



**Bruno Cardoso
Lamas**

**Optimização de aproveitamento de condensados em
sistemas energéticos**



**Bruno Cardoso
Lamas**

**Optimização de aproveitamento de condensados em
sistemas energéticos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Dr. Nelson Martins, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho à minha família e namorada pelo incansável apoio.

o júri

presidente

Prof. Dr. Fernando José Neto da Silva

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Nelson Amadeu Dias Martins

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Manuel Arlindo Amador de Matos

professor auxiliar Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Nelson Martins e Eng. Hugo Calisto pelo incansável apoio na realização deste trabalho, pela ajuda na compreensão da metodologia e no tratamento de dados.

Agradeço também à minha namorada, Joana Marques, pelo apoio fornecido ao longo do trabalho.

O meu grande agradecimento à empresa Galp Energia pelo estágio proporcionado que permitiu a elaboração deste tema.

Agradeço ainda a todos os colaboradores da empresa em estudo, nomeadamente Eng. Vítor Catarino e Sr. Antero pela ajuda prestada na obtenção de dados relevantes para este trabalho.

palavras-chave

Pinch, integração de processo, termoeconómica, processo termodinâmico, sistemas térmicos, vapor, permutadores.

resumo

Nos últimos anos tem-se assistido a um aumento do consumo de energia devido ao desenvolvimento socioeconómico dos países e ao aumento da população global. De forma a auxiliar o aumento do consumo de energia têm-se desenvolvido técnicas de análise com o objetivo principal de otimizar os consumos energéticos nos processos produtivos.

Inicialmente dois métodos de análise e optimização de redes térmicas são analisadas e comparadas. Estas análises, *Pinch* e Termoeconómica, revelaram grandes potencialidades na obtenção de melhorias, sendo a *pinch* a metodologia seleccionada para implementação no caso de estudo, por se tratar de uma área com alguma carência de especialistas e de implementação sistemática, o que facilita na busca por melhorias.

Neste trabalho é realizada uma análise de eficiência energética a uma rede de fluidos térmicos real através da tecnologia *pinch*. Este tipo de análise permite a definição de metas que motivam o projectista na pesquisa por melhores soluções de recuperação de energia entre as correntes de processo.

As metas inicialmente calculadas pela tecnologia *pinch* são ultrapassadas devido ao máximo aproveitamento dos permutadores existentes que permitem o aumento da temperatura de uma determinada corrente para além do seu ponto *pinch*.

Com a implementação desta metodologia foi possível a obtenção de duas situações de melhoria que revelam o potencial deste tipo de análise ao se constatar que não existe apenas uma situação óptima, podendo optar-se por propostas com melhores resultados a nível energético ou económico.

No caso de estudo foi possível obter reduções na ordem de 1010 kg/h de vapor o que implica uma redução 17% do consumo anual de vapor. A redução na factura energética anual é de aproximadamente 98.000,00. Para a obtenção destas reduções é necessária a aquisição de permutadores de calor com tempo de retorno de investimento entre 2 e 3 meses o que torna as duas situações muito atractivas.

Nas duas situações propostas obteve-se reduções de cerca de 8% do consumo específico da instalação em estudo podendo esta cumprir os novos planos de racionalização (SGCIE) e obter os benefícios fiscais conseguidos pelo cumprimento destes.

keywords

Pinch, process integration, thermoeconomic, thermodynamic process, thermal system, steam, heat exchangers.

abstract

In recent years an increase of the energy consumption was verified, this is caused by the socio-economic development of the countries and the increase of global population. In order to assist the increase of energy consumption, techniques were developed to optimize the consumptions in productive processes.

Initially two methods of analysis and optimization of thermal systems were analyzed and compared. These analyzes, Pinch and Thermoeconomic had disclosed great potentialities in the attainment of improvements, Pinch methodology was the selected one to implement in the study case, it was chosen because it's an area with a lack of specialists and the possibility of systematic implementation.

In this work is made an analysis of energetic efficiency to a real thermal fluid net through the Pinch technology. This type of analysis allows the definition of targets that motivate the developer in the research for better solutions of energy recovery in process chains.

The initially calculated energy targets by pinch technology were exceeded because of the maximum exploitation of the existing exchangers that allow the increase of temperature in a current beyond its point pinch

By implementing this methodology it was possible to obtain two improvement situations, what reveal the potential of Pinch analysis, being possible to find several proposals of performing with great results at energetic or economic level.

In study case it was achieved reductions in the order of 1010kg/h of steam, which implies a 17% reduction in the annual consumption. The reduction in annual energy bill is approximately € 98,000.00. To obtain these reductions, the company must acquire heat exchangers, which the return of investment is between 2 and 3 months, that makes the proposes very attractive.

In this two proposals situations, one obtained reductions close to 8% of the specific consumption of installation in study being able to fulfill the new plans of rationalization (SGCIE) and obtaining tax benefits by the fulfilment of these.



Índice

Índice de Tabelas.....	xix
Índice de Figuras.....	xxi
Lista de Símbolos.....	xxiii
Lista de Acrónimos.....	xxiv
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Organização da Tese.....	2
1.4 Contribuição da Tese.....	3
1.5 Síntese do Capítulo.....	3
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Sumário.....	5
2.2 Métodos de Optimização de sistemas Térmicos.....	5
2.2.1 Princípios da Termodinâmica.....	5
2.3 Tecnologia <i>pinch</i>	6
2.4 Análise Termoeconómica.....	9
2.5 Metodologia Seleccionada.....	10
2.6 Síntese do Capítulo.....	10
3 Metodologia <i>Pinch</i>	13
3.1 Sumário.....	13
3.2 Passos da análise <i>pinch</i>	13
3.3 Identificação das Correntes e das Utilidades.....	13
3.4 Extracção dos dados térmicos para o processo e sistemas úteis.....	14
3.4.1 Regras para a extracção de dados.....	16
3.4.2 Processos isotérmicos.....	18
3.5 Selecção da variação de temperatura mínima.....	20
3.6 Construção da Curva composta e da Grande curva Composta.....	22
3.6.1 Curva composta.....	22
3.6.2 Grande curva composta.....	29
3.7 Síntese da Rede.....	33
3.8 Projecto da Rede de Permutadores de Calor.....	34

3.8.1	Sistemas energéticos Novos.....	34
3.8.2	Modificação de Sistemas Energéticos Existentes	38
3.9	Síntese do Capítulo	39
4	Caso de Estudo	41
4.1	Sumário	41
4.2	Identificação das Correntes e das Utilidades	41
4.2.1	Correntes Frias	41
4.2.2	Correntes Quentes	42
4.2.3	Utilidades	43
4.3	Extracção dos dados	44
4.4	Seleccção da temperatura mínima óptima	45
4.5	Metas Energéticas.....	47
4.6	Síntese da rede	51
4.7	Projecto da rede de permutadores de calor.....	52
4.7.1	Solução proposta 1	53
4.7.2	Situação proposta 2.....	54
4.8	Simulação das soluções encontradas	55
4.8.1	Situação proposta 1.....	56
4.8.2	Situação proposta 2.....	57
4.9	Síntese do Capítulo	59
5	Discussão de Resultados.....	61
5.1	Sumário	61
5.2	Análise Energética	61
5.3	Análise Económica	65
5.4	Síntese do Capítulo	69
6	Conclusões	71
6.1	Sumário	71
6.2	Conclusões gerais.....	71
6.3	Trabalhos futuros.....	72
6.4	Síntese do Capítulo	73
	Referências	75
7	Anexos.....	77
7.1	Anexo A	77



7.1.1	Rede de fluidos térmicos actual	77
7.1.2	Rede de fluidos térmicos proposta 1	83
7.1.3	Rede de fluidos térmicos proposta 2	87
7.2	Anexo B.....	91
7.3	Anexo C.....	94
7.4	Anexo D	95



Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Dados das correntes frias do problema exemplo.(2; 7).....	16
Tabela 3.2: Dados das correntes quentes do problema exemplo.(2; 7).....	16
Tabela 3.3: Divisão das correntes frias em intervalos de entalpia.....	24
Tabela 3.4: <i>Problem Table</i> para as correntes frias do problema exemplo.....	24
Tabela 3.5: <i>Problem Table</i> para as correntes quentes do problema exemplo.....	25
Tabela 3.6: Deslocação horizontal da curva composta quente.....	27
Tabela 3.7: Deslocação horizontal da curva composta fria.....	27
Tabela 3.8: Dados para a construção da grande curva composta do problema exemplo.....	30
Tabela 3.9: <i>Problem Table</i> para a construção da grande curva composta do problema exemplo..	30
Tabela 3.10: Necessidades mínimas de utilidades quentes e frias obtidas pela CC e GCC.....	31
Tabela 4.1: Identificação das correntes frias do caso de estudo.....	42
Tabela 4.2: Identificação das correntes quentes do caso de estudo.....	43
Tabela 4.3: Identificação das utilidades do caso de estudo.....	43
Tabela 4.4: Extracção dos dados para as correntes frias do caso de estudo.....	44
Tabela 4.5: Extracção dos dados para as correntes quentes do caso de estudo.....	44
Tabela 4.6: Capacidade calorífica e entalpia das correntes frias do caso de estudo.....	44
Tabela 4.7: Capacidade calorífica e entalpia das correntes quentes do caso de estudo.....	45
Tabela 4.8: <i>Problem Table</i> para as correntes frias do caso de estudo.....	47
Tabela 4.9: <i>Problem Table</i> para as correntes quentes do caso de estudo.....	48
Tabela 4.10: Deslocamento horizontal da curva composta fria do caso de estudo.....	49
Tabela 4.11: <i>Problem Table</i> para a grande curva composta do caso de estudo.....	50
Tabela 4.12: Verificação das utilidades mínimas necessárias do caso de estudo.....	51
Tabela 4.13: Somatório dos recursos na situação proposta 1.....	57
Tabela 4.14: Eficiência da integração energética para a situação proposta 1.....	57
Tabela 4.15: Somatório dos recursos na situação proposta 2.....	58
Tabela 4.16: Eficiência da integração energética para a situação proposta 2.....	58
Tabela 5.1: Capacidade de produção de água desarejada por kg de vapor consumido associado a cada processo.....	61
Tabela 5.2: Consumo mássico de vapor nos processos de extrusão durante o ano de referência.	62
Tabela 5.3: Comparação do consumo de vapor anual no desgasificador para a situação actual e situações propostas.....	62
Tabela 5.4: Comparação do consumo de vapor no aquecimento dos fluxos de ar ente situação actual e situações propostas.....	63
Tabela 5.5: Redução anual de vapor e fuelóleo para a proposta 1.....	64
Tabela 5.6: Redução anual de vapor e fuelóleo para a proposta 2.....	64
Tabela 5.7: Redução do consumo específico da indústria com a aplicação das medidas propostas.....	64
Tabela 5.8: Comparação do consumo de vapor para vários períodos de tempo.....	64
Tabela 5.9: Comparação do consumo de vapor para vários períodos de tempo.....	65
Tabela 5.10: Custo económico para as situações actual e proposta 1 com respectiva diferença para os vários períodos de tempo.....	66

Tabela 5.11: Custo económico para as situações actual e proposta 2 com respectiva diferença para os vários períodos de tempo.	66
Tabela 5.12: Fluxo de caixa acumulado para o primeiro ano do projecto para as duas propostas.	68
Tabela 5.13: Comparação do ROI, VAL e TIR para as situações propostas.	69
Tabela 7.1: Dados Relevantes dos pontos representados no <i>layout</i> (Figura 7.1) do caso de estudo.	77
Tabela 7.2: Características da permuta vapor-ar dos peixes para a situação actual.	78
Tabela 7.3: Características da permuta vapor-ar dos <i>pet</i> para a situação actual.	79
Tabela 7.4: Características da permuta condensados-ar dos <i>pet</i> para a situação actual.	79
Tabela 7.5: Dados Relevantes dos pontos representados no <i>layout</i> proposto 1 (Figura 7.4) do caso de estudo.	83
Tabela 7.6: Características da permuta vapor-ar dos peixes para a situação actual.	84
Tabela 7.7: Características da permuta vapor-ar dos <i>pet</i> para a situação actual.	85
Tabela 7.8: Dados Relevantes dos pontos representados no <i>layout</i> proposto 2 (Figura 7.6) do caso de estudo.	87
Tabela 7.9: Características da permuta vapor-ar dos peixes para a situação actual.	88
Tabela 7.10: Características da permuta vapor-ar dos <i>pet</i> para a situação actual.	89
Tabela 7.11: Variação do custo total e ΔT_{\min} para os diferentes custos fixos definidos.	91
Tabela 7.12: Variação do custo total e ΔT_{\min} para os diferentes coeficientes de transferência de calor definidos.	92



Índice de Figuras

Figura 3.1: Diagrama representativo das etapas para a otimização utilizando modelos que permitem a simulação das soluções.(5)	15
Figura 3.2: Representação de <i>safe-side linearisation</i> . (2)	17
Figura 3.3: Calor sensível para uma corrente fria.....	19
Figura 3.4: Calor latente para uma corrente fria.....	19
Figura 3.5: Representação do calor sensível e latente do processo de formação de vapor.	20
Figura 3.6: Custo energético, permutador e total com a variação de ΔT_{min}	21
Figura 3.7: Diagrama de temperatura entalpia para uma corrente fria, CS1.	23
Figura 3.8: Diagrama de temperatura entalpia para uma corrente fria, CS2.	23
Figura 3.9: Demonstração do processo de construção de curvas compostas para múltiplas correntes.	24
Figura 3.10: Curva Composta Fria do problema exemplo.	25
Figura 3.11: Curva Composta Quente do problema exemplo.	26
Figura 3.12: Localização do ponto <i>pinch</i> para o problema exemplo.	26
Figura 3.13: Curva Composta do problema exemplo.	28
Figura 3.14: <i>Curva composta deslocadas</i>	29
Figura 3.15: Grande Curva Composta do problema exemplo.	31
Figura 3.16: Grande curva composta para uma utilidade quente (exemplo).....	32
Figura 3.17: Grande curva composta para várias utilidades quentes (exemplo).....	33
Figura 3.18: Diagrama grande do problema exemplo.	35
Figura 3.19: Diagrama Grade acima do <i>pinch</i> para o problema exemplo.	35
Figura 3.20: Representação da permuta entre HS1 e CS1 imediatamente acima do ponto <i>pinch</i> . ..	36
Figura 3.21: Representação da permuta entre HS1 e CS2 imediatamente acima do ponto <i>pinch</i> . ..	37
Figura 3.22: Diagrama Grade abaixo do <i>pinch</i> para o problema exemplo.....	37
Figura 3.23: Diagrama Grade para o problema exemplo.	38
Figura 4.1: Variação do custo com a variação do ΔT_{min}	46
Figura 4.2: Curva composta fria do caso de estudo.	47
Figura 4.3: Curva composta quente do caso de estudo.	48
Figura 4.4: Curva composta quente e fria do caso de estudo.	48
Figura 4.5: Curva composta quente e fria deslocadas até ponto <i>pinch</i> igual a 23°C.	49
Figura 4.6: <i>Curva composta deslocadas</i> do caso de estudo.	50
Figura 4.7: Grande curva composta do caso de estudo.	51
Figura 4.8: Diagrama grade acima do ponto <i>pinch</i> do caso de estudo.....	52
Figura 4.9: Diagrama grade abaixo do ponto <i>pinch</i> para a situação proposta 1.	53
Figura 4.10: Diagrama grade da proposta 1.	54
Figura 4.11: Diagrama grade abaixo do ponto <i>pinch</i> para a situação proposta 2.	55
Figura 4.12: Diagrama grade final para a situação proposta 1 do caso de estudo.	56
Figura 4.13: Diagrama grade final para a situação proposta 2 do caso de estudo.	58
Figura 5.1: Redução do consumo específico durante o período de racionalização de energia previsto no SGCIE.....	65
Figura 5.2: Fluxo de caixa para 6 anos para ambas as situações.	67

Figura 5.3: Fluxo de caixa para os primeiros 12 meses do projecto para as duas situações propostas.	68
Figura 7.1: <i>Layout</i> da rede de fluidos térmicos actual do caso de estudo.	77
Figura 7.2: Diagrama representativo de um permutador.	78
Figura 7.3: Representação do sistema de aproveitamento de condensados actual e respectiva capacidade dos permutadores no aquecimento do ar dos alimentos compostos para <i>pet</i>	81
Figura 7.4: <i>Layout</i> da rede de fluidos térmicos proposta 1 do caso de estudo.	83
Figura 7.5: Diagrama representativo de um permutador.	84
Figura 7.6: <i>Layout</i> da rede de fluidos térmicos proposta 2 do caso de estudo.	87
Figura 7.7: Diagrama representativo de um permutador.	88
Figura 7.8: Variação do custo total para diferentes custos fixos de permutadores tubulares laminados.	91
Figura 7.9: Variação do custo total para diferentes coeficientes de transferência de calor de permutadores tubulares laminados.	92
Figura 7.10: Custo energético, área do permutador e total com a variação de ΔT_{\min} para um permutador de placas.	94



Lista de Símbolos

Escalares

A	Área (m ²)
CP	Capacidade calorífica (kW/°C)
cp	Capacidade calorífica específica (kJ/(kg °C))
H	Entalpia (kW)
h	Entalpia específica (kJ/kg)
m	Massa (kg)
\dot{m}	Caudal (kg/s)
n	Número
N	Número de permutadores
Q	Calor (kWh)
Q _c	Utilidade Fria (kWh)
Q _h	Utilidade Quente (kWh)
T	Temperatura (°C)
U	Energia interna (kWh)
W	Trabalho (kWh)

Letras Gregas

Δ	Variação
Σ	Somatório
η	Eficiência
\varnothing	Diâmetro

Subscritos

<i>cold</i>	Frio
<i>fg</i>	Evaporação
<i>hot</i>	Quente
<i>lm</i>	Média logaritmica
<i>min</i>	Mínima
<i>s</i>	Inicial (<i>Supply</i>)

<i>shifted</i>	Deslocada
t	Final (<i>Target</i>)
th	Térmico
u	Utilidade

Lista de Acrónimos

AP	Acima do <i>pinch</i>
BP	Abaixo do <i>pinch</i>
CC	Curva composta
CF	Custo fixo
CS	Corrente fria (<i>Cold stream</i>)
CV	Custo variável
GCC	Grande curva composta
HS	Corrente Quente (<i>Hot Stream</i>)
ICI	Grupo ICI
ID	Identificação
IVA	Imposto sobre o valor acrescentado
kgep	Quilograma equivalente de petróleo
NBR-SI	Borracha de nitrilo
PCI	Poder calorífico inferior
Pet	Fábrica de alimentos compostos para animais de companhia
ROI	Tempo de retorno de investimento (Return of investment)
SGCIE	Sistema de gestão dos consumos intensivos de energia
TCE	Teoria do custo exergético (<i>Exergy cost theory</i>)
tep	Toneladas equivalentes de petróleo
TFA	Análise funcional termoeconómica (<i>Thermoeconomic functional analysis</i>)
TIR	Taxa interna de retorno
UMIST	<i>School of Chemical Engineering and Analytical Sciences of Manchester University</i>
VAL	Valor actual líquido



1 Introdução

Nos últimos anos tem se assistido a um aumento do consumo de energia devido ao desenvolvimento socioeconómico dos países e ao aumento da população global. A fonte primária de energia mundial é fundamentada na utilização de fontes não renováveis, tal como o petróleo. Evidências científicas indicam que a geração de energia a partir da queima deste tipo de combustíveis ocasiona graves consequências ao meio ambiente como o aumento do efeito de estufa e inversões térmicas. Actualmente as redes de fluidos térmicos nas indústrias, tal como as redes de vapor, utilizam muitas vezes estes combustíveis como fonte de energia primária.

É também importante destacar a tendência para acordos internacionais para a redução de emissões de agentes poluidores, como o Protocolo de Quioto em 1997 e o tratado ambiental que irá decorrer em Dezembro deste ano em Copenhaga. Este tipo de conferências internacionais são uma demonstração de como o mundo inicia a tentativa de uma união para o aumento da sua eficiência energética.

As formas de produção de energia térmica para processos industriais variam entre caldeiras, bombas de calor, fornos e até sistemas de cogeração. O correcto recurso às utilidades disponíveis e a recuperação de energia em excesso entre correntes de processo são factores importantes na redução dos consumos energéticos e consequentemente na redução das emissões de gases de efeito estufa.

As análises *pinch* e termoeconómica são análises utilizadas em optimizações de redes térmicas indústrias, principalmente em indústrias de transformação de energia tal como termoeléctricas.

1.1 Enquadramento

O vapor é um dos vectores energéticos mais utilizados nas indústrias que utilizam energia térmica. Para transformar a água em vapor é necessário muita energia, contudo, esta não se perde, sendo transportada pelo vapor até ser libertada quando condensa ao contactar com uma superfície mais fria. Trata-se de um meio de transporte de calor extremamente moderno e eficiente, onde a pressão e temperatura são facilmente controladas, sendo por isso o meio de transporte de energia favorito da indústria mundial.

A escassez de fontes não renováveis e a incerteza do preço do petróleo leva os governos e as indústrias a optarem por políticas de racionalização de energia de forma a aumentar as eficiências energéticas, e a diminuir as emissões de gases efeito estufa.

De forma a auxiliar o aumento do consumo de energia a curto prazo, têm-se desenvolvido técnicas baseadas no primeiro e segundo princípio da termodinâmica com o objectivo de utilização mais eficiente dos recursos energéticos disponíveis.

Nas indústrias, a energia é o segundo maior custo logo a seguir às matérias-primas. A área da eficiência energética é cada vez mais importante neste sector. Este trabalho enquadra-se na área da eficiência energética de redes de fluidos térmicos industriais, utilizando técnicas baseadas nos princípios termodinâmicos referidos no parágrafo anterior, demonstrando a versatilidade na aplicação nas redes de fluidos térmicos.

1.2 Objectivos

A proposta deste trabalho é a realização de uma análise de eficiência energética do aproveitamento de condensados da rede de vapor de uma indústria e a sua optimização através da tecnologia *pinch*. A escolha deste método teve como motivação a própria relevância do mesmo, reforçada pela incerteza relativa ao preço do petróleo e a carência de especialistas no assunto.

É também objectivo, demonstrar que análises utilizadas maioritariamente em indústrias conversoras de energia, podem também ser implementadas no mais variado tipo de indústrias.

1.3 Organização da Tese

Neste trabalho é realizado um estudo de caso a uma indústria que consome energia térmica, nomeadamente vapor. Para a análise de eficiência energética desta indústria realizou-se inicialmente uma revisão de métodos de optimização de sistemas térmicos. Esta revisão é apresentada no Capítulo 2, onde é realizada um breve descrição dos métodos e principais trabalhos sobre o assunto, descrevendo de forma cronológica os desenvolvimentos mais importantes de cada um. Neste Capítulo é ainda divulgado qual a metodologia seleccionada.

No Capítulo 3 é descrito o processo de implementação da metodologia seleccionada em redes de fluidos térmicos industriais.



O Capítulo 4 contém a análise de eficiência energética ao caso de estudo utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 3. Esta metodologia permite o diagnóstico de oportunidades de melhoria através do reprojecto do sistema energético existentes.

No Capítulo 5 é realizada a discussão de resultados obtidos no caso de estudo. Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros

1.4 Contribuição da Tese

A nova legislação sobre eficiência energética na indústria em Portugal relançou metas mais ambiciosas para a racionalização de energia. Estas metas têm como objectivo principal a redução da intensidade energética nacional. Para as indústrias, o aumento da eficiência energética é um factor relevante para fazer cumprir os novos compromissos impostos pela nova política de racionalização energética.

Este trabalho demonstra que técnicas de optimização de sistemas térmicos maioritariamente utilizadas na optimização de centrais térmicas podem ser implementadas nos mais variados tipos indústrias, contribuindo na maior parte das vezes de uma forma eficaz para o aumento significativo da eficiência energética.

1.5 Síntese do Capítulo

Neste Capítulo foi apresentado uma breve situação da energia no mundo e as implicações do seu consumo intensivo. Assistimos actualmente a uma carência de especialistas nos temas que serão aqui estudados o que torna a divulgação e aprendizagem deste tipo de técnicas muito importantes.

Esta tese enquadra-se no aumento de eficiência energética de redes de fluidos térmicos sendo o caso de estudo uma indústria consumidora de vapor.



2 Revisão Bibliográfica

2.1 Sumário

De entre as metodologias utilizadas para a análise de eficiência energética e optimização de redes de fluidos térmicos destacam-se a análise *pinch* e a termoeconómica. Neste Capítulo faz-se uma breve revisão bibliográfica destes temas e os seus principais desenvolvimentos.

2.2 Métodos de Optimização de sistemas Térmicos

Como referido anteriormente, as metodologias de optimização de sistemas térmicos seleccionadas neste trabalho são a tecnologia *pinch* e a termoeconómica. (1; 2)

2.2.1 Princípios da Termodinâmica

A termodinâmica permite determinar a direcção na qual vários processos químicos ou físicos irão ocorrer.

2.2.1.1 O Primeiro Princípio

“Numa transformação elementar, em que a interacção com o exterior se resume a trocas de calor e trabalho, a variação de energia interna é igual à soma algébrica do trabalho e calor elementares postos em jogo nesta transformação.” (3)

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \quad (2.1)$$

O primeiro princípio da termodinâmica providência a equação que permite calcular as variações de entalpia nas correntes que passam pelos permutadores de calor, ao considerarmos que num permutador de calor a variação de trabalho é nula:

$$\Delta W = 0 \quad (2.2)$$

2.2.1.2 O Segundo Princípio

"É impossível a construção de um dispositivo que, por si só, isto é, sem intervenção do meio exterior, consiga transferir calor de um corpo para outro de temperatura mais elevada." (Clausius)

O segundo princípio da termodinâmica determina a direcção do fluxo de calor. A energia calorífica apenas pode fluir na direcção do gradiente de temperatura, ou seja, da fonte quente para a fonte fria. Num permutador de calor a fonte fria nunca pode ser aquecida a uma temperatura superior à fonte quente, assim como a fonte quente nunca pode ser arrefecida até temperaturas inferiores à fonte fria. (4)

2.3 Tecnologia *pinch*

A tecnologia *pinch*, ou tecnologia de integração do processo, é introduzida por Linnhoff em 1979 de forma a aumentar a eficiência de sistemas energéticos sendo depois estendida para outras áreas, tal como a de consumo de água por Wang e Smith em 1994 e o "*pinch* de hidrogénio" por Alves em 1999.(5)

A crise energética da década de 70 foi a grande propulsora do desenvolvimento desta tecnologia, sendo este assunto ainda muito estudado nos dias de hoje devido ao mercado exigente em que as empresas actuam. A preocupação das comunidades e governos com a escassez de recursos não renováveis e problemas ambientais são também importantes para o contínuo estudo destas tecnologias. (2)

Em 1979 uma empresa de refinação de petróleo (ICI) necessitava de uma expansão de 20% numa unidade de destilação de crude, o que aumentaria o consumo de energia. Uma nova fornalha parecia ser a única solução, contudo, esta era muito dispendiosa e volumosa, não existindo espaço suficiente para a sua instalação. A única solução parecia ser a colocação da fornalha do outro lado de uma rua muito movimentada o que aumentaria os riscos de segurança e operação. A equipa de Linnhoff é chamada para actuar e em apenas 11 horas consegue calcular as metas energéticas demonstrando que a refinaria poderia consumir muito menos energia mesmo com a expansão. Como resultado, foi possível evitar o investimento na nova fornalha e os seus problemas associados. O investimento necessário para tal melhoria seria muito inferior ao do projecto inicial, sendo apenas necessário a aquisição de novos permutadores de calor. (2)



Em poucos anos, muitas indústrias iniciaram projectos baseados nestas técnicas demonstrando bons resultados de eficiência energética. Estudos realizados pelo governo do Reino Unido reportaram para estas técnicas serem aplicadas eficientemente em variados tipos de indústrias. (2)

As técnicas de análise *pinch* foram disseminadas através de várias publicações e de cursos intensivos providenciados na UMIST, *School of Chemical Engineering and Analytical Science at Manchester University*. (2)

A técnica mais usual da tecnologia *pinch* é o *Pinch Design Method* através do projecto da rede de permutadores de calor. Esta técnica utiliza uma metodologia que permite uma minimização do custo anual da rede através da melhor relação entre o custo de investimento e de operação. O método mais famoso desta técnica é o método do ponto *pinch*. Este método surge em 1994 por Linnhoff como uma ferramenta para o *Pinch Design Method*. (6; 7)

Segundo Linnhoff, os três princípios básicos desta análise são as curvas compostas, o ponto *pinch*, e o diagrama grade.

O ponto *pinch* representa uma restrição termodinâmica no processo de transferência de energia. Este separa as regiões com excesso de energia das deficitárias em energia.

As três etapas mais importantes deste método são:

- Definição de metas energéticas;
- Síntese da rede;
- Optimização da rede. (8)

A etapa de definição de metas energéticas, ou pré análise, não deve ser confundida com as metas de redução energética utilizadas no conceito de monitorização de energia. Segundo a tecnologia *pinch*, as metas são absolutamente termodinâmicas, demonstrando que o processo é inerentemente capaz da realização de recuperação de calor, aquecimento e refrigeração se for projectado correctamente. A análise *pinch* não é uma análise trivial, no entanto, se o projectista souber quais as metas energéticas e o número mínimo permutadores de calor necessários (síntese da rede) irá certamente projectar a rede de uma forma mais rápida e objectiva. (2)

A criação de curvas compostas permite a obtenção das metas energéticas para um dado ΔT_{\min} . As curvas compostas integram um método gráfico apresentando na forma de um diagrama temperatura-entalpia. Estes gráficos representam o balanço de energia do processo. Elas permitem prever as necessidades mínimas de utilidades e localizar o ponto *pinch*. Apesar destas vantagens, as curvas compostas podem ser imprecisas e de forma a tornar o método mais preciso, Linnhoff e Flower criam em 1978 o *Problem Table* que permite a obtenção das metas energéticas de forma mais precisa. (2; 7)

Na síntese da rede, define-se o número mínimo de permutadores necessários para a obtenção do óptimo global. (2; 7)

Na última etapa, optimização da rede, define-se o cruzamento entre correntes e a sequência dos permutadores de calor. Para tal, é utilizado uma ferramenta de representação, Diagrama Grade, introduzida por Linnhoff e Flower em 1978. Neste diagrama as correntes quentes e frias são representadas por rectas horizontais ordenadas por ordem decrescente de temperatura com as correntes quentes no topo. Os permutadores de calor são representados por dois círculos unidos por uma linha vertical. Avalia-se a eficiência do fluxograma proposto e tenta-se novas modificações até obter um resultado satisfatório. Em 1983, Linnhoff e Hindmarsh propõem um conjunto de elementos básicos para o método do projecto da rede de permutadores de calor que permite projectar uma rede com o máximo de recuperação de energia. Estes elementos básicos são:

- Dividir o problema no ponto *pinch* e projectar cada parte separadamente;
- Projectar do ponto *pinch* para "fora";
- Imediatamente adjacente ao ponto *pinch*, obedecer às seguintes restrições:
 - $CP_{\text{hot}} < CP_{\text{cold}}$ (Acima do ponto *pinch*);
 - $CP_{\text{hot}} > CP_{\text{cold}}$ (Abaixo do ponto *pinch*).
- Maximizar as cargas dos permutadores;
- Fornecer calor externo apenas acima do ponto *pinch*, e refrigerar externamente abaixo do ponto *pinch*. (2; 7)

A desvantagem deste método reside nas alterações físicas a fazer numa fábrica existente que poderão ser de difícil implementação quando comparada com uma fábrica nova, podendo muitas das soluções encontradas serem apenas implementadas quando surgir a nova geração da



fábrica. Além disso, quanto maior a experiência do projectista, melhores serão os resultados. (2; 5; 7; 8)

2.4 Análise Termoeconómica

Na década de 1960 nasce o conceito de termoeconómica com Tribus e Evans (1962) num processo de dessalinização de água do mar. Este conceito permitiu relacionar num estudo só, aspectos termodinâmicos e económicos de um sistema térmico. Isto foi possível ao relacionar as equações de custo de geração de produtos em termos de variáveis termodinâmicas do sistema.(1)

Desde então o número de desenvolvimentos nesta área aumentou, e a maior parte destes desenvolvimentos tiveram como metas:

- Capacidades para encontrar e quantificar ineficiências energéticas;
- Provisão da introspecção à optimização;
- Automatizar certos aspectos da optimização.(1)

O conceito de termoeconomia originado pelo trabalho de Tribus e Evans foi generalizado por El-Sayed e Evans em 1970 através da introdução do conceito de optimização do sistema a partir da optimização isolada dos seus componentes. Para realizar esta tarefa, El-Sayed e Evans propuseram um método de cálculo baseado em multiplicadores de Lagrange.(1; 9)

O aumento do preço do petróleo na década de 1970 intensificou o interesse pela aplicação destes conceitos para o aumento da eficiência energética de sistemas térmicos. Contribuições mais recentes ao estudo da termoeconomia são encontradas em trabalhos publicados a partir de 1980 por Valero, Frangopoulos, Tsatsaronis e outros.(1)

A *Thermoeconomic Functional Analysis* (TFA) foi introduzida por Frangopoulos em 1983, com o desenvolvimento do conceito do diagrama funcional, através do qual os componentes do sistema energético são subdivididos em unidades de acordo com a sua função.(10)

Valero e Lozano em 1986 propuseram um procedimento para a caracterização de sistemas térmicos utilizando a álgebra matricial, ao qual deram o nome de *Exergy Cost Theory* (TCE). Este fornece um procedimento para o esboço e definição das equações de custo. (10; 11)

Em 1999 Valero, Serra e Erlach propõem a *Structural Theory* como uma metodologia comum para todas as metodologias termoeconómicas, comprovando que esta metodologia obtém os mesmos resultados da TCE e TFA, entre outras.(12)

A *Structural Theory* é um método matemático que permite obter um conjunto de equações características que modela o comportamento dos equipamentos do sistema térmico. Estas equações permitem o cálculo de irreversibilidades existentes no processo que podem ser eliminadas, aumentando assim a eficiência energética do equipamento. (10; 12; 13)

Com esta análise é possível conhecer a contribuição de cada equipamento no custo final. Esta metodologia permite ainda a criação de um sistema de supervisão, que identifica quando um equipamento entra em mau funcionamento e qual será o seu impacto no custo exergético dos restantes equipamentos.

Através da termoeconomia podemos otimizar os sistemas energéticos por equipamento, ou então, o reprojecto da rede de fluidos térmicos. A vantagem deste método deve-se exactamente a este facto, podendo ter uma implementação mais fácil que a análise *pinch* nas indústrias existentes. A desvantagem deste método em relação à metodologia *pinch* consiste no facto de não se tratar de uma análise sistemática.

2.5 Metodologia Seleccionada

A análise seleccionada neste trabalho foi a análise *pinch*, através da técnica *Pinch Design Method*. Esta escolha fundamenta-se no facto de ser uma metodologia simples e sistemática. A carência de especialistas nesta área é também um factor de escolha, servindo de motivação para o desenvolvimento do trabalho.

A vantagem deste método relativamente à termoeconomia, reside na sua simplicidade de implementação e sistematização, tendo como desvantagem a necessidade de reprojectar a rede de fluidos térmicos o que poderá levar a problemas de execução do projecto como já foi referido.

2.6 Síntese do Capítulo

Neste Capítulo realizou-se uma breve apresentação de metodologias de optimização de sistemas térmicos com uma comparação das vantagens e desvantagens destas. Os métodos baseiam-se nos princípios da termodinâmica, nomeadamente o primeiro e o segundo.



A análise *pinch* permite a recuperação de energia entre as correntes do processo antes de estas serem submetidas ao aquecimento ou arrefecimento necessário para o processo.

A análise termoeconómica aqui apresentada permite a identificação de irreversibilidades que podem ser evitadas aumentando assim a eficiência energética. Esta identificação baseia-se na comparação entre os custos exergéticos dos equipamentos no seu estado de projecto e o estado de funcionamento.

Com base no referido anteriormente, o método escolhido foi a análise *pinch*.



3 Metodologia *Pinch*

3.1 Sumário

A análise *pinch* é uma metodologia que permite a minimização do consumo de energia em processos termodinâmicos através de sistemas de recuperação de calor, métodos de abastecimento de energia e condições de funcionamento do processo. A grande vantagem da tecnologia *pinch* consiste na sua sistematização.

A análise *pinch* inicia-se com um balanço energético e mássico do processo. Depois de estabelecido este balanço é possível estabelecer metas de poupança de energia através do projecto da rede de permutadores de calor.

3.2 Passos da análise *pinch*

Com o desenvolvimento da tecnologia *pinch*, não é só possível a realização da optimização da rede de fluidos térmicos, como podem ser descobertos medidas de racionalização de energia consideráveis. Os passos da análise *pinch* são:

- Identificação das correntes e das utilidades;
- Extração dos dados térmicos para o processo e sistemas úteis;
- Selecção da variação de temperatura mínima inicial;
- Construção das curvas compostas e da grande curva compostas;
- Projecto da rede de permutadores de calor. (8)

3.3 Identificação das Correntes e das Utilidades

Nos processos indústrias, normalmente, existem correntes que necessitam de ser aquecidas (correntes frias) e outras que necessitam de ser arrefecidas (correntes quentes).

O critério de selecção das correntes deve acontecer sempre que exista alteração da carga térmica mas não na composição. De modo a encontrar melhores soluções na rede, as correntes devem ser divididas num menor número possível, isto é, se uma corrente fria é aquecida ao passar num tanque de armazenamento e de seguida num reactor, a melhor forma de o representar será contabilizando desde a temperatura inicial (antes do tanque) e a temperatura

final (depois do reactor). Por outras palavras, se separarmos fluxos em demasiadas correntes, vamos aumentar a complexidade aparente da rede tornando mais difícil encontrar oportunidades de recuperação de calor. (2)

As utilidades fornecem a energia necessária às correntes do processo. Estas podem ser:

- Fornalhas;
- Fluidos Térmicos;
- Aquecimento Eléctrico;
- Sistemas de Refrigeração;
- etc..

Existem variadas formas de utilidades frias e quentes que podem ser utilizadas sendo algumas mais convenientes que outras. Aquecer a temperaturas baixas é mais barato que aquecer a temperaturas elevadas.

3.4 Extracção dos dados térmicos para o processo e sistemas úteis

Os dados necessários envolvem essencialmente informação sobre o aquecimento e arrefecimento das correntes do processo, as utilidades disponíveis e respectivos custos.

Existem três fontes de informação para além dos colaboradores da empresa. A primeira delas é a documentação da unidade, na qual se encontram fluxogramas de processo, engenharia, folhas de especificação dos permutadores de calor, etc.. A segunda, também disponível na maioria das grandes unidades, são as informações com o histórico da produção. E, por fim, a criação de um modelo energético com capacidade para geração de dados necessários para um trabalho de integração. Todas elas são importantes e úteis no desenvolvimento do projecto.

A criação do modelo energético permite ainda a validação dos resultados da análise e da optimização final através de iterações. (5)

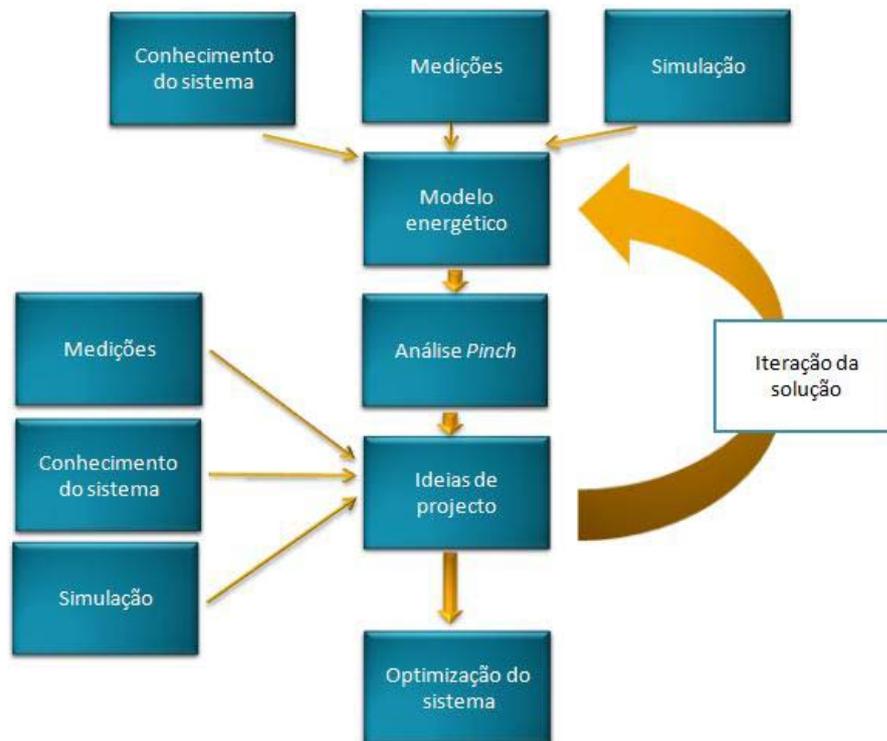


Figura 3.1: Diagrama representativo das etapas para a otimização utilizando modelos que permitem a simulação das soluções.(5)

Os dados necessários para a realização da análise de eficiência energética através da tecnologia *pinch* são o caudal mássico, temperaturas e entalpias específicas iniciais e finais.

Realizando um balanço energético e mássico numa corrente fria de um aquecedor, o calor trocado é igual à variação de entalpia desta corrente. Considerando-se que os calores específicos das correntes são constantes no intervalo de temperatura em questão, pode-se afirmar:

$$Q = \Delta H = \dot{m} \cdot cp \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot (h_t - h_s) \quad (3.1)$$

Considera-se ainda:

$$CP = \dot{m} \cdot cp \quad (3.2)$$

$$\Delta T = T_t - T_s \quad (3.3)$$

$$CP = \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (3.4)$$

Tabela 3.1: Dados das correntes frias do problema exemplo.(2; 7)

Corrente	T_s (°C)	T_s (°C)	CP (kW/°C)	ΔH (kW)
CS1	20	135	2	230
CS2	80	140	4	240

Tabela 3.2: Dados das correntes quentes do problema exemplo.(2; 7)

Corrente	T_s (°C)	T_t (°C)	CP (kW/°C)	ΔH (kW)
HS1	170	60	3	330
HS2	150	30	1,5	180

Como vimos anteriormente, existem várias possibilidades para extrair os dados térmicos a partir do balanço energético e mássico do processo. A extracção de dados pobres aumenta a probabilidade de omissão de medidas de racionalização de energia. Em casos extremos, dados térmicos pouco rigorosos podem mesmo apresentar a solução existente como sendo o óptimo ou mesmo a única solução, não beneficiando da metodologia. A extracção dos dados é, portanto, uma fase pouco motivadora mas essencial que é certamente melhorada com a experiência do projectista.

3.4.1 Regras para a extracção de dados

Como a qualidade dos resultados finais depende da qualidade da extracção dos dados é importante perceber o significado de algumas regras heurísticas. Estas regras são:

- Não extrair dados sobre a solução existente;
- Extrair dados a temperaturas efectivas;
- Extrair correntes a "safe-side";
- Não extrair correntes verdadeiramente utilitárias;
- Identificar os dados pouco relevantes. (2; 7)



3.4.1.1 Não extrair dados sobre a solução existente

A extracção de dados relativos à solução existente pode levar à consideração da solução existente como sendo a óptima, levando a análise *pinch* a não obter qualquer benefício.(2; 7)

3.4.1.2 Extrair dados a temperaturas efectivas

Para uma extracção de dados, é mais relevante a extracção de temperaturas efectivas do que a extracção da temperatura "actual" da corrente. Por exemplo, para uma corrente quente é importante conhecer qual a temperatura a que este se encontra disponível maioritariamente de forma a obter um resultado que se adequa ao processo real.(2; 7)

3.4.1.3 Extrair correntes a "safe-side"

A variação de entalpia de determinadas correntes pode ser não linear. Nestas situações, a selecção de apenas um CP pode levar a resultados inconsistentes. De forma a obter dados mais precisos, é conveniente a segmentação da corrente em tantas quanto as necessárias para que a representação das correntes no diagrama temperatura-entalpia seja o mais próximo possível da curva real. Este tipo de linearização dá-se o nome de linearização *safe-side*, tal como se pode observar na Figura 3.2.(2; 7)

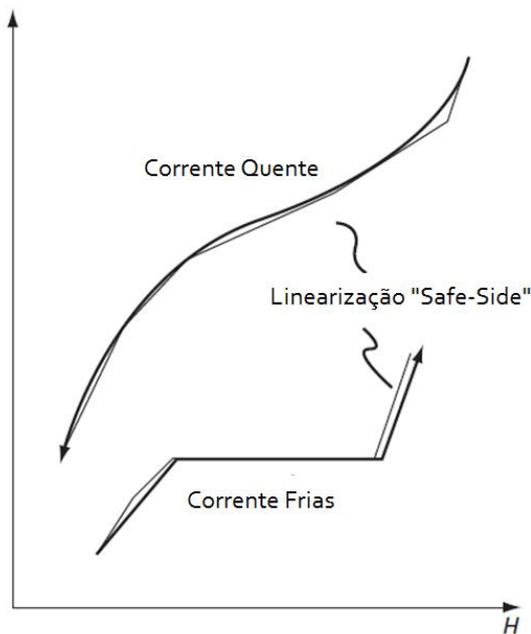


Figura 3.2: Representação da linearização "safe-side". (2)

3.4.1.4 Não extrair correntes verdadeiramente utilitárias

Uma corrente verdadeiramente utilitária é uma utilidade (tal como o vapor, água de refrigeração, etc.) que pode ser substituída por outra corrente qualquer (de processo ou utilitária) para uma permuta de calor. Por exemplo, quando o vapor é utilizado para aquecer ar através de permutadores de calor, o vapor não deverá ser considerado como corrente, uma vez que este poderá ser substituído por outra forma de aquecimento, como por exemplo bombas de calor.

Contudo, o vapor poderá em outras situações funcionar como corrente, quando é parte importante do processo, devendo nesse caso ser considerado como uma corrente do processo.(2; 7)

3.4.1.5 Identificar dados pouco relevantes

A qualidade das soluções é fortemente influenciada pela qualidade dos dados disponíveis, e os problemas de integração energética não fogem à regra. Os dados podem não estar disponíveis inicialmente com a precisão desejada e em geral quanto maior a precisão desejada, maior o tempo necessário à obtenção dos dados. Uma forma de abordar este problema é iniciar a análise com dados mais grosseiros e acessíveis, e com o decorrer do trabalho seleccionar os dados que necessitam ser refinados, evitando assim o desperdício de tempo no levantamento de dados que não causem grande impacto no resultado.(2; 7)

3.4.2 Processos isotérmicos

Algumas das metodologias propostas para resolver o problema da rede de permutadores de calor não consideram correntes isotérmicas onde existe a mudança de fase, ou seja, correntes que libertam apenas o seu calor latente tal como processos de condensação e vaporização. Ortega-Ponce propõe em 2008, a introdução do calor latente em substituição ao calor específico das correntes. (14)

A Figura 3.3 representa uma corrente num processo onde ocorre variação de calor sensível nomeadamente água a ser aquecida de 50°C até 100°C.

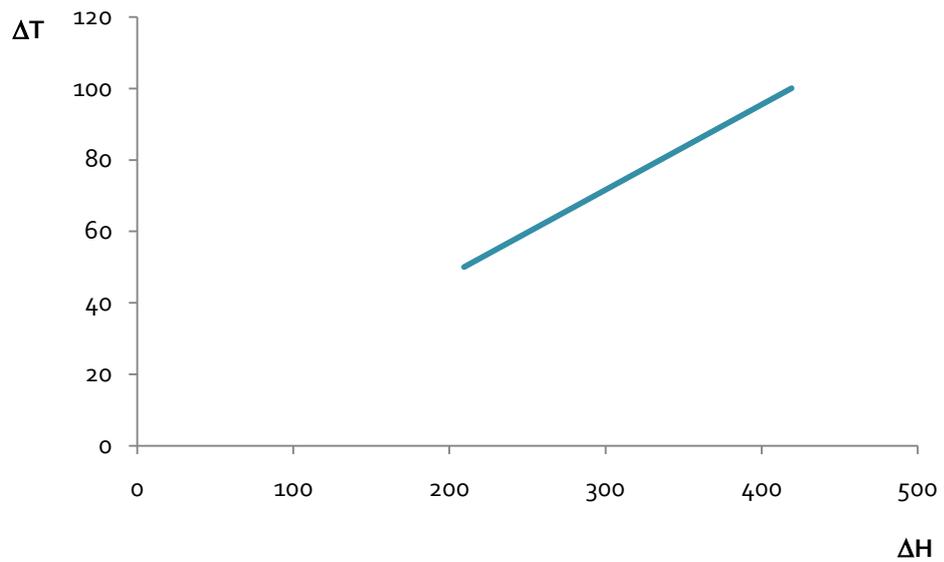


Figura 3.3: Calor sensível para uma corrente fria.

Para calcular a energia da corrente fria representada na Figura 3.3 é utilizado a equação 3.1.

Na Figura 3.4 é representada a formação de vapor a 100 °C. Para este processo de formação a água adquire calor latente.

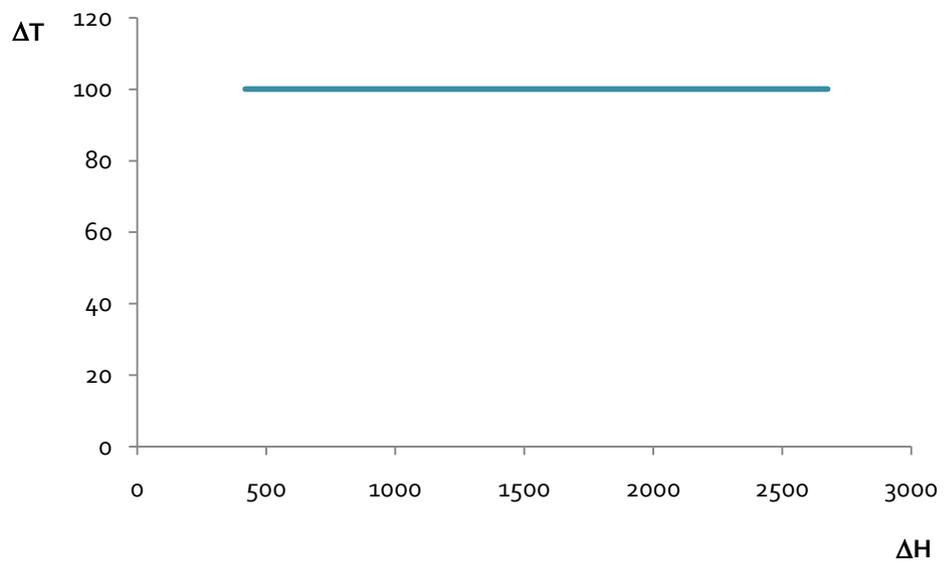


Figura 3.4: Calor latente para uma corrente fria.

Para este tipo de correntes a equação a utilizar deverá ser:

$$\Delta H = \dot{m} \cdot h_{fg} \quad (3.5)$$

Numa corrente na qual ocorra um processo isotérmico no meio, deverá ser segmentada de forma a não linearizar a variação da capacidade calorífica tal como foi demonstrado para a linearização *safe-side*.

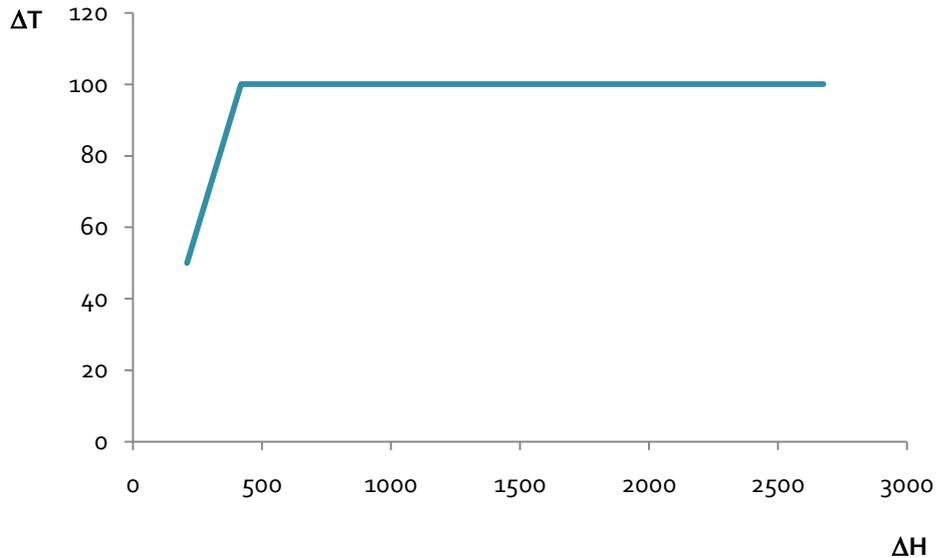


Figura 3.5: Representação do calor sensível e latente do processo de formação de vapor.

3.5 Selecção da variação de temperatura mínima

Pela análise da equação da transferência de calor (3.1), verificamos que para valores altos de ΔT_{\min} originam-se altas necessidades de utilidades exteriores uma vez que a transferência de energia num permutador de calor é directamente proporcional a ΔT_{\min} . Isto significa que quanto mais pequeno o valor de ΔT_{\min} melhor será a eficiência energética obtida na análise. No entanto, para valores baixos de ΔT_{\min} a área necessária para um permutador de calor irá aumentar. Este problema torna-se perceptível pela seguinte expressão:

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_{lm}} \quad (3.6)$$



Onde para permutadores em contracorrente:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{hot_s} - T_{cold_t}) - (T_{hot_t} - T_{cold_s})}{\ln\left(\frac{T_{hot_s} - T_{cold_t}}{T_{hot_t} - T_{cold_s}}\right)} \quad (3.7)$$

Se $(T_{hot_s} - T_{cold_t}) = (T_{hot_t} - T_{cold_s})$, ΔT_{lm} torna-se indefinido e a área necessária do permutador de calor infinita, o que demonstra que a área do permutador de calor é inversamente proporcional a ΔT_{lm} .

Então, para valores baixos de ΔT_{min} será necessário a aquisição de grandes e dispendiosos permutadores uma vez que o seu custo está directamente relacionado com o seu tamanho ou área de transferência de calor.

De forma a relacionar a área com a energia e a encontrar o ΔT_{min} óptimo para o problema é necessário relacionar o custo do permutador com o custo de energia. Representando este custo na forma de um gráfico é possível a visualização da zona de menor custo total.

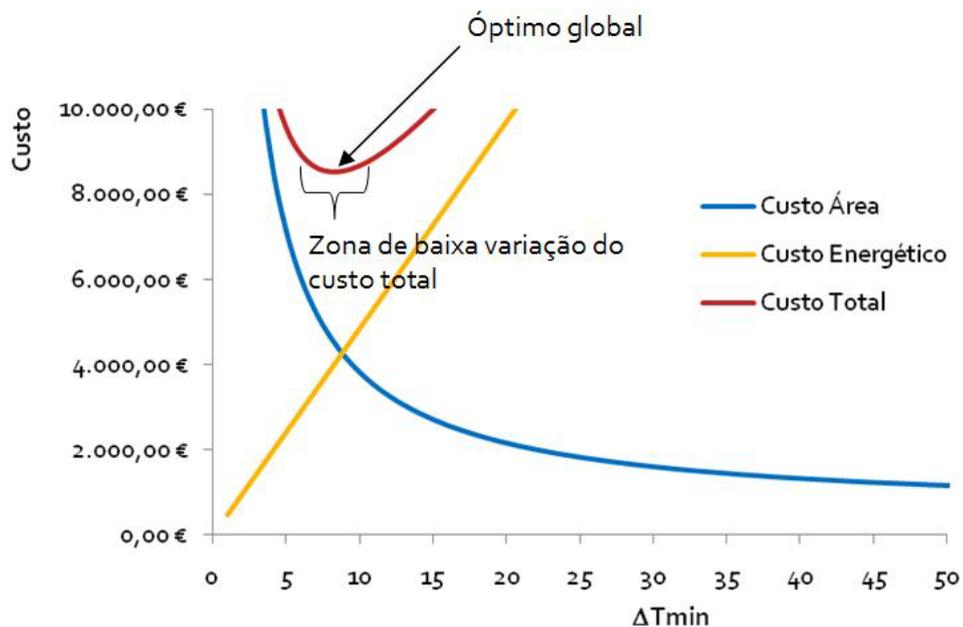


Figura 3.6: Custo energético, permutador e total com a variação de ΔT_{min} .

Para representar o custo do permutador na forma de um gráfico, é definido um custo fixo e custo variável. O custo variável depende exactamente da área de transferência de calor, pelo

que quanto maior o permutador, maior o custo variável associado. Através da equação 3.6 é possível relacionar a área com a diferença de temperatura e assim construir a curva referida.

Existe um intervalo de valores para ΔT_{\min} onde a curva do custo total apresenta uma variação pouco significativa. Estes valores podem também ser escolhidos quando se pretende dar maior relevância ao custo energético ou ao custo de investimento (permutador de calor). Para valores à esquerda do óptimo global, o investimento será superior enquanto o custo energético será inferior, sendo o caso ideal para situações onde se pretenda um longo período de vida útil. Para valores à direita do óptimo global, o investimento será inferior e o custo energético será superior, situação preferida para quando se pretende um tempo de retorno de investimento (ROI) relativamente mais rápido.(2)

3.6 Construção da Curva composta e da Grande curva composta

Um método útil de visualização das correntes é o diagrama temperatura-entalpia. Este diagrama pode ser utilizado para representar as trocas de calor, ao ser representado a variação de temperatura com a variação de entalpia das correntes. Como apenas existe o interesse na variação de entalpia (ΔH) de uma determinada corrente, esta pode ser deslocada para qualquer parte do eixo horizontal e continuar a representar o mesmo desde que se mantenha a inclinação desta.

3.6.1 Curva composta

Transportando para um diagrama de temperatura-entalpia os dados das correntes frias, CS1 e CS2, referidas na Tabela 3.1, obtém-se duas rectas cujo declive é igual á capacidade térmica das correntes, conforme a Figura 3.7 e Figura 3.8.

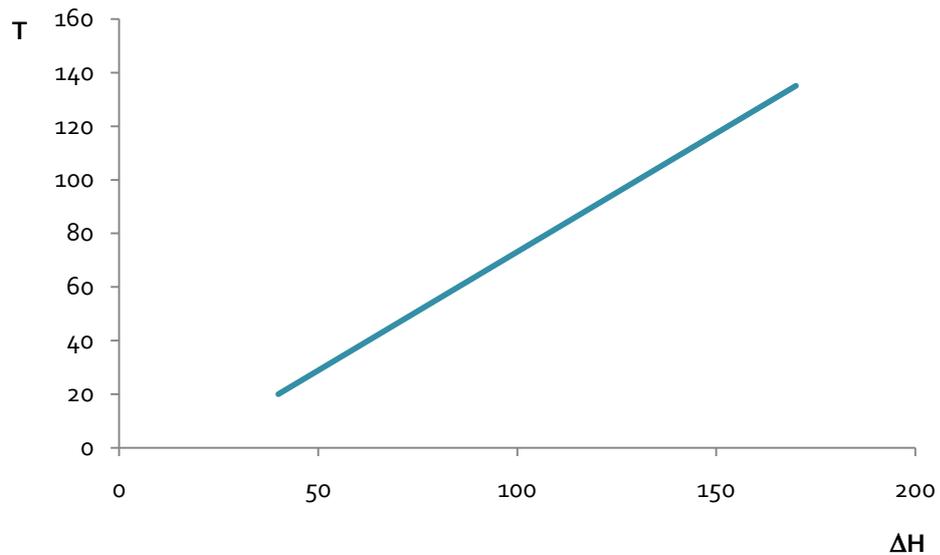


Figura 3.7: Diagrama de temperatura entalpia para uma corrente fria, CS1.

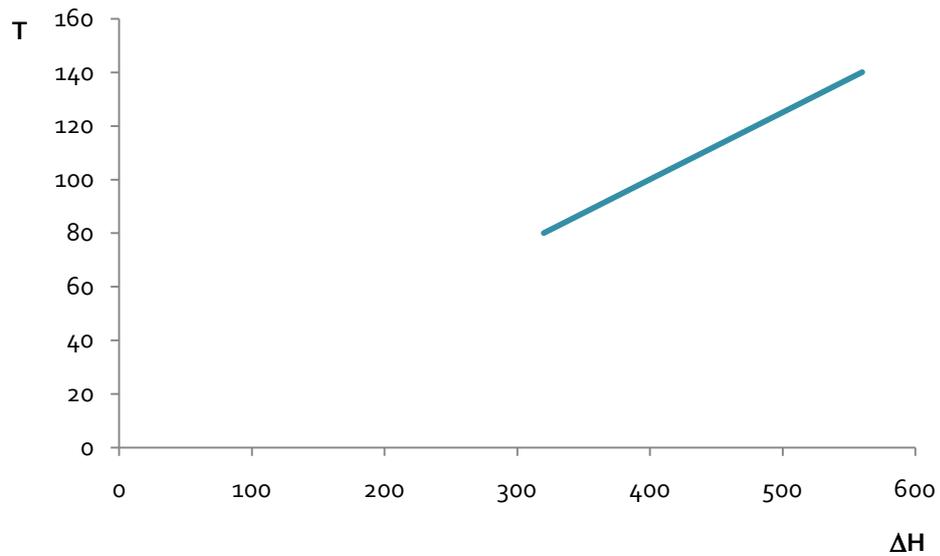


Figura 3.8: Diagrama de temperatura entalpia para uma corrente fria, CS2.

Considerando agora as duas correntes frias, é possível a criação de uma curva única que represente as duas correntes ao mesmo tempo. A esta curva dá-se o nome de curva composta fria. Para a construção desta curva o problema deve ser dividido em intervalos de temperatura e as capacidades caloríficas das correntes presentes nesse intervalo deverá ser somada. Uma ferramenta útil para a construção destas curvas é o *Problem Table*. O *Problem Table* é uma tabela

onde as linhas representam os intervalos de temperaturas ordenados por ordem crescente. Como exemplo temos a Tabela 3.4.

Tabela 3.3: Divisão das correntes frias em intervalos de entalpia.

Intervalo	ΔT	Correntes	CP	ΔH
A	20 - 80	CS ₁	CP ₁	CP ₁ *(80-20)
B	80 - 135	CS ₁ e CS ₂	CP ₁ + CP ₂	(CP ₁ +CP ₂)*(135-80)
C	135 - 140	CS ₂	CP ₂	CP ₂ *(140-135)

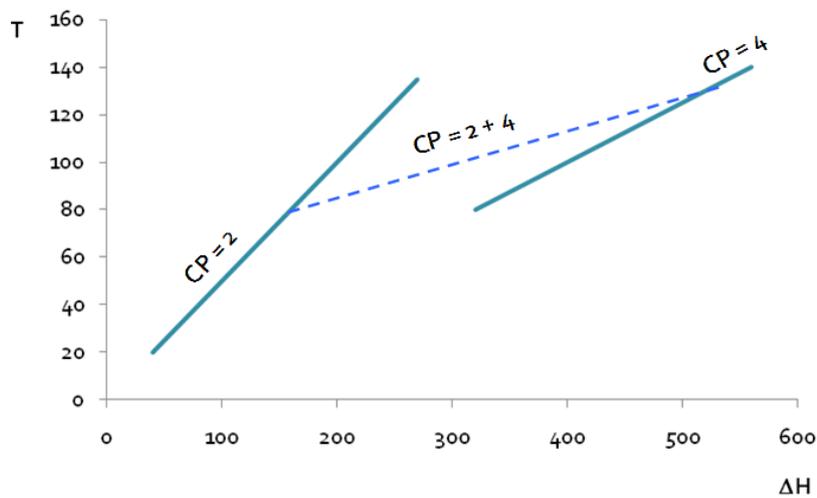


Figura 3.9: Demonstração do processo de construção de curvas compostas para múltiplas correntes.

Para a construção das curvas compostas deste exemplo, utilizou-se o *Problem Table*:

Tabela 3.4: *Problem Table* para as correntes frias do problema exemplo.

T	ΣCP	ΔH	ΣH
20	2	40	40
80	2	120	160
135	6	330	490
140	4	20	510

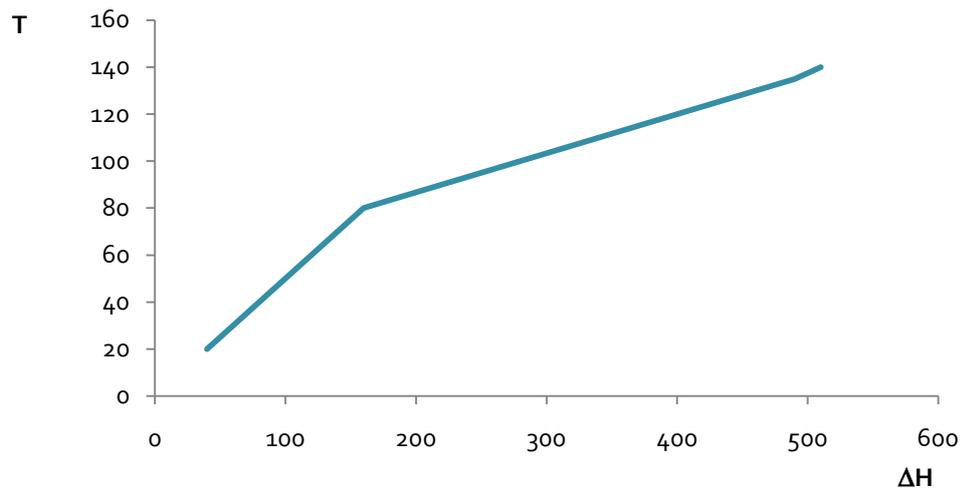


Figura 3.10: Curva Composta Fria do problema exemplo.

A variação de entalpia representada nesta curva é a quantidade de calor que precisa ser fornecida pelas utilidades para atender às necessidades do processo.

O processo de construção da curva composta quente é igual ao da curva composta fria.

Tabela 3.5: Problem Table para as correntes quentes do problema exemplo.

T	ΣCP	ΔH	ΣH
30	1,5	45	40
60	1,5	45	85
150	4,5	405	490
170	3	60	550

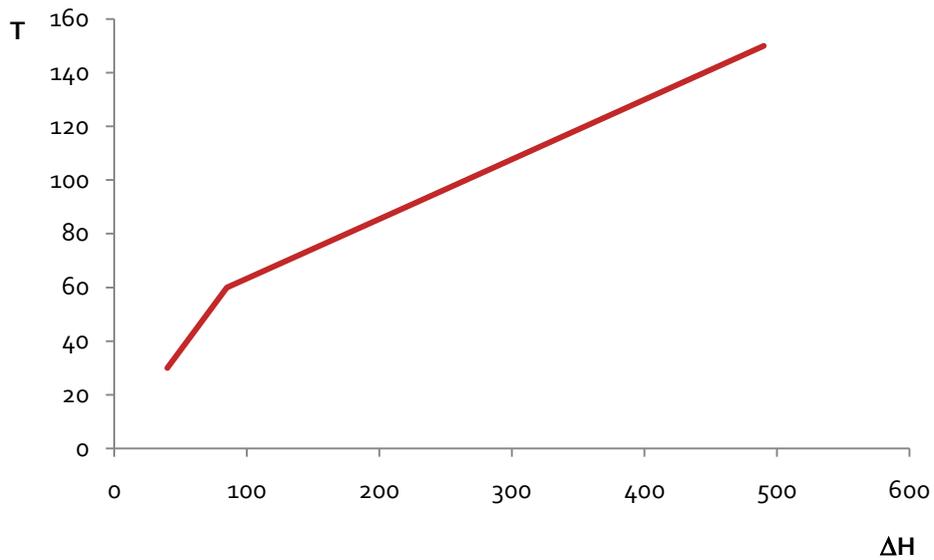


Figura 3.11: Curva Composta Quente do problema exemplo.

Para este exemplo iremos adoptar uma variação mínima de temperatura de 10 °C. (2; 7)

A curva composta (CC) é a representação da curva composta quente e fria no mesmo diagrama tal como acontece na Figura 3.12. Pela visualização deste diagrama é perceptível que a localização do ponto *pinch* acontece algures entre 115 °C e 80°C. Assim $\Delta T_{\min} \approx 35^\circ\text{C}$.

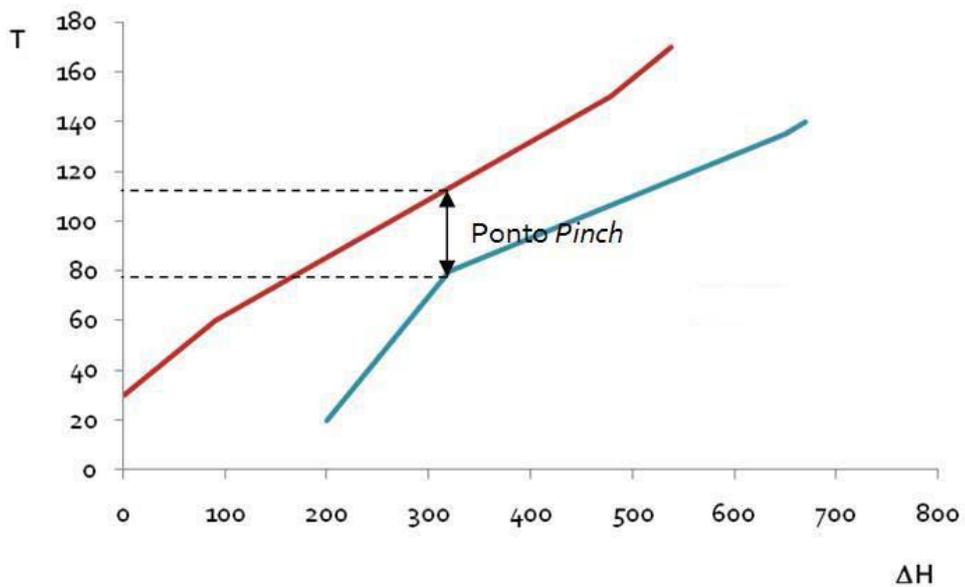


Figura 3.12: Localização do ponto *pinch* para o problema exemplo.



De modo a aumentar o potencial de recuperação de energia do problema, o ponto *pinch* poderá ser reduzido através da aproximação das curvas até $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$, valor escolhido anteriormente. Esta aproximação ocorre a 90°C para a curva composta quente e 80°C para a curva composta fria. Para esta aproximação utiliza-se o *Problem Table*, onde se iguala o valor energético para as respectivas temperaturas.

Como se pode ver na Tabela 3.6 e Tabela 3.7 representado a vermelho, os pontos 90°C e 80°C encontram-se com o mesmo valor energético (ΣH).

Tabela 3.6: Deslocação horizontal da curva composta quente.

T	ΣCP	ΔH	ΣH
30	1,5	45	0
60	1,5	45	45
90	4,5	135	180
150	4,5	405	450
170	3	60	510

Tabela 3.7: Deslocação horizontal da curva composta fria.

T	ΣCP	ΔH	ΣH
20	2	40	60
80	2	120	180
135	6	330	510
140	4	20	530

Na Figura 3.13, encontra-se representado a aproximação das curvas compostas para a variação mínima de temperatura escolhida inicialmente ($\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$).

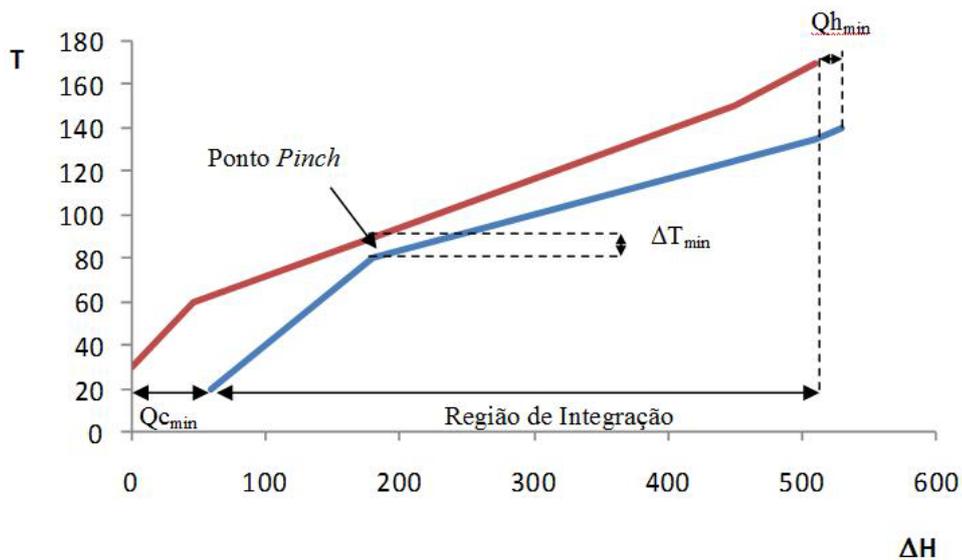


Figura 3.13: Curva Composta do problema exemplo.

Conhecendo-se a curva composta é possível saber qual é o mínimo de utilidades quentes e frias e a região de integração. A região de integração é a zona onde ambas as curvas existem e representa o potencial de recuperação de energia do problema.

A definição das regiões acima e abaixo do ponto *pinch* tem implicações importantes. Quando se recorre a utilidades frias acima do ponto *pinch*, será necessária a adição de utilidades quentes superiores ao valor mínimo. Isto ocorre porque, acima do ponto *pinch*, as correntes quentes não possuem energia suficiente para o atendimento das necessidades térmicas das correntes frias, sendo necessária a complementação com utilidades quentes. Contudo, se alguma corrente quente for arrefecida com uma utilidade fria, ela deixará de ter disponibilidade de aquecer uma corrente fria, elevando ainda mais a diferença entre a energia necessária pelas correntes frias e a oferecida pelas correntes quentes. Este fenómeno é conhecido como transferência de energia através do *pinch*.(2)

Estas implicações criam as três regras de ouro da tecnologia *pinch*:

- Não transferir energia através do ponto *pinch*;
- Não aquecer com utilidades externas abaixo do ponto *pinch*;
- Não arrefecer com utilidades externas acima do ponto *pinch*.(2; 5; 8)



Violando uma destas regras resultará numa transferência de energia através do ponto *pinch* que irá aumentar a necessidade de energia externa.

As temperaturas das correntes no ponto *pinch* são denominadas de temperaturas do ponto *pinch* quente e fria, sendo a diferença entre elas igual ao ΔT_{\min} seleccionado. O valor do ΔT_{\min} afecta os valores de consumo mínimo de utilidades. Isto acontece porque, para um ΔT_{\min} maior, as curvas terão de se afastar uma da outra, diminuindo a região de integração, e vice-versa.

3.6.2 Grande curva composta

Uma ferramenta útil para a validação do método e que permite uma melhor visualização das oportunidades de melhoria da rede é a Grande Curva Composta (GCC). A construção da grande curva composta inicia-se com o ajustamento das temperaturas das curvas compostas. Isto envolve a adição de $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$ à curva composta fria e a subtracção de $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$ à curva composta quente. Ao efectuar isto, as curvas deverão unir-se no ponto *pinch* como se pode verificar na Figura 3.14. Estas curvas são chamadas de curvas compostas deslocadas. A grande curva composta é construída através da diferença de entalpia entre as *curva composta deslocada* quente e fria nos vários intervalos de temperatura.

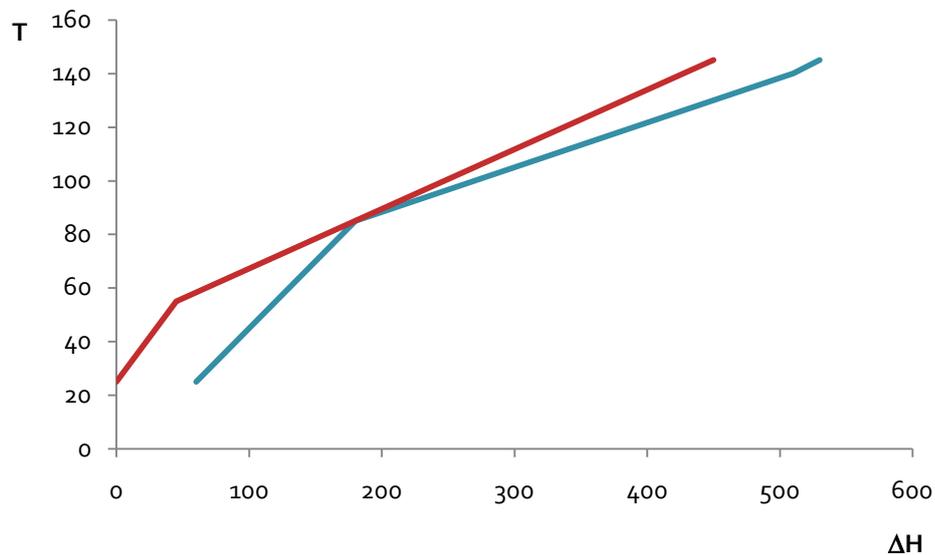


Figura 3.14: Curva composta deslocadas.

Com as informações necessárias para a construção das curvas compostas, é possível construir a grande curva composta. Esta curva auxilia na escolha de utilidades, bem como na avaliação do “saldo líquido” de energia em cada intervalo de temperatura. Permite ainda verificar se o método foi bem implementado, através da localização do ponto *pinch* e utilidades mínimas quentes e frias, que terão de ser iguais às obtidas na curva composta.

Para a construção divide-se o problema em intervalos de temperaturas e para cada intervalo subtrai-se o somatório das correntes frias ao somatório das correntes quentes tal como acontece na Tabela 3.8 e Tabela 3.9.

Tabela 3.8: Dados para a construção da grande curva composta do problema exemplo.

Intervalo	$\Delta T_{shifted}$	HS _n	CS _n	$\Sigma CP_{hot} - \Sigma CP_{cold}$
A	25 - 55	HS2	CS1	-0,5
B	55 - 85	HS1 e HS2	CS1	2,5
C	85 - 140	HS1 e HS2	CS1 e CS2	-1,5
D	140 - 145	HS1 e HS2	CS2	-0,5
E	145 - 165	HS1		3

Tabela 3.9: *Problem Table* para a construção da grande curva composta do problema exemplo.

T _{shifted}	$\Sigma CP_{hot} - \Sigma CP_{cold}$	ΔH	ΣH	$\Sigma H - lock\ pinch$
25	-0,5	12,5	12,5	60
55	-0,5	15	27,5	75
85	2,5	-75	-47,5	0
140	-1,5	82,5	35	82,5
145	0,5	-2,5	32,5	80
165	3	-60	-27,5	20

Assim a expressão que permite calcular a variação de entalpia nos intervalos de temperatura, que provém da equação 5, é:

$$\Delta H_i = (\Sigma CP_{hot} - \Sigma CP_{cold}) \cdot (T_{t_{shifted}} - T_{s_{shifted}}) \quad (3.8)$$



Se o problema foi bem implementado, o ponto *pinch* deverá ser o ponto mais á esquerda do gráfico. É conveniente colocar este ponto sobre o eixo vertical de forma a representar a sua restrição termodinâmica, ou seja, que não poderá existir transferência de energia através dele. O posicionamento do ponto *pinch* sobre o eixo vertical do problema exemplo pode ser observado na coluna " ΣH - lock pinch" na Tabela 3.9.

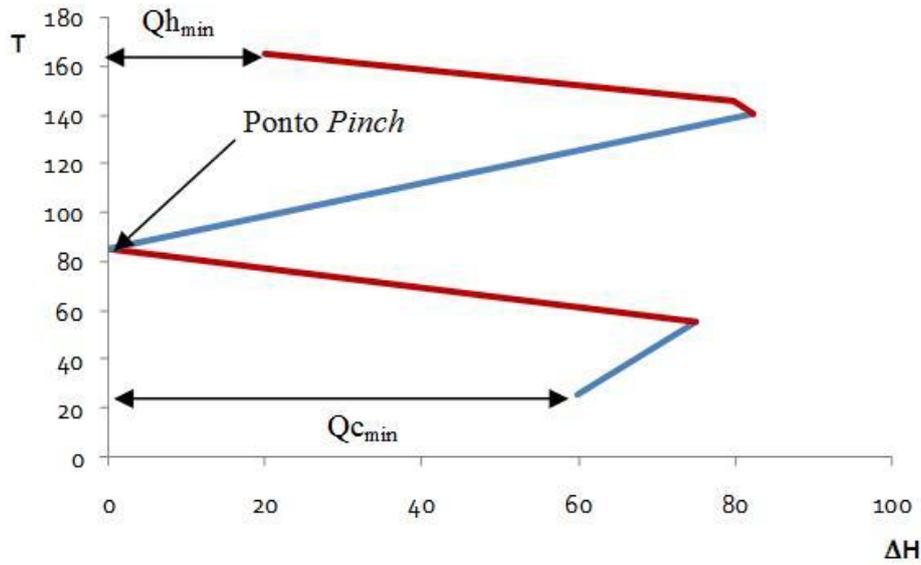


Figura 3.15: Grande Curva Composta do problema exemplo.

Além disso, os valores de $Q_{h_{min}}$ e $Q_{c_{min}}$ obtidos na grande curva composta têm de ser iguais aos valores obtidos na curva composta. Tal pode ser verificado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Necessidades mínimas de utilidades quentes e frias obtidas pela CC e GCC.

	CC	GCC
$Q_{h_{min}}$	20	20
$Q_{c_{min}}$	60	60

3.6.2.1 Definir metas para múltiplas utilidades

A necessidade de energia para um determinado processo pode ser satisfeito através de vários níveis de utilidades, sendo umas mais vantajosas que outras. Quando se pretende otimizar uma rede de fluidos térmicos um dos objectivos é maximizar o recurso a utilidades mais económica diminuindo o uso de utilidades mais dispendiosas. É preferível o recurso a vapor de baixa pressão em vez de vapor de média pressão, por exemplo.

A grande curva composta é a melhor ferramenta para definir as metas que maximizam o recurso a utilidades mais económicas. A Figura 3.16 representa a grande curva composta num processo onde as utilidades são satisfeitas por vapor a média pressão. Contudo este sistema energético permite também a utilização de vapor de baixa pressão com uma produção mais económica.

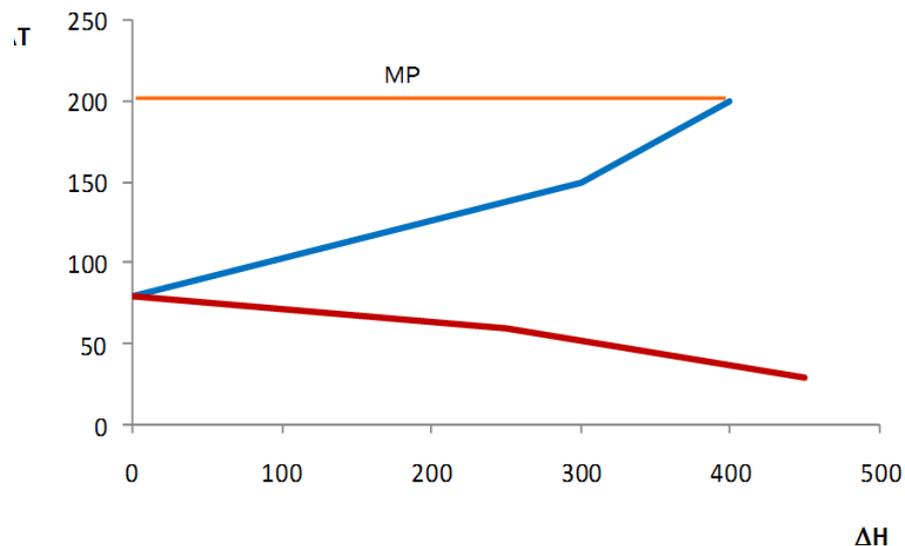


Figura 3.16: Grande curva composta para uma utilidade quente (exemplo).

Através das curvas compostas é possível definir as metas mínimas de cada utilidade. A Figura 3.17 representa o mesmo exemplo anterior com a definição da meta de consumo mínimo de vapor de baixa e média pressão. A recta a amarelo representa a energia mínima que pode ser servida pela utilidade mais barata.

O posicionamento dos vários níveis de utilidades é realizado colocando uma recta horizontal ao nível da temperatura a que esta se processa até tocar na GCC. A utilidade de nível superior é colocada na temperatura a que actua iniciando na diferença de energia a que a utilidade imediatamente inferior toca na GCC. Este procedimento encontra-se representado na Figura 3.17.

O mesmo procedimento pode ser realizado para utilidades frias.

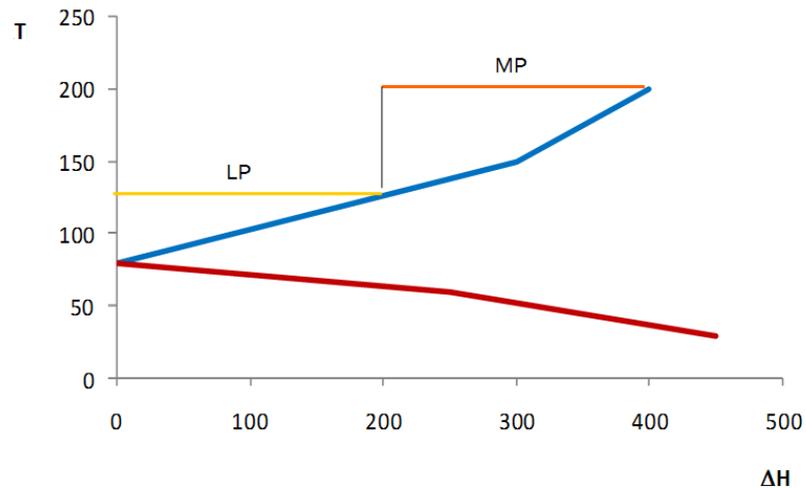


Figura 3.17: Grande curva composta para várias utilidades quentes (exemplo).

O facto de a GCC ser construída através das temperaturas deslocadas das CC, permite assegurar que o nível de utilidade ao tocar na curva garanta ΔT_{\min} .

O ponto onde o nível de utilidade toca na GCC é chamado de ponto *pinch* de utilidades diferenciando-se do ponto *pinch* de processo. Neste ponto é também aplicado as três regras de ouro:

- Não transferir utilidades através do ponto *pinch* de utilidades;
- Não recorrer a utilidades mais dispendiosas abaixo do ponto *pinch* de utilidades;
- Não recorrer a utilidades mais económicas acima do ponto *pinch* de utilidades.

De novo, a violação de uma destas regras irá causar a transferência de energia através do ponto *pinch* de utilidades aumentando a necessidade de recurso a utilidades mais dispendiosas.

Este procedimento permite dar a conhecer ao projectista as metas energéticas que reduzem o custo de utilidades. (2; 5; 7; 8)

3.7 Síntese da Rede

Para determinar o número mínimo de permutadores é possível o recurso às curvas compostas. O projectista ao conhecer as metas energéticas e o número mínimo de permutadores, consegue desenvolver o projecto da rede termina óptima nas primeiras tentativas.

Calcular o número mínimo de permutadores depende fundamentalmente no número total de correntes e utilidades do processo envolvidos na troca de energia. Este número pode ser determinado utilizando a seguinte expressão:

$$N_{min} = [N_{hot} + N_{cold} + N_u - 1]_{AP} + [N_{hot} + N_{cold} + N_u - 1]_{BP} \quad (3.9)$$

3.8 Projecto da Rede de Permutadores de Calor

Para o projecto da rede de permutadores de calor a ferramenta útil é a representação do diagrama de grades como referido anteriormente.

Neste diagrama as correntes são representadas por rectas horizontais pela ordem decrescente de temperatura (com as correntes quentes em primeiro lugar). Os permutadores de calor são representados por dois círculos unidos por uma recta vertical, enquanto os aquecedores e refrigeradores por um círculo com a letra H e C, respectivamente. O diagrama grade da rede também representa a natureza da contracorrente dos permutadores de calor, melhorando a visualização da praticabilidade das temperaturas.

A tecnologia *pinch* é aplicada a situações de projecto de redes novas e ao reprojecto de redes existentes, sendo a última situação mais frequente. Nesta secção serão apresentadas técnicas que permitem a redução do consumo energético para ambas as situações.

3.8.1 Sistemas energéticos Novos

De forma a encontrar o óptimo nas primeiras tentativas, um conjunto de elementos foram criados por Linnhoff e Hindmarsh em 1983. Estes elementos são:

- Dividir o problema no ponto *pinch* e projectar cada parte separadamente;
- Projectar do ponto *pinch* para “fora”;
- Imediatamente adjacente ao ponto *pinch*, obedecer às seguintes restrições:
 - $CP_{hot} < CP_{cold}$ (Acima do ponto *pinch*);
 - $CP_{hot} > CP_{cold}$ (Abaixo do ponto *pinch*).
- Maximizar as cargas dos permutadores;
- Fornecer calor externo apenas acima do ponto *pinch*, e refrigerar externamente abaixo do ponto *pinch*.

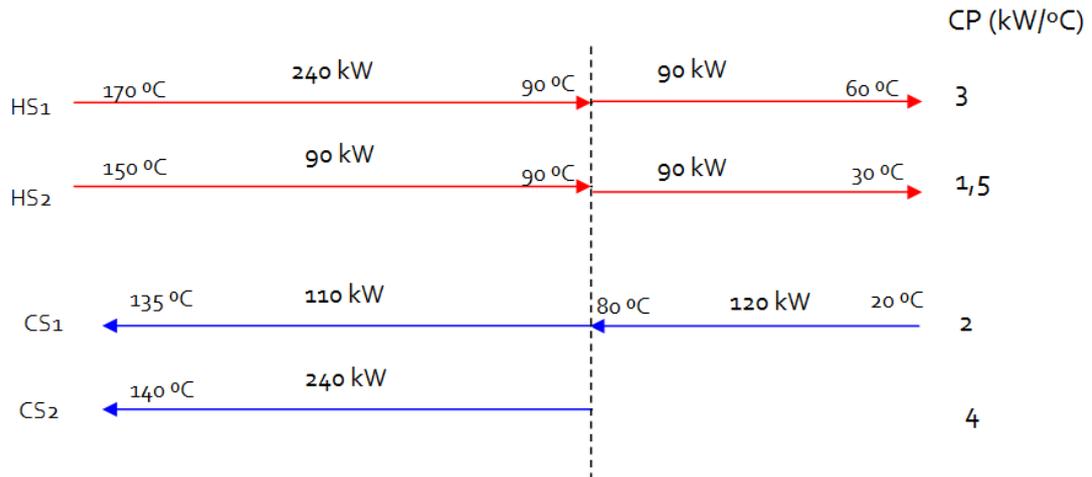


Figura 3.18: Diagrama grande do problema exemplo.

Recordando as três regras de ouro da tecnologia *pinch*, não deverá existir arrefecimento externo acima do ponto *pinch* assim como não deverá existir aquecimento externo abaixo do ponto *pinch*. Utilizando a Figura 3.18 como referência, verificamos que à esquerda da linha a tracejado, as correntes quentes devem transferir a sua energia para as correntes frias para atingirem a temperatura *pinch*. De forma semelhante, à direita, as correntes frias devem ser elevadas até á temperatura *pinch* apenas através de energia transferida com as correntes quentes.

Deve agora separar-se o problema no ponto *pinch* e projectar cada parte separadamente. A Figura 3.19 representa o diagrama grade acima do ponto *pinch*.

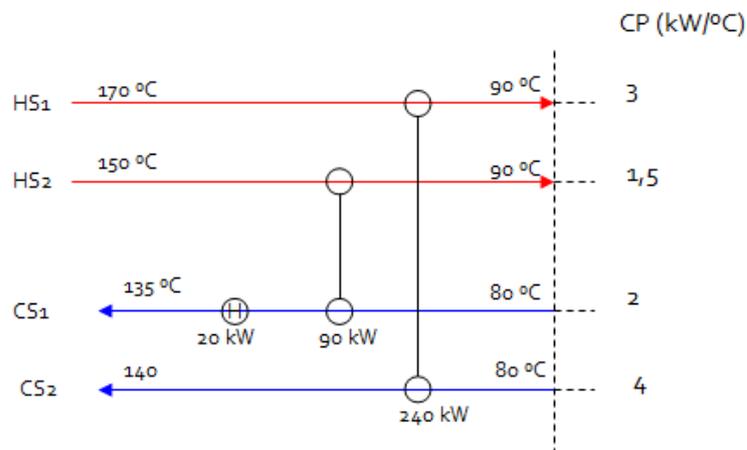


Figura 3.19: Diagrama Grade acima do *pinch* para o problema exemplo.

Uma das restrições para o projecto da rede de permutadores acima do ponto *pinch* é a impossibilidade da permuta entre correntes que se encontre imediatamente acima do ponto *pinch* quando $CP_{hot} < CP_{cold}$. Se trocarmos energia ente HS1 e CS1 imediatamente acima do ponto *pinch*, onde $CP_{hot} > CP_{cold}$, e traçarmos um diagrama temperatura-entalpia para uma possível troca de energia entre estas correntes verificamos uma impraticabilidade de temperaturas uma vez que as correntes durante a permuta atingem diferenças de temperaturas inferiores a ΔT_{min} e a temperatura final da corrente fria é superior à temperatura inicial da corrente quente (impossibilidade termodinâmica), tal como pode ser verificado na Figura 3.20. Isto sucede-se porque o CP da corrente fria, ao ser inferior ao da corrente quente necessita, de uma maior diferença de temperaturas para igualar a energia debitada pela corrente quente durante permuta.

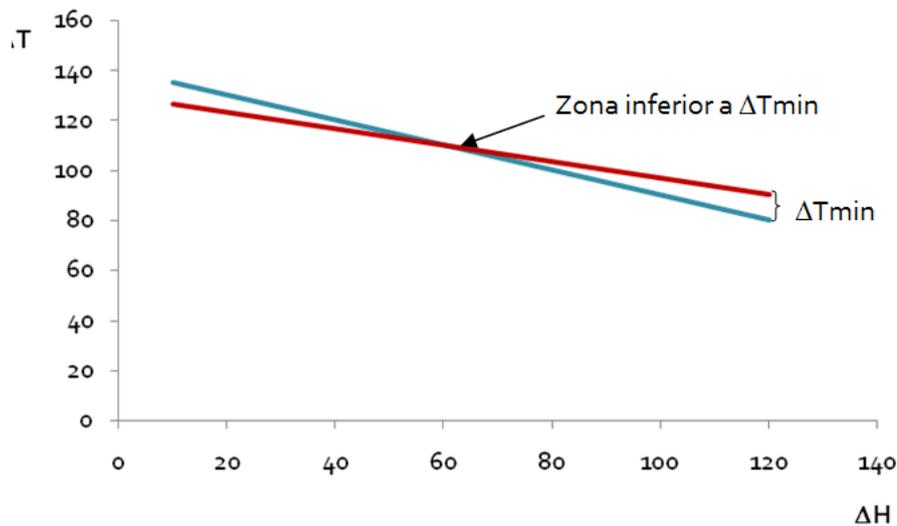


Figura 3.20: Representação da permuta entre HS1 e CS1 imediatamente acima do ponto *pinch*.

Nota: O gráfico foi espelhado para melhorar a visualização da impraticabilidade.

O mesmo já não acontece entre HS1 e CS2 como podemos verificar na Figura 3.21.

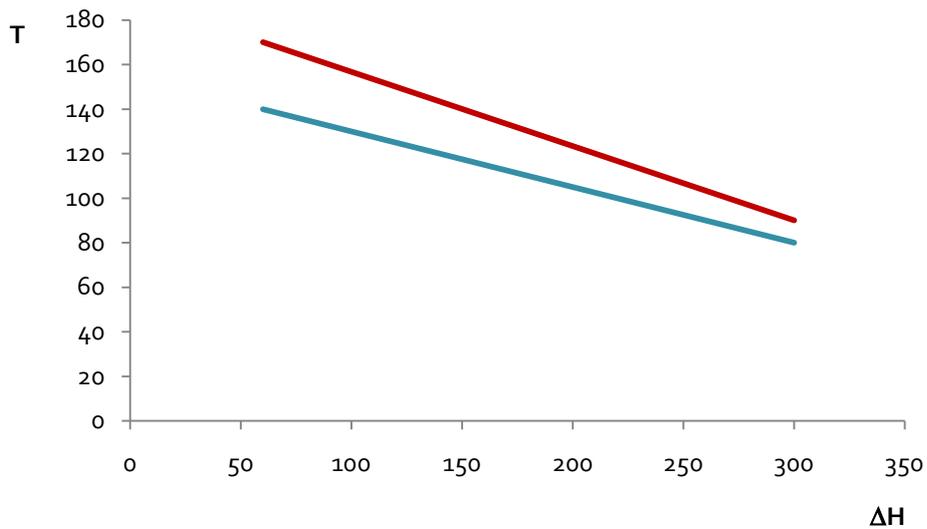


Figura 3.21: Representação da permuta entre HS1 e CS2 imediatamente acima do ponto *pinch*.

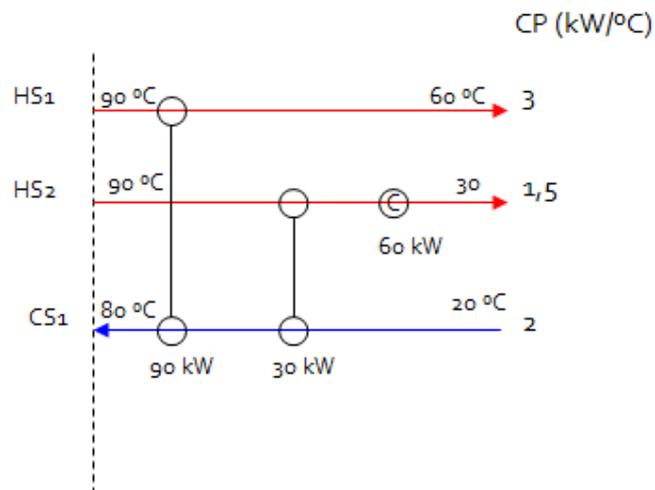


Figura 3.22: Diagrama Grade abaixo do *pinch* para o problema exemplo.

O mesmo critério aplicado imediatamente acima do ponto *pinch* deverá ser aplicado abaixo contudo a restrição a respeitar é agora $CP_{hot} > CP_{cold}$. A causa desta restrição é a impraticabilidade de temperaturas verificada anteriormente.

Na Figura 3.22 existe um permutador de calor que realiza a troca de energia entre HS2 e CS1 quando $CP_{hot} < CP_{cold}$. Isto acontece porque não se trata de uma troca imediatamente adjacente ao ponto *pinch*, não quebrando nenhuma regra de ouro.

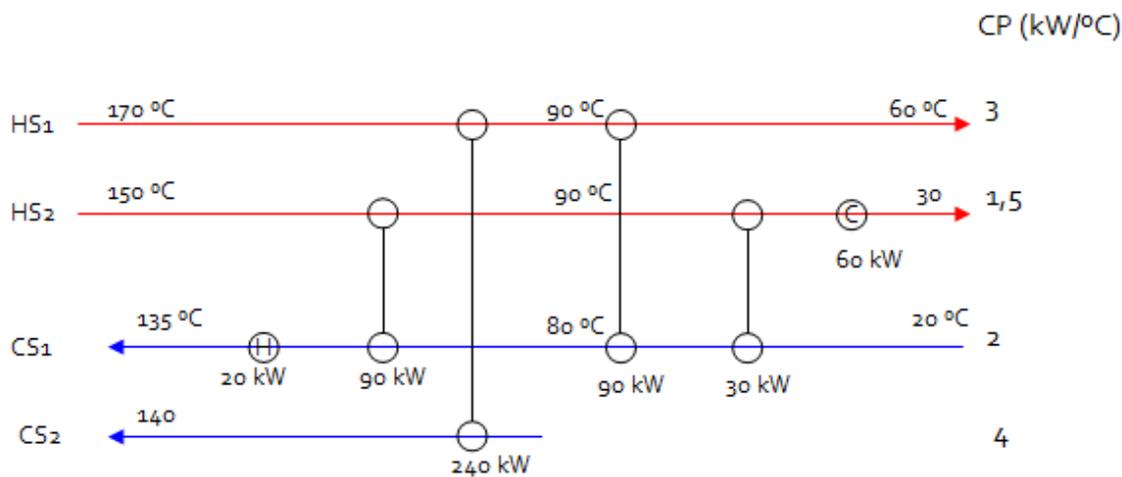


Figura 3.23: Diagrama Grade para o problema exemplo.

Finalizando esta fase, resta apenas o cálculo da área necessária para cada permutador. Isto pode ser feito através da potência que cada permutador necessita. Esta potência pode ser obtida através do diagrama de grades.

3.8.2 Modificação de Sistemas Energéticos Existentes

Para os sistemas energéticos existentes o processo de reprojecto é possível com o recurso a um conjunto de técnicas. As duas técnicas aqui consideradas mais relevantes são:

1. *Pinch Design Method* com a máxima reutilização dos permutadores existentes;
2. Correção da troca de energia através do ponto *pinch*;

O *Pinch Design Method* com a máxima reutilização dos permutadores existentes, deve ser utilizado quando existem poucas recuperações energéticas entre as correntes do processo. O processo de reprojecto é semelhante ao aplicado para sistemas energéticos novos, mas neste tenta-se dar o máximo uso dos permutadores já existentes.

A correção da troca de energia através do ponto *pinch* é realizada nas redes existentes onde já existam muitas recuperações energéticas entre as correntes de processo e onde uma grande modificação da rede seja pouco viável. Neste caso é preferível realizar um conjunto de modificações independentes que corrijam a troca de energia entre as correntes e que de certa forma diminua as necessidades de utilidades externas.



3.9 Síntese do Capítulo

Neste Capítulo foi apresentado a metodologia utilizada no trabalho para a optimização do aproveitamento de condensados de sistemas energéticos. Trata-se do *Pinch Design Method* que permite o conhecimento das metas energéticas através da construção de curvas compostas que representam as correntes quentes e frias.

Para o projecto da rede de permutadores de calor foram apresentadas três regras de ouro:

- Não transferir energia através do ponto *pinch*;
- Não aquecer com utilidades externas abaixo do ponto *pinch*;
- Não arrefecer com utilidades externas acima do ponto *pinch*.

Para além disso identificaram-se os elementos necessários para o projecto da rede de permutadores indicados por Linnhoff e Hindmarsh. Estes elementos são:

- Dividir o problema no ponto *pinch* e projectar cada parte separadamente;
- Projectar do ponto *pinch* para “fora”;
- Imediatamente adjacente ao ponto *pinch*, obedecer às seguintes restrições:
 - $CP_{hot} < CP_{cold}$ (Acima do ponto *pinch*);
 - $CP_{hot} > CP_{cold}$ (Abaixo do ponto *pinch*).
- Maximizar as cargas dos permutadores;
- Fornecer calor externo apenas acima do ponto *pinch*, e refrigerar externamente abaixo do ponto *pinch*.

Foi ainda apresentado um conjunto de técnicas para a modificação de redes existentes.



4 Caso de Estudo

4.1 Sumário

Neste Capítulo procede-se à implementação da metodologia *pinch* num sistema energético industrial existente.

A indústria em estudo dedica-se ao fabrico de alimentos compostos para animais, consumindo vapor através da mistura com a matéria-prima num processo de extrusão e no aquecimento de ar utilizado num processo de secagem do grão. É na fase de troca de calor entre vapor e ar que se forma o condensado que servirá de objecto de estudo neste trabalho. Para além dos condensados, a empresa de cogeração que fornece utilidades a esta indústria passará a fornecer água quente proveniente do arrefecimento dos motores.

O sistema energético actual incorpora um aproveitamento dos condensados, pretendendo-se neste trabalho optimizá-lo e encontrar a melhor integração energética da nova corrente quente, a água quente de cogeração. Duas soluções de optimização são apresentadas.

4.2 Identificação das Correntes e das Utilidades

Para a identificação das correntes tem-se em consideração a técnica de reprojecto através do *Pinch Design Method* de forma a retirar o máximo proveito dos permutadores existentes, procedendo-se à correcção da transferência de energia através do ponto *pinch* desta solução.

No Anexo A é representado o *layout* actual da rede de fluidos térmicos assim como os dados relevantes para esta análise. Os dados foram obtidos através de um balanço energético e mássico do qual se obteve uma variação de 9,19% quando cruzado com o ano de referência.

4.2.1 Correntes Frias

As correntes frias desta indústria identificadas para esta análise são:

- Ar do secador dos alimentos compostos para *pet*;
- Ar do secador dos alimentos compostos para peixes;
- Água de reposição do sistema.

A corrente de ar dos *pet* é extraída da casa das caldeiras que se encontra a uma temperatura superior à temperatura ambiente, o que se deve às perdas energética dos equipamentos lá existentes. A corrente de ar dos peixes é extraída directamente do meio ambiente. Estas duas correntes são aquecidas por vapor através de permutadores. Estes permutadores produzem condensados que são recolhidos num depósito, onde são misturados com uma outra corrente que será referida mais à frente.

A água de reposição é extraída de um poço, servindo para repor os consumos mássicos de vapor nas extrusoras durante o processo produtivo. Esta poderá ser previamente aquecida dirigindo-se depois para o desgasificador e finalmente para a caldeira.

Tabela 4.1: Identificação das correntes frias do caso de estudo.

Correntes Frias	
ID	Designação
CS1	Água fria
CS2	Ar dos peixes
CS3	Ar dos <i>pet</i>

4.2.2 Correntes Quentes

As correntes quentes utilizadas nesta análise são:

- Excesso de energia no depósito de recolha de condensados;
- Água quente proveniente da cogeração.

O depósito de recolha de condensados encontra-se à pressão atmosférica e a uma temperatura média de 95°C. Neste depósito são misturados todos os condensados formados no processo de permuta (entre vapor e ar) e das purgas de condensados formados ao longo de toda a rede térmica. A mistura destes condensados ocorre com uma outra corrente utilizada para realizar um pré-aquecimento ao ar dos *pet*, onde existe um aproveitamento deste excesso de energia (Figura 7.1 do Anexo A).

Este aproveitamento referido é fruto de uma modificação recente. Depois de os condensados se encontrarem a 95°C são reencaminhados para o desgasificador e para a caldeira retomando ao processo.



Segundo a metodologia *pinch*, a extracção de soluções existentes pode levar à omissão de melhorias no sistema energético. Contudo, ao tratar-se de uma solução recente procedeu-se à extracção desta de forma a se obter um máximo aproveitamento dos permutadores existentes, procedendo-se à correcção da transferência de energia através do ponto *pinch*.

A água quente da cogeração é uma corrente nova que se pretende introduzir no sistema energético, o seu custo económico é nulo quando não se considera o custo de utilização dos equipamentos necessários para o seu aproveitamento (tubagens, bombas, etc.). Assim pretende-se retirar o maior proveito desta.

Tabela 4.2: Identificação das correntes quentes do caso de estudo.

Correntes Quentes	
ID	Designação
HS1	Excesso de energia nos condensados
HS2	Água quente cogeração

4.2.3 Utilidades

As utilidades deste problema são o vapor, como utilidade quente, e uma virtual como utilidade fria. O vapor é considerado utilidade uma vez que para aquecer o ar pode ser utilizado outra utilidade diferente.

A água quente da cogeração deve ser utilizada com o maior proveito possível existindo liberdade de selecção da temperatura final. Assim, é escolhido uma temperatura baixa que permita retirar o máximo de energia desta corrente. No decorrer do trabalho observa-se que esta utilidade não atinge a temperatura final seleccionada sendo necessário a refrigeração de forma a fechar o balanço energético. Esta refrigeração é virtual, não sendo contabilizada para a análise energética e económica.

Tabela 4.3: Identificação das utilidades do caso de estudo.

Utilidades	
ID	Designação
H	Vapor
C	Utilidade Virtual

4.3 Extracção dos dados

Para a extracção de dados recorreu-se a um modelo energético criado através de balanços energéticos e mássicos aos equipamentos em análise. Para a realização destes balanços foram feitas medições directas nos equipamentos e o modelo energético foi afinado através do cruzamento com o histórico de consumos e produções do ano de referência. Uma representação deste modelo energético encontra-se no Anexo A, a sua criação serviu ainda para iterar e simular a solução encontrada.

Tabela 4.4: Extracção dos dados para as correntes frias do caso de estudo.

Correntes Frias						
ID	Designação	m (kg/s)	T _s (°C)	T _t (°C)	h _s (kJ/kg)	h _t (kJ/kg)
CS1	Água fria	0,53	15	95	62,94	397,96
CS2	Ar dos peixes	7,22	18	115	291,09	388,58
CS3	Ar dos pet	7,71	35	150	300,19	424,2

Tabela 4.5: Extracção dos dados para as correntes quentes do caso de estudo.

Correntes Quentes						
ID	Designação	m (kg/s)	T _s (°C)	T _t (°C)	h _s (kJ/kg)	h _t (kJ/kg)
HS1	Excesso energia condensados	5,59	95	91,25	397,96	383,26
HS2	Água quente cogeração	7,98	95	30	397,96	126,54

Conhecendo os dados das correntes é possível calcular a capacidade calorífica e entalpia das correntes. Na Tabela 4.6 e Tabela 4.7 encontra-se a capacidade calorífica e entalpia das correntes frias e quentes respectivamente.

Tabela 4.6: Capacidade calorífica e entalpia das correntes frias do caso de estudo.

ID	CP (kW/°C)	ΔH (kW)
CS1	2,21	191,95
CS2	7,26	704,11
CS3	7,78	894,48



Tabela 4.7: Capacidade calorífica e entalpia das correntes quentes do caso de estudo.

ID	CP (kW/°C)	ΔH (kW)
HS1	21,52	85,17
HS2	33,34	2166,84

Os permutadores existentes têm uma capacidade de 326 kW. Contudo apenas existe um aproveitamento de 85,79 kWh_{th}/h dos condensados devido ao acumular de incrustações na superfície de transferência de calor dos permutadores existentes causados por uma má utilização inicial. Para um máximo aproveitamento da capacidade destes permutadores é proposta a limpeza destas incrustações.

Como ambos os permutadores se destinam à transferência de energia entre as mesmas correntes, consideraram-se como um só. O maior permutador tem uma capacidade de 188,37 kW e o menor de 138,30 kW aproximadamente, para uma eficiência de 100%. Esta capacidade encontra-se representada na Figura 7.3.

4.4 Selecção da temperatura mínima óptima

Para a selecção da diferença de temperatura mínima é utilizado como referência os permutadores existentes no aproveitamento do excesso de energia dos condensados. O conjunto dos permutadores teve um custo total de 5.240€, com uma superfície de transferência de calor de 9,22 m², capacidade de 326,7 kW e um coeficiente de transferência de calor de 0,7 kW/(m²K) para permutas entre água e ar. Estes permutadores são tubulares laminados.

Considera-se que o custo total do permutador é composto por um custo fixo e um custo variável. O custo variável é directamente proporcional à superfície de transferência de calor. Define-se o custo fixo como sendo aproximadamente igual a 2.500€ o que implica um custo variável de cerca 297,18 €/m².

O combustível utilizado para a produção de energia térmica nesta indústria é o fuelóleo. No ano de referência o custo médio deste foi de 0,389€/kg + IVA. Considerando que o combustível tem um poder calorífico inferior igual a 41,2 MJ/kg e o rendimento da caldeira igual a 86% procede-se ao cálculo do custo energético através da seguinte expressão:

$$Custo_{MWh_{th}} = \frac{Custo_{combustível}}{\eta_{caldeira} \cdot PCI} = 39,63 \text{ €/MWh}_{th} \quad (4.10)$$

Variando ΔT_{min} na equação 3.6 pode-se definir o diagrama representado na Figura 4.1:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{min} \quad (3.6)$$

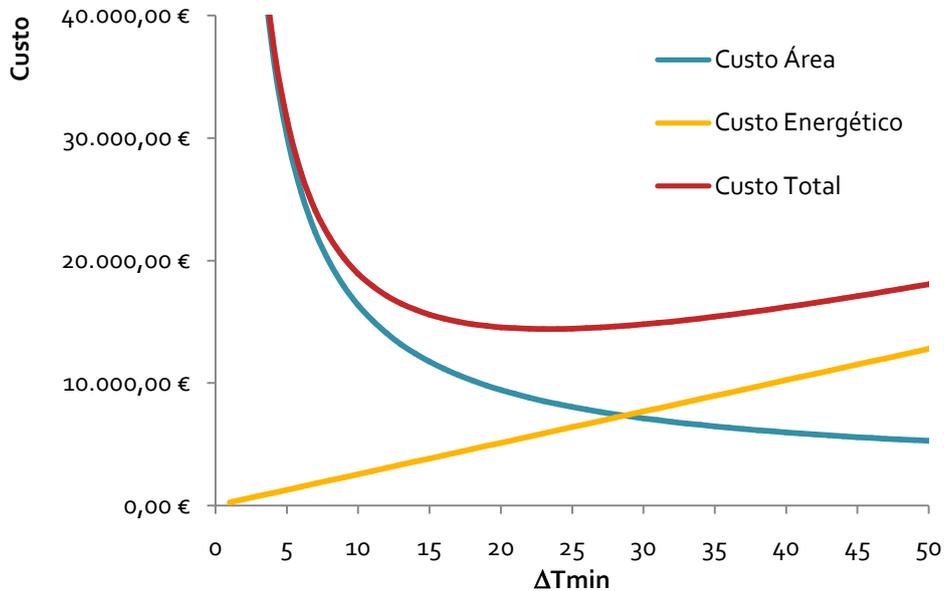


Figura 4.1: Variação do custo com a variação do ΔT_{min} .

Analisando a Figura 4.1 verifica-se que existe um intervalo alargado para a escolha do ΔT_{min} . A diferença de temperatura óptima global é 24°C e considerando uma variação máxima de 10% no custo total é possível considerar o intervalo de escolha de ΔT_{min} como [14;39]. No Anexo B é realizada uma análise de sensibilidade demonstrando quais os factores que afectam a escolha do ΔT_{min} . Esta análise demonstra que a selecção de ΔT_{min} é bastante sensível à variação do coeficiente de transferência de calor, o que influencia na definição das metas energéticas.



4.5 Metas Energéticas

Para a definição das metas energéticas deste problema recorre-se ao *Problem Table* e às curvas compostas. Apresenta-se a seguir um conjunto de tabelas e diagramas para o auxílio da definição das metas:

Tabela 4.8: *Problem Table* para as correntes frias do caso de estudo.

T	ΣCP	ΔH	ΣH
15	2,22	33,29	2833,29
18	2,22	6,65	2839,95
35	9,48	161,09	3001,04
95	17,79	462,54	4068,45
115	15,57	311,41	4379,87
150	8,31	290,99	4670,85

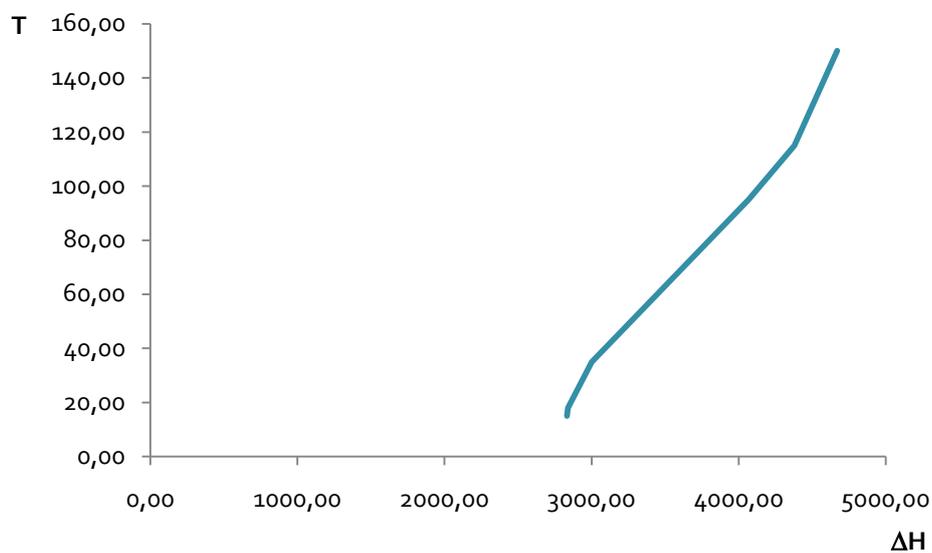


Figura 4.2: Curva composta fria do caso de estudo.

Tabela 4.9: Problem Table para as correntes quentes do caso de estudo.

T	ΣCP	ΔH	ΣH
30	33,32	999,66	999,66
91,25	33,32	2040,97	3040,63
95	55,23	207,13	3247,77

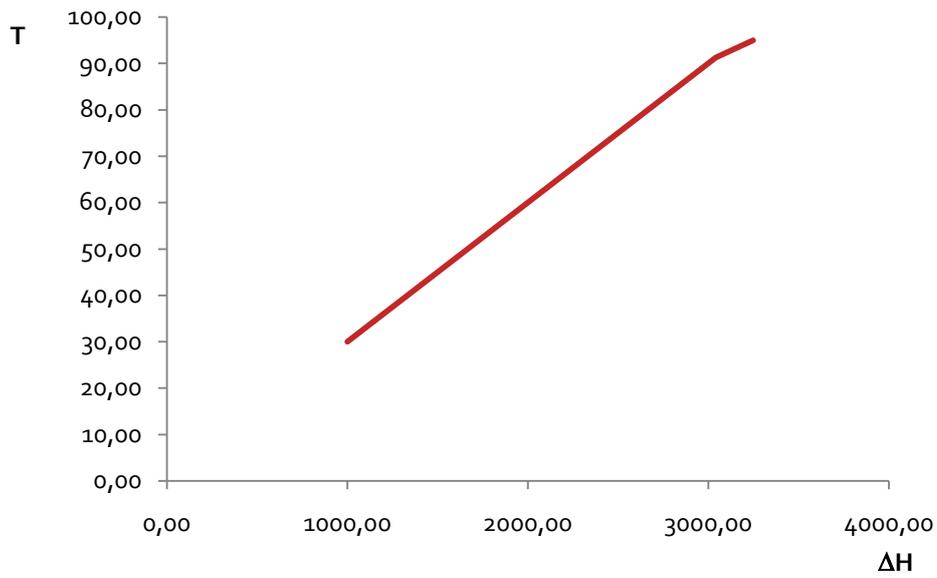


Figura 4.3: Curva composta quente do caso de estudo.

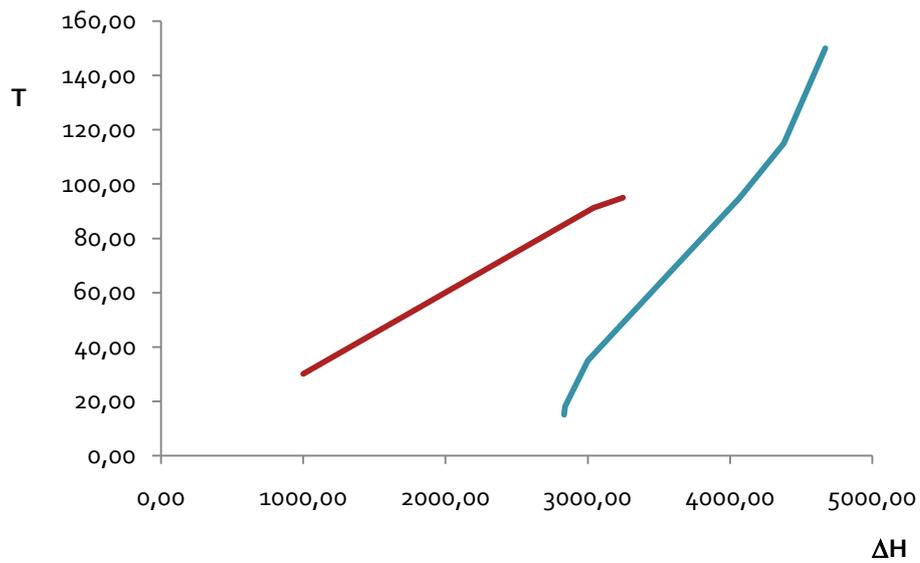


Figura 4.4: Curva composta quente e fria do caso de estudo.



Pela visualização da Figura 4.4 verifica-se que o ponto *pinch* ocorre para 95°C na curva composta quente. Como definido na secção 4.4 o ΔT_{\min} é igual a 24°C, procedendo-se ao deslocamento horizontal da curva composta fria até ponto *pinch* igualar ΔT_{\min} .

Tabela 4.10: Deslocamento horizontal da curva composta fria do caso de estudo

T	ΣCP	ΔH	ΣH
15	2,22	33,29	2475,15
18	2,22	6,65	2481,81
35	9,48	161,09	2642,90
71	17,79	604,86	3247,77
95	17,79	462,54	3710,31
115	15,57	311,41	4021,72
150	8,31	290,99	4312,71

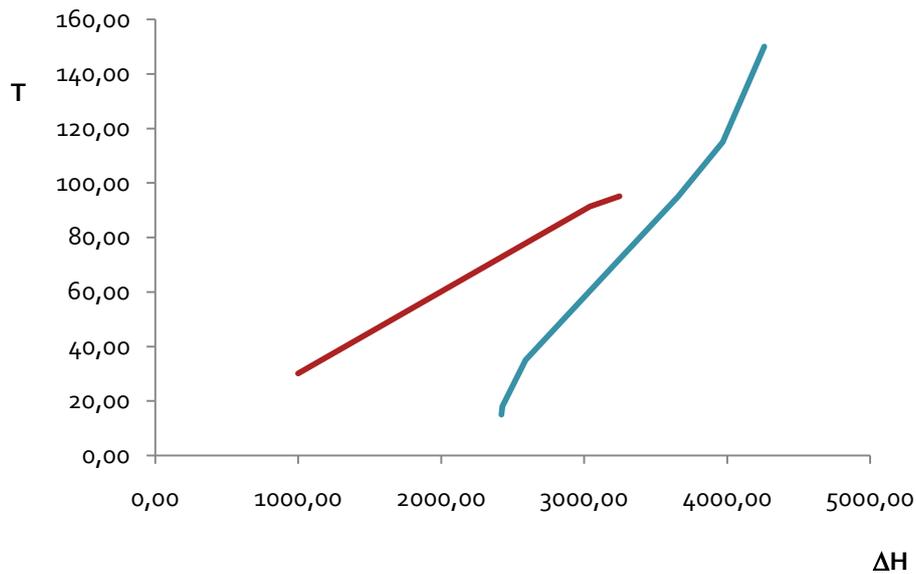


Figura 4.5: Curva composta quente e fria deslocadas até ponto *pinch* igual a 24°C.

A região de integração do problema é definida e corresponde a 825,98 kW (3247,77-2475,15), isto significa que existe um potencial de recuperação de 825,98 kWh_{th}/h. Na situação actual realiza-se a recuperação de aproximadamente 85,79 kWh_{th}/h de energia, ou seja, 10% do potencial de recuperação.

Para a criação da grande curva composta recorre-se à *curva composta deslocada*.

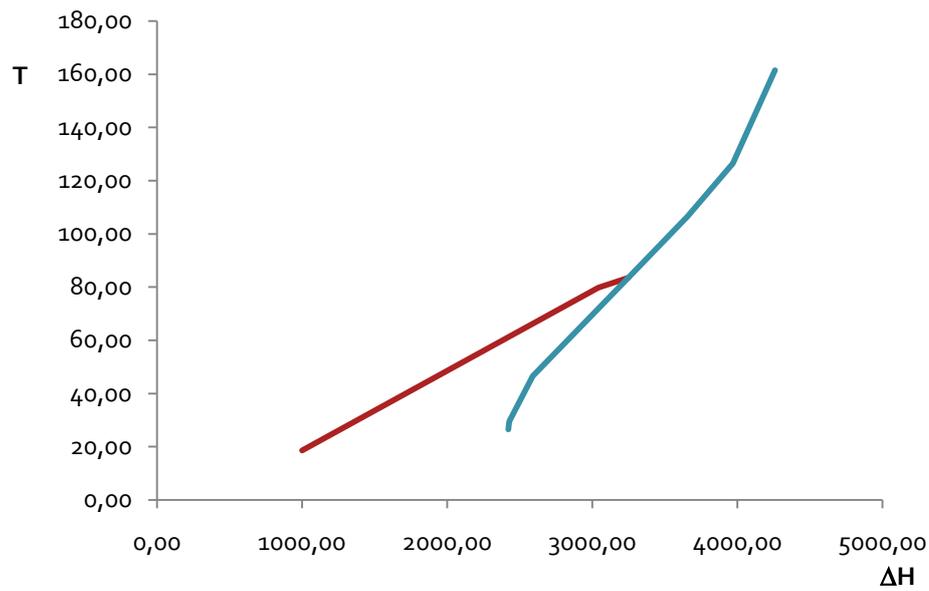


Figura 4.6: Curva composta deslocadas do caso de estudo.

Tabela 4.11: Problem Table para a grande curva composta do caso de estudo.

T_{shifted}	$\Sigma CP_{\text{hot}} - \Sigma CP_{\text{cold}}$	ΔH	ΣH	$\Sigma H - \text{lock pinch}$
18,50	33,32	-616,46	-616,46	1422,12
26,50	33,32	-266,58	-883,03	1155,55
29,50	31,10	-93,31	-976,34	1062,24
46,50	23,85	-405,38	-1381,72	656,86
79,75	15,53	-516,44	-1898,16	140,42
83,50	37,44	-140,42	-2038,58	0,00
106,50	-17,79	409,17	-1629,41	409,17
126,50	-15,57	311,41	-1318,00	720,58
161,50	-8,31	290,99	-1027,01	1011,57

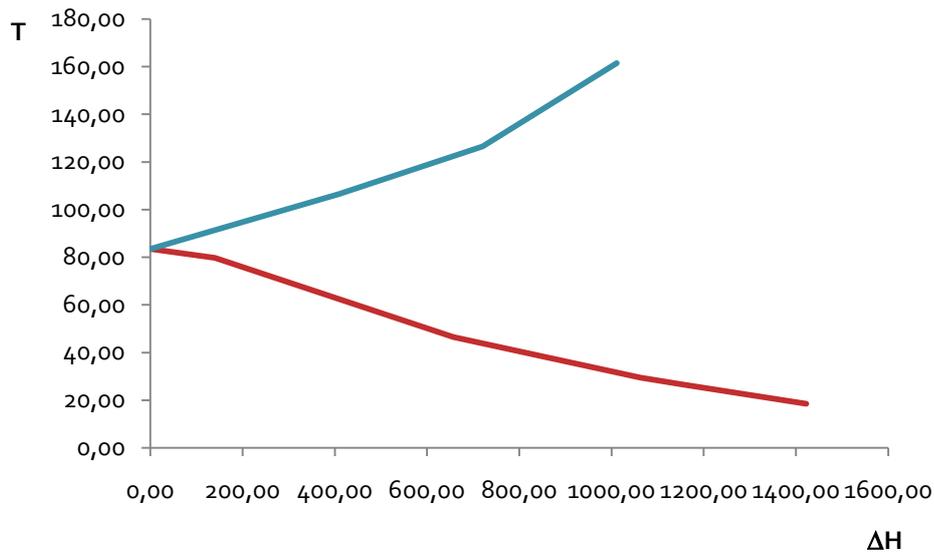


Figura 4.7: Grande curva composta do caso de estudo.

Como se trata do ponto mais à esquerda na grande curva composta o ponto *pinch* terá sido bem localizado. As necessidades mínimas de utilidades obtidas pela curva composta são iguais às obtidas na grande curva composta, como se pode verificar na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Verificação das utilidades mínimas necessárias do caso de estudo.

	CC	GCC
$Q_{h_{min}}$	1011,57	1011,57
$Q_{c_{min}}$	1422,12	1422,12

Como neste caso apenas existe uma utilidade quente e uma utilidade fria a grande curva composta apenas serviu para validar a definição de metas obtidas pelas curvas compostas.

4.6 Síntese da rede

De forma a encontrar a solução óptima do reprojecto de forma mais rápida calcula-se o número mínimo de permutadores necessários, através da equação 3.9:

$$N_{min} = 8$$

4.7 Projecto da rede de permutadores de calor

Como definido na secção anterior, o ponto *pinch* deste problema ocorre a 95°C para as correntes quentes e 71°C para as correntes frias. Apesar da extracção de uma solução existente, verifica-se que não existe transferência de energia através do ponto *pinch*.

Os condensados recolhidos no depósito comportam-se como uma corrente quente, ao perderem energia através de um processo de mistura com uma corrente a 91,25°C (HS1) que se comporta como corrente fria. Os condensados entram em equilíbrio a 95°C, sendo que parte destes funciona como corrente quente, ao transferir energia para o ar dos *pet*, enquanto outra parte comporta-se como corrente fria ao se dirigir para o desgasificador e caldeira.

Esta parte que se dirige para o desgasificador é então aquecida pela utilidade quente disponível. Como apenas se pode recorrer a utilidades quentes para temperaturas superiores a 71°C não existe quebra de nenhuma regra de ouro. Além disso, este aproveitamento energético previne a formação de vapor flash.

Definidas as metas energéticas e conhecido o ponto *pinch* divide-se o problema e projecta-se os diagramas separadamente. O diagrama representado na Figura 4.8 representa o reprojecto do sistema energético acima do ponto *pinch*. Como seria de esperar, devido à inexistência de correntes quentes acima deste ponto, apenas existe o recurso a utilidades.

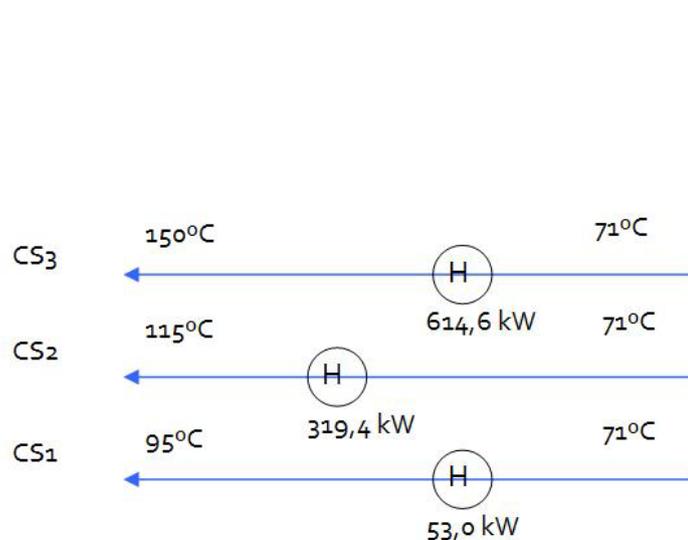


Figura 4.8: Diagrama grade acima do ponto *pinch* do caso de estudo.



Serão agora apresentadas duas propostas distintas para a optimização do diagrama abaixo do ponto *pinch*. Na primeira proposta será respeitado o intervalo de variação pouco significativo do custo total do permutador enquanto para a segunda será escolhido ΔT_{\min} mais baixos para uma máxima integração energética.

Apesar das incrustações nos permutadores existentes que são reaproveitados nesta análise foi calculado as perdas energéticas destes. Com a limpeza destes certamente as perdas irão aumentar, contudo este aumento é desprezado.

4.7.1 Solução proposta 1

A Figura 4.9 representa o reprojecto do sistema energético abaixo do ponto *pinch* para a situação proposta 1.

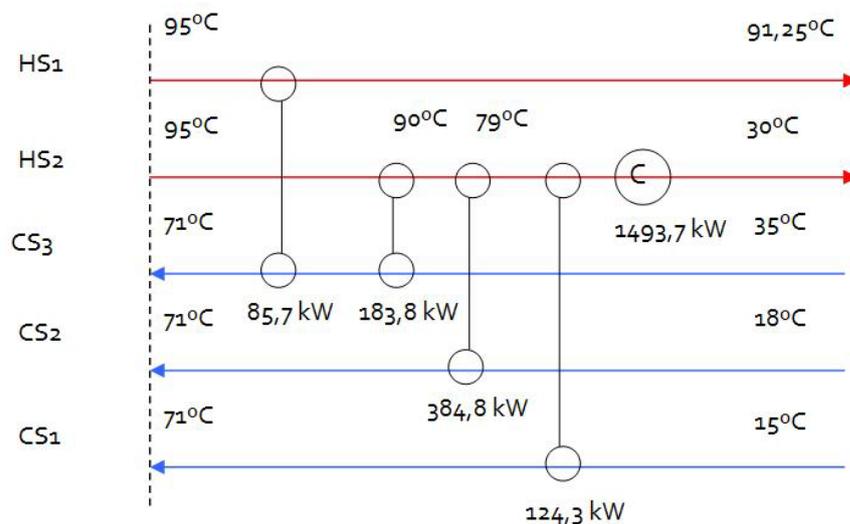


Figura 4.9: Diagrama grade abaixo do ponto *pinch* para a situação proposta 1.

A corrente CS₃, ou o ar dos *pet*, é aquecido pelas correntes HS₁ e HS₂. Estes dois permutadores representam o aquecimento das duas metades da corrente (Figura 7.3).

Na permuta entre HS₂ e CS₂, o ΔT_{\min} é igual a 19°C que é inferior a 24°C. Contudo este continua dentro da zona de variação inferior a 10% do custo total representado na Figura 4.1.

A permuta entre HS₂ e CS₁ acontece para um ΔT_{\min} igual a 9°C. Esta alteração do ΔT_{\min} acontece devido à alteração das condições de permuta. É então necessário o cálculo de um ΔT_{\min}

apropriado para este tipo de permutador. No Anexo C encontra-se o cálculo do ΔT_{\min} óptimo onde se obteve o valor de 8°C.

A utilidade fria, ou refrigeração, da corrente HS2 é virtual como referido na secção 4.2.3, esta utilidade serve apenas para fechar o balanço energético uma vez que a temperatura final de 30°C desta corrente foi definida de forma a poder extrair-se o máximo de energia possível.

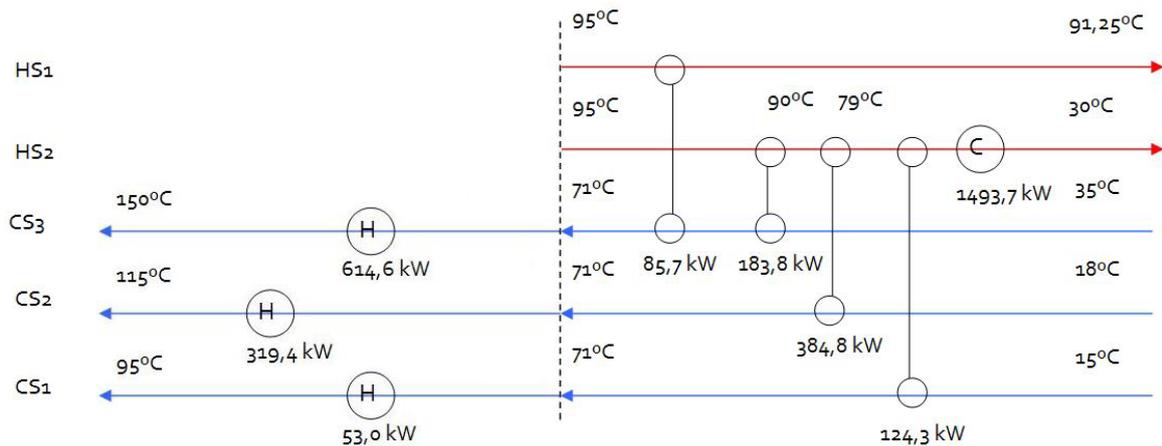


Figura 4.10: Diagrama grade da proposta 1.

Como se pode verificar na Figura 4.10, o número mínimo de permutadores calculado é igual ao obtido na solução apresentada. Trata-se de uma solução com o menor número de equipamentos necessários, ou seja, uma solução aparentemente mais económica.

Como existem mais correntes frias que quentes torna-se impossível garantir o mesmo ΔT_{\min} nas permutas de recuperação de calor para as correntes frias. Assim, procedeu-se à variação deste para que a regra de ouro (não recorrer a utilidades quentes abaixo do *pinch*) não fosse violada.

4.7.2 Situação proposta 2

Uma outra solução terá sido encontrada para ΔT_{\min} mais baixos de forma a se obter uma máxima integração energética. Esta redução da diferença de temperatura mínima irá causar um aumento do custo do permutador, contudo obter-se-á um maior impacto de redução energética.

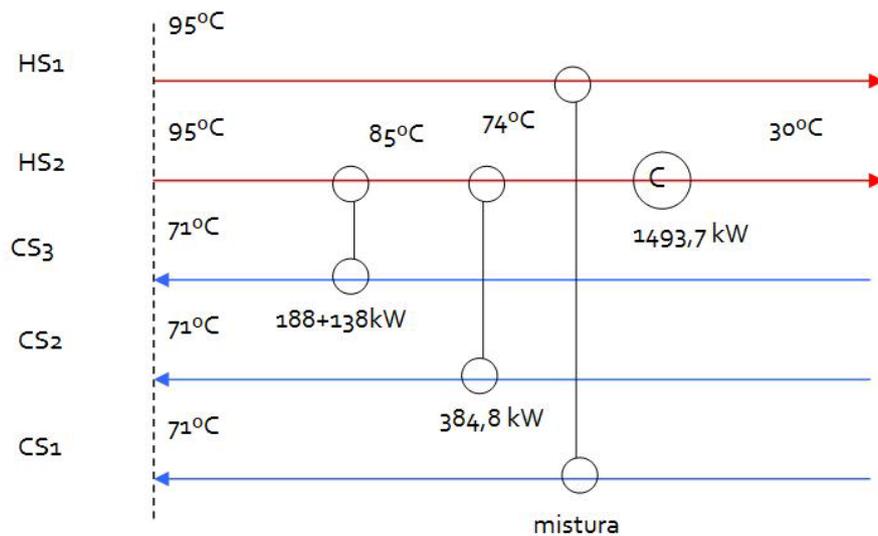


Figura 4.11: Diagrama grande abaixo do ponto *pinch* para a situação proposta 2.

Esta solução apesar de requerer um investimento maior no permutador entre HS2 e CS2 devido á variação da diferença de temperatura mínima que é reduzida para 14°C (contudo continua dentro do intervalo de variação máxima de 10% do custo total) evita o investimento no permutador entre HS1 e CS1 (depósito de condensados e água fria de reposição) que será realizado pela mistura das duas correntes. Assim, existe um permutador virtual que não requer qualquer investimento.

Na situação proposta 1 a diferença de temperatura mínima seleccionada para a permuta entre HS2 e CS2 era de 19°C sendo esta situação, como já referido, de 14°C valor contido no intervalo com variação máxima de 10% do custo total óptimo.

4.8 Simulação das soluções encontradas

Recorrendo ao modelo energético pode validar-se a solução encontrada através de um conjunto de iterações. Os resultados obtidos são semelhantes existindo algumas variações nas cargas permutadas entre as correntes. No Anexo A encontra-se a validação das simulações/iterações através de uma análise energética.

Para ambas as soluções é necessário a aquisição de permutadores de calor. Os dados técnicos dos permutadores necessários a adquirir encontram-se no Anexo D, contudo apenas

para o permutador de placas já que os permutadores tubulares laminados são fabricados por encomenda não existindo dados técnicos padrão.

Com o pré-aquecimento da corrente CS₂ (ar dos peixes) o condensado formado na permuta através do vapor aumenta de temperatura. Isto deve-se ao segundo princípio da termodinâmica que proíbe que este condensado atinja temperaturas inferiores a 71°C, temperatura de entrada da corrente fria.

4.8.1 Situação proposta 1

Para esta situação, com o aumento da temperatura dos condensados há um aumento do excesso de energia existente no depósito de condensados. Além disso, com a limpeza dos permutadores existentes haverá uma transferência da total capacidade que dispõem o que reduz a temperatura de equilíbrio no depósito de condensados para 83,85 °C.

Assim, continua a não existir a quebra das regras de ouro pois os condensados que se dirigem para o desgaseificador e caldeira (onde são sujeitos à utilidade quente) continuam acima de 71°C.

Através de iterações utilizando o modelo energético, obteve-se uma convergência de recuperação de energia de 818,7 kWh_{th}/h, que representam uma variação de 0,88% do valor previsto pelas metas energéticas.

Na Figura 4.12 encontra-se representado o diagrama grade final com as respectivas cargas dos permutadores.

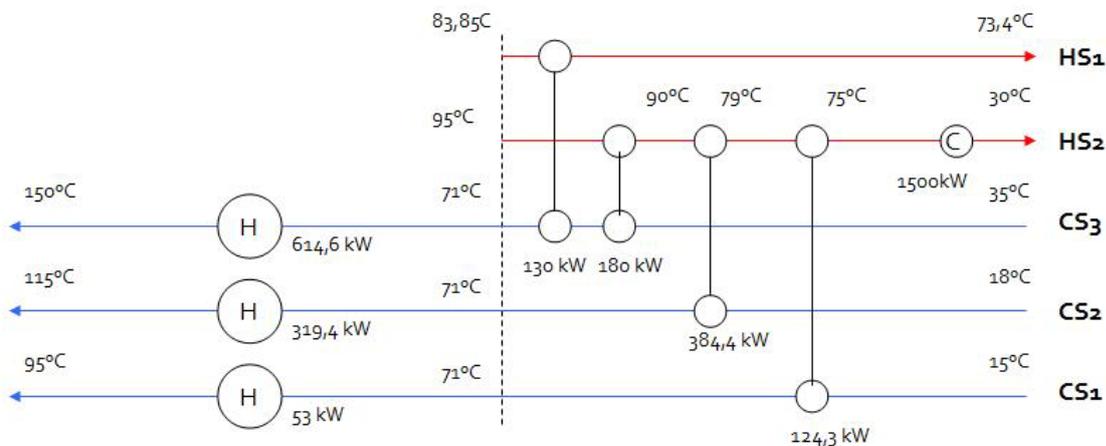


Figura 4.12: Diagrama grade final para a situação proposta 1 do caso de estudo.



Tabela 4.13: Somatório dos recursos na situação proposta 1

ΣH	987 kW
ΣC	1500 kW
ΣHE	818,7 kW

Tabela 4.14: Eficiência da integração energética para a situação proposta 1.

	Situação Actual	Situação proposta 1
Recuperação	85,79	818,70
Eficiência	10,39%	99,12%

Para esta recuperação é necessária a aquisição de dois permutadores:

- Permutador de placas com capacidade de 124,3 kW;
- Permutador tubular laminado com capacidade de 384,4 kW.

Para que seja possível o pré-aquecimento do ar dos peixes deve-se garantir que não existe uma redução significativa do caudal de ar. A solução passa pela aquisição de permutadores tubulares laminados que permitem uma menor perda de carga quando comparados com permutadores de placas.

4.8.2 Situação proposta 2

Para esta solução proposta continua-se a proceder ao aproveitamento máximo dos permutadores existentes para o aquecimento da corrente CS₃ o que aumenta a temperatura acima do ponto *pinch* (74°C) uma vez que a corrente quente apresenta uma maior caudal o que origina numa maior permuta. Assim, é novamente essencial uma diminuição da diferença de temperatura mínima entre HS₂ e CS₂ de forma a garantir que esta (CS₂), no final da permuta, atinja os 71°C.

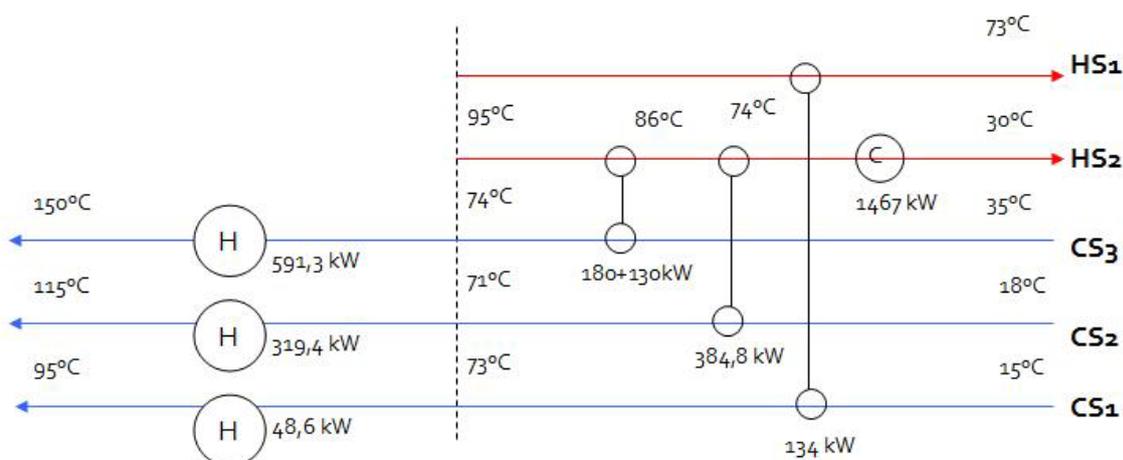


Figura 4.13: Diagrama grade final para a situação proposta 2 do caso de estudo.

Tabela 4.15: Somatório dos recursos na situação proposta 2.

ΣH	959,3 kW
ΣC	1467 kW
ΣHE	828,4 kW

Tabela 4.16: Eficiência da integração energética para a situação proposta 2.

	Situação Actual	Situação proposta 2
Recuperação	85,79	828,40
Eficiência	10,39%	100,29%

Para a proposta 2 é necessário a aquisição de um permutador:

- Permutador tubular laminado com capacidade de 384,8 kW.

As restantes permutas são realizadas pelos permutadores já existentes no pré aquecimento do ar dos *pet* e pela mistura da água de reposição com os condensados formados na rede e recolhidos no depósito de condensados.

Através de iterações utilizando o modelo energético, obteve-se uma convergência de recuperação de energia de 828,4 kWh_{th}/h, obtendo-se uma variação de 0,3% superior ao obtido na definição das metas energéticas. Este aumento deve-se à integração energética das correntes CS₃ e CS₁ para temperaturas superiores à *pinch* (71°C).



Com esta mistura, a temperatura da água no depósito de recolha de condensados ficará em equilíbrio a 73°C, continuando a não existir a quebra da regra de ouro da análise *pinch*, já que estes ao se dirigirem para o desgasificador, encontram-se acima dos 71°C (temperatura mínima para se poder recorrer a utilidades quentes externas).

Esta solução apresenta uma semelhança em relação à proposta 1, nomeadamente na permuta entre HS₂ e CS₂ onde a carga de permuta é igual. Apesar disto, como a temperatura de entrada da corrente quente é inferior para esta situação é necessário um permutador que garanta melhores características de transferência de calor o que tornará o investimento deste superior ao do apresentado na proposta 1.

4.9 Síntese do Capítulo

Neste Capítulo realizou-se a optimização de um sistema energético existente recorrendo-se à metodologia *pinch*. O sistema energético já incorpora uma solução de recuperação de energia entre correntes, contudo com o estudo possibilitou-se a correcção da transferência de energia através do ponto *pinch* dessa solução, obtendo-se duas situações de optimização.

As soluções apresentadas igualam o número de permutadores mínimos calculados na síntese da rede, demonstrando que as soluções se aproximam do óptimo económico. Para estas soluções dois permutadores existentes foram reaproveitados, diminuindo o investimento necessário para a integração energética.

Na definição das metas energéticas observou-se um potencial de recuperação de energia entre correntes de cerca de 825,98 kWh_{th}/h. Através de iterações num simulador da solução, constatou-se uma convergência para 818,7 kWh_{th}/h na situação proposta 1 e de 828,4 kWh_{th}/h na situação proposta 2.

Para a solução proposta 1 é necessária a aquisição de dois permutadores:

- Permutador de placas com capacidade de 124 kW;
- Permutador tubular laminado com capacidade de 384 kW.

Para a solução proposta 2 é necessária a aquisição de um permutador:

- Permutador tubular laminado com capacidade de 384 kW.



5 Discussão de Resultados

5.1 Sumário

Neste Capítulo procede-se à avaliação energética e económica da implementação das propostas obtidas através da análise *pinch*.

A nível energético será definido a redução de consumos em *tep* (toneladas equivalentes de petróleo) e a diminuição do consumo específico. A nível económico será calculado o VAL (valor actual liquido), TIR (taxa interna de retorno) e ROI (tempo de retorno de investimento) da implementação das melhorias.

5.2 Análise Energética

O balanço energético e mássico apresentou uma variação de 9,19% em relação ao ano de referência com um consumo total de 18378 toneladas de vapor.

Para a situação actual verifica-se um consumo de aproximadamente 1 kg de vapor para cada 6,5 kg de água a 15°C no desgasificador associado ao processo de extrusão e de 78,9 kg associado ao processo de secagem (Anexo A). A Tabela 5.1 apresenta os valores para as restantes situações (A diferença de produção de água desarejada entre processo de extrusão e secagem deve-se ao consumo mássico de vapor que implica a introdução de água de reposição que se encontra a 15°C).

Tabela 5.1: Capacidade de produção de água desarejada por kg de vapor consumido associado a cada processo.

kg_{água}/kg_{vapor}	Situação actual	Situação proposta 1	Situação proposta 2
Extrusão	6,5	18,2	19,4
Secagem	78,9	30,9	19,4

Conhecendo o consumo médio mássico de vapor por tonelada produzida é possível calcular a água de reposição anual e respectivo vapor necessário para o aquecimento desta no desgasificador. Este consumo é apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Consumo mássico de vapor nos processos de extrusão durante o ano de referência.

	$t_{\text{produção/ano}}$	$\text{kg}_{\text{vapor/t}}$	$\text{kg}_{\text{vapor/ano}}$
Pet	14353	67,4	967951
Criação	77733	65,5	5087978
Peixes	15774	67,1	1057823
Óleos	-	-	1560000
Fuelóleo	-	-	499200

No processo de extrusão existiu um consumo de aproximadamente 9173 toneladas de vapor no ano de referência. Para a produção de 9173 toneladas de vapor foi necessário um consumo de 1411 toneladas de vapor no desgasificador, o que perfaz um total de 10584 toneladas de vapor associado ao processo de extrusão.

Com a implementação da proposta 1 o consumo de vapor no desgasificador será reduzido para 663 toneladas por ano, o que perfaz um total de 9836 toneladas de vapor por ano. Com a implementação da proposta 2 este consumo é reduzido para 721 toneladas por ano, isto é, um total de 9894 toneladas de vapor por ano associado ao processo de extrusão.

A comparação entre as três situações encontra-se representada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Comparação do consumo de vapor anual no desgasificador para a situação actual e situações propostas.

Consumo mássico (t/ano)	Situação actual	Situação proposta 1	Situação proposta 2
Vapor desgasificador	1510	663	721
Diferença	-	-847	-789

Na situação actual existe um aproveitamento de cerca de 85 $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{h}$ dos condensados para um pré-aquecimento do ar dos *pet*. Com este aproveitamento, o consumo de vapor anual destinado ao aquecimento do ar dos *pet* durante o ano de referência foi de 3879 toneladas. Para o aquecimento do ar dos peixes foi 3915 toneladas.



Nas situações propostas pretende-se aumentar o pré-aquecimento ao ar dos *pet* e aplicar um pré-aquecimento ao ar dos peixes. Na Tabela 5.4 encontra-se representado a comparação entre as três situações (actual e proposta 1 e proposta 2).

Tabela 5.4: Comparação do consumo de vapor no aquecimento dos fluxos de ar ente situação actual e situações propostas.

	Situação actual	Situação proposta 1	Situação proposta 2
Ar dos pet (t/ano)	3879	2916	2809
Ar dos Peixes (t/ano)	3915	1973	1973
Poupança anual (t/ano)	-	-2904	-3011

Realizando a análise ao conjunto de melhorias propostas, é possível a redução de aproximadamente 3751 toneladas de vapor por ano para a proposta 1 e de 3800 para a proposta 2.

Para o ano de referência a cogeração forneceu 42% do vapor consumido, no entanto, a nível contratual, existe um limite mínimo de fornecimento de vapor por hora. Assim, para a análise energética e económica, considerar-se-á que a redução de consumo de vapor é reflectido no produzido pela caldeira da instalação em estudo.

Na caldeira da instalação é consumido 1kg de fuelóleo por cada 15,07kg de vapor produzidos. Este valor é calculado sabendo-se que a eficiência da caldeira é de 86% e se trata de vapor saturado a 8 bar, aplicando a seguinte expressão:

$$\frac{m_{vapor}}{m_{fuel}} = \frac{\eta_{caldeira} \cdot PCI}{(h_t - h_s)} = \frac{0,86 \cdot 41,2 \cdot 10^3}{(2778,1 - 427,5)} = 15,07 \text{ kg}_{vapor} / \text{kg}_{fuel}$$

Onde se iguala a energia libertada pela queima do fuel na caldeira (5.1) com a energia do vapor (3.1):

$$\eta_{caldeira} \cdot \Delta Q_{fuel} = \Delta Q_{vapor}$$

$$\Delta Q_{fuel} = m_{fuel} \cdot PCI \quad (5.1)$$

Tabela 5.5: Redução anual de vapor e fuelóleo para a proposta 1.

Redução de vapor	-3751	t _{vapor} /ano
Redução de fuel	-249	t _{fuel} /ano
Redução energética	-245	tep/ano

Tabela 5.6: Redução anual de vapor e fuelóleo para a proposta 2.

Redução de vapor	-3800	t _{vapor} /ano
Redução de fuel	-252	t _{fuel} /ano
Redução energética	-248	tep/ano

O consumo energético total para o ano de referência foi de 3164 tep, registando-se uma redução de 8% do consumo energético anual com a implementação das medidas aqui anunciadas. O consumo de vapor representou 1549 tep no ano de referência o que perfaz uma redução de aproximadamente 17% deste consumo anual para ambas as soluções propostas

Assumindo uma produção total de 127073 toneladas de alimentos compostos para animais, o consumo específico médio anual é de 29,3 kgep/t. Com a aplicação de uma destas propostas de melhoria, é possível a redução do consumo específico em cerca de 8%, tal como se pode verificar na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Redução do consumo específico da indústria com a aplicação das medidas propostas.

	Situação actual	Situação proposta 1	Situação proposta 2
Produção (t)	107861	107861	107861
tep/ano	3164	2919	2916
k (kgep/t)	29,33	27,06	27,03
Varição		7,74%	7,84%

Tabela 5.8: Comparação do consumo de vapor para vários períodos de tempo.

	Situação actual	Situação proposta 1	Situação proposta 2
t/h	4,97	3,96	3,94
t/dia	70,69	56,26	56,07
t/ano	18378,13	14626,94	14577,78

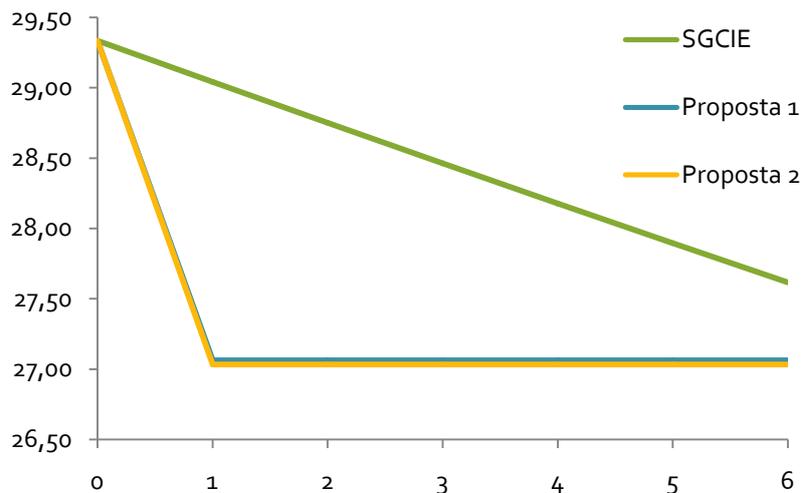


Figura 5.1: Redução do consumo específico durante o período de racionalização de energia previsto no SGCIÉ.

5.3 Análise Económica

No balanço energético da rede de fluidos térmicos a indústria em estudo terá consumido um total de 1549 tep, o que corresponde a 11953 MWh_{th} ou 18378 toneladas de vapor.

A fábrica trabalha nos 5 dias úteis semanais, o que perfaz um total de cerca de 260 dias/ano, logo existe um consumo médio de 45,95 MWh_{th}/dia. Considerando que os processos de produção dos vários alimentos compostos acontecem em simultâneo, existe um consumo de 3,23 MWh_{th}/h. Assim podemos afirmar que em média a indústria labora 14 h/dia.

Tabela 5.9: Comparação do consumo de vapor para vários períodos de tempo.

	Situação actual	Situação proposta 1	Situação proposta 2
MWh _{th} /h	3,23	2,57	2,56
MWh _{th} /dia	45,95	36,57	36,44
MWh _{th} /ano	11953,95	9507,51	9475,56

Na secção 4.4 definiu-se o custo por unidade energética para a rede de fluidos térmicos, este custo é de 39,7 €/MWh_{th} + IVA.

Tabela 5.10: Custo económico para as situações actual e proposta 1 com respectiva diferença para os vários períodos de tempo.

	Situação actual	Situação proposta 1	Diferença
hora	128,01 €	101,88 €	-26,13 €
dia	1.820,81 €	1.449,16 €	-371,65 €
ano	473.735,06 €	376.782,65 €	-96.952,41 €

Tabela 5.11: Custo económico para as situações actual e proposta 2 com respectiva diferença para os vários períodos de tempo.

	Situação actual	Situação proposta 2	Diferença
hora	128,01 €	101,54 €	-26,47 €
dia	1.820,81 €	1.444,29 €	-376,52 €
ano	473.735,06 €	375.516,27 €	-98.218,79 €

Com a aplicação destas medidas propostas na situação 1, existe o potencial de poupança de aproximadamente 97.000€/ano. Contudo para a obtenção desta poupança económica é necessário o investimento em dois permutadores. Estes permutadores são:

- Permutador de placas com capacidade de 124 kW;
- Permutador tubular laminado com capacidade de 384kW.

O permutador de placas com 124 kW de capacidade é da marca ARSOPI, modelo FHLoo-HJ-12, com estrutura decapada e pintada, placas em aço inoxidável AISI 316 de 0,5mm de espessura, juntas em NBR-SI, entradas/saídas roscadas 2" gás em aço inoxidável AISI 316. Este permutador tem um custo de 900€ + IVA.

O permutador tubular laminado com 384kW de capacidade é da marca ARSOPI e é produzido em aço ao carbono, com 105 Tubos em A179, de Ø19.05x2.11x2000mm. Este permutador tem um custo de 15.000€ + IVA.



Para a situação proposta 2, existe o potencial de poupança de aproximadamente 98.000€/ano. O investimento necessário para esta poupança consiste na aquisição de um permutador:

- Permutador tubular laminado com capacidade de 384 kW.

No Anexos C encontram-se os dados técnicos do permutador de placas. Os permutadores tubulares são construídos por encomenda não existindo dados técnicos padrão.

O investimento total em permutadores é de 15.900€ + IVA para a situação proposta 1 e de 25.000€ + IVA para a situação proposta 2. Considerando um tempo de vida útil de 6 anos (já que no permutador de placas, as juntas são o material que se desgasta mais rapidamente e possuem uma vida útil de 6 anos aproximadamente) é possível a construção do diagrama representativo do fluxo de caixa:

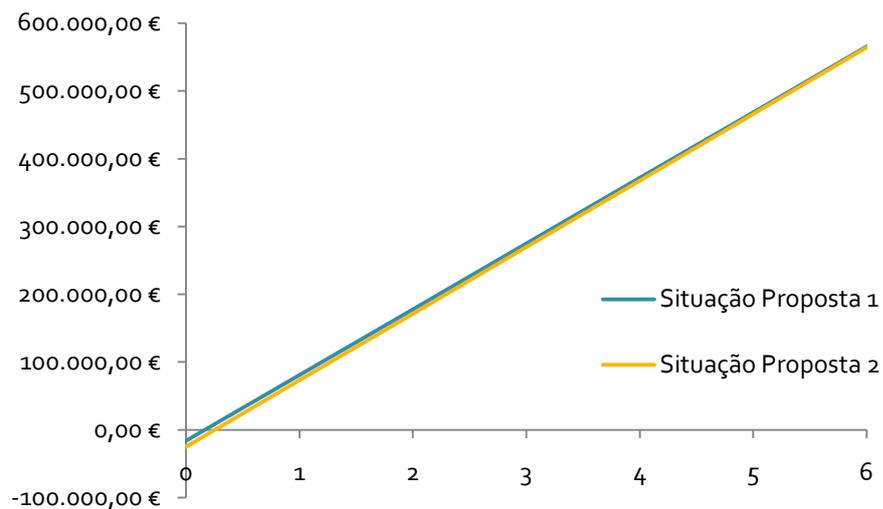


Figura 5.2: Fluxo de caixa para 6 anos para ambas as situações.

Pela visualização da Figura 5.3 verificamos que o tempo de retorno de investimento é realizado em menos de um ano para as duas situações propostas e que o fluxo de caixa é muito semelhante. Construindo um fluxo de caixa para o primeiro ano:

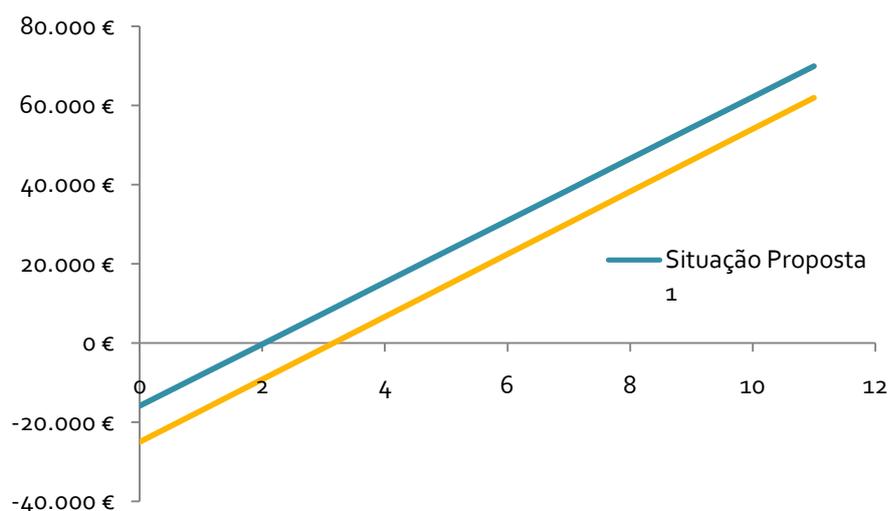


Figura 5.3: Fluxo de caixa para os primeiros 12 meses do projecto para as duas situações propostas.

Tabela 5.12: Fluxo de caixa acumulado para o primeiro ano do projecto para as duas propostas.

Mês	Situação proposta 1	Situação proposta 2
1	-15.900 €	-25.000 €
2	-8.095 €	-17.093 €
3	-291 €	-9.186 €
4	7.514 €	-1.279 €
5	15.319 €	6.628 €
6	23.123 €	14.535 €
7	30.928 €	22.441 €
8	38.732 €	30.348 €
9	46.537 €	38.255 €
10	54.342 €	46.162 €
11	62.146 €	54.069 €
12	69.951 €	61.976 €

Considerando uma taxa de atractividade de 10% é calculado o VAL e TIR para o período de 6 anos dos projectos.



Tabela 5.13: Comparação do ROI, VAL e TIR para as situações propostas.

	Situação Proposta 1	Situação Proposta 2
ROI	2 Meses	3 Meses
VAL	414.641 €	411.973 €
TIR	610%	393%

Segundo os indicadores económicos o melhor projecto a nível económica é a proposta 1.

5.4 Síntese do Capítulo

Neste Capítulo realizou-se uma análise energética e económica às medidas propostas obtidas pela análise *pinch* do caso em estudo.

Com a análise energética, concluí-se que existe o potencial de poupança de 245 tep/ano, que representa uma redução de aproximadamente 1010 kg/h. O consumo específico médio anual reduz de 29,33 kgep/t para 27,04 kgep/t, o que significa uma redução de 7,74%.

O mais recente regulamento para a racionalização de energia na indústria (SGCIE) obriga a uma redução do consumo específico de 6% em 6 anos, para consumidores intensivos de energia. É possível que a indústria em estudo efectue esta redução com a aplicação de uma das soluções aqui apresentadas.

O projecto economicamente mais atractivo (proposta 1) apresenta uma taxa interna de retorno de 610%. O tempo de retorno de investimento é de aproximadamente 2 meses, com uma poupança anual de cerca de 97.000€.



6 Conclusões

6.1 Sumário

Neste Capítulo são apresentadas conclusões gerais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

6.2 Conclusões gerais

Os objectivos propostos foram alcançados, existindo aspectos que poderiam ser melhor explorados, ficando assim como sugestão para trabalhos futuros.

A metodologia *pinch* demonstrou ser de fácil implementação, o que permite uma visualização gráfica do problema que motiva o projectista na busca por modificações na rede com o objectivo de se obter uma solução mais eficiente. As curvas compostas são uma boa ferramenta para o diagnóstico do sistema energético, revelando de forma eficiente, com a ajuda do *Problem Table*, o potencial de integração energética o que permite avaliar as reduções energéticas possíveis no início da resolução do problema.

Contudo, para a definição destas metas energéticas, é necessário a selecção de uma diferença de temperatura mínima, que se provou neste trabalho, ser sensível à selecção das variáveis de que depende. Esta análise de sensibilidade mostra que o coeficiente de transferência de calor é a variável com maior impacto nesta selecção.

A implementação desta metodologia a um caso real revela a existência de um potencial de integração de 825,98 kWh_{th}/h onde apenas 85,17 kWh_{th}/h eram integrados, 10% do potencial. De uma forma sistemática e criteriosa foi possível a elaboração de um conjunto de soluções que torna versátil a metodologia, podendo escolher-se no final a que mais interessar às partes envolvidas. A definição de metas revelou-se uma ferramenta útil informando se é viável continuar o estudo de optimização da rede e visualizando de uma forma mais ou menos precisa o potencial de redução energética.

A aplicação destas medidas permite à indústria cumprir o plano de racionalização de energia imposto pelo SGCIE ao diminuir em 8% o consumo energético específico. Fica demonstrado que a recuperação de energia entre as correntes de processo é um bom sistema

para a racionalização de energia e conseqüentemente na redução da emissão dos gases efeito de estufa.

No caso de estudo apenas existia uma utilidade quente e uma utilidade fria, pelo que não foi possível definir as metas para múltiplas utilidades de forma a diminuir o recurso às mais dispendiosas.

O sistema energético do caso estudo era de relativa simplicidade possibilitando o reprojecto do sistema através de ferramentas computacionais usuais tal como o *Microsoft Excel*. Para sistemas energéticos mais complexos poderá ser necessário o recurso a ferramentas computacionais mais elaboradas, como por exemplo o *PinchExpress* mencionado na bibliografia.

Este trabalho revela que as oportunidades de êxito aumentam quando as buscas por medidas de optimização são abordadas de forma sistemática e criteriosa. É demonstrado ainda que a metodologia *pinch* é bastante versátil e pode ser aplicada no mais variado tipo de redes térmicas.

6.3 Trabalhos futuros

- Realizar um estudo de viabilidade energética e económica da introdução de uma nova utilidade (de produção mais económica) como por exemplo vapor de baixa pressão. Este estudo envolveria o recurso à metodologia termoeconómica na fase inicial do projecto, que permite calcular o custo exergético das utilidades. Finalmente ser possível a realização da definição de metas energéticas para múltiplas utilidades através da análise *pinch*.
- A análise *pinch* permitiu a optimização estática do sistema de aproveitamento de condensados do caso de estudo, podendo recorrer-se à análise termoeconómica para realizar uma optimização dinâmica através da criação de um sistema de supervisão que possibilitasse identificar o aparecimento de defeitos nos equipamentos da rede térmica indicando quando o momento mais económico para proceder à manutenção.
- Através da atribuição de custos exergéticos pela termoeconomia, identificar a proposta mais vantajosa tendo como base o tempo de amortização dos equipamentos envolvidos. Continuação da optimização da proposta identificada pela análise termoeconómica.



6.4 Síntese do Capítulo

Este trabalho revela que as oportunidades de êxito aumentam quando as buscas por medidas de optimização são abordadas de forma sistemática e criteriosa.

A aplicação das medidas obtidas pela análise *pinch* no caso de estudo implica um investimento de cerca de 15.900€ + IVA com um tempo de retorno de investimento de 2 meses, diminuindo em 7,74% o consumo específico da indústria em estudo.

Esta diminuição é reflectida no consumo de vapor que corresponde a aproximadamente menos 245 tep por anos.



Referências

1. **El-Sayed, Yehia M.** *The Thermoconomics of the Energy Conversion*. California : Elsevier, 2003.
2. **Kemp, Ian C.** *Pinch analysis and Process Integration, Second Edition*. s.l. : Elsevier, 2007.
3. **Michael J. Moran, Howard N. Shapiro.** *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. England : Wiley, 2006. 13 978-0-470-03037-0.
4. **al., Frank P. Incropera et.** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. s.l. : Wiley, 2005. 978-0-471-45728-2.
5. **Canada, Natural Resources.** Centre-Varenes. [Online] 2003. [Cited: 2 15, 2009.] <http://cetc-varenes.nrcan.gc.ca>. 0-662-34964.
6. **W.Serth, Robert.** *Process Heat Transfer - Principles and Applications*. s.l. : Elsevier Science & Technology Books, 2007. 0123735882.
7. *Introduction to Pinch Technology*. **March, Linnhoff.** England : Linnhoff March, 1998.
8. Cheresources. *The Chemical Engineers' Resource Page*. [Online] [Cited: Fevereiro 17, 2009.] <http://www.cheresources.com/pinchtech.pdf>.
9. **Bejan, Adrien.** *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems*. London : Kluwer Academic Publishers.
10. *Structural theory as standart for thermoconomics*. **Valero, Antonio, Serra, Luis and Erlach, Berit.** Energy Conversion & Management, Zaragoza : Elsevier, 1999.
11. **Lozano, Miguel-Angel, Valero, Antonio and Serra, Luis.** *Theory of Exergetic Cost and Thermo-economic Optimization*. Zaragoza : s.n.
12. *Structural theory and thermoconomics diagnosis Part I: malfunction and dysfunction analysis*. **Valero, Antonio, Serra, Luis and Torres, César.** Energy conversion & Management, Zaragoza : Elsevier, 2002.
13. *Structural theory and thermo-economic diagnosis Part II: Application to an actual power plant*. **Valero, Antonio, et al.** Energy Conversion & Management, Zaragoza : Elsevier, 2002.
14. *Optimal synthesis of heat exchanger networks involving isothermal process streams*. **José M. Ponce-Ortega, Arturo Jiménez-Gutiérrez, Ignacio E. Grossmann.** Computers & Chemical Engineering, Celaya, Mexico : ScienceDirect, 2007.
15. *Pinch design method in the case of a limited number of process streams*. **Pedrag Raskovic, Sreten Soitljovic.** Energy, Serbia : Elsevier, 2007.
16. *Pinch analysis revisited: New ruler for utility targeting*. **Castier, Marcelo.** Applied Thermal Engineering, Brazil : Elsevier, 2006.

17. *Use of advanced composite curves for assessing cost-effective HEN retrofit I: Theory and concepts.* **R. Nordman, T. Berntsson.** Applied Thermal Engineering, Sweden : Elsevier, 2008.
18. **Smith, Robin.** *Chemical Process Design and Integration.* University of Manchester : John Wiley, 2005. 0-471-48680-9.
19. **Bealing, Chris.** *Optimal Hydrogen Output.* United Kingdom : Linnhoff March Ltd.
20. **Brouckaert, C.J.** *The Application of Pinch Analysis to the Rational Management of Water and Effluent in a Industrial Complex.* Durban : s.n.
21. *On the thermoeconomics approach to the diagnosis of the energy system malfunctions Part I: the TADEUS problem.* **Valero, Antonio, et al.** Energy, Zaragoza : Elsevier, 2004.
22. *On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions Part II: Malfuncion definitions and assessment.* **Valero, Antonio, et al.** Energy, Zaragoza : Elsevier, 2004.
23. *Accuracy level in thermoeconomic diagnosis of energy systems.* **Verda, Vittorio.** Energy, Torino : Elsevier, 2006.
24. *The effects of the control system on the thermoeconomic diagnosis of a power plant.* **Verda, Vittorio, Serra, Luis and Valero, Antonio.** Energy, s.l. : Elsevier, 2004.
25. *The dissipation temperature: a tool for the analysis of malfunctions in thermomechanical systems.* **Royo, Javier, Valero, Antonio and Zaleta, Alejandro.** Zaragoza : Pergamon, 1997.
26. *Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics.* **Tsatsaronis, George.** Energy, Berlin : Elsevier, 2007.
27. *On thermoeconomics of energy systems at variable load conditions: Integrated optimization of plant design and operation.* **Piacentino, A. and Cardona, F.** Energy Conversion & Management, Palermo : Elsevier, 2007.
28. **Bell, Kenneth, et al.** *Heat Exchanger Design Handbook.* s.l. : Verlag GmbH, 1983.



7 Anexos

7.1 Anexo A

7.1.1 Rede de fluidos térmicos actual

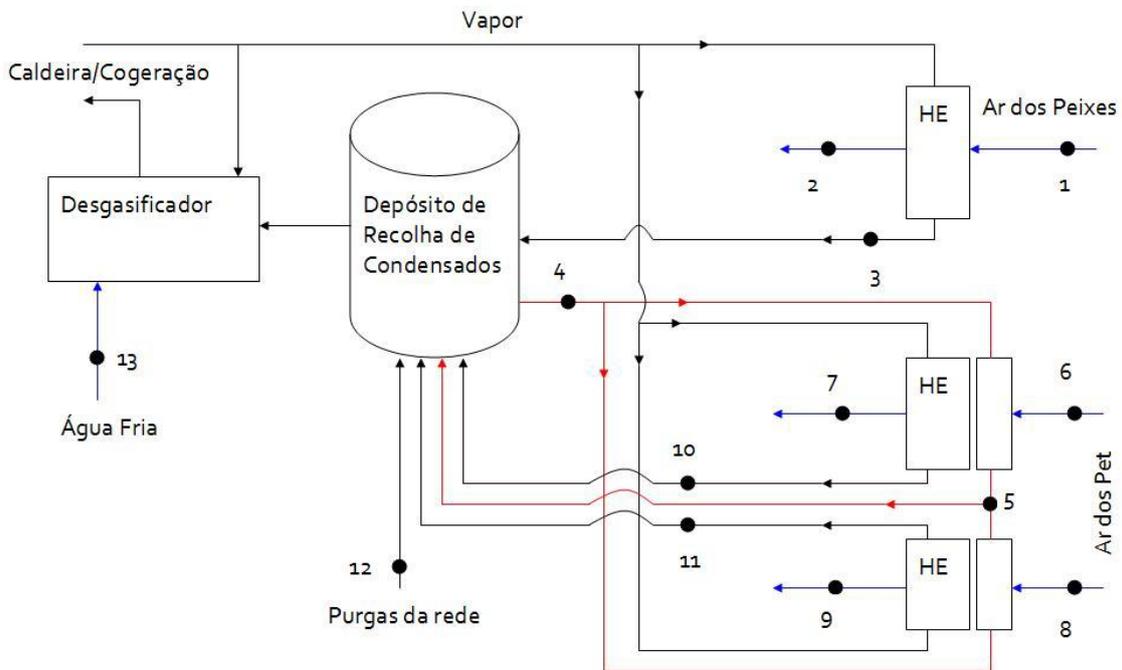


Figura 7.1: *Layout* da rede de fluidos térmicos actual do caso de estudo.

7.1.1.1 *Extracção de dados do balanço energético*

Tabela 7.1: Dados Relevantes dos pontos representados no *layout* (Figura 7.1) do caso de estudo.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	T °C	Composição	h (kJ/kg)
1	26002	18	Ar	292,46
2	26002	115	Ar	391,10
3	1034	57	Água	243,30
4	20118	95	Água	397,96
5	20118	91,25	Água	382,34
6	13877	35	Ar	309,54
7	13877	150	Ar	426,38
8	13877	35	Ar	309,54
9	13877	150	Ar	426,38
10	732	167	Água Saturada	699,00
11	732	167	Água Saturada	699,00
12	66,65	179,91	Água Saturada	763,22
13	2053,85	15	Água	62,94

Todos os valores da Tabela 7.1 foram levantados através de equipamentos de monitorização com excepção do caudal das purgas de condensados formados na rede (ponto 12) tratando-se da incógnita que fecha o balanço energético e mássico.

7.1.1.2 Balanço energético nos permutadores vapor-ar

Utilizando a Figura 7.2 como referência procedeu-se ao cálculo das perdas e respectiva eficiência da permuta entre vapor e ar.

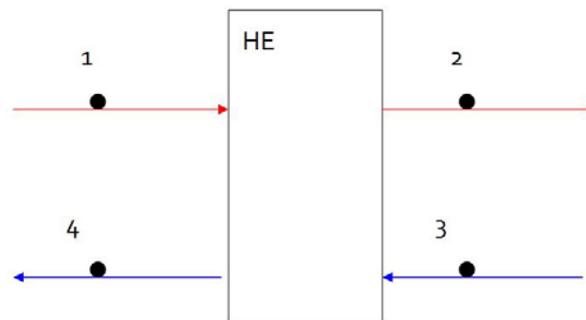


Figura 7.2: Diagrama representativo de um permutador.

Para a permuta entre vapor e ar dos peixes é possível construir a seguinte tabela:

Tabela 7.2: Características da permuta vapor-ar dos peixes para a situação actual.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	h (kJ/kg)
1	1034	2778,10
2	1034	243,00
3	26002	292,42
4	26002	389,94

$$\dot{Q}_{vapor} = \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{ar} \cdot (h_4 - h_3) + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{Q}_{perdas} = 86488,43 \frac{kJ}{h} = 24,02 kWh_{th}/h$$

O mesmo raciocínio pode ser seguido para o permutador de vapor-ar dos *pet*:



Tabela 7.3: Características da permuta vapor-ar dos *pet* para a situação actual.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	h (kJ/kg)
1	1464	2778,10
2	1464	699,00
3	27753,9	321,90
4	27753,9	425,12

Nota: O ponto 3 verifica-se após o pré-aquecimento realizado pelo aproveitamento dos condensados.

$$\dot{Q}_{vapor} = \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{ar} \cdot (h_4 - h_3) + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{Q}_{perdas} = 77292 \frac{kJ}{h} = 21,47 kWh_{th}/h$$

Para o permutador que realiza o aproveitamento de condensados no pré-aquecimento do ar dos *pet*:

Tabela 7.4: Características da permuta condensados-ar dos *pet* para a situação actual.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	h (kJ/kg)
1	20119	397,69
2	20118	382,34
3	27753,9	309,5
4	27753,9	318,6

$$\dot{Q}_{vapor} = \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{ar} \cdot (h_4 - h_3) + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{Q}_{perdas} = 57816 \frac{kJ}{h} = 16,06 kWh_{th}/h$$

Este valor de perdas energéticas no permutador que realiza o aproveitamento de condensados (16,06 kWh_{th}/h) será considerado constante após a limpeza de incrustações de forma a se proceder a uma aproximação do aproveitamento efectivo que se poderá realizar

através destes. Assim, da capacidade total de 326 kW do conjunto de permutadores, apenas existirá uma transferência equivalente a 310 kW para a corrente fria.

7.1.1.3 Balanço energético e mássico do depósito de condensados na situação actual

Para fechar o balanço energético e mássico, considera-se que a perda de energia através das paredes do depósito de recolha de condensados é nula. O valor do caudal das purgas na linha é desconhecido sendo a incógnita que fecha o balanço.

Considerando nulo o trabalho e a variação da energia interna pode-se afirmar:

$$\dot{Q}_{Entrada} = \dot{Q}_{Saída}$$

$$\dot{Q}_{Entrada} = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_{12} \cdot h_{12}$$

$$\dot{Q}_{Saída} = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_{desg} \cdot h_{desg} = \dot{m}_4 \cdot h_4 + (\dot{m}_3 + \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} + \dot{m}_{12}) \cdot h_{desg}$$

Igualando as duas expressões obtém-se:

$$\dot{m}_{12} = 66,65 \text{ kg/h}$$

Como referido anteriormente, este valor é superior ao calculado, de forma a satisfazer as perdas energéticas através das paredes do depósito.

Na Figura 7.3 é representado o aproveitamento de condensados com a identificação da capacidade de cada permutador de calor. A capacidade total dos permutadores é de 326 kW, enquanto o aproveitamento energético nestes é de apenas 85 kWh_{th}/h. Isto deve-se a uma má utilização inicial que envolveu a sucção do ar de zonas muito poeirentas causadas pela proximidade de silos que desperdiçam farinhas.

Este mau procedimento terá sido eliminado, alterando-se a zona de sucção para a casa das caldeiras onde a temperatura de entrada do ar se encontra a 35 °C. Contudo, as incrustações na superfície de transferência de calor não terão sido removidas encontrando-se os permutadores com baixa eficácia de transferência de calor.



Figura 7.3: Representação do sistema de aproveitamento de condensados actual e respectiva capacidade dos permutadores no aquecimento do ar dos alimentos compostos para *pet*.

Como os permutadores se destinam ao mesmo fim e existindo no final a mistura dos dois fluxos de ar, serão considerados com um só para efeito de cálculo. Apesar da diferença de capacidade dos permutadores, o caudal de ar que os atravessa é igual.

7.1.1.4 Balanço energético no desgasificador

Na situação actual entra água no desgasificador a 15°C e sai água desarejada a 102°C. Para este aquecimento existe o consumo de vapor que borbulha dentro do depósito. Para calcular a massa de água que cada kg de vapor tem a capacidade de aquecer até aos 102°C podemos utilizar a seguinte expressão:

$$\frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{vapor}}} = \frac{(h_{\text{vapor}} - h_{\text{desgasificador}})}{(h_{\text{desgasificador}} - h_{\text{água}})} = \frac{(2778,1 - 427,5)}{(427,5 - h_{\text{água}})} \quad (7.1)$$

Como a entalpia da água fria é de 62,94 kJ/kg origina em 6,5 kg de água fria por kg de vapor.

Contundo, existe um aproveitamento dos condensados para o desgasificador. Estes condensados apresentam uma entalpia específica de 397,69 kJ/kg. Resolvendo a equação 7.1 obtém-se uma capacidade de produção de água desarejada de 78,9 kg de condensados por kg de vapor.



7.1.2 Rede de fluidos térmicos proposta 1

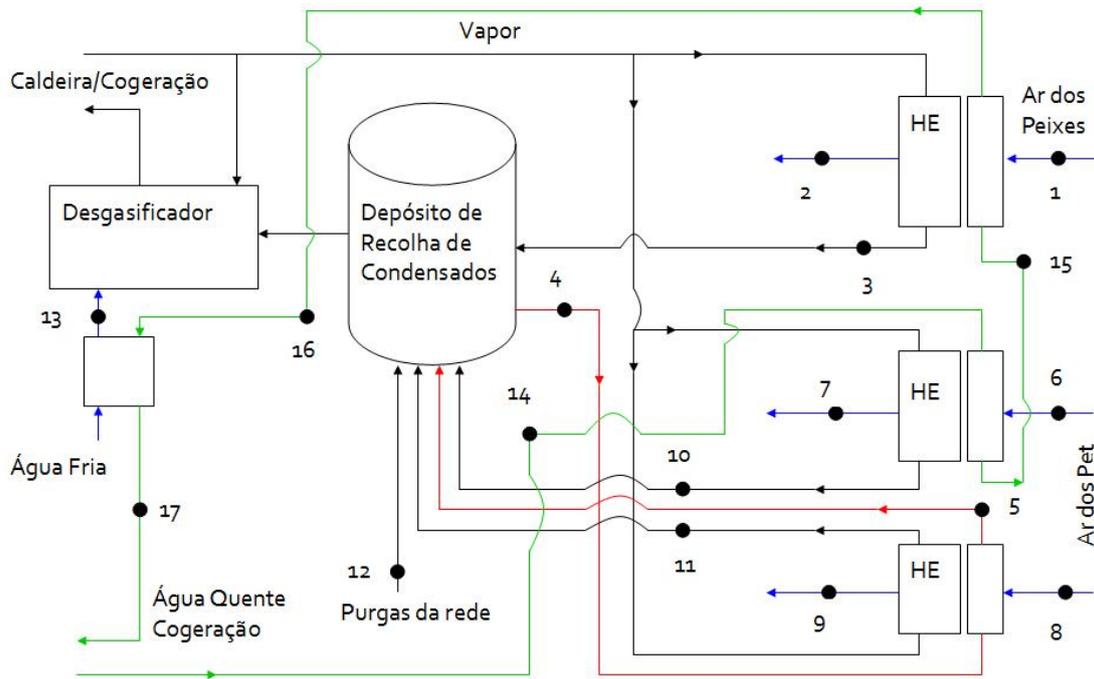


Figura 7.4: *Layout* da rede de fluidos térmicos proposta 1 do caso de estudo.

7.1.2.1 Extração de dados da simulação no modelo energético

Tabela 7.5: Dados Relevantes dos pontos representados no *layout* proposto 1 (Figura 7.4) do caso de estudo.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	T °C	Composição	h (kJ/kg)
1	26002	18	Ar	292,46
2	26002	115	Ar	391,10
3	521,28	98	Água Saturada	406,43
4	10059	83,85	Água	351,33
5	10059	73,43	Água	307,66
6	13877	35	Ar	309,54
7	13877	150	Ar	426,38
8	13877	35	Ar	309,54
9	13877	150	Ar	426,38
10	550	167	Água Saturada	699,00
11	550	167	Água Saturada	699,00
12	66	179,91	Água Saturada	763,22
13	2054,92	71	Água	298,2
14	28740	95	Água	397,69
15	28740	90,29	Água	378,31
16	28740	78,79	Água	330,12
17	28740	74,77	Água	313,30

As perdas energéticas nos permutadores de vapor/ar consideram-se constantes, isto é, iguais para a situação actual e proposta, apesar do aumento da temperatura de saída do permutador dos peixes (ponto 3) que origina um pequeno aumento de perda energética aqui desprezada. Assim, é possível calcular a redução no consumo de vapor:

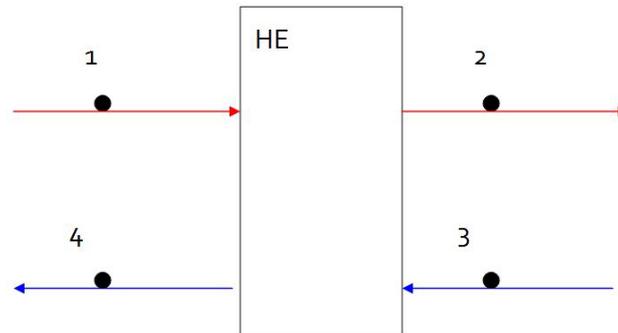


Figura 7.5: Diagrama representativo de um permutador.

Para a permuta entre vapor e ar dos peixes é possível construir a seguinte tabela:

Tabela 7.6: Características da permuta vapor-ar dos peixes para a situação actual.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	h (kJ/kg)
1	?	2778,10
2	?	406,43
3	26002	345,72
4	26002	389,94

Nota: Considera-se o aumento da temperatura de saída do condensado (ponto 2) a uma temperatura superior devido a uma restrição termodinâmica referida mais á frente.

$$\dot{Q}_{vapor} = \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{ar} \cdot (h_4 - h_3) + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} = 521,28 \text{ kg/h}$$

O mesmo raciocínio pode ser seguido para o permutador de vapor-ar dos pet:



Tabela 7.7: Características da permuta vapor-ar dos *pet* para a situação actual.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	h (kJ/kg)
1	?	2778,10
2	?	699,00
3	27753,9	345,72
4	27753,9	425,12

$$\dot{Q}_{vapor} = \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{ar} \cdot (h_4 - h_3) + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} = 1100,57 \text{ kg/h}$$

7.1.2.2 Balanço energético e mássico do depósito de condensados na situação proposta 1

Nesta proposta procede-se ao aumento do aproveitamento de energia do depósito de condensados de 85 kWh_{th}/h para 138 kWh_{th}/h para um máximo aproveitamento do permutador existente. Com este aumento, irá existir uma diminuição da temperatura no depósito de recolha de condensados de 95°C (situação actual) para 83,85°C (situação proposta).

O mesmo procedimento realizado para o balanço energético e mássico do depósito de recolha de condensados para a situação actual, é realizado para a situação proposta 1.

Na permuta entre vapor e o ar dos peixes, a temperatura de saída do fluido quente terá de aumentar na situação proposta, o que se deve a uma restrição termodinâmica (segundo principio da termodinâmica). A temperatura de saída do fluido quente (vapor), nunca poderá ser inferior a 71°C, temperatura a que o ar entra no permutador. Para calcular esta temperatura recorreu-se à eficácia da transferência de calor do permutador, que para a situação actual é:

$$\eta = \frac{T_{vapor} - T_3}{T_{vapor} - T_1} = \frac{179,91 - 58}{179,1 - 18} = 0,75$$

Admitindo que esta eficácia será igual para a situação proposta, a temperatura do ponto 3 será:

$$T_{3_nova} = -(\eta \cdot (T_{vapor} - T_1) - T_{vapor}) = -(0,75 \cdot (179,91 - 69) - 179,91) = 98 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este aumento de temperatura do condensado formado na permuta entre o ar dos peixes e o vapor, aumenta o excesso de energia no depósito de recolha de condensados, o que permite um maior aproveitamento energético através da corrente 4-5. O mesmo não se sucede no permutar de vapor-ar dos *pet*, uma vez que este funciona como condensador existindo apenas libertação de calor latente.

$$\dot{Q}_{Entrada} = \dot{Q}_{Saída}$$

$$\dot{Q}_{Entrada} = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_{12} \cdot h_{12}$$

$$\dot{Q}_{Saída} = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_{desg} \cdot h_{desg} = \dot{m}_4 \cdot h_4 + (\dot{m}_3 + \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} + \dot{m}_{12}) \cdot h_{desg}$$

Igualando as duas expressões obtém-se:

$$\dot{m}_{12} = 65,92 \text{ kg/h}$$

Utilizando o modelo energético para realizar iterações da solução obtém-se uma convergência do caudal de purgas na rede para 65,58 kg/h, valor bastante próximo do obtido para a situação actual (66,65kg/h).

Este caudal de purgas é o valor mínimo necessário quando as perdas de energia através das paredes do depósito são nulas.

7.1.2.3 Balanço energético no desgasificador

Na situação proposta 1 entra água no desgasificador a 71°C e sai água desarejada, novamente) a 102°C. Aplicando a equação 7.1 verifica-se que existe uma capacidade de produção de 18,2 kg de água desarejada por kg de vapor (associado ao processo de extrusão). Contudo, os condensados que se dirigem para o desgasificador, apresentam uma entalpia específica de 351,33 kJ/kg. Resolvendo a equação 7.1 obtém-se uma capacidade de produção de água desarejada de 30,9 kg de condensados por kg de vapor.



7.1.3 Rede de fluidos térmicos proposta 2

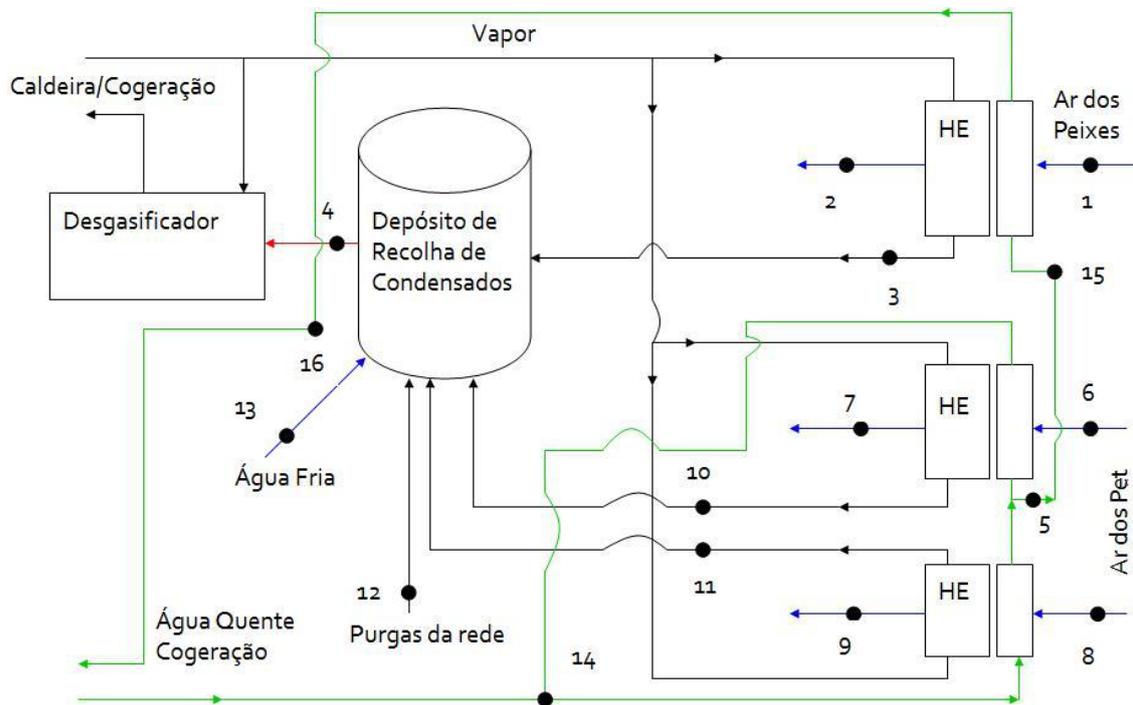


Figura 7.6: *Layout* da rede de fluidos térmicos proposta 2 do caso de estudo.

7.1.3.1 Extração de dados da simulação no modelo energético

Tabela 7.8: Dados Relevantes dos pontos representados no *layout* proposto 2 (Figura 7.6) do caso de estudo.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	T °C	Composição	h (kJ/kg)
1	26002	18	Ar	292,46
2	26002	115	Ar	391,10
3	521,28	98	Água Saturada	406,43
4	3723,99	73,05	Água	306,08
5	28740	85,95	Água	360,11
6	13877	35	Ar	309,54
7	13877	150	Ar	426,38
8	13877	35	Ar	309,54
9	13877	150	Ar	426,38
10	530	167	Água Saturada	699,00
11	530	167	Água Saturada	699,00
12	65,91	179,91	Água Saturada	763,22
13	2054,88	15	Água	62,94
14	28740	95	Água	397,69
15	28740	85,95	Água	360,11
16	28740	74,44	Água	311,92

Mais uma vez, as perdas energéticas nos permutadores de vapor/ar consideram-se constantes, isto é, iguais para a situação actual e proposta, como o aumento da temperatura de saída do permutador dos peixes (ponto 3) é originado num pequeno aumento de perda energética, contudo este é desprezável.

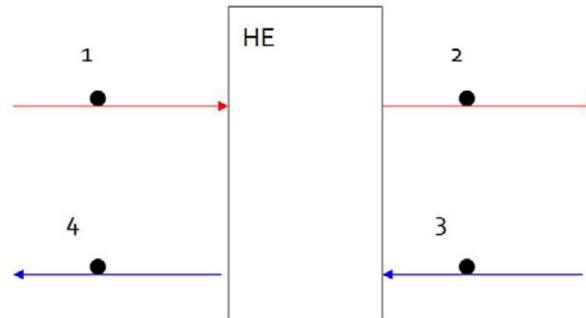


Figura 7.7: Diagrama representativo de um permutador.

Para a permuta entre vapor e ar dos peixes é possível construir a seguinte tabela:

Tabela 7.9: Características da permuta vapor-ar dos peixes para a situação actual.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	h (kJ/kg)
1	?	2778,10
2	?	406,43
3	26002	345,72
4	26002	389,94

$$\dot{Q}_{vapor} = \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{ar} \cdot (h_4 - h_3) + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} = 521,28 \text{ kg/h}$$



O mesmo raciocínio pode ser seguido para o permutador de vapor-ar dos *pet*:

Tabela 7.10: Características da permuta vapor-ar dos *pet* para a situação actual.

Ponto	\dot{m} (kg/h)	h (kJ/kg)
1	?	2778,10
2	?	699,00
3	27753,9	345,72
4	27753,9	425,12

$$\dot{Q}_{vapor} = \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{ar} \cdot (h_4 - h_3) + \dot{Q}_{perdas}$$

$$\dot{m}_{vapor} = 1060,18 \text{ kg/h}$$

A redução do consumo de vapor é igual à obtida para a situação proposta 1. A única diferença entre estas soluções reside na forma como é realizada a integração energética, com a água fria de reposição.

7.1.3.2 **Balço energético e mássico do depósito de condensados na situação proposta 2**

Nesta proposta procede-se ao aumento do aproveitamento de energia do depósito de condensados através da mistura de água fria de reposição. Este aumento é de 85 kWh_{th}/h para 139,12 kWh_{th}/h, encontrando-se os condensados em equilíbrio a 73,2°C. Esta opção previne o investimento de um permutador, uma vez que esta troca de energia acontece por mistura dentro do depósito de condensados.

O mesmo procedimento realizado para o balanço energético e mássico do depósito de recolha de condensados para a situação actual, é realizado para a situação proposta 2.

Na permuta entre o vapor e o ar dos peixes, a temperatura de saída do fluido quente terá de aumentar nesta situação proposta, o que se deve a uma restrição termodinâmica (segundo principio da termodinâmica), como verificado na situação proposta 1. A temperatura é igual à calculada para a situação proposta 2, ou seja, a temperatura do ponto 3 é de 96,7°C.

$$\dot{Q}_{Entrada} = \dot{Q}_{Saída}$$

$$\dot{Q}_{Entrada} = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_{12} \cdot h_{12}$$

$$\dot{Q}_{Saída} = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_{desg} \cdot h_{desg} = \dot{m}_4 \cdot h_4 + (\dot{m}_3 + \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} + \dot{m}_{12}) \cdot h_{desg}$$

Igualando as duas expressões obtém-se:

$$\dot{m}_{12} = 65,62 \text{ kg/h}$$

Utilizando o modelo energético para realizar as iterações da solução, obtém-se uma convergência do caudal de purgas na rede para 65,62 kg/h, valor bastante próximo do obtido para a situação actual (66,65 kg/h).

Novamente, este caudal de purgas é o valor mínimo necessário quando as perdas de energia através das paredes do depósito são nulas.

7.1.3.3 Balanço energético no desgasificador

Na situação proposta 2 a água que entra no desgasificador é a mistura da água fria com os condensados formados na rede de vapor. Esta mistura entra em equilíbrio a 73,05°C com uma entalpia específica de 206,08 kJ/kg aproximadamente. Novamente, aplicando a equação 7.1 obtém-se uma capacidade de produção de água desarejada de aproximadamente 19,4 kg por kg de vapor.



7.2 Anexo B

Factores que afectam o ΔT_{min}

A selecção da diferença de temperatura mínima é realizada através da melhor relação custo de utilização/investimento. Contudo, este cálculo permite apenas obter uma perspectiva da “melhor” relação e não da “óptima” relação. Como veremos à frente, a selecção da temperatura mínima é sensível à estimação das variáveis de que depende.

São apresentados a seguir, dois estudos de sensibilidade na selecção do ΔT_{min} , variando o custo fixo do permutador e o coeficiente de transferência de energia.

No caso de estudo, foi considerado que o custo fixo do permutador seria 2.000€. Variando este custo fixo, obtém-se o seguinte diagrama representativo do custo total para os vários custos fixos.

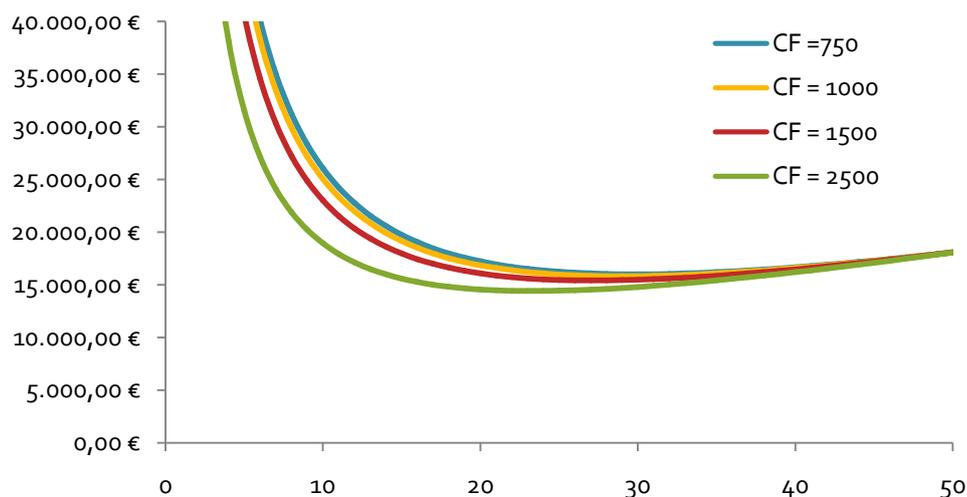


Figura 7.8: Variação do custo total para diferentes custos fixos de permutadores tubulares laminados.

Tabela 7.11: Variação do custo total e ΔT_{min} para os diferentes custos fixos definidos.

Custo Fixo	750	1000	1500	2500
Custo Total	15.997,63 €	15.816,77 €	15.416,14 €	14.411,85 €
%	0,00%	1,13%	3,63%	9,91%
ΔT_{min}	30	29	27	23
%	0,00%	3,33%	10,00%	23,33%

Pela análise da Tabela 7.11 verifica-se que o custo total varia cerca de 9% enquanto o ΔT_{\min} varia 23%, demonstrando que a selecção da ΔT_{\min} óptima é bastante sensível. Contudo, através da visualização da Figura 7.8, verificamos que a zona de baixa variação do custo total mínimo verifica-se para o mesmo intervalo de valores.

Variando o coeficiente de transferência de calor obtemos o seguinte diagrama:

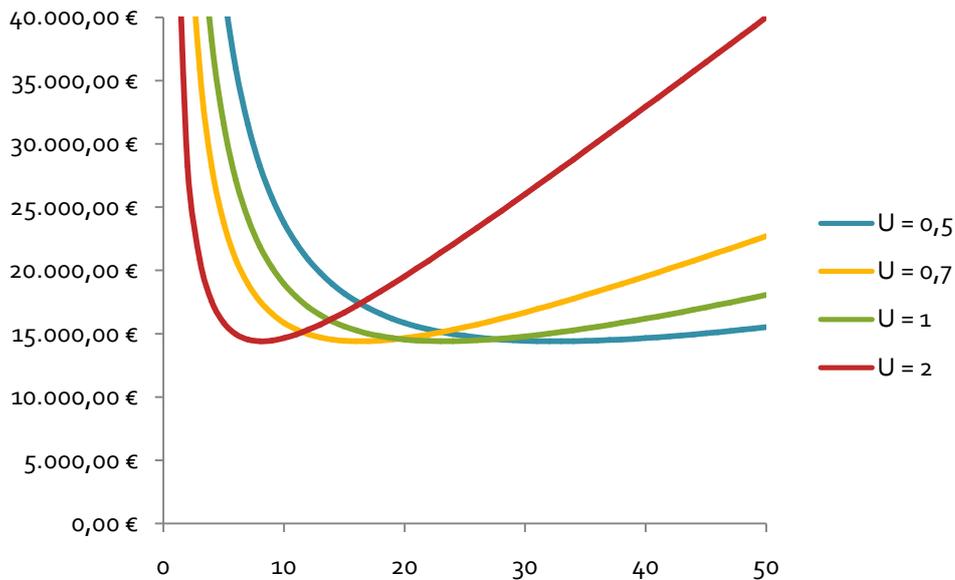


Figura 7.9: Variação do custo total para diferentes coeficientes de transferência de calor de permutadores tubulares laminados.

Tabela 7.12: Variação do custo total e ΔT_{\min} para os diferentes coeficientes de transferência de calor definidos.

h	0,5	0,7	1	2
Custo Total	14.413,00 €	14.411,85 €	14.413,00 €	14.413,00 €
%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
ΔT_{\min}	32	23	16	8
%	0,00%	28,13%	50,00%	75,00%

Pela visualização da Figura 7.9 e análise da Tabela 7.12, verifica-se que existe uma grande variação do ΔT_{\min} óptimo global que atinge os 75%, enquanto o custo total não tem variação significativa.

Esta análise permitiu constatar que a selecção das variáveis tem uma variação significativa na selecção do ΔT_{\min} . A análise *pinch* é fortemente influenciada pela selecção da



diferença de temperatura mínima, sendo a selecção deste, bastante sensível à variação das variáveis de que é dependente.

7.3 Anexo C

A troca de energia entre as correntes HS2 e CS1 é realizada por um permutador de placas em contracorrente. Para o cálculo do ΔT_{\min} é seleccionado um orçamento da empresa ARSOPI no valor de 1.693€.

O permutador de placas tem uma capacidade de 370 kW, um coeficiente de transferência de calor de 1,7 kW/(m²K) e uma superfície de 7,8 m². Considera-se um custo fixo de 500€, que origina um custo variável de 152,95€/m².

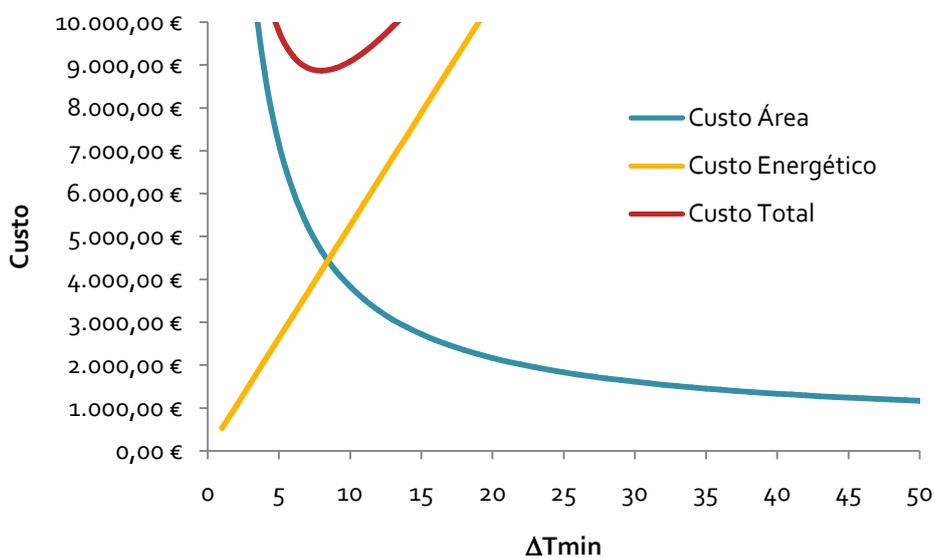


Figura 7.10: Custo energético, área do permutador e total com a variação de ΔT_{\min} para um permutador de placas.

Pela análise da Figura 7.10 verifica-se que o ΔT_{\min} óptimo acontece para aproximadamente 8°C. O intervalo onde a variação do custo total para uma variação máxima de 10% acontece para [5;12].

A sensibilidade desta análise é semelhante à efectuada no Anexo B.



7.4 Anexo D

PERMUTADOR DE PLACAS (PHE) ARSOPI-THERMAL

Data:2009-04-27

Cliente :
 Destino :
 Local :
 Item No. :
 V. Ref. No. :
 N. Ref. No. :

Serviço
 Tipo FHL00 -HJ -12 Número de PHE 1 Unid(s)
 Superfície 1.20 [m2/unid] Número de Placas 12 [pcs/unid]

(Performance por PHE) Lado Quente Lado Frio

Fluído	Água	Água
Caudal	30.0 [m3/h]	2.0 [m3/h]
Peso Específico	0.972 [-]	0.992 [-]
Calor Específico	4.199 [kJ/(kgC)]	4.180 [kJ/(kgC)]
Conductividade Térmica	0.669 [W/(mC)]	0.628 [W/(mC)]
Viscosidade	0.360 [mPas]	0.650 [mPas]
Temperat. de Entrada	79.00 [C]	15.00 [C]
Temperat. de Saída	75.00 [C]	71.00 [C]
Perda de Carga	0.084 [MPa]	0.001 [MPa]
Pressão de Trabalho	- [MPa G]	- [MPa G]
Pot. Calorífica	124.4 [kW]	
Circulação	ContraCorrente	

(Construção)

Arranjo das Placas	6 x 1	5 x 1
Max. Pressão	1.00 [MPa G]	1.00 [MPa G]
Pressão de Ensaio	1.30 [MPa G]	1.30 [MPa G]
Max. Temperatura	100.00 [C]	100.00 [C]
Peso Vazio/Cheio	150 / 160 [kg]	
Dimensões Aprox.	C 390 x L 350 x A 787 [mm] (C= 200 P= 340)	
Entradas/Saídas	Roscadas 2" Gás	Roscadas 1" Gás

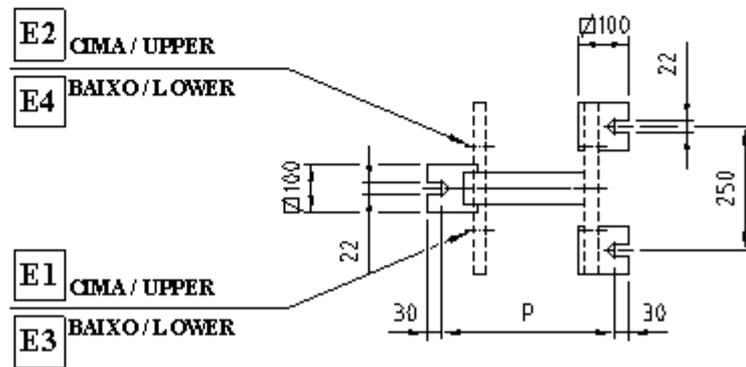
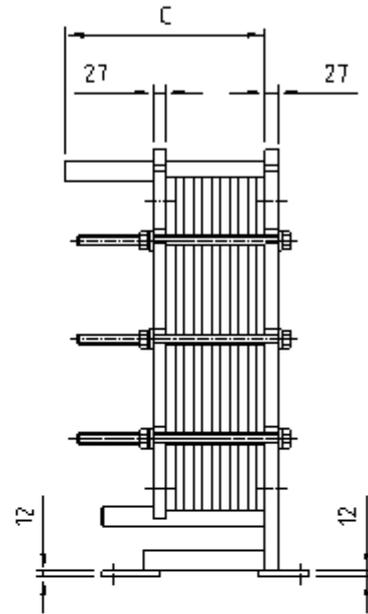
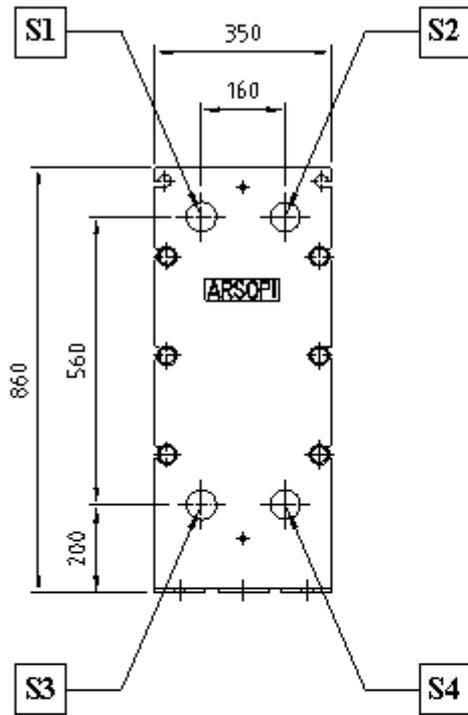
(Material)

Placas	AISI 316L	
Juntas	NBR-SI	NBR-SI
Entradas/Saídas	AISI 316	AISI 316
Estrutura/Tirantes	Aço Carbono, Pintada / Aço Carbono Zincado	

(Notas)

MODELO: FHL00 - HJ - 12

	Dimensões (mm)	MASSA (kgs)
C:	200	Vazio: 150
P:	340	Cheio: 160



Orientação Entrada/Saídas

Lado Quente: S2 → S4

Lado Frio: S3 → S1