



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Hélder Fernando Pinho Gadelho

**RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL DE
FONTES LÍQUIDAS EM INDÚSTRIA DE PASTA E
PAPEL**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Física, orientada
pelo Engenheiro Miguel Duarte Ferreira Antunes da Silva e pelo
Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo, e apresentada
ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra.**

Setembro de 2023

**Recuperação de Calor Residual de Fontes Líquidas em Indústria
de Pasta e Papel**

***Waste heat recovery from liquid sources in the pulp and paper
industry***

Hélder Fernando Pinho Gadelho

(2017254314)

Júri:

Presidente: António Adriano Castanhola Batista (Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra)

Vogal: José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro (Professor Associado da Universidade de
Coimbra)

Orientador: Miguel Duarte Ferreira Antunes da Silva (Mestre em Engenharia, The Navigator
Company, Figueira da Foz)

Orientado por:

Miguel Duarte Ferreira Antunes da Silva (Mestre em Engenharia, The Navigator Company, Figueira da Foz) e

António Manuel Mendes Raimundo (Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra)

Mestrado em Engenharia Física

Setembro de 2023

Agradecimentos

Este percurso (ensino superior) nem sempre foi fácil. Como tudo na vida, é feito de altos e baixos. Ao longo destes últimos meses tive algumas adversidades tais como ter sido submetido a uma cirurgia oftalmológica que me atrasou um tanto o desenvolvimento do trabalho. Também sofri a perda da minha avó materna que, apesar de difícil de superar sei que estará muito feliz por mim. Avó, ficarás eternizada nestas palavras que escrevo, mas especialmente no meu coração. Obrigado a todos os que me ensinaram principalmente a saber aceitar os “baixos” que a vida nos traz e a saber superá-los.

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste projeto. Inicialmente aos meus orientadores: Ao Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo pela sua disponibilidade para ajudar e apoiar sempre que precisava, e ao Engenheiro Miguel Duarte Silva por toda a ajuda, apoio e persistência ao longo destes meses na Navigator, especialmente pelo esforço acrescido em conciliar o seu trabalho do dia-a-dia na empresa com o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço à “The Navigator Company” a oportunidade de poder desenvolver este projeto nas suas instalações, mas principalmente por poder aprender o que é a integração dentro do contexto empresarial, pela inclusão e pela facilidade de poder “explorar” o complexo industrial em busca de informação e poder aprender “no terreno” como tudo se processa.

Agradeço à minha família, aos meus pais, irmã Cristina e cunhado por todo o apoio, persistência e por não me deixarem desistir nos momentos mais difíceis do curso superior. Obrigado pelos sacrifícios que fizeram, pelo orgulho que têm e pela confiança que demonstraram. Obrigado à minha irmã pela preocupação constante durante este tempo e pela ajuda incessante sempre que era necessária.

Por fim, agradeço à restante família e amigos pelo apoio, mas nomeadamente por me mostrarem a cada dia que a felicidade está onde menos esperamos.

Resumo

O setor industrial apresenta uma grande quantidade de calor residual que é desperdiçado. Motivados pela recuperação pós-pandémica e pelo desenvolvimento sustentável (nomeadamente neutralidade carbónica), a recuperação dessa energia excedente transformou-se num objetivo importante para a Navigator.

Neste trabalho, desenvolvido na “The Navigator Company” no complexo industrial da Figueira da Foz, foi realizado um estudo de identificação de fontes líquidas de calor residual bem com de possíveis técnicas para recuperação do calor residual identificado. Um dos objetivos passou pela avaliação das técnicas estudadas quanto à sua viabilidade para serem implementadas no complexo industrial. Dessa análise, concluiu-se que a recuperação de calor do sistema de arrefecimento dos compressores de ar e o permutador de calor (recuperação no tanque de smelt) são as únicas tecnologias que apresentam viabilidade e, por isso, maior probabilidade de futura implementação na Navigator. As restantes técnicas abordadas não apresentaram viabilidade económica (ou porque o balanço energético entre a energia poupada e a consumida era negativo, ou por problemas de corrosão e ainda elevados custos energéticos). A poupança verificada era na geração de vapor de baixa pressão (partindo de biomassa). Se o vapor considerado fosse gerado a partir de gás natural (como já aconteceu no complexo e pode voltar a acontecer em caso de avaria da caldeira de biomassa ou em caso de escassez do material) essas técnicas apresentariam já viabilidade económica, mostrando como apenas um fator pode ser decisivo na implementação de uma determinada técnica.

Dentro destas duas técnicas que apresentaram viabilidade, recuperação de calor do sistema de arrefecimento dos compressores de ar e recuperação de calor no tanque de smelt (com recurso a um permutador de calor), foram analisados vários indicadores de viabilidade. Quanto às poupanças económicas, o pré-aquecimento do tanque de água desmineralizada permite poupar 126 657 €/ano em vapor no primeiro caso e 133 043 €/ano no segundo caso, permitindo recuperar o investimento ao fim de 4,4 anos e 3,1 respetivamente.

Palavras-chave: Indústria de Pasta e Papel, Recuperação de Calor Residual Industrial, Análise técnico-económica, Eficiência Energética, Transição Energética.

Abstract

The industrial sector generates a significant amount of waste heat that is currently being discarded. Motivated by post-pandemic recovery and sustainable development (especially carbon neutrality), the recovery of this excess energy has become an important objective for Navigator.

In this work, carried out at "The Navigator Company" in the industrial complex of Figueira da Foz, a study was conducted to identify liquid sources of waste heat, as well as possible techniques for recovering the identified waste heat. One of the objectives was to evaluate the feasibility of the studied techniques for implementation in the industrial complex. From this analysis, it was concluded that the recovery of heat from the cooling system of the air compressors and the heat exchanger (recovery in the smelt tank) are the only technologies that present feasibility and, therefore, a higher probability of future implementation in Navigator. The other techniques studied did not present economic feasibility (either because the energy balance between saved and consumed energy was negative, or because of corrosion problems and high energy costs). The savings were observed in the generation of low-pressure steam (using biomass). If the considered steam were generated from natural gas (as has already happened in the complex and may happen again in case of biomass boiler failure or shortage), these techniques would already have economic viability, showing how only one factor can be decisive in the implementation of a particular technique.

Within these two techniques that showed feasibility, heat recovery from the cooling system of the air compressors and heat recovery in the smelt tank (using a heat exchanger), several feasibility indicators were analyzed. Regarding economic savings, preheating the demineralized water tank allows for savings of €126,657/year in steam in the first case and €133,043/year in the second case, allowing for the investment to be recovered after 4.4 years and 3.1 years, respectively.

Keywords: Pulp and Paper Industry, Industrial Waste Heat Recovery, Technical and Economic Analysis, Energy Efficiency, Energy Transition.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas.....	viii
Nomenclatura.....	ix
Abreviaturas	ix
Simbologia.....	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação.....	1
1.3 Objetivos	2
2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 Calor Residual.....	3
2.2 Sistemas de Recuperação de Calor Residual.....	3
2.2.1 Recuperação direta para aquecimento de líquidos e gases.....	4
2.2.1.1 Permuta gás-gás	4
2.2.1.2 Permuta gás-líquido	4
2.2.1.3 Permuta líquido-líquido	5
2.2.1.4 Permutador de calor	5
2.2.2 Recuperação para produção de energia elétrica	6
2.2.3 Recuperação de calor para refrigeração	8
2.2.3.1 Chillers de absorção	8
2.2.3.2 Chillers de adsorção	9

2.2.4	Recuperação de calor utilizando uma bomba de calor	11
2.3	Aplicabilidade dos Sistemas de Recuperação de Calor Residual	13
2.4	Casos de Sucesso na Recuperação de Calor.....	15
3.	FONTES LÍQUIDAS DE CALOR RESIDUAL.....	18
3.1	Identificação e Caraterização de Fontes Líquidas de Calor Residual	18
3.2	Origem das Fontes Líquidas de Calor Residual	21
3.3	Tratamento de Efluentes.....	22
3.4	Custo do Funcionamento da Torre de Refrigeração Geral	25
3.5	Custo do Funcionamento da Torre de Refrigeração dos Efluentes	27
3.6	Custo da Produção de Vapor a Baixa Pressão.....	30
3.6.1	Produção de vapor com recurso a biomassa	30
3.6.2	Produção de vapor com recurso a gás natural.....	31
4.	TÉCNICAS PARA RECUPERAÇÃO DO CALOR RESIDUAL IDENTIFICADO	32
4.1	Recuperação de Calor para Produção de Energia Elétrica	32
4.2	Recuperação de Calor para Aquecimento de Líquidos	38
4.2.1	Aquecimento do caudal de água desmineralizada com calor dos efluentes.....	38
4.2.2	Aquecimento do caudal de água desmineralizada com calor da TR geral.....	43
4.2.3	Aquecimento da água desmineralizada com calor dos compressores de ar.....	47
4.2.4	Aquecimento da água desmineralizada com calor do tanque de smelt.....	58
5.	CONCLUSÃO	65
6.	REFERÊNCIAS.....	67
	ANEXOS	72
	Anexo A – Folha de especificações da água	72
	Anexo B – Imagens da torre de refrigeração geral	73
	Anexo C – Imagens da torre de refrigeração dos efluentes líquidos	74

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Esquema de permutador de calor com contacto direto. Fonte: [10]	6
Figura 2.2 - Permutador de calor de carcaça-e-tubos. Retirado de [11].	6
Figura 2.3 - Esquema de um sistema para produção de eletricidade a partir de uma fonte de calor. Fonte: [12]	7
Figura 2.4 - Sistema baseado em ORC para produção de energia elétrica. Fonte: [13]	8
Figura 2.5 - Chiller de Absorção. Fonte: [15].....	9
Figura 2.6 - Chiller de adsorção. Fonte: [16]	10
Figura 2.7 – Esquema representativo de uma bomba de calor. Fonte: [17]	11
Figura 2.8 – Esquema do ciclo termodinâmico de compressão-expansão. Fonte: [18]	12
Figura 2.9 - Esquema do sistema integrado. Fonte: [21]	17
Figura 3.1 - Identificação das fontes líquidas de calor residual	18
Figura 3.2 - Segregação dos efluentes líquidos para ETAR	24
Figura 4.1 - Esquema da aplicação proposta de Bomba de Calor + ORC	33
Figura 4.2 - Exemplo de bomba de calor. Siemens SHP-C600.....	34
Figura 4.3 - ORC ENO-100LT. Fonte: [26]	35
Figura 4.4 - Gráfico de potência (em MW) em função da eficiência do ORC (em %). Fonte: [27].	35
Figura 4.5 - Esquema da aplicação proposta de pré-aquecimento do tanque de água com efluente	39
Figura 4.6 - Gráfico económico da simulação com gás natural da técnica 4.2.1	43
Figura 4.7 - Sistema de pré-aquecimento da água do tanque de água desmineralizada com calor recuperado na torre de refrigeração (TR) geral	44
Figura 4.8 - Gráfico económico da simulação com gás natural da técnica 4.2.2	47
Figura 4.9 - Esquema de um compressor ZR arrefecido a água [29].	48
Figura 4.10 - Situação atual do sistema de refrigeração por água dos compressores de ar	48
Figura 4.11 – Balanço de energia num compressor de ar arrefecido a água. Fonte: [32]......	50
Figura 4.12 - Esquema energético de compressor de ar. Fonte: [32]......	51
Figura 4.13 - Esquema do sistema proposto utilizando ER	52
Figura 4.14 - Esquema do sistema de ER utilizando o circuito de backup	54
Figura 4.15 - Gráfico económico da técnica 4.2.3	58
Figura 4.16 - Esquema do sistema atual do scrubber	60
Figura 4.17 - Esquema da alteração proposta ao sistema 4.2.4	61

Figura 4.18 – Comportamento económico da técnica 4.2.4.....	64
Figura 6.1 - Tabela de especificações da água de refrigeração (ER 900)	72
Figura 6.2 - Torre de refrigeração geral	73
Figura 6.3 - Medições de temperatura antes da torre de refrigeração geral	73
Figura 6.4 - Medição de temperatura à saída da torre de refrigeração geral	73
Figura 6.5 - Torre de refrigeração dos efluentes líquidos	74
Figura 6.6 - Medições de temperatura dos efluentes. À esquerda do efluente ácido (alcalino é aproximadamente igual) e à direita do efluente de baixo COD.....	74

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação de temperatura de fontes de calor residual e oportunidades de recuperação. Fonte: [19].....	14
Tabela 3.1 – Unidades SI das grandezas utilizadas	19
Tabela 3.2 - Caraterização das fontes líquidas de calor residual	20
Tabela 3.3 - Lista de equipamentos da torre de refrigeração geral.....	26
Tabela 3.4 - Custos de utilização de equipamentos da torre de refrigeração geral	27
Tabela 3.5 - Lista de equipamentos da torre de refrigeração dos efluentes.....	28
Tabela 3.6 - Custos de utilização de equipamentos da torre de refrigeração dos efluentes	29
Tabela 4.1 – Produtividade do sistema ORC considerado (ENO-100LT).....	35
Tabela 4.2 - Resultados económicos da técnica 4.1.....	36
Tabela 4.3 - Resultados económicos da técnica 4.1 com melhores condições de equipamentos	37
Tabela 4.4 - Resultados económicos da técnica 4.2.1 com produção de vapor a partir de biomassa	40
Tabela 4.5 - Resultados económicos da técnica 4.2.1 com produção de vapor a partir de gás natural	42
Tabela 4.6 - Resultados económicos da técnica 4.2.2 a partir de biomassa.....	45
Tabela 4.7 - Resultados económicos da técnica 4.2.2 com produção de vapor com recurso a gás natural	46
Tabela 4.8 – Potência dos compressores de ar (com funcionamento a 75% de carga).....	49
Tabela 4.9 – Cálculos da recuperação de energia do sistema ER900	55
Tabela 4.10 - Caudais de água a fornecer aos compressores	56
Tabela 4.11 - Resultados da análise de viabilidade económica do sistema ER.....	57
Tabela 4.12 - Dados de potencial recuperação do tanque de smelt	61
Tabela 4.13 - Energia recuperável com a técnica 4.2.4.....	62
Tabela 4.14 – Indicadores da viabilidade económica do sistema 4.2.4	63

Nomenclatura

Biomassa: Resíduos de madeira (cascas, etc.) que são utilizados como combustíveis.

Abreviaturas

BC – Bomba de Calor

CAPEX – Capital Expenditure (Despesa de capital ou Capital investido ou a investir)

Cashflow – Fluxo de caixa

COD – Carência Química de Oxigénio

COP – Coeficiente de Performance

EBITDA ou EBITA - *Earnings Before Interest, Taxes and Amortization* (RADFI – Resultado Antes de Depreciações, Gastos de Financiamento e Impostos)

GJ/Ano – Giga joule por ano

M€ - Milhão de euros

MW_e – Megawatt elétrico

MWh - Megawatt-hora

MW_{th} – Megawatt térmico

ORC – Ciclo Orgânico de Rankine (*Organic Rankine Cycle*)

Payback – Período de retorno do investimento

TIR – Taxa interna de rentabilidade

t/h – Tonelada por hora

VAL - Valor atualizado líquido

Simbologia

c_p – Calor específico [J/(kg.K)]

M – Massa [kg]

m – Caudal mássico [kg/s]

Q – Potência calorífica [W]

T – Temperatura [K ou °C]

ΔT – Diferença de temperatura [K ou °C]

η – Rendimento [--]

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Atualmente, atravessamos uma crise energética global. Incentivada pela invasão na Ucrânia, e por algumas limitações no seu fornecimento, têm aumentado exponencialmente o preço da energia, seja, gás natural, eletricidade, combustíveis, etc [1]. Naturalmente, esse aumento faz-se sentir de forma acentuada no setor industrial.

O setor industrial representa aproximadamente $\frac{1}{3}$ do consumo global de energia do planeta [2]. Como os processos de conversão de energia são pouco eficientes, estudos afirmam que entre 20 e 50% dessa energia é desperdiçada e conseqüentemente, libertada para a atmosfera.

A “The Navigator Company” é um produtor integrado de floresta, pasta, papel e energia. [...] Atualmente, a sua capacidade instalada ronda os 1,6 milhões de toneladas de papel, de 1,5 milhões de toneladas de pasta (80% integradas em papel), [...] e 2,5 TWh/ano de energia elétrica” [3].

Mais concretamente, no Complexo Industrial da Figueira da Foz, são produzidas cerca de 570 mil toneladas de pasta de papel branqueada de eucalipto e 800 mil toneladas de papel para impressão e escrita. Este complexo inclui uma fábrica de pasta e duas de produção de papel [4].

Estima-se que, no Complexo Industrial da Figueira da Foz, exista um desperdício de energia na forma de calor residual de cerca de 1200 GWh/ano, com potencial recuperação.

Implementando sistemas de recuperação de calor residual na indústria, é possível aproveitar este calor para gerar energia, seja de forma direta (com a produção de energia elétrica), seja sob a forma de calor para aproveitamento noutras seções da fábrica.

1.2 Motivação

Economia Circular é um conceito estratégico que assenta na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia. Este conceito está aqui presente porque evidencia a motivação da “The Navigator Company”. Evitar desperdício, seja direto para o ambiente, seja em gastos para arrefecimento, por exemplo, de efluente. É um ponto importante que esta empresa pretende atingir.

Para além disso, a “*The Navigator Company*” pretende atingir a neutralidade Carbónica até 2035 [5], o que motiva uma gestão otimizada dos recursos energéticos disponíveis. Neste sentido é fundamental minimizar o desperdício de energia, quer através do recurso a processos produtivos energeticamente otimizados quer através da recuperação do calor residual.

O facto de, atualmente, os custos energéticos estarem a aumentar exponencialmente [6], levam a que seja cada vez mais essencial a implementação na indústria de sistemas de recuperação do calor residual, por um lado, para reduzir custos de produção/fabrico e, por outro, para reduzir o impacto ambiental da mesma, bem como a dependência de combustíveis fósseis.

1.3 Objetivos

O presente estudo foca-se na recuperação do calor residual de fontes líquidas da unidade industrial, localizada na Figueira da Foz, da empresa “*The Navigator Company*”. Os seus objetivos principais são:

- Identificar as fontes líquidas de calor residual e caracterizá-las: quantidade de energia, temperatura, etc.;
- Identificar e caracterizar aplicações para o calor residual identificado: avaliando formas de aproveitar o desperdício, quer para utilização interna na fábrica (em outros processos), quer para produção de energia elétrica;
- Efetuar pré-análises técnicas e económicas de vários sistemas de recuperação do calor residual contido em líquidos.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Calor Residual

Calor residual, ou também designado de secundário, é energia térmica dissipada para o meio ambiente sob forma de calor, podendo ter várias origens. Sendo as mais frequentes, o calor que não foi viável consumir num determinado processo, calor gerado no decurso de um processo e o calor desperdiçado pelos equipamentos de produção e/ou de dissipação de energia térmica.

A recuperação do calor residual tem duas grandes vantagens: (i) evita-se o desperdício de energia; e (ii) protege-se o ambiente.

Existem diversas fontes de calor residual, como é o caso de gases resultantes de combustão, de secadores, ou mesmo água de torres de arrefecimento.

De forma análoga, existem diversas formas de reaproveitamento desse calor, seja para pré-aquecimento de água à entrada de caldeira, para produção de energia elétrica, entre outros. Obviamente, a forma mais eficaz de reaproveitar o calor residual depende da temperatura a que o mesmo se encontra.

2.2 Sistemas de Recuperação de Calor Residual

A implementação de sistemas com capacidade de recuperar calor residual é cada vez mais importante com ênfase na indústria, tornando-as mais eficientes e sustentáveis. É possível poupar uma quantidade elevada de energia e reduzir os respetivos custos energéticos, aproveitando este calor que representaria um desperdício à priori. O calor recuperado pode ter diversos usos, tais como, pré-aquecimento de outros líquidos/gases de processos industriais, produção de energia elétrica, inclusive para refrigeração. Com a evolução tecnológica, juntamente com o aumento dos custos de energéticos, têm tornando mais viável a recuperação desta energia. Eliminando algumas das barreiras históricas à implementação destes sistemas.

2.2.1 Recuperação direta para aquecimento de líquidos e gases

A implementação de um sistema de recuperação de calor pode efetuar-se por recuperação direta, por exemplo para efetuar aquecimento ou pré-aquecimento de gases ou líquidos. Para o efeito recorre-se a permutadores, os quais são utilizados para transferir calor entre duas correntes. No mesmo ou em diferentes estados físicos.

Os permutadores desempenham assim um papel fundamental na recuperação de calor. Existindo vários tipos: de carcaça e tubos, placas, tubos concêntricos, helicoidais, em serpentina, rotativos, etc. [7]. E podem possuir várias configurações para o escoamento dos fluidos, em co-corrente, em contra-corrente ou em correntes cruzadas, etc. [8].

2.2.1.1 Permuta gás-gás

Permutadores de gás-gás são equipamentos que têm a finalidade de trocar calor entre dois fluxos de gases, sem que estes se misturem. São utilizados de forma comum em sistemas de ar condicionado devido à facilidade de troca de calor entre ar de dois ambientes e, com isso, aquecer ou arrefecer um meio, consoante o pretendido.

Este tipo de permutadores, gás-gás, são projetados para cumprir diferentes requisitos de fluxo de ar. Assim, um permutador projetado para um prédio, por exemplo, pode ser diferente de um permutador desenhado para uma residência, ou unidade industrial. São equipamentos atravessados por ambos os fluxos de ar. Requerem uma instalação bem planeada com bons acessos, visto que é essencial que se faça a sua manutenção.

2.2.1.2 Permuta gás-líquido

Este tipo de permutador tem uma vasta gama de aplicações e, em termos económicos, um período de retorno de investimento reduzido. É vastamente utilizado na recuperação de calor em gases de combustão. Neste tipo de aplicação de permutadores à recuperação do calor contido em gases de combustão é necessário ter algumas precauções, nomeadamente no caso de se tratar de gases resultantes da combustão de combustíveis sólidos, líquidos e de alguns gases. Isto porque abaixo de uma determinada temperatura, ponto de orvalho, a qual depende do teor de enxofre no combustível, ocorre a formação de ácido sulfuroso (H_2SO_3), que posteriormente se transforma em ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou no caso de gás natural, ocorre a formação de ácido carbónico.

2.2.1.3 Permuta líquido-líquido

Um permutador deste tipo é utilizado para transferir calor de um fluxo líquido para outro líquido. Durante este processo, o líquido quente flui através de uma secção da parede, transferindo calor para o líquido frio, que flui na secção oposta. O líquido quente normalmente é gerado por um processo externo, como reações químicas, combustão ou processo de produção de energia. O líquido frio é gerado normalmente por um processo de arrefecimento, como circulação de água fria.

A eficiência da permuta líquido-líquido depende de diversos fatores, incluindo a diferença de temperatura entre os dois líquidos, a velocidade de fluxo dos líquidos, a espessura da parede de separação e a superfície de troca térmica.

Apresenta uma eficiência térmica elevada (pode atingir os 95%) e tem um período de retorno de investimento reduzido. Um ponto fraco deste tipo de permutador é a sua suscetibilidade a incrustações, reduzindo por vezes a sua eficiência até aos 25%, implicando uma limpeza regular. A permuta líquido-líquido é uma opção segura porque não requer o uso de gases refrigerantes ou outros fluidos que possam ser perigosos.

2.2.1.4 Permutador de calor

Dispositivo que permite a troca de calor entre dois fluidos, com temperaturas diferentes, sendo que um fornece calor e o outro recebe-o. É um dispositivo térmico aplicado para aquecer um ambiente ou arrefecer, dependendo do objetivo pretendido. Os dois meios distintos podem estar separados, de forma que nunca se misturam (permutadores de contacto indireto), ou podem estar em contacto um com o outro (contacto direto).

(i) Permutadores com contacto direto

Estes permutadores permitem o contacto físico entre os dois fluidos (Figura 2.1). Com a condensação é libertado calor que aquece a água, fazendo um pré-aquecimento desta. Produzem vapor através do arrefecimento do vapor a baixa pressão.

Existem sistemas baseados neste tipo de permutador onde o calor é fornecido através de gases de exaustão em vez de vapor a baixa pressão. Neste caso, existe a possibilidade de condensação dos vapores, o que pode originar ácidos corrosivos, sendo preciso atenção reforçada para evitar estas situações [9].

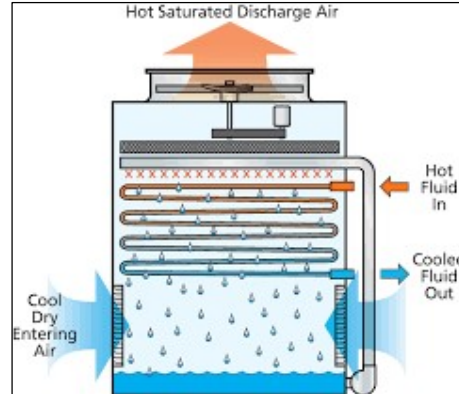


Figura 2.1 – Esquema de permutador de calor de torre de refrigeração. Fonte: [10]

i. Permutadores com contacto indirecto

Estes permutadores não permitem o contacto directo entre os fluidos que estão a permutar calor. É possível classificá-los em: permutadores de carcaça e tubos, de placas, em espiral, entre outros. Estes permutadores têm, geralmente, maior potência de permuta térmica, visto que a área destes permutadores para transferência de calor é superior relativamente aos permutadores que permitem o contacto directo entre os fluidos. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 2.2 um permutador do tipo carcaça-e-tubos [11].

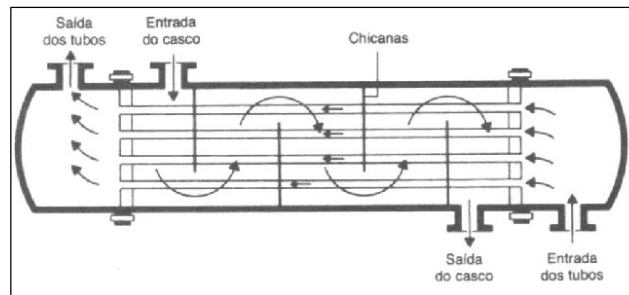


Figura 2.2 - Permutador de calor de carcaça-e-tubos. Retirado de [11].

2.2.2 Recuperação para produção de energia elétrica

Tal como representado na Figura 2.3, os sistemas baseados em Ciclos Orgânicos de Rankine (Organic Rankine Cycle, ORC) são utilizados para transformar o calor em energia elétrica.

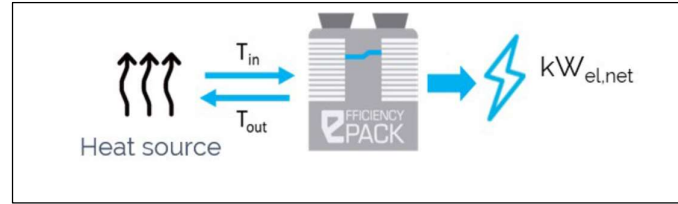


Figura 2.3 - Esquema de um sistema para produção de eletricidade a partir de uma fonte de calor. Fonte: [12]

Ciclo Orgânico de Rankine (ORC)

Trata-se de um ciclo termodinâmico em circuito fechado capaz de produzir energia mecânica a partir de duas fontes de calor, uma fonte quente e uma fonte fria, a qual pode ser fornecida a um gerador e assim produzir energia elétrica. A fonte quente pode ser garantida recorrendo a biomassa, energia geotérmica, combustíveis fósseis ou mesmo calor residual de processos industriais (fator de interesse neste estudo). A fonte fria pode ser assegurada por água fria (se disponível) ou pelo ar (quer diretamente quer recorrendo a uma torre de arrefecimento).

Apresenta-se na Figura 2.4 um esquema representativo de um sistema baseado em ORC para produção de energia elétrica. Este ciclo, ao contrário do ciclo tradicional de Rankine, utiliza um termofluido como fluido de trabalho o que permite o seu funcionamento com temperaturas da fonte quente a partir de 70°C. Quanto maior for a diferença entre a temperatura da fonte quente e a da fonte fria maior é a eficiência energética deste ciclo termodinâmico.

O ciclo ORC consegue produzir energia mecânica recorrendo à mudança de fase (líquido/vapor e vapor/líquido) do fluido de trabalho. Para o efeito recorre a cinco dispositivos: o evaporador, o expansor, o regenerador, o condensador e a bomba hidráulica. O evaporador utiliza o calor da fonte quente para evaporar o fluido de trabalho, o qual se encontrava no estado líquido. O vapor impulsiona o expansor (turbina, sistema de pistões, etc.) produzindo energia mecânica (normalmente a rotação de um veio). O regenerador (permutador de calor) utiliza o calor residual do vapor para pré-aquecer o líquido. No condensador, permutador, torre de arrefecimento, etc., o vapor é condensado transformando-se em líquido. A bomba hidráulica bombeia o líquido, fazendo-o passar pelo regenerador, onde é pré-aquecido, e de seguida pelo evaporador onde será novamente evaporado. A energia mecânica produzida no expansor, normalmente uma turbina, é fornecida a um gerador de energia elétrica.

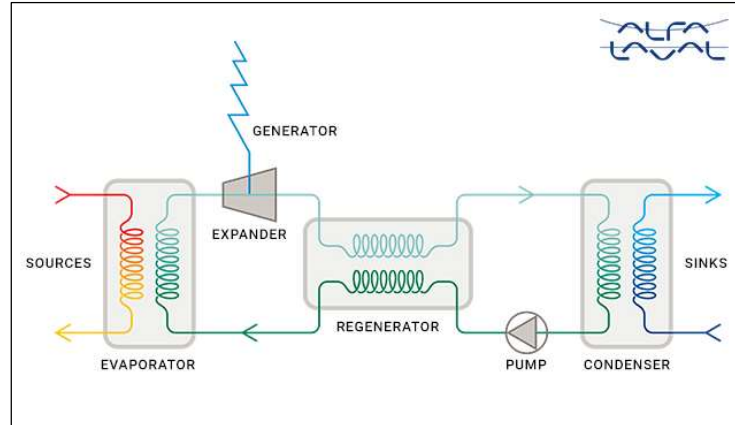


Figura 2.4 - Sistema baseado em ORC para produção de energia elétrica. Fonte: [13]

2.2.3 Recuperação de calor para refrigeração

É possível produzir arrefecimento a partir de uma fonte de calor recorrendo a um equipamento, designado por chiller, a funcionar segundo um ciclo de absorção ou segundo um ciclo de adsorção.

2.2.3.1 Chillers de absorção

Os chillers de absorção são equipamentos que produzem água refrigerada a partir de fontes de calor residual, como gás, água quente ou vapor [14]. Usam um ciclo de refrigeração química, no qual a água é o refrigerante e uma solução de brometo de lítio (Li-Br) é o absorvente. O funcionamento básico dos chillers de absorção é o seguinte:

- O calor proveniente da fonte externa é usado para aquecer a solução de Li-Br no gerador, fazendo com que a água evapore e se separe do absorvente;
- O vapor de água produzido no gerador é condensado no condensador, liberando calor para o fluido de arrefecimento;
- A água líquida resultante do condensador passa pelo dispositivo de expansão, reduzindo a sua pressão e temperatura;
- A água fria entra no evaporador, onde absorve calor da água que circula pelo sistema de ar condicionado, evaporando-se parcialmente;
- O vapor de água gerado no evaporador é absorvido pela solução de Li-Br que vem do gerador, formando uma mistura diluída;
- A mistura diluída retorna ao gerador, completando o ciclo.

Algumas aplicações típicas dos chillers de absorção são:

- Hotéis, hospitais, edifícios comerciais e residenciais que necessitam de refrigeração e aquecimento simultâneos.
- Indústrias químicas, petroquímicas, farmacêuticas e alimentícias que geram calor residual nos seus processos produtivos.
- Centros de dados, laboratórios e salas limpas que requerem condições ambientais controladas e estabilidade térmica.

Representa-se na Figura 2.5 um esquema de um chiller de absorção, onde se pode ver os diversos componentes e o funcionamento do sistema. É semelhante ao ciclo de compressão de vapor [15], mas neste caso o motor e o compressor são substituídos por um sistema de compressor térmico (absorvedor, bomba de solução e gerador). O sistema consiste num condensador, evaporador, absorvedor, gerador e bomba de solução. O absorvedor absorve o vapor do refrigerante. O fluido passa de vapor a líquido no condensador e de líquido a vapor no evaporador. Por sua vez, este retira o refrigerante mais diluído, bombeando-o para o gerador, libertando-o como vapor para ser condensado no condensador. O absorvente mais concentrado, regressa ao absorvedor para recolher o vapor de refrigerante, novamente. A circulação de água no condensador leva a que a temperatura de fornecimento de calor ao gerador seja elevada enquanto o calor de absorção no absorvedor é dissipado a uma temperatura mais reduzida.

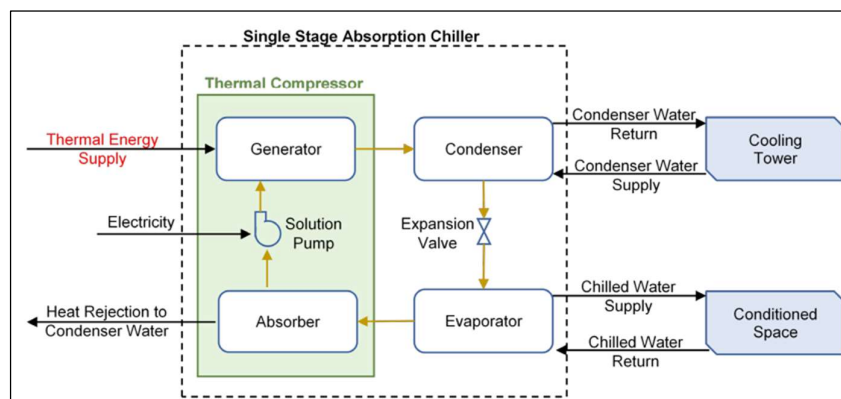


Figura 2.5 - Chiller de Absorção. Fonte: [16]

2.2.3.2 Chillers de adsorção

Chiller de adsorção é um sistema térmico que converte calor em frio, utilizando água como refrigerante e um gel de sílica como adsorvente. Também é comum utilizar carvão ativo ou resina

sintética, como adsorvente nos processos industriais. A diferença entre adsorção e absorção é o facto de, neste último, o fluido mistura-se com o absorvente para formar uma solução [17].

Este sistema incorpora um adsorvente, um evaporador e um condensador. O processo começa com a regeneração do adsorvente, que é feita através do fornecimento de água quente (vinda de uma fonte externa). Isso leva à evaporação do fluido refrigerante. De seguida, o fluido refrigerante em forma de vapor é levado para o condensador, onde é condensado de volta ao estado líquido. Há uma conexão entre o condensador e o evaporador que permite que o fluido refrigerante, agora na forma de líquido saturado, seja transportado para o evaporador. Seguidamente, o adsorvente começa a adsorver o vapor de água que vem do evaporador. Neste processo, é necessário que ocorra uma redução na temperatura para garantir a continuidade da adsorção. A pressão no interior do evaporador é relativamente baixa e o fluido refrigerante nessa secção é transferido na forma de vapor. Este vapor retira o calor de evaporação, resultando na produção de frio.

Na *Figura 2.6* representa-se um esquema de um chiller de adsorção. Neste sistema, água quente com temperatura entre 70 a 90°C é o suficiente para que haja a fase de desadsorção. Temperaturas por volta dos 55°C também podem ser utilizadas, embora a eficiência do sistema nesse caso seja significativamente mais reduzida.

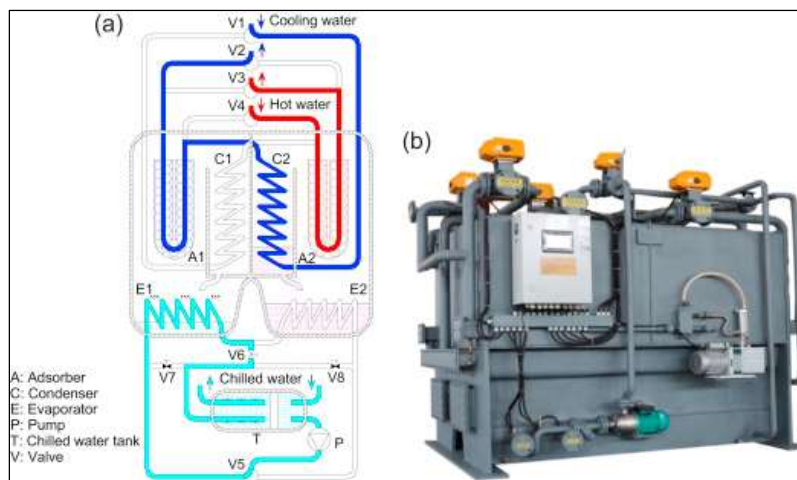


Figura 2.6 - Chiller de adsorção. Fonte: [17]

Os chillers de adsorção apresentam uma melhor eficiência do que os chillers de absorção para a gama de temperaturas entre 70 e 85° C, mas estes últimos têm uma eficiência melhor para temperaturas mais elevadas (entre 95 e 150° C).

2.2.4 Recuperação de calor utilizando uma bomba de calor

As bombas de calor representam uma forma de recuperar calor através da elevação de temperatura do calor e, portanto, é possível produzir calor com temperaturas mais altas.

Uma bomba de calor é um equipamento que transfere energia térmica, calor, de uma fonte fria para uma fonte quente. Para o efeito recorre a um fluido de trabalho, denominado refrigerante o qual sofre duas mudanças de fase, uma de líquido para vapor no evaporador (associado à fonte fria) e outra de vapor para líquido no condensador (associado à fonte quente). O correspondente ciclo termodinâmico designa-se por ciclo de compressão-expansão, na qual a Figura 2.7 representa o esquema.

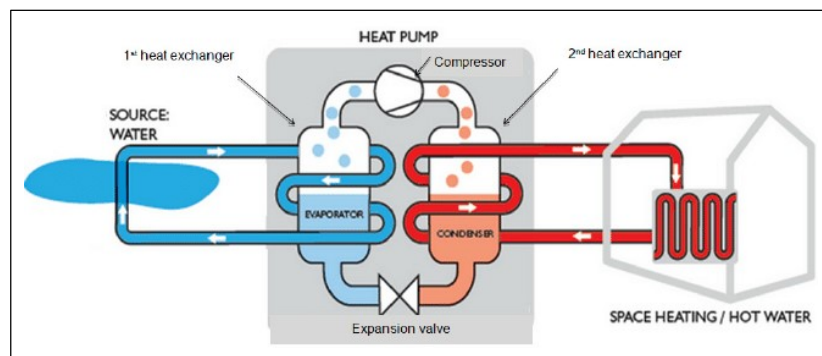


Figura 2.7 – Esquema representativo de uma bomba de calor. Fonte: [18]

Consoante a fonte de energia que desencadeia o ciclo, é possível classificar os ciclos por subcategorias: compressão mecânica, compressão térmica, recompressão mecânica de vapor (MVR) e recompressão térmica de vapor (TVR) [19]. Todos eles comprimem o fluido com o mesmo no estado de vapor, a diferença está apenas no modo como o fazem.

As bombas de calor são especialmente indicadas para a recuperação de calor residual, pois a fonte de calor residual funciona como “fonte fria”, como tal pode estar a uma temperatura relativamente baixa (inclusivamente pode ser negativa).

Este tipo de dispositivo permite a eletrificação do aquecimento tendo a vantagem de reduzir de forma significativa o consumo de combustíveis fósseis bem como a emissão de gases. No setor industrial é ainda mais evidente este facto, visto que, processos como secagem, lavagem, aquecimento ou refrigeração são grandes emissores de gases e consumidores de combustíveis fósseis.

No entanto, existem alguns entraves à implementação deste sistema, tais como: equipamentos ainda pouco acessíveis; dúvida na fiabilidade do sistema pelos utilizadores (que ainda não conhecem bem estes sistemas). Por outro lado, este tipo de bombas apresenta elevado coeficiente de performance (COP - coefficient of performance), relativamente baixo custo de investimento e alta duração de operação. O COP da bomba indica a sua eficiência energética. É a razão entre a energia transportada por um determinado sistema, Q , e o trabalho realizado pelo sistema, W , para que tal ocorra.

Apresenta-se na *Figura 2.8* um esquema do ciclo termodinâmico de compressão-expansão, segundo o qual funcionam as bombas de calor. A base deste ciclo assenta no facto de que quando se comprime um fluido (seja líquido ou gás) ele aumenta de pressão e aquece, e quando se expande um fluido ele diminui de pressão e arrefece. Este ciclo utiliza um fluido de trabalho, designado refrigerante, o qual retira calor da fonte fria, associada ao evaporador, e fornece calor à fonte quente, associada ao condensador.

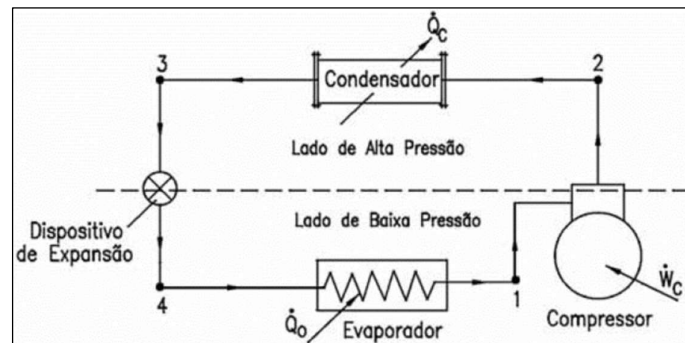


Figura 2.8 – Esquema do ciclo termodinâmico de compressão-expansão. Fonte: [20]

Segundo o esquema da figura, o fluido circula no sentido direto (ou seja, contrário aos ponteiros do relógio). No Ponto 1 o fluido refrigerante está no estado de vapor, a baixa pressão e a baixa temperatura (a uma temperatura ligeiramente abaixo da fonte fria (T_o)). O Compressor comprime o vapor, pelo que no Ponto 2 o fluido mantém-se no estado de vapor, mas a alta pressão e a alta temperatura (a uma temperatura superior à da fonte quente (T_c)). Neste processo o Compressor consome a quantidade de energia elétrica W_c . Ao passar pelo Condensador, o fluido perde a quantidade de calor Q_c para a fonte quente, o que faz com que ele condense. Deste modo, no Ponto 3 o fluido está no estado líquido, a alta pressão e a uma temperatura ligeiramente superior à da fonte quente. Agora, ao passar pelo Dispositivo de expansão, o fluido expande, o que faz com que ele arrefeça substancialmente (processo de expansão adiabática). Assim, no Ponto 4, o fluido está no estado líquido, a baixa pressão e a baixa temperatura (a uma temperatura inferior à da

fonte fria). Assim, ao passar pelo Evaporador, o fluido retira a quantidade de calor Q_o à fonte fria, o que faz com que ele evapore. Deste modo, no Ponto 1 o fluido refrigerante está no estado de vapor, a baixa pressão e a uma temperatura ligeiramente abaixo da fonte fria. No ciclo de compressão-expansão teórico ideal: $Q_c = Q_o + W_c$.

2.3 Aplicabilidade dos Sistemas de Recuperação de Calor Residual

É de interesse verificar que nem todas as tecnologias de recuperação de calor são indicadas para todos os tipos de aplicações industriais. Para um determinado sistema poder ser implementado num contexto industrial, por exemplo, deve ter-se em conta diversos fatores que podem definir o sucesso da implementação ou não. Fatores como a temperatura, o tamanho do sistema e o custo de aquisição, são importantes para perceber se um sistema é o indicado para o projeto em questão.

Apresenta-se na Tabela 2.1 um quadro resumo com as diversas tecnologias passíveis de serem implementadas, bem como as suas vantagens e desvantagens, para diferentes gamas de temperatura (alta, média ou baixa). Na gama de temperatura baixa ($< 230^\circ\text{C}$), é possível ainda dividir em várias subcategorias [21].

Barreiras à implementação de projetos de recuperação de calor residual

Existem diversas barreiras à implementação de sistemas de recuperação de calor residual, tais como, custos de materiais elevados, baixas temperaturas das fontes de calor residual ou mesmo a complexidade destes sistemas.

Do ponto de vista económico, um dos fatores mais importantes a estudar na implementação deste tipo de projetos, existem diversas barreiras a considerar. Uma delas é o risco associado ao investimento, devido à flutuação do mercado e também da natureza do negócio. O custo elevado dos materiais é também um fator decisivo, visto que pode levar à inviabilização da implementação de sistemas deste género. Quando o custo de energia recuperável é baixo, em comparação com o investimento de um sistema deste tipo, a viabilidade financeira do projeto é fortemente degradada. Levando muito tempo para que os custos de investimento sejam compensados pelos ganhos da energia recuperada.

Tabela 2.1 - Classificação de temperatura de fontes de calor residual e oportunidades de recuperação. Fonte: [21].

Temp Range	Example Sources	Temp (°F)	Temp (°C)	Advantages	Disadvantages/ Barriers	Typical Recovery Methods/ Technologies	
High >1,200°F [> 650°C]	Nickel refining furnace	2,500-3,000	1,370-1,650	High-quality energy, available for a diverse range of end-uses with varying temperature requirements	High temperature creates increased thermal stresses on heat exchange materials	Combustion air preheat	
	Steel electric arc furnace	2,500-3,000	1,370-1,650			Steam generation for process heating or for mechanical/electrical work	
	Basic oxygen furnace	2,200	1,200				
	Copper refining furnace	Aluminum reverberatory furnace	2,000-2,200	1,100-1,200	High-efficiency power generation	Increased chemical activity/corrosion	Furnace load preheating
		Copper refining furnace	1,400-1,500	760-820			
		Steel heating furnace	1,700-1,900	930-1,040	High heat transfer rate per unit area		Transfer to med-low temperature processes
		Copper reverberatory furnace	1,650-2,000	900-1,090			
		Hydrogen plants	1,200-1,800	650-980			
		Fume incinerators	1,200-2,600	650-1,430			
		Glass melting furnace	2,400-2,800	1,300-1,540			
Coke oven		1,200-1,800	650-1,000				
Iron cupola	1,500-1,800	820-980					
Medium 450-1,200°F [230-650°C]	Steam boiler exhaust	450-900	230-480	More compatible with heat exchanger materials		Combustion air preheat	
	Gas turbine exhaust	700-1,000	370-540	Practical for power generation		Steam power generation	
	Reciprocating engine exhaust	600-1,100	320-590			Organic Rankine cycle for power generation	
	Heat treating furnace	800-1,200	430-650			Furnace load preheating, feedwater preheating	
	Drying & baking ovens	450-1,100	230-590			Transfer to low-temperature processes	
Cement kiln	840-1,150	450-620			Space heating		
Low <450°F [<230°C]	Exhaust gases exiting recovery devices in gas-fired boilers, ethylene furnaces, etc.	150-450	70-230	Large quantities of low-temperature heat contained in numerous product streams.	Few end uses for low-temperature heat	Domestic water heating	
	Process steam condensate	130-190	50-90			Low-efficiency power generation	Upgrading via a heat pump to increase temp for end use
	Cooling water from:				For combustion exhausts, low-temperature heat recovery is impractical due to acidic condensation and heat exchanger corrosion	Organic Rankine cycle	
	furnace doors	90-130	30-50				
	annealing furnaces	150-450	70-230				
	air compressors	80-120	30-50				
	internal combustion engines	150-250	70-120				
	air conditioning and refrigeration condensers	90-110	30-40				
	Drying, baking, and curing ovens	200-450	90-230				
Hot processed liquids/solids	90-450	30-230					

Do ponto de vista das fontes, existem também diversos fatores que podem representar barreiras. A corrosão é um exemplo, podendo ser causada por fontes corrosivas tais como: gases (ex.: dióxido de enxofre) que podem ser corrosivos e provocar danos nos componentes do sistema; impurezas (ex.: minerais dissolvidos) podem também aumentar a corrosão. Para evitar a corrosão nestes sistemas é importante utilizar materiais mais resistentes à corrosão, como aço inoxidável ou cobre revestido, embora conduza a um aumento do investimento. Outro fator é a baixa temperatura das fontes que podem afetar a eficiência e o desempenho do sistema de diversas formas, tais como:

- Diminuição da eficiência: a baixa temperatura do fluido pode diminuir a eficiência do sistema;
- Dificuldade acrescida na transferência de calor: como referido anteriormente quanto maior a diferença de temperatura entre as fontes, maior será a eficiência de transferência de calor. Desta forma, se a temperatura da fonte é baixa, então a transferência de calor poderá ser menos eficiente;

- Requisição de energia adicional: um sistema de recuperação de calor que opera com baixa temperatura das fontes poderá requerer energia adicional para elevar a temperatura para um nível que permita o bom funcionamento do sistema ou cumprir os requisitos de uma aplicação específica.

A complexidade do sistema de recuperação de calor residual é também um fator determinante para decisão de implementação deste tipo de projetos. Esta depende de vários fatores, tais como, o tamanho do sistema, o tipo de tecnologia utilizada ou mesmo a eficiência energética desejada.

Alguns sistemas podem ser relativamente simples, como um sistema de permutadores de calor com uma única entrada e saída, enquanto outros podem ser muito complexos, envolvendo vários componentes interconectados e sistemas de controlo avançados. Para além disso, a complexidade também pode ser influenciada pela necessidade de integração com outros sistemas, como sistemas de aquecimento, refrigeração ou ventilação.

Em geral, quanto mais complexo for o sistema, mais tempo e recursos serão necessários para a instalação e manutenção. No entanto, a complexidade de um sistema de recuperação de calor residual pode ser compensada pela sua capacidade de melhorar a eficiência energética e reduzir os custos com energia.

É importante avaliar cuidadosamente as vantagens e desvantagens antes de decidir qual o sistema de recuperação de calor residual que se irá implementar.

2.4 Casos de Sucesso na Recuperação de Calor

Dentro dos projetos de recuperação de calor, existem os que a respetiva implementação está massificada, como a instalação de economizadores nas caldeiras e outros que, por sua vez, a implementação é mais invulgar, como por exemplo, no caso em que as fontes de calor são mais difíceis de trabalhar ou no caso em que as tecnologias que permitem essa recuperação sejam muito onerosas face ao custo da energia recuperável, como é o caso de estudo desta tese de mestrado.

O fator crítico da viabilidade destes projetos, passa pelo engenho na combinação de tecnologias com a melhor integração nos processos onde se integrará o respetivo calor recuperado. Neste capítulo listam-se alguns projetos de recuperação de calor residual.

(i) Recuperação de calor de efluente de Fábrica de Pasta e Papel na Finlândia

A UPM-Kymmene Kaukas Mill, na Finlândia é o maior grupo da indústria florestal da Europa e um dos maiores fabricantes de papel do mundo, produzindo anualmente 590 mil toneladas de papel LWC (leve revestido) e 720 mil toneladas de celulose branqueada [22]. Foi instalado, nesta empresa, um sistema de recuperação de calor inovador com permutadores de calor de placas específicos para a corrente em questão.

Este sistema permite recuperar calor do processo de arrefecimento do efluente de cerca de 70-80°C até perto dos 40°C antes de seguir até à estação de tratamento de efluentes biológicos. Este arrefecimento é necessário porque os micro-organismos não sobrevivem a temperaturas elevadas.

Segundo o autor os permutadores de placas Alfa Laval *WideGap*, desenvolvidos especificamente para a indústria de papel, celulose e açúcar, permitem o arrefecimento de efluentes que contenham fibras e outros componentes. Com grandes espaçamentos entre as placas, o padrão da placa e o seu design permitem que as partículas fluam facilmente, minimizando obstruções e maximizando o tempo de atividade. Devido ao fluxo de contracorrente elevado é possível aquecer a corrente fria a uma temperatura muito próxima da temperatura do fluxo da corrente quente, maximizando a recuperação de energia.

Este projeto possui algumas características similares ao caso de estudo a ser desenvolvido na Navigator.

(ii) Swep Company

A tecnologia ORC, associada aos permutadores de calor da SWEP e a geradores elétricos, está já a ser utilizada na Suécia, para transformar calor residual em energia elétrica. É um caso de sucesso visto a sua alta eficiência e baixa necessidade de manutenção. Neste sistema, desenhado por Againity (empresa especializada em sistemas ORC) e representado esquematicamente na, “o ORC utiliza o calor da caldeira, levando ao acionamento do condensador através da água de retorno da rede de aquecimento urbano” [23].

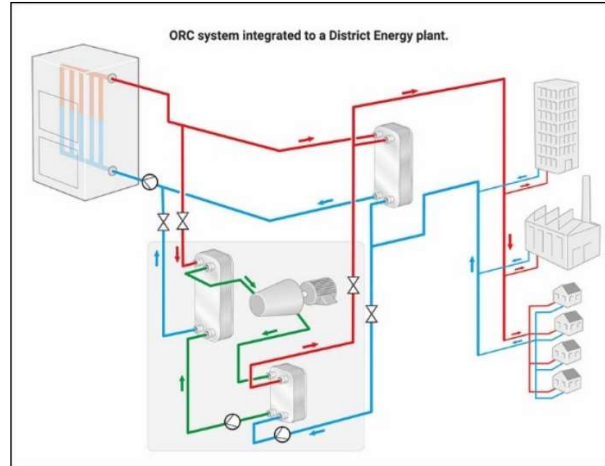


Figura 2.9 - Esquema do sistema integrado. Fonte: [23]

(iii) ArcelorMittal USA, Inc.

Numa fábrica de aço nos EUA foi instalada uma caldeira recuperativa por forma a recuperar o calor dos gases de exaustão dos fornos. Por sua vez, o calor recuperado produz vapor que alimenta turbogeradores que produzem eletricidade para alimentar cerca de 30 mil lares/ano e reduzir em 340 mil toneladas as emissões de CO₂. Estima-se que o projeto empregou 360 trabalhadores relacionados com o projeto, 200 trabalhadores de construção e, ao reduzir o custo de energia, ajuda a sustentar 5900 empregos associados à fábrica [24].

3. FONTES LÍQUIDAS DE CALOR RESIDUAL

3.1 Identificação e Caracterização de Fontes Líquidas de Calor Residual

Apresenta-se na Figura 3.1 a indicação da localização das fontes líquidas de calor residual no complexo industrial, localizado na Figueira da Foz, da empresa “The Navigator Company”. De notar que, o tamanho das setas (usadas para a identificação da fonte de calor) corresponde ao potencial de recuperação de calor presente nessa fonte.

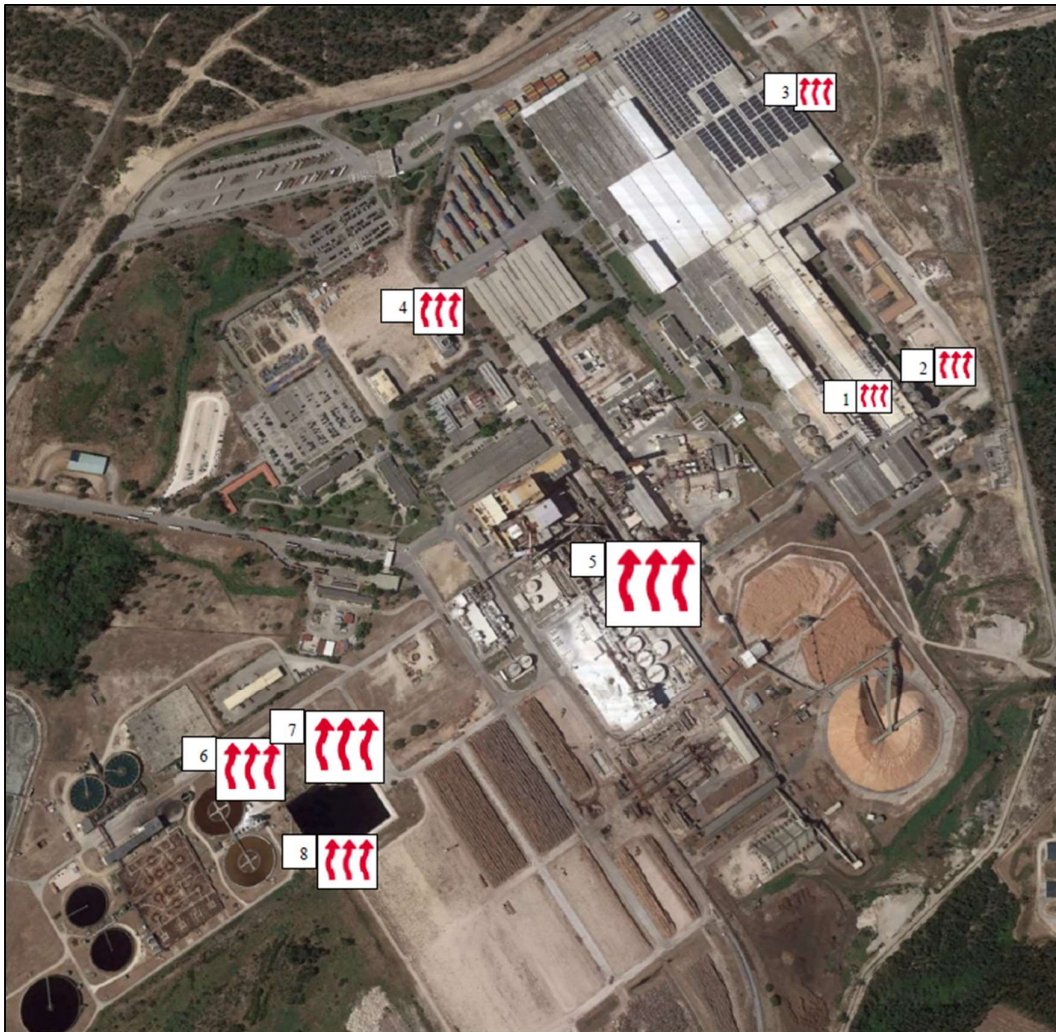


Figura 3.1 - Identificação das fontes líquidas de calor residual

- **Quantidade de calor**

Para o cálculo da quantidade de calor sensível, Q_s , foi utilizada a expressão apresentada de seguida, equação (3.1). De notar que, nesta situação não ocorre mudança de estado da substância.

$$Q_s = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

sendo as grandezas apresentadas na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 – Unidades SI das grandezas utilizadas

Grandeza	Unidades do Sistema Internacional	Significado
Potência térmica (Q)	Watts [W]	Potência térmica associada a um processo físico
Caudal mássico (m)	Quilogramas por segundo [kg/s]	Caudal mássico de substância
Calor específico (c_p)	Joules por quilograma e grau Kelvin $[\frac{J}{Kg \cdot K}]$	Calor específico é a quantidade de calor (Q) a fornecer para elevar um Kelvin (K) a um Kg de substância
Diferença de Temperatura (ΔT)	Grau Kelvin (K)	Variação da temperatura do fluido entre a situação inicial (T_i) e a situação final (T_f) [$\Delta T = T_f - T_i$]

O calor associado a uma mudança de fase duma substância (Q_L) é representado pela expressão:

$$Q_L = m \cdot L \quad (3.2)$$

onde L representa a entalpia específica dessa mudança de fase dessa substância (pode ser consultada numa tabela de calores latentes) [em J/kg].

Na Tabela 3.2 apresentam-se os dados que caracterizam as diversas fontes líquidas de calor residual assinaladas na Figura 3.1. Nela podemos verificar qual a fonte de calor que corresponde à numeração que consta na figura, bem como a temperatura da fonte residual, o potencial de calor (em uma temperatura de referência de 25°C), o caudal volúmico de fluido residual (está e

também algumas características físico-químicas (apenas dos efluentes). De notar que, as torres de refrigeração identificadas na tabela correspondem à circulação de água para essas torres.

Tabela 3.2 - Caracterização das fontes líquidas de calor residual

Número	Fonte de Calor	Temperatura da Fonte (°C)	Caudal (m ³ /h)	Potência de Calor (kW) <i>T_{ref} = 25°C</i>	Caraterísticas Físico-Químicas
1	Torre de Refrigeração da PM1 (Máquina de Papel 1)	26	720	837	-
2	Torre de Refrigeração da PM2 (Máquina de Papel 2)	29	742	3 449	-
3	Torre de Refrigeração do chiller de transformação	26	432	502	-
4	Torre de Refrigeração da TG4	23	2 207	5 130	-
5	Torre de Refrigeração Geral (Evaporação)	45	2 270	52 765	-
6	Efluente Ácido	55	790	27 545	pH baixo (2,49) / presença de fibra
7	Efluente Alcalino	55	1 062	37 028	pH elevado (9,8) / presença de fibra
8	Efluente de baixo COD (carência química de oxigénio)	40	1 156	20 153	pH = 8,18
Total	-	-	-	147 409	-

A potência total de calor obtida na Tabela 3.2 foi de, aproximadamente, 147 MW ao que corresponde **1253 GWh/ano** de energia, contando com 8500 horas anuais de trabalho. Não foram contabilizadas 8760 horas (número de horas num ano) devido a paragens programadas no complexo industrial. Para perceber melhor a quantidade de energia que é possível recuperar, foi feita correspondência para uma situação do quotidiano, neste caso o número de banhos que seria

possível tomar com esta energia. Assumindo valores médios de 10 minutos de duração, 120 litros de água e 3 kWh de energia por cada banho [25], seria possível tomar cerca de **420 milhões de banhos por ano** usando esta energia. É suficiente para a **população do país inteiro** tomar banho durante cerca de **um mês e meio**.

Considerando apenas as fontes de **efluente líquido** (ácido, alcalino e de baixo COD) temos cerca de 85 MW de potência que representam **720 GWh/ano** de energia.

Podemos verificar na Tabela 3.2 que os efluentes (números 6, 7 e 8) apresentam temperaturas mais elevadas que as torres de refrigeração (em geral), levando a que tenham um potencial de recuperação mais elevado, com exceção da torre de refrigeração geral.

Este esquema de identificação de fontes líquidas de calor residual e respetiva caracterização, numa primeira abordagem, permite perceber onde existe maior calor disponível para recuperação e também verificar a viabilidade de recuperação de calor de determinadas fontes (espaço disponível para instalação de equipamentos, estruturas necessárias, etc.).

3.2 Origem das Fontes Líquidas de Calor Residual

Esta seção descreve, de forma sucinta, a origem das diversas fontes líquidas de calor residual. Para isso, recorre-se à Tabela 3.2, mais precisamente à numeração utilizada para descrever a sua origem.

- Números 1 e 2 – As torres de refrigeração das máquinas de papel 1 e 2 servem para refrigeração dos equipamentos necessários para o processo de produção, secagem e corte do papel. Nestas torres, o ar é aspirado através da torre de arrefecimento em contracorrente com a água quente que circula por ela;
- Número 3 – Esta torre de refrigeração serve para refrigeração de um chiller existente na fábrica de papel 2 do complexo industrial;
- Número 4 – Torre de refrigeração que serve de refrigeração à TG4. A TG4, nomenclatura interna, é uma central de cogeração, com instalação de um gerador com potência de 71,4 MW, acionado por uma turbina a vapor. O combustível utilizado é composto por biomassa florestal e licor negro;
- Número 5 – Torre de refrigeração geral, a com maior energia para potencial recuperação de todas as torres de refrigeração presentes no complexo industrial. O sistema consiste na evaporação de água para arrefecimento. Esta torre de refrigeração concentra diversos

caudais de diversas pequenas fontes de água quente a 45°C. Por esta razão, é do interesse deste trabalho, estudar a possível recuperação desta energia e também para gerar poupança proveniente da redução dos custos associados ao seu funcionamento;

- Número 6 – O efluente ácido é proveniente da fábrica de pasta, maioritariamente dos processos de branqueamento e tiragem da pasta. É armazenado num tanque específico para efluente ácido. No entanto, a grande maioria deste efluente segue, através de uma bomba, para o tratamento de efluentes (em conjugação com lamas alcalinas);
- Número 7 – O efluente alcalino tem origem nos processos associados à fábrica de pasta, maioritariamente da linha de pasta e de branqueamento alcalino. Uma parte reduzida é enviada para a área de preparação de madeiras, para o processo de lavagem da rolaria. No entanto, o excedente segue, também, para o tratamento de efluentes;
- Número 8 – O efluente de baixo teor de COD (carência química de oxigénio) tem origem nas máquinas de papel (PM1 e PM2), na sua maioria. Resulta dos processos de produção de papel, nomeadamente da secagem. A pasta produzida na fábrica é transportada em forma líquida até às fábricas de papel, onde é feita extração de água de até cerca de 80%, sendo que essa água resulta no efluente que estas máquinas originam.

3.3 Tratamento de Efluentes

Esta secção apresenta uma breve descrição do processo do tratamento de efluentes porque, para além de ser uma das possíveis fontes de calor residual a recuperar, é uma das mais complexas em termos de processos. Pretende-se também explicar porque é tão importante o tratamento de efluentes para o processo de descarga dos efluentes no mar.

- **Caraterização:**

Os atributos geralmente utilizados para caraterizar um meio recetor de descargas de efluentes (mar, rio, ...) são: oxigénio dissolvido (essencial para a sobrevivência dos peixes, mas também de micro-organismos “valiosos”, incluindo os responsáveis pela biodegradação dos efluentes), pH, toxicidade, sólidos suspensos, temperatura, espuma, sabor, odor.

- **Poluição na indústria de pasta e papel:**

A poluição neste tipo de indústria consiste principalmente em: sólidos suspensos, toxicidade, cor e carência bioquímica de oxigénio. De notar que os esforços aplicados na redução de poluição incidem nos sólidos suspensos e na falta de oxigénio.

- **Redução do desperdício:**

Uma das principais formas de atacar o problema da redução das descargas de poluentes é a redução do consumo de água (para além da redução de perda de produtos químicos, de fibras, sólidos suspensos, etc.).

Juntando este fator ambiental com o impacto económico que estes tratamentos têm na empresa, torna-se mais importante que exista aproveitamento das fontes (neste caso, a água) ao máximo antes que se faça a descarga no mar. Já existe algum aproveitamento no complexo industrial em apreço (unidade da Figueira da Foz da “The Navigator Company”), onde se faz a recirculação de algumas correntes de água para áreas fabris, nomeadamente para a preparação de madeiras e para o forno da cal.

Na Figura 3.2 apresenta-se um esquema das diversas fontes do complexo fabril que “contribuem” com efluentes líquidos para a estação/zona de tratamento (retirado de documentos internos). Nele, consegue-se perceber de onde provém os contribuidores para os efluentes de baixo COD, alcalino e ácido. Apesar de existirem diversos pontos de geração de efluentes, estes estão conectados e seguem em condutas subterrâneas até à zona do tratamento de efluentes assinalado na Figura 3.1 com os números 6,7 e 8. Desta forma, é muito difícil, neste complexo industrial, utilizar apenas uma fonte de um determinado efluente que tenha mais interesse para o estudo, apesar de se ter equacionado esse ponto.

- **Tratamento secundário/biológico:**

É do interesse explicar, ainda que de forma pouco detalhada, este tratamento porque está inserido no processo do tratamento de efluentes e será útil para algumas técnicas de recuperação de calor apresentadas no capítulo seguinte.

O sistema de tratamento destes efluentes é constituído por uma torre de refrigeração, por um seletor, por duas bacias de arejamento e por três sedimentadores secundários. Este tratamento funciona por lamas ativadas (bactérias). Existe um canal de lamas que são recirculadas (onde se inserem nutrientes para o metabolismo das bactérias, como fósforo e azoto). A torre de arrefecimento faz a redução na temperatura do efluente. As bacias de arejamento do tipo seletor proporcionam uma mistura eficaz entre o efluente e as lamas recirculadas e evitam o transbordo de sólidos suspensos nos sedimentadores secundários. O seletor e as bacias de arejamento podem ser considerados como um reator biológico, onde as bactérias utilizam a matéria orgânica

dissolvida no efluente como fonte de alimentação, degradando-a e utilizando-a no seu metabolismo, conseguindo uma redução de cerca de 80% de CBO no processo. O efluente é então enviado para sedimentares secundários, onde ocorre floculação e sedimentação das lamas biológicas (tratadas noutra fase posterior).

Na entrada da torre de refrigeração (TR) dos efluentes é importante caracterizar os seguintes parâmetros, para os ter em consideração nas técnicas apresentadas no capítulo seguinte:

- pH – O valor do pH situa-se entre 6.0-8.0, porque é nesta gama que os microorganismos subsistem com interesse sob o ponto de vista do tratamento secundário/biológico.
- Temperatura – À saída da TR (que apenas faz arrefecimento do efluente, não tendo qualquer influência no pH do mesmo) o efluente não deve ultrapassar os 35-40°C para permitir o bom funcionamento do tratamento secundário/biológico).

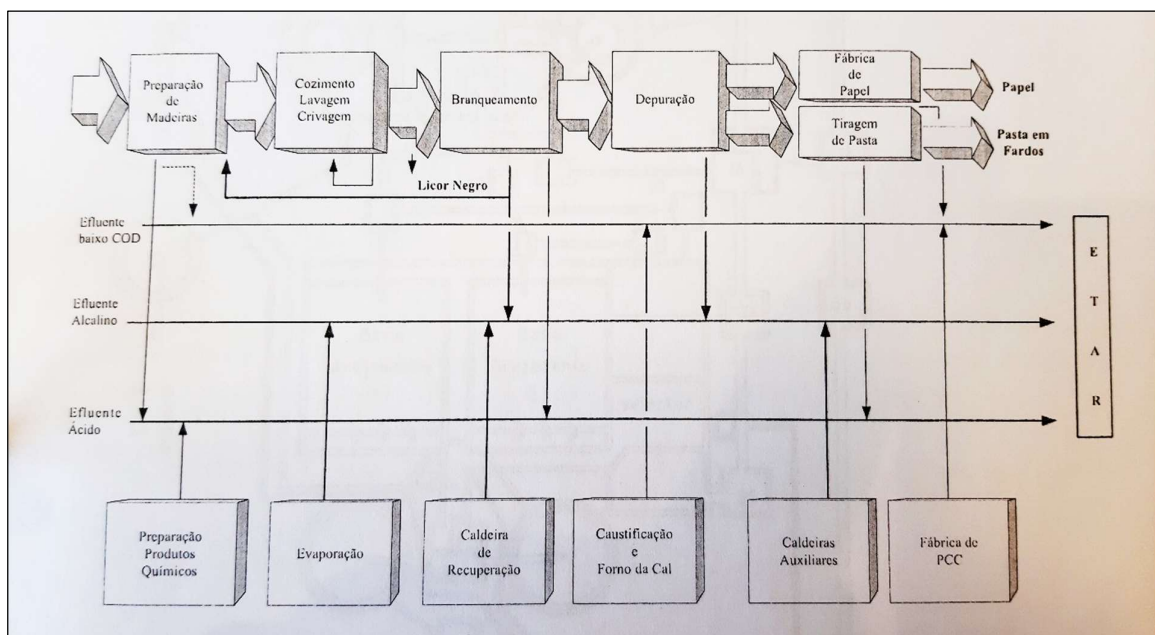


Figura 3.2 - Segregação dos efluentes líquidos para ETAR

Devido à composição química dos diversos efluentes, nomeadamente o pH bastante ácido ou alcalino, existia o problema dos equipamentos a utilizar nas diversas técnicas poderem sofrer de corrosão e não resistirem. Nesse caso, seriam necessários equipamentos mais resistentes à corrosão. Para solucionar este problema, estudou-se o circuito dos efluentes a pormenor e percebeu-se que, imediatamente antes da torre de refrigeração dos efluentes (e após os pontos assinalados na Figura 3.1 com os números 6,7 e 8), os diversos efluentes são misturados. Nesta

mistura descobrimos que o pH é muito próximo do ideal (cerca de 6,23). No entanto, neste ponto, e porque os efluentes não tinham todos a mesma temperatura, esta mistura “perde alguma temperatura” face à temperatura dos efluentes ácido e alcalino, tendo aqui cerca de **47°C**.

Apesar de a temperatura ser menor e, por isso, ter menor quantidade de calor, é preferencial utilizar neste ponto porque deixa de ter a problemática devida ao valor do pH.

3.4 Custo do Funcionamento da Torre de Refrigeração Geral

Neste ponto são apresentados os custos que a torre de refrigeração geral tem na empresa. É do interesse do presente trabalho estudar os custos que o funcionamento normal da torre enunciada tem na empresa, por forma a poder contabilizá-lo na análise económica das soluções em que esta está inserida. Desta forma, as soluções apresentadas neste estudo, onde é feita a recuperação de energia desta torre, irão incluir estes custos para aumentar a viabilidade dessas soluções, visto que ao fazer a recuperação dessa energia, deixa de ser necessário refrigerar a água que por ela passa.

Para poder fazer a estimativa deste custo, foram considerados todos os equipamentos necessários para a refrigeração (que apresentam consumo de energia elétrica, para poder estimar os gastos energéticos).

Abaixo, na Tabela 3.3, encontra-se uma tabela com a lista de equipamentos que compõem a torre de refrigeração geral e que apresentam gastos energéticos para o seu funcionamento.

Existem cinco motores/ bombas nesta torre de refrigeração, sendo que três deles têm uma potência nominal de 200 kW, um de 132kW e outro de 110kW.

Os restantes equipamentos a considerar são quatro ventiladores, neste caso, todos eles com potência nominal de 110 kW.

No entanto, na maioria do tempo, estes equipamentos não se encontram no máximo do seu potencial de funcionamento. É natural que nos meses de verão estes estejam a funcionar com maior potência que nos meses de inverno, especialmente os ventiladores. Também podem ocorrer situações de maior potência quando existe maior caudal a circular pela torre (quando alguma parte da fábrica se encontra em mau funcionamento e existe maior caudal para esta e outras torres). Estes são alguns exemplos de situações que mostram a volatilidade deste aspeto (potência variável).

Tabela 3.3 - Lista de equipamentos da torre de refrigeração geral

Equipamento	Potência (kW)	% útil	Potência útil (kW)
Motores:			
Motor 1	200	65%	130
Motor 2	200	65%	130
Motor 3	200	65%	130
Motor 4	132	65%	85,8
Motor 5	110	65%	71,5
Ventiladores:			
Ventilador 1	110	75%	82,5
Ventilador 2	110	75%	82,5
Ventilador 3	110	75%	82,5
Ventilador 4	110	75%	82,5
Total			877,3

Por forma a poder fazer uma melhor estimativa da potência destes equipamentos e, consequentemente do seu consumo energético, fizemos medições nos diversos equipamentos para perceber com que potência cada um se encontrava a funcionar. Alguns deles encontram-se monitorizados pelo sistema interno e, por isso, conseguimos perceber, em tempo real, o seu consumo. Para estes casos, retirámos do sistema interno um valor médio da potência do equipamento nos últimos 120 dias, para ter uma vasta gama de valores e perceber de que forma a potência variava em diferentes alturas do ano. Nos restantes equipamentos, que não estão monitorizados pelo sistema interno, fizemos uma medição física junto dos equipamentos com um sistema que permite obter a potência do equipamento, tendo as suas características padrões e analisando a rotação dos motores ou ventoinhas num determinado espaço temporal. Esta medição foi feita através da aplicação “KSB Sonolyzer” [26]. Com estas medições comparámos os resultados medidos com os indicados pelo sistema interno (no caso de bombas e/ou ventiladores de igual potência desenhada), por forma a perceber se os resultados da medição física estariam válidos e coerentes.

Com estes resultados, chegámos ao valor total de 877,3 kW de potência real consumida pelos equipamentos da torre de refrigeração. Sabendo que estes se encontram em funcionamento cerca de 8500h anuais conseguimos estimar o seu consumo, considerando um valor médio da energia elétrica de 80 €/MWh. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Custos de utilização de equipamentos da torre de refrigeração geral

Potência total de consumo (kW)	877,3
Horas de funcionamento (h/ano)	8 500
Consumo anual (kWh/ano)	7 457 050
Consumo anual (MWh/ano)	7 457,05
Custo da energia elétrica (€/MWh)	80
Custo de utilização (€/ano)	596 564

Como é possível verificar na Tabela 3.4, a utilização da torre de refrigeração geral representa um custo de cerca de 600 milhares de € por ano à empresa, mais especificamente 596 564 € por ano.

Eliminando este custo, é uma vantagem para a economia da empresa, mas também para aumentar a viabilidade das soluções de recuperação da energia desta torre (considerando o fator económico, decisivo para a sua implementação, mas também o fator ambiental da recuperação de energia que é desperdiçada nesta torre).

3.5 Custo do Funcionamento da Torre de Refrigeração dos Efluentes

Nesta seção, são apresentados os custos que a torre de refrigeração dos efluentes tem para a empresa, para posteriormente serem consideradas na análise económica das técnicas que incidem na recuperação de calor residual dos efluentes. De notar que os custos considerados são apenas do ponto de visto energético e não englobam aquisição ou manutenção dos equipamentos. As soluções propostas neste estudo, que implicam a recuperação de energia desta torre, irão ter em consideração estes custos, acabando por tornar essas soluções mais viáveis.

Para estimar este custo, todos os equipamentos necessários para a refrigeração foram tidos em consideração por forma a estudar a quantidade de energia consumida.

Na Tabela 3.5, encontra-se a lista dos equipamentos presentes na torre de refrigeração dos efluentes que representam consumo energético. Existem três motores/ bombas nesta torre de refrigeração, sendo que um deles tem uma potência nominal de 45 kW e os restantes de 55 kW. Os restantes equipamentos a considerar são dois ventiladores, ambos com uma potência nominal de 75 kW.

Tabela 3.5 - Lista de equipamentos da torre de refrigeração dos efluentes

Equipamento	Potência (kW)	% útil	Potência Útil (kW)
Motores:			
Motor 1	45	45%	20,3
Motor 2	55	58%	31,9
Motor 3	55	69%	38,0
Ventiladores:			
Ventilador 1	75	32,5%	24,8
Ventilador 2	75	41,5%	31,5
Total			145,6

Estes equipamentos não estão a operar a 100% durante grande parte do tempo, sendo estes valores bastantes voláteis. Por isso, fizemos a consulta dos dados do sistema interno de monitorização (nos equipamentos em que são feitos registos) e fez-se também a sua medição com recurso à aplicação “KSB Sonolyzer” [26]. Obtivemos uma potência total, consumida por esta torre de refrigeração, de 145,6 kW. Considerando um tempo de operação de 8500h anuais, estimou-se o seu consumo energético médio anual, e, a partir deste o seu custo de funcionamento. Estes resultados apresentam-se na Da **Erro! Autorreferência de marcador inválida.** percebemos que a utilização da torre de refrigeração dos efluentes representa um custo anual para a empresa de cerca de 100 mil € por ano, considerando um valor médio para a tarifa de energia elétrica de 80 €/MWh.

Tabela 3.6.

Da **Erro! Autorreferência de marcador inválida.** percebemos que a utilização da torre de refrigeração dos efluentes representa um custo anual para a empresa de cerca de 100 mil € por ano, considerando um valor médio para a tarifa de energia elétrica de 80 €/MWh.

Tabela 3.6 - Custos de utilização de equipamentos da torre de refrigeração dos efluentes

Potência total (kW)	145,6
Horas de funcionamento (h/ano)	8 500
Consumo anual (kWh/ano)	1 237 600
Consumo anual (MWh/ano)	1 237,6
Custo eletricidade (€/MWh)	80
Custo de utilização (€/ano)	99 008

Com a minimização deste custo, se possível, a empresa consegue baixar os custos de operação e também recuperar energia que, não só seria desperdiçada na sua totalidade, como ainda implica um custo acrescido para a desperdiçar.

Para além disto, ao ser possível recuperar energia e também recircular água, a empresa consegue diminuir o consumo de água do complexo industrial, o qual representa um volume diário avultado.

3.6 Custo da Produção de Vapor a Baixa Pressão

Os processos ocorridos no complexo industrial em apreço requerem quantidades assinaláveis de vapor de água a baixa pressão, o qual está atualmente a ser produzido com recurso a biomassa e a gás natural. No entanto, produzir vapor de água a baixa pressão a partir de biomassa e a partir de gás natural são duas abordagens diferentes, cada uma com as suas próprias características e custos associados.

3.6.1 Produção de vapor com recurso a biomassa

A geração de vapor com recurso a biomassa envolve a combustão controlada de materiais orgânicos, como resíduos agrícolas e florestais. Embora a biomassa seja uma fonte de energia renovável que ajuda a reduzir o desperdício, a sua disponibilidade pode ser variável e, no caso de escassez, torna-se necessário recorrer a outra fonte, como gás natural. O custo de geração de vapor a partir da biomassa inclui o custo de recolha e preparação da biomassa, além de custos

operacionais tais como com a caldeira. No entanto, esses custos podem ser parcialmente compensados por incentivos fiscais e programas de apoio às energias renováveis.

Teve-se acesso a um relatório interno da “The Navigator Company” em que consta uma estimativa bastante realista dos custos de geração de vapor de água a baixa pressão com recurso a biomassa. Segundo os dados internos da empresa, o custo marginal de produção de uma tonelada de vapor a biomassa é de aproximadamente 8 €/tonelada.

3.6.2 Produção de vapor com recurso a gás natural

A produção de vapor a partir de gás natural é baseada na queima do gás natural, que é uma energia fóssil. O gás natural é um combustível fóssil formado por uma mistura de hidrocarbonetos, tais como metano, etano, propano e butano. O gás natural é versátil e de queima relativamente limpa, quando comparado com outros combustíveis fósseis.

Segundo informação interna da empresa, para produzir uma tonelada de vapor de água a baixa pressão são gastos cerca de 30 €. Valor este que inclui os custos associados, à compra de gás natural e à taxa de CO₂ (taxa sobre as emissões de CO₂, sendo uma taxa de valor elevado a considerar [27]).

Ao comparar os custos de produção de vapor de água é importante considerar os preços relativos da biomassa e do gás natural, os quais podem ser bastante voláteis. De forma geral, e tendo em conta a situação da empresa, a biomassa é normalmente a melhor opção, devido à quantidade de biomassa utilizada pela fábrica de pasta e também pelo benefício ambiental.

4. TÉCNICAS PARA RECUPERAÇÃO DO CALOR RESIDUAL IDENTIFICADO

Após ser feita a identificação e consequente caracterização das fontes líquidas de calor residual, segue-se um estudo de possíveis aplicações para o calor residual identificado no capítulo anterior. Os sistemas de recuperação a analisar são agregados em função do destino a dar ao calor residual: (i) recuperação de calor para produção de energia elétrica; e (ii) recuperação de calor para aquecimento de líquidos.

4.1 Recuperação de Calor para Produção de Energia Elétrica

Para este sistema é necessário instalar uma bomba de calor (devido à baixa temperatura da fonte) e um Ciclo de Rankine Orgânico (ORC).

Com o uso de uma bomba de calor é possível aumentar a temperatura da nossa fonte de calor residual como, por exemplo, efluente líquido (que se encontra a 55°C, como é possível verificar na “Tabela 3.2 - Caracterização das fontes líquidas de calor residual” ou a 47°C no caso da mistura dos três efluentes, localizada num ponto mais afastado, como referido no capítulo 3). O caso estudado foi a mistura dos efluentes alcalino e ácido (com caudal de 835,56 kg/s, a 47°C e com pH= 6,2).

A adição da bomba-de-calor serve para aumentar a temperatura da fonte de calor para posteriormente ser aplicada num ORC e, desta forma, produzir energia elétrica.

Para esta aplicação é necessário estudar a bomba de calor e o ORC como um sistema conjunto. Nesta aplicação a fonte de calor residual a utilizar é o efluente líquido (num ponto do complexo industrial onde se encontra após tratamento biológico) a uma temperatura de cerca de 47°C. Desta forma é necessário estudar os custos associados à aquisição dos equipamentos, bem como do seu consumo energético. Por fim, é obtida a energia que se gera com este sistema para verificar a viabilidade económica do mesmo.

Um esquema ilustrativo deste sistema encontra-se representado na Figura 4.1 abaixo.

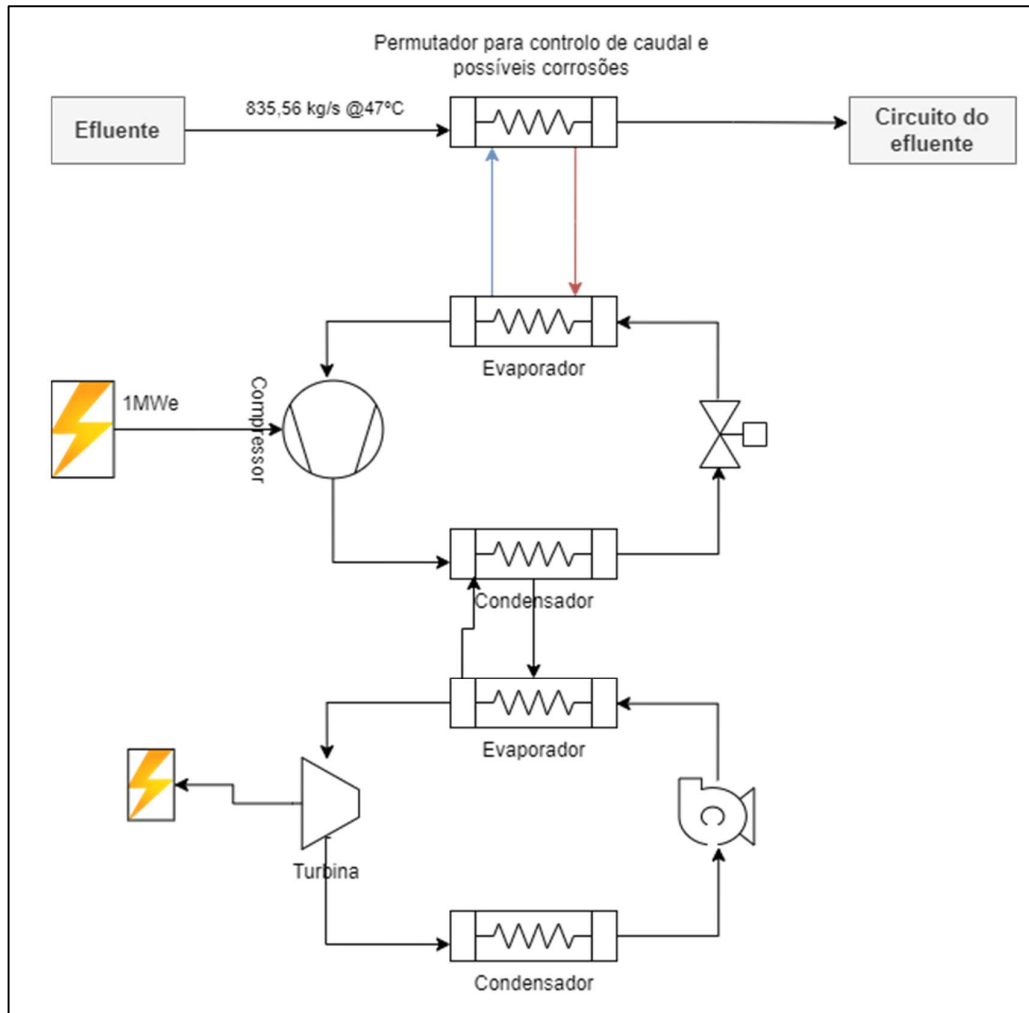


Figura 4.1 - Esquema da aplicação proposta de Bomba de Calor + ORC

- **Bomba de Calor (BC)**

O primeiro equipamento necessário para este sistema é uma bomba de calor. Esta bomba tem de cumprir determinados requisitos para que possa ser implementada no complexo fabril. Desta forma, é necessária uma bomba de calor industrial água-água que tenha capacidade para temperatura de água quente de entrada de 47°C e que permita aquecer o seu fluido de trabalho até uma temperatura de, pelo menos, 80 °C, de modo a ser suficiente para evaporar o fluido orgânico do ciclo de Rankine. Na Figura 4.2 apresenta-se um exemplo de uma bomba de calor industrial, mais especificamente da série *Siemens SHP-C600*. Nesta série existem bombas de calor com potências nominais entre 15 e 30 MW e com capacidade para elevar a temperatura do seu fluido de trabalho (o seu refrigerante) até cerca de 90 °C.



Figura 4.2 - Exemplo de bomba de calor. Siemens SHP-C600

Segundo os dados que foram obtidos junto de entidades fornecedoras, conseguimos perceber que:

- Custo de aquisição da bomba: cerca de 1,2 M€/MW_{th};
- COP nominal (aproximado): 4,1.

Desta forma, uma bomba com potência de 1MW_{th} consome aproximadamente 2,07 GWh/ano de energia elétrica considerando 8500h de operação anual (padrão) e o COP de 4,1 referido acima. Assim sendo, fornece aproximadamente 8,5 GWh/ano de energia térmica. Esta energia térmica é então fornecida ao ciclo orgânico de Rankine para produção de energia elétrica.

- **Ciclo Orgânico de Rankine (ORC)**

O passo seguinte é a implementação do ORC para a produção de energia elétrica. Na Figura 4.3 representa-se um ORC modelo *ENO-100LT* [28]. Este sistema de ORC requer uma temperatura da fonte quente (no evaporador) de pelo menos 70 °C e consegue absorver uma potência térmica ligeiramente superior a 1 MW.

Segundo os dados que foram obtidos junto de entidades fornecedoras, conseguimos perceber que:

- Custo aproximado de 2 000€ por kW de potência elétrica produzida;
 - Um ORC de 1MWe tem um custo de cerca de 2 M€;
- Rendimento: aproximadamente 16 % (ver Figura 4.4). Atualmente já é possível conseguir um rendimento superior.

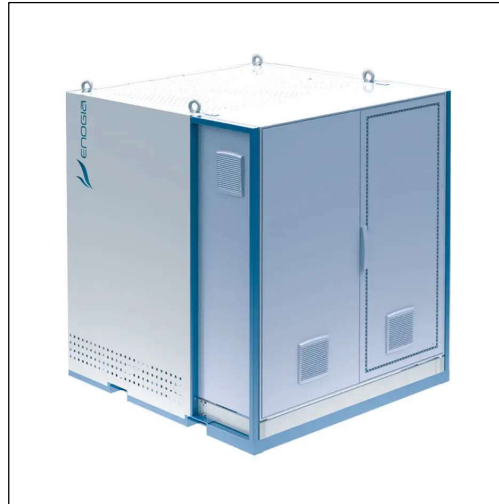


Figura 4.3 - ORC ENO-100LT. Fonte: [28]

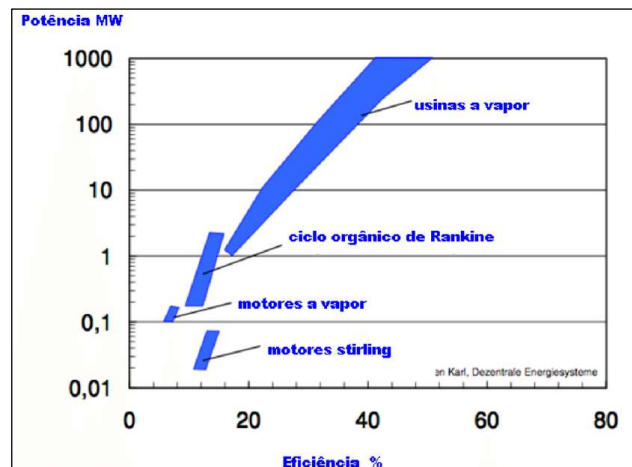


Figura 4.4 - Gráfico de potência (em MW) em função da eficiência do ORC (em %). Fonte: [29]

Apresentam-se na Tabela 4.1 os dados de produtividade do sistema ORC considerado (ENO-100LT).

Tabela 4.1 – Produtividade do sistema ORC considerado (ENO-100LT).

Energia térmica consumida [MWh/ano]	Energia elétrica gerada [MWh/ano]	Rendimento (%)
8500	1360	16

- **Estudo económico (Preliminar)**

Apresentam-se na Tabela 4.2 os resultados obtidos recorrendo a uma análise preliminar da viabilidade económica do investimento neste sistema de recuperação do calor residual dos efluentes líquidos. Nesta tabela apresentam-se os valores obtidos para o CAPEX – Despesas de capital (o capital a investir), o VAL – Valor atualizado líquido, a TIR – Taxa interna de rentabilidade, e o PR – período de retorno do investimento. Para esta simulação considerou-se um período de vida útil do sistema de 20 anos, e uma tarifa de venda da energia elétrica produzida de 80 €/MWh.

Tabela 4.2 - Resultados económicos da técnica 4.1

CAPEX = 3,2 M€
VAL (20 anos) = -2,3 M€
TIR = - 8,8 %/ano
PR = -- anos

Podemos verificar que os resultados não são, de todo, favoráveis à implementação do sistema preconizado. Apesar de existir o benefício da redução do impacto ambiental pela recuperação de calor residual, este sistema não configura um bom investimento do ponto de vista económico. Todos os parâmetros indicadores de viabilidade económica são desfavoráveis, pois o VAL e a TIR são negativos e o PR não existe. Ou seja, nunca se consegue atingir a recuperação do capital investido na sua vida útil.

A não existência de um PR é a consequência de o balanço energético global do sistema ser inferior à unidade ($4,1 \times 0,16 = 0,656$), sendo prejudicial para a viabilidade do mesmo, ainda mais se tivermos em conta que é um sistema que custa cerca de 3,2 milhões de euros.

É espetável que, para não perder energia, o COP da bomba e o rendimento do ORC devem, pelo menos, “anularem-se”. Por exemplo, para um COP da bomba-de-calor (BC) de 4, o rendimento do equipamento de ORC devia ser de pelo menos 25%, para que a energia consumida pela BC fosse igual ou inferior à produzida no ciclo. Ainda assim, ter-se-ia um resultado económico negativo, inerente aos custos de aquisição dos equipamentos.

No entanto, apesar deste resultado ser desfavorável à implementação do sistema preconizado, foi estudada a sua viabilidade técnica e económica.

No futuro, provavelmente não muito longe, com o avanço tecnológico e consequentes melhorias nos COP's das bombas-de-calor e também no rendimento dos ciclos ORC's talvez seja possível ou minimamente equacionável um sistema de produção de energia elétrica a partir de uma fonte de calor de "baixa temperatura", que é o principal entrave à sua viabilidade.

Para aferir a validade da afirmação anterior foi feita uma simulação tendo em conta esses desenvolvimentos ao nível dos rendimentos dos equipamentos. Considerando um COP para a bomba de calor de 6, e um rendimento do ciclo ORC de 25% já se consegue obter um balanço energético global do sistema superior à unidade, pois $6 \times 0,25 = 1,50$.

Fez-se uma análise de viabilidade económica mantendo o valor dos restantes parâmetros, tendo obtido os parâmetros indicadores da viabilidade económica apresentados na Tabela 4.3.

De notar que, para estes equipamentos mais específicos, espera-se que o CAPEX possa ser superior. Como esta análise é preliminar e tem como objetivo perceber a viabilidade dos sistemas, não é imprescindível que essa variação seja tida em conta na simulação.

Tabela 4.3 - Resultados económicos da técnica 4.1 com melhores condições de equipamentos

CAPEX = 3,2 M€
VAL (20 anos) = 96 k€
TIR = 1,9 %/ano
PR = 16,4 anos

Destes resultados, conseguimos perceber que o sistema já se tornaria minimamente rentável, embora não de forma satisfatória. Conseguir-se-ia uma TIR positiva, embora baixa, de quase 2%, e um VAL de cerca de 100 000€. Neste caso, o grande fator de variação é o período de retorno que é de 16 anos, dentro do tempo estimado de duração dos equipamentos. Mesmo assim, tal como indicado na bibliografia sobre análise de projetos de investimento [30], valores da TIR inferiores a 8%/ano indicam projetos com risco elevado, logo um projeto com uma TIR de 1,9%/ano apresenta um risco exageradamente elevado.

4.2 Recuperação de Calor para Aquecimento de Líquidos

Neste capítulo serão apresentadas diversas técnicas para recuperação de calor para aquecimento de água. No caso deste estudo, trata-se de um tanque de água desmineralizada, a qual deve ser mantida a uma temperatura próxima dos 35°C. Este é o tanque de água onde se pretende dissipar o calor que o complexo industrial dispõe nos vários pontos referenciados no capítulo 3.1. O interesse neste tanque em específico reside no facto de ser um tanque de grandes dimensões (com cerca de 180 m³ de volume), com água proveniente da desmineralização (por isso tem temperatura de 35°C e não cerca de 25°C da temperatura da água de reposição). A água deste tanque está constantemente a ser consumida por outro processo da fábrica que vai produzir vapor a 130°C. Se, com as técnicas apresentadas se conseguisse elevar a temperatura deste caudal de água, isso permitiria recuperar o calor que seria desperdiçado, mas também gerar poupança (do lado do aquecimento que também usa vapor no aquecimento, mas também poupança nas torres de refrigeração).

O caudal de água que passa por este tanque é de 100 t/h aproximadamente (ou 27,8 kg/s). O aquecimento deste caudal até à temperatura do tanque de desgaseificação de 130°C (desgaseificador utilizado para remoção de gases dissolvidos na água que é utilizada no processo de produção) representa uma potência térmica elevada. São 12,2 MW de potência (relativa à temperatura ambiente padrão de 25°C) ou então 15,9 t/h de vapor direto. São 11 MW de potência relativa à temperatura de 35°C da água do tanque (ou 14,4 t/h de vapor direto). Conseguem-se perceber, assim, que existe um potencial de recuperação de calor bastante interessante.

Tendo em conta a diferença de temperatura verificada nas fontes de calor, nomeadamente torres de refrigeração, foi considerada uma percentagem do valor do custo de utilização das torres de refrigeração nas diversas análises económicas.

4.2.1 Aquecimento do caudal de água desmineralizada com calor dos efluentes

Na Figura 4.5 apresenta-se um esquema representativo da aplicação proposta nesta seção. Com este sistema pretende-se recuperar o calor da mistura dos três efluentes (ácido, alcalino e de baixo COD) num ponto após os pontos 6, 7 e 8 (ver Figura 4.1) e antes da correspondente torre de arrefecimento. Ou seja, pretende-se utilizar o calor contido no caudal desta mistura de efluentes (835,56 kg/s a 47 °C) para aquecer o caudal de água que passa pelo tanque de água

desmineralizada (27,8 kg/s a 35°C). Para aumentar o diferencial de temperatura recorre-se a uma bomba-de-calor. Assim, far-se-ia um pré-aquecimento da água deste tanque.

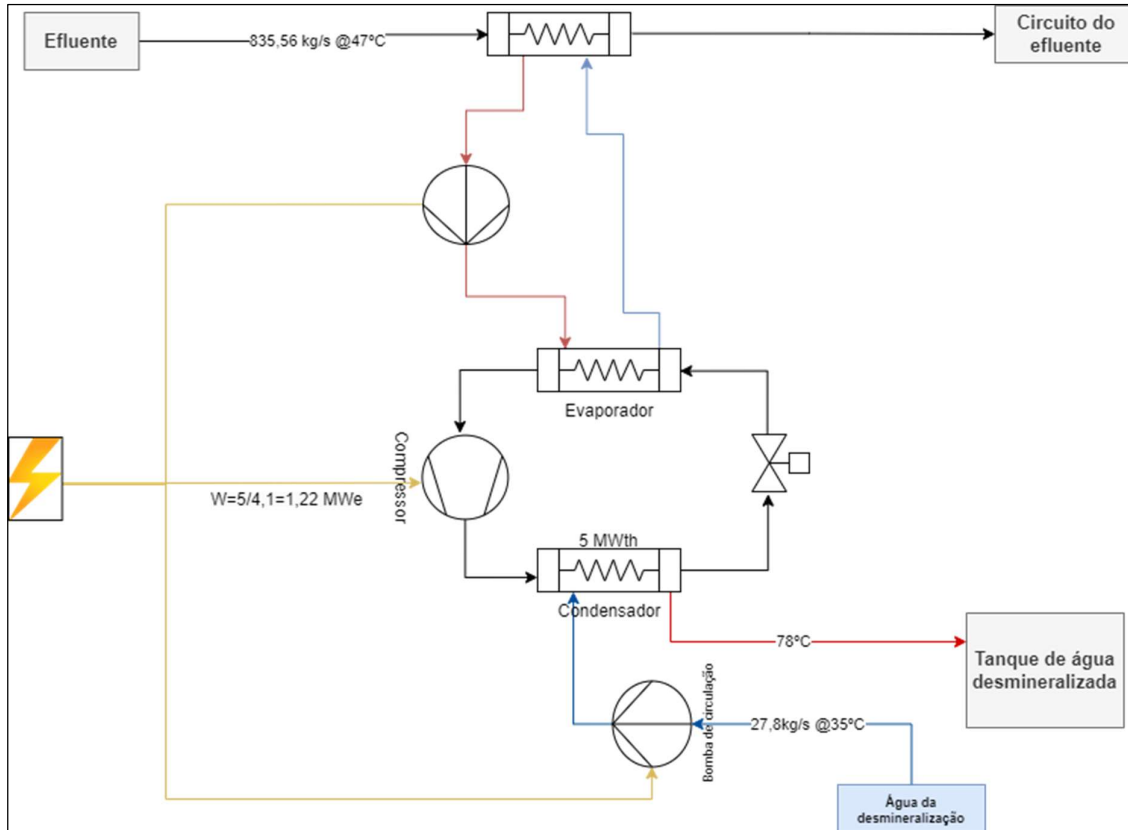


Figura 4.5 - Esquema da aplicação proposta de pré-aquecimento do tanque de água com efluente

De seguida, apresenta-se uma listagem dos equipamentos que compõem a solução proposta:

- **Bombas de circulação:** São necessárias bombas para impulsionar o fluxo dos fluidos. As bombas devem ser seleccionadas de acordo com os caudais necessários para garantir o fluxo adequado dos fluidos;
- **Tanque de água desmineralizada:** O tanque inicialmente está a uma temperatura de cerca de 35°C enquanto o efluente está a uma temperatura de 47°C. O calor do efluente é transferido para a água do tanque, elevando a sua temperatura.
- **Bomba de calor:** Componente principal do sistema, que permite aumentar a temperatura de aquecimento do caudal de água desmineralizada. De notar que, é necessário ter em conta que este componente é também o maior consumidor de energia elétrica (que será considerado na análise económica).

Como se pode verificar na Figura 4.5, o sistema consiste na aplicação de uma bomba de calor para fazer transferência de calor entre o efluente líquido e a água do tanque a temperatura de 35°C. A necessidade da bomba reside no facto de a diferença de temperatura entre as fontes ser reduzida. Colocar-se-ia uma bomba de circulação do lado do efluente para fazer a circulação do efluente e outra para fazer a circulação da água do tanque. Como representado no esquema da Figura 4.5, é fornecida energia elétrica às bombas de circulação e à bomba de calor.

- **Estudo económico (Preliminar)**

Após análise económica preliminar conseguimos obter os resultados mostrados na Tabela 4.4, para uma análise a 20 anos do investimento, considerando uma tarifa de compra de energia elétrica de 80 €/MWh. Apresenta-se, à semelhança das outras soluções propostas, os valores do investimento necessário (CAPEX), e dos indicadores de viabilidade económica valor atual líquido (VAL), taxa interna de rentabilidade (TIR) e período de retorno (PR).

Tabela 4.4 - Resultados económicos da técnica 4.2.1 com produção de vapor a partir de biomassa

CAPEX = 6 M€
VAL (20 Anos) = - 3,9 M€
TIR = - 7,2 %/ano
PR = 47,7 anos

Verificamos que os resultados não são favoráveis à implementação do sistema. Este sistema não representa um bom investimento, do ponto de visto económico, porque tem um VAL negativo e um período de retorno muito maior que o tempo de vida útil dos equipamentos, ambos indicadores de que o capital investido nunca é recuperado [30].

A principal razão para a falta de viabilidade económica deste sistema é que o custo da energia térmica transferida para o tanque de água (com recurso a biomassa) é baixo. Apesar disto, a grande poupança verificada encontra-se no custo relativo ao processo de vaporização da água desmineralizada, o qual depende da fonte de energia utilizada. Ou seja, a água do tanque vai ser aquecida no processo normal, onde se junta com outras fontes de calor (tal como vapor de água) para originar vapor de água a cerca de 130°C, necessário para o processo normal da fábrica. Desta

forma, pré-aquecendo a água do tanque e, portanto, fornecendo-lhe mais energia, será necessário utilizar menor quantidade calor vindo das outras fontes, como é o caso do vapor de baixa pressão. Essa quantidade de vapor que pode ser poupada no processo foi estimada seguindo o raciocínio apresentado a seguir.

- **Poupança de vapor de água (fonte de energia: Biomassa)**

Da análise que foi feita e, tendo em conta o potencial de calor disponível, obteve-se o valor de 151 200 GJ/ano de energia. Desta forma, foi estimada a poupança de vapor de água a que corresponde esta energia, obtendo-se 54 782 t/ano de vapor poupado. De seguida, para compreender no que se traduz este valor em termos económicos foi estimada a poupança monetária, considerando um valor aproximado de custo de 8 €/tonelada de vapor. Desta forma, a poupança estimada de vapor foi de, aproximadamente 438 260 €/ano. Este valor foi tido em conta na análise económica apresentada anteriormente.

Comentários

Com este sistema, percebe-se que a temperatura da água do tanque sobe aos 78°C (aproximadamente) como foi projetado. A questão que se prende aqui é do lado do efluente, porque com esse potencial a diferença de temperatura será pequena, não sendo possível desativar a torre de refrigeração e contabilizá-la como poupança. No entanto, foi estimada uma pequena parcela de poupança possível, com baixa diferença de temperatura, por parte da torre de refrigeração. Essa energia foi considerada no cálculo energético e consequentemente contabilizada na análise económica, originando o resultado desta análise. A diferença de temperatura no efluente, entre o ponto de captação (de calor) e o ponto onde o caudal é devolvido de novo ao circuito normal é estimado ser de 5/6 °C. Teoricamente seria menor diferença, mas este valor foi estimado considerando também perdas pelo caminho (que é bastante grande, cerca de 500 m).

Para uma maior diferença de temperatura, poder-se-ia utilizar uma bomba com maior potência ou então considerar mais potenciais consumidores de calor (onde fosse possível dissipar o calor disponível, à semelhança do tanque de água desmineralizada). No entanto, uma bomba de calor de maior potência não seria possível utilizar apenas para dissipar no tanque em questão porque iria aumentar em demasia a temperatura da água desse tanque, não sendo, por isso, considerada. Relativamente a outras fontes consumidoras do calor disponível, seria ideal encontrar outras formas de dissipar o calor todo disponível e, por isso, considerar maior poupança na torre de

refrigeração e considerar desativá-la (ou como backup). No entanto, no decorrer deste projeto, não houve tempo para estudar outros possíveis “locais” para dissipar o calor remanescente.

- **Poupança de vapor de água (fonte de energia: Gás Natural)**

A título de exemplo, foi feita uma análise alternativa de viabilidade económica tendo em conta as considerações acima, isto é, considerando uma bomba de calor também de 5 MW de potência, mas agora a poupança de vapor de água seria maior, isto porque nesta simulação se iria gerar vapor com recurso a gás natural (com maior custo que a biomassa), originando uma poupança de cerca de 1,6 M€/ano nos custos do vapor direto.

Os resultados mostram-se abaixo, na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados económicos da técnica 4.2.1 com produção de vapor a partir de gás natural

CAPEX = 6 M€
VAL (20 Anos) = 5,1 M€
TIR = 9,5 %/ano
PR = 8,8 anos

Conseguimos perceber que, naturalmente, vemos a viabilidade do sistema a subir. Este caso, embora represente uma simulação onde foram assumidas outras condições, representa um investimento passível de ser implementado. Esta simulação tinha como objetivo mostrar como uma condição pode alterar completamente a viabilidade económica de um projeto. Esta simulação foi feita baseada em dados reais e que, apesar de não se produzir vapor a partir de gás natural nos dias de hoje no complexo industrial da Navigator, já aconteceu no passado e pode voltar a acontecer em caso de avaria da caldeira de biomassa, ou escassez de biomassa.

Na Figura 4.6 apresenta-se um gráfico que permite visualizar o comportamento económico desta simulação. Dada a maior viabilidade desta simulação é interessante verificar este comportamento.

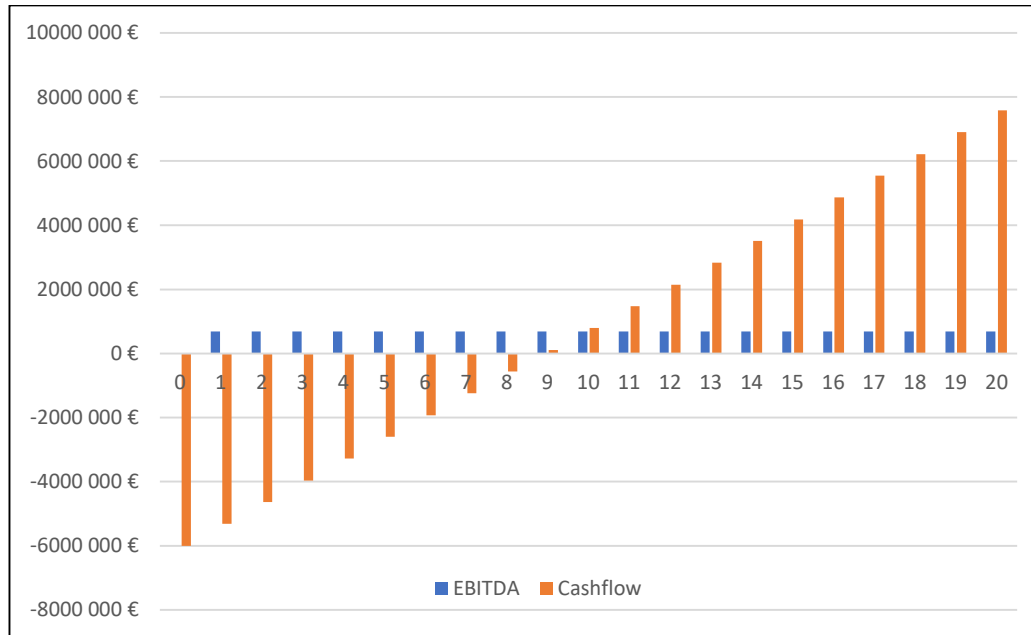


Figura 4.6 - Gráfico económico da simulação com gás natural da técnica 4.2.1

4.2.2 Aquecimento do caudal de água desmineralizada com calor da TR geral

Na Figura 4.7 apresenta-se uma proposta de sistema de pré-aquecimento da água do tanque de água desmineralizada com recurso a calor recuperado na torre de arrefecimento geral (TR geral). Pretende-se fazer transferência de calor do caudal de água da torre (630,56 kg/s a cerca de 45°C, ver Tabela 3.2 - Caracterização das fontes líquidas de calor residual) para o caudal de água que passa pelo tanque de água tratada (27,8 kg/s a 35 °C). Assim, far-se-ia um pré-aquecimento da água deste tanque. Utilizar-se-ia uma bomba de calor para o efeito, visto que a diferença de temperatura entre os dois caudais de água não é suficiente para que se fizesse permuta direta utilizando um permutador de calor. Esta fonte encontra-se a uma distância bastante mais próxima do tanque (consumidor do calor) do que no caso da mistura dos efluentes, daí o interesse acrescido nesta fonte de calor residual, porque poderia representar menos perdas de calor pelo caminho e menores gastos de energia elétrica com a bombagem.

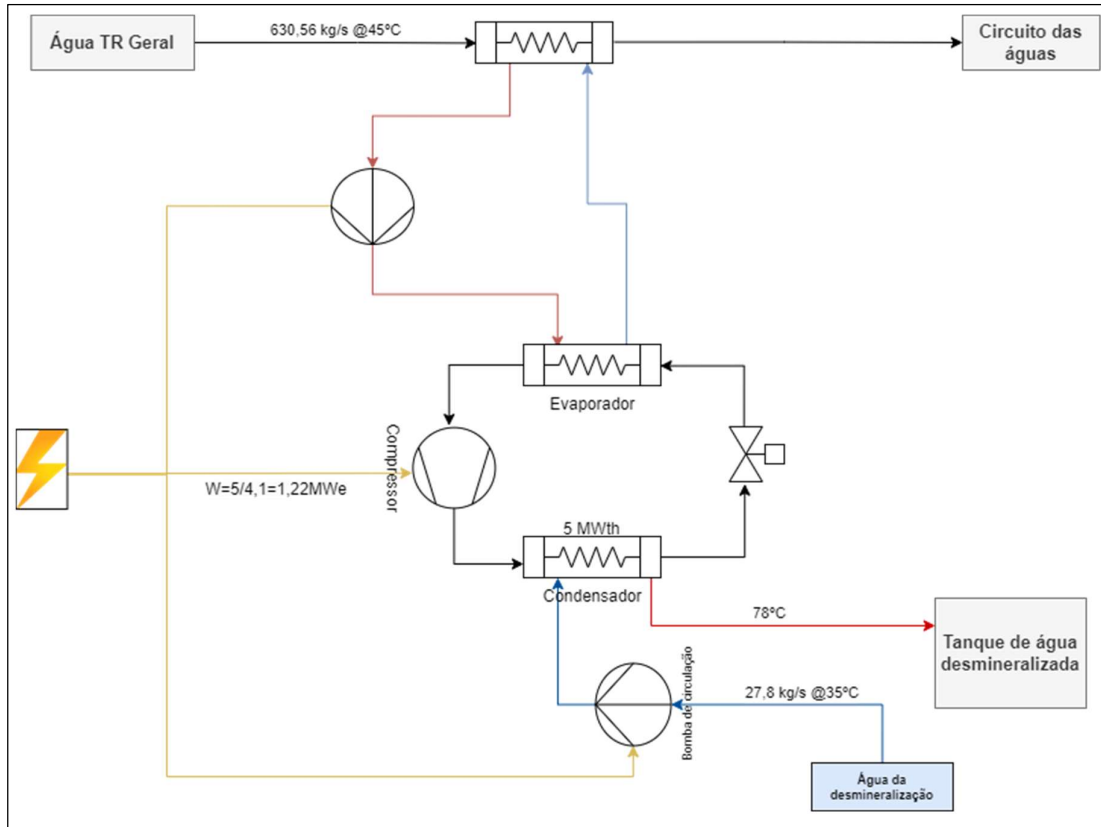


Figura 4.7 - Sistema de pré-aquecimento da água do tanque de água desmineralizada com calor recuperado na torre de refrigeração (TR) geral.

Este sistema tem por base o mesmo princípio do sistema anterior (secção 4.2.1), mas neste caso utiliza outra fonte de calor. Aqui também teria uma bomba de calor com a mesma potência, 5 MW, porque o destino do calor é o mesmo do caso anterior. A análise económica encontra-se apresentada abaixo. De notar que esta é bastante semelhante à anterior porque o sistema é igual, apenas diferindo na distância das fontes e, portanto, no custo associado às tubulações, etc. Aqui é ligeiramente menor o CAPEX por esse motivo.

- **Estudo económico (Preliminar)**

Obtiveram -se os resultados mostrados abaixo para este caso, considerando também 20 anos de investimento, e uma tarifa de compra de energia elétrica de 80 €/MWh. Apresentam-se na Tabela 4.6 os valores obtidos para os indicadores de viabilidade económica VAL, TIR e PR.

Tabela 4.6 - Resultados económicos da técnica 4.2.2 a partir de biomassa

CAPEX = 5,8 M€
VAL (20 Anos) = - 3,7 M€
TIR = - 6,5 %/ano
PR = 45,7 anos

Uma vez mais, os resultados não são benéficos tendo em conta o investimento (VAL e TIR negativos e PR muito superior ao período de vida útil dos equipamentos). Assim, o sistema não configura, nesta fonte também, um bom investimento. De forma similar ao sistema anterior (secção 4.2.1), também aqui foi considerada uma pequena poupança na torre de refrigeração, embora reduzida, porque a diferença de temperatura que se estima obter entre o ponto em que é captada a fonte de calor até ser “devolvida” novamente ao seu circuito natural é bastante pequena (estima-se que seja de 4/5°C de diferença). Seria de esperar uma diferença de temperatura maior que no sistema em que se usa a mistura de efluentes, visto que esta fonte tem menor caudal e, portanto, com a mesma quantidade de calor transferida, a diferença de temperatura seria maior. No entanto, dada a proximidade desta fonte até à dissipação de calor prevêm-se menores perdas pelo caminho, quando comparado com a distância no caso da mistura de efluentes. A temperatura da água do tanque seria a mesma (78°C) dado que a quantidade de calor transferida seria a mesma, levando à mesma elevação da temperatura.

Nesta situação também a energia que é poupada na torre não é suficiente para compensar a energia consumida pela bomba de calor (isto porque não é possível poupar o consumo total da torre).

- **Poupança de vapor de água (fonte de energia: Biomassa)**

A poupança económica na produção de vapor aqui também representa um fator relevante visto que é a maior poupança que é possível ter no sistema. Essa poupança tem o mesmo peso que no sistema anterior porque a quantidade de energia a transferir seria a mesma (com a mesma potência de bomba de calor). Assim, a poupança económica estimada para a produção de vapor foi de cerca de 438 k€. Este valor foi considerado na análise económica apresentada.

- **Poupança de vapor de água (fonte de energia: Gás natural)**

Tal como foi feito no caso anterior, secção 4.2.1, aqui também foi simulado o sistema onde se considerou a poupança de vapor de água produzido a partir de gás natural. Os resultados da simulação, utilizando as mesmas condições desse caso (mesma potência da bomba de calor, custo energético, etc.), apresentam-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados económicos da técnica 4.2.2 com produção de vapor com recurso a gás natural

CAPEX = 5,8 M€
VAL (20 Anos) = 5,3 M€
TIR = 10,1 %/ano
PR = 8,4 anos

Neste caso, também, a viabilidade económica aumenta, supondo a poupança de vapor de água aqui produzido recorrendo a uma caldeira a gás natural.

Na Figura 4.8, apresenta-se um gráfico do comportamento económico da simulação, à semelhança da secção anterior.

Do ponto de vista da disposição das fábricas no complexo industrial da Navigator na Figueira da Foz, no caso de ser considerada a hipótese de implementação do sistema de bomba de calor para fazer o pré-aquecimento da água do tanque, é preferível usar como fonte de calor a torre de refrigeração geral. Isto dada a menor distância entre a fonte de calor (torre de refrigeração geral) e o tanque de água desmineralizada. No caso dos efluentes líquidos, esta distância ronda os 500m sendo por isso, preferencial a outra fonte de calor.

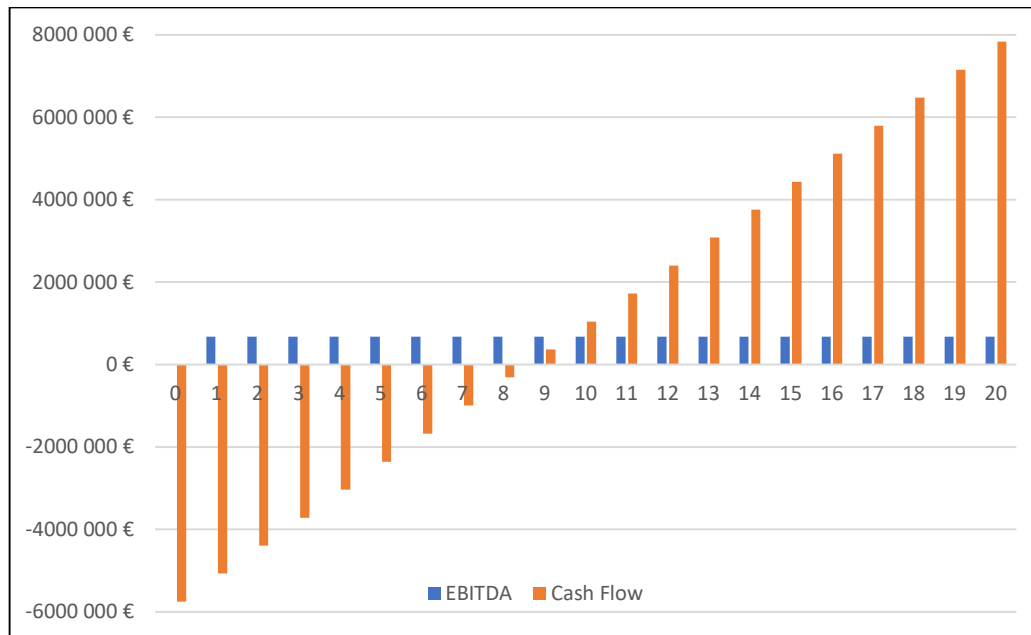


Figura 4.8 - Gráfico económico da simulação com gás natural da técnica 4.2.2

4.2.3 Aquecimento da água desmineralizada com calor dos compressores de ar

Neste seção, estuda-se um sistema baseado na recuperação de calor do sistema de arrefecimento de compressores de ar. Contextualizando, existe uma série de compressores de ar (mais concretamente compressores de parafuso de dois andares acionados por um motor elétrico, que fornece ar comprimido isento de óleo e de pulsações) que são arrefecidos por água [31]. Um esquema de um compressor de ar ZR arrefecido a água é representado na Figura 4.9.

Neste caso o foco centra-se na recuperação do calor contido no caudal de água de arrefecimento dos compressores (e de outros componentes muito menos relevantes), o qual transporta grandes quantidades de calor passível de recuperação. Trata-se de **uma parte** do caudal da fonte de calor residual identificada com o número 5 na Tabela 3.2. Este caudal da torre engloba várias fontes que se juntam nessa torre. Aqui, é tratada apenas uma parte desse caudal, referente ao sistema de refrigeração dos compressores de ar.

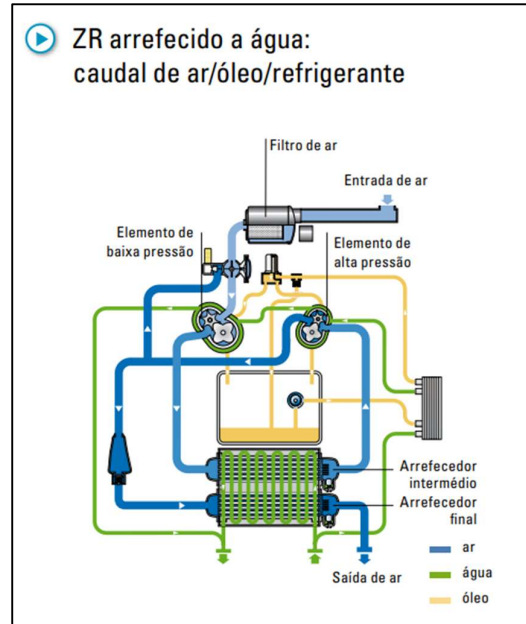


Figura 4.9 - Esquema de um compressor ZR arrefecido a água [31].

Neste momento, o processo na fábrica consiste na utilização de água para arrefecimento dos compressores de ar, a qual sai dos compressores com temperatura a rondar os 45°C, seguindo diretamente para a torre de refrigeração (mais concretamente à torre de refrigeração geral da evaporação) para dissipar o calor e a arrefecer até cerca de 25°C. Esta situação encontra-se representada na Figura 4.10.

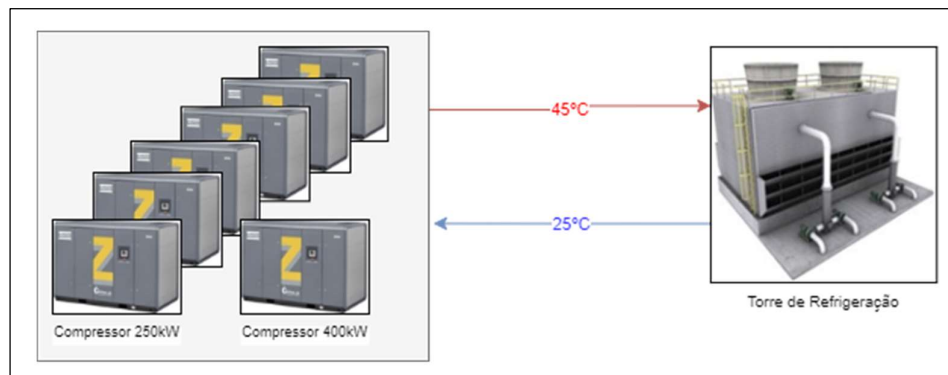


Figura 4.10 - Situação atual do sistema de refrigeração por água dos compressores de ar

Como se pode verificar na Figura 4.10, existem sete compressores de ar, sendo seis de 250 kW e um de 400 kW. No total têm uma potência de 1 900 kW, sendo que nunca se encontram todos em funcionamento a 100% de carga. Aquando da escrita deste trabalho, inclusive um dos

compressores de 250 kW encontrava-se parado. No entanto isto representa uma exceção, pelo que se considerou nos cálculos uma potência útil de cerca de 75% do valor nominal. Na Tabela 4.8 abaixo, encontram-se enumerados os diversos compressores existentes na fábrica, a sua potência projetada (segundo os manuais de utilização) e a potência considerando os compressores a 75% de carga.

Tabela 4.8 – Potência dos compressores de ar (com funcionamento a 75% de carga)

Máquina	Potência nominal [kW]	Potência a 75% da carga [kW]
ZR250	250	188
ZR250	250	188
ZR250	250	188
ZR250	250	188
ZR250	250	188
ZR250	250	188
ZR250	250	188
ZR400	400	300
Total [kW]	1900	1428

Como se pode verificar na tabela existem seis compressores “Atlas Copco ZR 250” e um “Atlas Copco ZR 400”. Mais detalhes do funcionamento destes compressores e especificações, podem ser consultados em [32] e [33], respetivamente. Conforme indicado na Tabela 4.8, a potência térmica recuperável é de cerca de 1428 kW (isto em relação a uma temperatura de referência de 25 °C). Transpondo para valores anuais, que são a forma mais comum de contabilização, obtemos 12 138 MWh/ano ou 12,14 GWh/ano de energia, isto considerando um funcionamento de 8 500 horas/ano. É um valor bastante significativo que deve ser considerado.

Por forma a recuperar este calor, diversos fabricantes destes compressores de ar criaram um sistema de recuperação de calor. Exemplos são a unidade da “Atlas Copco” [34] ou a unidade da “Kaeser” [35], embora existam diversas outras empresas com sistemas semelhantes. Esta solução é particularmente interessante para esta indústria (papel e celulose) porque ela utiliza grandes volumes de ar comprimido e vapor de água. Branqueadores, digestores ou evaporadores, são alguns exemplos de aplicações comuns.

Termodinamicamente, a energia utilizada para compressão do ar é convertida em calor. Cerca de 90% desse calor permanece no ar comprimido e no lubrificante. O restante é dissipado no

ambiente por radiação térmica pelas paredes dos compressores. Um esquema ilustrativo encontra-se na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Balanço de energia num compressor de ar arrefecido a água. Fonte: [34].

A eletricidade não é a única fonte de energia que entra no balanço energético a um compressor de ar. O ar na sucção do compressor contém vapor da água. O calor contido nesse vapor é libertado nos arrefecedores intermediário como consequência da sua condensação. Por norma, esse calor de condensação representa entre 5-20% da energia elétrica consumida por um compressor de ar [34].

Este sistema, projetado pela Atlas Copco [34], permite recuperar a energia total do calor do ar comprimido e do sistema de óleo. Esta energia recuperada sob a forma de água quente, chega a ultrapassar os 80% da energia elétrica consumida pelo sistema. Estes valores dependem das condições reais de instalação do sistema e da pressão do sistema de ar comprimido. Por norma, estes atingem até 95%, segundo este fabricante [34]. Um esquema representativo deste sistema pode ser visto na Figura 4.12.

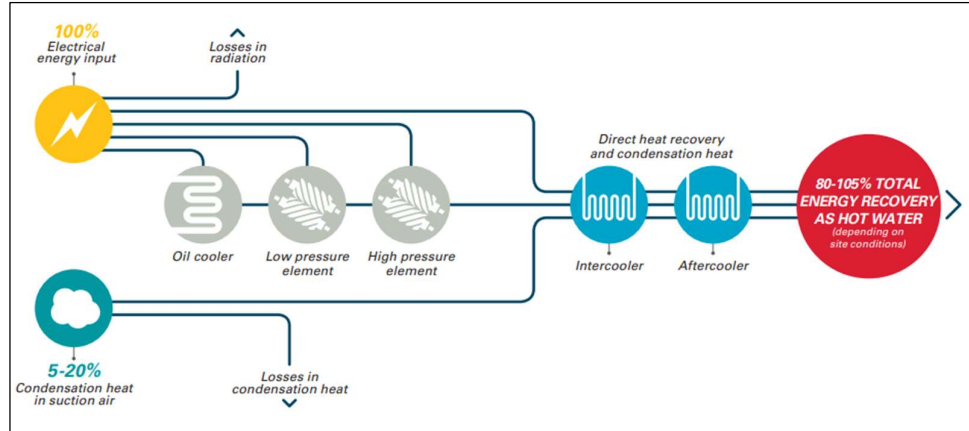


Figura 4.12 - Esquema energético de compressor de ar. Fonte: [34].

Esta unidade de recuperação de energia pode estar conectada a até 4 compressores, num total máximo de 900 kW de potência. A unidade de recuperação, ER, é instalada entre o(s) compressor(es) e o circuito de arrefecimento e aquecimento da fábrica. É uma unidade de fácil instalação/montagem porque se trata somente de um “bloco” em que apenas é necessário garantir as ligações de entrada e saída.

Segue-se a apresentação de algumas das vantagens deste sistema:

- Regulação da pressão e da temperatura da água de arrefecimento dos compressores ao mesmo tempo que são mantidas as condições ideais de funcionamento;
- Excelente qualidade da água de arrefecimento do compressor;
- Os compressores são conectáveis: A cada unidade ER podem estar ligados até quatro compressores (arrefecidos a água isenta de óleo) com potência máxima de 900 kW;
- O consumo de energia da unidade de recuperação é inferior a 4 kW;
- Facilidade de instalação e necessidade de pouco espaço.

Na Figura 4.13 abaixo, encontra-se um esquema do sistema a implementar na fábrica utilizando as unidades de recuperação ER900 da Atlas Copco [34].

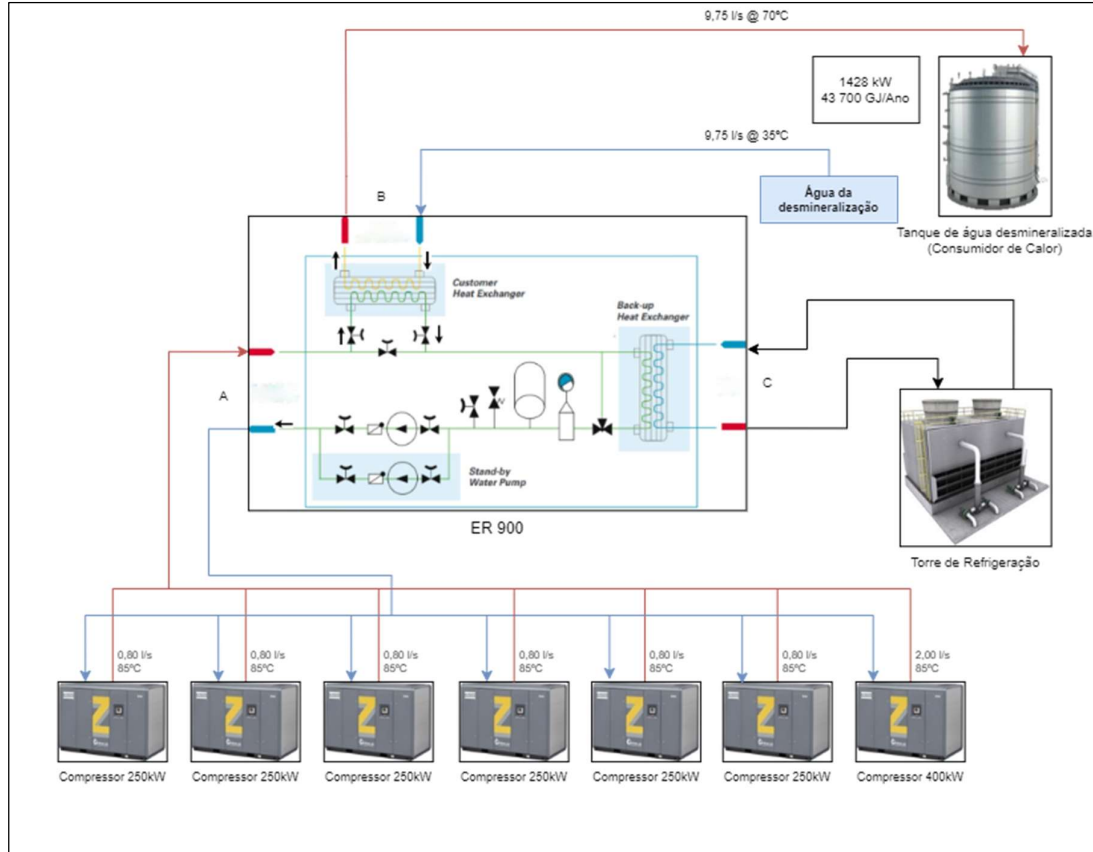


Figura 4.13 - Esquema do sistema proposto utilizando ER

Segue-se a apresentação de algumas observações relativas a este sistema, na configuração apresentada na Figura 4.13:

- **Compressores de ar:** São a fonte de energia térmica. O circuito inicial sofre modificações com a implementação do sistema enunciado. Com isto, transfere-se grande parte da energia térmica para a água de refrigeração obtida na compressão, sem colocar em causa os parâmetros de funcionamento normal das máquinas. Estes compressores iriam sofrer modificação nos permutadores internos para aceitar temperatura de entrada superior aos 25°C (da situação atual).
- **Unidade de recuperação ER 900:** Este sistema implica três circuitos totalmente independentes (A, B e C identificados no esquema representado na Figura 4.13):
 - Circuito A – Circuito fechado de recuperação de energia;
 - Circuito B – Circuito fechado de consumo da energia recuperada. Neste circuito a água recirculada não vem do tanque de água desmineralizada (como se pode ver

na figura) mas sim do processo de desmineralização, garantindo que a sua temperatura ronda sempre os 35°C;

- Circuito C – Circuito fechado de refrigeração (torre de refrigeração) que serve como backup.

O ER900 garante as condições normais de refrigeração aos compressores para que não haja problemas no fornecimento de ar comprimido. Assim, a entrada de água de refrigeração dos compressores (circuito A) não pode ultrapassar os limites dos compressores.

Supondo que toda a energia térmica que entra no ER900 (do lado do circuito A) é consumida totalmente no circuito B (do lado do consumidor) não será necessário transferir energia térmica para o circuito C (que funciona com reserva, em caso de avaria ou manutenção), ou seja, conseguimos utilizar toda a energia recuperada.

No caso em que o consumidor de calor (no circuito B) não conseguir absorver a totalidade da energia térmica disponível no circuito A (no lado do fornecedor), o sistema ER900 transfere automaticamente a energia térmica excedente para o circuito C (da torre de refrigeração), por forma a garantir que o processo ocorre nos moldes normais. O Circuito C é projetado para ter capacidade de absorver toda a carga térmica disponível no circuito A, no caso do circuito B deixar de a consumir (por avaria, indisponibilidade, manutenção, etc.).

O sistema ER900 tem no seu interior, duas bombas de velocidade variável, que garantem o caudal de água necessário no circuito A (onde uma satisfaz a totalidade do caudal necessário e a outra serve de backup). Tem, também, um sistema de controlo que permite o controlo de todo o sistema incluindo as condições exigidas de refrigeração aos compressores, dentro dos parâmetros normais de funcionamento.

- **Materiais:** Neste projeto seriam utilizadas tubagens de inox, onde apenas existe necessidade de colocar um filtro de rede à entrada de cada uma das bombas nos circuitos B e C, para a sua proteção.
- **Requisitos:** Para que o sistema ER900 funcione corretamente, a “Atlas Copco” recomenda diversas especificações da qualidade da água de refrigeração a utilizar no sistema. Essas especificações podem ser consultadas no anexo A.

Por forma a elucidar o funcionamento do sistema no caso do circuito B não conseguir “consumir” o calor proveniente do circuito A, apresenta-se um esquema abaixo, semelhante ao anterior, mas neste caso, com a circulação de águas para o circuito C (sistema de backup). O esquema encontra-se na Figura 4.14.

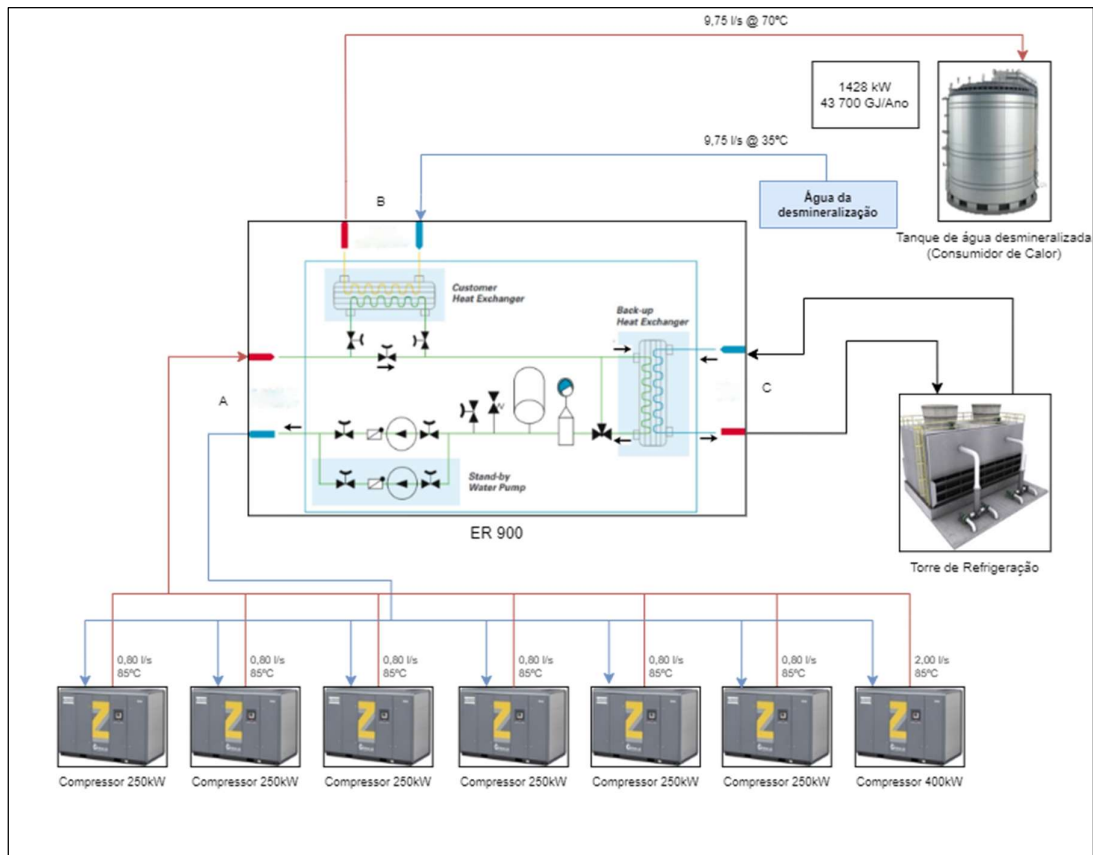


Figura 4.14 - Esquema do sistema de ER utilizando o circuito de backup

Como se pode verificar no esquema da Figura 4.14, o circuito A transporta o calor, naturalmente para o sistema ER. Neste caso, considerámos que o circuito B, do consumidor de calor, não tem capacidade para consumir esse calor, por manutenção ou avaria ou qualquer outro fator impeditivo. Assim, o calor é enviado para o circuito C, onde a água de refrigeração é enviada para a torre de refrigeração (através de permuta). É garantido, desta forma, o arrefecimento da água de refrigeração para manter o normal funcionamento dos compressores, no caso de existirem impedimentos no circuito B.

Na Tabela 4.9 encontram-se os cálculos da recuperação de energia do sistema ER900.

Tabela 4.9 – Cálculos da recuperação de energia do sistema ER900

Designação	Unidades	Valor
Período de funcionamento	Horas/ano	8 500
Potência recuperável (média)	kW	1428
Caudal de água (médio)	l/s	6,83
Caudal de água (médio)	m ³ /h	24,57
Calor específico água	kJ/(kg °C)	4,184
Temperatura da água à entrada do ER	°C	35
Temperatura da água à saída do ER	°C	85
Diferença de temperatura	°C	50
Energia retirada pelo ER	MWh/Ano	12 138
Energia retirada pelo ER	GWh/Ano	12,14
Energia retirada pelo ER	GJ/Ano	43 700

Como se pode verificar na Tabela 4.9, foram consideradas para o estudo, foram consideradas para o estudo, 8500 horas anuais de funcionamento dos compressores, com um potencial recuperável de 1428 kW de energia, como visto na Tabela 4.8, o que representa 12,14 GWh anuais de energia.

Neste caso, a variável a estudar foi o caudal médio. Isto é, tínhamos obtido o potencial recuperável e era conhecida também a diferença de temperatura pretendida, neste caso, cerca de 50°C (de 85°C para 35°C). Desta forma, obtivemos o caudal de água necessário fornecer para que, nestas condições, se conseguisse obter a diferença de temperatura pretendida. Obteve-se o valor de 6,8 l/s aproximadamente para o caudal de água a fornecer. Esse caudal seria distribuído pelos diversos compressores de ar (sete, neste caso) embora não de forma uniforme. Como existem seis compressores de 250 kW e um de 400 kW, fornecer-se-ia um caudal de água mais elevado ao compressor de maior potência. Os caudais correspondentes a fornecer apresentam-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Caudais de água a fornecer aos compressores

Máquina	Potência (kW)	Caudal a receber
ZR250	250	0,80
ZR250	250	0,80
ZR250	250	0,80
ZR250	250	0,80
ZR250	250	0,80
ZR250	250	0,80
ZR400	400	2,03
Caudal total	-	6,83

Para esta análise foi estimada, à semelhança dos outros casos da seção 4.2, a poupança de vapor de água que se obtém com a implementação deste sistema. O processo para a estimacão foi o mesmo que nesses casos. De notar que, esta poupança de vapor de água é o fator com maior peso na rentabilidade deste caso.

- **Poupança de vapor de água**

De acordo com os resultados obtidos, percebemos que a energia potencial recuperável seria de 43 700 GJ/ano. Desta forma, foi estimada a poupança de vapor a que corresponde esta energia, obtendo-se 15 832 toneladas de vapor de água poupado, por ano, ou então 1,86 tonelada por hora. Em termos económicos, considerando um valor típico de custo de 8€/tonelada de vapor de água, estimou-se uma poupança anual de 126 657€.

- **Consumo energético**

Tal como referido, segundo folha de informações do equipamento, o ER apresenta uma potência de consumo até 4 kW. Neste sistema foi considerado um consumo de 6 kW (3 kW por cada unidade, ter-se-iam duas unidades a funcionar a 75%), representando 25,5 MWh/ano de consumo de energia elétrica. Assim, estas unidades apresentam um custo com a energia consumida de 2040€/ano, considerando uma tarifa de compra de energia elétrica de 80€/MWh.

- **Estudo económico (Preliminar)**

Para este caso foi considerada uma análise apenas a 15 anos de vida útil deste investimento, visto que é o período que a empresa fabricante garante para o funcionamento dos equipamentos. Apresentam-se na Tabela 4.11 os valores obtidos para os indicadores de viabilidade económica VAL, TIR e PR.

Tabela 4.11 - Resultados da análise de viabilidade económica do sistema ER

CAPEX = 400 k€
VAL (20 Anos) = 753 k€
TIR = 21,1 %/ano
PR = 4,4 anos

Analisando os resultados obtidos na Tabela 4.11, podemos afirmar que os resultados são bastante favoráveis à implementação deste sistema. O facto de ser um investimento bastante mais reduzido (quando comparado com sistemas apresentados e estudados anteriormente) e representar uma poupança elevada, conduz a um período de retorno do investimento (ou “payback” em inglês) reduzido. Adicionalmente, uma TIR de 21,2 %/ano indica que se trata de um investimento com um risco muito baixo [30].

Na Figura 4.15 apresenta-se um gráfico que melhor descreve o comportamento económico do sistema.

Como é possível ver no gráfico da Figura 4.15, é mais fácil perceber quando o sistema passa a ser rentável, neste caso, entre o quarto e o quinto ano (4,4 anos segundo os dados da Tabela 4.11).

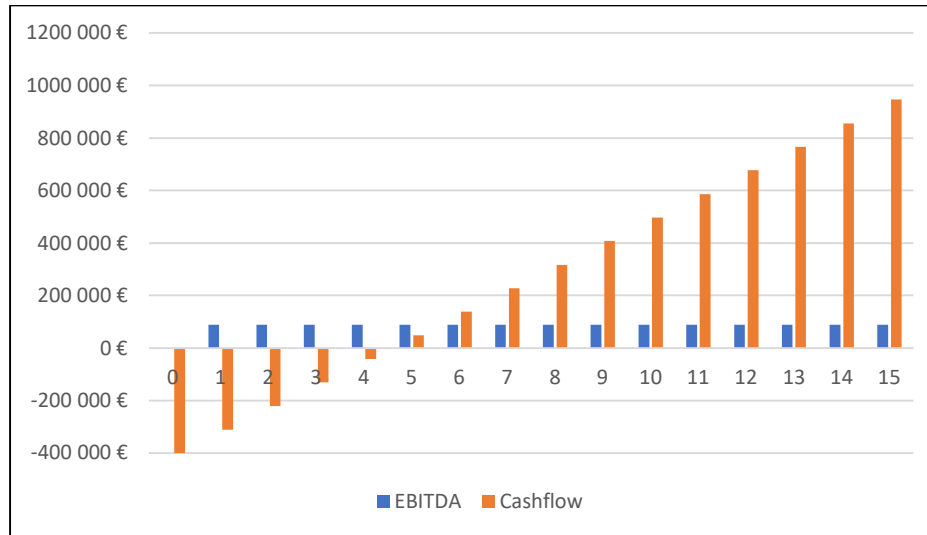


Figura 4.15 - Gráfico econômico da técnica 4.2.3

4.2.4 Aquecimento da água desmineralizada com calor do tanque de smelt

Nesta seção, estudou-se possível recuperação de calor do tanque de smelt para fazer o pré-aquecimento da água desmineralizada.

Trata-se de uma fonte de calor que faz parte do caudal de água da torre de refrigeração geral (ver Tabela 3.2, ponto 5). Desta forma, seria tratada uma parte desse caudal apenas, e portanto, antes da sua chegada à referida torre.

A fonte de calor para o projeto de recuperação de calor foi a água de “lavagem” no *scrubber* de uma mistura proveniente do tanque de dissolução de smelt de uma caldeira em que um dos combustíveis queimados é “licor negro”. Mais especificamente, durante a queima do licor negro ocorre a combustão dos seus componentes orgânicos e a precipitação no fundo da fornalha da caldeira dos inorgânicos fundidos (os quais têm o nome de “smelt”). O smelt é encaminhado para o tanque de dissolução (o tanque de smelt) onde é misturado com licor branco fraco.

Esta caldeira tem as seguintes funções:

- Incineração da matéria orgânica presente no licor negro (que é um subproduto do processo de produção da pasta de papel);
- Geração de vapor como resultado do aproveitamento da energia libertada pela combustão para cogeração (produção de calor e de energia elétrica);

- Produção de carbonato de sódio (Na_2CO_3) e de sulfeto de sódio (Na_2S) através da redução do sulfato de sódio (Na_2SO_4).

No processo de recuperação química, o SMELT formado na caldeira de recuperação é alimentado a um tanque de dissolução onde é dissolvido em lavagem fraca para formar licor verde. Antes de se misturar com a lavagem fraca, o fluxo de SMELT é dividido em gotículas com jatos de vapor.

A elevada temperatura do smelt ao entrar em contacto com a lavagem fraca liberta uma grande quantidade de calor sob a forma de vapor de água. Os gases são expelidos através da ventilação do tanque de dissolução de smelt.

Normalmente, a exaustão do tanque de dissolução de SMELT é passada através de um *scrubber* húmido para reduzir a emissão de partículas compostas (compostos maioritariamente por compostos de sódio arrastados pelos gases de escape). Os gases de escape que saem do *scrubber* são saturados com vapor de água e arrefecidos até cerca de 80°C . A água (quente) que faz a “lavagem” representa a fonte de calor do sistema de recuperação de calor a analisar nesta secção. De notar que, atualmente esta água (que é arrefecida para retornar ao *scrubber* e fazer nova lavagem) é arrefecida por permuta com água da torre de refrigeração geral. A situação atual encontra-se representada na Figura 4.16.

A descarga do SMELT acontece num tanque dissolvedor, que envia o material fundido para a próxima etapa. Ao queimar o licor na região inferior da fornalha, o carbonato e o sulfeto de sódio formados são fundidos ("smelt") e fluem para o tanque de dissolução. A solução obtida neste tanque contendo Na_2S e Na_2CO_3 recebe o nome de licor verde.

Na Figura 4.17 apresenta-se um esquema que inclui o sistema de recuperação de calor a analisar nesta secção. De notar que este caudal de água não é mais do que um dos caudais que fazem parte da torre de refrigeração geral (como representado na Figura 4.16). Assim, esta recuperação de calor tem de ocorrer mais a montante, antes deste caudal de água seguir para a torre de arrefecimento geral.

Neste investimento foi considerada a instalação de um circuito “barreira” entre o caudal recirculado existente atualmente no *scrubber* no tanque de dissolução de smelt e a água desmineralizada para tornar o sistema mais resistente a possíveis infiltrações na água desmineralizada.

Este sistema foi inspirado num sistema implementado pela “Thermal Energy” que é semelhante, embora com algumas diferenças. Mais informações podem ser consultadas em [36].

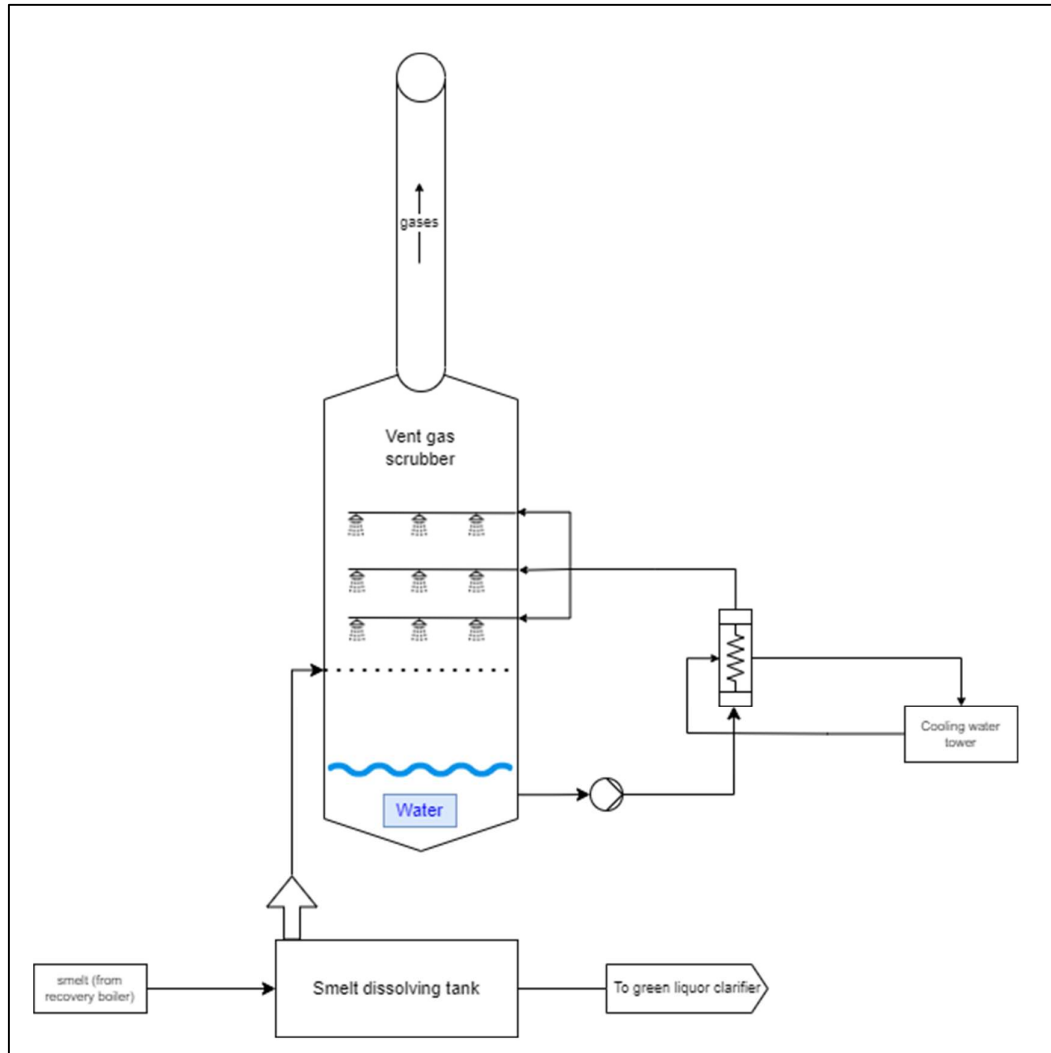


Figura 4.16 - Esquema do sistema atual do scrubber

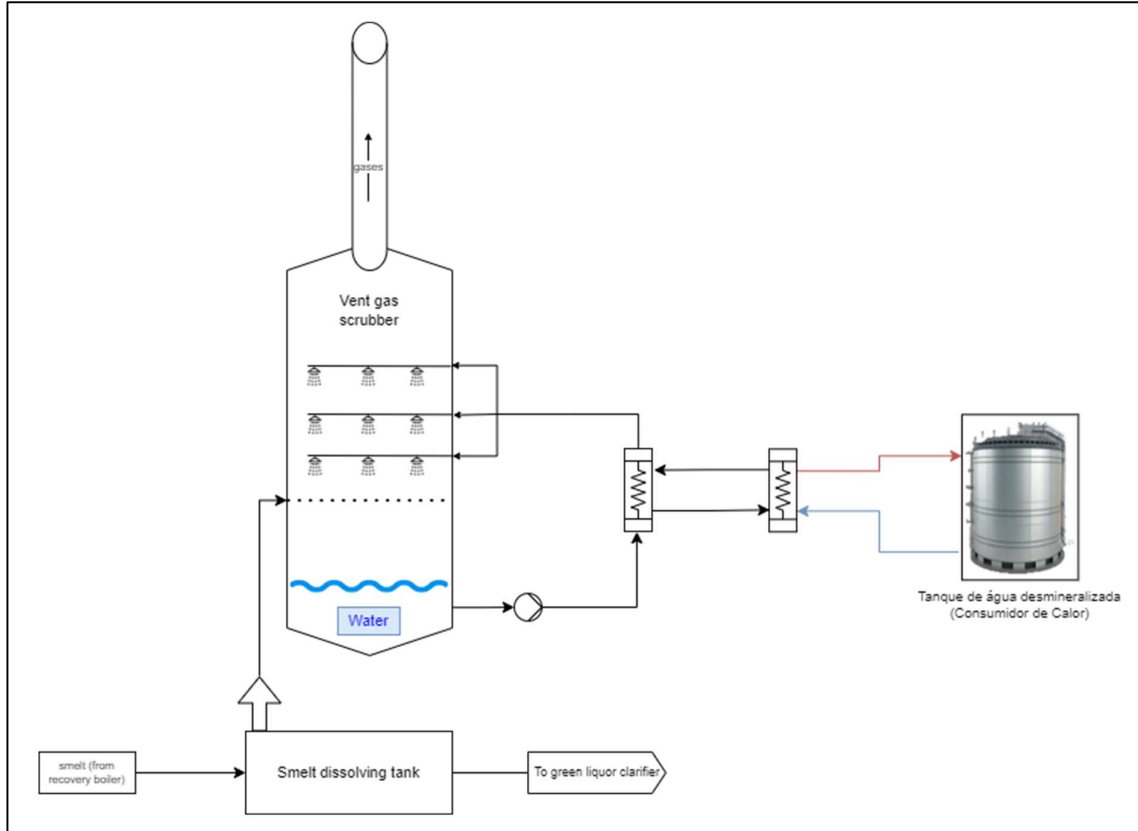


Figura 4.17 - Esquema da alteração proposta ao sistema 4.2.4

- **Análise Energética**

Apresenta-se na Tabela 4.12 os dados recolhidos sobre o potencial de recuperação do calor do tanque de smelt.

Tabela 4.12 - Dados de potencial recuperação do tanque de smelt

Designação	Valor	Unidades
Caudal arrefecido (estimado)	20	l/s
Diferença de Temperatura	20	°C
Potência disponível	1673,6	kW
Caudal de vapor equivalente	2,2	t/h
Potência térmica considerada	1,5	MW

Conforme se pode verificar na Tabela 4.12, apesar da potência térmica disponível ser de cerca de 1,67 MW, apenas foram considerados 1,5 MW, devido ao facto de ser apenas uma estimativa. De realçar que a temperatura da água do tanque de água desmineralizada é de 35°C, e não de 25°C, daí a diferença de temperatura considerada ser de 20°C, o que representa uma aproximação, podendo a mesma ser eventualmente maior. No entanto, foi considerada essa diferença para fazer uma análise de carácter mais conservador.

A energia recuperável com este sistema pode ser consultada na Tabela 4.13 abaixo.

Tabela 4.13 - Energia recuperável com a técnica 4.2.4

Designação	Unidades	Valor
Período de funcionamento	horas/ano	8 500
Potência recuperável (média)	MW	1,5
Energia térmica recuperada	MWh/ano	12 750
Energia térmica recuperada	GWh/ano	12,75
Energia térmica recuperada	GJ/ano	45 900
Vapor de água poupado	t/ano	16 630
Vapor de água poupado	t/hora	2

Com esta potência térmica é possível aumentar a temperatura do tanque de água desmineralizada em cerca de 13°C, subindo assim de 35°C para os 48°C aproximadamente. Este ganho de temperatura leva a uma poupança de vapor de água.

- **Poupança de vapor de água**

Aqui a poupança obtida com o sistema quantifica-se em toneladas de vapor de água poupado, não se considerando poupanças elétricas ou de outra natureza. Desta forma, estima-se uma poupança de cerca de 16 630 toneladas de vapor de água poupado por ano, ou 2 toneladas por hora, aproximadamente.

Economicamente, considerando um custo de 8€/tonelada de vapor de água produzido a partir de biomassa, estimou-se uma poupança anual de 133 043€. Este valor foi considerado no estudo económico, apresentado de seguida.

- **Estudo económico (Preliminar)**

Para efetuar a análise de viabilidade económica deste sistema de recuperação de calor residual considerou-se um período de vida útil dos equipamentos de 15 anos. Apresentam-se na Tabela 4.14 os valores obtidos para os indicadores de viabilidade económica VAL, TIR e PR.

Tabela 4.14 – Indicadores da viabilidade económica do sistema 4.2.4

CAPEX = 300 k€
VAL (20 Anos) = 930 k€
TIR = 31,4 %/ano
PR = 3,1 anos

Analisando os resultados que constam na Tabela 4.14, verificamos que estes são muito atrativos. Realça-se a excelente TIR, que revela um risco económico mesmo muito baixo [30] e um PR (3,1 anos) muito inferior ao período de vida útil dos equipamentos. Adicionalmente, também existe uma excelente relação entre os benefícios e custos, ou seja, representa um EBITDA elevado para um CAPEX mais reduzido, resultando dos valores que foram obtidos.

Na Figura 4.18 apresenta-se um gráfico que contém o comportamento económico deste sistema de recuperação de calor residual.

Conseguimos, através da análise do gráfico da Figura 4.18, perceber de que forma o investimento considerado se comporta ao longo do tempo. Percebemos também que o montante poupado é praticamente constante (considerou-se um valor fixo para o custo de produção de vapor) e de que forma esse valor impacta o *cash flow* do investimento.

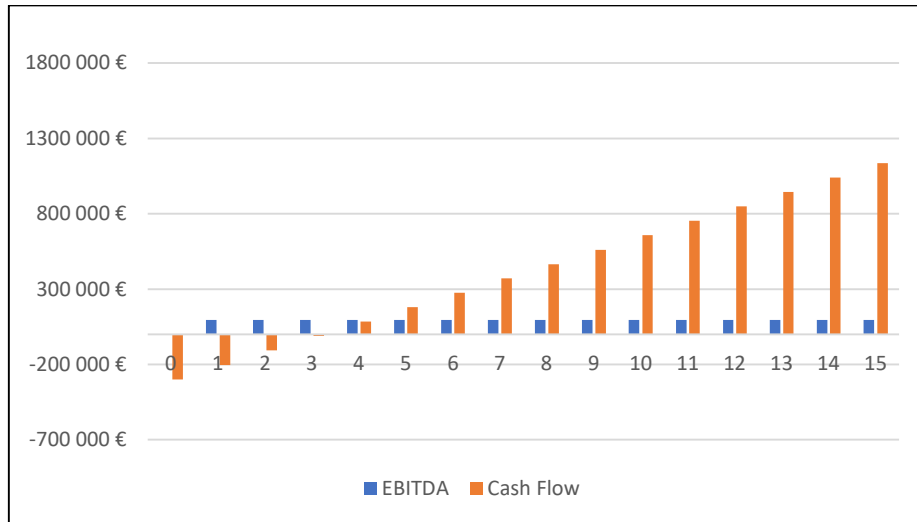


Figura 4.18 – Comportamento económico da técnica 4.2.4

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram identificadas e caracterizadas as fontes de calor residual mais relevantes do complexo industrial da “The Navigator Company” localizado na Figueira da Foz. Foram identificadas as fontes com grande potencial de recuperação de calor e foram consideradas possíveis técnicas para a sua utilização.

A técnica analisada de recuperação de calor residual para produção de energia elétrica não é rentável economicamente. Isto deve-se a ela apresentar um balanço energético global negativo. No entanto, numa análise em que se considerou uma eficiência substancialmente superior dos equipamentos envolvidos demonstrou-se que ela já apresentava um balanço energético positivo e algum interesse económico. O pressuposto era evidenciar que, apesar de não ser viável à data deste estudo, poderá ser viável num futuro próximo se se tiver em consideração que os COP’s das bombas-de-calor estão a aumentar assim como o rendimento dos sistemas baseados em ciclos ORC. Esta técnica tem relevância para um estudo futuro.

As técnicas estudadas baseadas na instalação de bombas de calor (usando o efluente líquido ou a água da torre de refrigeração geral) também demonstraram não ser rentáveis, isto porque a poupança que se obtém não é suficiente para compensar o consumo da bomba-de-calor. Uma vez mais, estas técnicas podem ter potencial de implementação, visto que se atualmente estivesse a ser produzido com recurso a gás natural, estas já seriam rentáveis. Contando, novamente, com as melhorias futuras nos COP’s das bombas-de-calor, estas técnicas tornar-se-iam mais interessantes do ponto de vista empresarial.

O sistema preconizado para a recuperação do calor residual dos compressores de ar demonstrou ter uma razoável viabilidade económica. Muito porque tem um custo inicial de investimento mais reduzido (que outras técnicas anteriormente estudadas) e onde se conseguem poupanças de vapor (e monetárias) significativas. Para além disso, é uma técnica pouco invasiva (em termos de layout do complexo industrial), pois necessita de pouco espaço e é de fácil instalação, acessos e requer pouca manutenção.

Também a técnica que permite fazer a recuperação de calor do tanque de smelt, através da introdução de um permutador de calor apresenta boa viabilidade económica. Ela é interessante também pelo facto de não ser um sistema muito complexo de implementar e pelo custo mais

reduzido de investimento, quando comparado com sistemas baseados em bombas-de-calor e/ou em ciclos ORC's.

Na sequência deste estudo surgiram questões que não houve oportunidade de analisar e, que, como tal são dignas de sugerir com assuntos a abordar em trabalhos futuros.

Primeiramente seria a busca por outras fontes de calor residual que possam existir no complexo industrial em questão. Embora se tenham identificado as de maior potencial de recuperação, seria interessante encontrar outras fontes de calor residual. Sugere-se o estudo de outras técnicas para a recuperação do calor, que possam estar a surgir no mercado (encontram-se algumas em desenvolvimento, como materiais de mudança de fase, PCM's, que funcionam como armazenadores de calor latente absorvendo calor quando fundem e libertando calor quando solidificam) ou que se encontram ainda em desenvolvimento. Outra sugestão será efetuar uma análise mais exaustiva das técnicas de recuperação aqui apresentadas e que, sendo economicamente viáveis, possam configurar uma possibilidade de implementação.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Idealista, “Aumento dos custos energéticos,” Outubro 2022. [Online]. Available: <https://www.idealista.pt/news/financas/economia/2022/09/30/54295-energia-precos-do-gas-e-luz-mais-caros-desde-1-de-outubro>. [Acedido em 09 2023].
- [2] Exergy-orc, “Heat Recovery from industry,” [Online]. Available: <https://www.exergy-orc.com/application/heat-recovery-from-industrial-process>. [Acedido em 09 2023].
- [3] The Navigator Company, “Perfil da Companhia,” [Online]. Available: <http://www.thenavigatorcompany.com/Institucional/Perfil-da-Companhia>. [Acedido em 09 2023].
- [4] The Navigator Company, “The Navigator Company - Figueira da Foz,” [Online]. Available: <http://www.thenavigatorcompany.com/Institucional/A-Nossa-Actividade/Figueira-da-Foz>. [Acedido em 09 2023].
- [5] The Navigator Company, “Neutralidade Carbónica,” [Online]. Available: http://thenavigatorcompany.com/var/ezdemo_site/storage/original/application/3d6c04b35d3ec8806b3e60d35e2791ab.pdf. [Acedido em 09 2023].
- [6] Jornal t, “Custos da Energia,” [Online]. Available: <https://jornal-t.pt/noticia/custos-da-energia-em-destaque-na-convencao-euratex/>. [Acedido em 09 2023].
- [7] R. Figueiredo, “Permutadores de Calor,” em *Transmissão de Calor - Fundamentos e Aplicações*, Lidel, 2015, pp. 291-293.
- [8] M. T. J. Sarah Broberg Viklund, “Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction, Energy Conversion and Management,” 2014, Volume 77. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.052>. [Acedido em 09 2023].

- [9] Dep. of Energy, US, “Industrial Heat Pumps for Steam and Fuel Savings,” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/heatpump.pdf>. [Acedido em 09 2023].
- [10] “Permutador de Calor,” [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/torre-de-resfriamento-alexandre-arag%C3%A3o-/?originalSubdomain=pt>. [Acedido em 26 09 2023].
- [11] M. Silva, “CONSTRUÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR TUBULAR EM ESPIRAL”. DOI : [10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/tubular-em-espiral](https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/tubular-em-espiral).
- [12] Orcan Energy, “Heat Check,” [Online]. Available: <https://www.orcan-energy.com/>. [Acedido em 09 2023].
- [13] A. Laval, “Organic Rankine Cycle (ORC),” 2022. [Online]. Available: <https://www.alfalaval.com/industries/energy-and-utilities/sustainable-solutions/energy-efficiency/waste-heat-recovery/orc/>. [Acedido em 09 2023].
- [14] LG, “Chiller de absorção,” [Online]. Available: <https://www.lg.com/br/business/chiller-queima-direta>. [Acedido em 09 2023].
- [15] Thermal engineering, “Ciclo de compressão de vapor,” [Online]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-ciclo-de-compressao-de-vapor-ciclo-de-refrigeracao-definicao/>. [Acedido em 09 2023].
- [16] Dep. of Energy, US, “Absorption Chillers for CHP Systems,” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/06/f35/CHP-Absorption%20Chiller-compliant.pdf>. [Acedido em 26 09 2023].
- [17] Sciencedirect, “Adsorption Chiller,” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/adsorption-chiller>. [Acedido em 09 2023].
- [18] “A renewable heat solution for water ingress in the Glasgow subway tunnel system,” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/A-typical-diagram-of-a-water-source-heat-pump_fig2_286358619. [Acedido em 09 2023].

- [19] REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR, “Ciclos termodinâmicos e rendimentos de máquinas térmicas,” [Online]. Available: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/pdf/2020/014/>. [Acedido em 26 09 2023].
- [20] M. N. d. Silva, “Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial,” 2005. [Online]. Available: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/refrigeracao/EficiEnergSist.Refri.IndustrialCom.pdf>. [Acedido em 09 2023].
- [21] U.S. Department of Energy, “Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry,” 2008, p. 23. [Online]. Available: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf. [Acedido em 09 2023].
- [22] Alfa laval, “Alfa laval Energy Balance CaseStory,” [Online]. Available: https://assets.alfalaval.com/documents/pd4a70573/alfa-laval-energy-balance-casestory-en.pdf?_ga=2.138401208.985226642.1675443196-7237835.1675443196&_gl=1*1f4tr42*_ga*NzIzNzgzNS4xNjc1NDQzMTk2*_ga_VR90J5D3K9*MTY3NTQ0MzE5Ni4xLjEuMTY3NTQ0MzE5Ni4wLjAuMA. [Acedido em 09 2023].
- [23] Swep Company, “Using available energy for productive use,” [Online]. Available: <https://www.swep.net/applications/case-stories/using-available-energy-for-productive-use/>. [Acedido em 09 2023].
- [24] ArcelorMittal USA, Inc., “EERE Success Story—Steel Mill Powered by Waste Heat Recovery System,” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/success-stories/articles/eere-success-story-steel-mill-powered-waste-heat-recovery-system>. [Acedido em 09 2023].
- [25] Exame.com, “Banho de 10 minutos,” [Online]. Available: <https://exame.com/tecnologia/banho-passou-de-10-minutos-e-desperdicio/>. [Acedido em 09 2023].
- [26] “KSB Sonolyzer,” [Online]. Available: <https://www.ksb.com/pt-pt/software-e-know-how/ferramentas-de-analise/sonolyzer>. [Acedido em 09 2023].

- [27] “Preço de carbono supera os 50 euros por tonelada,” Governo de Portugal, 2021. [Online]. Available: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/noticia?i=preco-de-carbono-supera-os-50-euros-por-tonelada>. [Acedido em 09 2023].
- [28] Enogia, “Sistema ORC ENO-100LT,” [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/pt/prod/enogia/product-243263-2458412.html>. [Acedido em 09 2023].
- [29] Researchgate, “Análise teórica da recuperação de calor para geração de energia usando ORC,” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/321378897_Analise_teorica_da_recuperacao_de_calor_para_geracao_de_energia_em_industrias_de_cimento_e_cal_utilizando_o_ciclo_de_Rankine_organico. [Acedido em 09 2023].
- [30] A. Raimundo, “Análise da viabilidade económica de projetos de investimento,” FCTUC, 2021.
- [31] Atlas Copco, “Livro de Instruções - Compressores de Ar Estacionários ZR250,” 1998-04. [Online]. Available: https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/oil-free-air/documents/2935053813_leaflet%20ZRZT110-275_LR_ineko.pdf. [Acedido em 09 2023].
- [32] Atlas Copco, “Atlas Copco ZR 250,” 2016. [Online]. Available: https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/oil-free-air/documents/2935053813_leaflet%20ZRZT110-275_LR_ineko.pdf. [Acedido em 09 2023].
- [33] Atlas Copco, “Atlas Copco ZR 400,” 2017. [Online]. Available: [https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/oil-free-air/documents/zr-zt-300-750-&-zrzt-75-90-vsd-\(ff\)/ZR%20300-750%20&%20ZRZT%20400-900%20VSD_EN.pdf](https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/oil-free-air/documents/zr-zt-300-750-&-zrzt-75-90-vsd-(ff)/ZR%20300-750%20&%20ZRZT%20400-900%20VSD_EN.pdf). [Acedido em 09 2023].
- [34] Atlas Copco, “Energy Recovery ER 900,” [Online]. Available: <https://www.atlascopco.com/en-us/compressors/service/efficiency/energy-recovery/energy-recovery-unit-er-90-900#ctba-product-properties-table>. [Acedido em 09 2023].

- [35] Kaeser, “Recuperação de calor de compressores de ar,” [Online]. Available:
<https://pt.kaeser.com/produtos/compressores-de-parafuso/sistema-de-recuperacao-de-calor/>. [Acedido em 09 2023].
- [36] Thermal Energy, “Heat Recovery from Smelt Dissolving tank,” [Online]. Available:
https://www.thermalenergy.com/uploads/9/4/5/9/9459901/heat_recovery_from_smelt_dissolving_tank_vent_2009_01_26.pdf. [Acedido em 09 2023].

ANEXOS

Anexo A – Folha de especificações da água

Atlas Copco

Water specification table

In case water is not in line with recommended values or if any doubt, consult Atlas Copco.

Parameter	Unit	Closed loop	
		65 °C	95 °C
pH		7.5 - 9.3	7.5 - 9.3
Conductivity	µs/cm	< 4000	50 - 600
Total Dissolved Solids (TDS)	mg/L	Is limited by the conductivity. TDS required to calculate RSI	
Ca-hardness	ppm CaCO ₃	< 1000	< 50
Total Alkalinity	ppm CaCO ₃	Required to calculate RSI	
Ryznar Stability Index (RSI)	(*)	5.6 - 7.5	5.6 - 7.5
Chlorine	ppm	Not done	Not done
Chlorides	ppm	< 500 (**)	< 100
Nitrates	ppm	Required to calculate Chemical Corrosion Index	
Sulphates	ppm	< 400	< 200
Chemical Corrosion Index	(***)	< 1	< 1
Iron	ppm	< 1	< 0.2
Manganese	ppm	< 0.2	< 0.05
Copper	ppm	< 1	< 0.2
Ammonium	ppm	< 0.5	< 0.5
Suspended Solids (maximum 10 µ)	ppm	< 10	< 1
Oil or Grease	ppm	< 1	< 1
Biology	CFU/m L	< 10 ³	< 10 ³

(*) Procedure for calculation of RSI and required actions: see Ryznar stability index

(**) Limit is function of RSI

(***) Chemical Corrosion Index = $\frac{([SO_4^{2-}] + [Cl^-] + [NO_3^-])}{[T-Alk]}$ all in meq/l

Figura 6.1 - Tabela de especificações da água de refrigeração (ER 900)

Anexo B – Imagens da torre de refrigeração geral



Figura 6.2 - Torre de refrigeração geral

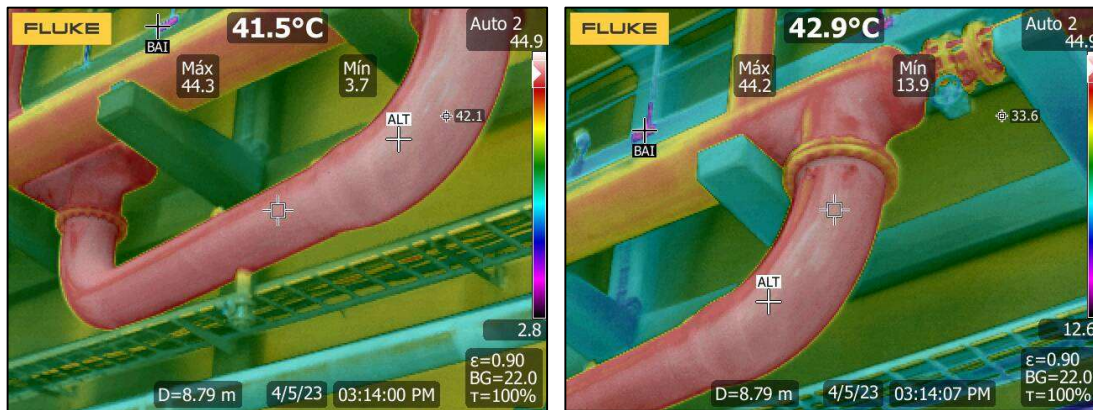


Figura 6.3 - Medições de temperatura antes da torre de refrigeração geral



Figura 6.4 - Medição de temperatura à saída da torre de refrigeração geral

Anexo C – Imagens da torre de refrigeração dos efluentes líquidos



Figura 6.5 - Torre de refrigeração dos efluentes líquidos



Figura 6.6 - Medições de temperatura dos efluentes. À esquerda do efluente ácido (alcalino é aproximadamente igual) e à direita do efluente de baixo COD