



Otimização energética do consumo de energia térmica numa empresa produtora de bebidas

JOÃO MIGUEL PEREIRA CARDOSO

Outubro de 2020

Otimização energética do consumo de energia térmica numa empresa produtora de bebidas

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Química, ramo opcional de Energia e Biorrefinaria

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Química

JOÃO MIGUEL PEREIRA CARDOSO

22 de outubro de 2020

Orientação da Empresa: Engenheiro Rui Pedro Frias Silva Correia

Orientação ISEP: Doutora Maria Teresa Martins Sena Esteves

Co-orientação ISEP: Doutora Teresa Augusta Ferreira Araújo Pimenta

Agradecimentos

Qualquer trabalho, escolar ou profissional, não é bem-sucedido sem nenhum apoio, direto ou indireto, e a presente tese não é exceção. Felizmente, posso afirmar que tive ao meu lado pessoas e entidades que me ajudaram e conduziram à finalização da presente dissertação e conseqüente findar de um percurso letivo que dura há 17 anos. Todos os que estiveram em contacto comigo durante todo este tempo merecem, indubitavelmente, um grande agradecimento. Porém, sinto a necessidade de delinear e agradecer expressamente aqueles que mais me marcaram e tornaram esta aventura possível.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Super Bock Group por me ter acolhido e presenteado com uma tese verdadeiramente desafiante e igualmente gratificante, e apesar do tempo passado juntos ter sido pouco, será algo que nunca esquecerei. Mais concretamente, dentro do universo dessa empresa, gostaria de agradecer ao João Teixeira, pela ajuda apesar dos tempos complicados e atarefados que nos envolveram, à Eduarda Melo por me ter apresentado e iniciado naquele espaço, e aos meus colegas e amigos, Cristiana, João Seixas e Hugo Costa que nunca me deixaram sozinho durante o tempo lá passado.

À doutora Teresa Sena Esteves e à doutora Teresa Pimenta por me terem aturado durante incontáveis horas e guiado incansavelmente até conseguir atingir aquilo que viram que em mim seria possível, o maior dos agradecimentos, pois tenho a mais perfeita noção que sem este apoio não conseguiria de todo acabar este trabalho.

Àqueles que nunca me abandonaram desde que entraram na minha vida e me ajudaram a crescer tanto como pessoa como como engenheiro, e fizeram de mim quem sou hoje. Aos amigos que fiz na Maia, no ISEP, aos crustáceos e a todos os outros a quem posso verdadeiramente chamar de amigos, no mais belo sentido da palavra.

À Georgina, ao Manuel, ao Pedro, à Quicas, ao Jorge, ao Miguel e à Gusta.

Ao ISEP.

Sumário

Atualmente, na procura da otimização da utilização de energia por parte de empresas industriais, é frequente recorrer-se ao conceito de integração energética de forma a garantir o maior aproveitamento e eficiência possível dos consumos e gastos energéticos, resultando numa diminuição dos custos associados a esta vertente.

Procurando corresponder a esta otimização, o método *Pinch*, no qual se procura associar os consumidores e os produtores de energia térmica de forma a ser necessário a menor quantidade de energia externa possível, pode ser aplicado a um conjunto de equipamentos já existentes, de forma a que seja possível utilizar a energia excedente dos produtores de energia nos equipamentos que a necessitem.

Para a aplicação deste método ao Centro de Produção de Leça do Balio da Super Bock Group, fez-se um levantamento da rede de permutadores de calor já existente e dos outros equipamentos que a compõem, bem como das características termodinâmicas das correntes que são utilizadas. Com estas informações construiu-se uma nova rede de permutadores de calor, otimizada de acordo com o método *Pinch*.

Comparando a rede existente e a rede proposta nesta dissertação, verificou-se que estas apresentam a mesma quantidade de energia recuperada anualmente, porém o número de permutadores necessários na rede proposta é menor, reduzindo-se de 16 para 8. Esta redução apesar de não impactar diretamente no consumo de energia da unidade industrial pode refletir resultados positivos a longo prazo sobre a forma de menores custos de manutenção dos permutadores.

Palavras-chave: integração energética, *Pinch*, Permutadores de Calor, Aproveitamentos térmicos

Abstract

These days, while looking for the optimization of energy consumption by any industry, it is frequent to resort to the concept of energetic integration, as to ensure the most possible efficiency in the consumption of energetic resources, resulting in a reduction of the associated monetary costs.

In order to achieve this optimization, the Pinch method, in which you match energy producers and consumers' necessities to reduce the amount of external energy needed, can be used and applied to a set of pre-existing equipments so you can divert the exceeding energy to the equipments that need it.

A survey of the already existing thermal recovery network was made in which both the equipments that make it up and the thermodynamical characteristics of its currents were detailed, which allowed for a new network to be made according to the Pinch method.

Comparing both these networks, it was possible to conclude that while the annual amount of recovered energy is the same, the amount of heat exchangers needed to make up the network was reduced from 16 to 8, which while not impacting directly the consumption of energetic resources can have long term positive repercussions in the form of lesser associated maintenance costs.

Keywords: Process Integration, Pinch, Heat Exchangers, Thermal Recovery

Índice

1. Introdução -----	1
1.1. Enquadramento e objetivos-----	1
1.2. A empresa-----	2
1.3. Estrutura da dissertação-----	4
2. Metodologia <i>Pinch</i> Energético e Rede de Aproveitamentos de Energia Térmica ---	7
2.1. Integração Energética na Indústria -----	7
2.2. Fundamentação da metodologia -----	8
2.3. Limitações à integração energética numa unidade industrial-----	10
2.4. Concretização da análise energética-----	11
2.5. Estudo do potencial energético do sistema: método das curvas compostas ---	13
2.6. Construção da rede de permutadores de calor -----	23
3. Caracterização da rede de aproveitamentos energéticos do Centro de Produção de Leça do Balio do Super Bock Group-----	27
3.1. Descrição do sistema de aproveitamento de energia térmica existente -----	28
3.2. Produtores de energia -----	37
3.3. Consumidores de energia -----	41
4. Determinação da rede de máximos aproveitamentos energéticos -----	47
4.1. Aplicação do método da cascata-----	47
4.2 Rede de permutadores de calor -----	62
4.3 Áreas dos permutadores de calor -----	64
5 Comparação de aproveitamentos térmicos e de consumos de energia entre a rede atual e a rede proposta, e avaliação económica do projeto-----	71
5.1. Comparações entre a rede atual e a rede proposta-----	71
5.2. Custos com a implementação da nova rede de aproveitamentos térmicos ----	78
6. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros -----	79
Bibliografia -----	81

Anexo A	83
Anexo B	87
Anexo C	89
Anexo D	91
Anexo E	95
Anexo F	97

Índice de figuras

Figura 1.1 Vista aérea do Centro de Produção de Leça do Balio do SuperBock Group	3
Figura 1.2 Marcas comercializadas pelo Super Bock Group	3
Figura 1.3 Presença internacional da Super Bock Group	4
Figura 2.1 Exemplo de ΔT_{min} numa permuta de calor	10
Figura 2.2 Curva composta quente	14
Figura 2.3 Curva Composta Fria	15
Figura 2.4 Curva Composta quente e fria e respetivo Pinch	16
Figura 2.5 Exemplo de template preenchido com os balanços de energia do método da cascata para o exemplo da tabela 2	20
Figura 2.6 Cascata(s) contruída para o exemplo da aplicação da tabela 2	21
Figura 2.7 Exemplo de cálculo dos valores de energia de cada corrente acima do Pinch, trocas de calor entre as correntes e energias resultantes (utilidades quentes) para o exemplo da tabela 2	25
Figura 2.8 Exemplo de cálculo dos valores de energia de cada corrente abaixo do Pinch, trocas de calor entre as correntes e energia resultante (utilidade fria) para o exemplo da tabela 2	25
Figura 2.9 Exemplo da rede de permutadores de calor do exemplo de aplicação da tabela 2	26
Figura 3.1 Circuito principal do sistema de aproveitamento de energia térmica	29
Figura 3.2 Troca de calor entre circuito principal e circuito secundário	30
Figura 3.3 Distribuição da água proveniente do tanque C815	31
Figura 3.4 Circuito secundário dos aproveitamentos de energia térmica	31
Figura 3.5 Funcionamento permutador PHE Last Chance	32
Figura 3.6 Subsistema/circuito "comboio"	33
Figura 3.7 Permutador PHE 1	33
Figura 3.8 Permutador PHE 3	34
Figura 3.9 Permutador PHE 4	34
Figura 3.10 Sistema de arrefecimento: aeroarrefecedores	35
Figura 3.11 Diagrama técnico do sistema de aproveitamentos térmicos em estudo	36
Figura 3.12 Motor de Cogeração e respetivas correntes	37

Figura 3.13 Caldeira Recuperativa -----	39
Figura 3.14 Arrefecimento do Compressor de CO ₂ e correntes relevantes ao processo	40
Figura 3.15 Tanque C805 -----	40
Figura 3.16 Esquema do aquecimento de um Pasteurizador-----	42
Figura 3.17 Aquecimento da corrente de alimentação à ETAR -----	44
Figura 3.18 Exemplo de um filtro de carvão e características das correntes -----	45
Figura 3.19 Desgaseificador-----	46
Figura 4.1 Representação gráfica das correntes frias (azul) e quentes (amarelo) os balanços de energia a elas associados em cada intervalo de temperaturas-----	49
Figura 4.3 Balanços energéticos às correntes estudadas, localizadas acima do Pinch, e divisão das correntes 6 e 9-----	54
Figura 4.3 Troca de calor entra um ramo da corrente 9 e corrente 2 -----	55
Figura 4.4 Permutador responsável pela troca de calor entre um ramo da corrente 9 e a corrente 2 e correntes a este associadas-----	56
Figura 4.5 Balanços energéticos às correntes estudadas localizadas acima do Pinch e trocas de energia entre as correntes 1,2, 4, 6, 9, 12 e 13 -----	58
Figura 4.6 Balanços de energia às correntes estudadas, localizadas acima do Pinch, e todas as trocas de energia realizadas entre elas -----	59
Figura 4.7 Balanços de energia às correntes estudadas, localizadas acima do Pinch, todas as trocas de energia entre elas e aplicação de utilidades externas quentes às correntes deficitárias de energia -----	61
Figura 4.8 Balanços de energia às correntes estudadas, abaixo do pinch, e aplicação de utilidades externas frias -----	62
Figura 4.9 Rede de permutadores de calor proposta para o caso em estudo-----	63
Figura 5.1 Aproveitamentos térmicos mensais da rede proposta (laranja) e da rede atual (azul)-----	73
Figura 5.2 Diferença absoluta (azul) e percentual (laranja) entre os aproveitamentos térmicos mensais atuais e propostos-----	74
Figura A-1 Massa volúmica da água líquida (kg/m ³), r , vs Temperatura, T , (°C)-----	83
Figura A-2 Massa volúmica da água glicolada líquida (35%), r , (kg/m ³) vs Temperatura, T , (°C)-----	84
Figura A-3 Calor específico da água líquida, c_p , (kJ/(kg.K)) vs Temperatura, T , (°C) -	84
Figura A-4 Calor específico da água glicolada líquida (35%), c_p , (kJ/(kg.K)) vs Temperatura, T , (°C)-----	85

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Dados do exemplo de aplicação do método da cascata	18
Tabela 2.2 Valores de temperatura corrigida para o exemplo de aplicação do método da cascata.....	19
Tabela 3.1 Temperaturas iniciais (T_i) e finais (T_f), caudais e propriedades físicas das correntes quentes	41
Tabela 3.2 Características das correntes fornecedoras de energia aos pasteurizadores...43	
Tabela 3.3 Características das correntes receptoras de energia nos pasteurizadores...43	
Tabela 3.4 Caudal de fluido recetor de energia em cada pasteurizador.....43	
Tabela 3.5 Resumo das correntes frias relevantes ao estudo.....46	
Tabela 4.1 Propriedades físicas das correntes utilizadas no pinch energético.....48	
Tabela 4.2 Áreas de transferência de calor dos permutadores da rede de aproveitamentos térmicos atual.....65	
Tabela 4.3 Cálculo das áreas de transferência de calor necessárias para as trocas de energia determinadas e respetivos dados utilizados para esse fim	67
Tabela 4.4 Possíveis redimensionamentos dos permutadores existentes	68
Tabela 5.1 Comparação entre os aproveitamentos térmicos mensais do ano de 2019 no centro de produção de Leça do Balio e a rede proposta	73
Tabela 5.2 Consumo mensal de utilidades externas quentes no ano de 2019 no centro de produção de Leça do Balio e comparação com o consumo da rede proposta	76
Tabela D-1 Relação entre coeficiente global de transferência de calor de um permutador de calor, tipo de fluidos do mesmo e respetiva potência	92
Tabela D-1 (Continuação) Relação entre coeficiente global de transferência de calor de um permutador de calor, tipo de fluidos do mesmo e respetiva potência	92
Tabela E-1 Propriedades termodinâmicas do Vapor saturado.....	96
Tabela F-11 Consumos mensais durante o ano de 2019 de vapor e aproveitamentos térmicos verificados nesses meses.....	97

Nomenclatura

A – Área de transferência de calor (m^2)

A.B.V. – Adegas, Barris e Vini

CC – Curva Composta

CIP – Cleaning in Place

Comp. - Compressor

c_p – Calor específico ($kJ/(kg \cdot ^\circ C)$)

C805 – Tanque C805

Desg. - Desgaseificador

ETA – Estação de Tratamento de Águas

ETAR - Estação de Tratamento de Águas Residuais

G.C. – Gases de Combustão da caldeira recuperativa

GNIP – Grupo Nacional para a Integração de Processos

HT – High Temperature

KPI – Key Performance Indicator

kW – kilowatt

kWh – kilowatt hora

L1 – Pasteurizador da linha 1

L2 - Pasteurizador da linha 2

L3 - Pasteurizador da linha 3

L5 - Pasteurizador da linha 5

L6 - Pasteurizador da linha 6

LT – Low Temperature

\dot{m} - Caudal mássico (kg/s)

$\dot{m}c_p$ – Capacidade calorífica por unidade de tempo (kW/°C)

MJ – MegaJoule

MW – MegaWatt

MWh – MegaWatt hora

PHE – Plate Heat Exchanger

Q – Calor envolvido num processo (kW)

Q_{uf} – Calor a retirar através de utilidades frias (kW)

Q_{uq} – Calor a fornecer através de utilidades quentes (kW)

SBG – Super Bock Group

$T_{entrada}$ – Temperatura de uma corrente antes de sofrer uma alteração de entalpia

T_f – Temperatura da corrente fria

T'_f – Temperatura corrigida da corrente fria

T_{pq} – Temperatura do pinch quente

T_{pf} – Temperatura do pinch fria

T_q – Temperatura da corrente quente

T'_q – Temperatura corrigida da corrente quente

$T_{saída}$ – Temperatura de uma corrente após sofrer uma alteração de entalpia

U – Coeficiente global de transferência de calor (kW/(m².°C))

ΔH_i – Balanço de energia ao intervalo de temperatura i (kW)

ΔH_{vap} – Calor latente de Vaporização (kJ/kg)

ΔT – Diferença de temperatura

ΔT_{min} – Diferença de temperatura mínima

ΔT_{ML} – Diferença de temperatura média logarítmica

ρ – Massa volúmica (kg/m³)

1. Introdução

Este relatório surge no âmbito da Unidade Curricular de Dissertação/Estágio do Mestrado em Engenharia Química, especificamente do ramo de Energia e Biorrefinaria, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, e foi desenvolvido no Departamento de Manutenção do Super Bock Group (SBG), no centro de produção de Leça do Balio. Esta dissertação teve como tema a Otimização Energética no Consumo de Energia Térmica, com o objetivo de avaliar a rede de aproveitamentos de energia térmica existente e compará-la com uma desenhada de raiz através do uso da metodologia do Ponto de Estrangulamento, ou metodologia *Pinch* como é mais conhecido e utilizado na indústria, de forma a otimizar a utilização de utilidades externas e equipamentos no processo.

1.1. Enquadramento e objetivos

Os diversos processos realizados em qualquer indústria, quer físicos quer químicos, requerem frequentemente a utilização de utilidades externas, fluídos exteriores ao processo que permutam diretamente com as correntes de forma a retirar ou fornecer energia às mesmas, de modo a arrefecer ou aquecer o sistema relativamente à temperatura ambiente, podendo portanto estas ser consideradas quentes ou frias. Porém muitos desses mesmos processos também produzem energia térmica. Assim, o que acontece frequentemente em empresas de grande dimensão é o aproveitamento desta energia produzida e a sua utilização como fonte energética, reduzindo assim as necessidades de utilização destas utilidades sendo que estes aproveitamentos energéticos são geralmente sistematizados de forma a criar uma rede de aproveitamentos de energia térmica.

O caso em estudo foi então o aproveitamento da energia térmica produzida no Centro de Produção de Leça do Balio da Super Bock Group, circuito este que envolve todas as zonas da empresa desde o Fabrico ao Enchimento, passando pela Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), entre outros. O controlo deste circuito dá-se maioritariamente na Central Térmica, na qual os técnicos regulam, quando necessário, os diversos componentes desta rede de aproveitamentos de energia térmica. Uma vez que esta rede foi sendo construída ao longo dos anos, sofrendo assim diversas alterações e melhorias

relativamente ao *design* original, procurou-se efetuar uma avaliação da mesma, construindo uma nova rede utilizando a metodologia do *Pinch* energético, uma técnica desenhada para se determinar teoricamente a rede que promove maiores aproveitamentos térmicos. Essas duas redes serão posteriormente comparadas de forma a determinar-se como a rede de aproveitamentos máximos desenhada difere da rede existente e como estas poderiam convergir. Foi ainda pedido que se avaliasse economicamente as alterações que seriam necessárias para se cumprir este objetivo e a sua viabilidade, bem como se o impacto que estas alterações teriam na rede existente seria significativo o suficiente para se proceder à alteração. Este impacto seria medido em termos de melhoramento do índice de Key Performance Indicator (KPI), que reflete a razão entre a energia térmica consumida e a quantidade de cerveja produzida num dado intervalo de tempo, esperando-se assim uma diminuição do KPI avaliado.

Assim, de modo a corresponder a estes objetivos é necessário proceder-se à identificação e caracterização dos equipamentos que consomem energia térmica - consumidores de energia - e dos equipamentos que libertam energia térmica - produtores de energia - bem como das suas correntes de entrada e saída, na rede já existente.

1.2. A empresa

A Super Bock Group é a maior empresa portuguesa de bebidas refrescantes, marcando ainda presença no mercado de bebidas não refrescantes, cuja atividade essencial assenta no negócio de cervejas e águas engarrafadas. Esta empresa tem atividade também noutras categorias de bebidas, como os vinhos e os refrigerantes, e está presente ainda noutros setores comerciais como no turismo, possuindo duas instalações hoteleiras em Trás-os-Montes, e na comercialização de malte.

A Super Bock Group conta, atualmente, com 8 centros de produção: Leça do Balio, Pedras Salgadas, Castelo de Vide, Caramulo, Envendos, Melgaço, Póvoa do Lanhoso e Poceirão. O centro de Leça do Balio foi inaugurado a 28 de setembro de 1964. Ao longo dos anos a unidade fabril tem vindo a sofrer várias alterações, mas foi no ano de 2012 que se iniciou a maior intervenção, quando a empresa arrancou com um projeto de modernização industrial que pretendeu transformar a fábrica numa das melhores da Europa a nível de qualidade, eficiência e serviço, com uma capacidade de 450 milhões de

litros anuais (Departamento de Recursos Humanos da SuperBock Group, 2020). Uma imagem do Centro de Produção em questão pode ser encontrado na Figura 1.1.1.



Figura 1.1 Vista aérea do Centro de Produção de Leça do Balio do SuperBock Group (google maps, 2020)

Apesar da sua marca de nome, Super Bock, ser uma cerveja e a mais comercializada pela empresa, esta produz e detém também os direitos nacionais de diversas outras marcas, correspondendo a mais de 10, sendo que estas marcas albergam uma gama que engloba todo o tipo de bebidas, desde a cerveja ao vinho, refrigerante e água. Uma representação gráfica de algumas destas marcas e produtos, providenciando uma ideia da dimensão da empresa, pode ser encontrada na figura Figura 1.2.



Figura 1.2 Marcas comercializadas pelo Super Bock Group (Departamento de Recursos Humanos da SuperBock Group, 2020)

A SBG conta ainda com a comercialização dos seus produtos no estrangeiro, estando presente no mercado de bebidas de mais de 50 países, estando os principais compradores

da marca representados na Figura 1.3. Todas as localizações nas quais se podem encontrar produtos da Super Bock Group encontram-se a verde, sendo que a vermelho estão representados os principais destinos de vendas do grupo..



Figura 1.3 Presença internacional da Super Bock Group (Departamento de Recursos Humanos da SuperBock Group, 2020)

1.3. Estrutura da dissertação

Neste subcapítulo apresenta-se a estrutura desta dissertação, que se encontra dividida em 5 capítulos.

O primeiro capítulo, correspondente à introdução, procura contextualizar o leitor tanto do objetivo do tema em estudo como do ambiente no qual foi realizado.

No segundo capítulo apresentam-se os fundamentos da metodologia *Pinch*, nomeadamente o método das curvas compostas e o método da cascata, bem como os diversos componentes que podem fazer parte de uma rede de aproveitamentos de energia térmica e o seu funcionamento.

No terceiro capítulo procede-se, à apresentação detalhada dos diversos produtores e consumidores de energia térmica do complexo fabril, bem como a caracterização termodinâmica das correntes a eles associadas. Será também neste capítulo apresentada a

rede de aproveitamentos de energia térmica já existente, procedendo também a uma explicação detalhada do seu funcionamento.

No quarto capítulo procede-se à aplicação da metodologia *Pinch* ao Centro de Produção de Leça do Balio, através do método da cascata, bem como à avaliação e comparação dos permutadores existentes e dos requeridos para o projeto proposto.

No quinto capítulo procura-se expor as diferenças entre os consumos energéticos da rede proposta e da rede atual, bem como a relevância destes fatores.

No sexto capítulo aborda-se a vertente económica deste projeto, nomeadamente relativamente ao investimento necessário para a implementação da rede de aproveitamentos térmicos proposta.

No sétimo capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas ao longo desta dissertação e como esta poderá ser desenvolvida sobre a forma de propostas de trabalhos futuros.

2. Metodologia *Pinch* Energético e Rede de Aproveitamentos de Energia Térmica

Neste capítulo proceder-se-á à explicação e fundamentação da metodologia *Pinch*, sendo que para tal recorreu-se maioritariamente à consulta do documento “Integração de Processos. Uma metodologia de otimização energética e ambiental” (Relvas, Susana *et al.*, 2002). Os autores deste documento pertencem ao Grupo de Integração de Processos do Centro de Processos Químicos da Universidade Técnica de Lisboa, no Instituto Superior Técnico, e foram designados pelo Grupo Nacional para a Integração de Processos (GNIP) para a realização do texto e sua edição.

2.1. Integração Energética na Indústria

O funcionamento e operação de qualquer indústria com processos físicos ou químicos implica necessariamente a existência de processos transformativos nos quais uma matéria prima é utilizada de modo a obter-se um produto, final ou intermédio. Esses processos frequentemente não se encontram sozinhos numa fábrica, sendo que esta pode possuir dezenas de processos a operar simultaneamente, resultando em necessidades bastante diversas no complexo fabril. Uma vez que qualquer empresa procura sempre produzir o máximo de um dado produto recorrendo aos menores gastos possíveis, a integração destes vários processos numa rede capaz de transmitir os excedentes de um processo a um outro, colmatando os seus consumos externos, será sempre algo que uma empresa em constante evolução procurará otimizar ao máximo. A este conceito foi aplicada a terminologia de Integração de Processos.

Assim, desde que o conceito de Integração de Processos foi criado e expandido, entre a década de 80 e 90, foram sendo desenvolvidos métodos que sobrepõem a área processual e a área energética, possibilitando a implementação de conceitos como o ponto de estrangulamento, em inglês *Pinch*, o que impulsionou a realização de estudos de integração processual baseados em fundamentos termodinâmicos. Foi assim então criada uma das áreas mais procuradas na Engenharia Química, a da Integração Energética, que

procura aplicar os fundamentos da integração de processos a consumos energéticos e termodinâmicos dos vários processos de uma indústria.

2.2. Fundamentação da metodologia

Conforme mencionado no subcapítulo 2.1, a integração energética foi baseada no conceito do *Pinch*, um princípio que pode ser aplicado não só a casos de aproveitamentos térmicos, *Pinch* energético, como a casos nos quais os aproveitamentos que se pretendem realizar são mássicos, *Pinch* mássico. Para que o método *Pinch* possa ser empregue é necessário a existência de uma força motriz por detrás das transferências a realizar, podendo esta ser a diferença de temperaturas entre duas correntes no caso do *Pinch* energético ou a diferença de concentrações entre duas correntes no caso do *Pinch* mássico.

A aplicação da metodologia em questão procura satisfazer um ou mais objetivos, sendo que estes devem ser definidos antes da realização do projeto onde essa metodologia vai ser aplicada. Esses objetivos possuem em comum o fato de serem todos problemas de otimização, nos quais se procura encontrar o valor ótimo, e geralmente mínimo, de um dado fator, e podendo ser a área mínima de troca de calor, o consumo mínimo de utilidades externas ou até ambos. Assim, através da aplicação de restrições de igualdade e desigualdade ao processo este pode ainda ser caracterizado matematicamente, dando origem à possibilidade da adaptação destes problemas a algoritmos matemáticos que resolvam o problema em questão.

No caso em estudo, procura-se explorar o diferencial de temperaturas entre duas correntes para se proceder às trocas de calor necessárias através de um permutador de calor. Estas trocas de calor implicam assim a necessidade de caracterização das diversas correntes e consequente categorização como correntes frias ou correntes quentes.

Às correntes que recebem a energia térmica, de forma a aumentar a sua temperatura ou até mesmo obter a sua mudança de estado, satisfazendo as necessidades do processo, é atribuída a designação de corrente fria. Essas correntes, caso não possam ser satisfeitas termicamente recorrendo a aproveitamentos de energia térmica, trocam geralmente

energia com correntes próprias para o efeito, como vapor ou água quente (utilidade quente).

Caso as correntes necessitem de doar parte da sua energia devido às necessidades processuais, ou seja, geralmente se encontrem a temperaturas demasiado elevadas, atribui-se a denominação de corrente quente. A não integração destas correntes numa rede de aproveitamentos de energia térmica implica a necessidade de remoção de energia destas através de fluidos de arrefecimento, sendo para tal geralmente utilizada água de refrigeração (utilidade fria).

Verifica-se então que existindo correntes com um excedente de energia e correntes necessitadas energeticamente, pode-se proceder à troca de calor entre elas, e como se sabe, dando-se esta sempre da corrente quente para a corrente fria.

A integração energética de uma indústria procura assim utilizar ao máximo o potencial de aquecimento ou arrefecimento das diversas correntes que a compõem de forma a que se recorra o mínimo possível às denominadas utilidades externas, e frequentemente dispendiosas, de fluidos quentes ou frios. Porém, uma vez que na realidade nunca será possível satisfazer as necessidades entálpicas de todas as correntes de todos os processos, será sempre obrigatório recorrer às utilidades externas. A utilização dessas utilidades garante assim que a integridade do processo não é posta em causa caso, por exemplo, haja uma necessidade de energia térmica que as correntes quentes não são capazes de suprir. Essas utilidades podem então ser divididas relativamente à sua função, podendo estas fornecer ou retirar energia às correntes. No caso de se ter que fornecer energia, as utilidades mais empregues na indústria são o vapor de água, devido à sua grande relação entre energia capaz de transferir por unidade de massa, seguido da água quente e do óleo. No caso de se ter que retirar energia, é frequentemente utilizada uma água de refrigeração, com ponto de fusão inferior ao da água, de forma a garantir a não danificação dos equipamentos e tubagens, o ar atmosférico ou outros fluidos de refrigeração.

Para se proceder à integração energética de um sistema é necessário ainda definir-se um intervalo de temperaturas mínimo, ΔT_{\min} , um valor que representa a diferença de temperaturas mínima a que as correntes que trocam calor num permutador devem estar. A definição deste valor tem grandes implicações na rede de aproveitamentos energéticos que será obtida e no sucesso do cumprimento dos objetivos estabelecidos. Na Figura 2.1

apresenta-se a variação da diferença de temperatura mínima, entre correntes quente e fria, (ΔT_{\min}) em função da recuperação de energia (H).

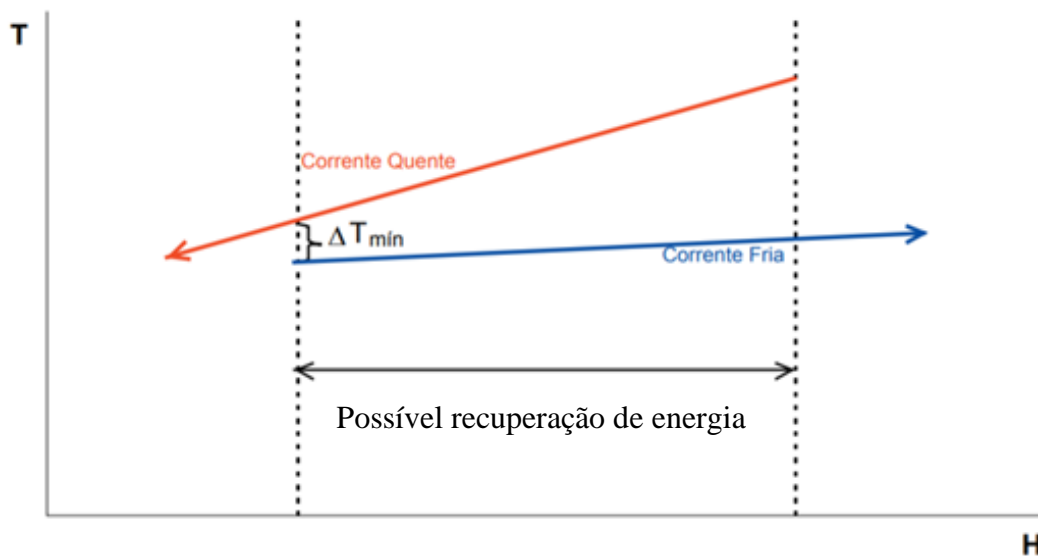


Figura 2.1 Exemplo de ΔT_{\min} numa permuta de calor (adaptado de Linnhoff et al. (1988))

Conforme se pode verificar na Figura 2.1, um aumento do valor de ΔT_{\min} proporciona ao sistema uma maior possibilidade de ocorrerem trocas de calor entre as correntes quente e fria, levando assim a uma menor necessidade de recorrer a utilidades externas. O aumento deste valor, porém, é desvantajoso em termos físicos, uma vez que conforme se diminui o valor de ΔT_{\min} é necessário aumentar a área de transferência de calor do permutador em questão. Assim, frequentemente, procura-se encontrar um valor para a diferença mínima de temperaturas tal que se troque o máximo de energia possível com o menor custo associado, seja este o custo de utilização de utilidades ou o custo de investimento e manutenção de permutadores de grandes dimensões.

2.3. Limitações à integração energética numa unidade industrial

Apesar da ideia da integração energética possibilitar a maior troca de energia possível entre quaisquer correntes quentes e frias dentro de uma dada unidade industrial, a permuta de calor entre duas dadas correntes, apesar de poder ser a solução mais eficiente deve, por vezes, ser evitada ou não é de todo exequível. Este desvio da aplicação teórica da integração energética prende-se com as limitações físicas frequentemente encontradas

num dado complexo. Estas questões impeditivas geralmente relacionam-se com o *layout* fabril, por exemplo, devido ao distanciamento entre as correntes em questão, o que poderia resultar num investimento em tubagens e bombas para o efeito demasiado elevados, ou outros obstáculos que se verifiquem inultrapassáveis e não permitam fisicamente a que as trocas se realizem.

Outros fatores a ter em conta aquando do design de uma rede de aproveitamentos de energia térmica serão o facto de haver a possibilidade de trocas de calor entre as tubagens e o exterior, levando a um aquecimento do ar de uma sala, que não deve pôr em causa qualquer processo termicamente sensível. A possibilidade de se formarem pontos de fuga num permutador que permitam a contaminação de um fluido processual deve ser também tida em conta aquando da realização deste projeto, bem como outros fatores que possam pôr em causa a pureza do produto ou a segurança do estabelecimento em si.

Assim, partindo de todas as correntes disponíveis para a integração energética, deve-se ter em conta as limitações que estas oferecem. A soma dos fatores referidos resulta então numa disparidade entre a rede de máximo aproveitamento de energia térmica teórico e aquela que pode ser concretizada efetivamente, porém a integração energética não deixa de poder ser alvo de otimização de forma a que se possa atingir os objetivos desejados.

2.4. Concretização da análise energética

De forma a poder-se proceder à análise energética de uma unidade industrial, será necessário proceder-se a uma recolha de dados detalhada relativamente a cada consumidor e produtor de energia térmica e, mais especificamente, às correntes que lhe estão associadas.

Será assim necessário proceder-se à caracterização de cada corrente existente relativamente a se são correntes quentes ou frias, e quais são as suas necessidades energéticas, ou seja, se estas necessitam de ser aquecidas ou arrefecidas para entrar no processo.

Determinadas as correntes que necessitam de utilidades externas e, portanto, podem ser utilizadas no aproveitamento energético, passa-se à caracterização termodinâmica das mesmas. Os fatores que se devem apurar relativamente a estas correntes são então:

- A temperatura a que a corrente que se encontra antes de sofrer qualquer alteração entálpica, T_{entrada} (temperatura de entrada), em K ou °C
- A temperatura a que a corrente deve estar antes de ser admitida no processo, T_s (temperatura saída), em K ou °C
- O caudal mássico da corrente em questão, \dot{m} , em kg/s
- O calor específico médio da corrente, c_p , em kJ/(kg.K)
- A entalpia de vaporização ou condensação da corrente caso seja aplicável, ΔH_{vap} , em J/kg

Relativamente aos permutadores de calor, apenas será necessário apurar o valor do coeficiente global de transferência de calor, U (kW/(m².°C)), para o cálculo das respetivas áreas de transferência de calor.

Deve-se ainda proceder à obtenção da capacidade calorífica média por unidade de tempo de cada corrente através da multiplicação dos valores de \dot{m} por c_p , obtendo-se $\dot{m}c_p$.

Aquando da determinação dos valores a utilizar para cada fator apresentado, deve-se ter em conta algumas considerações relevantes. A primeira refere-se à determinação do calor específico de uma corrente, o qual, mais acentuadamente ou não, varia com a temperatura, sendo assim recomendado que se utilize um valor médio entre o c_p à temperatura de entrada e à temperatura de saída. Deve-se ainda tratar cada corrente de forma independente, mesmo quando estas se misturam entre elas. Neste caso, deve-se tratá-las como correntes com necessidades entálpicas únicas. As temperaturas registadas para cada corrente devem ser as que são efetivamente empregues, e não as recomendadas ou as que constam no projeto, tornando por vezes a obtenção destes valores mais complicada caso as correntes em questão não possuam uma forma direta de se verificar estas temperaturas. Finalmente, deve-se sempre ter em conta outras considerações gerais sobre a rede, peculiaridades que possam ser relevantes à determinação da rede de aproveitamentos térmicos e considerações económicas e físicas sobre a viabilidade dos potenciais energéticos de cada corrente. Para tal, é necessário um conhecimento aprofundado e detalhado do processo, sendo a recolha de dados necessariamente um processo que deve ser cuidadoso e efetuado por alguém que tenha uma compreensão verdadeira do alvo da integração energética.

2.5. Estudo do potencial energético do sistema: método das curvas compostas

O potencial energético de um dado sistema pode ser avaliado recorrendo ao método das curvas compostas ou ao método da cascata de calor. O primeiro método mencionado depende de uma avaliação gráfica da soma das entalpias de todas as correntes quentes para cada temperatura, realizando-se o mesmo para as correntes frias, sendo a partir da sobreposição destas representações que se retiram as conclusões desejadas. O método da cascata baseia-se num algoritmo que pretende calcular através dos dados termodinâmicos de cada corrente todos os parâmetros desejados.

2.5.1. Método das Curvas Compostas

Recolhidas as informações relativas a cada corrente, estas podem ser reunidas de forma a se compreender facilmente, sobre a forma de um gráfico, qual é o potencial de aproveitamento energético do sistema em estudo, bem como diversas outras características do mesmo. Para tal, constrói-se a denominada Curva Composta (CC), fria ou quente. A Curva Composta é o resultado da soma das entalpias de todas as correntes que seguem a uma determinada temperatura, sendo representada num gráfico de temperatura vs entalpia (potência térmica). Esta representação permite prever qual será o mínimo de energia a fornecer ao sistema através de utilidades quentes, a quantidade de energia a retirar do sistema através do uso de utilidades frias, a área total de transferência de calor necessária e a quantidade de permutadores de calor a utilizar. (Linhoff B. *et al.*, 1988).

Um exemplo de uma Curva Composta para duas correntes quentes encontra-se representada na Figura 2.2.

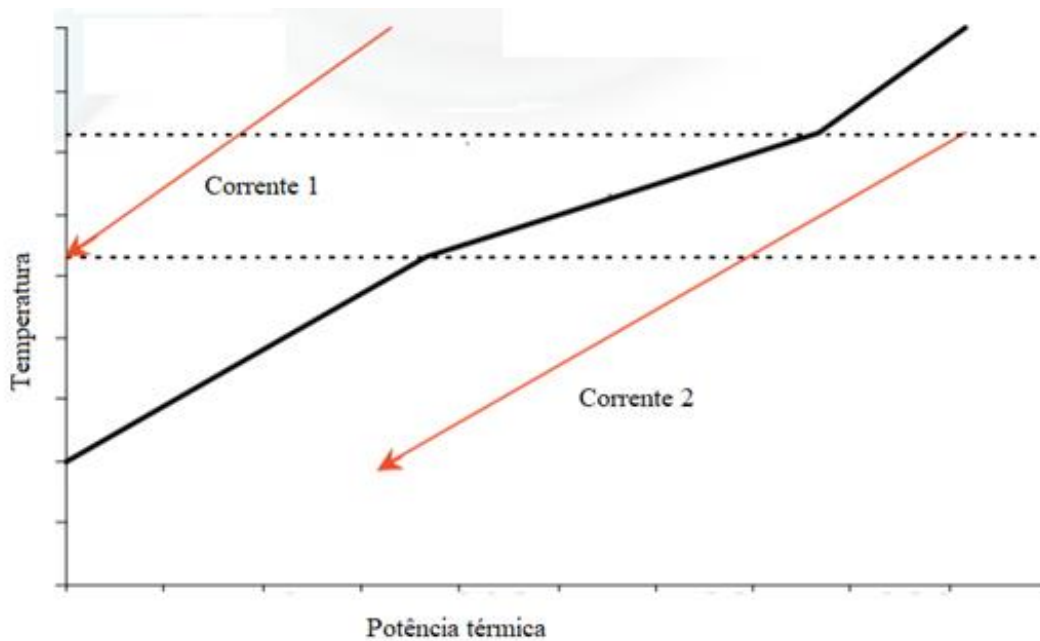


Figura 2.2 Curva composta quente (adaptado de Relvas, Susana et al., 2002)

Representada, na Figura 2.2, a vermelho, encontram-se as correntes quentes do sistema e, a preto, a Curva Composta resultante. Verifica-se assim que a “Corrente 1” deve arrefecer de uma temperatura mais elevada para uma mais baixa, correspondendo o declive da sua representação gráfica ao fator $\dot{m}c_p$. O mesmo é aplicável à “Corrente 2”. A construção da curva composta é possível por uma translação da corrente com temperatura mais baixa para o valor de entalpia igual a zero. Nos intervalos de temperatura em que ambas as correntes operam, o declive da curva composta corresponderá à soma do potencial energético por unidade de tempo ($\dot{m}c_p$) de cada uma.

Um exemplo de uma Curva Composta de duas correntes frias pode ser encontrado na Figura 2.3.

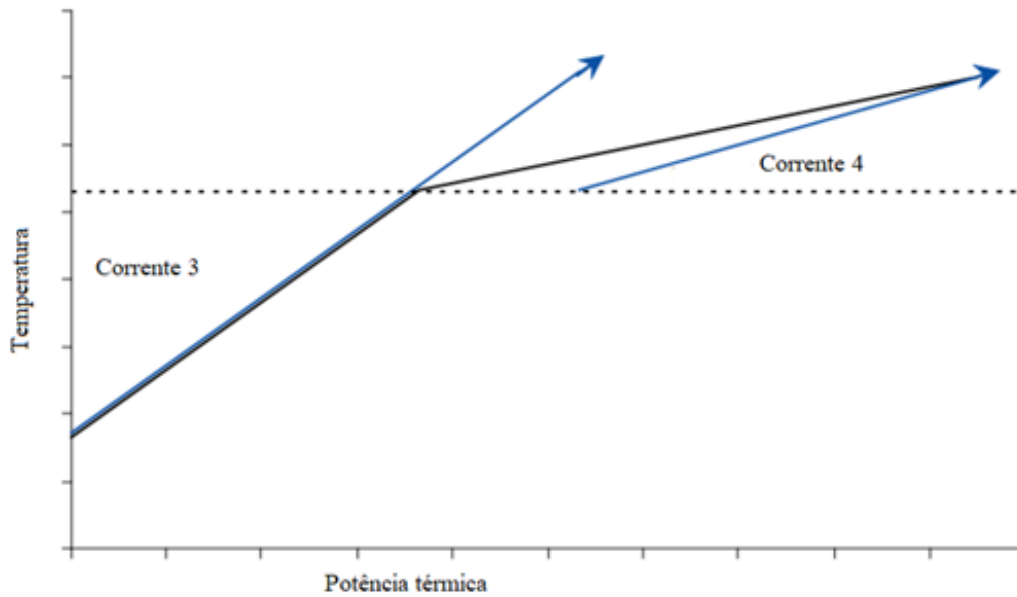


Figura 2.3 Curva Composta Fria (adaptado de Relvas, Susana et al., 2002)

Na Figura 2.3 encontram-se representadas, a azul, duas correntes frias que necessitam de aquecimento e a Curva Composta resultante da sua soma. O método empregue para a construção desta curva composta é idêntico ao apresentado para a curva composta quente.

Estas Curvas Compostas de um sistema, quando representadas no mesmo gráfico, permitem averiguar graficamente qual a quantidade mínima de calor a retirar e a adicionar ao sistema, e o total de calor recuperado pela integração energética. Nesta representação, a escolha de um intervalo de temperaturas mínimo, ΔT_{\min} , demonstra a sua importância pois os fatores mencionados dependem diretamente do valor escolhido. Nesta representação é ainda possível ser determinado o *Pinch* do sistema.

Assim, a representação gráfica simultânea das curvas compostas apresentadas na Figura 2.2 e na Figura 2.3 pode ser encontrada na Figura 2.4.

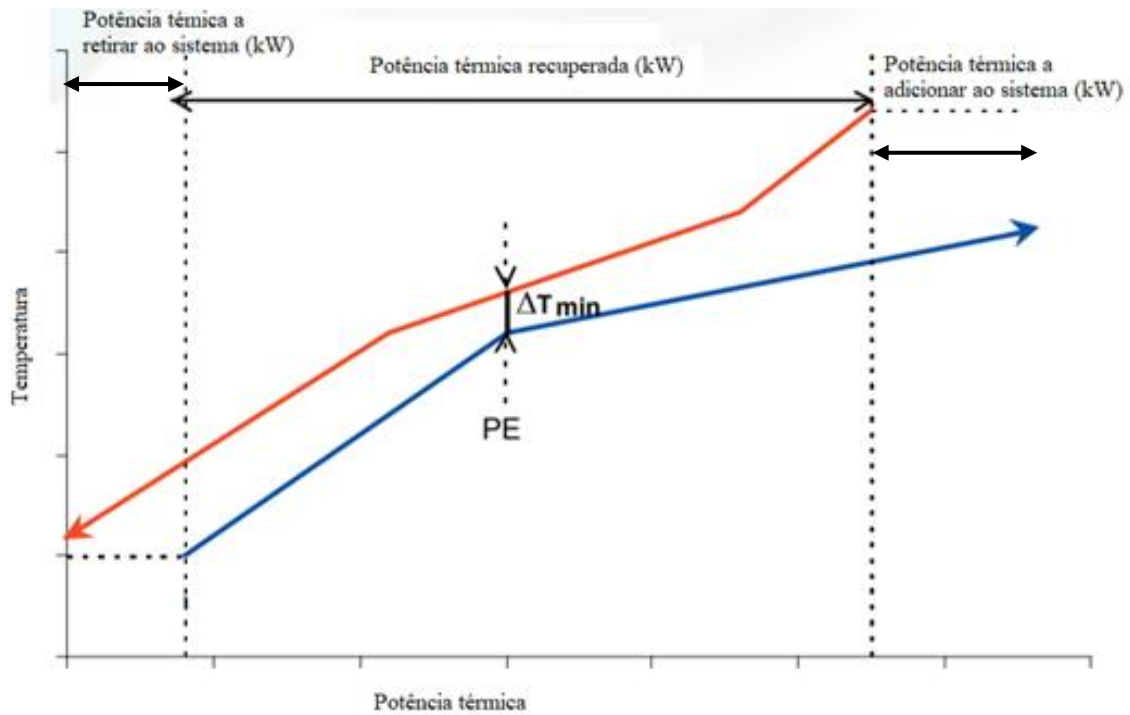


Figura 2.4 Curva Composta quente e fria e respetivo Pinch (adaptado de Relvas, Susana et al., 2002)

O *Pinch* encontrado na 2.4 foi escolhido previamente como sendo o ponto no qual as Curvas Compostas quente e fria mais se aproximam. A partir deste ponto pode-se determinar a temperatura do *Pinch* fria, T_{pf} , e quente, T_{pq} .

De forma a que a troca de calor entre as correntes quentes e frias seja possível é necessário que a curva composta quente se encontre acima da curva composta fria em toda a sua gama. Recorrendo-se a translações horizontais das Curvas Compostas, que resultam em alterações do *Pinch*, diferença de temperatura mínima, potencia térmica aproveitada e potencia térmica a acrescentar e retirar do sistema. Na construção da curva composta combinada deve-se recorrer a uma translação horizontal da curva composta fria de tal modo a que o pontos mais próximos de ambas as curvas compostas tenham uma diferença no eixo da temperatura igual ao definido como ΔT_{min} .

Caso se procedesse a uma colocação das Curvas Compostas tal que no *Pinch* as Curvas Compostas se tocassem, a diferença de temperatura mínima seria 0, o que corresponderia à quantidade máxima de calor que poderia ser possível trocar entre as correntes do processo. Este ponto levaria também à necessidade de uma área de transferência de calor infinita, uma vez que a força motriz por trás das trocas de calor, a diferença de temperatura, seria nula.

Após a identificação do *Pinch*, pode-se dividir a representação gráfica em zona acima do *Pinch*, que necessita de absorver energia, e abaixo do *Pinch*, que necessita de o libertar. Estas zonas, acima e abaixo do *Pinch*, são denominadas de zona “absorvedora de calor” e “fonte de calor” respetivamente. Nestas zonas, todas as necessidades ou excessos de energia devem ser complementadas pelas correntes opostas no sistema, ou seja, o excesso de energia abaixo do *Pinch* deve ser colmatado recorrendo a utilidades frias e a deficiência do mesmo acima do *Pinch* através de utilidades quentes.

Caso acima do *Pinch* seja necessário recorrer a uma utilidade fria ou abaixo do *Pinch* a uma utilidade quente não será possível minimizar o consumo de energia, visto que esta utilização resulta num excedente ou défice de energia maior, e consequente maior utilização ainda de utilidades frias e quentes para colmatar estas necessidades.

2.5.2 Método da Cascata de Calor

Apesar da interpretação gráfica das curvas compostas quentes e frias poder indicar qual será o consumo mínimo de utilidades quentes e frias, não se deve recorrer a este método pois este baseia-se em construções gráficas, levando a valores com maior incerteza. Para tal, desenvolveu-se o método da “cascata de calor”, um algoritmo que permite calcular as quantidades de energia a retirar e a adicionar ao sistema, bem como determinar a localização do *Pinch*. Este método tem como base a soma das entalpias disponíveis num dado intervalo de temperaturas e transferir o excesso para o nível de temperatura imediatamente abaixo.

De forma a facilitar a compreensão deste método, cada passo apresentado será acompanhado de um exemplo prático, baseado no conjunto de valores apresentados na Tabela 2.1, onde T_{entrada} é a temperatura de entrada da corrente e $T_{\text{saída}}$ corresponde à temperatura de saída da corrente.

Tabela 2.1 Dados do exemplo de aplicação do método da cascata

Corrente	T _{entrada} (°C)	T _{saída} (°C)	mcp (kW/ °C)
1	180	80	20
2	130	40	40
3	60	100	80
4	30	120	36

O algoritmo da “cascata de calor” resume-se aos seguintes passos:

1. Cálculo das temperaturas corrigidas das correntes

Apesar de no método da “cascata de calor” não ser necessária a utilização das temperaturas corrigidas, neste estudo, foi adotado esse procedimento. Sendo assim, o primeiro passo do algoritmo consiste em obter as temperaturas corrigidas das correntes quentes e frias. Essas temperaturas correspondem, no caso das correntes frias, à soma das temperaturas verificadas nas correntes (temperatura de entrada, T_{entrada}, e temperatura de saída, T_{saída}) com metade da variação da temperatura mínima (equação 2.1) e, no caso das correntes quentes, à diferença entre as temperaturas verificadas nas correntes (T_{entrada} e T_{saída}) e metade da variação de temperatura mínima (equação 2.2), ou seja:

$$T'_f = T_f + \frac{\Delta T_{\min}}{2} \quad (2.1)$$

$$T'_q = T_q - \frac{\Delta T_{\min}}{2} \quad (2.2)$$

No qual:

T_f – Temperatura da corrente fria (°C)

T'_f – Temperatura corrigida da corrente fria (°C)

T_q – Temperatura da corrente quente (°C)

T'_q Temperatura corrigida da corrente quente (°C)

A correção das temperaturas faz com que o ΔT_{\min} passe a ter o valor zero o que permite trabalhar com uma única temperatura no *Pinch*, possibilitando uma análise da rede de permutadores mais simplificada. No final da aplicação do método é necessário restaurar as temperaturas do *Pinch* ao valor original, através da operação inversa a que foi sujeita a temperatura.

Segundo o exemplo apresentado, e utilizando um valor de ΔT_{\min} de 10 °C, os valores de temperaturas corrigidas para cada corrente serão os que se encontram na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Valores de temperatura corrigida para o exemplo de aplicação do método da cascata

Corrente	Temperatura de entrada corrigida(°C)	Temperatura final corrigida (°C)
1	175	75
2	125	35
3	65	105
4	35	125

Todas as temperaturas corrigidas são posteriormente organizadas, numa grelha gráfica que corresponde a intervalos de temperatura, por ordem decrescente de valor dessas temperaturas. Nessa grelha são também representadas, diferenciadamente, as correntes quentes e frias.

2. Balanço de energia a cada intervalo de temperatura

A cada intervalo de temperatura corrigida é então realizado um balanço de energia. Este balanço corresponde à diferença entre a capacidade calorífica por unidade de tempo, mcp , das correntes quentes e das correntes frias no intervalo de temperaturas respetivo, multiplicado pelo valor do intervalo de temperatura. O balanço de energia pode ser representado matematicamente pela expressão encontrada na equação 2.3:

$$Potência\ térmica_i = \left(\sum_{correntes\ quentes} \dot{m}cp - \sum_{correntes\ frias} \dot{m}cp \right) * \Delta T_i \quad (2.3)$$

Na qual:

Potência térmica_i (ΔH_i)– resultado do balanço de energia ao intervalo de temperatura *i* (kW)

ΔT_i – valor do intervalo de temperatura *i* (K ou °C)

A grelha gráfica, referida anteriormente (relacionada com as temperaturas corrigidas), foi preenchida de acordo com os valores apresentados na tabela 2.1 e tabela 2.2 e segundo a equação 3, podendo ser encontrada na Figura 2.5.

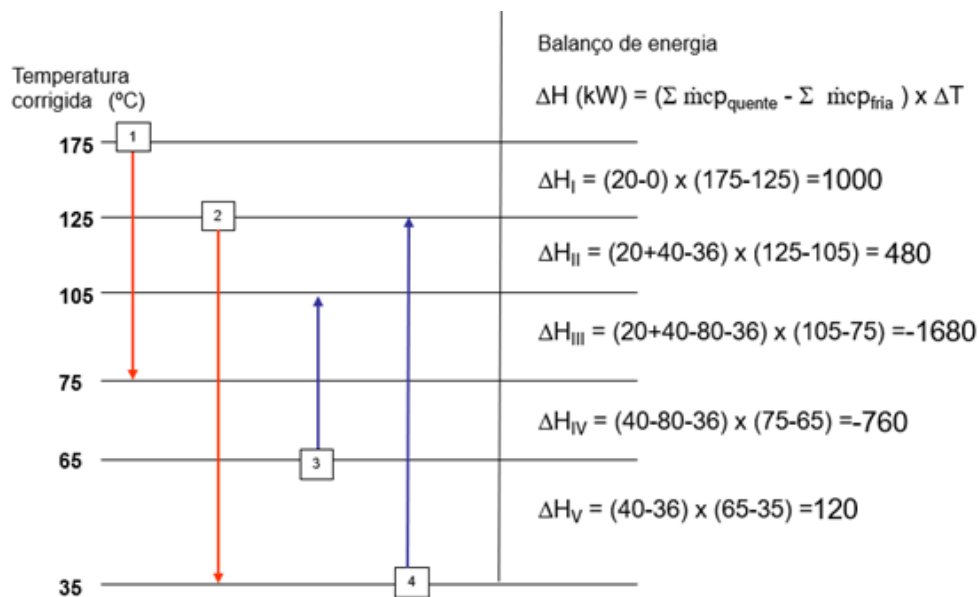


Figura 2.5 Exemplo de template preenchido com os balanços de energia do método da cascata para o exemplo da tabela 2

Nessa figura, a cada traço horizontal corresponde uma temperatura corrigida, por ordem decrescente. A primeira coluna é preenchida com setas verticais que correspondem a cada corrente, a apontar do valor de temperatura de entrada para o valor de temperatura de saída. Na segunda coluna, a cada intervalo de temperaturas, faz-se corresponder um balanço de energia.

Caso o valor de *Potência térmica_i* (ΔH_i) seja positivo, existe um déficit de energia no intervalo de temperaturas, sendo que o inverso se verifica caso o valor de *Potência térmica_i* seja negativo.

3. Construção da Cascata de Calor

Obtidos os valores de temperatura corrigida de cada corrente e realizados os balanços energéticos aos diversos intervalos de temperatura, procede-se à construção da cascata de calor, que indicará a localização do *Pinch* energético bem como a quantidade mínima de energia a fornecer ao sistema, através de utilidades quentes, e a remover, através de utilidades frias. A construção dessa “cascata de calor” passa pelo preenchimento de diversas caixas, conforme representadas na Figura 2.6. De salientar que na Figura 2.6 está representada a situação das duas cascatas (duas linhas verticais com setas) do exemplo apresentado. O método da “cascata de calor” pode ter duas ou apenas uma cascata.

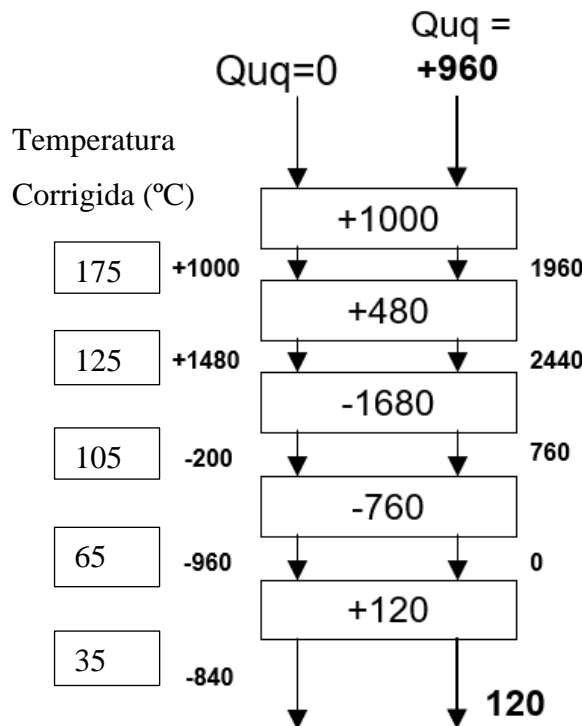


Figura 2.6 Cascata(s) contruída para o exemplo da aplicação da tabela 2

Inicia-se a construção da “cascata de calor” pelo preenchimento de cada caixa com os valores obtidos nos balanços de energia, pela mesma ordem apresentada na grelha gráfica.

De seguida, calcula-se a quantidade de energia presente no sistema após cada nível de temperatura na “cascata de calor”, partindo do ponto em que não se utilizam utilidades quentes no sistema, representado por $Q_{uq}=0$. Esses valores são obtidos somando sequencialmente os valores contidos em cada caixa (por exemplo: $0 + 1000 = +1000$; $1000 + 480 = +1480$). De forma a facilitar os cálculos e o acompanhamento do algoritmo, estes valores são representados no intervalo de cada caixa correspondendo à segunda coluna da figura. Se os valores na segunda coluna fossem todos positivos, o *Pinch* estaria localizado logo no início da cascata, para o valor de temperatura de $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ e então não seria necessário construir a segunda cascata. Neste caso em estudo, tal não acontece, e o *Pinch* passa a estar localizado no valor mais negativo da segunda coluna, -960 kW , ou seja, na temperatura de $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ mas não se conhecem os valores das utilidades. Para se determinar as utilidades a fornecer (quentes) e a retirar (frias) do sistema será necessário construir uma segunda cascata onde os valores das energias nos intervalos se encaram como energias disponíveis transferidas (quarta coluna) que têm que ser positivas (tal como a palavra disponível indica). Então inicia-se a construção passando as utilidades quentes, Q_{uq} , a ser iguais ao valor mais negativo da segunda coluna, mas em módulo, $+960\text{ kW}$. O restante procedimento é igual ao que se fez na primeira cascata (por exemplo: $960 + 1000 = +1960$; $1960 + 480 = +2440$). O valor final da quarta coluna, $+120\text{ kW}$, corresponde à quantidade de energia a retirar ao sistema através de uma utilidade fria, ou seja, Q_{uf} .

Finalmente, de modo a determinar a quantidade de energia a retirar ao sistema através de uma utilidade fria, procede-se aos mesmos cálculos, porém já adicionando ao sistema o valor de Q_{uq} , obtendo-se o valor desejado no final da cascata, Q_{uf} .

Conforme mencionado anteriormente para a correção das temperaturas corrigidas, deve-se retirar ou adicionar o valor de ΔT_{\min} , de forma a se obter os dois valores das temperaturas do *Pinch*, quente e fria.

Verifica-se então, pela Figura 2.6, que:

- o *Pinch* energético é de 65°C , a que corresponde a temperatura quente de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a temperatura fria de 60°C ;
- serão necessários fornecer ao sistema 960 kW através de utilidades quentes e retirar do sistema 120 kW através de utilidades frias.

Tal como nas curvas compostas quentes e frias, o valor de ΔT_{\min} possui uma grande relevância nos resultados obtidos na “cascata de calor”, sendo que uma alteração neste valor implica uma nova realização por completo da “cascata de calor”.

2.6. Construção da rede de permutadores de calor

A construção da rede de permutadores de calor deve ser dividida entre zona acima do *Pinch* e abaixo do *Pinch*, sendo que as trocas a realizar entre as correntes quentes e frias devem seguir várias regras, dependendo da zona em que se encontram. Será de salientar que também poderá existir mais do que um *Pinch* no mesmo sistema e nessa altura também existirá a zona entre *Pinch's*, onde também existem algumas regras para as permutas de calor, nomeadamente, o número de correntes quentes deve ser igual ao número de correntes frias (Esteves, Teresa Sena; Pinto, Gilberto, 2019).

A construção da rede de permutadores de calor inicia-se com trocas de calor entre correntes que tocam no *Pinch* energético, ou seja, que incluem a temperatura do *Pinch* na sua temperatura de entrada ou saída.

Na zona acima do *Pinch*, “absorvedora de calor”, e apenas para as correntes que tocam no *Pinch*, deve-se garantir que a capacidade calorífica por unidade de tempo das correntes quentes, $\dot{m}c_p$, deve ser inferior ou igual ao $\dot{m}c_p$ das correntes frias, com as quais vão permutar calor. Essa regra garante que seja possível transferir-se calor entre essas correntes sem que ocorra violação do ΔT_{\min} , ou seja, em que T'_q é sempre superior ou igual a T'_f . Deve-se ainda certificar que o número de correntes quentes é inferior ou igual ao número de correntes frias. Caso as correntes em questão não respeitem alguma das regras, pode-se proceder à sua divisão, resultando em duas ou mais correntes com $\dot{m}c_p$ inferiores. No caso da regra não respeitada ser a dos $\dot{m}c_p$, deverá proceder-se à divisão da corrente quente que se quer permutar, no caso da regra não respeitada ser a do número de correntes, deverá proceder-se à divisão da(s) corrente(s) fria(s).

Na zona abaixo do *Pinch*, “fonte de calor”, observa-se o oposto das regras apresentadas para a zona “absorvedora de calor”, ou seja, o valor de $\dot{m}c_p$ das correntes quentes deve ser superior ou igual ao das correntes frias, com as quais vão permutar calor, e o número de correntes quentes também deve ser superior ou igual ao número de correntes frias. No

caso da regra não respeitada ser a dos $\dot{m}c_p$, deverá proceder-se à divisão da corrente fria que se quer permutar, no caso da regra não respeitada ser a do número de correntes, deverá proceder-se à divisão da(s) corrente(s) quente(s).

Como foi referido, estas regras empíricas apenas se aplicam às trocas de calor no *Pinch* energético designadas por primeiras trocas, sendo que conforme se vai afastando do *Pinch* e realizando segundas trocas, aquelas regras deixam de ser condições que se devem cumprir obrigatoriamente. No entanto, se, para trocas longe do *Pinch*, essas regras forem cumpridas podem garantir que não há violações de ΔT , desde que as temperaturas das correntes quentes sejam superiores ou iguais às das correntes frias no lado do permutador em que se iniciam as trocas de energia (lado mais próximo do *Pinch*).

O excedente ou défice de calor resultante das trocas entre correntes com necessidades distintas resulta numa nova corrente cuja energia é a diferença entre os respetivos valores das correntes em permuta. Caso as correntes tenham o mesmo módulo de necessidades energéticas, estas apenas trocarão energia entre si, não dando origem a uma nova corrente.

Conforme mencionado no subcapítulo 2.5, acima do *Pinch* não se deve recorrer a utilidades frias, sendo assim necessário garantir que todas as correntes quentes são arrefecidas até à temperatura do *Pinch* recorrendo apenas a trocas de calor com as correntes frias, sendo que o inverso se aplica à utilização de utilidades quentes abaixo do *Pinch*.

Para construir a rede de permutadores de calor é necessário calcular os valores de energia de cada corrente, acima e abaixo do *Pinch*. Na Figura 12.7 apresentam-se esses valores para a zona acima do *Pinch* e na Figura 2.8 para a zona abaixo do *Pinch*. As ligações criadas entre as correntes quentes e as correntes frias representam as trocas de calor entre estas, sendo a quantidade de calor trocado equivalente ao menor módulo de energia das correntes em questão. Representados nas Figuras 2.7 e 2.8 estão ainda os valores de energia a fornecer, Q_{uq} (valores negativos) e a retirar, Q_{uf} (valores positivos), ao sistema, ou seja, às correntes que assim o necessitem, acima e abaixo do *pinch*, respetivamente, para o exemplo apresentado.

Acima do pinch $\left\{ \begin{array}{l} N^{\circ}c.q. < = N^{\circ}c.f. \\ Mcp_q < = Mcp_f \end{array} \right.$

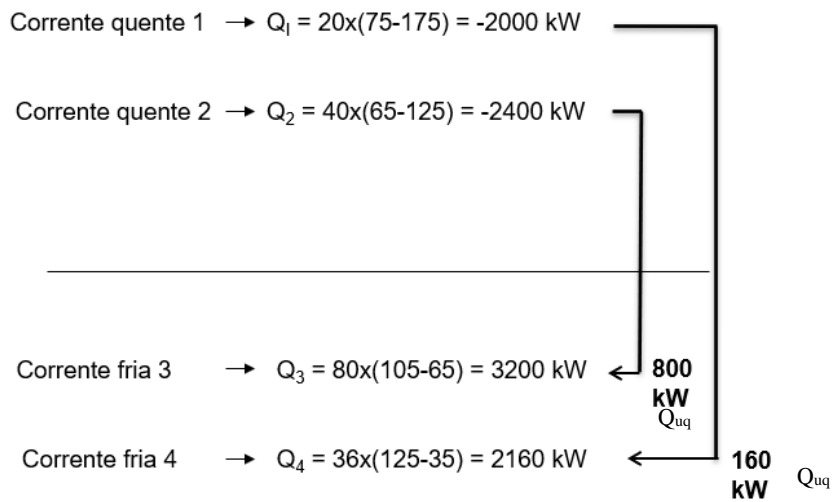


Figura 2.7 Exemplo de cálculo dos valores de energia de cada corrente acima do Pinch, trocas de calor entre as correntes e energias resultantes (utilidades quentes) para o exemplo da tabela 2

Abaixo do pinch $\left\{ \begin{array}{l} N^{\circ}c.f. < = N^{\circ}c.q. \\ Mcp_f < = Mcp_q \end{array} \right.$

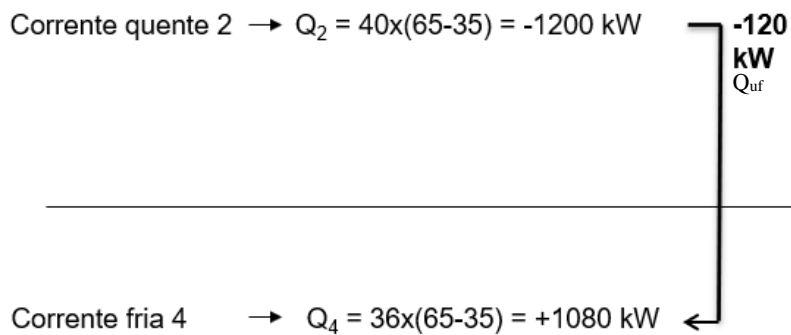


Figura 2.8 Exemplo de cálculo dos valores de energia de cada corrente abaixo do Pinch, trocas de calor entre as correntes e energia resultante (utilidade fria) para o exemplo da tabela 2

A rede de permutadores de calor resultante da aplicação do método da cascata ao exemplo apresentado encontra-se na Figura 2.9.

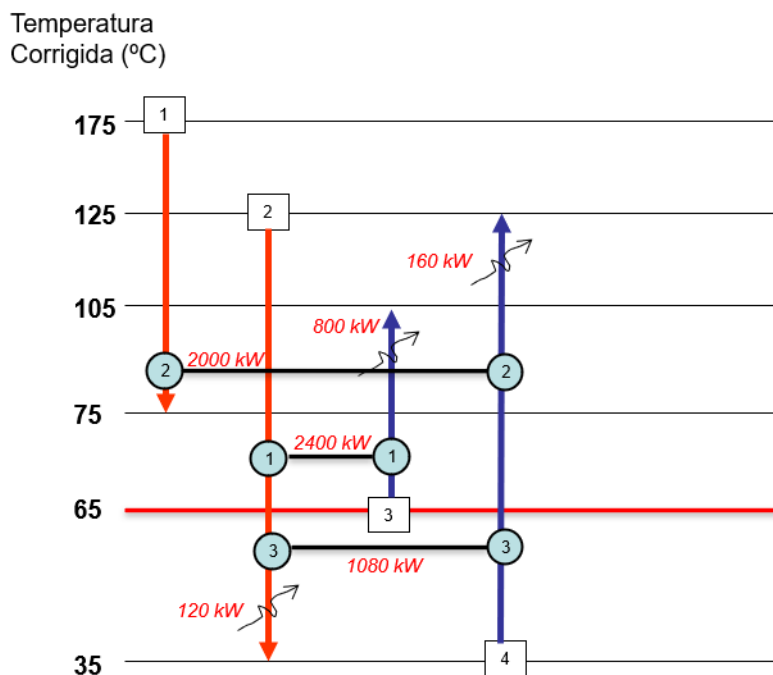


Figura 2.9 Exemplo da rede de permutadores de calor do exemplo de aplicação da tabela 2

No exemplo apresentado pode-se verificar que as correntes 1 transferiu toda a sua energia para a corrente 4, não necessitando assim de ser arrefecida. A corrente dois, acima do *Pinch*, efetuou uma troca com a corrente 3 e abaixo do *Pinch* com a corrente 4, porém, uma vez que ainda necessitava que lhe fosse retirada energia, foi-lhe aplicado uma utilidade fria com uma potência de 120 kW. A corrente 3 trocou energia com a corrente 2 porém ainda necessitou de uma utilidade quente com uma potência de 800 kW. Finalmente, a corrente 4 troca energia com as correntes 1 e 2, e tal como a corrente 3, também necessitou que lhe fosse aplicado uma utilidade quente, desta vez com uma potência de 160 kW.

3. Caracterização da rede de aproveitamentos energéticos do Centro de Produção de Leça do Balio do Super Bock Group

A aplicação da integração energética nas instalações industriais do Centro de Produção de Leça do Balio do Super Bock Group deve partir tanto do conhecimento e compreensão do funcionamento da rede de aproveitamentos térmicos atualmente instalada como da caracterização detalhada dos vários produtores e consumidores de energia existentes.

Uma vez que um dos objetivos desta tese será a avaliação da rede de permutadores já existente, os equipamentos e correntes que serão considerados são aqueles que já fazem parte da rede atual, havendo ainda possibilidade ou não da adoção de novos equipamentos à rede.

Neste capítulo pode-se encontrar uma explicação detalhada do design e funcionamento do sistema de aproveitamentos de energia térmica atual acompanhado de representações gráficas, bem como os diversos equipamentos envolvidos. São ainda apresentados os consumidores e produtores de energia considerados para o estudo e construção da rede de permutadores a propor, caracterizando-se as respetivas correntes, de acordo com o que foi apresentado no capítulo 2.

Visto que se trata de uma abordagem a uma situação real, serão naturalmente encontradas diversas dificuldades devido ao funcionamento da unidade fabril como um todo que obrigarão a tomadas de decisões para a simplificação do procedimento necessário à integração energética.

Deve ser notado que devido à inesperada interrupção abrupta do estágio presencial no Super Bock Group (10 de março de 2020) devido à pandemia COVID-19, nem todos os valores de temperaturas ou potências térmicas por unidade de tempo foram obtidos no mesmo intervalo de tempo. Assim, enquanto a maior parte dos dados apresentados correspondem aos obtidos durante o mês de fevereiro de 2020, outros correspondem a valores facultados pela empresa, obtidos em espaços de tempo diferentes. Nesses casos, um comentário a realçar este facto é apresentado.

3.1. Descrição do sistema de aproveitamento de energia térmica existente

O sistema de aproveitamento de energia térmica instalado atualmente é constituído pelo conjunto de permutadores e tubagens responsáveis pela troca de calor entre as várias correntes quentes e frias dos diversos equipamentos, que serão apresentados neste capítulo. De modo a facilitar a compreensão de um sistema de aproveitamento de energia térmica e a compreender melhor o funcionamento do sistema atual, este será descrito e explicado ao pormenor neste subcapítulo.

O principal fornecedor de energia térmica a todo este sistema é o motor da cogeração utilizado na unidade fabril, dando origem às correntes *High Temperature* , HT, e *Low Temperature*, LT. Começando pela corrente HT, esta encontra-se na cave da sala do motor de cogeração, e fornece energia ao resto da instalação através um permutador que a liga a um circuito fechado. Este circuito será denominado circuito principal, uma vez que é o principal responsável pelo fornecimento de energia aos pasteurizadores, que por sua vez são os maiores consumidores de energia deste sistema. O circuito principal recebe ainda energia resultante dos gases de cogeração, estando ainda dotado de um sistema de backup de vapor, cuja função, como o próprio nome indica, será de fornecer energia ao circuito em questão através da utilização de correntes de vapor, caso a primeira troca de energia não consiga satisfazer as necessidades energéticas dos pasteurizadores. Uma esquematização deste segmento da rede de aproveitamentos energéticos pode ser encontrada na Figura 3.1.

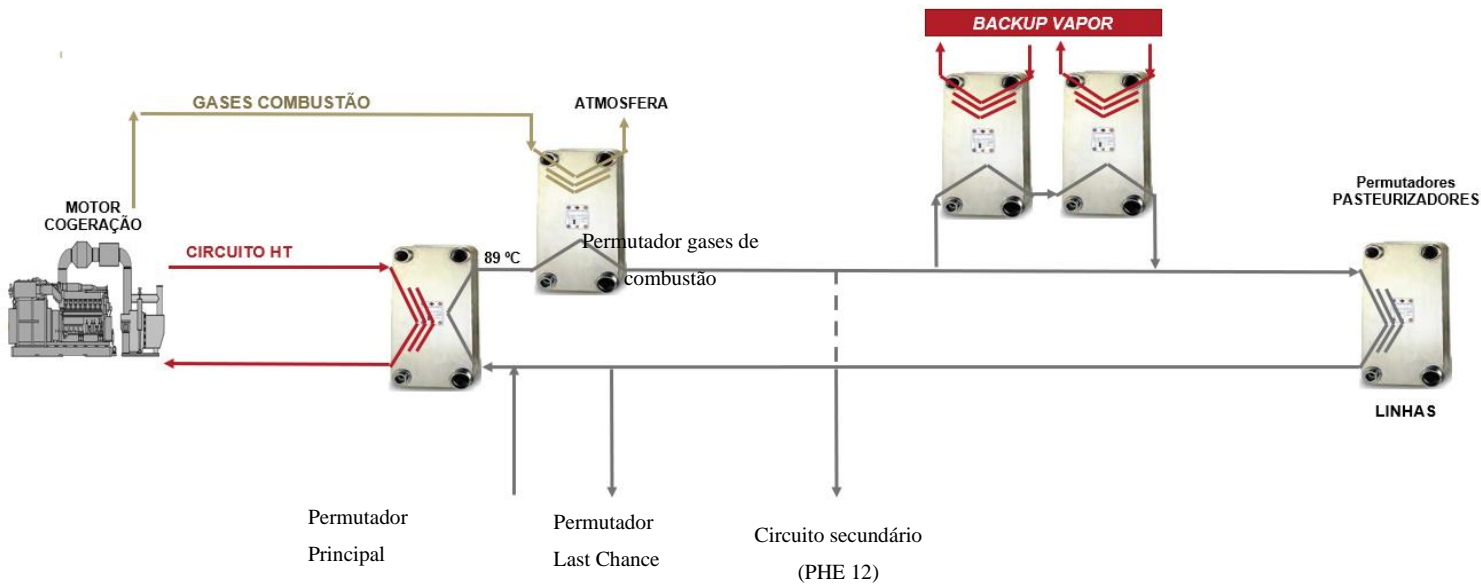


Figura 3.1 Circuito principal do sistema de aproveitamento de energia térmica (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

Uma vez que, na maior parte das vezes, a energia a ser dissipada do circuito/corrente HT é superior àquela capaz de ser absorvida pelos pasteurizadores, a corrente principal pode por sua vez distribuir este calor em excesso para uma segunda corrente, através de um permutador de placas, *Plate Heat Exchanger* (PHE) 12, que por sua vez transporta esta energia para um circuito secundário de aproveitamento de energia térmica.

Este circuito secundário de aproveitamento de energia térmica é o responsável pelo transporte da energia em excesso para os filtros de carvão, para o degaseificador e para a ETAR, sendo que o tanque C805 também fornece energia a este subsistema. Neste circuito semi-fechado, e começando a partir do PHE 12, o fluido quente vai para o tanque C815, no qual é armazenado e misturado com a água quente proveniente do tanque C805 (onde chega água de todo o processo de fabrico), conforme se pode verificar na Figura 3.2.

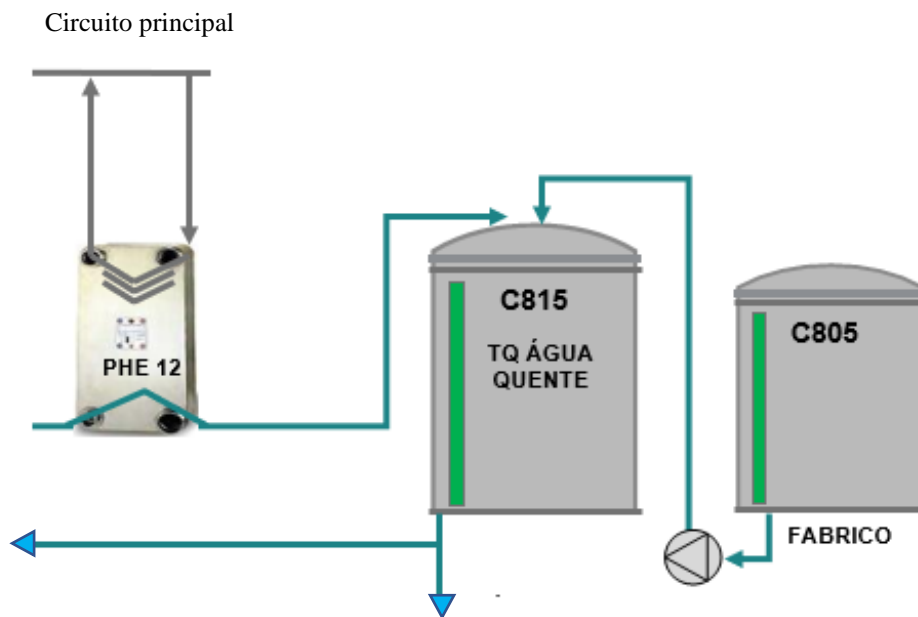


Figura 3.2 Troca de calor entre circuito principal e circuito secundário (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

A água quente proveniente do tanque C815 (tanque coletor e distribuidor de água) pode depois tomar dois cursos, conforme as necessidades energéticas, sendo estes um distribuidor que envia água para a linha do barril, para as adegas, para o vini, ou para ser despejada na central de águas, e a reinserção no próprio circuito secundário. Em ambos os casos a água quente é aproveitada para aquecer água desmineralizada cujo destino é o degaseificador. Esta transferência de energia é feita através do PHE 14 caso a água tenha como destino a central de águas ou o PHE 13 caso a água seja reinserida no circuito. Isto pode ser verificado na Figura 3.3.

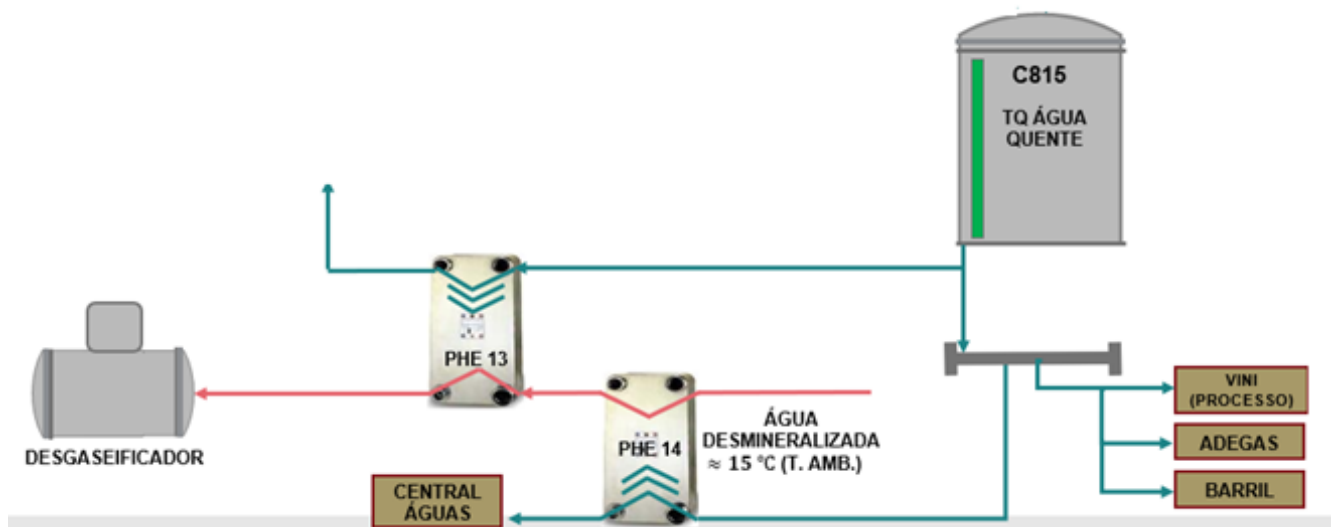


Figura 3.3 Distribuição da água proveniente do tanque C815 (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

Um esquema global deste circuito secundário pode ser encontrado na Figura 3.4.

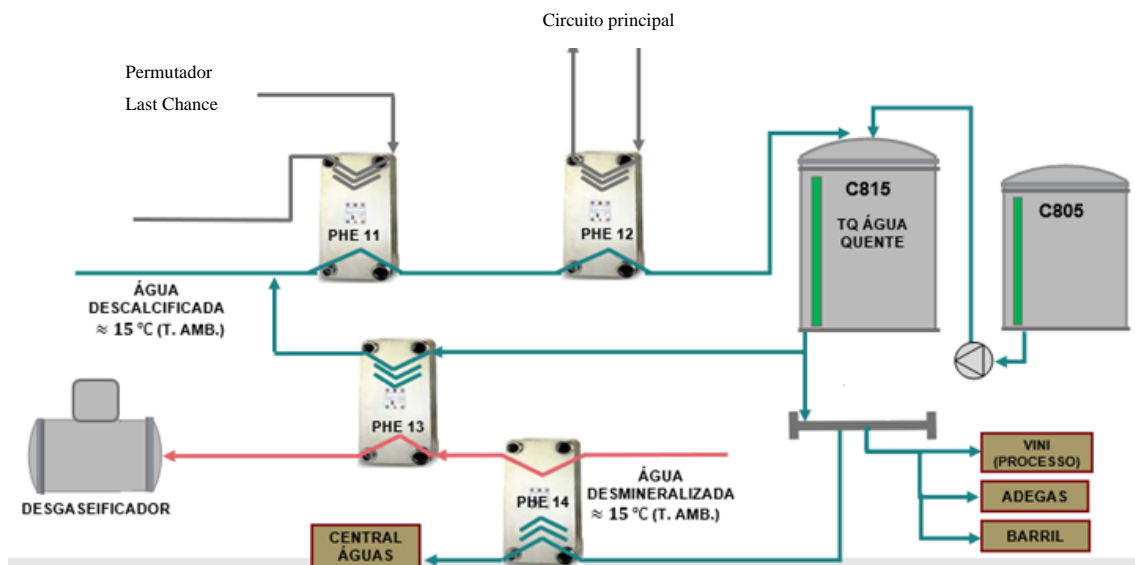


Figura 3.4 Circuito secundário dos aproveitamentos de energia térmica (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

A água a ser reinserida no sistema faz-se através da introdução de água descalcificada de modo a colmatar a água que deixa o circuito, como a que vai para as adegas, linha de barril, vini ou para a central de águas.

Existe ainda implementado no sistema global de aproveitamentos de energia térmica um terceiro subsistema, denominado de “comboio”. O “comboio” tem como objetivo aumentar os aproveitamentos térmicos possíveis, introduzindo no sistema global várias fontes quentes e frias, sendo elas o circuito LT do motor de cogeração, os compressores

e o circuito principal, no que diz respeito a fontes quentes, e a ETAR no que diz respeito a fontes frias. O circuito principal está ligado ao “comboio” indiretamente através do permutador denominado PHE *Last Chance*, que transporta a energia em excesso do circuito principal, após ter fornecido o que podia aos pasteurizadores num circuito fechado. Este circuito fechado permite fornecer energia ao circuito secundário através do permutador PHE 11 ou fornecer energia ao “comboio” através do permutador PHE 2, conforme necessário. Estas interligações podem ser verificadas na Figura 3.5.

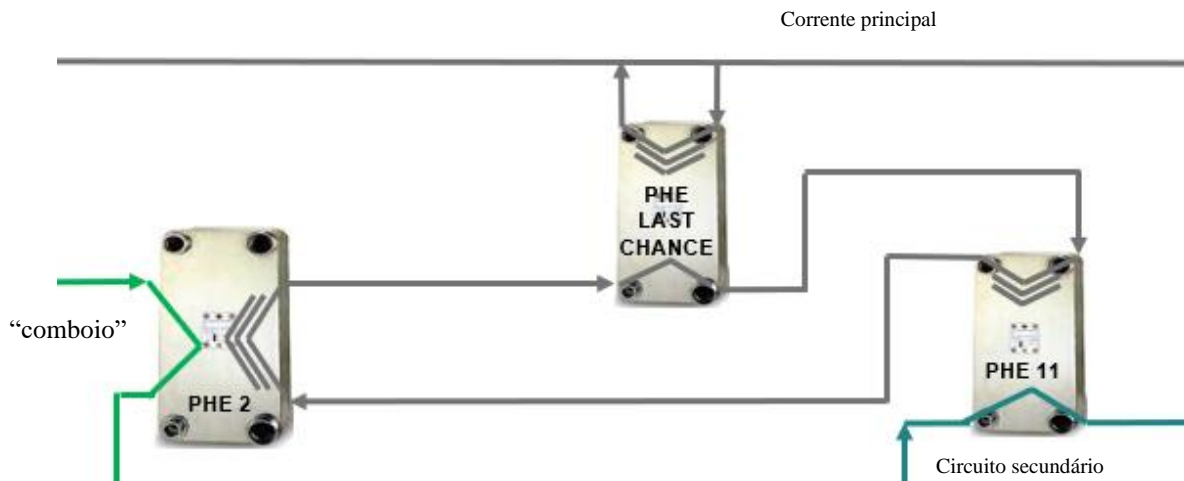


Figura 3.5 Funcionamento permutador PHE Last Chance (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

O “comboio” pode então ser descrito como um conjunto de 4 permutadores que fazem parte de um circuito fechado, com um caudal constante e cujo fluido transportador de energia é água glicolada (35%). Os permutadores que fazem parte deste subsistema são os permutadores PHE 1, PHE 2, PHE 3 e PHE 4, cada um responsável pela troca de calor com uma das fontes previamente apresentadas. Este circuito encontra-se esquematizado na Figura 3.6.

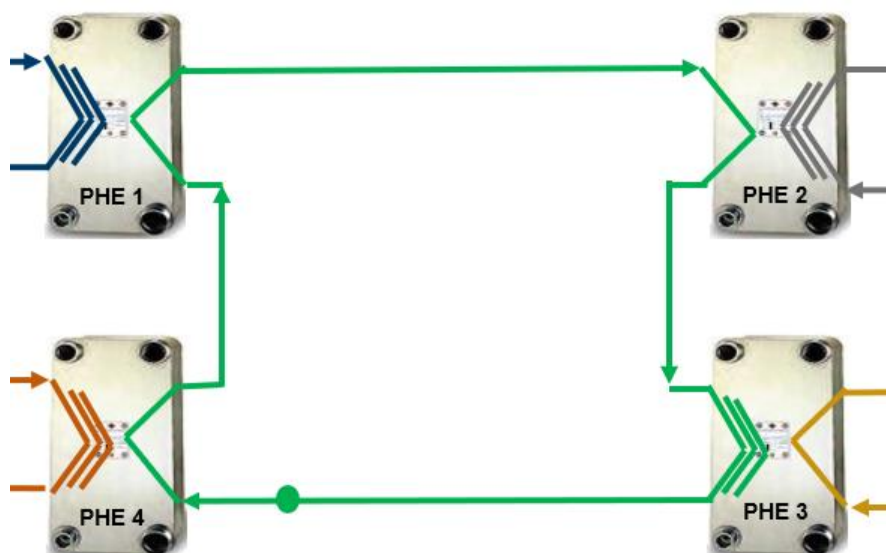


Figura 3.6 Subsistema/circuito "comboio" (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

O permutador PHE 1 é o responsável pela troca de energia presente no circuito LT para o circuito do "comboio", conforme se pode verificar na Figura 3.7.

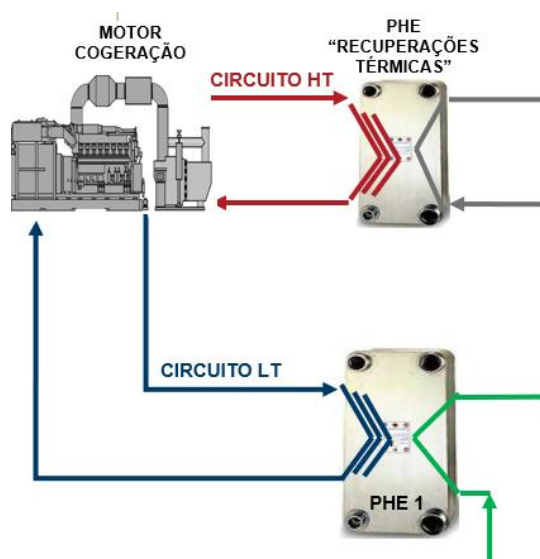


Figura 3.7 Permutador PHE 1 (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

O permutador PHE 3 é o único que remove energia do circuito fechado do "comboio", fornecendo-a a uma corrente proveniente de um tanque de "rejeitados" de osmose, o TQ 14, que se encontra à temperatura ambiente, destinando-se esta água à ETAR, sendo que este circuito se encontra representado na Figura 3.8.

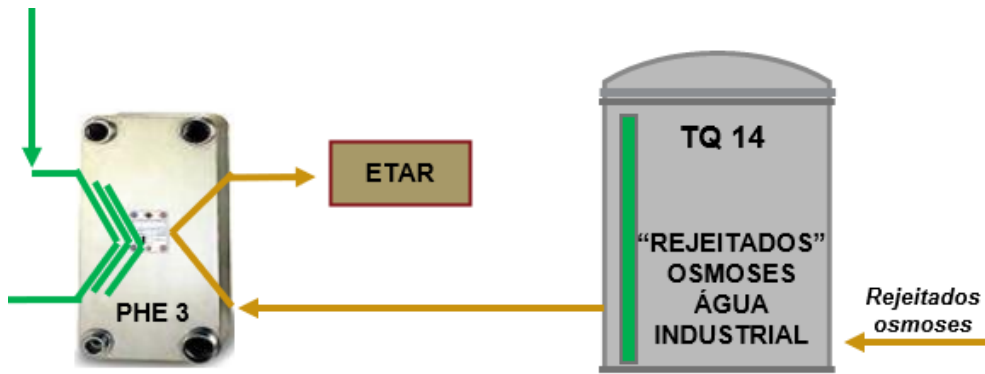


Figura 3.8 Permutador PHE 3 (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

Terminando o circuito do “comboio”, o permutador PHE 4 é o responsável por receber a energia resultante do arrefecimento dos compressores, conforme se verifica na Figura 3.9.

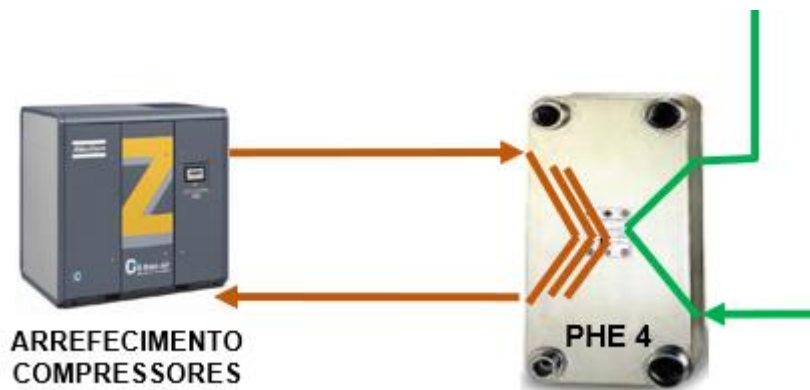


Figura 3.9 Permutador PHE 4 (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

Finalmente, toda a energia do circuito principal que não pode ser aproveitada de uma forma ou de outra tem como destino os aeroarrefecedores, nos quais a energia em excesso será trocada com o ar exterior, conforme se verifica na Figura 3.10.

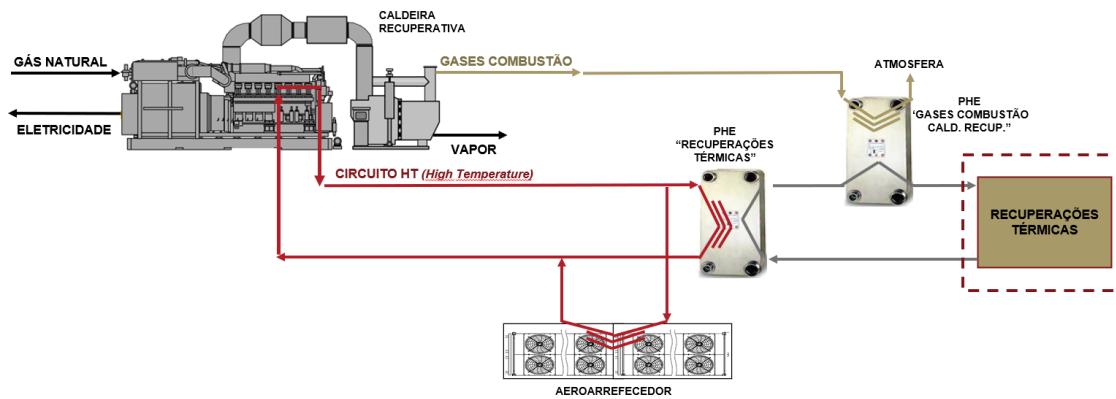


Figura 3.10 Sistema de arrefecimento: aeroarrefecedores (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

A energia restante do circuito LT, caso também não seja aproveitada totalmente, será dissipada numa torre de refrigeração.

Um diagrama técnico de todo o sistema de aproveitamentos térmicos implementado na central de produção de Leça do Balio, incluído todos os aparelhos e instrumentação utilizados, pode ser encontrado na Figura 3.11 (Melo, Eduarda (2018)). Os diversos circuitos deste sistema encontram-se delineados a cores diferentes, correspondendo o circuito delineado a verde ao circuito principal, o a vermelho e a tracejado ao secundário e a azul e pontado ao “comboio”.

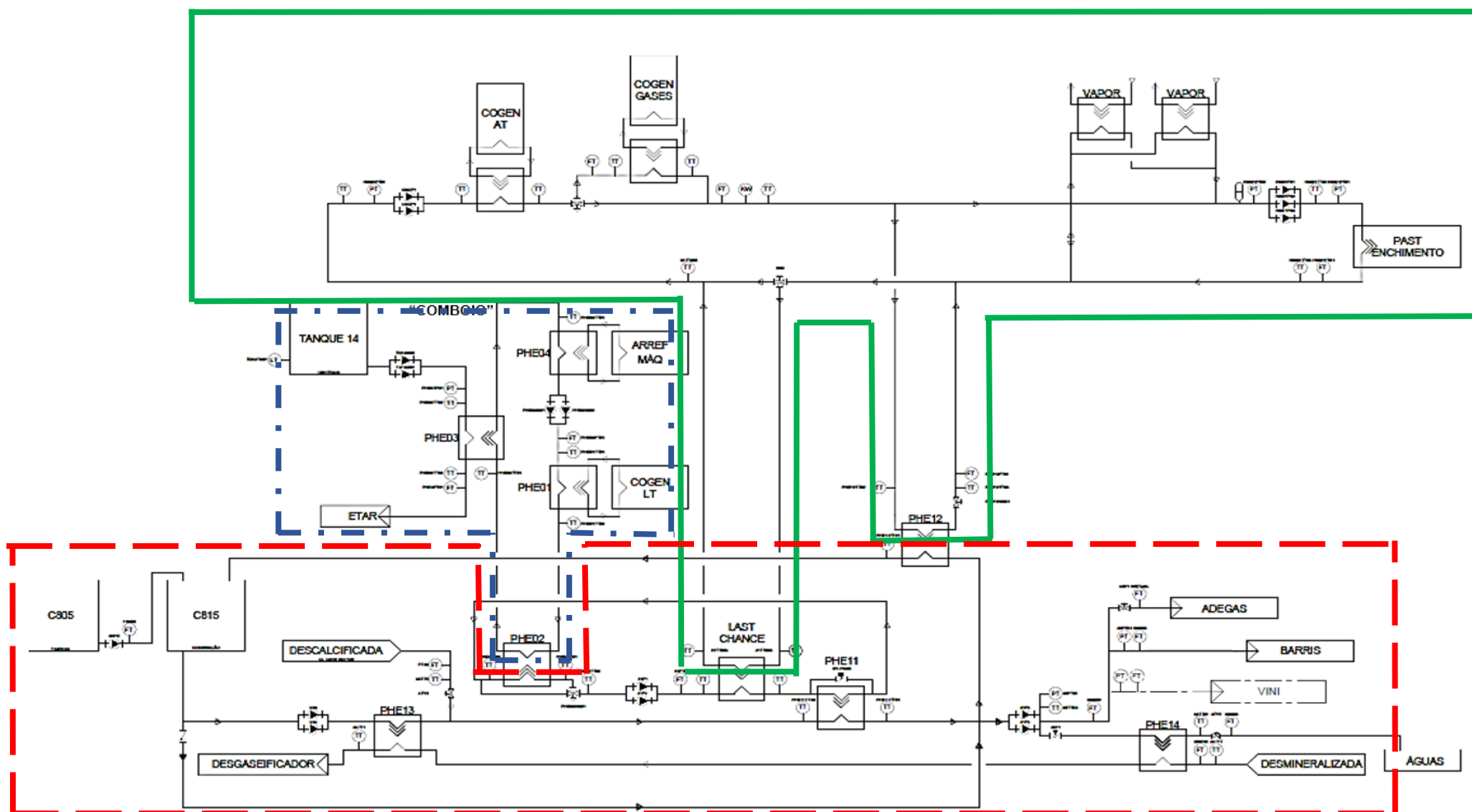


Figura 3.11 Diagrama técnico do sistema de aproveitamentos térmicos em estudo (Melo, Eduarda (2018))

3.2. Produtores de energia

Neste subcapítulo apresentam-se os produtores de energia considerados para este estudo.

3.2.1 Motor de Cogeração

A primeira e maior fonte de energia do sistema é o motor utilizado na unidade fabril para o processo de cogeração, que visa produzir simultaneamente energia térmica e elétrica. Este é um motor MVM que no seu design possui duas correntes de arrefecimento do motor que serão as utilizadas para os fins desejados. Estas correntes, denominadas *High Temperature*, HT, e *Low Temperature*, LT, são correntes de água com glicol (35%), que circulam em circuito fechado. Cada uma dessas correntes, sai do motor a uma temperatura elevada devendo retornar ao mesmo a uma temperatura mais baixa, sendo que todos os valores de temperaturas e caudais são relativamente estáveis e fixos. Um esquema destas correntes pode ser encontrado na Figura 3.123.12 onde:

- a corrente HT tem uma temperatura de entrada, T_{entrada} , de 91 °C, uma temperatura de saída, $T_{\text{saída}}$, de 78 °C, um caudal volúmico de 105 m³/h e uma capacidade calorífica por unidade de tempo, $\dot{m}c_p$, de 118 kW/°C;
- a corrente LT tem T_{entrada} , de 45 °C, $T_{\text{saída}}$, de 40 °C, um caudal volúmico de 65 m³/h e $\dot{m}c_p$ de 72,7 kW/°C;

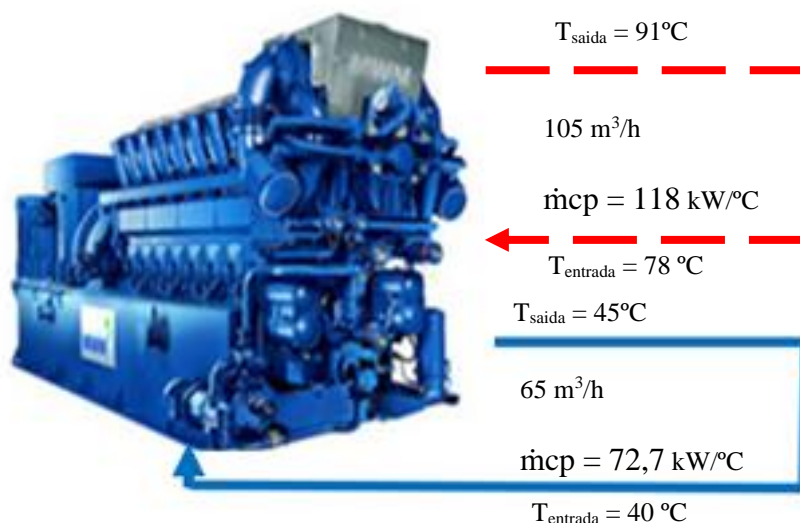


Figura 3.12 Motor de Cogeração e respectivas correntes

Representado na Figura 3.12 encontra-se, a vermelho e tracejado, a corrente correspondendo ao circuito HT e, a azul e a cheio, a corrente correspondendo ao circuito LT. Estes dois circuitos são independentes um do outro, pelo que podem ser considerados duas correntes quentes. Deve ser ainda mencionado que as temperaturas de ambas as correntes diferem conforme a altura do ano, sendo superiores no verão e inferiores no inverno. Uma vez que foi impossível aceder ao motor de forma contínua durante um período longo o suficiente para se poder ter em conta esses valores de temperatura, escolheu-se utilizar os valores disponibilizados pela empresa (Melo, Eduarda (2018)) para este estudo, referentes às médias obtidas no verão de 2018. Apesar de esta limitação implicar que as temperaturas apresentadas não correspondem às praticadas aquando da recolha de dados de muitas outras correntes apresentadas, espera-se que a divergência entre estes deve ser bastante reduzida devido ao funcionamento regular do motor.

3.2.2 Caldeira Recuperativa

Através da energia térmica presente nos gases de escape do motor de cogeração é possível aquecer água para a produção de vapor, sendo utilizado, por toda a instalação fabril, salientando que esta caldeira não é a fonte exclusiva de vapor. Este aproveitamento é realizado com recurso a uma caldeira de recuperação, cujos gases, após a formação de vapor, podem ser ainda aproveitados para fins de aquecimento. Esta caldeira está dotada de dois economizadores, permutadores próprios para o aquecimento de líquidos através de gases, sendo que o primeiro é responsável pelo aquecimento da água de alimentação à caldeira recuperativa e o segundo pelo aquecimento da água da rede de aproveitamento energético. Esta corrente quente, do segundo economizador, tem a característica de não ter temperatura final estipulada, sendo esta limitada pela capacidade de permuta do economizador e pelas características físicas da corrente. Uma ilustração da caldeira recuperativa e a temperatura dos seus gases de escape pode ser encontrada na Figura 3.13. Nesta figura, por motivos de simplicidade, apenas se encontra representado o segundo economizador. A corrente que será utilizada como fonte quente tem uma temperatura inicial de 151°C e uma temperatura final de 124°C, temperatura esta que foi escolhida pois é a temperatura média a que os gases de escape se encontram após fornecer energia ao sistema de recuperações energéticas atual. O valor da capacidade calorífica por unidade de tempo desta corrente é de 5,7 kW/°C.

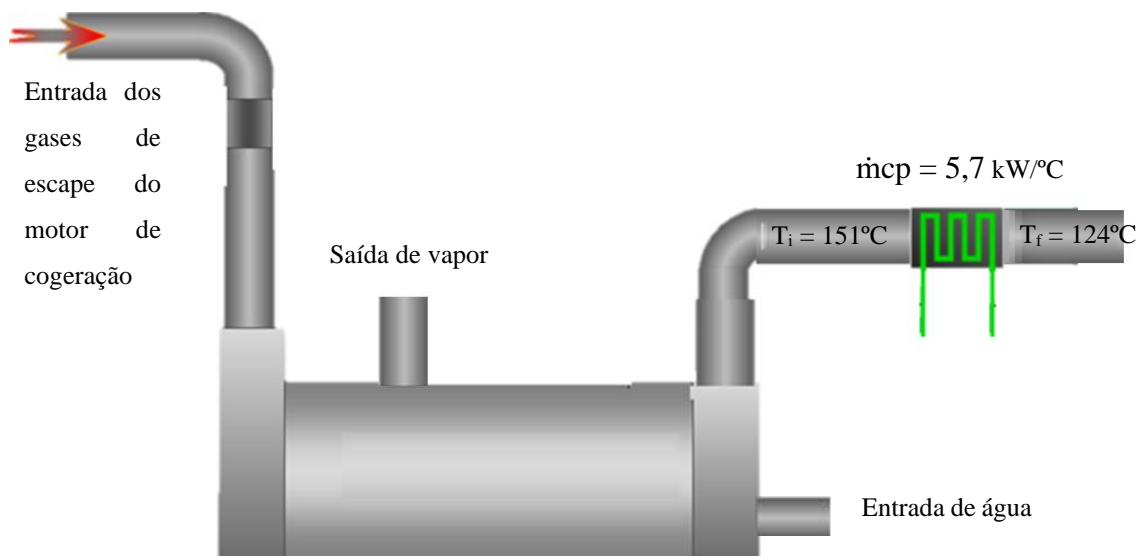


Figura 3.13 Caldeira Recuperativa

3.2.3 Compressores de CO₂

Na instalação industrial são utilizados compressores de CO₂ que possuem correntes que operam em circuito fechado que necessitam de arrefecimento. Apesar de as necessidades entálpicas destas correntes serem bastante reduzidas, uma vez que estas já se encontram incorporadas na rede de aproveitamentos térmicos existente, será considerada para a conceção da nova rede. Um esquema do compressor e da respetiva corrente da água de refrigeração encontra-se na Figura 3.14. Esta corrente de refrigeração sai do compressor a uma temperatura inicial de 29°C e deve voltar ao compressor a 24°C, sendo a sua capacidade calorífica por unidade de tempo 15,6 kW/°C.

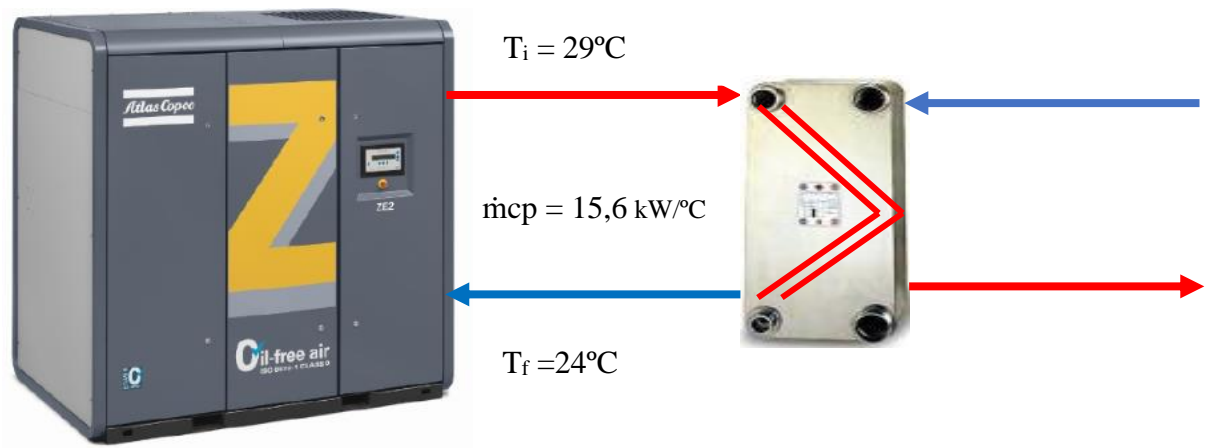


Figura 3.14 Arrefecimento do Compressor de CO2 e correntes relevantes ao processo

3.2.4 Tanque C805

O tanque C805 armazena água proveniente da zona do fabrico a temperaturas e intervalos de tempo variados, devido a várias razões processuais dessa zona. Porém, este tanque é frequentemente utilizado no aproveitamento térmico já existente, pelo que também deve ser considerado neste trabalho. Conforme se verificava no que diz respeito à caldeira recuperativa, esta corrente não possui um valor final de temperatura fixa, pelo que terá que ser definida tendo em conta a sua temperatura final média na rede de aproveitamentos térmicos já existente, sendo que o mesmo raciocínio se aplica à sua temperatura inicial. Assim, as temperaturas consideradas para esta fonte quente foram de 78°C como temperatura inicial e 26°C como temperatura final, e o valor da capacidade calorífica por unidade de tempo desta corrente é de 3,95 kW/°C. Um esquema desse tanque pode ser encontrado na Figura 3.15.

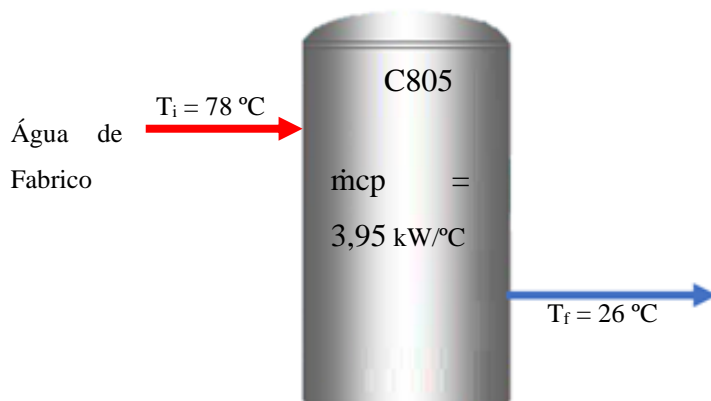


Figura 3.15 Tanque C805

3.2.5 Propriedades termodinâmicas das correntes quentes

Um quadro resumo dos diversos equipamentos e das suas correntes e características pode ser encontrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Temperaturas iniciais (T_i) e finais (T_f), caudais e propriedades físicas das correntes quentes

Corrente quente	T_i (°C)	T_f (°C)	Caudal mássico (kg/s)	Calor específico (kJ/(kg·°C))	$\dot{m}c_p$ (kW/°C)
HT	91	78	29,72	3,97	118
LT	45	40	18,69	3,89	72,7
Gases de escape da caldeira recuperativa	151	124	6,7	0,895	5,7
Arrefecimento compressores	29	24	3,73	4,18	15,6
Tanque C805	78±23	26	0,93	4,21	3,95

Os valores das massas volúmicas das correntes, necessários para a determinação dos caudais mássicos, e dos calores específicos foram calculados recorrendo a expressões matemáticas, uma vez que estes variam com a temperatura. As expressões utilizadas e um exemplo de cálculo podem ser encontrados no Anexo A.

Uma vez que os dados da temperatura de saída da corrente do tanque C805 foram obtidos através da média de um conjunto de valores obtidos ao longo do decorrer do estágio presencial, e não fornecidos pela empresa posteriormente como os restantes, apenas este possuem o respetivo desvio associado.

3.3. Consumidores de energia

3.3.1 Pasteurizadores das várias linhas de produção

Cada linha de produção, numeradas de 1 a 6, com exceção da linha 4, está dotada de um pasteurizador cujas necessidades energéticas são fornecidas pela rede de aproveitamentos de energia térmica existente. Estes pasteurizadores operam de forma semelhante, porém

têm necessidades energéticas diferentes, uma vez que tratam diferentes produtos. Um esquema do funcionamento destes pasteurizadores, no que diz respeito à utilização de energia térmica, pode ser encontrado na Figura 3.16.

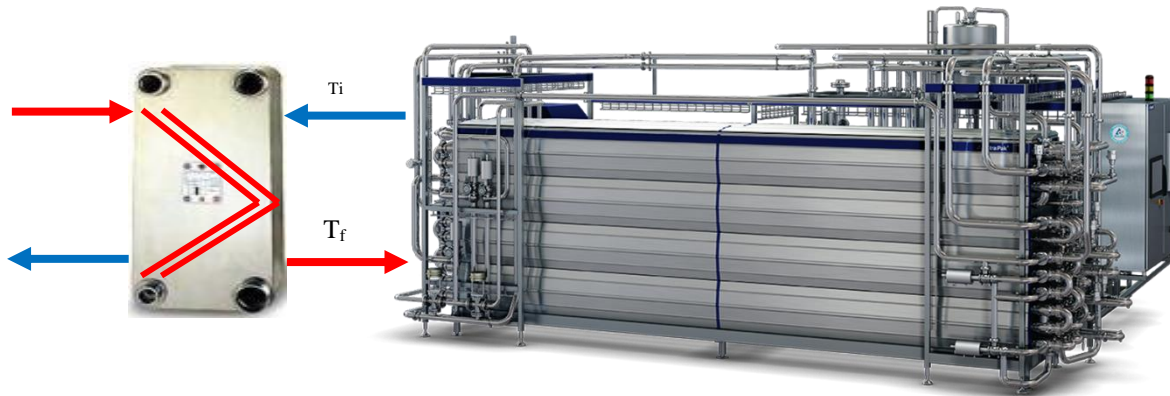


Figura 3.16 Esquema do aquecimento de um Pasteurizador

Uma vez que as correntes a aquecer nestes permutadores não estão dotadas de medidores de caudal, estes terão que ser estimados através de balanços de energia às correntes.

Os balanços de energia aos permutadores dos pasteurizadores de calor serão realizados tendo em conta os valores médios das propriedades físicas das correntes atualmente utilizadas para fornecer energia ao sistema em questão. Estes dados só se tornaram disponíveis após a interrupção do estágio presencial, sendo que estes apenas foram obtidos em julho de 2020. Os valores utilizados nestes cálculos correspondem assim aos valores médios verificados durante esse mês e podem ser encontrados na Tabela 3.2. Assumiu-se que, uma vez que as temperaturas das correntes do permutador são bastante próximas, e que o fluido em causa é só água, o valor de c_p destas correntes é idêntico, simplificando o cálculo.

Tabela 3.2 Características das correntes fornecedoras de energia aos pasteurizadores

Pasteurizador	Caudal (m ³ /h)	T _i (°C)	T _r (°C)	cp (kJ/kg.°C)
Linha 1	23.3	86.3	70.6	4,28
Linha 2	32.6	88.5	73.6	
Linha 3	27.7	88.7	71.8	
Linha 5	19	86	72.6	
Linha 6	25.6	89.4	74.8	

Relativamente ao lado receptor de energia do sistema, os valores utilizados para estes cálculos podem ser encontrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Características das correntes receptoras de energia nos pasteurizadores

Pasteurizador	T _i (°C)	T _r (°C)	cp (kJ/kg.°C)
Linha 1	70	75	4,28
Linha 2	70	75	
Linha 3	70	75	
Linha 5	72	75	
Linha 6	70	75	

Tendo em conta estes valores, e utilizando a expressão que se encontra no Anexo A para determinar o calor específico da água, calculou-se o caudal de fluido recetor de energia neste sistema para cada permutador. Um exemplo destes cálculos pode ser encontrado no Anexo B. Os valores obtidos para estes caudais, bem como os valores de $\dot{m}cp$ obtidos, são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Caudal de fluido recetor de energia em cada pasteurizador

Pasteurizador	Caudal (kg/s)	$\dot{m}cp$ (kW/°C)
Linha 1	17.25	74
Linha 2	20.75	88.8
Linha 3	24.77	106
Linha 5	24.1	103
Linha 6	15.96	68.3

3.2.2 ETAR

Parte do funcionamento da ETAR reside num processo biológico que opera a 30,5 °C. As necessidades energéticas para que esta temperatura se mantenha constante são em parte colmatadas pela rede de aproveitamentos de energia térmica existente, pelo que este se considera um processo consumidor de energia na instalação. A água fornecida a este processo vem de um tanque de acumulação, TQ 14, no qual se armazena a água rejeitada do processo de osmose inversa que se dá na Estação de Tratamento de Água (ETA), sendo que a temperatura da água neste tanque é a ambiente, considerada 20°C. A capacidade calorífica por unidade de tempo deste utilizador é de 150 kW/°C. Um esquema do aproveitamento térmico realizado por parte da ETAR pode ser encontrado na Figura 3.17.

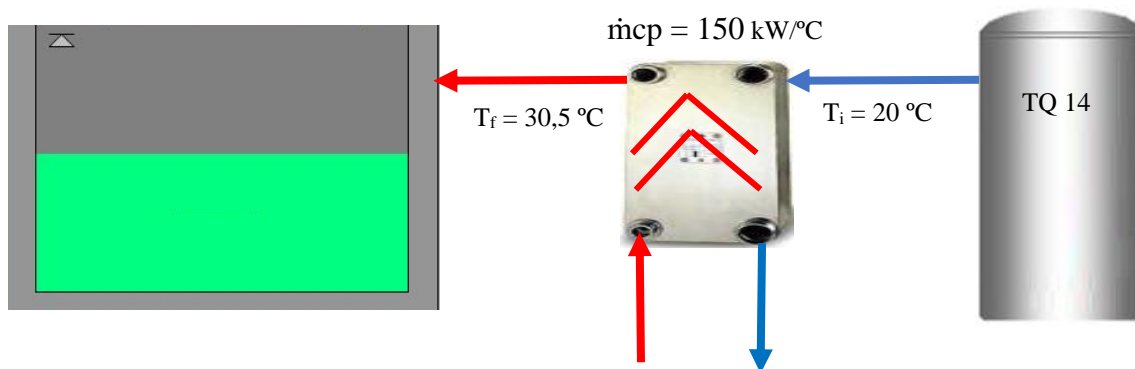


Figura 3.17 Aquecimento da corrente de alimentação à ETAR

3.2.3 *Cleaning in Place* (CIPs) e esterilização de filtros de carvão

A realização da limpeza dos equipamentos industriais, sejam reatores ou outros relativos à produção, decorre sem haver movimentação dos aparelhos, o designado *Cleaning in Place* (CIP). Este processo necessita de decorrer a uma temperatura de 80°C, sendo que a corrente inicial se encontra à temperatura ambiente de 20 °C, necessitando de aquecimento. Assim, cabe ao sistema de aproveitamentos de energia térmica suprimir essas necessidades em várias áreas, nomeadamente, a das adegas, onde decorre a fermentação da cerveja, da linha do barril, onde se enchem os barris de cerveja, e no vini, onde se produz sangria. O mesmo se pode verificar na esterilização dos filtros de carvão da produção de cidra. Uma vez que estes equipamentos, CIPs e filtros, apesar de funcionarem de formas diferentes, têm as suas necessidades energéticas satisfeitas da mesma forma, estes podem ser representados identicamente e conforme se apresenta na Figura 3.18. A corrente a ser aquecida e utilizada neste processo possuem um valor de capacidade calorífica por unidade de tempo de 3,9 kW/°C. As correntes de lavagem que

deixam os tanques, tanto aqueles onde se realizam os CIPs como os Filtros de Carvão, são de seguida enviadas para a Estação de Tratamento de Águas Residuais. Uma vez que dependendo do tanque estas correntes podem sair a diversas temperaturas que não são registadas ou avaliadas, não se considerou a possibilidade de as utilizar como uma fonte quente para os aproveitamentos energéticos, apesar de estas terem um caudal mássico definido e igual ao que é fornecido a estes equipamentos.

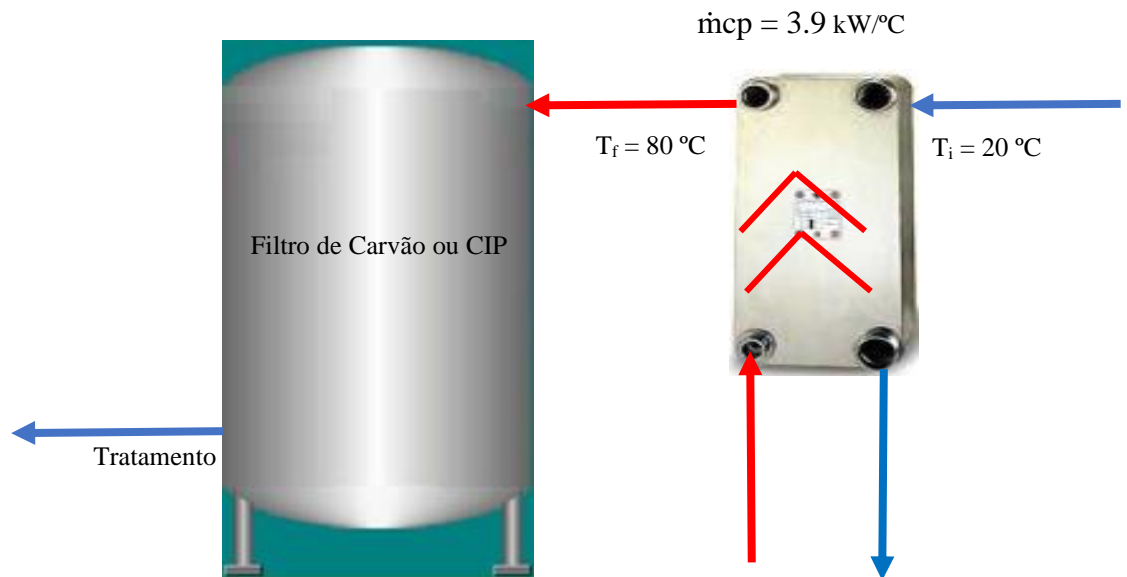


Figura 3.18 Exemplo de um filtro de carvão e características das correntes

3.2.3 Desgaseificador

A água desmineralizada de alimentação às caldeiras do centro de produção, utilizadas para a produção de vapor, deve ser previamente tratada de forma a não pôr em causa o funcionamento destes equipamentos devido a problemas como incrustações ou arrastamentos de partículas. Assim, um dos tratamentos a que esta água é sujeita é o de desgaseificação, no qual os gases dissolvidos na água são libertados resultado das altas temperaturas, por volta dos 100 °C, e de uma pressão ligeiramente superior à do ambiente. Se esta água for previamente aquecida devido a um qualquer excedente de energia que possa existir será necessário um menor consumo de gás natural resultando numa poupança monetária, sendo isso o que ocorre neste processo de aproveitamento. A corrente de água fornecida ao equipamento possui uma temperatura inicial de 60°C e um valor de capacidade calorífica por unidade de tempo de 5.5 kW/°C Um esquema do aproveitamento térmico no desgaseificador pode ser encontrado na Figura 3.19.

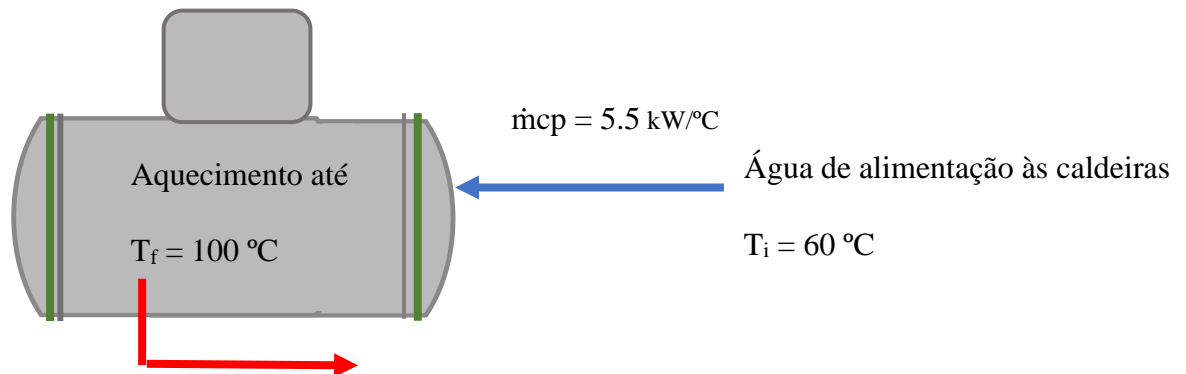


Figura 3.19 Desgaseificador

3.2.4 Propriedades termodinâmicas das correntes frias

Uma síntese com as correntes que receberão energia e as suas propriedades termodinâmicas, relevantes a este estudo, encontra-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Resumo das correntes frias relevantes ao estudo

Corrente fria	T_i (°C)	T_r (°C)	Caudal mássico (kg/s)	Calor específico (kJ/kg.°C)	$\dot{m}c_p$ (kW/°C)
Linha 1	70	75	17,25	4,28	73,8
Linha 2	70	75	20,75	4,28	88,8
Linha 3	70	75	24,77	4,28	106
Linha 5	72	75	24,1	4,28	103
Linha 6	70	75	15,96	4,28	68,3
ETAR	20	30.5	33,25	4,18	139
Adega/Barril/ Vini	20	80	0,93	4,2	3,9
Desgaseificador	60	100	1,27	4,32	5,49

4. Determinação da rede de máximos aproveitamentos energéticos

Para a determinação da rede de máximos aproveitamentos energéticos será utilizado o método da cascata de calor apresentado no capítulo 2. Com este método pretende-se encontrar o número mínimo de permutadores a utilizar nas instalações de forma a se aproveitar o máximo de energia térmica possível e a quantidade de energia mínima a aplicar e retirar ao sistema através da utilização de utilidades externas. Pretende-se ainda neste capítulo avaliar economicamente a implementação desta rede tendo em conta a rede já existente e determinar o impacto que esta rede teria no KPI da empresa.

4.1. Aplicação do método da cascata

A aplicação do método da cascata à situação em estudo seguirá a lógica apresentada no capítulo 2. Assim, um quadro com as correntes em questão e as suas características termodinâmicas relevantes, nomeadamente a temperatura de entrada, temperatura de saída e capacidade calorífica por unidade de tempo, bem como a caracterização como corrente quente ou fria e as suas temperaturas corrigidas podem ser encontrado na Tabela 4.1. O valor de ΔT_{\min} escolhido foi de 6 °C.

Tabela 4.1 Propriedades físicas das correntes utilizadas no pinch energético

Número da Corrente	Descrição da Corrente	Tipo de corrente	T _i (°C)	T _i corrigida (°C)	T _r (°C)	T _r corrigida (°C)	mcp (kW/°C)
1	Pasteurizador linha 1 (L1)	Fria	70	73	75	78	73.8
2	Pasteurizador linha 2 (L2)	Fria	70	73	75	78	88.8
3	Pasteurizador linha 3 (L3)	Fria	70	73	75	78	106
4	Pasteurizador linha 5 (L5)	Fria	72	75	75	78	103
5	Pasteurizador linha 6 (L6)	Fria	70	73	75	78	68.3
6	ETAR	Fria	20	23	30.5	33.5	139
7	Desgaseificador (Desg.)	Fria	60	63	80	83	3.9
8	Adega/Barril/Vini (A.B.V.)	Fria	20	23	100	103	5.49
9	HT	Quente	91	88	78	75	118
10	LT	Quente	45	42	40	37	72.7
11	Gases de escape da Caldeira (G.C.)	Quente	151	148	124	121	5.7
12	Compressor (Comp.)	Quente	29	26	24	21	15.6
13	Tanque C805 (C805)	Quente	78	75	26	23	3.95

Os valores de mcp representados na Tabela 4.1 foram obtidos pelo produto do caudal mássico da respetiva corrente e do seu valor de cp, sendo que o primeiro é referente ao mês de fevereiro de 2020, à exceção das correntes HT e LT, referentes ao verão de 2018 e das correntes dos pasteurizadores das várias linhas, que por sua vez são referentes ao mês de julho de 2020. A capacidade calorífica foi determinada recorrendo às expressões encontradas no Anexo A, utilizando a temperatura média de cada corrente para este cálculo.

A representação destas correntes e os balanços de energia a elas associados podem ser encontrados na Figura 4.1.

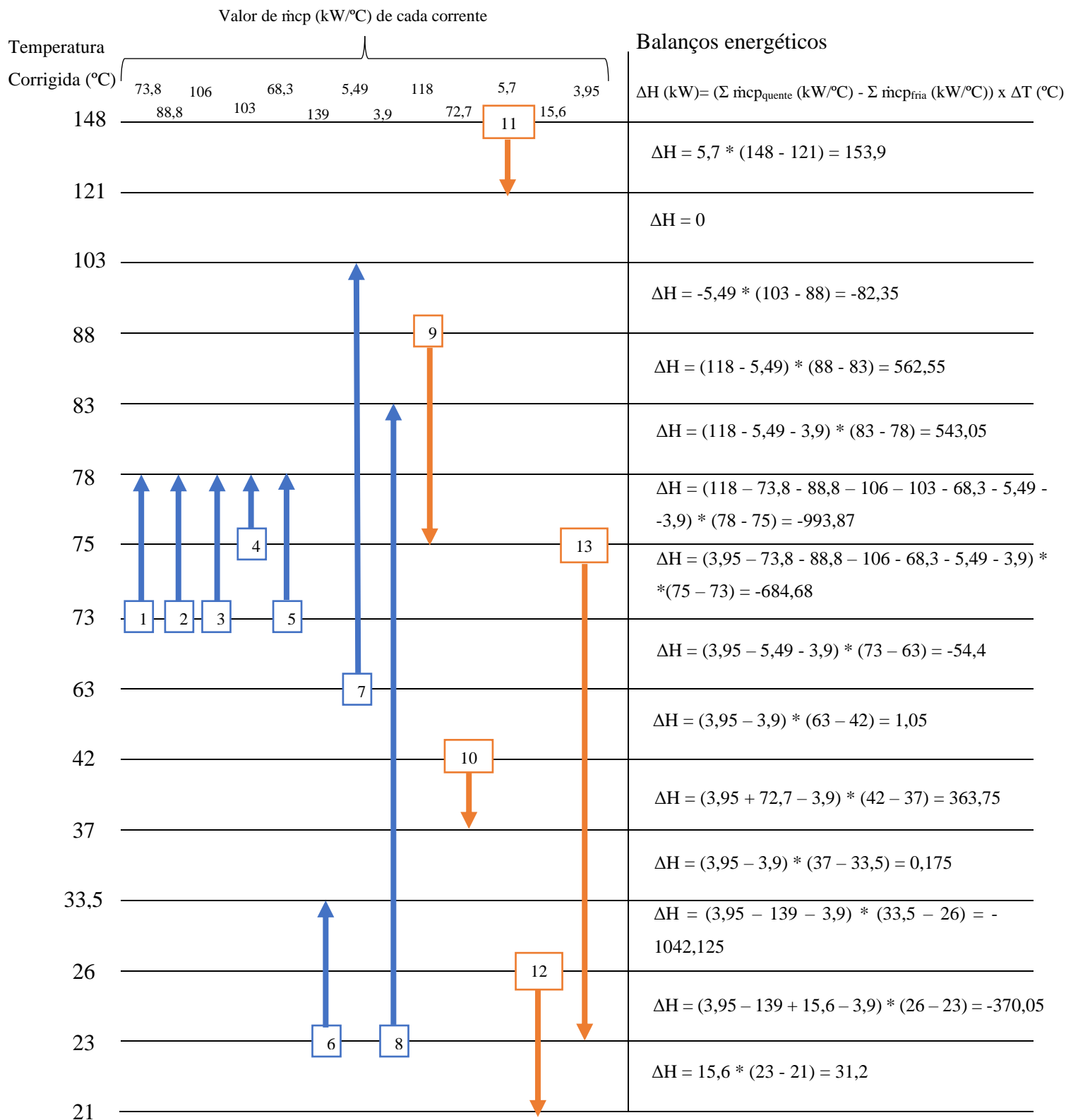


Figura 4.1 Representação gráfica das correntes frias (azul) e quentes (amarelo) os balances de energia a elas associados em cada intervalo de temperaturas

Recorrendo aos valores obtidos através dos balanços de energia aos diversos níveis térmicos é possível construir a cascata de calor para o sistema em estudo, e através desta determinar o *pinch* energético, e a quantidade de calor a adicionar e retirar ao sistema através do uso de utilidades. A cascata de calor pode então ser encontrada na Figura 4.2.

Temperatura Corrigida (°C)

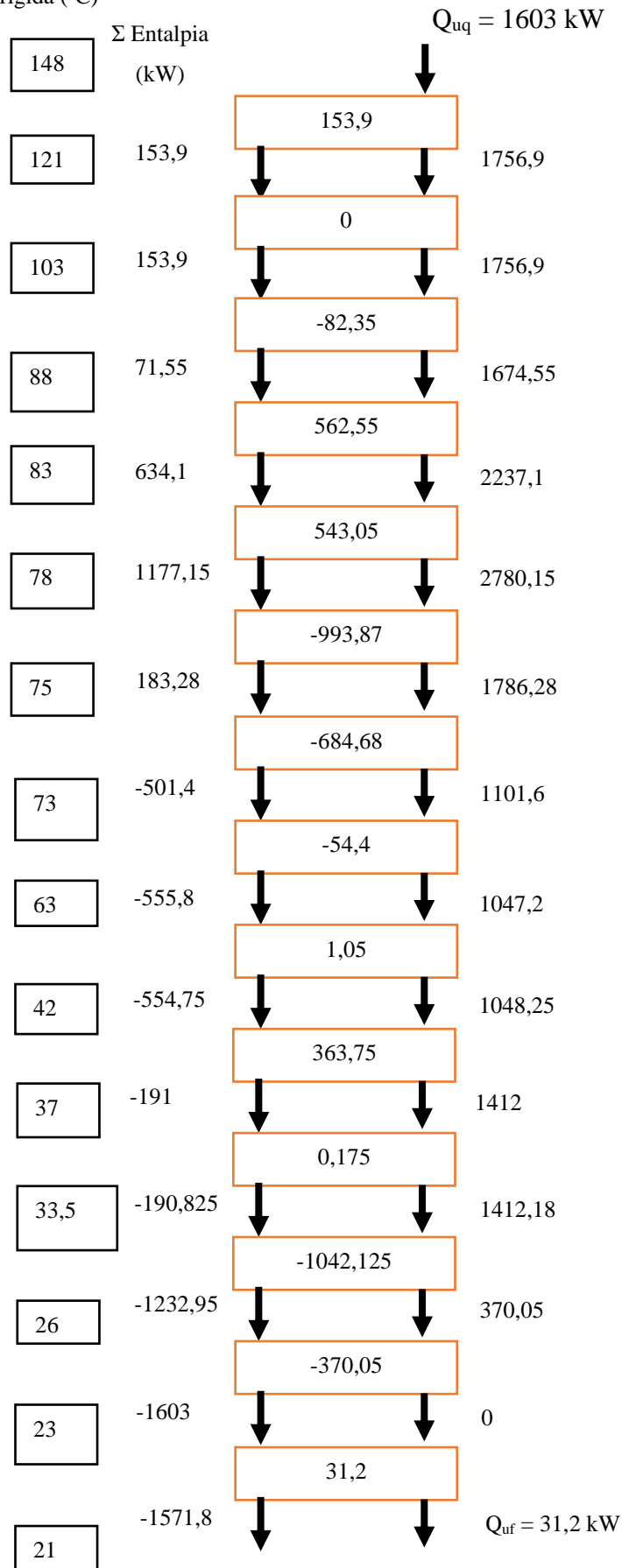


Figura 4.2 Cascata de calor do caso em estudo

Através da análise da Figura 4.2 é possível concluir que o *pinch* energético se encontra nos 23 °C, que é necessário fornecer ao sistema 1603 kW através do uso de utilidades quentes e retirar ao mesmo 31,2 kW utilizando utilidades frias.

A construção da rede de permutadores de calor começa então pela determinação da energia térmica de cada corrente, sendo esta o resultado do produto do seu valor de $\dot{m}c_p$ com o intervalo de temperatura da corrente em questão, representado na Figura 4.3. De seguida, deve-se começar por trocar calor entre correntes que se encontram junto ao *Pinch*, ou seja, correntes em que uma das suas duas temperaturas é de 23 °C. Encontram-se nesse caso as correntes quentes 6 e 8 e as correntes frias 12 e 13. Desta forma optou-se por começar por dividir a corrente 6 em dois ramos de forma a que fosse possível utilizar a energia das correntes 12 e 13. Uma vez que estas trocas se vão dar junto ao *pinch*, a corrente 6 foi dividida de modo a que a regra, que dita que o valor da capacidade calorífica por unidade de tempo da corrente quente deve ser menor ou inferior ao da corrente fria com que troca energia térmica, acima do *pinch*, seja respeitada. O resultado desta divisão é uma corrente cujo $\dot{m}c_p$ é de 15,6 kW/°C, e outra cujo $\dot{m}c_p$ é de 123,4 kW/°C que resulta da diferença entre o valor da corrente original, 139 kW/°C, e 15,6 kW/°C. As energias térmicas de cada um desses ramos são naturalmente o resultado do produto desses valores de $\dot{m}c_p$ com a diferença de temperaturas da corrente 6, obtendo-se para o ramo cujo $\dot{m}c_p$ é de 123,4 kW/°C uma energia térmica de 1295,7 kW e para o ramo cujo $\dot{m}c_p$ é de 15,6 kW/°C uma energia térmica de 163,8 kW. Esses valores de calor a trocar são resultantes da escolha do valor de 15,6 kW/°C para o ramo da corrente 6 que irá trocar energia com a corrente 12, uma vez que o $\dot{m}c_p$ da corrente 6 terá que ser superior ou igual ao valor de $\dot{m}c_p$ da corrente 12, e porque se optou por resolver a corrente 12 com o mínimo de energia possível. Por sua vez o ramo que resta, com o $\dot{m}c_p$ de 123,4 kW/°C e energia térmica de 1295,7 kW, troca calor com a corrente fria 13, ficando esta corrente resolvida. Relativamente à corrente 9, decidiu-se que esta efetuaria trocas dando prioridade aos pasteurizadores (correntes 1 a 5), uma vez que estes equipamentos têm elevada importância no sistema produtivo. Assim, uma vez que o valor de $\dot{m}c_p$ da corrente 9 é significativamente superior ao dos pasteurizadores, dividiu-se esta corrente em dois ramos e de forma a que o $\dot{m}c_p$ das correntes resultantes fosse tal que ambas fossem capazes de trocar energia com os pasteurizadores e também de forma a que fosse possível satisfazer completamente em termos energéticos o máximo número de pasteurizadores possível sem que existissem violações de ΔT entre a corrente quente e fria. Após várias

tentativas, concluiu-se que apenas seria possível satisfazer 3 pasteurizadores (correntes 1, 2 e 4) e que, para tal, os valores de $\dot{m}c_p$ dos ramos das correntes resultantes desta divisão seriam $74 \text{ kW/}^\circ\text{C}$ e $44 \text{ kW/}^\circ\text{C}$. Os valores de energia térmica que cada uma destas novas correntes/ramos tem disponível serão de -962 kW e -572 kW , respetivamente. Tanto as divisões da corrente 6 como as da corrente 9, bem como os resultados da energia térmica, necessária ou disponível, de cada corrente da rede de permutadores a construir podem ser encontrados na Figura 4.3.

$$Q_i \text{ (kW)} = \dot{m}_{cp} \text{ (kW/}^\circ\text{C)} * (T_{f\text{corrigida}} - T_{i\text{corrigida}})$$

L1 $Q_1 = 73,8 * (78 - 73) = 369$

L2 $Q_2 = 88,8 * (78 - 73) = 444$

L3 $Q_3 = 106 * (78 - 73) = 530$

L5 $Q_4 = 103 * (78 - 75) = 309$

L6 $Q_5 = 68,3 * (78 - 73) = 341,5$

ETAR $Q_6 = 139 * (33,5 - 23) = 1459,5$

Desg. $Q_7 = 5,49 * (103 - 63) = 219,6$

A.B.V $Q_8 = 3,9 * (83 - 23) = 234$

HT $Q_9 = 118 * (75 - 88) = -1534$

LT $Q_{10} = 72,7 * (37 - 42) = -363,5$

G.C. $Q_{11} = 5,7 * (121 - 148) = -153,9$

Comp. $Q_{12} = 15,6 * (23 - 26) = -46,8$

C805 $Q_{13} = 3,95 * (23 - 75) = -205,4$

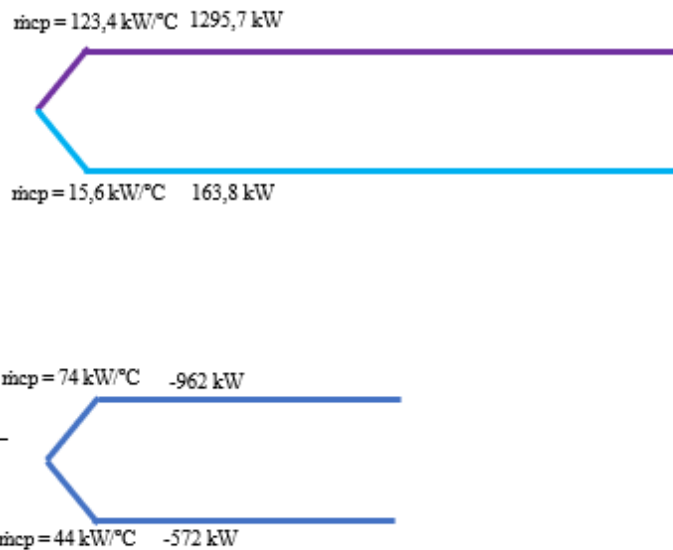


Figura 4.3 Balanços energéticos às correntes estudadas, localizadas acima do Pinch, e divisão das correntes 6 e 9

De seguida, começaram-se a estabelecer as ligações entre as correntes referidas no parágrafo anterior. Ligaram-se, em primeiro lugar, as correntes 12 (linha azul clara) e 13 (linha roxa) aos ramos criados na corrente 6, com a 12 a trocar energia com o ramo cujo

valor de $\dot{m}c_p$ é idêntico ao seu. Os dois ramos criados a partir da corrente 9 foram postos a trocar energia com as correntes 1 (linha azul escura) e 2 (linha vermelha), respectivamente conectadas aos ramos cujos valores de $\dot{m}c_p$ são de $74 \text{ kW/}^\circ\text{C}$ e $44 \text{ kW/}^\circ\text{C}$. De notar que, apesar do valor de $\dot{m}c_p$ da corrente 1 ser ligeiramente inferior ao da corrente com a qual troca calor, este fator não quebra as regras pré-estabelecidas para a construção da rede de permutadores pois estas correntes já estão a efetuar trocas afastadas do *pinch*. Após essas primeiras trocas, as correntes/ramos que resultam da divisão da corrente 6, aqueceram até às temperaturas de $24,7 \text{ }^\circ\text{C}$ e $26,0 \text{ }^\circ\text{C}$, à saída dos permutadores,, enquanto as correntes/ramos resultantes da divisão da corrente 9 apresentam as temperaturas de $80,0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $85,1 \text{ }^\circ\text{C}$ à entrada dos permutadores. De notar que esses permutadores, necessários a essas primeiras trocas, devem ser colocados o mais próximos do *pinch* que for possível. Os segundos permutadores, correspondentes a segundas trocas, devem ser colocados a seguir aos primeiros permutadores, mais afastados do *pinch*, no sentido crescente das temperaturas, no caso de se estar a resolver a rede de permutadores acima do *pinch*. Esse conjunto de regras apresentadas permite mais facilmente que seja possível encontrar uma solução para a construção da rede de permutadores de calor. Um esquema que ilustra uma troca de calor entre duas correntes, mais concretamente entre um dos ramos da corrente 9 e a corrente 2, pode ser encontrado na figura 4.4.

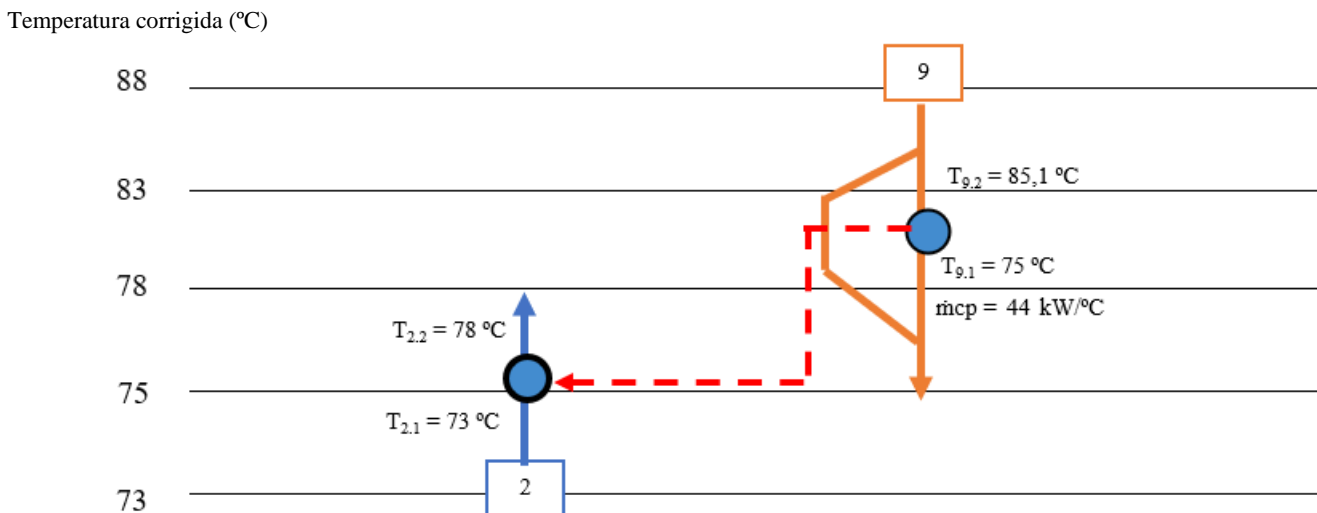


Figura 4.4 Troca de calor entra um ramo da corrente 9 e corrente 2

Uma representação do permutador responsável por esta troca de calor bem como das correntes a este associadas pode ser encontrado na Figura 4.5.



Figura 4.54 Permutador responsável pela troca de calor entre um ramo da corrente 9 e a corrente 2 e correntes a este associadas

O cálculo da temperatura do ramo da corrente 9 em questão pode ser realizado recorrendo a um simples balanço de energia, verificado na equação 4.1.

$$Q_{i-j} \text{ (kW)} = \dot{m}_i \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) * c_{p_i} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} \right) * (T_{fi} - T_{ii}) \quad (4.1)$$

No qual

Q_{i-j} – Calor trocado entre as correntes i e j (kW)

\dot{m}_i – Caudal mássico da corrente i (kg/s)

c_{p_i} – capacidade calorífica da corrente i (kJ/(kg * °C))

T_{fi} – Temperatura final da corrente i (°C)

T_{ii} – Temperatura inicial da corrente i (°C)

A temperatura de saída do ramo da corrente 9 apresentado nas figuras 4.3 e 4.4 foi calculada recorrendo à expressão 4.2:

$$440 = 44 * (T_f - 75) \quad (4.2)$$

$$T_f = 85,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este cálculo é de extrema relevância pois permite determinar se a troca de calor em si é possível, visto que se deve verificar que a temperatura de saída da corrente quente é superior à de entrada da corrente fria e que a temperatura de entrada da corrente quente é superior à de saída da corrente fria. O conhecimento destas temperaturas permite ainda avaliar a possibilidade de realizar segundas trocas com a mesma corrente, caso esta possua temperatura e energia suficiente para tal.

Uma vez que o ramo da corrente 9 que trocou energia com a corrente 1 ainda possui energia para fornecer às correntes frias, e se encontra a uma temperatura que possibilita tal, este ramos ainda troca energia com a corrente 4 (linha verde clara), aumentando assim

a sua temperatura para 84,2 °C. Dado que agora cada um dos dois ramos da corrente 9 já não possui energia suficiente para satisfazer totalmente qualquer uma das outras correntes dos pasteurizadores (correntes 3 e 5), decidiu-se unir os dois ramos e ligar a corrente resultante (linha azul) ao ramo da corrente 6 com $\dot{m}c_p$ de 123,4 kW/°C (linha roxa). Essa união dos dois ramos da corrente 9 permite a utilização de menos um permutador de calor na rede, dado que de outra forma teria que cada um dos ramos da corrente 9 trocar energia com a corrente 6 sequencialmente. Com essa união de ramos reduzem-se os custos de investimento e manutenção. Esta solução, de um permutador em vez de dois, teria que ser analisada para as diversas condições de funcionamento da fábrica garantindo que daí resultava um aproveitamento térmico igualmente eficaz. A corrente, resultante da união dos dois ramos da corrente 9, tem um $\dot{m}c_p$ idêntico ao da corrente que as originou, 118 kW/°C, e tem uma energia corresponde à soma das energias dos dois ramos, -412 kW. A sua temperatura, 84,2 °C, obtém-se através de um balanço de energia ao ponto de mistura dos dois ramos da corrente 9. Após essa corrente de mistura trocar calor com um dos ramos (linha roxa) da corrente 6, este ramo encontrar-se-á à temperatura de 28,0 °C, necessitando ainda de receber 673,8 kW de energia. Estas trocas de calor entre as várias correntes (1, 2, 4, 6, 9, 12 e 13), bem como as suas características termodinâmicas referidas ao longo deste parágrafo podem ser verificadas na Figura 4.6.

$$Q_i \text{ (kW)} = m_{cp} \text{ (kW/}^\circ\text{C)} * (T_{f\text{corrigida}} - T_{i\text{corrigida}})$$

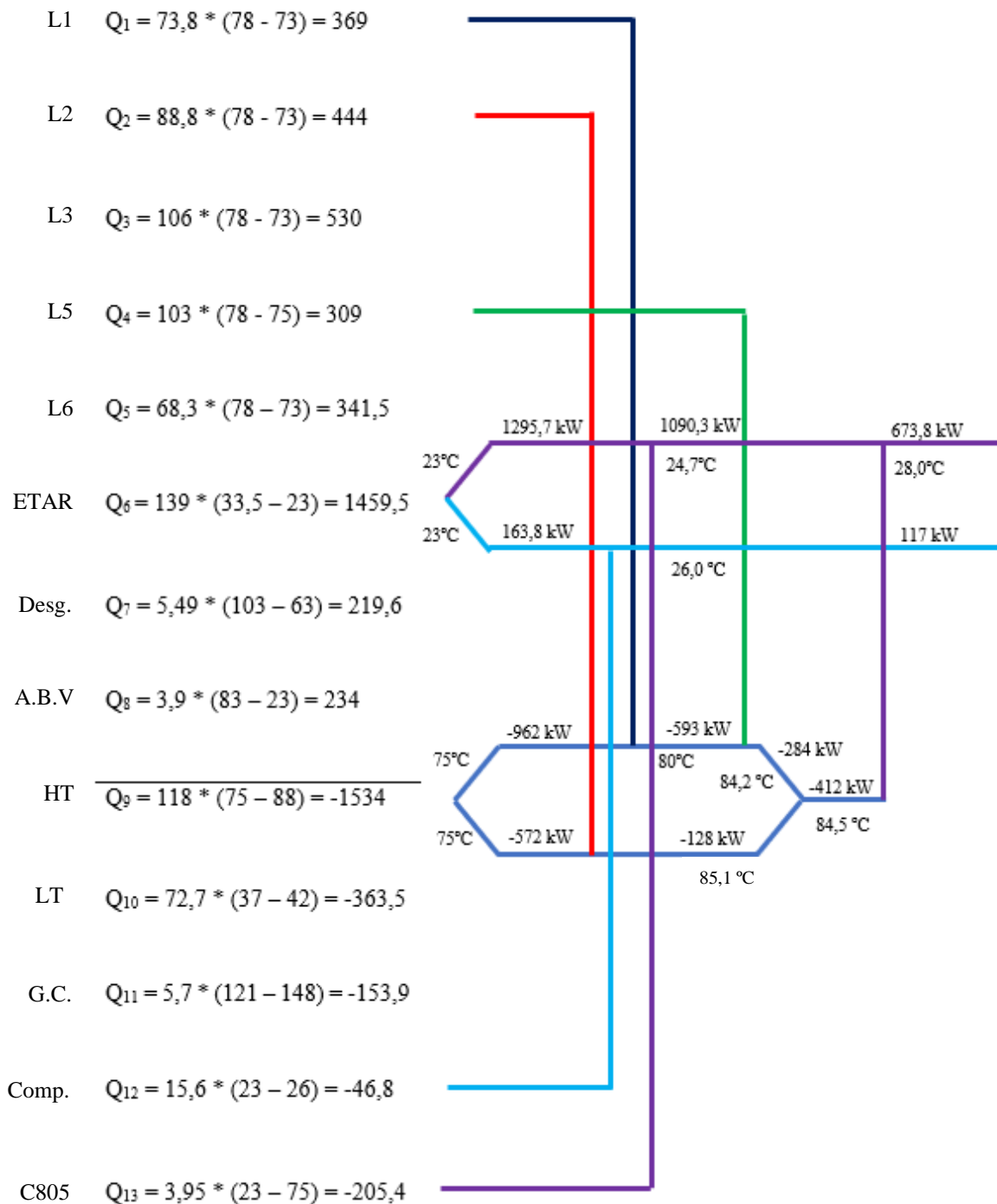


Figura 4.6 Balanços energéticos às correntes estudadas localizadas acima do Pinch e trocas de energia entre as correntes 1,2, 4, 6, 9, 12 e 13

Uma vez que estas correntes se encontram acima do *pinch*, a utilização de utilidades frias é naturalmente algo a evitar, uma vez que esta utilização implica uma perda de energia inutilizada à qual está associada custos monetários, resultando numa rede não otimizada. Assim, atribuiu-se às restantes correntes quentes do processo (correntes 10 e 11) trocas

de calor com correntes frias, resultando numa troca de calor entre as correntes 7 e 11 (linha amarela) e entre as correntes 10 e o ramo superior da divisão da corrente 6 (linha roxa). Não havendo mais possibilidades para troca de calor, uma vez que já se esgotaram todas as fontes quentes, as conexões idealizadas entre as correntes quentes e frias podem ser encontradas na Figura 4.7.

$$Q_i \text{ (kW)} = \dot{m}_{cp} \text{ (kW/}^\circ\text{C)} * (T_{f\text{corrigida}} - T_{i\text{corrigida}})$$

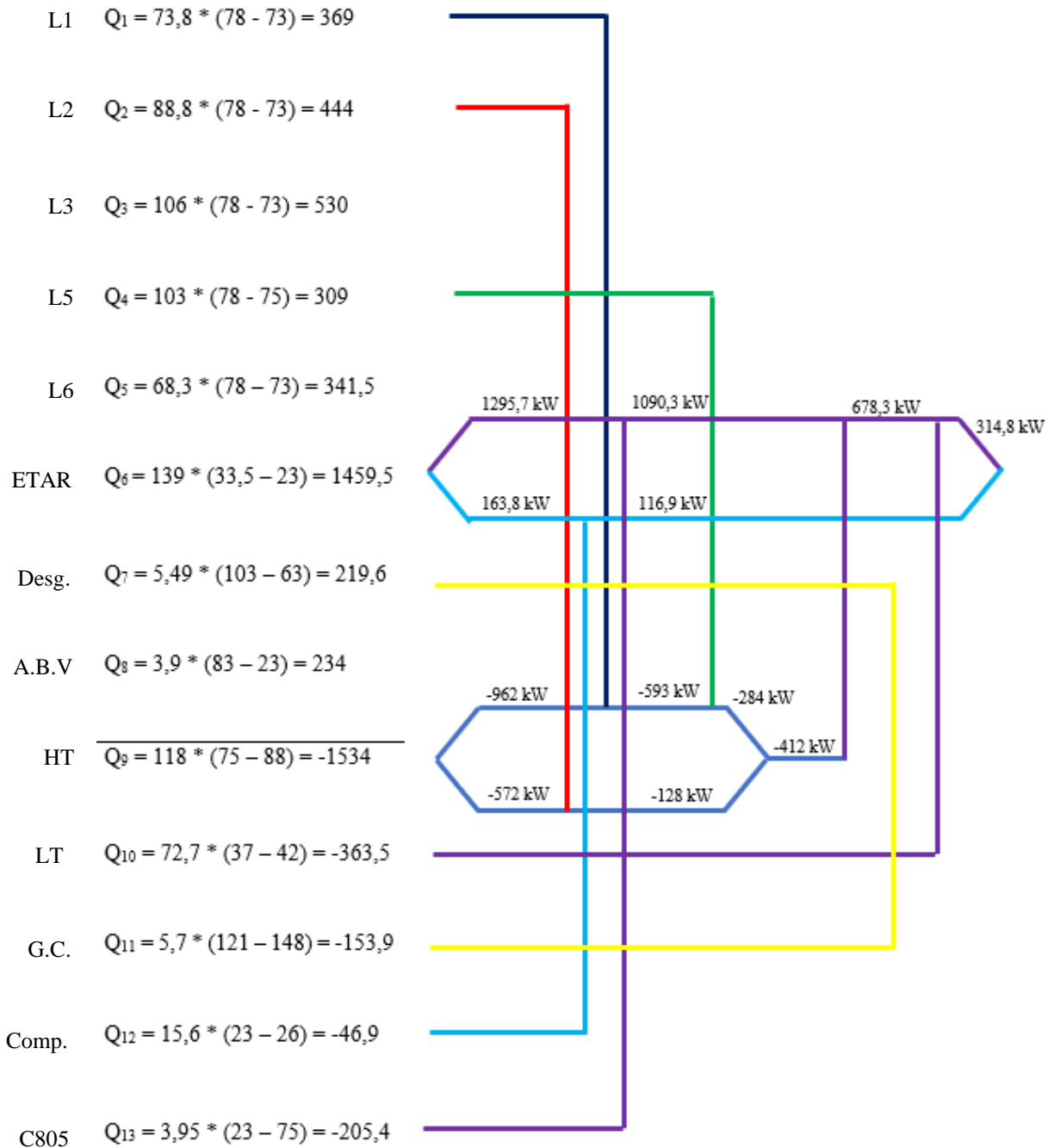


Figura 4.7 Balanços de energia às correntes estudadas, localizadas acima do Pinch, e todas as trocas de energia realizadas entre elas

Finalmente, uma vez que ainda existem correntes frias (3, 6 e 8) com necessidades de energia térmica, atribuíram-se utilidades externas quentes a cada uma delas consoante a potência térmica em falta, tendo se primeiro unido os dois ramos da corrente 6 de forma a reduzir o número de permutadores necessários, sendo preciso apenas uma e não duas fontes externas de calor. Desta forma, os cálculos da potência térmica de cada corrente, as conexões resultantes entre estas e a quantidade de energia térmica a fornecer sobre a forma de utilidades externas quentes às correntes que de tal necessitem, podem ser encontradas na Figura 4.7.

Pode-se verificar pela análise da Figura 4.8 que se necessitou de recorrer a 8 permutadores de calor para o aproveitamento máximo de energia, sendo este número inferior ao verificado no sistema de aproveitamentos energéticos atualmente implementado, que utiliza 13. Relativamente à utilização de utilidades quentes, verifica-se que será necessário fornecer energia a 4 correntes, nomeadamente à linha de pasteurização 3 (corrente 3), à linha de pasteurização 6 (corrente 5), à ETAR (corrente 6) e às Adegas/Barril (corrente 8), totalizando 1603 kW, conforme foi determinado pela cascata de calor representada na Figura 4.2.

$$Q_i \text{ (kW)} = \dot{m}c_p \text{ (kW/}^\circ\text{C)} * (T_{f\text{corrigida}} - T_{i\text{corrigida}})$$

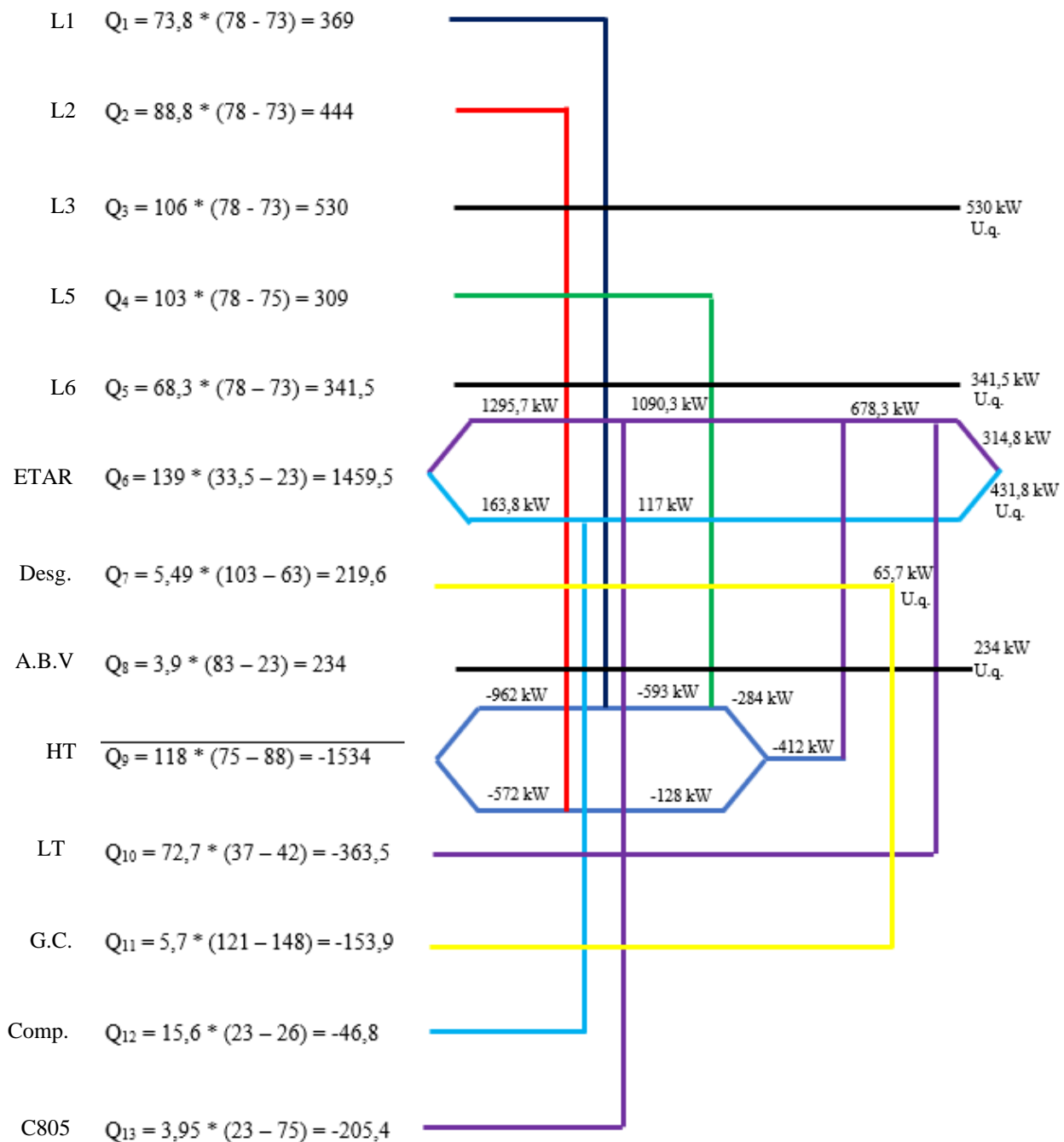


Figura 4.8 Balanços de energia às correntes estudadas, localizadas acima do Pinch, todas as trocas de energia entre elas e aplicação de utilidades externas quentes às correntes deficitárias de energia

Os cálculos das necessidades energéticas de cada corrente bem como as ligações estabelecidas entre estas através de permutadores de calor, abaixo do *pinch*, podem ser

encontradas na Figura 4.9. Uma vez que apenas uma corrente quente, a do compressor (corrente 12), possui uma temperatura inferior e outra igual à do *pinch* (23 °C), apenas esta fará parte da rede de permutadores abaixo do *pinch*.

$$Q_i \text{ (kW)} = \dot{m}c_p \text{ (kW/}^\circ\text{C)} * (T_{f\text{corrigida}} - T_{i\text{corrigida}})$$

Comp. $Q_{12} = 15,6 * (23 - 21) = 31,2$ $\underline{\hspace{2cm}}$ $\frac{31,2 \text{ kW}}{\text{U.f}}$

Figura 4.9 Balanços de energia às correntes estudadas, abaixo do pinch, e aplicação de utilidades externas frias

Desta forma, todas as necessidades energéticas da corrente 12, na zona abaixo do *pinch*, devem ser resolvidas recorrendo a utilidades externas, sendo que neste caso será necessário retirar a esta corrente 31,2 kW, estando este valor de acordo com o calculado na cascata de calor representada na Figura 4.2.

4.2 Rede de permutadores de calor

Através dos resultados obtidos no subcapítulo anterior, 4.1, é possível esquematizar a rede de permutadores de calor resultante, estando esta representada na Figura 4.10.

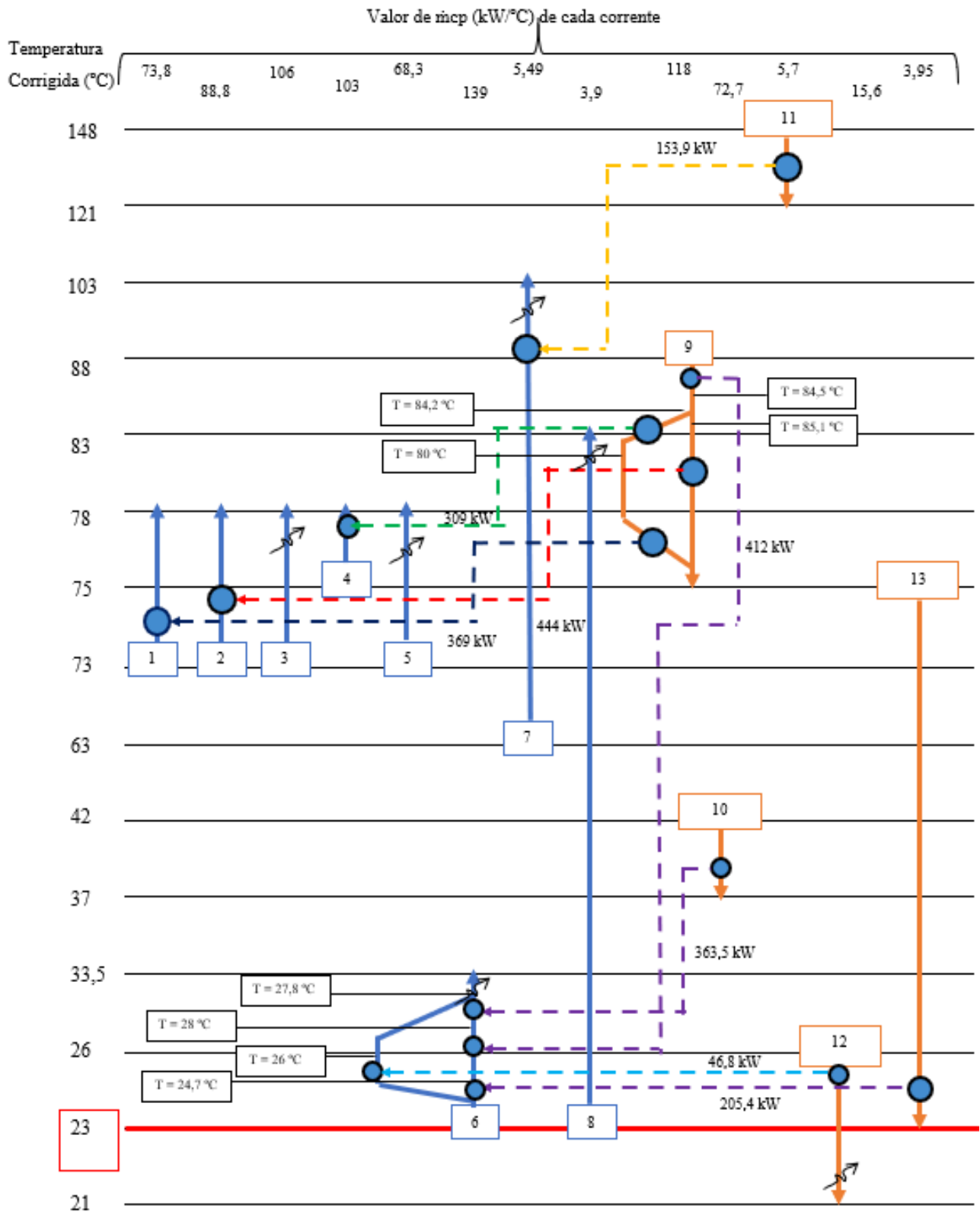


Figura 5.10 Rede de permutadores de calor proposta para o caso em estudo

Apesar de a rede de permutadores de calor apresentada apenas estabelecer como estritamente necessário a implementação de 4 unidades externas de fornecimento de energia térmica e 1 de remoção da mesma, uma vez que este caso prático se trata de uma empresa de bebidas, cuja oferta, e conseqüentemente produção, varia consoante a procura do mercado, deve-se salvaguardar o funcionamento da rede de aproveitamentos térmicos apresentada através da implementação de unidades extra fornecedoras de utilidades quentes (backups de vapor) ou utilidades frias (aeroarrefecedores ou torres de arrefecimento). Apesar deste fator ser bastante relevante para o funcionamento regular da unidade fabril e do sistema de aproveitamentos térmicos, este não terá o impacto económico que teria numa empresa que, por exemplo, estaria a construir uma planta fabril de raiz, uma vez que para todos os equipamentos apresentados, estes já estão dotados, de uma forma ou de outra, de auxiliares externos próprios para o efeito mencionado. Concretamente, para as correntes frias, todas elas estão dotadas de *back-ups* de vapor, conectadas ao circuito de vapor principal originário nas caldeiras (recuperativa e do centro de produção de vapor). Relativamente às correntes frias, a corrente HT (9) está conectada a um aeroarrefecedor que dissipa a energia para o exterior através do uso de ventoinhas, a corrente LT (10) e compressor (12) podem recorrer a uma torre de arrefecimento, e as correntes da caldeira (11) e do tanque 805 (13), uma vez que estas não se encontram em circuito fechado, o seu excedente térmico pode ser libertado para a atmosfera.

4.3 Áreas dos permutadores de calor

Outro fator relevante para a construção de uma rede de permutadores será a área de transferência de calor de cada permutador e o seu total, sendo que este valor também deve ser comparado ao seu equivalente na rede atualmente instalada no complexo fabril. Desta forma, os permutadores relevantes ao sistema atual bem como os seus valores de área de transferência de calor podem ser encontrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Áreas de transferência de calor dos permutadores da rede de aproveitamentos térmicos atual

Permutador	Área de transferência de calor (m ²)
Usado no Pasteurizador da Linha 1	21,0
Usado no Pasteurizador da Linha 2	21,8
Usado no Pasteurizador da Linha 3	21,8
Usado no Pasteurizador da Linha 5	29,25
Usado no Pasteurizador da Linha 6	58
PHE “Recuperações Térmicas” (HT)	260,42
PHE 12	26
PHE 11	39,69
Permutador “last chance”	110,25
PHE 14	47,17
PHE 13	22,18
PHE 4	53,41
PHE 3	117,11
PHE 2	39,69
PHE 1	28,19
Economizador Caldeira recuperativa	155
ÁREA TOTAL	1050,96

Todos estes valores de áreas de transferência de calor, à exceção dos relativos à linha 6 e ao economizador da caldeira recuperativa, foram gentilmente fornecidos pelo fabricante, ARSOPI-THERMAL. As áreas dos dois permutadores restantes foram obtidas diretamente por leitura das respetivas placas.

A área de transferência de calor de cada permutador da nova rede projetada pode ser calculada através da equação, de projeto, 4.3.

$$Q = U * A * \Delta T_{ML} \quad (4.3)$$

Na qual:

Q – Potência calorífica a transferir através do permutador (kW)

U – Coeficiente global de transferência de calor do permutador (kW/(m² °C))

A – Área de transferência de calor do permutador (m²)

ΔT_{ML} - Diferença de temperatura média logarítmica (°C ou K)

O valor de ΔT_{ML} por sua vez é calculado através da equação 4.4:

$$\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}} \quad (4.4)$$

Sendo que:

ΔT_A corresponde à diferença de temperaturas entre as correntes no lado A do permutador

ΔT_B corresponde à diferença de temperaturas entre as correntes no lado B do permutador

Para o caso em questão, o lado A será considerado o lado no qual o fluido quente entra no permutador e o lado B será o lado no qual o fluido frio entra.

O valor do coeficiente global de transferência de calor será estimado recorrendo a uma tabela com dados empíricos (ver Anexo D) que são:

- a razão entre o calor trocado no permutador e o ΔT deste;
- os fluidos que circulam nas correntes quente e fria do permutador.

Desta forma, as áreas de transferência de calor, bem como os valores de potência calorífica, de coeficiente global de transferência de calor, e de diferença de temperatura média logarítmica de cada permutador da rede proposta podem ser encontrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 Cálculo das áreas de transferência de calor necessárias para as trocas de energia determinadas e respectivos dados utilizados para esse fim

Permutador	Q (kW)	U (kW/(m ² °C))	ΔT_{ML} (°C)	A (m ²)
L1 – HT(1) (Corrente 1 – Ramo corrente 9)	369	0,938	5	78,68
L2 – HT(2) (Corrente 2 – Ramo corrente 9)	444	0,938	7,25	65,26
L5 – HT(1) (Corrente 4 – Ramo corrente 9)	309	0,938	3,57	92,37
Desgaseificador – Caldeira (Corrente 11 – Corrente 7)	153,9	0,055	33,08	84,60
HT – ETAR(1) (Ramo corrente 6 – Corrente 9)	412	0,938	3,13	127,88
LT – ETAR(1) (Corrente 10 – Ramo corrente 6)	363,5	0,938	3,89	99,74
Tanque 805 – ETAR(1) (Corrente 13 – ramo corrente 6)	205,4	0,938	14,64	14,96
Compressor – ETAR(2) (Corrente 12 – ramo corrente 6)	46,9	0,938	3,00	16,67

O total de área de transferência de calor necessária para as permutas a realizar nesta rede é de 580,16 m². Relativamente à área total de troca de calor atualmente implementada, verifica-se uma redução de 470,8 m².

Uma vez que os permutadores instalados na rede de aproveitamentos térmicos atual se tratam de permutadores de placas, as áreas de transferência de calor destes podem ser adaptadas às áreas calculadas com relativa facilidade, recorrendo a um aumento ou diminuição do número de placas dos permutadores existentes caso se deseje aumentar ou reduzir a área de transferência de calor, respetivamente. Alternativamente, as placas de um dado permutador podem ser substituídas por outras com maior eficiência, permitindo também um aumento na capacidade do permutador. Estas alternativas à aquisição de novos permutadores implicam naturalmente custos de investimento inferiores, e este aumento/redução da área de um permutador pode ser até realizado numa paragem fabril calendarizada.

Desta forma, procurou-se relacionar os permutadores projetados utilizando o método da cascata de calor com os permutadores atualmente existentes na unidade fabril, de tal forma a manter o maior número possível de permutadores. Estas relações entre os

permutadores foram determinadas de modo a que a diferença das áreas de transferência de calor entre estes fosse mínima, ou seja, para que seja necessário retirar ou adicionar o menor número de placas possível. Assim, um resumo dos permutadores projetados e daqueles que seriam utilizados para este lugar, bem como as respectivas áreas de transferência de calor e a área a adicionar ou reduzir pode ser encontrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Possíveis redimensionamentos dos permutadores existentes

Permutador Novo	Área (m ²)	Permutador existente	Área (m ²)	Área a acrescentar ou remover (m ²)
L1 – HT(1) (Corrente 1 – Ramo corrente 9)	78,68	PHE 14	47,17	31,51
L2 – HT(2) (Corrente 2 – Ramo corrente 9)	65,26	PHE 11	39,69	25,57
L5 – HT(1) (Corrente 3 – Ramo corrente 9)	92,37	PHE 4	53,41	38,96
Desgaseificador – Caldeira (Corrente 11 – Corrente 7)	84,60	n/a	n/a	n/a
HT – ETAR(1) (Ramo corrente 6 – Corrente 9)	127,88	PHE 3	117,11	10,77
LT – ETAR(1) (Corrente 10 – Ramo corrente 6)	99,74	Last Chance	110,25	-10,51
Tanque 805 – ETAR(1) (Corrente 13 – ramo corrente 6)	14,96	Usado no pasteurizador da linha 1	21,00	-6,04
Compressor – ETAR(2) (Corrente 12 – ramo corrente 6)	16,67	Usado no pasteurizador da linha 2	21,80	-5,13

Conforme se pode verificar na Tabela 4.4, o permutador “Desgaseificador – Caldeira” não foi associado a nenhum permutador já existente, pois, uma vez que se trata de um economizador incorporado no tubo de escape da caldeira de recuperação, nenhum outro permutador das instalações possuiu características semelhantes que permitam a sua adaptação a este papel. O permutador da linha de pasteurização L6, atualmente instalado, não foi utilizado pois trata-se, de facto, de uma série de permutadores de carcaça e tubos cuja área de transferência de calor (58 m², ver Tabela 4.2) não pode ser alterada.

Uma visualização gráfica dos permutadores que sofreriam alterações com a implementação da rede nova de permutadores, análoga à Figura 3.11, pode ser encontrada na Figura 4.11, na qual rodeados a vermelho se encontram aqueles permutadores cujas

áreas devem ser aumentadas e a azul os permutadores cujas áreas devem ser diminuídas. De notar que os permutadores utilizados nos pasteurizadores das várias linhas não estão diferenciados individualmente na figura, pelo que se encontra rodeada toda a unidade representativa das linhas de enchimento nas quais estes equipamentos se encontram

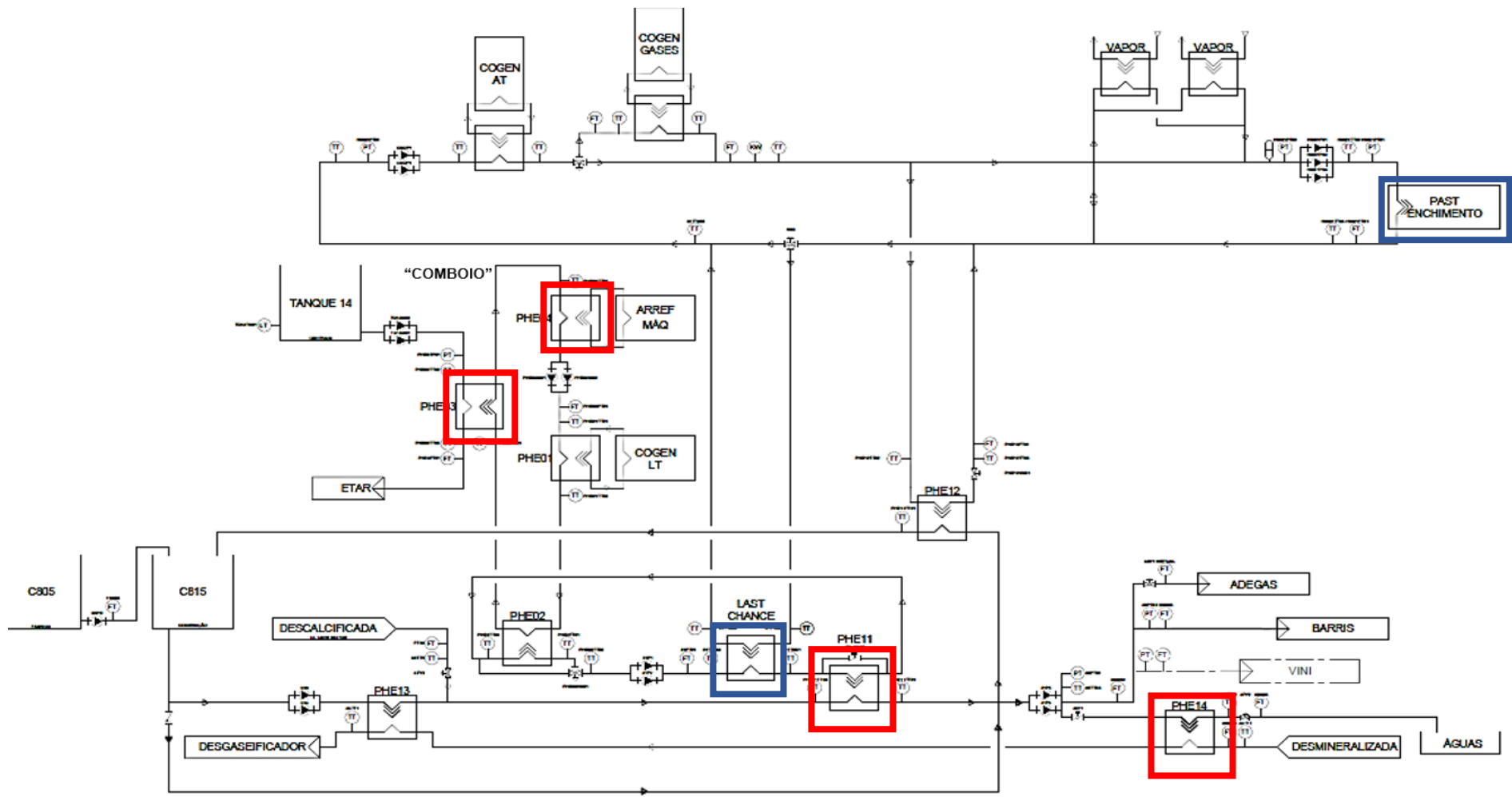


Figura 4.11 Representação dos permutadores cujas áreas seriam alteradas de acordo com a nova rede de permutadores (adaptado de Melo, Eduarda (2018))

5 Comparação de aproveitamentos térmicos e de consumos de energia entre a rede atual e a rede proposta, e avaliação económica do projeto

5.1. Comparações entre a rede atual e a rede proposta

Uma vez que se possui os valores do consumo mínimo de utilidades externas da rede de permutadores proposta, bem como da energia térmica aproveitada pela mesma, é possível fazer uma comparação entre estes e os valores que são atualmente verificados na rede de aproveitamentos térmicos existente.

Visto que na rede proposta neste trabalho apenas existem aproveitamentos térmicos localizados acima do *Pinch*, é possível comparar o valor total da energia aproveitada com os praticados na rede atual, existente no Centro de Produção de Leça do Balio. Os dados fornecidos pela empresa e utilizados nesta comparação são referentes ao ano de 2019, uma vez que o ano de escrita da tese, 2020, teve valores de produção, e consequentemente aproveitamentos energéticos bastante incomuns, devido à pandemia global que se verificou no decurso de 2020. Esses valores de aproveitamentos térmicos foram divididos em dois grupos: aproveitamentos térmicos verificados nos pasteurizadores das linhas de produção e aproveitamentos térmicos gerais, verificados nos restantes equipamentos da rede. Considerou-se que, para a rede proposta, a energia térmica aproveitada acima do *Pinch* resulta do módulo da soma da energia de cada corrente quente utilizada (ver valores de Q9, Q10, Q11, Q12 e Q13 na Figura 4.7). Uma vez que os dados fornecidos pela empresa avaliam os consumos energéticos de cada mês, em quilowatt-hora (kWh), foi necessário proceder ao cálculo do consumo mensal que a rede proposta teria, nesse mesmo intervalo de tempo. Para tal, definiu-se como parâmetros para esse cálculo uma utilização da rede de 17h por dia, que equivale ao regime de funcionamento do motor de cogeração, uma vez que o funcionamento da rede depende diretamente do funcionamento deste motor, e de 26 dias por mês, uma vez que num mês normal de 30 dias existem 4 domingos, nos quais o motor não é utilizado. Assim, os aproveitamentos térmicos

mensais médios da rede proposta podem ser calculados pela expressão apresentada na equação 5.1:

$$\begin{aligned}
 & \text{Aproveitamentos térmicos mensais} \left(\frac{kWh}{\text{mês}} \right) \\
 &= \sum |Energia\ térmica\ correntes\ quentes\ (kW)| * \frac{1h}{1h} * \frac{17\ h}{\text{dia}} \\
 & * \frac{26\ \text{dias}}{\text{mês}} \qquad \qquad \qquad (5.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Aproveitamentos térmicos mensais} \left(\frac{kWh}{\text{mês}} \right) &= (1534 + 363,5 + 153,9 + 46,8 + \\
 205,4) * \frac{1h}{1h} * \frac{17h}{\text{dia}} * \frac{26\ \text{dias}}{\text{mês}} &= 1,0182 * 10^6 \frac{kWh}{\text{mês}} = 1018,2 \frac{MWh}{\text{mês}}
 \end{aligned}$$

Conforme mencionado, os dados utilizados para o cálculo deste valor podem ser encontrados na Figura 4.7. Por sua vez, esses dados são referentes maioritariamente ao mês de fevereiro de 2020, à exceção dos das correntes do motor (Corrente LT e Corrente HT), que correspondem ao período do verão de 2018 e das correntes dos pasteurizadores (Corrente 1 a 5), que correspondem ao mês de julho de 2020.

Tendo sido facultados pelo departamento de manutenção do centro de produção de Leça do Balio da Super Bock Group, os aproveitamentos térmicos verificados ao longo do ano de 2019, à exceção do mês de Dezembro, tanto nas linhas de enchimento (2ª coluna) como no resto do complexo fabril (3ª coluna), é efetuada, na Tabela 5.1, uma comparação com a quantidade de energia recuperada na rede proposta através da diferença entre as duas redes (5ª coluna). Nessa tabela pode-se verificar ainda a diferença percentual das duas redes relativamente à rede existente atualmente (7ª coluna).

Tabela 5.1 Comparação entre os aproveitamentos térmicos mensais do ano de 2019 no centro de produção de Leça do Balio e a rede proposta

Mês de 2019	Aproveitamentos térmicos nas linhas (MWh)	Aproveitamentos térmicos Gerais (MWh)	Total de aproveitamentos térmicos (MWh)		Diferença entre rede atual e rede proposta (MWh)	Diferença percentual relativamente à rede atual (%)
Janeiro	719	408,41	1127,41	Aproveitamento térmico mensal na rede proposta 1018,2 MWh	109,21	9,69
Fevereiro	567	190,44	757,44		-260,75	-34,43
Março	569	307,17	876,17		-142,02	-16,21
Abril	667	254,97	921,97		-96,22	-10,44
Maió	832	276,52	1108,52		90,32	8,15
Junho	957	304,29	1261,29		243,09	19,27
Julho	867	322,17	1189,17		170,97	14,38
Agosto	612	310,04	922,04		-96,15	-10,43
Setembro	609	284,06	893,06		-125,14	-14,01
Outubro	688	445,91	1133,91		115,71	10,21
Novembro	611	401,50	1012,50		-5,69	-0,56
TOTAL ANUAL	7698	3505,5	11203,5		11200,2	3,33

Para facilitar a compreensão dos dados expressos na Tabela 5.1, construiu-se o gráfico de barras que pode ser encontrado na Figura 5.1 no qual se verificam os aproveitamentos térmicos mensais da rede atual e da rede proposta.

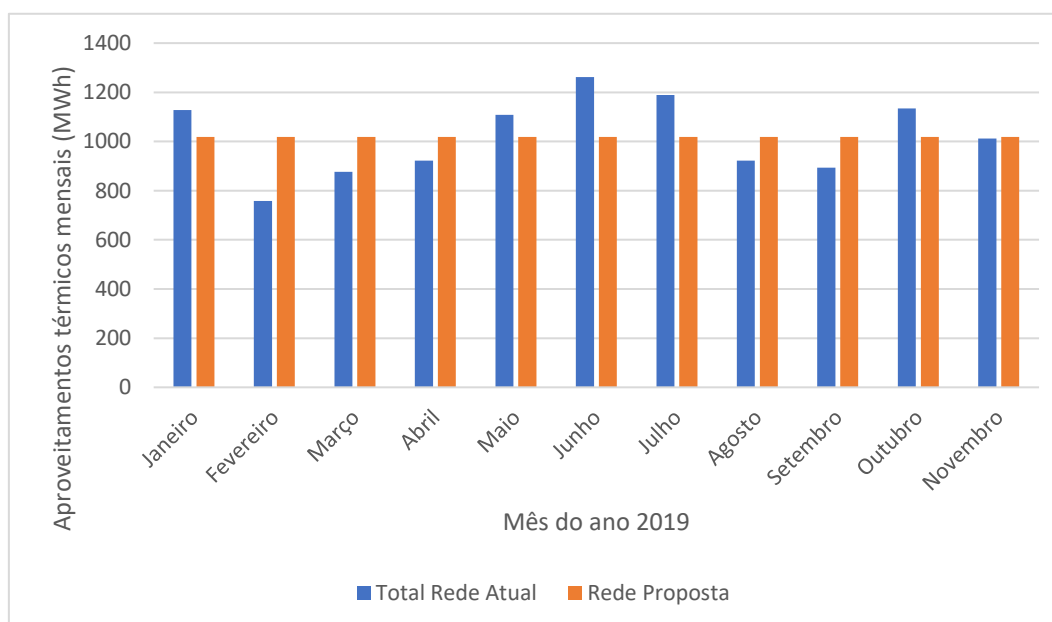


Figura 5.1 Aproveitamentos térmicos mensais da rede proposta (laranja) e da rede atual (azul)

No gráfico representado na Figura 5.2 pode-se verificar a variação tanto da diferença dos aproveitamentos térmicos entre a rede atual e a rede proposta mensalmente, a azul como a percentagem desta variação relativamente aos aproveitamentos atuais, a laranja.

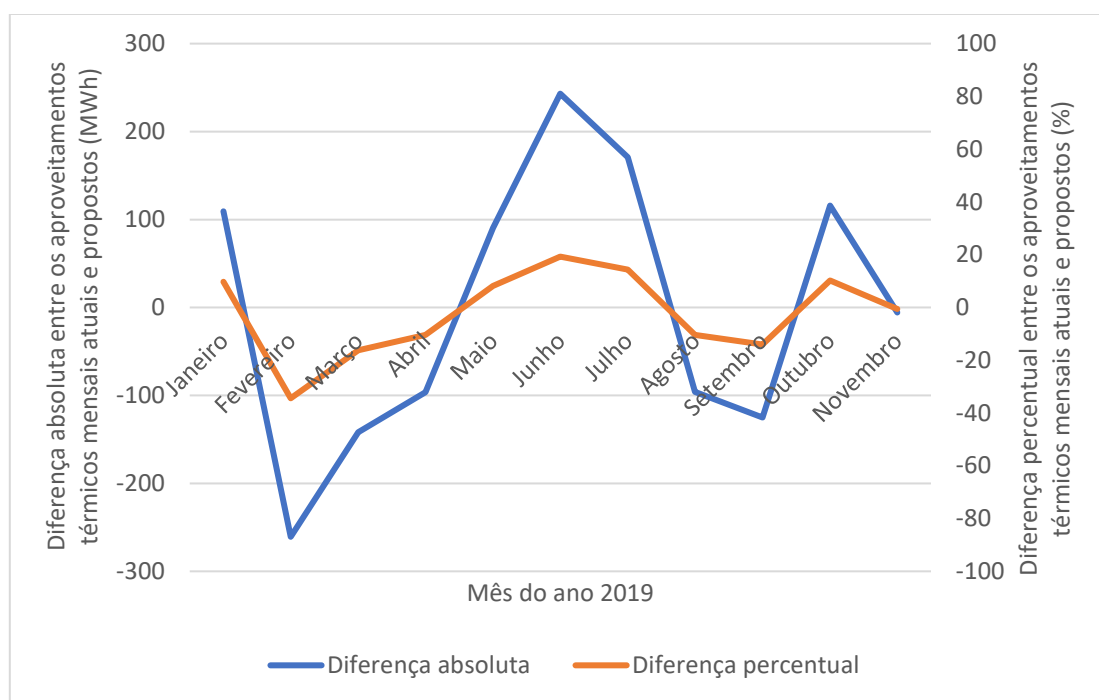


Figura 5.2 Diferença absoluta (azul) e percentual (laranja) entre os aproveitamentos térmicos mensais atuais e propostos

Conforme se pode verificar pela análise da tabela 5.1 e figura 5.1, a quantidade de energia térmica recuperada através do sistema atualmente implementado tem variações significativas conforme o mês do ano, sendo que nos meses de maior produção pode existir um aumento de até 1,4 vezes relativamente aos meses de menor produção fabril. Uma vez que estes dados se tratam de valores absolutos, o mês de fevereiro refletirá uma quantidade menor de aproveitamentos térmicos relativos aos demais pois este já possui uma quantidade de dias significativamente menor. Comparando as duas redes de aproveitamentos térmicos, verifica-se que em 5 dos 11 meses em estudo a rede atual apresentou uma quantidade de energia aproveitada superior à da rede proposta, verificando-se o oposto nos restantes meses. Comparando a diferença dos aproveitamentos térmicos entre ambas as redes, estes variam no intervalo de [-260,75 MWh; 243,09 MWh], apresentando desvios percentuais no intervalo de [-34,43%; 19,27%] relativamente aos aproveitamentos atuais. Totalizando os aproveitamentos mensais atuais do ano de 2019, e comparando-os com o equivalente proposto, durante o mesmo espaço de tempo, verifica-se que esta diferença (atual menos proposto) totaliza os 3,33 MWh, representando um desvio de 0,03% relativamente ao aproveitamento atual.

Essa análise permite concluir que, para o ano 2019, a prestação de ambas as redes é equivalente, sendo que um maior aproveitamento térmico através da implementação de uma nova rede de permutadores de calor não deve assim ser algo a considerar. De forma a que fosse possível avaliar com mais certeza a variação da diferença dos aproveitamentos térmicos de ambas as redes devia ter-se estudado mais exaustivamente o comportamento da rede atual de aproveitamentos térmicos e dos equipamentos que a compõem ao longo de todo o ano, o que não foi possível devido não só à interrupção abrupta do estágio presencial como à duração curta pré-estabelecida para o estágio em si. É ainda possível, pela análise da Tabela 5.1, inferir-se que o aproveitamento térmico atual por parte dos permutadores de calor aplicados nos pasteurizadores das diversas linhas de produção é bastante significativo, justificando portanto a escolha da priorização destes mesmos equipamentos na construção da rede de permutadores de calor proposta, apresentada no capítulo 4.

Outro fator relevante para a comparação entre a rede de permutadores atualmente implementada e a rede proposta é a quantidade de utilidades externas, tanto quentes como frias, que necessitam para funcionar. Conforme determinado pela cascata de calor, a rede apresentada neste estudo tem uma necessidade mínima de energia a ser fornecida ao sistema de 1603 kW e a ser removida de 31,2 kW. Relativamente aos seus homólogos no complexo fabril, a quantidade de energia a fornecer pode ser determinada através do consumo de vapor nos diversos espaços que contêm os equipamentos da rede de aproveitamentos térmicos atual, nomeadamente na ETAR, no Enchimento (Pasteurizadores das linhas 1 a 6), nas Centrais (Desgaseificador), nas Adegas, e no Barril. O valor de consumos dessas zonas é total, ou seja, não é dividido pelo que é consumido pelos equipamentos de forma a colmatar as necessidades não saciadas pela rede de aproveitamentos térmicos e pelo que é necessário para o funcionamento correto da zona em questão por outros motivos, pelo que não é possível proceder a esta divisão. Já os dados necessários ao cálculo da quantidade de energia que é removida dessas zonas não puderam ser obtidos, uma vez que não existe esse registo na empresa. Uma vez que a variável medida e armazenada para esta comparação é a de quantidade de vapor, em toneladas, consumidas por cada um dos espaços previamente referidos, é necessário calcular a quantidade de energia presente nesta utilidade, tendo em atenção que o vapor produzido nas caldeiras e distribuído se encontra saturado a 4 barg. Este cálculo encontra-se no Anexo E. Na Tabela 5.2 pode-se encontrar o valor do consumo total mensal de

vapor desses espaços em toneladas e em megaWatt hora (MWh), ao longo do ano de 2019, bem como a comparação destes valores relativamente ao determinado pelo método do *Pinch* energético.

Tabela 5.2 Consumo mensal de utilidades externas quentes no ano de 2019 de toda a fábrica do centro de produção de Leça do Balio e comparação com o consumo da rede proposta

Mês de 2019	Consumo de vapor (toneladas)	Consumo de energia do vapor (MWh)		Diferença entre rede atual e rede proposta (MWh)	Diferença percentual relativamente à rede atual (%)
Janeiro	3601	2108,2	Consumo mensal de energia do vapor na rede proposta 1603 MWh	2108,2	66,40
Fevereiro	4743	2776,8		2776,8	74,49
Março	5523	3233,4		3233,4	78,09
Abril	6060	3547,8		3547,8	80,03
Maio	5550	3249,2		3249,2	78,20
Junho	5126	3001,0		3001,0	76,40
Julho	4868	2849,9		2849,9	75,15
Agosto	4839	2832,9		2832,9	75,00
Setembro	3710	2172,0		2172,0	67,39
Outubro	3833	2244,0		2244,0	68,43
Novembro	4171	2441,9		2441,9	70,99
TOTAL ANUAL	52024	30457,3		19236 MWh	30457,3

Pela análise da Tabela 5.2, verifica-se que a rede proposta consome significativamente menos energia externa relativamente à rede atualmente implementada, uma vez que esta apresenta no mínimo um consumo de mais 2108,2 MWh (janeiro) relativamente à rede proposta, cerca do dobro. Esta diferença significativa pode ser justificada pelo facto de os consumos de vapor apresentados não representarem somente aqueles consumidos como utilidade externa pela rede de aproveitamos térmicos atual e os equipamentos que a compõem. De forma a calcular verdadeiramente a diferença entre os consumos de vapor da rede de aproveitamentos térmicos atual e da rede proposta seria necessário poder contabilizar, dentro de cada uma das zonas apresentadas, quanto do vapor fornecido tinha como destino os equipamentos alimentados pela rede referida e quanto iria para as restantes necessidades da zona em questão.

Comparando os valores dos aproveitamentos térmicos mensais e os valores de consumo de energia de vapor mensal, presentes nas Tabelas 5.1 e 5.2 respetivamente, pode-se ainda

concluir que estas duas formas de fornecer energia térmica ao sistema são comparáveis em ordem de grandeza, podendo estes dados ser verificados no Anexo F. Dessa forma, e uma vez que estas duas formas de transporte de energia térmica são as principais utilizadas nas instalações, pode-se concluir que para o estudo da alteração do valor de KPI com a implementação desta nova rede, relativamente à área abrangida por ela, é necessário ter-se conhecimento da quantidade de vapor utilizada pelos vários equipamentos que fazem parte da rede de aproveitamentos térmicos.

Relativamente ao consumo de utilidades frias, tanto a rede proposta como a rede atual apresentam consumos mínimos, pois apesar de os dados de utilização dos aeroarrefecedores não estarem disponíveis, o conhecimento resultante da experiência permite chegar a esta avaliação da situação atual. Dessa forma, para colmatar as necessidades de utilidades frias por parte da rede proposta, a atual solução empregue no Centro de Produção de Leça do Balio seria utilizada, podendo esta ser efetuada recorrendo aos aeroarrefecedores previamente mencionados ou à torre de refrigeração instalada.

Este capítulo comparativo, da situação atual com a proposta, carece de uma maior recolha de resultados para uma abordagem mais real ao problema da otimização energética porque se verifica nesta empresa grandes flutuações de valores de produção, tanto ao longo do ano como, muitas vezes, ao longo do mês. As consequências dessa flutuabilidade são refletidas em todos os sistemas de apoio à produção, no qual está englobada a rede de aproveitamentos de energia térmica. De forma a colmatar estas variações, deve-se tentar agrupar o maior conjunto de dados possível de todas as variáveis em causa, desde temperaturas a caudais, ao longo de grandes períodos, podendo neste caso ser necessário fazê-lo ao longo de mais de um ano, para garantir a sua representatividade. Ao proceder a esta recolha alargada, os valores utilizados no estudo refletirão mais precisamente as flutuações verificadas permitindo obter menores desvios, quando aplicados estudos estatísticos. Esta abordagem permite a quem está a aplicar a metodologia *Pinch* ter um conhecimento mais aprofundado da forma como todo o sistema fabril opera ao longo do(s) ano(s), algo que é de extrema relevância não só na construção/alteração da rede de permutadores em si, mas também na escolha dos equipamentos relevantes para essa rede.

Uma vez que o estágio presencial na Super Bock Group foi abruptamente cancelado, aquando do início do processo de recolha de dados para este estudo, foi impossível

proceder a um estudo tão aprofundado como desejado da rede de aproveitamentos térmicos atual e dos equipamentos que a compõem.

Desta forma, os resultados obtidos não deverão, eventualmente, ser interpretados como uma forma de introduzir melhorias concretas no que toca ao aproveitamento de energia no centro de produção estudado. Trata-se, no entanto, de uma abordagem que demonstra resultados positivos no que toca à possibilidade de otimizar ainda mais um sistema que por si já é de excelência em termos de aproveitamentos energéticos possíveis, mas que apresenta um número relativamente elevado de permutadores em relação à rede proposta neste estudo.

5.2. Custos com a implementação da nova rede de aproveitamentos térmicos

Contactando o departamento de manutenção da Super Bock Group, responsável pela manutenção e funcionamento dos permutadores englobados na rede atual, e os fabricantes dos permutadores a alterar, a ARSOPI-THERMAL, procurou-se avaliar economicamente as alterações necessárias a realizar aos 7 permutadores existentes.

Verificou-se assim que a redução da área dos permutadores apresentada na Tabela 4.4 não apresenta quaisquer custos associados, uma vez que esta redução pode ser realizada tanto retirando fisicamente o número de placas necessárias ao permutador em questão, diminuindo a área de transferência de calor, como reduzindo os caudais dos fluidos que neste passam, o que apesar de não alterar a área de transferência de calor diminui o coeficiente global de transferência de calor deste equipamento, reduzindo assim a potência energética trocada no permutador.

Relativamente ao aumento da capacidade dos permutadores, através do contacto com o fabricante verificou-se que este pode ser realizado tanto como através de um aumento do número de placas dos permutadores como da atualização das placas já existentes por umas com maior eficiência, aumentando a capacidade do mesmo.

Aquando da submissão desta dissertação, ainda não se obteve um orçamento facultado pelo fabricante associado a estas alterações.

6. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

Nesta tese aplicou-se o método *Pinch* aos consumidores e produtores de energia que compõem a rede de aproveitamentos térmicos do Centro de Produção de Leça do Balio da Super Bock Group, de forma a determinar se seria possível aumentar a quantidade de energia recuperada por esta rede, diminuir o consumo de utilidades externas e avaliar a possibilidade de reduzir a quantidade de permutadores existentes na rede atual.

Construiu-se uma nova rede de permutadores de calor com base na metodologia *Pinch*, tendo-se verificado que, comparativamente à rede existente atualmente, esta apresenta o mesmo valor de aproveitamentos térmicos anuais, com uma diferença anual (rede atual menos rede proposta) de apenas 0,03%, relativamente à rede atual, variando mensalmente dentro do intervalo [-34,43%; 19,27%].

Estudando os consumos de utilidades externas de ambas as redes, verificou-se que o consumo de energia, sobre a forma de utilidades externas, na rede atual é significativamente superior à da rede proposta, consumindo no mínimo mais 2108,2 MWh (valor verificado em janeiro). Esta diferença pode ser explicada pelo facto de os dados relativos aos consumos mensais de vapor utilizados não representarem necessariamente aqueles associados à rede de aproveitamentos térmicos.

Relativamente ao número de permutadores de cada rede e à área de transferência de calor a eles associados, concluiu-se que é possível reduzir o número de permutadores necessários para metade, de 16 para 8, resultando numa redução da área de transferência de calor de 1050,96 m² para 580,16 m², ou seja, uma redução de 470,8 m².

A alteração do valor de Key Performance Indicator (KPI) com a implementação da rede proposta não pôde ser avaliada visto que, os consumos de vapor de ambas as redes têm grande relevância neste cálculo e os consumos de vapor associados à rede atual não puderam ser contabilizados, ou seja, individualizados do consumo geral de vapor na fábrica.

Economicamente, também não foi possível apurar o impacto que a rede proposta teria, sendo apenas possível concluir relativamente a essa vertente que a redução da área de transferência de calor proporcionaria menores custos de manutenção, que acabariam por colmatar o investimento necessário, para esta alteração, a longo prazo.

Quanto ao trabalho futuro e dado que nesta dissertação, devido à interrupção abrupta que sofreu, trabalhou-se maioritariamente com dados relativos a fevereiro de 2020, sugere-se uma alargamento significativo do período de recolha de dados relativos às características das correntes relevantes à rede de aproveitamentos térmicos, uma componente fulcral para a construção de uma rede de permutadores de calor. Desta forma, um maior estudo dos equipamentos abordados e das correntes a estes associados poderá ser feito no futuro de forma a obter-se uma descrição mais detalhada e, conseqüentemente, real da rede em estudo e possibilitando soluções mais abrangentes de como poderia ser melhorada.

Ainda, a otimização da rede de permutadores de calor pode ser abordada de uma perspetiva diferente, na qual se procura automatizar a resposta a quebras de eficiência da rede através da criação de parâmetros cuja avaliação permite atuar sobre os equipamentos que causam essa quebra de eficiência, sendo um exemplo prático a limpeza das placas de um permutador cuja sujidade e incrustações estariam a diminuir a quantidade de energia transferida e aproveitada neste. Um levantamento de todos os equipamentos, sub equipamentos e conjuntos a estes associados numa plataforma digital, como o atualmente utilizado na empresa, SAP ERP, pode ainda levar a uma maior capacidade de resposta perante possíveis quebras no sistema de aproveitamentos térmicos, permitindo desta forma otimizar não o seu funcionamento mas a quantidade de tempo em que este funciona no seu pleno.

Bibliografia

Assis, Carlos (2019), Apontamentos da unidade curricular UTLIND (Utilidades Industriais), DEQ (Departamento de Engenharia Química), ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto).

Departamento de Manutenção da SuperBock Group (2020), *Recuperação Térmica*, Ficheiro de dados facultado pela SuperBock Group.

Departamento de Recursos Humanos da SuperBock Group (2020), Apresentação institucional facultada pela SuperBock Group.

Esteves, Teresa Sena; Pinto, Gilberto (2019) Apontamentos da unidade curricular INTROP (Integração e Otimização de Processos), DEQ (Departamento de Engenharia Química), ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto).

Relvas, Susana et al. (2002), *Integração de Processos; Uma metodologia de otimização energética e ambiental*, PolarPress, Lda.

Google (2020), Imagem aérea do centro de produção de Leça do Balio da SuperBock Group, [google.pt/maps](https://www.google.pt/maps), consultado em 15/5/2020

Linnhoff, B et al. (1992), *A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*, The Institution of Chemical Engineers.

Melo, Eduarda (2018) *Água Quente_EM*, apresentação facultada pela SuperBock Group

Ramalho, E. (2002), Apontamentos da unidade curricular EURE (Estratégias para a Utilização Racional de Energia), DEQ (Departamento de Engenharia Química), ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto).

Anexo A

Neste anexo podem-se encontrar os diversos gráficos utilizados para relacionar as temperaturas das correntes verificadas no capítulo 3 com as suas densidades, verificados nas Figuras A-1 para a água e A-2 para a água glicolada (35%), e as suas capacidades caloríficas, verificadas nas figuras A-3 para a água e A-4 para a água glicolada (35%). Todos os dados presentes neste anexo referentes a estas relações foram retirados de (Departamento de Manutenção (2020))

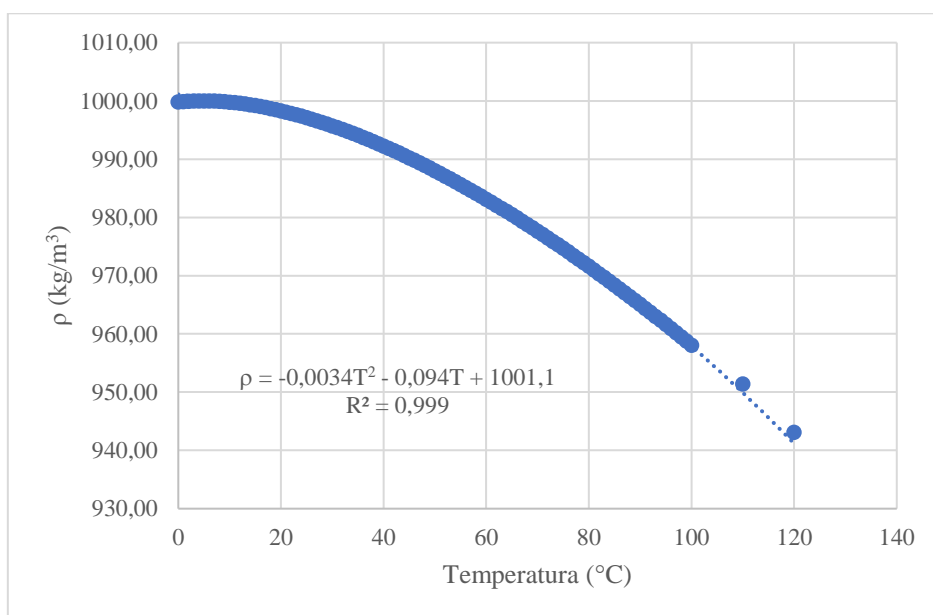


Figura A-1 Massa volúmica da água líquida (kg/m^3), ρ , vs Temperatura, T , ($^{\circ}\text{C}$)

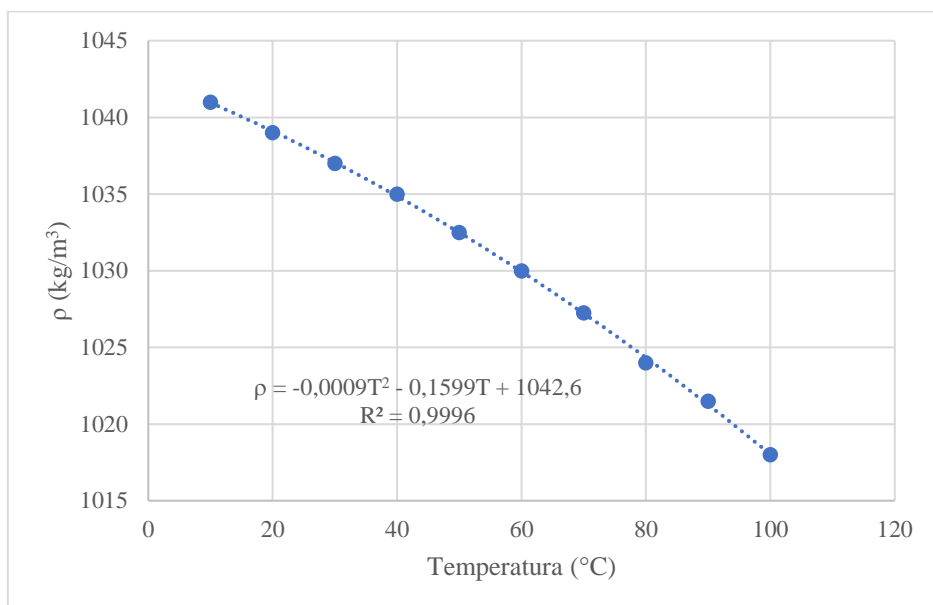


Figura A-2 Massa volúmica da água glicolada líquida (35%), ρ , (kg/m^3) vs Temperatura, T , ($^{\circ}\text{C}$)

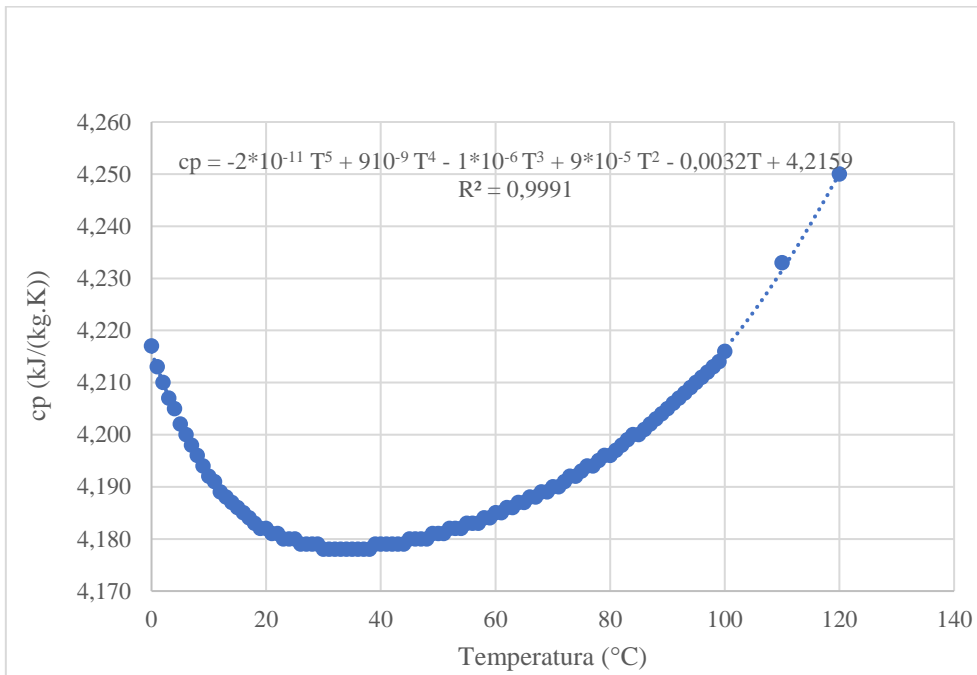


Figura A-36 Calor específico da água líquida, c_p , ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) vs Temperatura, T , ($^{\circ}\text{C}$)

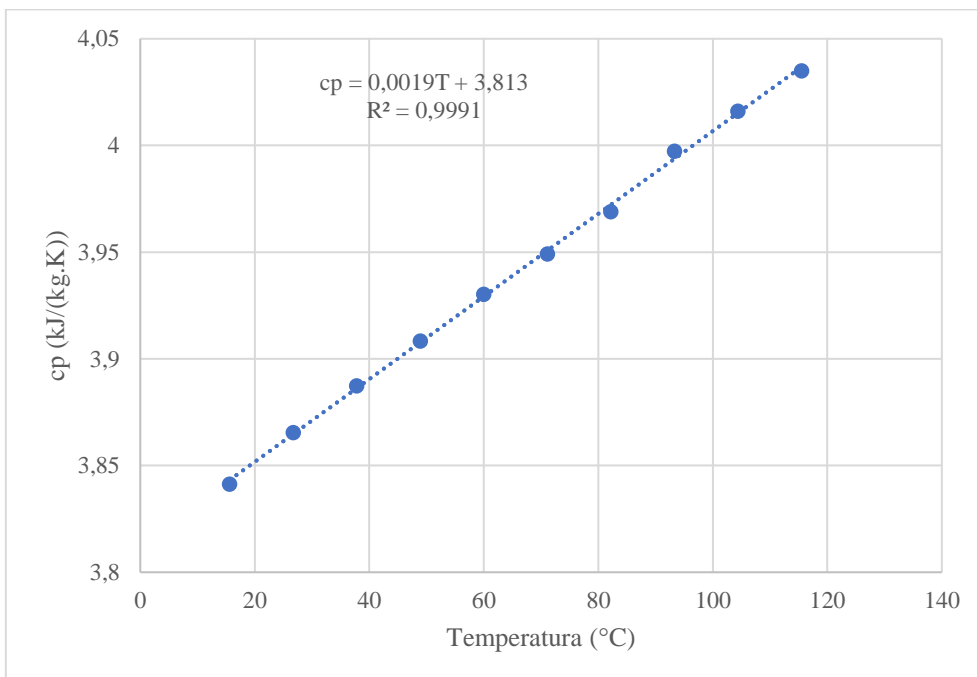


Figura A-4 Calor específico da água glicolada líquida (35%), c_p , ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) vs Temperatura, T , ($^{\circ}\text{C}$)

Exemplo de cálculo do caudal mássico da corrente HT (água glicolada)

$$T_i = 91 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_f = 78 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Caudal} = 105 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Caudal mássico} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = \text{Caudal mássico} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) * \frac{1}{3600} \left(\frac{\text{h}}{\text{s}} \right) * \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Utilizando a expressão apresentada na Figura A-2, ρ (kg/m^3) é determinado por:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) &= -0,0009 * T \text{ (}^\circ\text{C)}^2 - 0,1599 T \text{ (}^\circ\text{C)} + 1042,6 \\ \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) &= -0,0009 * \left(\frac{91 + 78}{2} \right)^2 - 0,1599 \left(\frac{91 + 78}{2} \right) + 1042,6 \\ &= 1022,7 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \end{aligned}$$

O Caudal mássico da corrente em questão será então:

$$\text{Caudal mássico} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = 105 * \frac{1}{3600} * 1022 = 29,8 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Anexo B

Exemplo de cálculo do caudal mássico de água fria \dot{m}_f do pasteurizador da linha 1, sendo que estes dados podem ser encontrados nas Tabelas 3.2 e 3.3, e são valores médios referentes ao mês de julho, fornecidos pela empresa.

Temperatura de entrada da corrente fria (T_{fe}) = 70,6 °C

Temperatura de saída da corrente fria (T_{fs}) = 76,2 °C

Temperatura de entrada da corrente quente (T_{qe}) = 86,3 °C

Temperatura de saída da corrente quente (T_{qs}) = 70,6 °C

Caudal mássico da corrente quente $\dot{m}_q = 23,3 \text{ m}^3/\text{h}$

$$\dot{m}_f \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = \dot{m}_q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) * \frac{T_{qe} - T_{qs}}{T_{fs} - T_{fe}}$$
$$\dot{m}_f \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 23,3 * \frac{86,3 - 70,6}{76,2 - 70,6} = 65,3 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

É possível realizar esta relação entre os caudais de água quente e fria pois os valores dos calores específicos destas correntes não variam muito, pelo que no balanço de energia este parâmetro é eliminado.

Anexo C

Exemplo de cálculo da temperatura de uma corrente após uma troca de calor, T_f

Utilizando como exemplo a determinação da temperatura do ramo inferior da corrente 9 após a troca de calor com a corrente 2 obtém-se a temperatura final do ramo inferior da corrente 9 de 85,1 °C.

$\dot{m}cp$ ramo inferior corrente 9 = 44 kW/°C

T_i corrente 9 = 75 °C

$Q = 444$ kW

$$Q \text{ (kW)} = \dot{m}cp \left(\frac{\text{kW}}{\text{°C}} \right) * (T_i - T_f)$$

$$T_f \text{ (°C)} = T_i \text{ (°C)} - \frac{Q \text{ (kW)}}{\dot{m}cp \left(\frac{\text{kW}}{\text{°C}} \right)}$$

$$T_f = 75 - \frac{444}{44} = 85,1 \text{ °C}$$

Anexo D

Neste anexo pode-se verificar a tabela que reflete as relações utilizadas entre o valor de

$\frac{Q}{\Delta T}$ e os fluidos que circulam num permutador.

Tabela D-1 Relação entre coeficiente global de transferência de calor de um permutador de calor, tipo de fluidos do mesmo e respetiva potência (Ramalho, E. (2002))

Q/ΔT W/K	COLD SIDE FLUID	PARAMETER	Low pressure Gas - 1 bar	High pressure Gas - 20 bar	Process water	Low viscosity organic fluid	High viscosity Liquid	Condensing Steam	Condensing Hydrocarbon	Condensing Hydrocarbon with Inert Gas
1 000	Low pressure gas (1 bar)	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	55 4.36	93 3.76	102 3.43	99 3.54	63 4.29	107 3.27	100 3.50	86 3.14
	High pressure gas (20 bar)	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	93 3.76	300 1.70	429 2.45	375 2.80	120 2.91	530 1.99	388 2.78	240 2.12
	Treated Cooling water	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	105 3.33	484 2.17	938 1.12	714 1.47	142 2.46	1607 0.65	764 1.37	345 3.04
	Low viscosity organic liquid*	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	99 3.54	375 2.8	600 1.75	500 2.1	130 2.69	818 1.28	524 2.00	286 1.78
	High viscosity liquid**	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	68 3.97	138 2.54	161 3.16	153 3.33	82 3.29	173 2.94	155 3.28	124 2.82
	Boiling water	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	105 3.33	467 2.25	875 1.20	677 1.55	140 2.50	1432 0.73	722 1.45	336 3.13
	Boiling organic liquid***	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	99 3.53	375 2.8	600 1.75	500 2.1	130 2.69	818 1.28	524 2.00	286 1.78
5 000	Low pressure gas (-1 bar)	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	55 1.42	93 1.25	102 1.14	99 1.17	63 1.49	107 1.00	100 1.16	86 1.21
	High pressure gas (-20 bar)	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	93 1.25	300 0.8	429 0.63	375 0.72	120 1.12	530 0.66	388 0.78	240 0.37
	Treated Cooling water	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	105 1.10	484 0.72	938 0.54	714 0.71	142 0.94	1607 0.32	764 0.67	345 0.78
	Low viscosity organic liquid*	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	99 1.17	375 0.72	600 0.58	500 0.70	130 1.03	818 0.62	524 0.67	286 0.84
	High viscosity liquid**	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	68 1.38	138 0.97	161 0.83	153 0.88	82 1.27	173 0.77	155 0.864	124 1.08
	Boiling water	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	105 1.10	467 0.75	875 0.58	677 0.52	140 0.96	1432 0.36	722 0.78	336 0.883
	Boiling organic liquid***	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	99 1.17	375 0.72	600 0.58	500 0.70	130 1.03	818 0.62	524 0.67	286 0.84
	Low pressure gas (-1 bar)	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	55 0.82	93 0.54	102 0.52	99 0.53	63 0.73	107 0.49	100 0.52	86 0.58
	High pressure gas (-20 bar)	U (W/m ² K) C (A/(W/K))	93 0.54	300 0.26	500 0.23	375 0.25	120 0.45	530 0.22	388 0.24	240 0.3

Tabela D-12 (Continuação) Relação entre coeficiente global de transferência de calor de um permutador de calor, tipo de fluidos do mesmo e respectiva potência (Ramalho, E. (2002))

30 000	Treated Cooling Water	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	105 0.50	484 0.24	938 0.14	714 0.19	142 0.39	1607 0.15	764 0.14	345 0.23
	Low viscosity organic liquid*	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	99 0.53	375 0.25	600 0.19	500 0.23	130 0.43	818 0.16	524 0.20	286 0.27
	High viscosity liquid**	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	68 0.69	138 0.41	161 0.40	153 0.34	82 0.59	173 0.37	155 0.36	124 0.44
	Boiling water	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	105 0.50	467 0.22	875 0.15	677 0.17	140 0.4	1432 0.13	722 0.19	336 0.23
	Boiling organic liquid***	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	99 0.53	375 0.25	600 0.19	500 0.23	130 0.43	818 0.16	524 0.20	286 0.27
100 000	Low pressure gas (-1 bar)	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	55 8 0.8	93 8 0.47	102 8 0.43	99 8 0.44	63 8 0.7	107 8 0.41	188 8 0.44	86 8 0.51
	High pressure gas (-20 bar)	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	93 8 0.47	300 8 0.17	429 8 0.13	375 8 0.14	120 8 0.37	530 8 0.11	388 8 0.14	248 8 0.20
	Treated Cooling Water	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	105 8 0.42	484 8 0.12	938 8 0.083	714 8 0.095	142 8 0.31	1607 8 0.065	764 8 0.094	345 8 0.015
	Low viscosity organic liquid*	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	99 8 0.44	375 8 0.14	609 8 0.11	500 8 0.11	130 8 0.348	818 8 0.088	524 8 0.11	286 8 0.17
	High viscosity liquid**	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	68 8 0.65	138 8 0.32	161 8 0.27	153 8 0.29	82 8 0.54	173 8 0.25	155 8 0.28	124 8 0.35
	Boiling water	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	105 8 0.42	467 8 0.12	875 8 0.082	677 8 0.10	140 8 0.31	1432 8 0.066	722 8 0.094	336 8 0.15
	Boiling organic liquid***	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	99 8 0.44	375 8 0.14	600 8 0.11	500 8 0.11	130 8 0.34	818 8 0.088	524 8 0.11	286 8 0.17
1000 000	Low pressure gas (-1 bar)	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	55 8 0.80	93 8 0.47	102 8 0.46	99 8 0.44	63 8 0.78	107 8 0.41	188 8 0.44	86 8 0.51
	High pressure gas (-20 bar)	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	93 8 0.47	300 8 0.15	500 8 0.088	375 8 0.12	120 8 0.37	530 8 0.0	388 8 0.11	248 8 0.18
	Treated Cooling Water	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	105 8 0.42	484 8 0.091	938 8 0.047	714 8 0.062	142 8 0.31	1607 8 0.027	764 8 0.058	345 8 0.13
	Low viscosity organic liquid*	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	99 8 0.44	375 8 0.12	600 8 0.073	500 8 0.088	130 8 0.34	818 8 0.054	524 8 0.084	286 8 0.15
	High viscosity liquid**	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	68 8 0.65	138 8 0.32	161 8 0.27	153 8 0.29	82 8 0.54	173 8 0.25	155 8 0.28	124 8 0.35
	Boiling water	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	105 8 0.42	467 8 0.094	875 8 0.050	677 8 0.065	140 8 0.31	1432 8 0.031	722 8 0.061	336 8 0.13
	Boiling organic liquid***	U (W/m ² K) C (L/(W/K))	99 8 0.44	375 8 0.12	600 8 0.073	500 8 0.077	130 8 0.34	818 8 0.054	524 8 0.084	286 8 0.15

Exemplo de cálculo da área de transferência de calor (A) para o permutador L2 – HT2:

$$Q = 444 \text{ kW}$$

$$U = 0,938 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$T \text{ entrada fluido quente } (T_{qe}) = 88 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T \text{ saída fluido quente } (T_{qs}) = 77,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T \text{ entrada fluido frio } (T_{fe}) = 73 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T \text{ saída fluido frio } (T_{fs}) = 78 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q \text{ (kW)} = U \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right) * A \text{ (m}^2) * \Delta T_{ML} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$A (m^2) = \frac{Q(kW)}{U \left(\frac{kW}{m^2 * ^\circ C} \right) * \Delta T_{ML}(^\circ C)}$$

$$\Delta T_{ML}(^\circ C) = \frac{(T_{qe} - T_{qs}) - (T_{fs} - T_{fe})}{\ln \frac{(T_{qe} - T_{qs})}{(T_{fs} - T_{fe})}}$$

$$\Delta T_{ML}(^\circ C) = \frac{(88 - 77,9) - (78 - 73)}{\ln \frac{(88 - 77,9)}{(78 - 73)}} = 7,25^\circ C$$

$$A (m^2) = \frac{444}{0,938 * 7,25} = 65,26 m^2$$

Anexo E

Neste anexo encontra-se um exemplo de cálculo para a determinação da energia presente no vapor consumido pela rede atual de permutadores, presente no capítulo 5. Pode-se ainda verificar, na tabela E-1, as propriedades termodinâmicas de vapor que foram utilizadas para determinar o valor de calor latente de vaporização à temperatura e à pressão a que o vapor se encontra.

Tendo em conta que o vapor se encontra a 4 barg e está saturado, os cálculos a efetuar para esta determinação seguirão a equação 7:

$$\begin{aligned} \text{Energia presente no vapor} \left(\frac{MWh}{\text{mês}} \right) \\ = \dot{m}_{\text{vapor}} \left(\frac{\text{ton}}{\text{mês}} \right) * 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{ton}} \right) * \Delta H_{\text{vap}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) * \frac{1}{1000} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{mês}} \right) \\ * \frac{1}{3600} \left(\frac{MWh}{\text{mês}} \right) \end{aligned}$$

No qual

\dot{m}_{vapor} - massa total de vapor consumida pelas diversas áreas em estudo ao longo de um mês

ΔH_{vap} – calor latente de vaporização do vapor a uma dada pressão ou temperatura (kJ/kg)

Um exemplo de cálculo para o mês de julho será

$$\begin{aligned} \text{Energia presente no vapor} \left(\frac{MWh}{\text{mês}} \right) &= 4868 * 1000 * 2108,0 * \frac{1}{1000} * \frac{1}{3600} \\ &= 2849,9 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Tabela E-1 Propriedades termodinâmicas do Vapor saturado (Assis, Carlos (2019))

Pressão relativa (barg)	Temp. (°C)	Massa volúmica do vapor (kg/m ³)	Viscosidade do vapor x10 ⁵ (Pa.s)	Entalpia do líquido (kJ/kg)	Entalpia do vapor (kJ/kg)	Entalpia de condensação (kJ/kg)
-1.007	0	0.0048	-	0	2502.1	2502.1
-1.006	1.7	0.0054	-	7.0	2505.2	2498.2
-1.005	4.4	0.0066	-	18.7	2510.3	2491.6
-1.003	7.2	0.0079	-	30.4	2515.4	2485.0
-1.001	10.0	0.0094	-	42.0	2520.5	2478.5
-0.998	12.8	0.0112	-	53.7	2525.4	2471.7
-0.996	15.6	0.0133	-	65.3	2530.5	2465.2
-0.990	20.0	0.0173	0.954	84.0	2538.1	2454.1
-0.983	24.0	0.0218	0.967	100.7	2545.4	2444.7
-0.975	28.0	0.0273	0.980	117.4	2552.6	2435.2
-0.966	32.0	0.0339	0.992	134.2	2559.9	2425.7
-0.954	36.0	0.0418	1.005	150.9	2567.1	2416.2
-0.939	40.0	0.0512	1.019	167.6	2574.3	2406.7
-0.922	44.0	0.0624	1.032	184.3	2581.4	2397.1
-0.90	48.3	0.0765	1.047	202.0	2589.0	2387.0
-0.85	55.7	0.1080	1.080	233.4	2601.4	2368.0
-0.8	61.5	0.1388	1.098	257.3	2611.4	2354.1
-0.6	76.7	0.2581	1.148	321.0	2637.5	2316.5
-0.4	86.5	0.3735	1.181	362.3	2653.9	2291.6
-0.2	94.0	0.4864	1.206	393.6	2666.1	2272.5
0	100.0	0.5975	1.227	419.0	2675.7	2256.7
0.5	111.6	0.8695	1.267	468.3	2693.8	2225.5
1	120.4	1.1359	1.297	505.7	2706.9	2201.2
1.5	127.6	1.3981	1.322	536.3	2717.1	2180.8
2	133.7	1.6574	1.343	562.3	2725.5	2163.2
2.5	139.0	1.9142	1.361	585.1	2732.6	2147.5
3	143.8	2.1691	1.378	605.5	2738.7	2133.2
3.5	148.0	2.4224	1.392	623.9	2744.0	2120.1
4	152.0	2.6743	1.406	640.8	2748.8	2108.0
5	158.9	3.1749	1.430	671.1	2756.8	2085.7

Anexo F

Na Tabela F-1 encontra-se a comparação entre o consumo de energia com o vapor mensal e os aproveitamentos térmicos verificados nesse mesmo mês.

Tabela F-16 Consumos mensais durante o ano de 2019 de vapor e aproveitamentos térmicos verificados nesses meses

Mês de 2019	Consumo de energia do vapor (MWh)	Total de aproveitamentos térmicos (MWh)
Janeiro	2108,2	1127,41
Fevereiro	2776,8	757,44
Março	3233,4	876,17
Abril	3547,8	921,97
Mai	3249,2	1108,52
Junho	3001,0	1261,29
Julho	2849,9	1189,17
Agosto	2832,9	922,04
Setembro	2172,0	893,06
Outubro	2244,0	1133,91
Novembro	2441,9	1012,50
TOTAL ANUAL	30457,3	11203,5