, em períodos de grande demanda do mercado consumidor a diretriz industrial é produzir e lucrar com a escala. Já no período de poucos pedidos, o ideal é investir em projetos que reduzam os custos de produção, como: integração de processo, eficiência energética, sustentabilidade e otimização. O setor Petroquímico é um caso bem ilustrativo dessa tendência. Porém, conforme discutido no item I.1, um período de custos altos de energia e água sem previsão a curto e médio prazo de redução parece ter se iniciado. Dessa forma, os investimentos em minimização de consumo de energia e água muito provavelmente passarão a ser uma constante no setor industrial. Portanto, o aprimoramento de uma metodologia simples e de fácil aplicação, adaptativa e com capacidade de evolução à medida que novas regras heurísticas são incorporadas é de grande valia para a indústria nacional.
2. Contribuir para a consolidação da metodologia de SCTMTC em desenvolvimento no GIPQ/EQ. Durante a pesquisa e a elaboração desse trabalho, houve grande preocupação por parte de todos os envolvidos em agregar experiência de projetos e da indústria à metodologia SCTMTC. Acredita-se que o desenvolvimento tecnológico da indústria brasileira depende da criação científica nacional, concentrada principalmente nas universidades federais brasileiras. Um agente muito importante nesse processo são as empresas de projetos de engenharia e tecnologia, que muitas vezes atuam como ponte entre universidade e indústria.
3. Discutir o desempenho e os resultados da metodologia de SCTMTC e compará-la com os procedimentos disponíveis na literatura, buscando principalmente comprovar as suas vantagens como simplicidade, adaptabilidade e eficácia. Nos estudos de caso apresentados é possível perceber os bons resultados obtidos pela metodologia.
4. Apresentar e testar pequenas alterações em relação ao procedimento proposto por Stelling (2004) para a SCTMTC, com intuito de contribuir com a evolução da técnica. No presente trabalho são propostas a inclusão da avaliação do impacto da mistura de correntes antecedendo a síntese da rede de trocadores de calor, conforme sugerido por Queiroz *et al* (2007), e a utilização de novas regras heurísticas específicas para o caso de um único contaminante, como por exemplo, a mistura não isotérmica de correntes, com objetivo de redução do número de trocadores de calor e necessidade de utilidades quente e fria.

I.4 – Apresentação da organização da dissertação

Essa dissertação foi organizada em quatro capítulos. O primeiro apresenta o novo cenário econômico mundial frente ao crescimento populacional e às novas demandas mundiais por energia e recursos hídricos. Tais mudanças e restrições reforçam a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas e soluções de engenharia que permitam à indústria o estabelecimento de processos produtivos sustentáveis e economicamente viáveis. Ainda no primeiro capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica que apresenta os principais trabalhos e referências na área de integração de processos com ênfase na minimização do uso de água externa ao processo, do uso de energia e da geração de efluentes. Finalmente, o capítulo introdutório é encerrado com os objetivos e organização da dissertação.

O segundo capítulo apresenta a metodologia SCTMTC e compara os resultados obtidos pela mesma com os obtidos por outra técnica, SWE, baseada em regras heurísticas, análises gráficas, termodinâmica e Tecnologia *Pinch*. O problema definido e utilizado como estudo de caso, nesse capítulo, utiliza dados reais provenientes de uma planta de papel, localizada na Malásia.

O terceiro capítulo descreve o estudo de caso número 2, baseado em dados simplificados de uma indústria química e apresentados pela primeira vez na tese de Savulescu (1999). Novamente a metodologia SCTMTC é comparada com outra técnica de minimização simultânea de água e energia, ou seja, dessa vez ela é confrontada com um algoritmo computacional de otimização não linear (MINLP). Também nesse capítulo são apresentadas as modificações sugeridas para complementar o trabalho de Stelling (2004), sendo elas: avaliação do impacto da mistura de correntes e introdução de misturas não isotérmicas de correntes.

Finalmente, no capítulo IV, são discutidas as conclusões do trabalho e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II - METODOLOGIA PROPOSTA PARA SCTMTC

II.1 – Introdução

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para SCTMTC, que contempla a análise simultânea visando à minimização da geração de efluentes aquosos e do consumo de energia. Na realidade este procedimento é uma estratégia de utilização simultânea do Diagrama de Fontes de Água e da Tecnologia de *Pinch* Energético, que vêm sendo utilizadas no Grupo de Integração de Processos Químicos da Escola de Química para estudos isolados sobre cada um dos objetivos.

A metodologia é apresentada através de sua utilização em um exemplo industrial no setor de papel e celulose, representado por uma planta da Malaysia Newsprint Industry (MNI). A seguir são descritos o processo analisado e a metodologia, passo a passo.

II.2 – Caracterização do problema

O setor de papel e celulose também enfrenta problemas com escassez de água e energia, bem como aumento no custo desses insumos e, ao longo dos anos, diversos esforços vêm sendo realizados na busca por processos mais eficientes, onde o consumo de água e energia possa ser minimizado, bem como a produção de efluentes e resíduos industriais.

A Figura 4 apresenta a distribuição de custos da indústria de papel e celulose do Canadá, referência: Statistics Canada (1998).

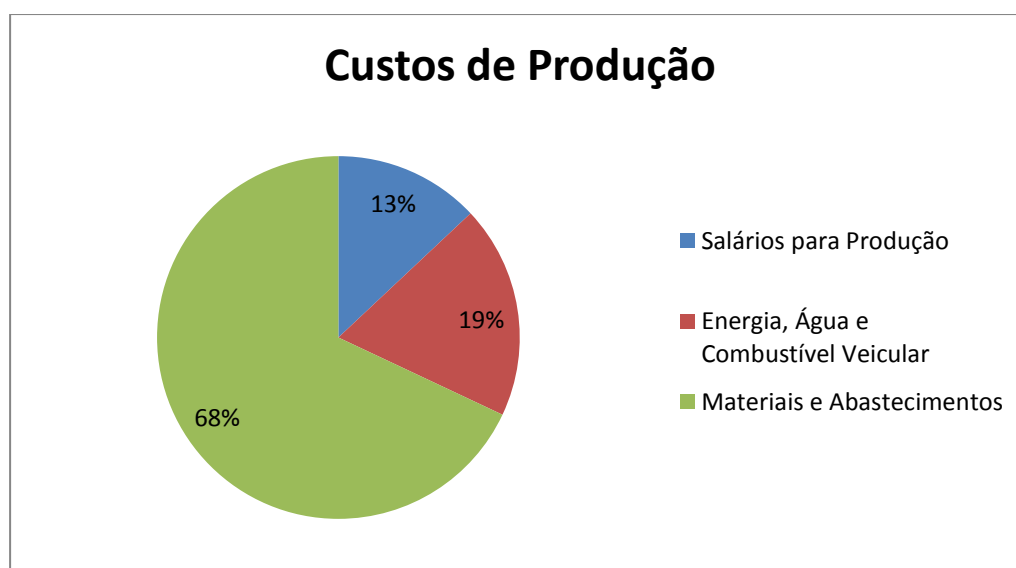


Figura 4 – Custos de Produção por Categoria (Indústria de Papel e Celulose – Statistics Canada, 1998)

Além da preocupação por uma produção mais sustentável, assunto de extrema importância nos dias de hoje, os custos gerados pelo consumo de água e de energia são significativos e ficam próximos a 20% dos custos totais do setor (Statistics Canada, 1998). Dessa forma, conclui-se que a melhor utilização desses recursos, além de fundamental para o meio ambiente e sociedade, é salutar para o gerenciamento financeiro da planta.

É nesse cenário de otimização de consumo de água e energia, visando redução de custos produtivos e maior sustentabilidade ambiental do setor, que se desenvolveu o estudo de caso 1 da presente dissertação.

O ponto de partida do estudo realizado é o trabalho publicado em 2009, por Manan *et al* (2009) da Univesiti Teknologi Malaysia, que utilizou a metodologia denominada SWE (Simultaneous Minimization of Water and Energy) para propor reduções no consumo de água nova (fontes externas ao processo), redução na emissão de efluentes líquidos e redução no consumo de utilidades quentes e frias, respectivamente vapor e água de refrigeração, numa planta de papel e celulose, localizada na Malásia.

Tendo como base a mesma planta e os mesmos dados de processo: vazões, temperaturas e concentrações de contaminantes, foi aplicado o método SCTMTC (2004) para resolução do mesmo problema e comparação dos resultados obtidos pelas duas técnicas.

Nesse primeiro caso são apresentados:

- O processo e a planta utilizados no exemplo;
- Os resultados obtidos pela metodologia SWE;
- O método SCTMTC e sua aplicação no presente estudo;
- Os resultados obtidos pelo método SCTMTC;
- Comparação dos resultados obtidos por cada uma das técnicas nas mesmas bases;
- Conclusões do estudo de caso

A técnica SWE não é detalhada, apenas os resultados obtidos por Manan *et al* (2009) são apresentados para fins comparativos.

O intuito desse estudo de caso é analisar a aplicabilidade da SCTMTC em problemas reais da indústria, comparando seus resultados com os obtidos pela metodologia SWE de Manan *et al* (2009).

II.3 – A planta e o processo

A planta de processo escolhida para o estudo de caso se localiza na Malásia e pertence à Malaysia Newsprint Industry (MNI). Essa unidade produz papel jornal, desde

1996, MNI (2001), com fibra 100% reciclada. É uma das maiores fábricas de papel jornal do mundo, com uma produção anual de aproximadamente 280.000 toneladas, MNI (2001).

A fábrica utiliza água em abundância para processos como: diluição, lavagem, limpeza, produção de vapor, entre outros, e utiliza energia térmica para processos de secagem e geração de energia elétrica.

A Figura 5 apresenta uma visão esquemática do processo da MNI.

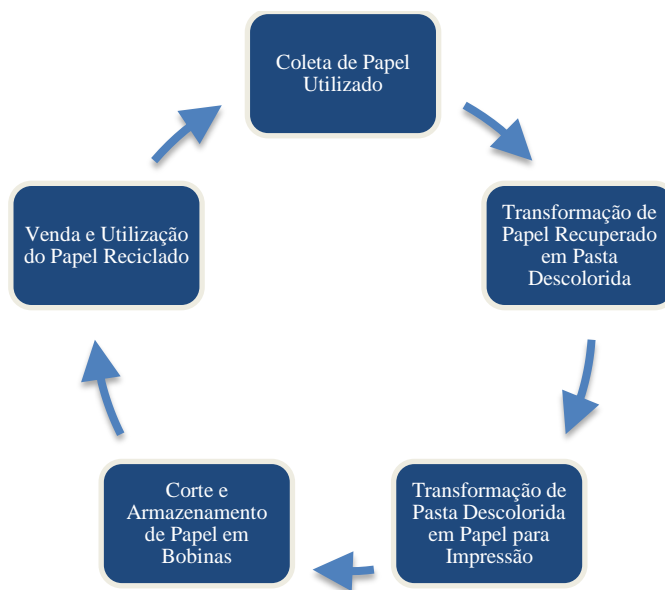


Figura 5 – Processo produtivo da MNI.

O diagrama de utilização de água atual da planta, conforme apresentado por Manan *et al* (2009), com todas as vazões importantes para o problema de otimização de uso de água e emissão de efluentes é exibido na Figura 6, a seguir:

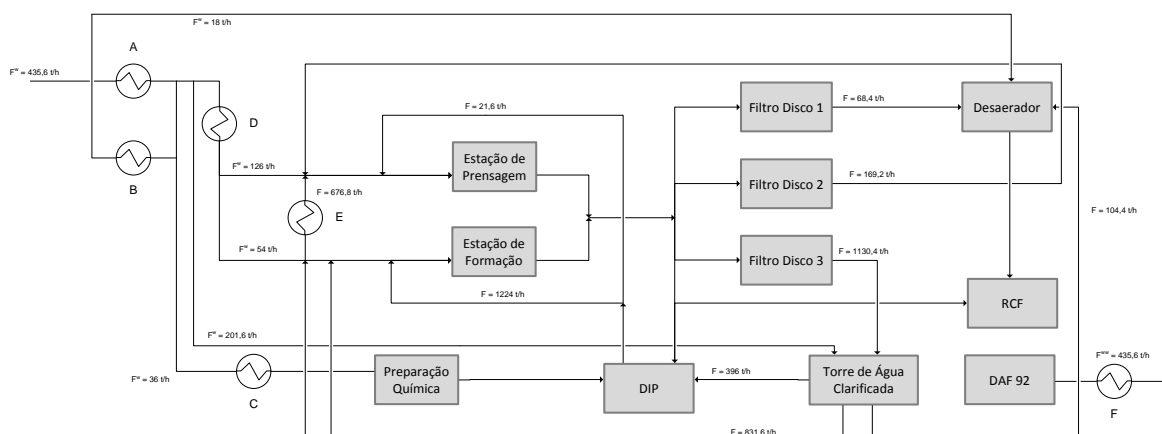


Figura 6 - Diagrama de utilização de água atual da MNI.

Na Figura 6, as seguintes siglas e seus significados foram utilizadas:

- DIP – De-Inking Plant (Planta de Descoloração);
- DAF – Dissolved Air Flotation (Flotação de Ar Dissolvido);
- RCF – Recycle Fiber Plant (Planta de Fibra Reciclada).

Os dados de processo necessários para aplicação das metodologias foram obtidos através de balanço de massa e energia da planta e foram organizados em: fontes de água, consumidores de água e utilidades para aquecimento e refrigeração.

As Tabela 1 e Tabela 2 apresentam os doze consumidores e as cinco fontes de água respectivamente. Os dados obtidos incluem vazão, temperatura e concentração de contaminantes para cada corrente, seja para consumidores ou fontes de água. Para concentração de contaminantes foi utilizada a concentração total de sólidos suspensos em ppm. Ou seja, para efeitos de simplificação do problema, todos os possíveis contaminantes existentes foram agrupados num único pseudo-contaminante. Dessa forma, o problema foi simplificado para o caso de um contaminante apenas nas correntes de água.

Tabela 1 – Correntes consumidoras de água para o estudo de caso da planta da MNI.

Tabela 1 - Dados das correntes demandadas para o estudo de caso da usina de papel da MNI					
Demanda	Tipo	F (t/h)	C _{max,in} (ppm)	Massa de contaminante carregado, Δm (kg/h)	T (°C)
D1	Prensagem 1	126	20	2,52	50
D2	Formação 1	54	20	1,08	50
D3	Preparação Química	36	20	0,72	81
D4	Água Clarificada 1	202	20	4,03	38
D5	Desaerador 1	18	20	0,36	38
D6	Prensagem 2	169	100	16,92	43
D7	Água Clarificada 2	1130	150	169,56	46
D8	Prensagem 3	677	160	108,29	43
D9	Formação 2	155	160	24,77	43
D10	DIP	396	160	63,36	46
D11	Desaerador 2	104	160	16,70	46
D12	Desaerador 3	68	250	17,10	40

Tabela 2 – Correntes fontes de água para o estudo de caso da planta da MNI.

Tabela 2 - Dados das correntes fontes para o estudo de caso da usina de papel da MNI					
Fonte	Tipo	F (t/h)	C _{max,out} (ppm)	Massa de contaminante carregado, Δm (kg/h)	T (°C)
S1	Filtro Disco 2	169	100	16,92	43
S2	DAF 92	436	150	65,34	48
S3	Filtro Disco 3	1130	150	169,56	46
S4	Torre de Água Clarificada	832	160	133,06	46
S5	Filtro Disco 1	68	250	17,10	40

As utilidades instaladas para refrigeração e aquecimento das correntes de processo estão organizadas na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Utilidades para aquecimento QH e para refrigeração QC da planta da MNI.

Tabela 3 - Funções dos trocadores de calor na rede de utilização de água para usina de papel da MNI		
	Tipo	Q _H (MW)
A	Aquecimento de vapor de flash	2,68
B	Aquecimento da umidade condensada	0,59
C	Vapor	2,14
D	Vapor	2,73
	Total	8,14
	Tipo	Q _C (MW)
E	Água de refrigeração	2,37
F	Água de refrigeração	6,61
	Total	8,98

Ressalta-se que as utilidades de aquecimento para os aquecedores A e B são provenientes de fontes de reciclo, por isso não são consideradas no cálculo final de custos ($2,68 + 0,59 = 3,27$ MW)

II.4 - Resultados do trabalho de Manan *et al* (2009) - metodologia SWE

Manan *et al* (2009) propõem opções que levam a reduções no consumo de água, na emissão de efluentes e no consumo de utilidades para aquecimento. Porém, as mudanças sugeridas no diagrama de utilização de água, geraram um pequeno aumento no consumo de utilidades para refrigeração.

Para os cálculos financeiros, Manan *et al* (2009) consideraram que a planta opera 24 horas por dia, 330 dias por ano e os custos de utilidades informados pela MNI (Tabela 4) foram utilizados:

Tabela 4 – Custos unitários das utilidades da MNI.

Utilidade	Custo (US\$)
Água nova	0,045 por m ³
Tratamento de efluente	0,312 por m ³
Utilidade quente	0,362 por kW
Utilidade fria	0,003 por kW

Na Tabela 5 é feita uma comparação da situação original da planta com aquela sugerida com a adoção das propostas obtidas através da utilização da metodologia SWE.

Tabela 5 – Parâmetros comparativos custos MNI e sugeridos por metodologia SWE.

Parâmetro comparativo	MNI	SWE
Consumo de água nova (t/h)	436,0	377,5
Custo da água nova (US\$ / ano)	156.591,00	135.580,00
Efluente líquido gerado (t/h)	436,0	377,5
Custo de tratamento do efluente (US\$ / ano)	1.078.949,00	934.182,00
QH (MW)	8,14	7,75
QH (MW) (sem considerar reciclo em A e B)	4,87	4,48
Custo utilidade quente (US\$ / ano)	14.012.542,00	12.890.387,00
QC (MW)	8,98	9,47
Custo utilidade fria (US\$ / ano)	229.393,00	241.910,00
Custo total de utilidades (US\$ / ano)	15.477.475,00	14.202.059,00
Economia (US\$ / ano)	-	1.275.416,00

Por último, foi calculado o investimento necessário na alteração da rede de trocadores de calor. Com esse cálculo pode se chegar ao valor do período de retorno de investimento.

O investimento foi calculado para todo trocador de calor cuja área aumentou. A Tabela 6 exibe a variação de carga por trocador, para a situação original da planta e alterações sugeridas pela metodologia SWE.

Tabela 6 – Variação na carga de trocadores de calor.

	Rede de utilização de água existente, Q _H (MW)	Nova técnica de minimização SWE, Q _H (MW)
A	2,68	2,68
B	0,59	0,59
C	2,14	1,71
D	2,73	2,77
Total	8,14	7,75
	Rede de utilização de água existente, Q _c (MW)	Nova técnica de minimização SWE, Q _c (MW)
E	2,37	-
F	6,61	5,73
H	-	2,91
I	-	0,78
J	-	0,05
Total	8,98	9,47

O custo calculado para alteração ou inclusão dos quatro trocadores (D, H, I, J) foi de US\$ 7190,00, Manan *et al* (2009). Neste caso, o tempo de retorno de investimento (TRI) foi menor do que 1 mês.

$$\text{TRI} = \text{Investimento} / \text{Economia anual} = 7190 / 1275416 = 0,006 \text{ ano.}$$

O diagrama final proposto pela metodologia SWE é apresentado na Figura 7.

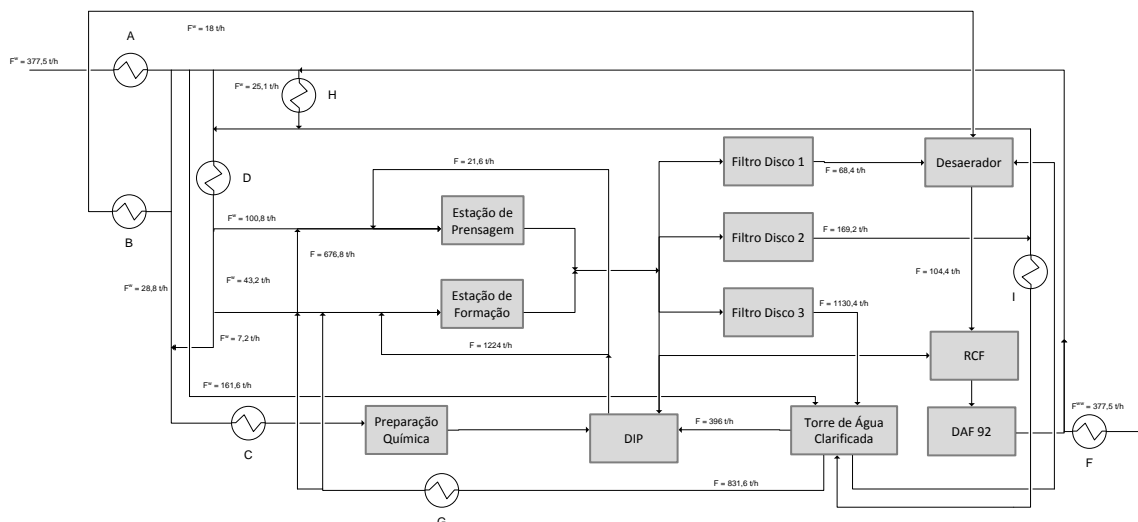


Figura 7 – Diagrama de utilização de água sugerido por metodologia SWE.

II.5 - Método SCTMTC

O método SCTMTC (2004) tem como objetivo obter a rede de água e de trocadores de calor com menor custo. Ele não garante que se atinja o valor operacional mínimo para cada problema analisado. Ao invés disso, o método permite que se obtenham resultados supostamente próximos do valor ótimo, tendo a vantagem de ser um método simples e com flexibilidade para resolução de problemas com várias restrições.

O SCTMTC é dividido em duas etapas sequenciais:

1. Síntese da rede de águas e
2. Síntese da rede de trocadores de calor referente à rede de águas gerada.

II.5.1 - Síntese da rede de águas

O objetivo da síntese de rede de águas é minimizar o consumo de água primária nova, respeitando os requisitos de vazão e concentração de contaminantes de cada processo. Essa síntese segue as regras apresentadas por Stelling (2004), com o objetivo de se obter a rede com menor custo econômico total. A seguir cada passo necessário é descrito.

Para o problema analisado nesse estudo de caso, utilizamos os dados apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2: vazão máxima de operação (F), concentração máxima de contaminantes na entrada de cada consumidor ($C_{\max,in}$), concentração máxima de contaminante na saída de cada fonte de água ($C_{\max,out}$), carga de contaminantes de cada operação (Δm) e temperatura de trabalho de cada operação e de cada corrente fonte (T).

Passo 1

O problema é dividido em intervalos de concentração, limitados pela fonte de água primária, definida como fonte externa, e por concentrações iguais as de entrada e saída das operações, definidas como fontes internas. As fontes são colocadas em ordem crescente de concentração, definindo intervalos de concentração, e por consequência, o diagrama de fontes de água (DFA).

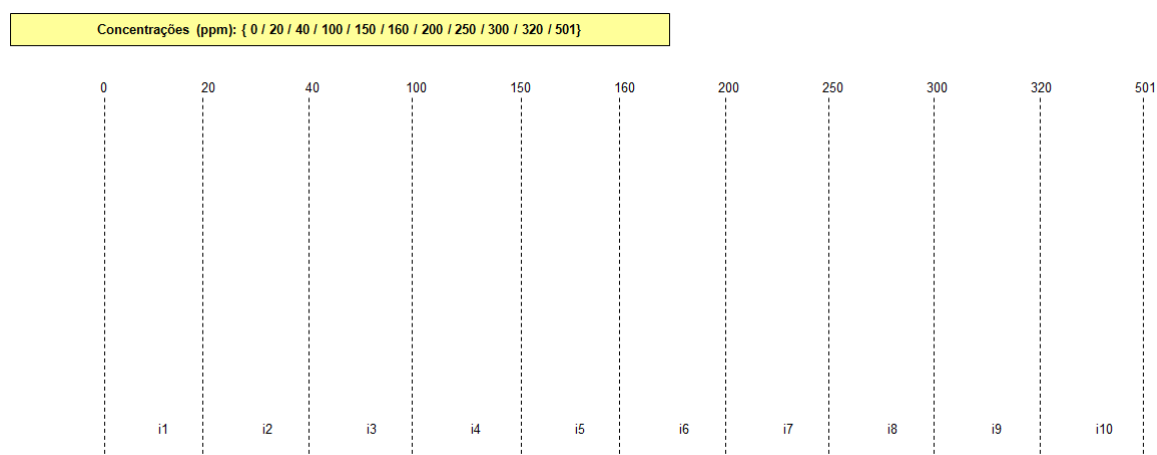


Figura 8 – Diagrama de fontes de água (passo 1).

Passo 2

As operações de transferência de massa são representadas por setas, cuja origem é posicionada na respectiva concentração máxima de entrada, e a extremidade corresponde à concentração máxima de saída. As vazões limites das operações (F) e as temperaturas de cada operação (T) são escritas no lado esquerdo do diagrama.

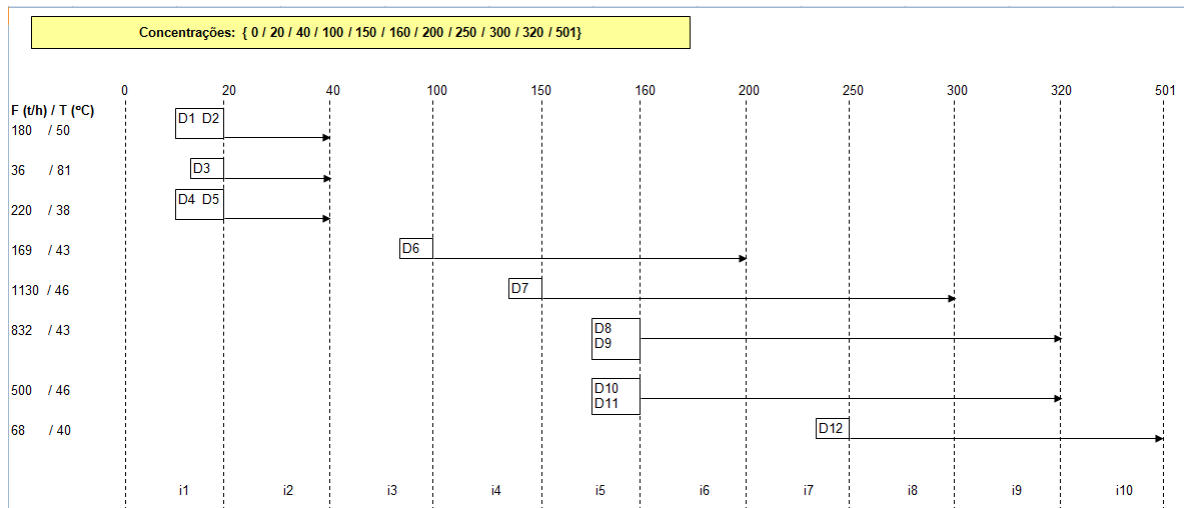


Figura 9 – Diagrama de fontes de água, com operações (passo 2).

Passo 3

A quantidade de massa transferida em cada processo k e em cada intervalo i , (Δm_{ki}) é calculada por:

$$\Delta m_{ki} = f_k (C_{fi} - C_{ii}) \quad (1)$$

onde C_{fi} é a concentração final do intervalo i , C_{ii} é a concentração inicial do intervalo i , f_k é a vazão mássica limite da corrente k , $k = 1, \dots, N_{op}$ e $i = 1, \dots, N_{int}$.

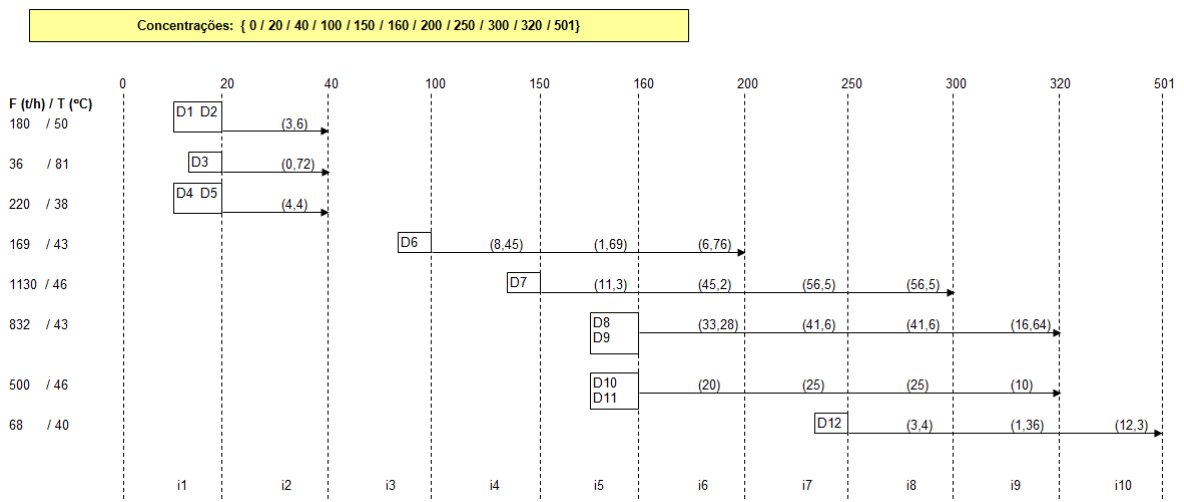


Figura 10 – Diagrama de fontes de água, com operações (passo 3) – quantidade de massa transferida indicada entre parêntesis.

Passo 4

Para assegurar que a mínima vazão de água primária seja utilizada, o procedimento para construção da rede é iniciado no intervalo 1, de menor concentração, e duas regras heurísticas devem ser obedecidas:

1. Utilizar fonte externa (água nova) somente quando não houver fonte interna disponível, tanto em qualidade quanto em quantidade. Na disponibilidade de fonte externa, usar preferencialmente a oriunda da mesma operação.
2. Para uma determinada operação, a fonte de água utilizada em um dado intervalo de concentração deve absorver a quantidade de massa transferida no respectivo intervalo (isto assegura que as concentrações máximas de entrada e de saída não sejam violadas).

São identificadas todas as fontes (externas e internas) disponíveis em cada intervalo. O número de fontes externas de água (N_{fea}) é um dado do problema e, para cada intervalo, deve ser verificada em termos de concentração, gerando $N_{fea,i}$. O número de possíveis fontes internas ($N_{fia,i}$), em cada intervalo, é dado pelo número de operações presentes nos intervalos anteriores.

A vazão de água requerida da fonte de água p , pela operação k , no intervalo i , é determinada pela seguinte equação, para fontes externas:

$$f_{pki}^e = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{j=1}^{N_{fia,i}} (f_{jki}^i [C_{fi} - C_{ij}])}{C_{fi} - C_p^e} \quad (2)$$

onde C_{ij} é a concentração na qual a fonte interna j é usada no intervalo i , C_p^e a concentração da fonte externa p , C_{fi} a concentração final no intervalo i e $N_{fia,i}$ o número de fontes internas disponíveis no intervalo i .

Pela ordem de cálculo, se houver utilização de fonte interna no intervalo, os valores dos respectivos f_{jki}^i são calculados antes dos f_{pki}^e . O somatório nessa equação representa a quantidade de contaminante retirada pelas fontes internas, na operação k , no intervalo i , que tem preferência sobre as fontes externas.

Para as fontes internas, utiliza-se a equação a seguir:

$$f_{pki}^i = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{j=p-1}^p (f_{jki}^i [C_{fi} - C_{ij}])}{C_{fi} - C_p^i} \quad (3)$$

onde C_{ij} é a concentração na qual a fonte interna j é usada no intervalo i ; C_p^i a concentração da fonte interna p e C_{fi} a concentração final no intervalo i .

Com essas equações e informações, calcula-se a quantidade de água necessária para cada operação em cada intervalo de concentração. O procedimento apresentado por

Stelling (2004) e Gomes *et al* (2007) garante que a rede gerada utilize a mínima quantidade de água possível para o máximo reuso.

Após montagem do DFA completo, obtém-se uma rede com consumo de **218 t/h** de água nova e geração das mesmas **218 t/h** de efluentes líquidos para tratamento.

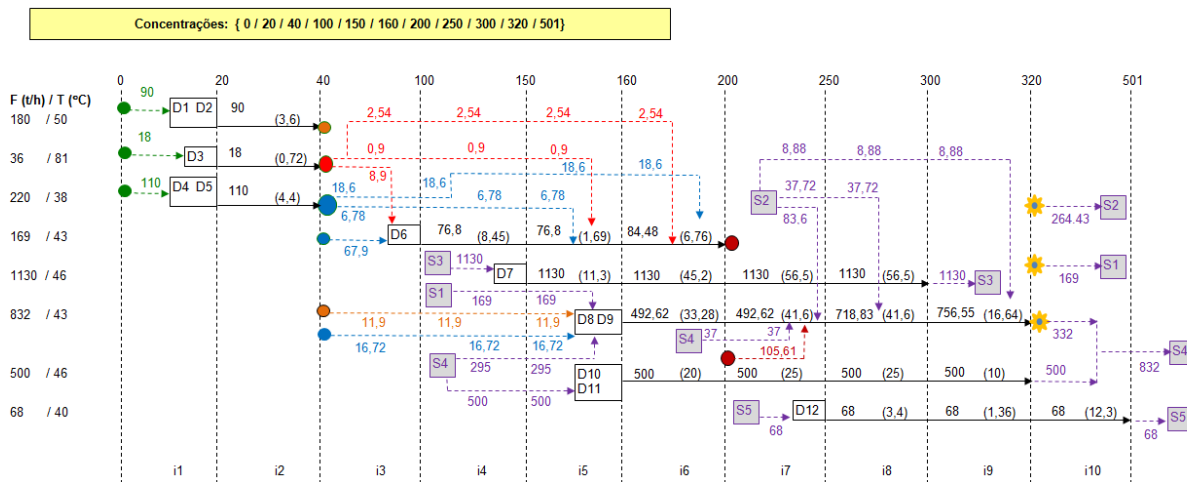


Figura 11 – Diagrama de fontes de água, com operações (passo 4) - vazões em t/h indicadas nas setas.

Entretanto, com a análise simultânea da variável temperatura de operação de cada equipamento de transferência de massa, esse procedimento pode gerar mais de uma rede de águas com o mesmo consumo mínimo de água primária. Sendo necessário, dessa forma, definir qual delas possui menor custo financeiro sob o ponto de vista de integração energética.

Para encontrar a configuração que tem menor custo de aquecimento ou resfriamento, são definidas as demandas de aquecimento e resfriamento e utiliza-se a Tecnologia de *Pinch* Energético. Essa técnica leva em consideração os custos de utilidades quentes, utilidades frias e equipamentos para troca de calor. Repare que quanto maior a integração energética, menor o uso de utilidades frias ou quentes, porém maior o custo com trocadores de calor.

A Figura 12 e a Tabela 7 apresentam as demandas de resfriamento (Q1 e Q2) e aquecimento (F1, F2, F3, F4, F5) necessárias para atendimento das temperaturas de cada processo, conforme tabelas 1 e 2. A Tabela 7 também apresenta as três correntes de efluente líquido e suas respectivas temperaturas de saída, pois elas podem ser utilizadas também para integração térmica.

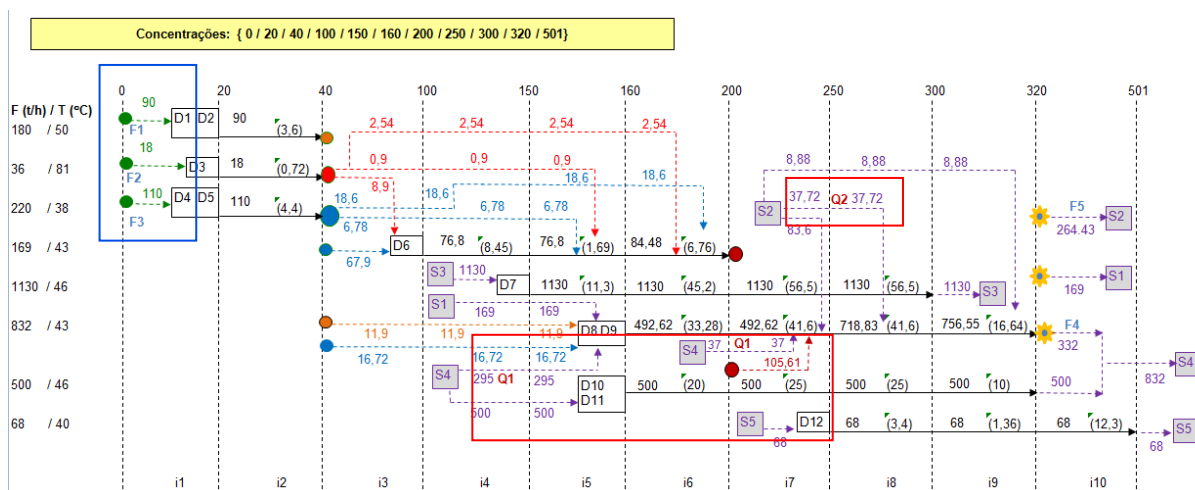


Figura 12 – Diagrama de fontes de água, com demandas de resfriamento e aquecimento em destaque.

II.5.2 - Análise energética

Essa etapa tem como objetivo minimizar a utilização de utilidades quentes e frias, à medida que propõe uma integração térmica entre as correntes disponíveis. Para realização da análise energética, utiliza-se a Tecnologia *Pinch* (estrangulamento térmico ou energético). A partir da análise realizada no DFA, as seguintes correntes e demandas são identificadas:

Tabela 7 – Correntes e demandas térmicas.

Corrente	T Entrada (°C)	T Saída (°C)	Vazão (T/h)	M_{cp} (kW / °C)	Q (kW)
F1	30	50	90	104,6	2092
F2	30	81	18	20,92	1066,92
F3	30	38	110	127,84	1022,72
F4	43	46	332	386,86	1160,58
F5	43	48	264,43	307,33	1536,65
Q1	46	43	332	385,86	-1157,58
Q2	48	43	130,2	151,32	-756,6
Efluente 1	50		78,1	90,77	-
Efluente 2	81		5,66	6,58	-
Efluente 3	48		134,24	156,2	-

Os valores de M_{cp} (kW/ °C) foram calculados considerando o c_p da água como 1 cal/g°C ou 4,128 J/kg°C. A quantidade térmica da corrente, Q (kW), foi calculada conforme a equação:

$$Q = m_{cp}(T_s - T_e) \quad (4)$$

onde:

T_s é a temperatura de saída da corrente ($^{\circ}\text{C}$) e

T_e é a temperatura de entrada da corrente ($^{\circ}\text{C}$).

Para obtenção de mais uma corrente quente, mistura-se as correntes efluentes 1, 2 e 3, gerando a corrente Q3. De acordo com Manan *et al* (2009), os efluentes devem ser resfriados até 35°C antes de serem enviados para a torre de resfriamento. Dessa forma, tem-se a Tabela 8 com as demandas térmicas utilizadas para aplicação da Tecnologia de *Pinch* Energético.

Tabela 8 – Correntes e demandas térmicas.

Corrente	T Entrada ($^{\circ}\text{C}$)	T Saída ($^{\circ}\text{C}$)	Vazão (T/h)	M cp (kW / $^{\circ}\text{C}$)	Q (kW)
F1	30	50	90	104,6	2092
F2	30	81	18	20,92	1066,92
F3	30	38	110	127,84	1022,72
F4	43	46	332	386,86	1160,58
F5	43	48	264,43	307,33	1536,65
Q1	46	43	332	385,86	-1157,58
Q2	48	43	130,2	151,32	-756,6
Q3	49,6	35	218	253,53	-3694,83

Com as correntes apresentadas na Tabela 8, constrói-se o diagrama de intervalos de temperatura. Como citado anteriormente, nessa análise utilizou-se $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$ para as trocas térmicas. É possível utilizar outros ΔT_{\min} na aplicação da Tecnologia *Pinch*, bem como variá-lo para otimização nos resultados, porém nesse trabalho isso não é realizado. A Figura 13, a seguir, apresenta o Diagrama de Intervalos de Temperatura.

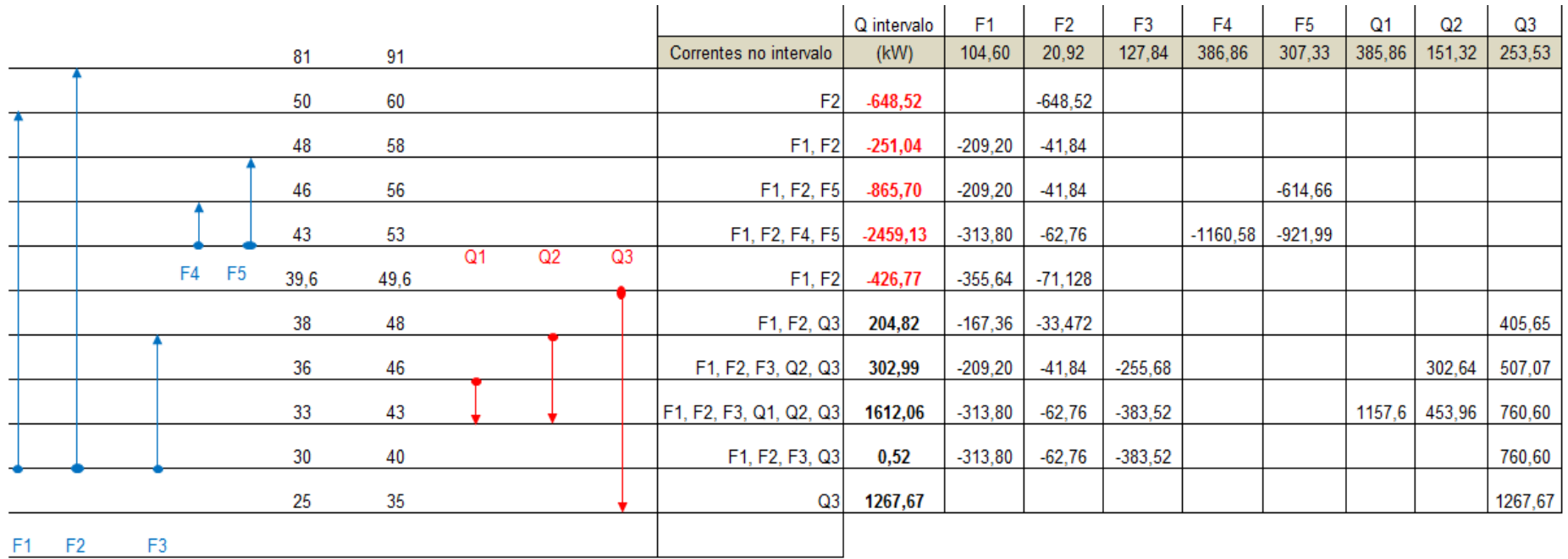


Figura 13 - Diagrama de Intervalos de Temperatura.

A seguir, faz-se a análise de cascata de energia para as correntes:

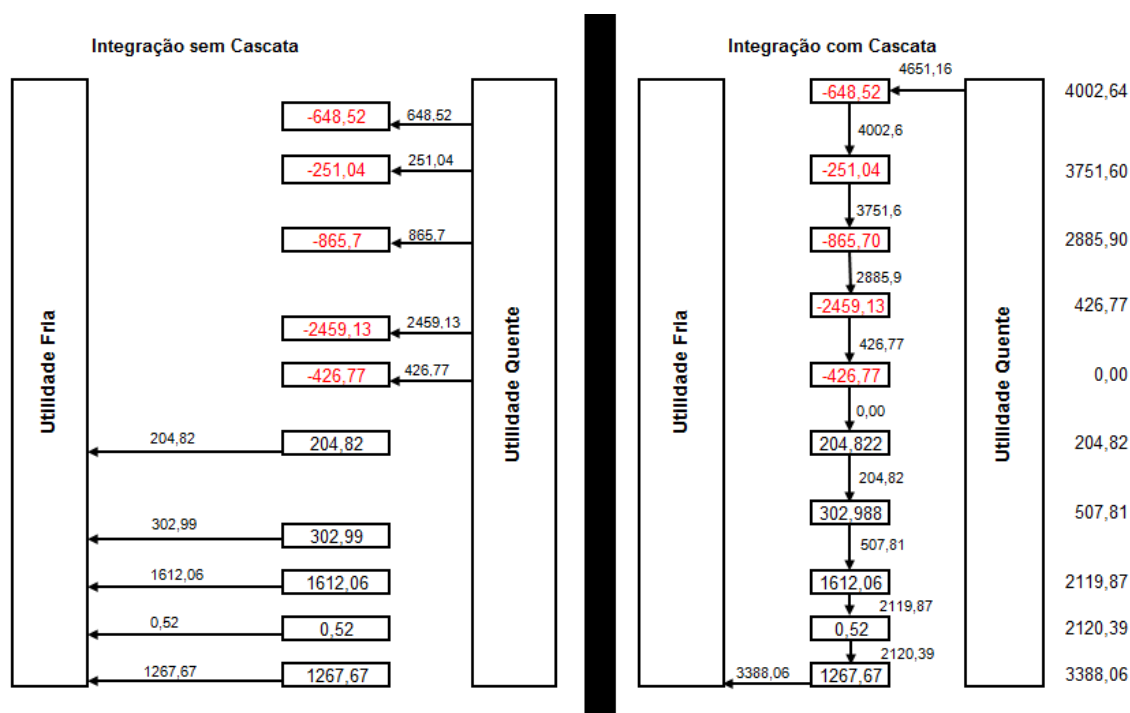


Figura 14 - Diagrama de Integração (sem cascata e com cascata).

A análise dos dados nos leva ao seguinte resumo, apresentado na Tabela 9:

Tabela 9 – Resultados das integrações energéticas.

Tipo da Análise	UF (kW)	UQ (kW)
Sem integração	5615,78	-6878,87
Integração sem cascata	3388,06	-4651,16
Integração com cascata	3388,06	-4651,16

Para as correntes do problema analisado, não houve economia energética através da integração com cascata. Os consumos de utilidade fria e quente nas integrações com e sem cascata são os mesmos, conforme apresentado na Tabela 9. Isso ocorre pelo fato de não haver excedente de energia nos intervalos de temperatura superiores do Diagrama de Intervalos de Temperatura, apresentado na Figura 13, e que poderiam ser aproveitados pelos intervalos de temperatura inferiores (cascateados).

Para melhor visualização do problema, propõe-se analisar o Diagrama das Curvas Compostas, que relaciona o Delta Mínimo de Troca Térmica (ΔT_{\min}), a quantidade mínima de utilidade fria e a quantidade mínima de utilidade quente.

Tabela 10 e Tabela 11 – Dados para construção do Diagrama de Curvas Compostas

Intervalo Quente			Intervalo Frio		
T (°C)	Entalpia (kW) intervalo	Entalpia (kW) cumulativa	T (°C)	Entalpia (kW) intervalo	Entalpia (kW) cumulativa
91	0,00	5615,78	81	648,52	10266,93
60	0,00	5615,78	50	251,04	9618,41
58	0,00	5615,78	48	865,70	9367,37
56	0,00	5615,78	46	2459,13	8501,67
53	0,00	5615,78	43	426,77	6042,54
49,6	405,65	5615,78	39,6	200,83	5615,77
48	809,71	5210,12	38	506,72	5414,94
46	2372,14	4400,41	36	760,08	4908,22
43	760,60	2028,27	33	760,08	4148,14
40	1267,67	1267,67	30	0,00	3388,06
35	0,00	0,00	25	3388,06	3388,06

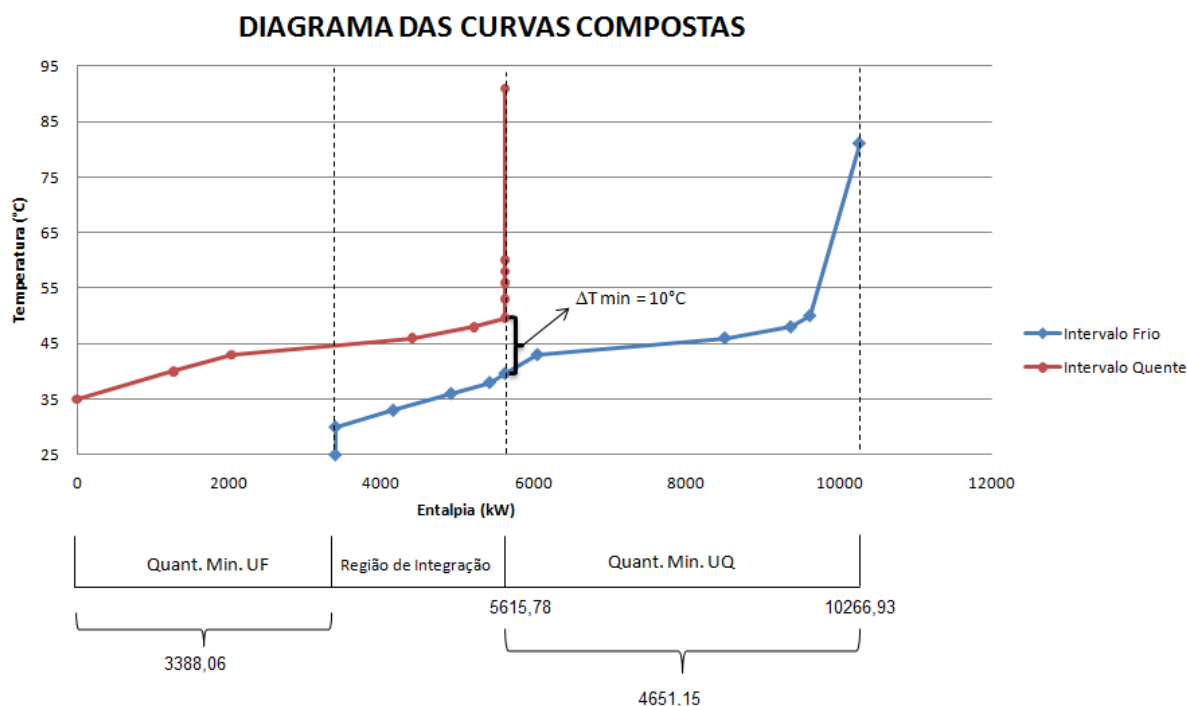


Figura 15 - Diagrama de Curvas Compostas

Com auxílio do Diagrama das Curvas Compostas é possível visualizar três regiões distintas: região sem integração com utilização de utilidade fria, região de integração e região sem integração com utilização de utilidade quente. Também é possível visualizar o *pinch* energético (área onde a distância entre as curvas é mínima e igual ao ΔT_{\min} adotado). O *pinch* ocorre na temperatura de 39,6°C na curva “intervalo frio” e a 49,6°C na curva “intervalo quente”.

Também é possível construir a Grande Curva Composta para auxílio da análise. Esse gráfico também é baseado no Diagrama de Integração Cascata (Figura 11), porém utiliza uma escala de temperatura deslocada (média das temperaturas dos intervalos frio

e quente). Os dados geradores da curva são apresentados na Tabela 12, a seguir, e em vermelho é destacado o ponto de *pinch* energético:

Tabela 12 – Dados para construção da Grande Curva Composta.

GRANDE CURVA COMPOSTA	
T (°C)	Entalpia (kW)
86	4651,16
55	4002,64
53	3751,60
51	2885,90
48	426,77
44,6	0,00
43	204,82
41	507,81
38	2119,87
35	2120,39
30	3388,06

Na Figura 16, a seguir, é apresentada a Grande Curva Composta, em destaque o ponto de *pinch* e as quantidades de utilidades fria e quente necessárias para resolução do problema de integração energética.

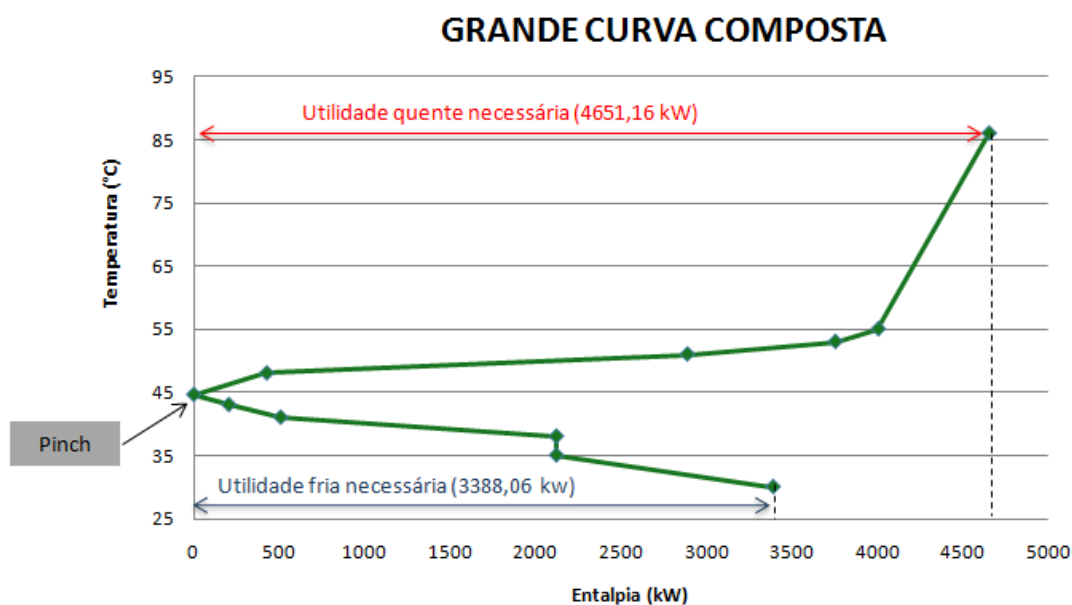


Figura 16 - Grande Curva Composta

Com o ponto de *pinch* e as quantidades mínimas de utilidade fria e de utilidade quente definidas, obtém-se o número mínimo de trocadores de calor, bem como a rede de trocadores que soluciona o problema.

Para definição da rede de trocadores divide-se o problema em duas partes:

- Acima do *pinch* e
- Abaixo do *pinch*.

Acima do *pinch*, tem-se as seguintes correntes e demandas (Tabela 13):

Tabela 13 – Demandas acima do *pinch*.

Corrente	T Entrada (°C)	T Saída (°C)	Vazão (T/h)	M cp (kW / °C)	Q (kW)
F1 (b)	39,6	50	90	104,6	1087,84
F2 (b)	39,6	81	18	20,92	866,088
F4	43	46	332	386,86	1160,58
F5	43	48	264,43	307,33	1536,65

Neste subproblema, o número mínimo de trocadores de calor é dado por:

< número de correntes frias > + < número de correntes quentes > + < número de utilidades quente > + < número de utilidades fria > - 1

Número mínimo de trocadores = 4 + 0 + 1 + 0 - 1 = **4**.

Na região acima do *pinch*, não há integração entre as correntes, somente troca térmica entre cada corrente fria e a fonte de utilidade quente disponível. Dessa forma, os trocadores necessários são apresentados na Tabela 14 a seguir:

Tabela 14 – Trocadores acima do *pinch*

Trocador	Correntes	Q _T (kW)
TC1	F1(b) x UQ	1087,84
TC2	F2(b) x UQ	866,088
TC3	F4 x UQ	1160,58
TC4	F5 x UQ	1536,65
TOTAL UQ		4651,16

Abaixo do *pinch*, por sua vez, o problema contém as seguintes correntes e demandas (Tabela 15).

Tabela 15 – Demandas abaixo do *pinch*

Corrente	T Entrada (°C)	T Saída (°C)	Vazão (T/h)	M cp (kW / °C)	Q (kW)
Q1	46	43	332	385,86	-1157,58
Q2	48	43	130,2	151,32	-756,6
Q3	49,6	35	218	253,53	-3694,83
F1(a)	30	39,6	90	104,6	1004,16
F2(a)	30	39,6	18	20,92	200,83
F3	30	38	110	127,84	1022,72

Na região abaixo do *pinch*, há possibilidade de trocas térmicas entre as correntes (integração) e há também utilização de utilidade fria para alcançar os objetivos do problema.

Neste subproblema, o número mínimo de trocadores de calor é dado por:

< número de correntes frias > + < número de correntes quentes > + < número de utilidades quente > + < número de utilidades fria > - 1

Número mínimo de trocadores = 3 + 3 + 0 + 1 - 1 = 6.

Durante o processo de escolha dos pares para realização de troca térmica, as seguintes regras devem ser observadas:

- **Abaixo do *pinch*:**

$$N_f \leq N_q$$

$$mCp|_f \leq mCp|_q$$

- **Troca térmica contracorrente:**

$$(T_{\text{entrada quente}} - T_{\text{saida fria}}) \geq \Delta T_{\text{min}}$$

$$(T_{\text{saida quente}} - T_{\text{entrada fria}}) \geq \Delta T_{\text{min}}$$

Com a observação das regras acima, obtém-se os seguintes trocadores de calor e os pares de correntes (Tabela 16):

Tabela 16 – Trocadores abaixo do *pinch*

Trocador	Correntes	Q _T (kW)	tipo
TC5	F1(a) x Q3	1004,16	integração
TC6	F2(a) x Q3	200,83	integração
TC7	F3 x Q1	767,04	integração
TC8	F3 x Q2	255,68	integração
TC9	Q1 x UF	389,72	UF
TC10	Q2 x UF	500,87	UF
TC11	Q3 x UF	2497,31	UF
TOTAL*		3387,90	≅ 3383,06*

* Esse resultado é aproximadamente igual à quantidade mínima de utilidades fria calculada através do diagrama de integração (Figura 14). A diferença obtida é devida a pequenas aproximações nos cálculos efetuados.

Note que foram obtidos sete trocadores de calor e não seis conforme previsto pelo cálculo do número mínimo de trocadores de calor. Isso é explicado pela

necessidade de se dividir a corrente Q3 em duas, para possibilitar as trocas térmicas entre “F1(a) x Q3” e “F2(a) x Q3”.

Finalmente, é importante lembrar que a corrente Q3 representa o somatório das correntes efluentes e é utilizada como fonte de calor para aumentar a integração energética do sistema. Conforme citado anteriormente, Manan *et al* (2009), também é necessário resfriar a corrente de efluente, Q3, até 35°C para posterior envio à torre de resfriamento da planta da MNI.

A rede final de trocadores de calor é representada na Figura 17, a seguir:

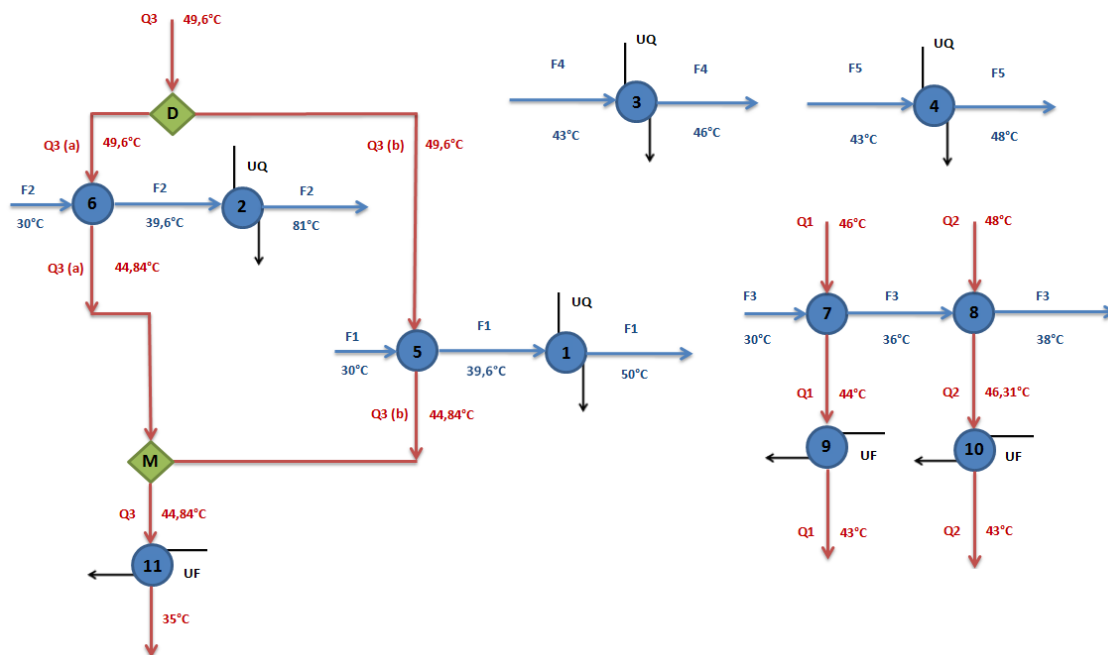


Figura 17 – Rede de Trocadores de Calor

II.6 - Resultados com método SCTMTC

Após aplicação do método SCTMTC, foram obtidos os seguintes resultados para utilização de água nova, tratamento de efluente líquido gerado, utilidade quente e utilidade fria (Tabela 17):

Tabela 17 – Resultados SCTMTC em comparação com os resultados SWE e situação atual da planta MNI.

Parâmetro comparativo	MNI	SWE	SCTMTC
Consumo de água nova (t/h)	436,0	377,5	218
Custo da água nova (US\$ / ano)	156.591,00	135.580,00	78.295,21
Efluente líquido gerado (t/h)	436,0	377,5	218
Custo de tratamento do efluente (US\$ / ano)	1.078.949,00	934.182,00	539.474,64
QH (MW)	8,14	7,75	4,65
QH (MW) (sem considerar reciclo em A e B)	4,87	4,48	1,38
Custo utilidade quente (US\$ / ano)	14.012.542,00	12.890.387,00	3.970.699,57
QC (MW)	8,98	9,47	3,38
Custo utilidade fria (US\$ / ano)	229.393,00	241.910,00	86.341,69
Custo total de utilidades (US\$ / ano)	15.477.475,00	14.202.059,00	4.674.811,11
Economia (US\$ / ano)	-	1.275.416,00	10.802.663,89

Para cálculo do custo de utilidades fria e quente foram utilizados os mesmos valores unitários propostos por Manan *et al* (2009).

O diagrama final proposto pela metodologia SCTMTC é apresentado na Figura 18, a seguir:

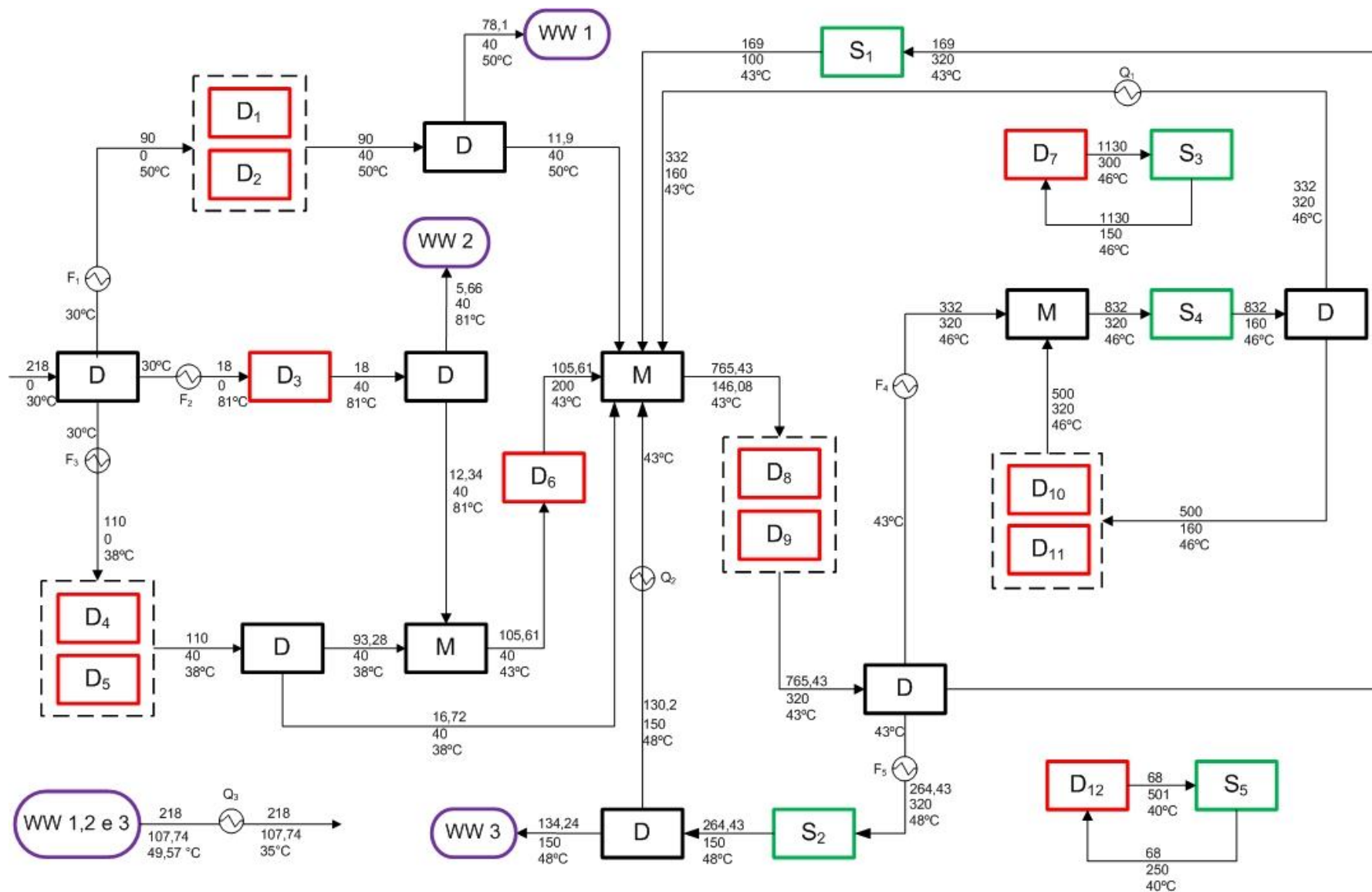


Figura 18 – Diagrama de utilização de água sugerido pela metodologia SCTMTC.

Cálculo do Investimento Necessário

Para implementação da solução proposta, alguns investimentos são necessários:

- Investimento para os trocadores de calor propostos;
- Modificações na rede de água (tubulações, bombas e obras civis).

Porém, na ausência de um levantamento de campo mais detalhado, algumas hipóteses foram adotadas para simplificar o cálculo do investimento necessário:

- Foi considerado que todos trocadores de calor necessários são novos, não havendo aproveitamento de nenhum dos equipamentos de troca térmica existentes;
- Foi considerado que as modificações na rede de água (novas tubulações, bombas hidráulicas e obras civis) tem um valor pequeno frente ao investimento necessário para aquisição dos equipamentos de troca térmica. Essa hipótese também foi adotada no trabalho referência Manan *et al* (2009).

Dessa forma, o cálculo do investimento necessário se limitou ao custo dos onze trocadores de calor propostos. As fórmulas utilizadas para o cálculo dos custos dos trocadores foram as mesmas apresentadas por Manan *et al* (2009), por questões de comparação:

$$Q_T = U.A.\Delta T_{ln} \quad (5)$$

onde:

Q_T – carga térmica total do trocador de calor, proveniente do balanço energético (W);

U – Coeficiente de troca térmica = 5678 W/m² °C. É utilizado o mesmo valor definido no trabalho de Manan *et al* (2009);

A – área de troca térmica necessária (m²) e

ΔT_{ln} – média logarítmica da temperatura (°C).

$$BC = C_0 \left(\frac{A}{S_0} \right)^\alpha \quad (6)$$

onde:

BC – Custo base (*base cost*) do trocador de calor em dólares americanos;

A – área de troca térmica necessária (m²), a mesma da equação anterior e

α, C_0, S_0 – parâmetros da equação, respectivamente 0.024, US\$ 300 e 0.511m².

E, finalmente, a equação que atualiza o custo base (BC) do trocador de acordo com material, pressão, etc:

$$Custo\ Final = UF \cdot BC \cdot (MPF + MF - 1) \quad (7)$$

onde:

UF – Fator de Atualização (*update factor*) = 3,62;

BC – Custo base, calculado pela equação anterior (US\$);

MPF – fator de material e pressão = 0,80 e

MF – fator módulo = 1,83.

Dessa forma a Tabela 18, a seguir, apresenta os custos dos trocadores de calor necessários para resolução do problema.

O investimento total necessário para implementação da solução é igual a US\$ 20.442,58. Esse valor é muito pequeno quando comparado com a economia anual de utilidades calculada US\$ 10.802.663,89/ ano. O tempo de retorno de investimento (TRI), se calculado é menos que um mês:

$$TRI\ (anos) = \frac{Investimento\ (US\$)}{Economia\ Anual\ (US\$ / ano)} \cong 0,002 \quad (8)$$

Tabela 18 – Custo dos trocadores de calor necessários para resolução do problema.

Trocador	Correntes	TE fria (°C)	TE quente (°C)	TS fria (°C)	TS quente (°C)	Q (kW)	ΔT In (°C)	U (W/m2 K)	Área (m2)	Custo Base (US\$)	Custo Final (US\$)
TC1	F1(b) x UQ	39,6	280	50	280	1087,84	235,16	5678	0,81	303,38	1790,11
TC2	F2(b) x UQ	39,6	280	81	280	866,09	219,05	5678	0,70	302,24	1783,38
TC3	F4 x UQ	43	280	46	280	1160,58	235,50	5678	0,87	303,84	1792,83
TC4	F5 x UQ	43	280	48	280	1536,65	234,49	5678	1,15	305,92	1805,13
TC5	F1(a) x Q3	30	49,6	39,6	44,86	1004,16	12,27	5678	14,41	325,03	1917,90
TC6	F2(a) x Q3	30	49,6	39,6	44,84	200,83	12,26	5678	2,88	312,72	1845,26
TC7	F3 x Q1	30	46	36	44	767,04	11,89	5678	11,36	323,19	1906,99
TC8	F3 x Q2	36	48	38	46,31	255,68	10,15	5678	4,43	315,97	1864,40
TC9	Q1 x UF	30	44	34	43	389,72	11,43	5678	6,00	318,27	1878,00
TC10	Q2 x UF	30	46,31	36	42	500,87	11,13	5678	7,92	320,40	1890,55
TC11	Q3 x UF	25	44,84	34	35	2497,31	10,41	5678	42,23	333,53	1968,03
										TOTAL	20.442,58

II.7 – Conclusões do estudo de caso 1.

O método proposto SCTMTC apresentou bons resultados na resolução do problema proposto com uma economia anual de utilidades muito interessante. Sua aplicação para problemas integrados de minimização de consumo de água e de troca térmica, para casos de apenas um contaminante se mostrou válida.

Os resultados obtidos em comparação com a metodologia SWE foram superiores sob a ótica dos critérios adotados. A principal diferença encontrada foi o consumo

mínimo de água externa, que por sua vez contribui para a redução de utilidades fria e quente.

As fábricas de papel e celulose se enquadram no tipo de problema analisado.

Recomenda-se sua utilização nesse tipo de indústria com o objetivo de minimizar o consumo de água nova, utilidades de aquecimento e resfriamento, conseqüentemente, também é minimizado o custo de tratamento de efluentes. Com essas minimizações, além de economia para a indústria de interesse em termos financeiros, também é possível contribuir para o meio ambiente, a medida que se consome menos energia e menos água.

O tempo de retorno de investimento (TRI) foi muito pequeno, aproximadamente igual a um dia de operação. Porém, cálculos mais precisos do investimento necessário, considerando todas as etapas de engenharia, equipamentos, materiais e obras, devem ser realizados, para obtenção de valores mais precisos.

Vale, ainda, destacar que resultados de investimento e de retorno econômicos diferentes serão obtidos ao se utilizar parâmetros financeiros distintos. Na literatura e nos trabalhos de engenharia de projetos existem diversas metodologias que podem ser aplicadas com resultados interessantes. Recomenda-se que a equipe de projeto interessada, defina *a priori* os padrões que serão utilizados para análise dos investimentos necessários para futuros estudos de caso.

CAPÍTULO III - ESTUDO DE CASO 2 – Savulescu (1999)

III.1 – Introdução.

O segundo estudo de caso utiliza dados de uma planta química, retirados da tese de doutorado de Savulescu *et al* (1999) e compara os resultados obtidos através da utilização da metodologia de SCTMTC com aqueles obtidos por Leewongwanawit *et al* (2004), que, em seu artigo, utiliza um método computacional para otimização do problema de síntese integrada para minimização de utilização de água e energia no processo estudado.

Diferentemente do caso 1, não são fornecidas informações mais precisas sobre o tipo de processo, localização e demais características da planta estudada. Em seu trabalho Savulescu *et al* (1999) apenas cita que hipóteses simplificadoras foram feitas e apenas algumas operações unitárias e equipamentos da planta foram escolhidas como fontes de dados. Contudo, tendo em vista os objetivos do atual trabalho e do artigo de Leewongwanawit *et al* (2004), tais informações se mostram suficientes.

Em seu trabalho, publicado em 2004, Leewongwanawit *et al* (2004) do “Department of Process Integration”, UMIST, Reino Unido, utilizou um algoritmo matemático não linear para otimização do problema de integração simultânea de água e energia. A função objetiva do problema visava minimizar os seguintes custos:

- Água nova;
- Utilidades (vapor e água para refrigeração) e
- Trocadores de calor.

A formulação matemática descrita no trabalho de Leewongwanawit *et al* (2004) resulta num problema de minimização não linear (MINLP). Para sua resolução o autor utiliza um algoritmo linear (MILP) para estimativa inicial.

Tendo como base a mesma planta e os mesmos dados de processo: vazões, temperaturas e concentração de contaminantes, foi aplicado o método SCTMTC para resolução do mesmo problema e comparação dos resultados obtidos pelas duas técnicas.

Vale ressaltar que as mesmas hipóteses simplificadoras foram adotadas e, como critério de avaliação das metodologias, foram utilizadas as mesmas considerações e hipóteses econômicas de investimentos.

Nesse segundo caso, além da introdução, são apresentados:

- Dados do processo considerado;
- Os resultados obtidos pelo algoritmo MINLP de Leewongwanawit *et al* (2004) e sua comparação com o trabalho base da tese de Savulescu (1999);
- O método SCTMTC e sua aplicação no presente estudo;
- Os resultados obtidos pelo método SCTMTC;

- Comparação dos resultados obtidos por cada uma das técnicas nas mesmas bases e
- Conclusões do estudo de caso.

O algoritmo de minimização de Leewongwanawit *et al* (2004) não é detalhado, apenas os resultados obtidos, bem como as hipóteses adotadas e os parâmetros financeiros escolhidos são apresentados para fins comparativos.

Novamente, como no primeiro estudo de caso, o foco é dado aos resultados obtidos com a aplicação da técnica SCTMTC no caso referência escolhido e à comparação dos resultados obtidos por ambas as metodologias, com intuito de se analisar a aplicabilidade da segunda em problemas reais da indústria.

Nesse estudo, também é apresentada, durante a aplicação da metodologia de SCTMTC, uma avaliação do impacto da mistura de correntes (tratamento distribuído ou concentrado das vazões para água efluente).

III.2 – Dados do processo

Os dados de processo necessários para aplicação das metodologias foram obtidos na tese de Savulescu (1999), que realizou levantamento de campo necessário numa indústria química bem como definiu as simplificações necessárias para geração do conjunto de dados apresentado na Tabela 19 abaixo.

Basicamente, o processo é definido por oito operações, suas restrições em termos de temperatura de processo, concentração de contaminantes e vazão de água. Também é definido que:

- Água nova é fornecida a 20 °C;
- Correntes de efluentes devem ser descartadas a 30 °C e
- O ΔT min para definição dos trocadores de calor em contra-corrente é igual a 10 °C.

Operação	C_{in} (ppm)	C_{out} (ppm)	ΔC (ppm)	Δm (kg/h)	F (t/h)	T (°C)
1	0	200	200	14,4	72	40
2	100	200	100	39,6	396	60
3	0	400	400	21,6	54	75
4	400	600	200	8,64	43,2	45
5	100	600	500	75,6	151,2	100
6	150	400	250	21,6	86,4	50
7	350	600	250	54	216	80
8	500	1000	500	36	72	55

Tabela 19 – Dados do Processo – estudo de caso 2.

A Tabela 19 apresenta as oito operações consumidoras de água incluindo: concentração de entrada e de saída de contaminantes (ppm), diferença entre concentração de entrada e saída (ppm), quantidade de contaminante transferido em cada operação (kg/h), vazão (t/h) e temperatura (°C). Novamente, como no estudo de caso 1, todos os possíveis contaminantes existentes foram agrupados num único pseudo-contaminante, assumindo a hipótese simplificadora de um único contaminante nas correntes aquosas.

O fornecimento de energia por utilidade quente é feito através de vapor saturado, com temperatura definida em 158,13°C, mesma hipótese de Stelling (2004). Para simplificação a temperatura da água de resfriamento é fixada em 20°C na entrada e, na saída, 10°C abaixo da temperatura da corrente quente que deseja resfriar.

III.3 - Resultados do trabalho base (algoritmo MINLP)

O algoritmo apresentado no trabalho de Leewongwanawit *et al* (2004) conseguiu obter reduções no consumo de utilidades para aquecimento e resfriamento, além de reduzir o número de trocadores de calor, quando comparado com o trabalho original de Savulescu (1999). O consumo de água nova, bem como a geração de efluentes foi igual nos dois trabalhos: 117 kg/s. É interessante destacar que Leewongwanawit considerou a possibilidade de misturas não isotérmicas entre as correntes para troca térmica, possibilitando a redução do número de equipamentos de troca de calor, obviamente sem desobedecer aos critérios de concentração de contaminantes.

Porém, as mudanças sugeridas no diagrama de utilização de águas e na rede de trocadores de calor geraram alguns problemas práticos como correntes muito pequenas e inferiores a 0,2 kg/s e várias correntes de entrada no mesmo equipamento. No diagrama apresentado na Figura 19, por exemplo, é possível observar quatro correntes de entrada no equipamento 7.

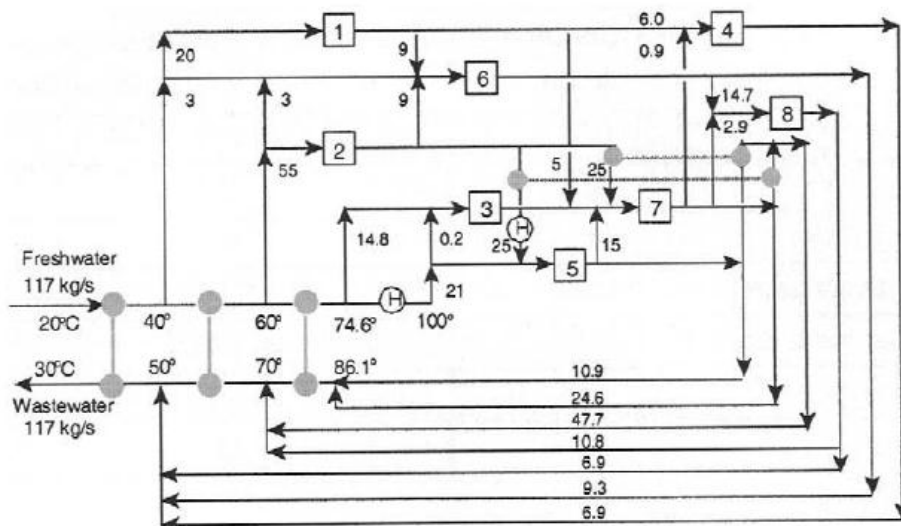


Figura 19 – Primeiro diagrama obtido pelo algoritmo MINLP.

Para evitar esses problemas, novas restrições foram inseridas no modelo computacional gerando uma nova rede de águas e trocadores de calor, porém dessa vez, com nenhuma corrente menor do que 1 kg/s e no máximo duas correntes de entrada por equipamento. Contudo, nessa nova resolução o número de trocadores aumentou, bem como a quantidade de água mínima e a quantidade de utilidade quente necessárias. A Figura 20 apresenta a segunda rede obtida pelo MINLP, frente às restrições inseridas.

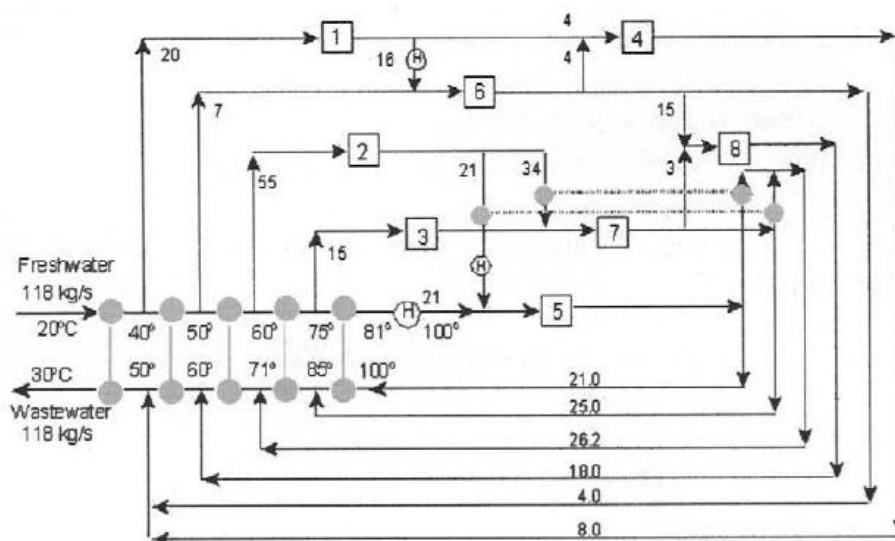


Figura 20 – Segundo diagrama obtido pelo algoritmo MINLP – com restrições de engenharia.

Os cálculos financeiros apresentados por Leewongwanawit *et al* (2004) não são detalhados, porém acredita-se que as premissas e os parâmetros financeiros utilizados sejam os mesmos daqueles apresentados na tese de Savulescu (1999). Vale ressaltar que todos esses valores financeiros são revistos durante a comparação feita com os resultados da metodologia SCTMTC, no capítulo III.5.

A Tabela 20, a seguir, confronta os dados do trabalho original de Savulescu (1999) com os dois resultados obtidos pelo algoritmo computacional (MINLP): com e sem as restrições de engenharia.

Tabela 20 – Comparação dos resultados de Savulescu (1999) e Leewongwanawit *et al* (2004)

	Savulescu (1999) Desenho conceitual	Leewongwanawit (2004) sem restrições	Leewongwanawit (2004) com restrições
Água Nova (kg/s)	117	117	118
Utilidade Quente (kW)	5712	4914	4956
Utilidade Fria (kW)	798	0	0
Trocadores de Calor	12	7	10
Área Trocadores de Calor (m ²)	1345	1190	1260
Custo Total (£/ano)	£ 1.320.000,00	£ 1.130.000,00	£ 1.180.000,00
Economia Comparativa	0,00%	14,39%	10,61%
Economia (£/ano)	£ 0,00	£ 190.000,00	£ 140.000,00

O método apresentado Leewongwanawit *et al* (2004) teve sucesso na tentativa de reduzir os custos totais da rede de águas e de trocadores de calor quando comparados ao trabalho original (Savulescu, 1999). Destacam-se as redes relativamente simples obtidas, com um pequeno número de equipamentos de troca térmica e também a possibilidade da inclusão de restrições de engenharia como o tamanho mínimo aceitável para vazão das correntes.

III.4 - Método SCTMTC

Os passos do método SCTMTC foram descritos com detalhe no estudo de caso 1, mais precisamente no capítulo **II.5 - Método SCTMTC** desse trabalho. No estudo de caso 2, contudo, são apresentados apenas os resultados finais obtidos em cada uma das etapas do método:

1. Síntese da rede de águas e
2. Análise energética (síntese da rede de trocadores de calor referente à rede de águas gerada).

Além disso, é realizada uma avaliação do impacto da mistura de correntes na aplicação da Tecnologia de *Pinch* Energético e cálculo da quantidade mínima de utilidades quente e fria, que fazem parte da etapa 2 – análise energética. Essa avaliação foi baseada na ideia apresentada por Queiroz *et al* (2007) e apresenta a mudança na quantidade necessária de utilidade quente, consequência da mistura das correntes de efluentes.

III.4.1 - Síntese da rede de águas

Conforme explicado anteriormente o objetivo da síntese de rede de águas é minimizar a vazão global de água primária e emissão de efluentes, obtendo a estrutura mais econômica possível, sem desrespeitar os requisitos de vazão e concentração das operações do problema. A Tabela 19, apresentada anteriormente, lista as correntes do estudo de caso 2 e os parâmetros necessários para resolução do problema: concentração de entrada e de saída de contaminantes (ppm), diferença entre concentração de entrada e saída (ppm), quantidade de contaminante transferida em cada operação (kg/h), vazão (t/h) e temperatura de cada operação (°C).

No estudo de caso 1, todos os cinco passos da etapa de síntese da rede de águas são descritos com detalhes. Agora, por praticidade, apresenta-se a rede final obtida após execução de todos os passos.

Passo 1

O problema é dividido em intervalos de concentração, limitados pela fonte de água primária, definida como fonte externa, e por concentrações iguais as de entrada e saída das operações, definidas como fontes internas. As fontes são colocadas em ordem crescente de concentração, definindo intervalos de concentração, e por consequência, o diagrama de fontes de água (DFA).

Passo 2

As operações de transferência de massa são representadas por setas, cuja origem é posicionada na respectiva concentração máxima de entrada, e a extremidade corresponde à concentração máxima de saída. As vazões limites das operações (F) e as temperaturas de cada operação (T) são escritas no lado esquerdo do diagrama.

Passo 3

A quantidade de massa transferida em cada processo k e em cada intervalo i, (Δm_{ki}) é calculada por:

$$\Delta m_{ki} = f_k (C_{fi} - C_{ii}) \quad (9)$$

onde C_{fi} é a concentração final do intervalo i, C_{ii} é a concentração inicial do intervalo i, f_k é a vazão mássica limite da corrente k, $k = 1, \dots, N_{op}$ e $i = 1, \dots, N_{int}$.

Passo 4

Para garantir que a utilização da mínima vazão de água primária, o procedimento de construção da rede é iniciado no intervalo 1, de menor concentração, e duas regras heurísticas devem ser obedecidas:

1. Utilizar fonte externa (água nova) somente quando não houver fonte interna disponível, tanto em qualidade quanto em quantidade. Na

disponibilidade de fonte externa, usar preferencialmente a oriunda da mesma operação.

- Para uma determinada operação, a fonte de água utilizada em um dado intervalo de concentração deve absorver a quantidade de massa transferida no respectivo intervalo (isto assegura que as concentrações máximas de entrada e de saída não sejam violadas).

São identificadas todas as fontes (externas e internas) disponíveis em cada intervalo. Calcula-se a quantidade de água necessária para cada operação em cada intervalo de concentração. O procedimento apresentado por Stelling (2004) e Gomes *et al* (2007) garante que a rede gerada utiliza a mínima quantidade de água possível para o máximo reuso.

Após montagem do DFA completo, obtém-se uma rede com consumo de **421,2 t/h** de água nova e geração das mesmas **421,2 t/h** de efluentes líquidos.

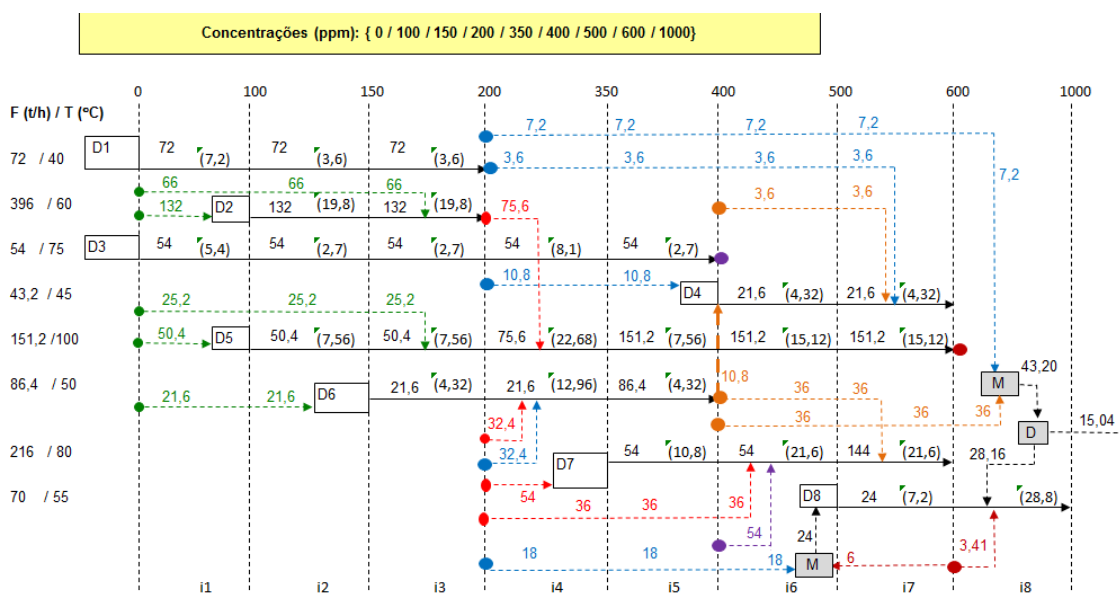


Figura 21 – Diagrama de fontes de água, com operações (passo 4) - vazões em t/h indicadas nas setas.

Novamente, como no caso 1, o procedimento gera mais de uma rede de águas com o consumo mínimo de água primária. Porém, ao se analisar simultaneamente a variável temperatura de cada operação, é possível definir qual delas apresenta o menor custo econômico em termos de integração energética.

Para definição da rede com menor custo de aquecimento e ou resfriamento, é necessário definir as demandas de aquecimento (correntes que precisam receber calor) e resfriamento (correntes que precisam doar calor), e quantificar a quantidade mínima de utilidades quente (vapor) e fria (água de resfriamento). Para isso utiliza-se a Tecnologia *Pinch* ou ponto de estrangulamento energético.

Conforme apresentado no estudo de caso 1, essa técnica avalia concomitantemente os custos de utilidade quente, utilidade fria e trocadores de calor. O maior nível de integração energética gera uma menor utilização de utilidades, mas, em contra partida, um maior número de equipamentos de troca térmica. Porém, como é analisado na avaliação econômica, geralmente o custo fixo e de manutenção dos equipamentos é compensado pela economia de utilidades, cada vez mais caras devido às novas demandas internacionais por energia e água.

A Figura 22 e a Tabela 20 apresentam as demandas de resfriamento (Q1, Q2, Q3, Q4 e Q5) e aquecimento (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8 e F9) necessárias para atendimento das temperaturas de cada processo, conforme Tabela 19.

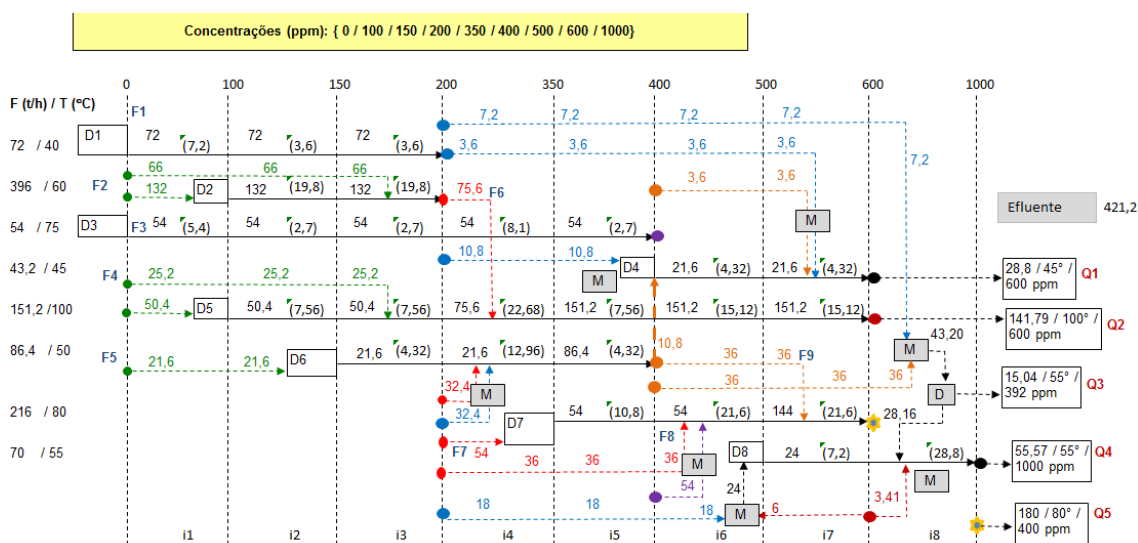


Figura 22 – Diagrama de fontes de água, com demandas de resfriamento e aquecimento em destaque.

III.4.2 - Análise energética

Essa etapa objetiva a minimização da quantidade de utilidades quentes e frias, necessária para atender às demandas das operações do processo em questão, buscando a máxima integração térmica entre as correntes disponíveis e observando a segunda lei da termodinâmica. Conforme descrito anteriormente, a técnica utilizada para cumprimento desse objetivo é a Tecnologia *Pinch* (estrangulamento térmico ou energético). Após a conclusão da síntese da rede de águas (DFA), as seguintes correntes e demandas térmicas são obtidas (Tabela 21).

Tabela 21 – Correntes e demandas térmicas (correntes efluentes distribuídas).

Corrente	T Entrada (°C)	T Saída (°C)	Vazão (T/h)	Vazão (kg/s)	M cp (kW / °C)	Q (kW)
F1	20	40	72	20,0	83,64	1672,8
F2	20	60	198	55,0	230,01	9200,4
F3	20	75	54	15,0	62,73	3450,2
F4	20	100	75,6	21,0	87,82	7025,8
F5	20	50	21,6	6,0	25,09	752,8
F6	60	100	75,6	21,0	87,82	3512,9
F7	60	80	54	15,0	62,73	1254,6
F8	69	80	90	25,0	104,55	1150,1
F9	50	80	36	10,0	41,82	1254,6
Q1	45	30	28,8	8,0	33,46	-501,8
Q2	100	30	141,79	39,4	164,71	-11529,9
Q3	48,33	30	15,04	4,2	17,47	-320,3
Q4	55	30	55,57	15,4	64,55	-1613,8
Q5	80	30	180	50,0	209,10	-10455,0

Os valores de M_{cp} (kW/ °C) foram calculados considerando o c_p da água como 1 cal/g°C ou 4,128 J/kg°C. A quantidade de calor da corrente, Q (kW), foi calculada conforme a equação:

$$Q = m_{cp}(T_s - T_e) \quad (10)$$

onde:

T_s é a temperatura de saída da corrente (°C) e

T_e é a temperatura de entrada da corrente (°C).

Com as correntes listadas na Tabela 21, constrói-se o diagrama de intervalos de temperatura. Como citado anteriormente, nessa análise utilizou-se $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ para as trocas térmicas. É possível utilizar outros ΔT_{\min} durante aplicação da Tecnologia *Pinch*, bem como variá-lo para otimização nos resultados, porém nesse trabalho isso não é realizado. A Figura 23, a seguir, apresenta o Diagrama de Intervalos de Temperatura para o estudo de caso 2, considerando as cinco correntes quentes distribuídas.

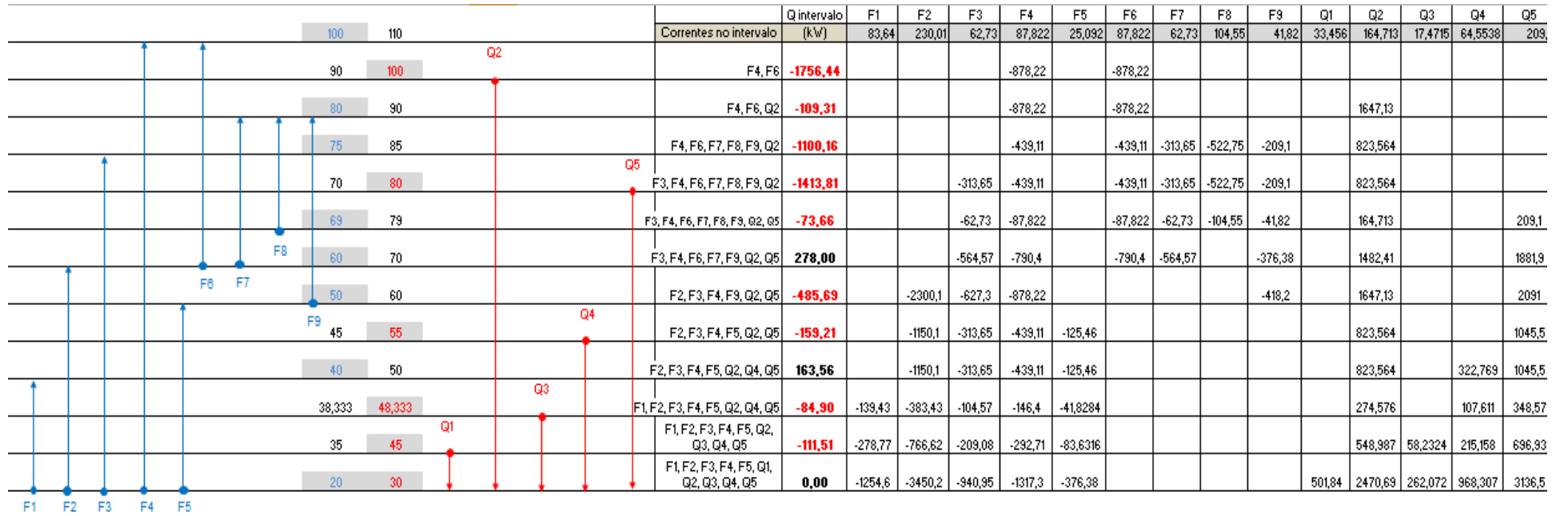


Figura 23 - Diagrama de Intervalos de Temperatura.

A seguir, faz-se a análise de cascata de energia para as correntes:

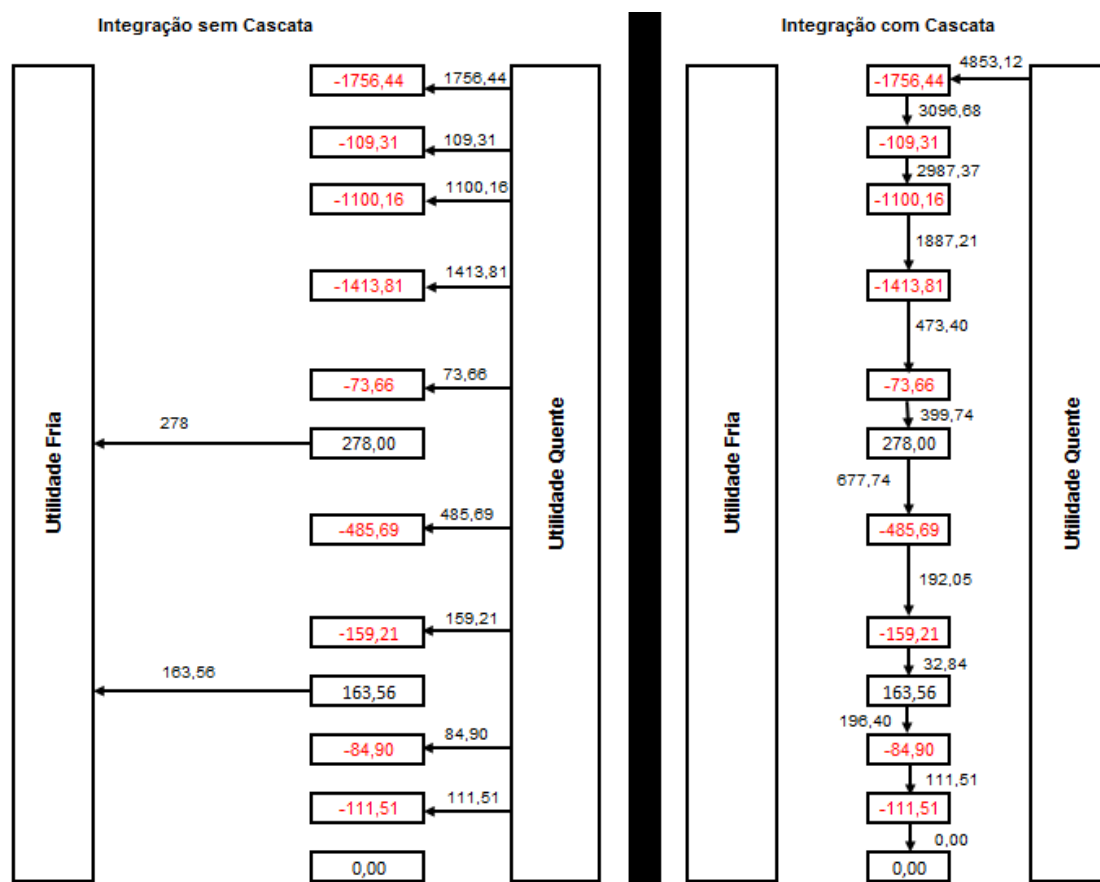


Figura 24 - Diagrama de Integração (sem cascata e com cascata).

Com a análise dos dados, apresentados na Figura 23 e na Figura 24, obtém-se as seguintes informações sobre quantidades necessárias de utilidades (Tabela 22):

Tabela 22 – Resultados das integrações energéticas.

Análise	UF (kW)	UQ (kW)
Sem integração	24420,88	-29274,00
Integração sem cascata	441,56	-5294,68
Integração com cascata	0	-4853,12

Para as correntes do problema analisado, sem nenhum tipo de integração energética seriam necessárias as hipotéticas quantidades de utilidade fria e quente, respectivamente, 24.420,88 kW e 29.274,00 kW.

Com a integração sem cascata de energia, apenas considerando as trocas térmicas possíveis dentro dos intervalos de temperatura, definidos no Diagrama de Intervalos de Temperatura (Figura 23), seria possível uma redução significativa de utilidades, 441,56 kW e 5294,68 kW.

Por último, ao se considerar o efeito cascata térmica, com aproveitamento de energia excedente de um intervalo de temperatura mais quente para um mais frio, obtém-se o mínimo de utilidades fria e quente possíveis, respectivamente 0 e 4851,12 kW.

Para melhor visualização do problema, propõe-se analisar o Diagrama das Curvas Compostas, que relaciona o Delta Mínimo de Troca Térmica (ΔT_{\min}), a quantidade mínima de utilidade fria e a quantidade mínima de utilidade quente. Os dados para construção das curvas presentes no diagrama são apresentados na Tabela 23, a seguir.

Tabela 23 – Dados para construção do Diagrama de Curvas Compostas

Intervalo Quente			Intervalo Frio		
T (°C)	Entalpia (kW) intervalo	Entalpia (kW) cumulativa	T (°C)	Entalpia (kW) intervalo	Entalpia (kW) cumulativa
110	0,00	24420,88	100	1756,44	29274,00
100	1647,13	24420,88	90	1756,44	27517,56
90	823,56	22773,75	80	1923,72	25761,12
85	823,56	21950,19	75	2237,37	23837,40
80	373,81	21126,63	70	447,47	21600,03
79	3364,31	20752,81	69	3086,32	21152,56
70	3738,13	17388,50	60	4223,82	18066,24
60	1869,06	13650,37	50	2028,27	13842,42
55	2191,83	11781,31	45	2028,27	11814,15
50	730,76	9589,48	40	815,65	9785,88
48,333	1519,31	8858,72	38,333	1630,82	8970,23
45	7339,41	7339,41	35	7339,41	7339,41
30	0,00	0,00	20	0,00	0,00

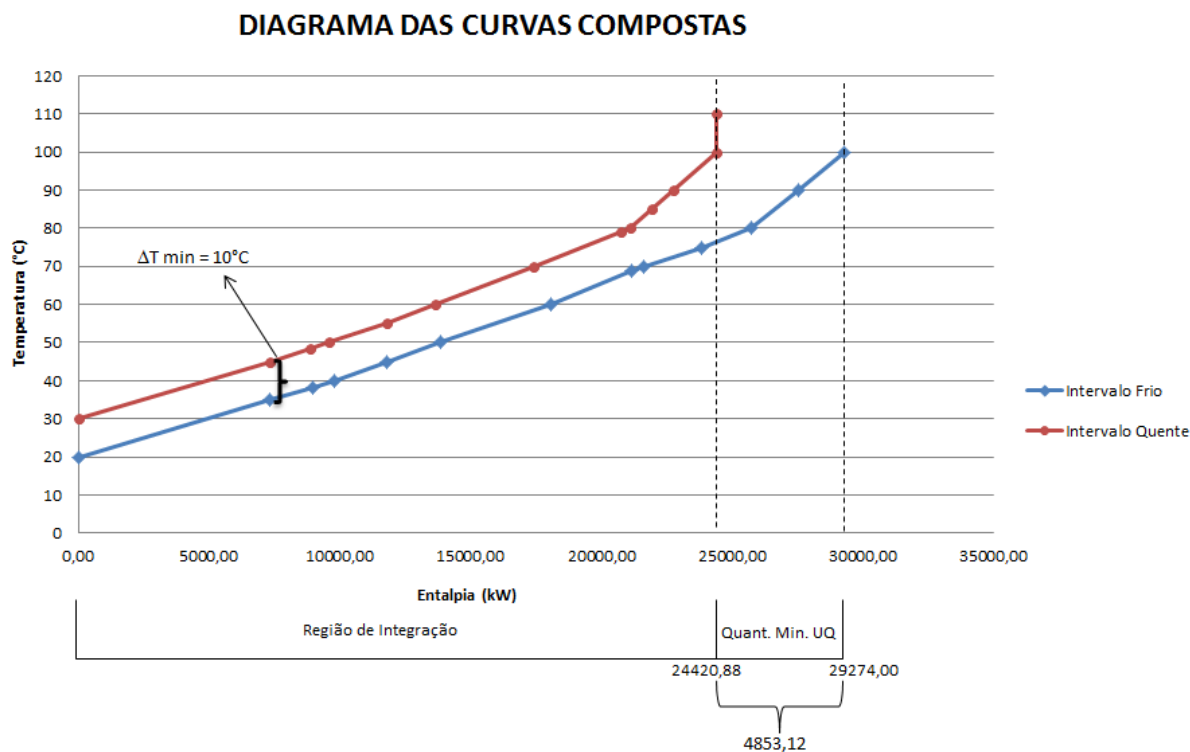


Figura 25 - Diagrama de Curvas Compostas

O Diagrama das Curvas Compostas define duas regiões distintas: região de integração e região sem integração com utilização de utilidade quente. Também é possível visualizar o *pinch* energético (área onde a distância entre as curvas é mínima e igual ao ΔT_{\min} adotado), que nesse problema ocorre na temperatura de 35°C na curva “intervalo frio” e a 45°C na curva “intervalo quente”.

A seguir apresenta-se a Grande Curva Composta construída também a partir do Diagrama de Integração Cascata (Figura 24). Conforme apresentado no estudo de caso 1, essa curva utiliza uma escala de temperatura deslocada (média das temperaturas dos intervalos frio e quente). Os dados da curva são apresentados na Tabela 24, a seguir, em vermelho é destacado o ponto de *pinch* energético:

Tabela 24 – Dados para construção da Grande Curva Composta.

GRANDE CURVA COMPOSTA	
T (°C)	Entalpia (kW)
105	4853,12
95	3096,68
85	2987,37
80	1887,21
75	473,40
74	399,74
65	677,74
55	192,05
50	32,84
45	196,40
43,333	111,51
40	0,00
25	0,00

A seguir, na Figura 26 é apresentada a Grande Curva Composta, em destaque o ponto de estrangulamento energético (*pinch*) e a quantidade de utilidade quente necessária para resolução do problema de integração energética.

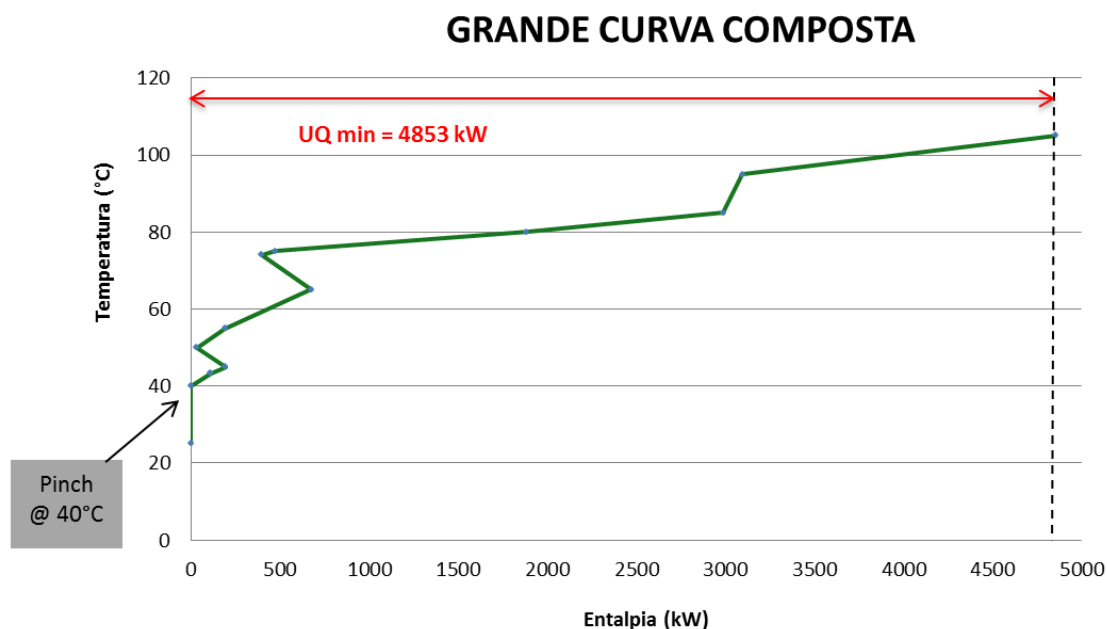


Figura 26 - Grande Curva Composta

Com o ponto de *pinch* e a quantidade mínima de utilidade quente definida, obtém-se a rede de trocadores de calor que soluciona o problema.

Avaliação do Impacto da Mistura de Correntes

Porém, antes de continuar a técnica de ponto de estrangulamento térmico com a definição das redes de trocadores de calor, é interessante realizar uma avaliação do impacto da mistura de correntes nos resultados finais da análise energética. Até aqui, foi considerado um tratamento distribuído para as cinco correntes para efluentes que precisam ser resfriadas: Q1, Q2, Q3, Q4 e Q5. No entanto, agora, para efeito comparativo, assume-se que elas são concentradas numa corrente única, Q, antes da integração energética. Dessa forma, a nova lista de correntes e demandas térmicas é apresentada na Tabela 25 (em confronto com a Tabela 21).

Tabela 25 – Correntes e demandas térmicas (correntes efluentes distribuídas).

Corrente	T Entrada(°C)	T Saída (°C)	Vazão (T/h)	Vazão (kg/s)	M Cp (kW / °C)	Q (kW)
F1	20	40	72	20,0	83,640	1672,8
F2	20	60	198	55,0	230,010	9200,4
F3	20	75	54	15,0	62,730	3450,2
F4	20	100	75,6	21,0	87,822	7025,8
F5	20	50	21,6	6,0	25,092	752,8
F6	60	100	75,6	21,0	87,822	3512,9
F7	60	80	54	15,0	62,730	1254,6
F8	69	80	90	25,0	104,550	1150,1
F9	50	80	36	10,0	41,820	1254,6
Q	79,91	30	421,2	117,0	489,294	-24420,8

Com as correntes listadas na Tabela 25, constrói-se o diagrama de intervalos de temperatura e faz-se a análise cascata de integração energética.

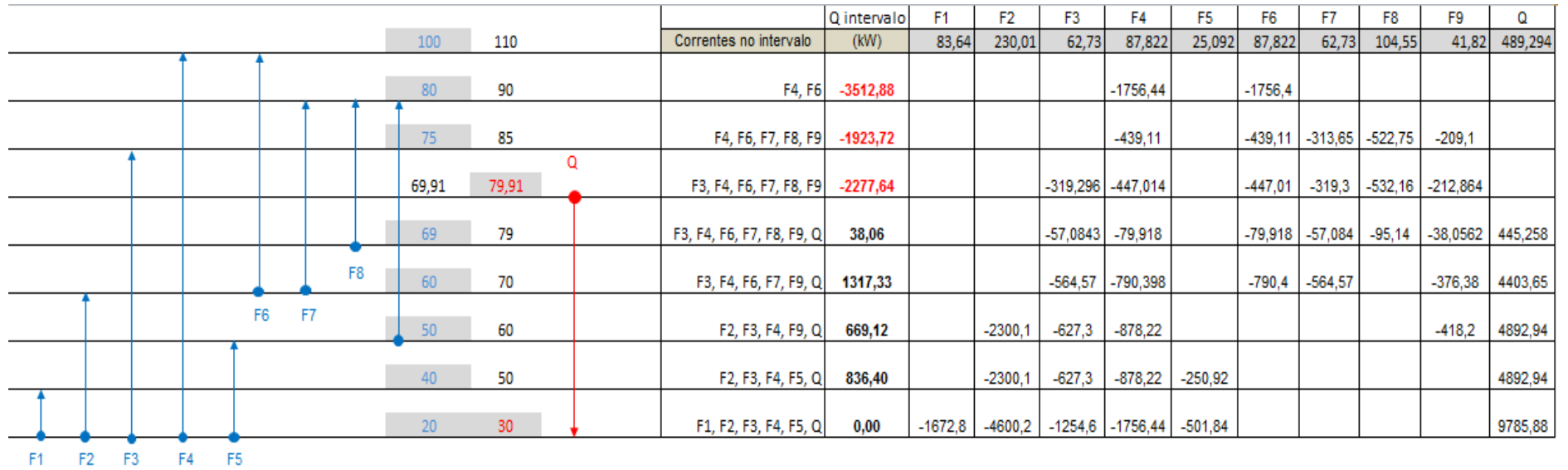


Figura 27 - Diagrama de Intervalos de Temperatura – corrientes de efluentes concentradas.

Na Figura 28, a seguir, a análise cascata para aproveitamento térmico na condição de correntes para efluentes unificadas.

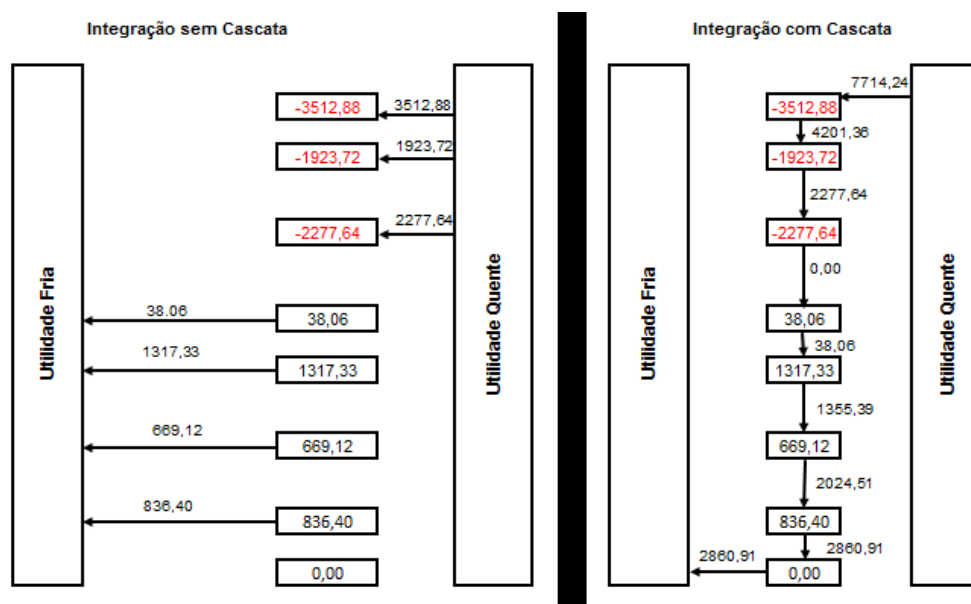


Figura 28 - Diagrama de Integração (sem cascata e com cascata) – efluentes concentrados.

Com a análise dos dados, apresentados na Figura 27 e na Figura 28, obtém-se as seguintes informações sobre quantidades necessárias de utilidades (Tabela 26):

Tabela 26 – Resultados das integrações energéticas.

Análise	UF (kW)	UQ (kW)
Sem integração	24420,66	-29274,00
Integração sem cascata	2860,91	-7714,24
Integração com cascata	2860,91	-7714,24

Quando as correntes de efluentes são concentradas numa corrente Q única, as quantidades de utilidades fria e quente necessárias aumentam, respectivamente para 2860,91 kW e 7714,24 kW, constituindo um cenário desfavorável frente ao tratamento original das correntes de efluentes distribuídas.

O Diagrama das Curvas Compostas e a Grande Curva Composta para a situação de correntes de efluentes concentradas são apresentados na Figura 29 e na Figura 30 a seguir.

Tabela 27 e 28 – Dados para construção do Diagrama de Curvas Compostas – efluentes concentrados.

Intervalo Quente			Intervalo Frio		
T (°C)	Entalpia (kW) intervalo	Entalpia (kW) cumulativa	T (°C)	Entalpia (kW) intervalo	Entalpia (kW) cumulativa
110	0,00	24420,66	100	3512,88	32134,91
90	0,00	24420,66	80	1923,72	28622,03
85	0,00	24420,66	75	2277,64	26698,31
79,91	445,26	24420,66	69,91	407,20	24420,67
79	4403,65	23975,41	69	3086,32	24013,47
70	4892,94	19571,76	60	4223,82	20927,15
60	4892,94	14678,82	50	4056,54	16703,33
50	9785,88	9785,88	40	9785,88	12646,79
30	0,00	0,00	20	2860,91	2860,91

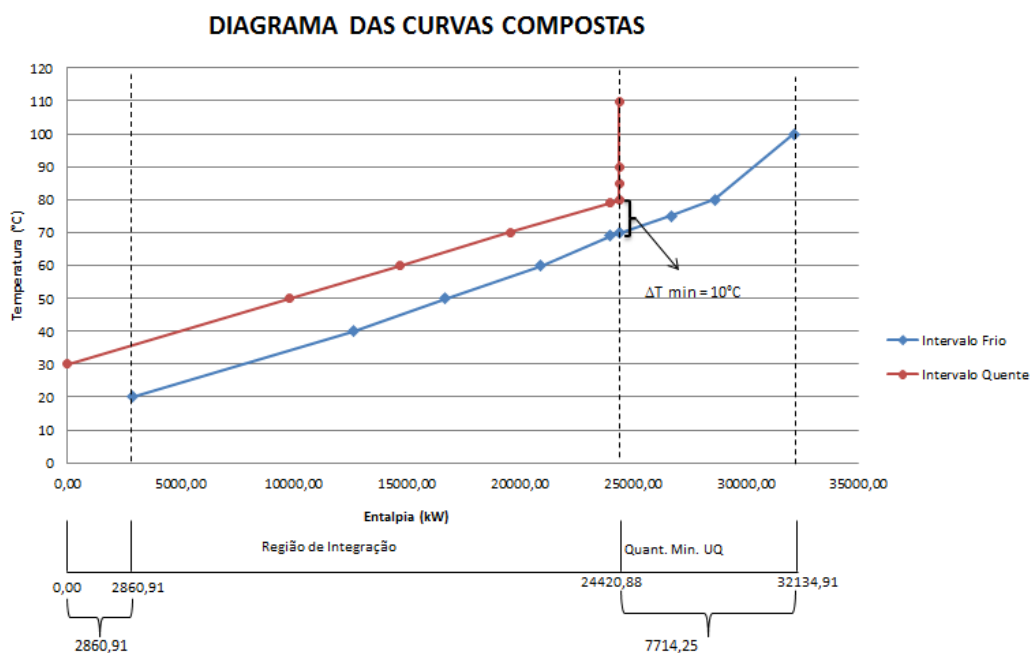


Figura 29 - Diagrama de Curvas Compostas – efluentes concentrados.

No diagrama apresentado na Figura 29, para nova situação, é possível perceber três regiões distintas ao invés de duas: região sem integração e com necessidade de utilidade fria, região de integração e região sem integração com necessidade de utilidade quente. Também é possível perceber que o ponto de estrangulamento mudou de local.

Tabela 29 – Dados para construção do Grande Curva Composta – efluentes concentrados

GRANDE CURVA COMPOSTA	
T (°C)	Entalpia (kW)
105	7714,24
85	4201,36
80	2277,64
74,91	0,00
74	38,06
65	1355,39
55	2024,51
45	2860,91
25	2860,91

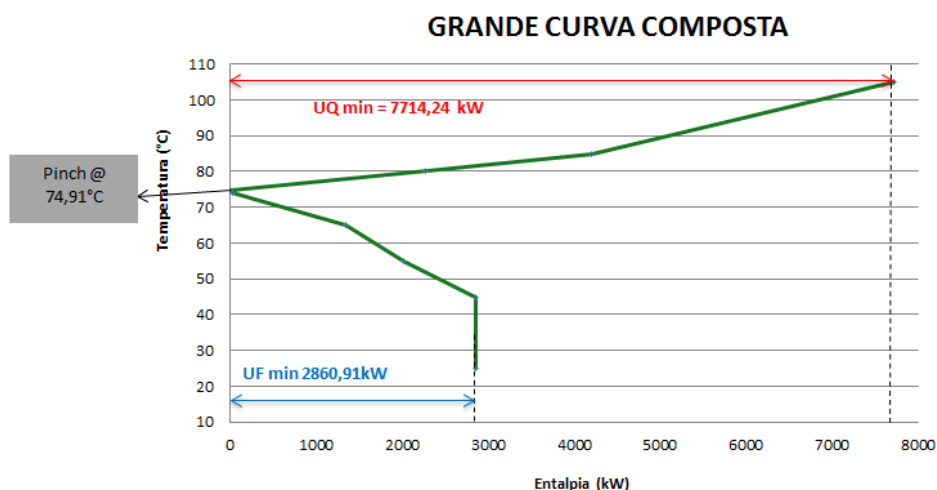


Figura 30 - Grande de Curva Composta – efluentes concentrados.

Além do aumento da necessidade de utilidades quentes e frias, a Grande Curva Composta para o tratamento das correntes de efluentes concentradas também exibe uma nova temperatura de estrangulamento energético: 74,91°C.

A avaliação do impacto da mistura de correntes apresentada demonstra que a unificação das correntes de efluentes numa corrente Q única, apesar de manter a mesma demanda global de utilidades frias e quentes (sem integração), gera um ponto de estrangulamento energético numa temperatura diferente e demandas por utilidades (quente e fria) maiores (sem cascata e com cascata energética), ao se comparar com a abordagem inicial de correntes para efluentes distribuídas. A principal razão para isso é a temperatura máxima da corrente de efluente gerada, Q, igual a 79,91°C ser menor do que a máxima temperatura das correntes originais, 100°C. Essa redução de temperatura, provavelmente, é acompanhada de uma redução da exergia das correntes de efluentes.

Essa análise exergética é sugerida como um possível trabalho futuro no capítulo final dessa dissertação.

Síntese da rede de trocadores

Para definição da rede de trocadores é utilizada a abordagem de correntes de efluentes distribuída, pois a mesma apresentou quantidades mínimas de utilidades quente e fria menores. A síntese inicia-se com a divisão do problema em duas partes:

- Acima do *pinch* e
- Abaixo do *pinch*.

Acima do *pinch*, tem-se as seguintes correntes e demandas (Tabela 30):

Tabela 30 – Demandas acima do *pinch*.

Corrente	T Entrada(°C)	T Saída (°C)	Vazão (T/h)	Vazão (kg/s)	M cp (kW / °C)	Q (kW)
F1 (b)	35	40	72	20,0	83,64	418,20
F2 (b)	35	60	198	55,0	230,01	5750,25
F3 (b)	35	75	54	15,0	62,73	2509,20
F4 (b)	35	100	75,6	21,0	87,82	5708,43
F5 (b)	35	50	21,6	6,0	25,09	376,38
F6	60	100	75,6	21,0	87,82	3512,88
F7	60	80	54	15,0	62,73	1254,60
F8	69	80	90	25,0	104,55	1150,05
F9	50	80	36	10,0	41,82	1254,60
Q2 (b)	100	45	141,79	39,4	164,71	-9059,20
Q3 (b)	48,33	45	15,04	4,2	17,47	-58,18
Q4 (b)	55	45	55,57	15,4	64,55	-645,54
Q5 (b)	80	45	180	50,0	209,10	-7318,50

Na região acima do *pinch*, inicia-se a síntese da rede de trocadores em torno do ponto de estrangulamento, com as correntes listadas na Tabela 31.

Tabela 31 – Demandas acima do *pinch*, ao redor do ponto de estrangulamento.

Corrente	T Entrada(°C)	T Saída (°C)	Vazão (T/h)	Vazão (kg/s)	M cp (kW / °C)	Q (kW)
F1 (b)	35	40	72	20,0	83,64	418,20
F2 (b)	35	60	198	55,0	230,01	5750,25
F3 (b)	35	75	54	15,0	62,73	2509,20
F4 (b)	35	100	75,6	21,0	87,82	5708,43
F5 (b)	35	50	21,6	6,0	25,09	376,38
Q2 (b)	100	45	141,79	39,4	164,71	-9059,20
Q3 (b)	48,33	45	15,04	4,2	17,47	-58,18
Q4 (b)	55	45	55,57	15,4	64,55	-645,54
Q5 (b)	80	45	180	50,0	209,10	-7318,50

Após gerar a rede de trocadores ao redor do *pinch*, juntam-se as correntes da Tabela 31 que ainda não atingiram seu objetivo térmico, denominadas problema remanescente, com as correntes acima e afastadas do ponto de estrangulamento térmico que ainda não foram consideradas. Esse novo conjunto de correntes é listado na Tabela 32, a seguir.

Tabela 32 – Demandas acima do *pinch*, afastada do ponto de estrangulamento.

Corrente	T Entrada(°C)	T Saida (°C)	Vazão (T/h)	Vazão (kg/s)	M cp (kW / °C)	Q (kW)
F3 (b)	45	75	54	15,0	62,73	1881,9
F4 (b)	90	100	75,6	21,0	87,82	878,2
F5 (b)	38,04551852	50	21,6	6,0	25,09	300,0
F6	60	100	75,6	21,0	87,82	3512,9
F7	60	80	54	15,0	62,73	1254,6
F8	69	80	90	25,0	104,55	1150,1
F9	50	80	36	10,0	41,82	1254,6
Q2 (b2)	100	50,43888805	66,19	18,4	76,89	-3810,8
Q5 (b)	80	72,5	180	50,0	209,10	-1568,3

Após integração entre as correntes afastadas do *pinch*, o problema remanescente utiliza vapor (utilidade quente) para alcançar as necessidades de aquecimento das operações do processo. Os trocadores de calor necessários para integração térmica entre as correntes acima do *pinch* e que possibilitam o uso mínimo de utilidades quentes são apresentados na Tabela 33, a seguir:

Tabela 33 – Trocadores acima do pinch

TC	Correntes	Q _T (Kw)
TC2	F2(b) x Q5(b)	5227,50
TC3	F4(b) x Q2(b1)	3952,00
TC4	F1(b) x Q2(b2)	418,20
TC5	F3(b) x Q4(b1)	627,30
TC6	F5(b) x Q3_4	76,40
TC7	Q2(b2) x F8	1150,10
TC8	Q2(b21) x F3(b)	1881,90
TC9	Q2(b22) x F9	563,60
TC10	Q2(b22) x F5(b1)	215,20
TC11	Q5(b1) x F6	878,22
TC12	Q5(b21) x F7	414,00
TC13	Q5(b21) x F9	276,01
TC14	F5 (b2) x UQ	84,77
TC15	F4_6 x UQ	3512,88
TC16	F7_9 x UQ	1255,52

TOTAL UQ (TC 14, 15 e 16)	4853,17 \cong 4853,12*
----------------------------------	--

* Esse resultado é aproximadamente igual à quantidade mínima de utilidades quente calculada através do diagrama de integração (Figura 24), a diferença obtida é devida a pequenas aproximações nos cálculos efetuados.

Abaixo do *pinch*, por sua vez, o problema contém as correntes e necessidades apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 – Necessidades abaixo do *pinch*

Corrente	T Entrada(°C)	T Saída (°C)	Vazão (T/h)	Vazão (kg/s)	M cp (kW / °C)	Q (kW)
F1 (a)	20	35	72	20,0	83,64	1254,6
F2 (a)	20	35	198	55,0	230,01	3450,2
F3 (a)	20	35	54	15,0	62,73	941,0
F4 (a)	20	35	75,6	21,0	87,82	1317,3
F5 (a)	20	35	21,6	6,0	25,09	376,4
Q1	45	30	28,8	8,0	33,46	-501,8
Q2 (a)	45	30	141,79	39,4	164,71	-2470,7
Q3 (a)	45	30	15,04	4,2	17,47	-262,1
Q4 (a)	45	30	55,57	15,4	64,55	-968,3
Q5 (a)	45	30	180	50,0	209,10	-3136,5

Na região abaixo do *pinch*, há a possibilidade de se concentrar todas as correntes frias numa única corrente F e todas as quentes numa única corrente Q. Isso permite realizar a integração das correntes com apenas um trocador de calor. Abaixo do *pinch*, como previsto na análise energética, não há necessidade de uso de utilidade fria. A Tabela 35 apresenta o problema simplificado com as correntes resultantes da mistura.

Tabela 35 – Necessidades abaixo do *pinch* – correntes concentradas

Corrente	T Entrada(°C)	T Saída (°C)	Vazão (T/h)	Vazão (kg/s)	M cp (kW / °C)	Q (kW)
F	20	35	421,2	117,0	489,294	7339,4
Q	45	30	421,2	117,0	489,294	-7339,4

Dessa forma, o trocador de calor utilizado para integração das correntes abaixo do *pinch* é apresentado na Tabela 36.

Tabela 36 – Trocador abaixo do *pinch* – correntes concentradas

TC	Correntes	Q _T (Kw)
TC1	F x Q	7339,4

Na prática, esse trocador de calor calculado ($Q_T = 7339,4$ kW) pode ser substituído por trocadores menores cuja soma das áreas de transferência de calor sejam igual à área necessária para transferir a quantidade Q_T calculada.

A escolha dos pares para realização das trocas térmicas acima e próximo ao *pinch* obedeceu as seguintes regras:

- **Acima do *pinch*:**

$$N_q \leq N_f$$

$$mCp|_q \leq mCp|_f$$

- **Troca térmica contracorrente:**

$$(T_{\text{entrada quente}} - T_{\text{saida fria}}) \geq \Delta T_{\text{min}}$$

$$(T_{\text{saida quente}} - T_{\text{entrada fria}}) \geq \Delta T_{\text{min}}$$

Para a síntese acima e afastada do *pinch* (problema remanescente) utilizou-se a regra heurística de Rudd, que indica que os pares para troca térmica sejam escolhidos preferencialmente da seguinte maneira: corrente quente com temperatura mais alta e corrente fria com temperatura mais alta, observando o ΔT_{min} definido.

As regras para troca térmica abaixo do *pinch* foram apresentadas no estudo de caso 1. Devido à simplificação realizada no estudo de caso 2 (mistura das correntes), essas regras não foram aplicadas do segundo estudo de caso.

III.5 - Resultados com método SCTMTC

O diagrama final proposto pela metodologia SCTMTC é apresentado na Figura 31, a seguir:

Figura 31 - Diagrama de utilização de água sugerido pela metodologia SCTMTC.

Definição do critério de avaliação econômica adotado.

Para comparação dos resultados obtidos pela metodologia SCTMTC com os resultados de Leewongwanawit *et al* (2004), é necessário calcular os custos de: água nova, utilidade quente (vapor) e trocadores de calor.

Existem diversas possibilidades para estimativa do custo econômico, cada uma delas adota diferentes parâmetros e hipóteses. Para uma correta comparação é necessário calcular os custos da rede obtida por ambos os trabalhos na mesma base econômica, dessa forma, aplicou-se a análise proposta por Stelling (2004) nos resultados da SCTMTC e de Leewongwanawit *et al* (2004).

Conforme proposto por Stelling (2004), o custo total de cada rede pode ser dividido em custo operacional e custo de investimento fixo. Entende-se por custo operacional o custo das seguintes utilidades: água nova, água de resfriamento (utilidade fria) e vapor de aquecimento (utilidade quente). O custo de investimento fixo é definido como o custo dos equipamentos de troca térmica anualizados.

Dessa forma:

$$CT = CO + CF \quad (11)$$

onde CT é o custo total, CO o custo operacional e CF o custo de investimento fixo.

Conforme explicado acima, o custo operacional é a soma do custo de água de processo (AP), água de resfriamento (AR) e vapor de aquecimento (VA).

$$CO = AP + AR + VA \quad (12)$$

Os seguintes parâmetros propostos no trabalho de Stelling (2004) são utilizados:

$$AP = \frac{US\$ 0,634}{1000 \text{ kg de água } 0 \text{ ppm}} \quad (13)$$

$$AR = \frac{US\$ 0,0159}{1000 \text{ kg de água de resfriamento}} \quad (14)$$

Para o cálculo de VA, utilizam-se os seguintes parâmetros:

$$\text{Vapor } 100 \text{ psig} = \frac{US\$ 2,00}{1000 \text{ lb vapor saturado}} \quad (15)$$

$$\text{Calor de evaporação (vapor } 100 \text{ psig)} = \frac{893,5 \text{ BTU}}{\text{lb vapor saturado}} \quad (16)$$

Dessa forma,

$$VA = \frac{US\$ 2,238 \times 10^6}{\text{BTU}} \quad (17)$$

O custo fixo é igual ao custo dos trocadores de calor (incluindo aquecedores e resfriadores). O custo desses equipamentos é diretamente proporcional à área de transferência de calor. Stelling (2004) define a seguinte relação:

$$CF = ETC \times A \quad (18)$$

onde A é a área de transferência de calor em m² e ETC o custo por unidade de área.

$$ETC = \frac{US\$ 322,92}{m^2} \quad (19)$$

A área é calculada através da seguinte equação:

$$A = \frac{Q_T}{U \cdot \Delta T_{ln}} \quad (20)$$

onde:

Q_T – Calor trocado, proveniente do balanço energético (W);

U – Coeficiente global de transferência de calor (W/m² °C) e

ΔT_{ln} – média logarítmica entre os diferenciais de temperatura nas extremidades do trocador de calor (°C).

A média logarítmica e o coeficiente global de transferência de calor, considerando trocadores em configuração contra-corrente e desprezando a resistência condutiva nas paredes dos tubos, são calculadas da seguinte forma (equação 21 e 22):

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(TEQ - TSF) - (TSQ - TEF)}{\ln\left(\frac{TEQ - TSF}{TSQ - TEF}\right)} \quad (21)$$

onde:

TEQ - Temperatura de entrada quente (°C);

TSQ - Temperatura de saída quente (°C);

TEF - Temperatura de entrada fria (°C) e

TSF - Temperatura de saída fria (°C).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_q} + \frac{1}{h_f}} \quad (22)$$

onde h_q e h_f são, respectivamente, os coeficientes de transferência de calor nas correntes quentes e frias. Nesse trabalho, foi assumido que todas as correntes líquidas e vapor possuem os seguintes valores fixos para esses coeficientes:

$$h(\text{água líquida}) = 800 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (23)$$

$$h(\text{vapor}) = 2000 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (24)$$

Finalmente, assume-se a temperatura de vapor saturado a 100 psig (utilidade quente) igual a 158,1°C e a temperatura da água de resfriamento (utilidade fria) igual a 20°C na entrada. Considera-se que a temperatura de saída da água de resfriamento é 10°C menor do que a temperatura de entrada da corrente a ser resfriada.

Para possibilitar a soma do custo de investimento fixo (CF) com os custos operacionais (CO), o primeiro deve ser anualizado. Admitindo-se o tempo de vida dos trocadores igual a 10 anos, depreciação de 100% do seu valor e taxa de investimento de 0% ao ano, temos que o valor obtido para CF deve ser dividido por 10 para anualização de seu valor.

$$CT = CO + \frac{CF}{10} \quad (25)$$

Área e custo dos trocadores de calor.

A seguir, na Tabela 37, são apresentados as áreas e os custos dos equipamentos de troca térmica definidos pela metodologia SCTMTC, da rede apresentada na Figura 31, e aqueles definidos por Leewongwanawit *et al* (2004), Tabela 38 e Tabela 39.

Tabela 37 – Custo dos trocadores de calor necessários para resolução do problema, metodologia SCTMTC.

Trocador	Correntes	TE fria (°C)	TE quente (°C)	TS fria (°C)	TS quente (°C)	Q _T (kW)	ΔT In (°C)	U (W/m ² °C)	Área (m ²)	Custo Final (US\$)
TC1	F x Q	20,00	45,00	35,00	30,00	7339,41	10,00	400,00	1834,85	\$ 592.510,57
TC2	F2(b) x Q5(b)	35,00	72,50	60,00	45,00	5227,50	11,20	400,00	1166,48	\$ 376.680,66
TC3	F4(b) x Q2(b1)	35,00	100,00	90,00	45,00	3952,00	10,00	400,00	988,00	\$ 319.044,96
TC4	F1(b) x Q2(b2)	35,00	50,44	40,00	45,00	418,20	10,22	400,00	102,32	\$ 33.041,40
TC5	F3(b) x Q4(b1)	35,00	55,00	45,00	45,00	627,30	10,00	400,00	156,83	\$ 50.641,93
TC6	F5(b) x Q3_4	35,00	48,96	38,05	45,00	76,40	10,45	400,00	18,28	\$ 5.901,72
TC7	Q2(b2) x F8	69,00	100,00	80,00	85,04	1150,10	17,95	400,00	160,19	\$ 51.728,86
TC8	Q2(b21) x F3(b)	45,00	85,04	75,00	50,44	1881,90	7,51	400,00	626,70	\$ 202.375,57
TC9	Q2(b22) x F9	50,00	85,04	63,48	72,50	563,60	22,03	400,00	63,96	\$ 20.653,56
TC10	Q2(b22) x F5(b1)	38,05	60,00	50,00	50,44	215,20	11,15	400,00	48,23	\$ 15.575,77
TC11	Q5(b1) x F6	60,00	80,00	70,00	72,50	878,22	11,20	400,00	195,97	\$ 63.282,35
TC12	Q5(b21) x F7	60,00	80,00	66,60	72,50	414,00	12,94	400,00	79,95	\$ 25.819,06
TC13	Q5(b21) x F9	63,48	80,00	70,08	72,50	276,01	9,47	400,00	72,90	\$ 23.539,29
TC14	F5 (b2) x UQ	38,05	158,13	50,00	158,13	84,77	114,00	571,43	1,30	\$ 420,20
TC15	F4_6 x UQ	80,00	158,13	100,00	158,13	3512,88	67,64	571,43	90,89	\$ 29.349,87
TC16	F7_9	67,99	158,13	80,00	158,13	1255,57	83,99	571,43	26,16	\$ 8.447,69
									TOTAL	5.633,02 \$ 1.819.013,47

Tabela 38 – Custo dos trocadores de calor, Leewongwanawit *et al*, rede 1.

Trocador	TE fria (°C)	TE quente (°C)	TS fria (°C)	TS quente (°C)	Q _T (kW)	ΔT In (°C)	U (W/m ² °C)	Área (m ²)	Custo Final (US\$)
TC1	20,00	50,00	40,00	30,00	9785,88	10,00	400,00	2446,47	\$ 790.014,09
TC2	40,00	70,00	60,00	50,00	7862,16	10,00	400,00	1965,54	\$ 634.712,18
TC3	60,00	86,10	74,60	70,00	2198,06	10,00	400,00	549,51	\$ 177.449,32
TC4	74,60	158,13	100,00	158,13	2252,00	70,06	571,43	56,25	\$ 18.163,70
TC5	74,30	158,13	100,00	158,13	2662,00	70,20	571,43	66,36	\$ 21.429,81
TC6	60,00	80,00	74,30	67,20	1486,50	6,42	400,00	578,78	\$ 186.899,89
TC7	60,00	100,00	78,82	79,95	1668,62	20,56	400,00	202,91	\$ 65.522,91
								TOTAL	5865,82 \$ 1.894.191,91

Tabela 39 - Custo dos trocadores de calor, Leewongwanawit *et al*, rede 2.

Trocador	TE fria (°C)	TE quente (°C)	TS fria (°C)	TS quente (°C)	Q _T (kW)	ΔT In (°C)	U (W/m ² °C)	Área (m ²)	Custo Final (US\$)
TC1	20,00	50,00	40,00	30,00	9869,52	10,00	400,00	2467,38	\$ 796.766,35
TC2	40,00	60,00	50,00	50,00	4098,36	10,00	400,00	1024,59	\$ 330.860,60
TC3	50,00	71,00	60,00	60,00	3805,62	10,49	400,00	906,79	\$ 292.819,28
TC4	60,00	85,00	75,00	71,00	2258,28	10,49	400,00	538,09	\$ 173.760,89
TC5	75,00	100,00	81,00	85,00	526,93	14,02	400,00	93,95	\$ 30.337,74
TC6	81,00	158,13	100,00	158,13	1668,62	67,18	571,43	43,46	\$ 14.035,62
TC7	40,00	158,13	50,00	158,13	669,12	113,06	571,43	10,36	\$ 3.344,58
TC8	70,19	158,13	100,00	158,13	2617,97	72,01	571,43	63,62	\$ 20.545,10
TC9	60,00	80,00	70,19	69,80	894,91	9,80	400,00	228,18	\$ 73.682,59
TC10	60,00	100,00	82,20	65,00	3156,57	10,08	400,00	782,83	\$ 252.791,65
								TOTAL	6159,25 \$ 1.988.944,41

Comparando resultados SCTMTC versus Leewongwanawit *et al*.

A seguir é apresentada Tabela 40 que compara os resultados obtidos pela metodologia SCTMTC e Leewongwanawit *et al* (2004).

Tabela 40 – Comparativo das redes sugeridas SCTMTC versus Leewongwanawit *et al*.

Parâmetro	Leewongwanawit Rede 1	Leewongwanawit Rede 2	SCTMTC
Água Nova (kg/s)	117	118	117
Água Nova (t/h)	421,2	424,8	421,2
Utilidade Quente (kW)	4914	4956	4853
Utilidade Fria (kW)	0	0	0
Trocadores de Calor	7	10	16
Área Trocadores de Calor (m ²)	5866	6159	5633
Custo Total Trocadores de Calor (\$)	\$ 1.894.191,91	\$ 1.988.944,41	\$ 1.819.013,47
Custo Trocadores de Calor (\$ / ano)	\$ 189.419,19	\$ 198.894,44	\$ 181.901,35
Custo Total (\$/ano)	\$ 2.857.416,80	\$ 2.889.695,45	\$ 2.845.818,38
Economia Comparativa	1,12%	0,00%	1,52%
Economia (\$/ano)	\$ 32.278,65	\$ 0,00	\$ 43.877,06

III.6 – Conclusões do estudo de caso 2.

O método proposto SCTMTC apresentou bons resultados na resolução do problema proposto com uma economia anual de utilidades interessante. Sua aplicação para problemas integrados de minimização de consumo de água e de troca térmica, para casos de apenas um contaminante novamente se mostrou válida e de simples execução.

Vale a pena ressaltar que informações mais detalhadas sobre o processo e as oito operações escolhidas seriam necessárias para uma análise mais profunda em relação ao aproveitamento da técnica por tipo de processo, operação e nível de utilidades (HP, LP, etc).

Nesse exemplo, a metodologia SCTMTC, baseada em regras heurísticas, termodinâmica e Tecnologia *Pinch*, foi comparada com um algoritmo computacional de otimização (MINLP) com obtenção de resultados melhores frente às hipóteses econômicas adotadas. É importante ressaltar que os índices econômicos escolhidos para estimativa de custo desempenham um papel muito importante na avaliação quantitativa das técnicas em análise. Além disso, os parâmetros escolhidos para os coeficientes de transferência de calor h_q e h_f também desempenham um papel importante já que influenciam diretamente no cálculo da área de transferência de calor.

Ao se analisar os dados finais apresentados na Tabela 40, percebe-se que a quantidade de água nova foi praticamente a mesma nas três redes finais. Não há necessidade de utilidade fria. A rede obtida pela SCTMTC apresenta um número maior de trocadores de calor, porém com um somatório total de área de transferência de calor menor. Mesmo como uma área total menor, a metodologia SCTMTC obteve a menor necessidade de utilidades quentes.

A utilização da técnica SCTMTC se mostrou mais uma vez aplicável em problemas similares ao estudado no caso 2. Os objetivos de redução do consumo de água nova e de síntese de rede de águas com máximo reuso foram atingidos, bem como a redução de utilidades de aquecimento e de resfriamento. Além da economia financeira anual, as alterações propostas da rede de águas e da rede de trocadores de calor contribuem para uma redução do impacto ambiental.

Além disso, durante o estudo de caso 2, foi demonstrado que a técnica SCTMTC é sensível a decisões heurísticas adotadas como, por exemplo, mistura ou não das correntes de efluentes antes da síntese da rede de trocadores de calor. Essas decisões durante o projeto das redes devem ser analisadas para evitar a obtenção de redes com economia global menor. Ao contrário de técnicas computacionais que se propõe a encontrar o mínimo global, a metodologia SCTMTC depende das regras heurísticas mapeadas e da experiência dos engenheiros de processo de cada unidade operacional.

CAPÍTULO IV - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

IV.1 – Conclusões

A metodologia SCTMTC em desenvolvimento no GIPQ/EQ foi aplicada em dois estudos de caso distintos para comparação dos resultados obtidos com aqueles apresentados por outros autores. A técnica alcançou resultados promissores nos dois estudos, superando de acordo com os critérios de avaliação adotados os resultados de Manan *et al* (2009) e Leewonkwanawit *et al* (2004).

A dissertação teve como um de seus objetivos contribuir para o desenvolvimento da SCTMTC, além de propor algumas alterações como:

- A avaliação do impacto da mistura de correntes durante a etapa de análise energética para possibilitar a obtenção de melhores resultados sem a necessidade de testar todos os modelos de rede exaustivamente.
- A possibilidade de misturas não isotérmicas entre as correntes para redução do número de equipamentos de troca térmica, bem como a redução da quantidade de utilidades fria e quente necessárias.

Além disso, a avaliação da metodologia em problemas reais, como foi o caso do primeiro estudo de caso: *MNI – Malaysian Newsprint Industry*, possibilita o aumento da credibilidade do SCTMTC frente ao setor industrial.

Os resultados obtidos nos dois estudos de caso permitem destacar a eficácia do método e suas vantagens, principalmente, a simplicidade e a adaptabilidade quando confrontada com técnicas baseadas em algoritmos computacionais do tipo MINLP, por exemplo. Essas características possibilitam sua aplicação nas indústrias de processo pelos próprios engenheiros de processo. As metodologias computacionais, por outro lado, possuem uma maior complexidade com uma maior curva de aprendizado, maior esforço para sua aplicação, exigindo muitas vezes um grande esforço de convergência do algoritmo.

IV.2 – Sugestões e comentários finais

Como sugestão para trabalhos futuros, a metodologia pode ser utilizada em casos complexos multi-contaminantes e suscetíveis a incertezas nos parâmetros obtidos nos levantamentos de campo. Essas incertezas podem alterar a localização do ponto de *pinch* e as quantidades de utilidades quente e fria necessárias. Além disso, o conceito de exergia, que se relaciona com o trabalho útil disponível nas correntes de processo, poderia ser incluído na metodologia. A exergia aliada ao parâmetro carga térmica, Q (kW), da corrente pode possibilitar melhores escolhas sobre as correntes para troca de calor.

Por último, mas não menos importante, é necessário adaptar os critérios de avaliação da metodologia SCTMTC às novas políticas de desenvolvimento sustentável.

Nem sempre as melhores decisões de processo podem ser identificadas apenas sob a ótica econômica e de retorno de investimento. Recentemente, um grupo de especialistas ambientais, todos laureados com o prêmio *Blue Planet Prize*, apresentaram o documento (Brundtland *et al*, 2012) “Desafios ambientais e desenvolvimento: o imperativo para agir” que recomenda, entre outras coisas, a substituição do conceito de PIB como único índice de avaliação de riqueza das nações. A sustentabilidade, a biodiversidade e o meio ambiente são formas de riqueza que precisam ser mensuradas e incluídas nos índices de avaliação de resultados, primeiramente, na esfera nacional e, conseqüentemente, no âmbito industrial. Por exemplo, a economia de água nova e de vapor não pode ser avaliada apenas pela economia financeira que possibilita ao processo. Também devem ser considerados nas avaliações realizadas os impactos positivos gerados ao meio ambiente e a redução de potenciais riscos futuros com a menor poluição e o menor gasto energético.

Estima-se que os custos ambientais não computados pelas empresas já chegam a US\$ 846 bilhões (KPMG *International*, 2012). Esse cálculo leva em consideração os principais impactos ambientais como: emissão de gases de efeito estufa, geração de resíduos e utilização de água nova. A mudança de paradigma é urgente e as empresas correm riscos financeiros por não incluírem esses custos em seus orçamentos. Vale a máxima: “Se você não sabe que o problema existe, não pode resolvê-lo”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bagajewicz, M.J., Manousiouthakis, V., On the mass/heat exchanger network representations of distillation networks, *A.I.Ch.E. Journal*, 38, pg. 1769, 1992.

Bagajewicz, M., Pham, R., Manousiouthakis, V., On the state space approach to mass/heat exchanger network design, *Chemical Engineering Science*, 53, pg. 2595—2621, 1998.

Bagajewicz, M., A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants, *Computers & Chemical Engineering*, 24, pg. 2093-2113, 2000.

Bagajewicz, M.J., Rodera, H., Savelski, M.J., Energy efficient water utilization systems in process plants, *Computer & Chemical Engineering* 26, pg. 59—79, 2002.

Boix, M., Pibouleau, L., Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., Domenech, S., Minimizing water and energy consumptions in water and heat exchange networks, *Applied Thermal Engineering*, 36, pg. 442-455, 2012.

Chew, I.M.L., Foo, D.C.Y., Lam, H.L., Bonhivers, J.C., Stuart, P., Savulescu, L.E., Alva-Argaez, A., Simultaneous water and energy optimization for a pulp and paper mill, *Chemical Engineering Transactions*, 25, pg. 441-446, 2011.

Delgado, B.E.P.C., Síntese de Sistemas de Regeneração e Tratamento Final de Efluentes, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação Stricto-Sensu: Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, EQ / UFRJ, 2008.

Dong, H.G, Lin, C.Y., Chang, C.T., Simultaneous optimization approach for integrated water-allocation and heat-exchange networks, *Chemical Engineering Science*, 63, pg. 3664-3778, 2008.

Edgar, T.F., Huang, Y.L., Simultaneous recovery of waste chemicals and energy in oil refinery, ACS Special Symposium on Emerging Technologies for hazardous waste management, Book of Extend Abstracts (Edited by D.W. Tedder), Atlanta, Sept 27-29, 1993.

Federal Environment Agency - Germany, Sustainable and rational use of water and energy - examples from Germany, 2012, Exhibitions from the Umweltbundesamt, <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-e/wah20-e/1-2.htm>

Gomes, J.F.S., Queiroz, E.M. and Pessoa, F.L.P., 2007, Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant. *Journal of Cleaner Production*, 15: 474–485.

Gomes, J.F.S., Procedimento para minimização de efluentes aquosos. Tese de mestrado. EQ/ UFRJ, 2002.

Gro Harlem Brundtland, Paul Ehrlich, Jose Goldemberg, James Hansen, Amory Lovins, Gene Likens, James Lovelock, Suki Manabe, Bob May, Hal Mooney, Karl-Henrik Robert, Emil Salim, Gordon Sato, Susan Solomon, Nicholas Stern, MS Swaminathan, Bob Watson, Barefoot College, Conservation International, International Institute of Environment and Development, and International Union for the Conservation of Nature, Environment and Development Challenges: The Imperative to Act, 12ª Reunião Especial do Conselho de Administração do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) e do Fórum Global de Ministros do Meio Ambiente, em Nairóbi, no Quênia, 20 de Fevereiro 2012.

Hahn, A. A., Waltz, F.M.S., Ribeiro, R.T.S, Machado, R.B.P., Eficiência energética e gestão energética – uma nova abordagem, 2009, Revista Controle e Instrumentação, edição 146.

Higa, C.M., Delgado, B.E.P.C., Queiroz, E.M., Pessoa, F. L. P., 2007, Minimização do consumo de água: o caso de uma refinaria de petróleo. 4º PDPETRO, Campinas, SP, 21-24 de Outubro de 2007.

Jacobson, M.Z., Delucchi, M.A., A path to sustainable energy by 2030, Scientific America, November 2009, 58-65.

KPMG, Expect the Unexpected: Building business value in a changing world, Publication number: 111274, KPMG International, Fevereiro 2012.

Leewonkwanawit, B.; Kim, J.K.; Smith, R., Design and optimisation of combined water and energy systems. European Symposium on Computer-Aided Process Engineering, 14, pg. 439-444, 2004.

Liporace, F.S., Síntese de redes de trocadores de calor afastadas do ponto de estrangulamento energético, Tese de Mestrado, EQ/ UFRJ, 1996.

Malaysia Newsprint Industry, <http://www.newsprint.com.my/mill.html>, site da Malaysia Newsprint Industry (MNI), 2011.

Manan, Z.A., Tea, S.Y. and Alwi, S.R.W., 2009, A new technique for simultaneous water and energy minimisation in process plant. Chemical Engineering Research and Design, Volume 87, Issue 11, Pages 1509–1519.

Módenes, A.N., Utilização da análise *pinch* na redução de emissões de poluentes. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

Módenes, A.N., Menon, R., Ravagnani, M.A.S.S., Redução da emissão de poluentes líquidos por reutilização de água em processos industriais, Acta Scientiarum. Technology Maringá, v. 25, n.º. 2, p. 127-132, 2003.

Organization for Economic Cooperation and Development, International National Agency, World Energy Outlook, 2010 and 2011.

Queiroz, E.M., Ahón, V.R.R., Costa, A.L.H., Incertezas na síntese de rede de trocadores de calor: estudo de caso, 4ºPDPETRO, Campinas, SP, Outubro 2007.

Savulescu, L., Simultaneous energy and water minimisations. PhD. *Thesis*, Department of Process Integration, UMIST, Manchester U.K, 1999.

Statistics Canada, special tabulation, unpublished data, Annual Survey of Manufactures, 1998 to 2003; Annual Survey of Manufactures and Logging, 2004 to 2007.

Stelling, R.J., 2004, Síntese combinada de redes de equipamentos de transferência de massa e de trocadores de calor. Tese de Mestrado, UFRJ/EQ.

United Nations Population Division, World Population Prospects: The 2008 Revision – Population Database, <http://esa.un.org/unpp/>, 2008.

Yergin, Daniel, 2011, The quest: energy, security and the remaking of the modern world, The Penguin Press, Published by the Penguin Group, capítulo 9, 189-193.

Yergin, Daniel, 2011, The quest: energy, security and the remaking of the modern world, The Penguin Press, Published by the Penguin Group, capítulo 27, 524-526.

Zheng, X.S., Feng, X. and Cao, D.L., 2003, Design water allocation network with minimum freshwater and energy consumption. *Computer Aided Chemical Engineering*, 15: 388–393.