

Análise Técnico-Económica de Soluções Energéticas Alternativas ao Aquecimento por Vapor na Indústria Alimentar

INÊS FILIPA FERNANDES INVERNO
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

Orientadores:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca
Licenciada Ana Cristina Pereira Teixeira

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel de Abreu e Silva

Vogais:

Doutor Miguel José Pereira Sales Cavique Santos
Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Análise Técnico-Económica de Soluções Energéticas Alternativas ao Aquecimento por Vapor na Indústria Alimentar

INÊS FILIPA FERNANDES INVERNO
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de
Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

Orientadores:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca, ISEL/IPL
Licenciada Ana Cristina Pereira Teixeira, ACET

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel de Abreu e Silva, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor Miguel José Pereira Sales Cavique Santos, Escola
Naval/Marinha
Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca, ISEL/IPL

Agradecimentos

“Devagar se vai ao longe”, e não apressar o processo revelou-se o mais importante ao longo desta jornada. A persistência e a resiliência foram qualidades que consolidei nesta experiência, pela qual me sinto grata.

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais e à minha família, pelo apoio incansável e por acreditarem sempre em mim e no meu potencial.

Ao meu namorado, agradeço pelo conforto constante ao longo destes anos e por me lembrar que o trabalho não é tudo, sendo o nosso bem-estar a verdadeira prioridade.

Às amigas que construí nestes cinco anos de ensino superior, deixo um especial reconhecimento pela companhia, compreensão e companheirismo — porque percorrer este caminho acompanhada foi muito mais enriquecedor e leve do que fazê-lo sozinha.

Expresso também a minha sincera gratidão à Professora Cláudia Casaca, pela orientação prestada neste trabalho e pelo apoio constante ao longo de todo o meu percurso académico no ISEL, bem como à Engenheira Ana Teixeira, pelo acompanhamento ao longo desta etapa.

Por último, agradeço à ACET – Antero Cardoso Engenharia Termodinâmica, Lda., em particular ao Engenheiro João Cardoso, pela partilha de conhecimento, pela disponibilidade e pela forma como me integrou tão bem na sua equipa durante o estágio.

...

Declaração de integridade

Declaro que este relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

Lisboa, 31 de dezembro de 2025

Análise Técnico-Económica de Soluções Energéticas Alternativas ao Aquecimento por Vapor na Indústria Alimentar

Resumo

A crescente preocupação com o impacto das emissões de gases com efeito estufa na intensificação do aquecimento global tem conduzido à procura de medidas que promovam a transição energética e a neutralidade carbónica. A definição de metas internacionais e nacionais para a redução das emissões obriga à reavaliação de processos industriais dependentes de combustíveis fósseis, nomeadamente os associados ao aquecimento a alta temperatura.

No âmbito do estágio de natureza profissional, em colaboração com a ACET – Antero Cardoso Engenharia Termodinâmica, Lda., procedeu-se à análise técnico-económica de soluções energéticas alternativas ao aquecimento por vapor num complexo industrial de produção de margarina. O processo em estudo apresenta elevada exigência térmica, atualmente suprida por vapor gerado numa caldeira a gás natural.

Foram estudadas três soluções: (i) bomba de calor amoníaco-água (R717-H₂O), (ii) configuração em cascata com bomba de calor ar-água e bomba de calor água-água (ar-H₂O-H₂O) e (iii) caldeira elétrica de resistência. A comparação considerou consumo energético, viabilidade tecnológica e impacto económico. A bomba de calor amoníaco-água é a alternativa mais viável. Relativamente à bomba de calor ar-H₂O-H₂O e à caldeira elétrica de resistência, apresenta coeficiente de desempenho 2,1 e 4 vezes superior e custo total (incluindo o investimento inicial) 2,4 e 4,3 vezes inferior, traduzindo-se em poupanças estimadas de 4 931 712 € e 11 425 247 €, respetivamente.

Além das vantagens energéticas e económicas, esta solução reduz o desperdício térmico e o consumo elétrico do sistema de refrigeração existente, permitindo integração térmica entre aquecimento e arrefecimento. Esta abordagem contribui para a sustentabilidade energética e para a redução da pegada carbónica da instalação industrial.

Palavras-chave: Neutralidade Carbónica, Aquecimento, Bomba de Calor, Caldeira Elétrica, Estudo Técnico-Económico.

Technical-Economical Analysis of Alternative Solutions to Steam in the Food Industry

Abstract

The growing concern about the impact of greenhouse gas emissions on the intensification of global warming has driven the search for measures that promote energy transition and carbon neutrality. The establishment of international and national targets for emission reduction requires the reassessment of industrial processes dependent on fossil fuels, particularly those associated with high-temperature heating.

Within the scope of a professional internship, and in collaboration with ACET – Antero Cardoso Engenharia Termodinâmica, Lda., a techno-economic analysis was carried out to evaluate alternative energy solutions to steam heating in an industrial margarine production facility. The process under study presents a high thermal demand, which is currently met by steam generated in a natural gas-fired boiler.

Three alternative solutions were analysed: (i) an ammonia–water heat pump, (ii) cascade configuration with an air–water heat pump and a water–water heat pump, and (iii) an electric resistance boiler. The comparison considered energy consumption, technological feasibility, and economic impact. The results demonstrate that the ammonia–water heat pump is the most viable alternative. Compared to the air–water heat pump and the electric resistance boiler, it achieves a coefficient of performance 2,1 and 4 times higher, and a total cost (including initial investment) 2,4 and 4,3 times lower, corresponding to estimated savings of 4 931 712 € and 11 425 247 €, respectively.

In addition to its energy and economic advantages, this solution reduces thermal waste and the electricity consumption of the existing refrigeration system, enabling thermal integration between heating and cooling. This approach contributes to energy sustainability and to the reduction of the industrial facility's carbon footprint.

Keywords: Carbonic Neutralisation, Heating, Heat Pump, Electric Boiler, Technical-Economical Study

Lista de Símbolos

C_{elet}	Custo de eletricidade [€/kWh]
C_{energia}	Custo do consumo de energia [€]
C_{inv}	Custo de investimento [€]
C_{om}	Custo de operação e manutenção [€]
C_p	Calor específico [J/kg K]
C_{rev}	Custo de revenda [€]
ΔT	Diferença de temperatura [K]
η	Eficiência
h_{op}	Horas de operação [h]
ρ	Massa volúmica [kg/m ³]
P	Potência térmica [W]
P_{abs}	Potência absorvida [W]
$P_{\text{crítica}}$	Pressão crítica [Pa]
$P_{\text{teórica}}$	Potência térmica teórica [W]
P_{efetiva}	Potência térmica efetiva [W]
P_{equip}	Potência térmica do equipamento [W]
\dot{Q}_{FT}	Potência térmica transferida para a fonte quente [W]
$T_{\text{crítica}}$	Temperatura crítica [K]
$T_{\text{fusão}}$	Temperatura de fusão [K]
\dot{V}	Caudal volúmico [m ³ /s]
\dot{W}_C	Potência elétrica consumida pelo compressor [W]

Lista de siglas

AQS	Água Quente Sanitária
AT	Alta Temperatura
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BC	Bomba de Calor
BT	Baixa Temperatura
CE	Caldeira Elétrica
CEE	Caldeira Elétrica de Eléctrodo
CEES	Caldeira Elétrica de Eléctrodo Submersível
CEEJAV	Caldeira Elétrica de Eléctrodo de Jato de Alta Velocidade
CER	Caldeira Elétrica de Resistência
CFC	Clorofluorocarbonetos
CGN	Caldeira a Gás Natural
COP	Coefficiente de Desempenho
EPBD	Diretiva Europeia relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HCFC	Hidroclorofluorocarboneto
HFC	Hidrofluorocarboneto
HFO	Hidrofluorolefina
LCC	<i>Lifecycle Cost</i>
ODP	<i>Ozone Destruction Potential</i>
PNEC	Plano Nacional Energia e Clima
RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbónica
UE	União Europeia

Índice

Agradecimentos	i
Declaração de integridade	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Símbolos	ix
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivações	2
1.2 Eletrificação e descarbonização da indústria	5
1.3 Objetivos	8
1.4 Estrutura do documento	8
2 Produção de Vapor	11
2.1 Metodologias de produção em contexto industrial	11
2.1.1 <i>Caracterização físico-química e propriedades do vapor</i>	11
2.1.2 <i>Tecnologias de caldeiras</i>	12
2.1.2.1 Caldeira aquatubular.....	13
2.1.2.2 Caldeira pirotubular.....	13
2.1.2.3 Caldeira elétrica	14
2.2 Limitações e impactos ambientais	15
2.3 Soluções energéticas alternativas	16
2.3.1 <i>Bomba de calor</i>	18
2.3.1.1 Tipologias e aplicações industriais.....	20
2.3.1.2 Fluidos frigorigéneos e critérios de seleção	21

2.3.1.3	Bombas de calor de alta temperatura	26
2.3.2	<i>Caldeira elétrica</i>	29
2.3.2.1	Tipologias e aplicações	30
2.3.2.2	Condições de operação	34
3	Unidade de Produção de Margarina	35
3.1	Caracterização do processo produtivo.....	36
3.2	Descrição da instalação existente.....	37
3.3	Dimensionamento da instalação	39
3.3.1	<i>Potência térmica necessária</i>	39
3.3.2	<i>Seleção dos equipamentos</i>	42
3.3.2.1	Bomba de calor	43
3.3.2.2	Caldeira elétrica	48
4	Análise Técnico-Económica	49
4.1	Análise tecnológica.....	49
4.2	Análise energética	50
4.3	Análise económica	51
5	Conclusões e trabalho futuro	61
	Referências bibliográficas	65
	Anexos	71
	Anexo A – Ficha Técnica Caldeira Elétrica de Resistência	73
	Anexo B – Excerto de P&ID da Unidade Industrial desenvolvido pela ACET	87
	Anexo C – Dados da Auditoria da Unidade Industrial de Produção de Margarina	89
	Anexo D – Ficha Técnica Bomba de Calor R717-H₂O.....	91
	Anexo E – Ficha Técnica Bomba de Calor Ar-H₂O-H₂O.....	99
	Anexo F - Relatório Engineering Economic Analysis: Lifecycle Summary	105
	Anexo G - Relatório Engineering Economic Analysis: Analysis Details ...	109

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Evolução das emissões totais nacionais de GEE [9].	3
Figura 1.2 - Evolução do consumo de energia primária por fonte energética [10].	4
Figura 1.3 - Evolução do consumo de energia final por setor de atividade [4].	4
Figura 1.4 - Consumo de energia final por setor de atividade, em 2022 [4].	5
Figura 1.5 - Consumo energético por setor industrial [4].	5
Figura 1.6 - Consumo final de energia por utilização, na Europa, adaptado de [12].	6
Figura 1.7 - Distribuição do consumo de energia primária na UE27, adaptado de [12].	6
Figura 1.8 - Comparação do consumo energético e das emissões de CO ₂ entre CE ou BC e CGN, adaptado de [13].	7
Figura 2.1 - Diagrama de pressão - entalpia da água, adaptado de [17].	12
Figura 2.2 - Esquema de caldeira aquatubular, adaptado de [18].	13
Figura 2.3 - Esquema de caldeira piro-tubular, adaptado de [18].	14
Figura 2.4 - Esquema de caldeira elétrica, adaptado de [18].	15
Figura 2.5 - Esquema do princípio da bomba de calor, adaptado de [25].	18
Figura 2.6 - Princípio de funcionamento de uma bomba de calor, adaptado de [26].	19
Figura 2.7 - Diagrama de pressão-entalpia para o ciclo de funcionamento de bomba de calor, adaptado de [26].	19
Figura 2.8 - Evolução dos fluidos frigoríficos, adaptado de [28].	21
Figura 2.9 - COP em função da temperatura da fonte e da potência térmica, adaptado de [37].	25
Figura 2.10 - Esquema de funcionamento em cascata de bomba de calor, adaptado de [43].	27
Figura 2.11 - Exemplo de fontes de calor de uma bomba de calor de alta temperatura na indústria, adaptado de [42].	28
Figura 2.12 - Fluxograma do princípio de funcionamento da caldeira elétrica.	29
Figura 2.13 - Caldeira elétrica de resistência a) e de eletrodo b), adaptado de [49].	30
Figura 2.14 - Caldeira elétrica de resistência a) e conjunto de resistências elétricas b), adaptado de Anexo A.	30

Figura 2.15 - Constituição da caldeira elétrica de elétrodos, adaptado de [52].	31
Figura 2.16 – Componentes da caldeira de elétrodo de jato de alta velocidade, adaptado de [58].	33
Figura 3.1 – Etapas do processamento de margarina, adaptado de [62].	36
Figura 3.2 – Esquema da instalação existente.	38
Figura 3.3 – Gráfico de resumo das necessidade térmicas reais da unidade industrial.	41
Figura 3.4 – Perfil de produção de vapor face ao consumo elétrico dos compressores de frio, adaptado de Anexo C.	43
Figura 3.5 - Esquema de princípio da BC de AT R717-H ₂ O, adaptado de Anexo D.	44
Figura 3.6 – Esquema de princípio da BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O	46
Figura 3.7 - Esquema da CER.	48
Figura 4.1 – Gráfico para análise do LCC das tecnologias em estudo	56

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação de segurança para fluidos frigorigêneos [31].	23
Tabela 2.2 - Características de fluidos frigorigêneos, adaptado de [32] e [33].	23
Tabela 2.3 – Propriedades termodinâmicas de fluidos frigorigêneos naturais, adaptado de [35].	24
Tabela 2.4 – COP para diferentes fluidos frigorigêneos, adaptado de [39].	26
Tabela 2.5 – Exemplos de características dos elétrodos que afetam a eficiência da caldeira elétrica.	32
Tabela 3.1 – Resumo da análise tecnológica comparativa entre bomba de calor de alta temperatura e caldeira elétrica de resistência.	39
Tabela 3.2 - Características da água quente no circuito secundário de cada permutador de calor.	40
Tabela 3.3 - Propriedades termofísicas consideradas e respectivos valores.	41
Tabela 3.4 - Potência térmica teórica e efetiva em cada permutador de calor.	42
Tabela 3.5 – Características técnicas e construtivas da BC de AT R717-H ₂ O.	45
Tabela 3.6 - Cálculo do COP global da BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O.	47
Tabela 3.7 - Características técnicas e construtivas da BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O.	47
Tabela 3.8 – Características técnicas e construtivas da CER.	48
Tabela 4.1 - Comparação energética entre as tecnologias em estudo.	51
Tabela 4.2 – Custo de investimento das tecnologias em estudo.	52
Tabela 4.3 - Custo de consumo anual de eletricidade por equipamento.	53
Tabela 4.4 - OPEX das tecnologias em estudo.	54
Tabela 4.5 - Valores de custos de investimento e operação introduzidos no <i>software</i> .	55
Tabela 4.6 - Resultado da comparação entre CER e BC de AT R717-H ₂ O.	57
Tabela 4.7 - Resultado da comparação entre BC de AT R717-H ₂ O e BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O.	57
Tabela 4.8 - Resultado da comparação entre CER e BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O.	58

1 Introdução

A neutralidade carbónica constitui um dos principais objetivos no combate às alterações climáticas, nomeadamente no que concerne à mitigação do aquecimento global [1]. Para alcançar tal objetivo, têm sido desenvolvidas e implementadas diversas estratégias que visam reduzir a emissão de gases com efeito estufa (GEE).

Os GEE são compostos presentes na atmosfera que desempenham um papel semelhante ao vidro numa estufa: absorvem a energia e o calor do Sol que são irradiados pela superfície da Terra, conserva-os na atmosfera e evitam que escapem para o espaço. Este fenómeno, conhecido como efeito de estufa, é essencial para a manutenção da temperatura do planeta, e, conseqüentemente, para a existência de vida na Terra [2]. Muitos destes gases com efeito estufa são libertados naturalmente na atmosfera, no entanto, a atividade humana acrescenta enormes quantidades, aumentando assim o efeito estufa e contribuindo para o aquecimento global [2]. Em Portugal, o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) estabelece a redução entre 45% e 55% das emissões de GEE até 2030, entre 65% e 75% até 2040, e entre 85% a 90% até 2050, face ao ano de referência de 2005 [3].

No contexto europeu, o setor industrial representou 20,3% das emissões de GEE em 2022 [2]. A indústria alimentar é um dos vários setores que consome energia primária para produção de bens. O gás natural é uma das fontes de energia primária mais utilizadas na indústria representando, em 2022, 22,6% do consumo total de energia primária em Portugal [4]. A elevada dependência da importação de gás natural tem impulsionado a procura por alternativas baseadas em energia de produção nacional, nomeadamente a eletricidade.

A eletricidade é uma fonte de energia final cuja produção nacional tem vindo a aumentar, principalmente através de fontes de energia renováveis. Esta transição não só contribui para a redução das emissões de GEE, assim como diminui a necessidade de importação de fontes energéticas, promovendo a autonomia energética do país.

Na indústria alimentar, a utilização de água quente, frequentemente produzida por sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), constitui um fator determinante na procura por soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis. A adoção de tecnologias que reduzam a dependência de fontes energéticas importadas, aliada à melhoria da eficiência dos processos e equipamentos, assume-se como uma estratégia fundamental para a competitividade do setor.

Neste contexto, a implementação de soluções inovadoras pode não só reduzir o consumo de energia e os custos operacionais, como também mitigar o impacto ambiental dos processos produtivos. A integração de sistemas que aproveitem calor residual, resultante de processos industriais, representa uma abordagem promissora para maximizar a eficiência energética e reduzir desperdícios, promovendo, assim, um modelo mais sustentável para a indústria alimentar.

1.1 Enquadramento e motivações

O aquecimento global é provocado pela emissão de GEE provenientes de processos naturais e antropogénicos. Para mitigar os impactos das alterações climáticas, a União Europeia (UE) tem implementado diversas políticas e regulamentos com o objetivo de reduzir a emissão destes gases e promover a sustentabilidade ambiental.

O Protocolo de Quioto, assinado em 1997, foi o primeiro documento assinado internacionalmente que referencia as ações a ser praticadas para evitar o avanço das alterações climáticas, limitando as emissões quantificadas de GEE nos países desenvolvidos [5]. Posteriormente, em 2016, entrou em vigor o Acordo de Paris, que estabeleceu um quadro global para a descarbonização das economias mundiais e estabeleceu como meta limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C, de forma a reduzir os riscos e impactos das alterações climáticas [6].

Em linha com este compromisso, a UE definiu, em 2019, o objetivo de alcançar a neutralidade carbónica até 2050. Com isto, Portugal desenvolveu um plano a longo prazo para combater as alterações climáticas e atingir a neutralidade carbónica, o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050). Este identifica os principais vetores de descarbonização em todos os setores da economia e estabelece a trajetória para atingir os objetivos estabelecidos, nomeadamente a redução das emissões de GEE em mais de 85% face aos níveis de 2005, cumprindo o estabelecido no Acordo de Paris [7].

A descarbonização do setor industrial foca-se na redução de cerca de 80% da emissão de GEE que pode ser obtida através da eletrificação dos sistemas convencionais, da utilização de biomassa como combustível ou através do aumento da eficiência do equipamento. Ainda assim, a redução das emissões de GEE deve ficar pelos 60% [7].

Para assegurar o cumprimento destas metas, Portugal elaborou o PNEC 2030, que define objetivos específicos para a próxima década, nomeadamente em termos de redução das emissões de GEE, incorporação de energia renováveis, melhoria da eficiência energética e reforço das interligações energéticas [3].

Complementarmente, a modernização dos edifícios, incluindo os industriais, constitui uma boa prática para o aumento da eficiência energética dos edifícios e, conseqüentemente, para a redução das emissões de GEE e do seu consumo energético, como previsto nos requisitos mínimos de desempenho energético da Diretiva Europeia relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD - *Energy Performance of Buildings Directive*) [8].

A implementação destas medidas permitiu um decréscimo de 34,5% nas emissões totais de GEE entre 2005 e 2022, sendo que o PNEC 2030 estabelece como meta uma redução de 45% a 55% das emissões até ao final da década [3].

De acordo com os dados referentes a 2022, as emissões de GEE, sem contabilização das emissões de uso do solo e florestas, são cerca de 56,4 MtCO_{2eq}, representando uma diminuição de 34,8% face a 2005, embora com um ligeiro aumento face a 2021 [9], como se observa na Figura 1.1.

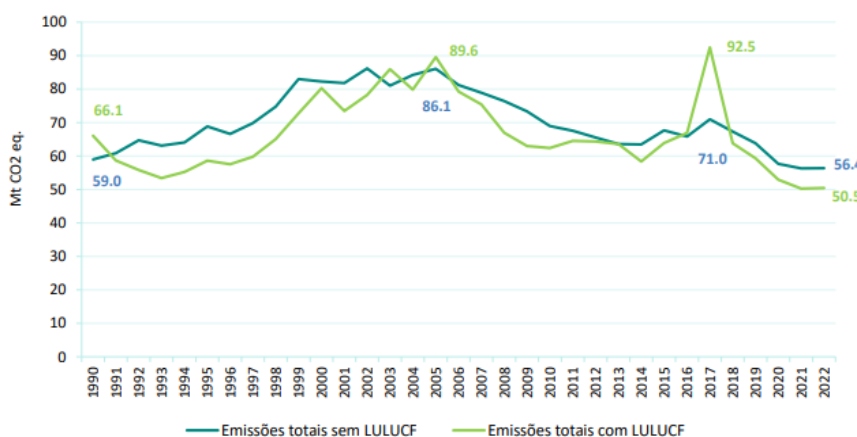


Figura 1.1 - Evolução das emissões totais nacionais de GEE [9].

No que concerne ao consumo de energia primária, regista-se uma diminuição do uso de carvão, e petróleo e derivados, e um aumento do consumo de gás natural e energia elétrica, de 128,2% e 254,2%, respetivamente, desde 2005 até 2022, como se observa na Figura 1.2.

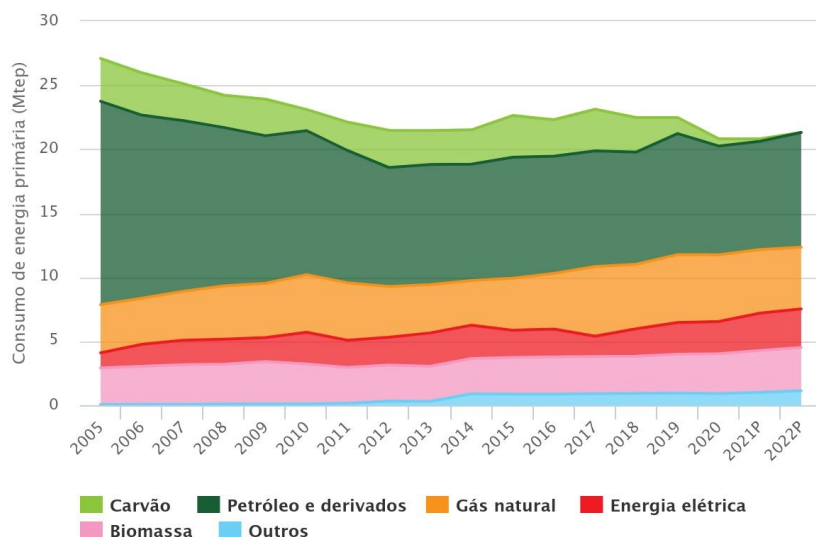


Figura 1.2 - Evolução do consumo de energia primária por fonte energética [10].

Quanto ao consumo de energia final, registou-se uma redução de 1,1% no consumo de gás natural no período de 2021 para 2022. Em contraste, verificou-se um aumento de 0,1% no consumo de eletricidade no mesmo período [4]. Em consequência da redução do consumo de gás natural, registou-se uma diminuição de 26,2% da importação desta fonte energética em 2022, em comparação com o ano de 2021 [4].

Adicionalmente, ao analisar a evolução do consumo energético no setor industrial, apresentado na Figura 1.3, verifica-se um decréscimo de aproximadamente 4,5% no consumo de energia final entre 2002 e 2022, totalizando em 2022 um consumo de 29,3% face ao total, conforme apresentado na Figura 1.4 [4].

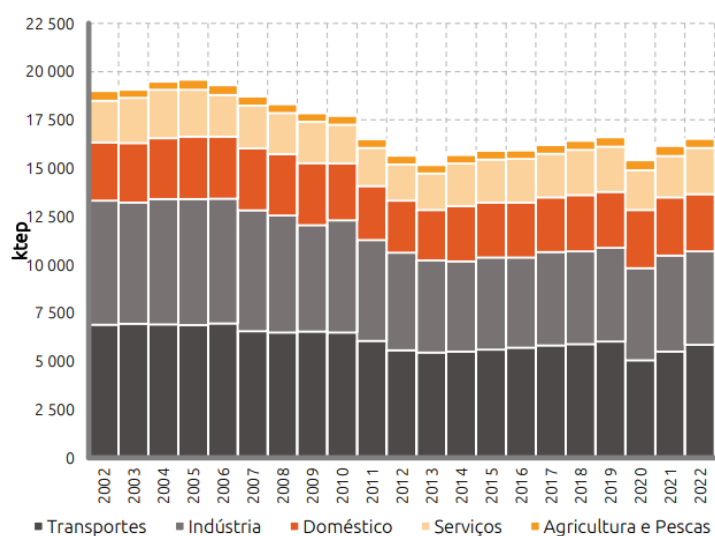


Figura 1.3 - Evolução do consumo de energia final por setor de atividade [4].

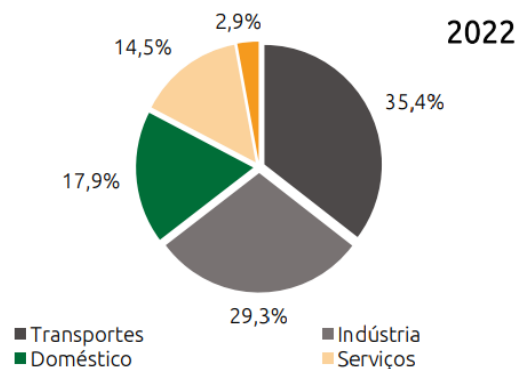


Figura 1.4 - Consumo de energia final por setor de atividade, em 2022 [4].

No setor industrial, como se observa na Figura 1.5, a evolução do consumo energético entre 2012 e 2022 apresenta uma tendência de crescimento, com um aumento de 1,8% no consumo de gás natural e de 4,5% no consumo de eletricidade, enquanto o consumo de petróleo registou uma redução de 2,6% [4]. Estes dados indicam uma substituição progressiva do petróleo pelo gás natural, bem como uma preferência crescente pela eletrificação dos processos industriais em detrimento do uso de combustíveis fósseis emissores de GEE, com tendência para aumentar.

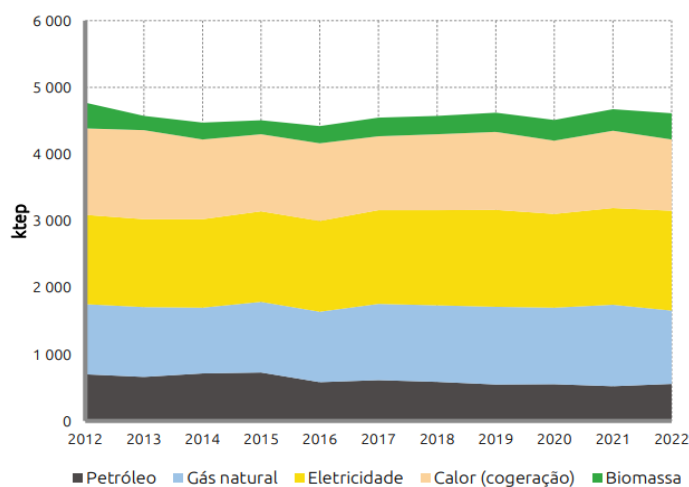


Figura 1.5 - Consumo energético por setor industrial [4].

1.2 Eletrificação e descarbonização da indústria

A eletrificação da indústria surge como uma estratégia fundamental para a descarbonização do setor, promovendo a redução das emissões de carbono e o aumento da eficiência energética. A substituição de combustíveis fósseis por eletricidade, especialmente quando proveniente de fontes renováveis, não só contribui para a sustentabilidade ambiental, como também pode reduzir os custos operacionais.

Entre as principais tecnologias associadas à eletrificação destacam-se os motores elétricos de alto rendimento e os sistemas de produção de energia térmica de origem elétrica, que permitem uma redução significativa do consumo energético [11].

Importa salientar que a produção de calor representa mais de dois terços de todo o consumo total de energia no setor industrial, conforme ilustrado na Figura 1.6, sendo o gás natural o combustível mais utilizado na indústria europeia (ver Figura 1.7).

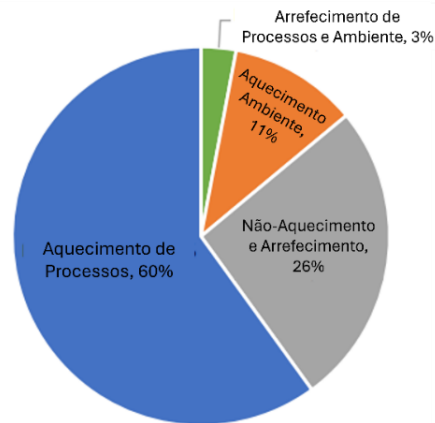


Figura 1.6 - Consumo final de energia por utilização, na Europa, adaptado de [12].

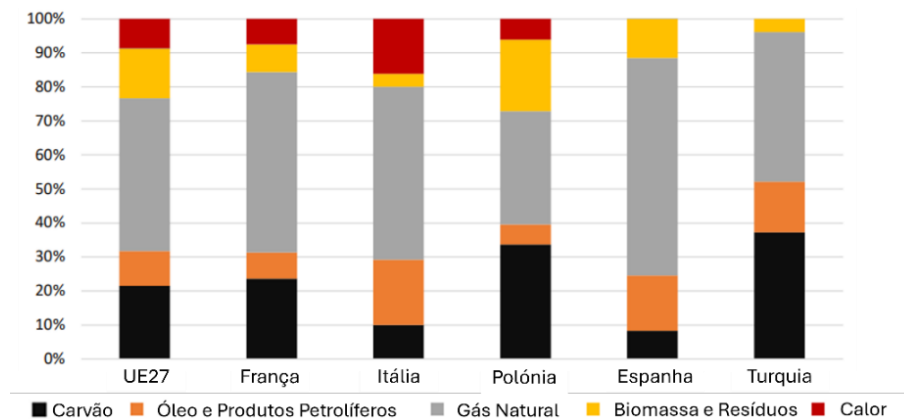


Figura 1.7 - Distribuição do consumo de energia primária na UE27, adaptado de [12].

A eletrificação da indústria produtora, através da substituição de soluções convencionais, como a caldeira a gás natural (CGN), por bombas de calor (BC) ou caldeiras elétricas (CE), tem um papel fundamental na redução das emissões de GEE e no aumento da eficiência energética do processo de aquecimento. Estima-se que, com a implementação de algumas CE, as emissões de CO₂ na UE possam diminuir para aproximadamente 100 MtCO₂/ano em 2050, pressupondo que em 2030 as emissões de CO₂ sejam cerca de 190 MtCO₂/ano [13].

No caso das BC, é expectável que haja uma redução de cerca de 2 MtCO₂/ano, entre 2030 e 2050, uma vez que as CE apresentam menores emissões de GEE, devido ao seu elevado coeficiente de desempenho (COP) [13].

Além do impacto ambiental, a eletrificação também reduz a dependência da Europa, nomeadamente de Portugal, da importação de gás natural, proveniente principalmente da Argélia e da Nigéria [14], e aumenta a utilização de eletricidade produzida em território nacional, incluindo de fontes de energia renováveis.

Em 2022, os processos industriais, onde se insere a BC em estudo, registaram uma redução de 0,9% da emissão de GEE em comparação com 2021, segundo os dados apresentados em [15]. Este resultado reflete o impacto das medidas de descarbonização implementadas nos últimos anos.

A implementação de CE e BC para produção de água quente é uma possível solução face à utilização da solução convencional de CGN. É expectável que as BC sejam mais eficientes que as CE, uma vez que estas últimas produzem calor e as BC transformam calor retirado do ambiente e potencializam a sua energia. Devido ao seu elevado COP, as BC requerem um menor consumo de energia elétrica face à quantidade de energia térmica que produzem. Através de um estudo que compara o impacto na UE da implementação destas soluções alternativas face à tecnologia convencional, e representado na Figura 1.8, conclui-se que a substituição integral da CGN por CE ou BC, resulta na redução do consumo energético e na anulação das emissões de CO₂, o principal gás responsável pelo efeito estufa.

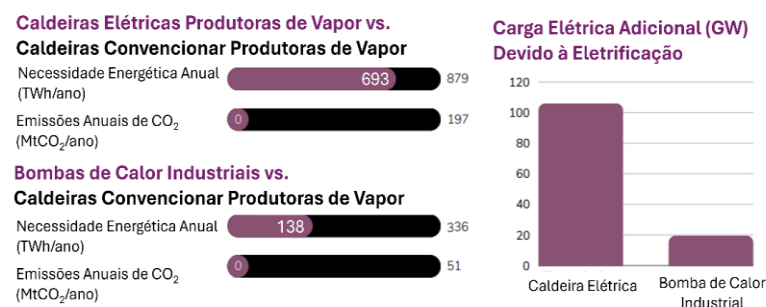


Figura 1.8 - Comparação do consumo energético e das emissões de CO₂ entre CE ou BC e CGN, adaptado de [13].

A eletrificação da indústria enfrenta o desafio do elevado custo inicial de implementação. O investimento necessário para a transição pode ser significativo pelo que muitas empresas analisam o retorno sobre o investimento para justificar a mudança [11]. Apesar da redução a longo prazo dos custos operacionais, o financiamento inicial pode ser um obstáculo para muitas empresas, especialmente para pequenas e médias empresas [11].

Estas são classificadas através do número de empregados e pelo volume de negócios anual/balanço total anual, sendo, respetivamente, 11 a 50 pessoas e 10/10 milhões de euros para pequenas empresas, e 51 a 250 pessoas e 50/43 milhões de euros para médias empresas [16].

1.3 Objetivos

O presente trabalho foi desenvolvido no contexto do estágio curricular realizado na e em conjunto com a empresa ACET – Antero Cardoso Engenharia Termodinâmica, Lda. Durante o estágio foi possível participar na realização de vários projetos na área da climatização e dos fluidos industriais, nomeadamente no dimensionamento de sistemas aeráuticos e hidráulicos. Entre os projetos em que pude intervir destaco o projeto que proporcionou o presente tema em estudo, sendo o objetivo a verificação da solução adjudicada pela empresa e implementada no projeto de execução, analisando a um nível mais teórico ambas as soluções propostas.

Consiste na análise técnico-económica de soluções energéticas alternativas ao sistema convencional de aquecimento por vapor na indústria alimentar. O estudo tem como caso de aplicação uma unidade de produção do setor lácteo, concretamente um complexo industrial de produção de margarina, onde se pretende avaliar o potencial de substituição da CGN atualmente em funcionamento por soluções mais eficientes, sustentáveis e alinhadas com os regulamentos e metas de descarbonização em vigor, tanto a nível nacional como europeu.

A análise desenvolve-se em torno da produção de água quente industrial, um recurso essencial em diversos processos da indústria alimentar. A avaliação destas soluções desenvolve-se sob diferentes perspetivas: a nível tecnológico, económico e energético, permitindo uma análise abrangente do seu desempenho e viabilidade.

O objetivo central deste trabalho é fornecer uma base sólida de suporte à decisão, contribuindo para a competitividade, sustentabilidade e resiliência do setor alimentar, em consonância com os desafios impostos pela transição energética, pela neutralidade carbónica e pelas políticas de eficiência energética da UE e de Portugal.

1.4 Estrutura do documento

O capítulo 1 consiste na introdução teórica e revisão bibliográfica necessária para elaboração do estudo, aprofundando a problemática da emissão de gases com efeito estufa e a procura de soluções que proporcionam a resolução desse problema.

Adicionalmente, é abordado neste capítulo o objetivo do presente trabalho e a motivação para abordar o impacto da emissão dos gases com efeito estufa e a importância do estudo de soluções que encaminham para a neutralidade carbónica pretendida.

No capítulo 2 é apresentada uma introdução teórica ao vapor como fluido térmico e aos equipamentos responsáveis pela sua produção. São analisadas as principais condições de serviço do vapor (pressão, temperatura, qualidade e entalpia), bem como os aspetos relacionados com a sua utilização em ambiente industrial. São ainda discutidas as vantagens e desvantagens associadas à produção e utilização do vapor, nomeadamente a sua elevada capacidade de transporte de energia térmica e a sua versatilidade de aplicação, e as perdas associadas à sua produção e distribuição, e implicações ambientais. Adicionalmente, são abordadas as tecnologias alternativas selecionadas para mitigar a problemática em estudo: a redução da emissão de GEE associada à produção convencional de vapor. É efetuada uma caracterização de cada tecnologia, incluindo o princípio de funcionamento, a tipologia de equipamentos disponíveis, as condições de operação típicas e os seus potenciais de aplicação no setor alimentar. A análise contempla, ainda, as limitações técnicas e os requisitos de integração destas soluções em ambientes industriais.

No capítulo 3 é apresentado o caso de estudo que serve de base ao trabalho, com o respetivo enquadramento na problemática definida. Descreve-se o processo de produção de margarina na unidade industrial em análise, bem como a visão da instalação térmica pretendida para substituição do sistema convencional. Após o estabelecimento das condições de projeto, procede-se ao dimensionamento da potência térmica necessária para suprir as necessidades do processo. Este capítulo inclui, igualmente, a seleção dos equipamentos mais adequados, acompanhada da descrição das suas principais características técnicas.

O capítulo 4 é dedicado à análise energética, tecnológica e económica. São comparadas as soluções estudadas em termos de eficiência energética, impacto ambiental, viabilidade tecnológica e custos de investimento, operação e manutenção, de forma a fornecer uma avaliação abrangente do desempenho global de cada alternativa.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, resultantes da análise desenvolvida nos capítulos anteriores, respondendo diretamente à problemática em estudo. Adicionalmente, contempla uma perspetiva de trabalho futuro, identificando potenciais linhas de estudo da problemática, que permitam aprofundar a avaliação das soluções energéticas alternativas, bem como explorar outras tecnologias emergentes que possam contribuir para a redução das emissões de GEE e para a otimização da eficiência energética na indústria alimentar.

2 Produção de Vapor

2.1 Metodologias de produção em contexto industrial

2.1.1 Caracterização físico-química e propriedades do vapor

O vapor constitui um dos fluidos térmicos de referência na indústria de processos, em particular nos setores que requerem temperaturas elevadas e transferências significativas de energia térmica, em virtude das suas propriedades termodinâmicas, em particular a sua capacidade de atingir temperaturas significativamente elevadas. Destaca-se, sobretudo, pela sua capacidade de transportar grandes quantidades de energia sob a forma de calor latente, o que o torna adequado para aplicações em processos que exigem estabilidade térmica e que requerem elevados níveis de aquecimento.

A produção de vapor pode ocorrer sob a forma de vapor saturado ou vapor sobreaquecido, em função da pressão e das condições de operação. A principal distinção entre ambos os estados, reside na quantidade e no tipo de energia libertada. No caso do vapor saturado, a libertação de energia decorre exclusivamente da mudança de fase para líquido saturado, envolvendo apenas a transferência de calor latente, mantendo-se a temperatura constante durante o processo. No caso de estudo será contemplada a utilização do vapor no estado de saturação. Já o vapor sobreaquecido além do calor latente associado à mudança de fase, disponibiliza também calor sensível, uma vez que ocorre variação de temperatura acima do ponto de saturação.

Estas transformações podem ser visualizadas no diagrama pressão-entalpia da água, representado na Figura 2.1, onde se evidenciam as zonas de líquido comprimido, mistura bifásica e vapor sobreaquecido.

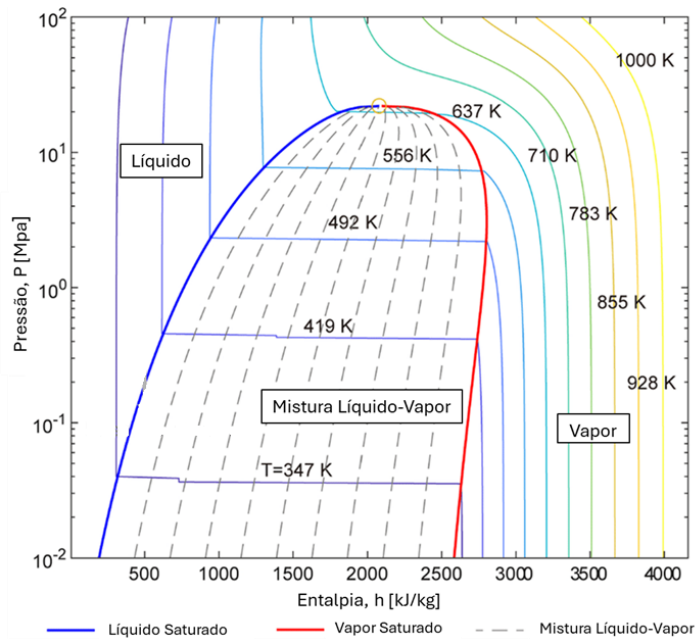


Figura 2.1 - Diagrama de pressão - entalpia da água, adaptado de [17].

O vapor pode ser produzido a várias temperaturas e pressões e é produzido através da ebulição de água em geradores de vapor, maioritariamente em caldeiras. Os geradores de vapor são constituídos, de forma geral, por uma câmara de combustão, no caso das caldeiras de combustão, e por um reservatório de água, assegurando as condições necessárias para a geração de vapor [18].

Outro fator relevante é a qualidade do vapor. A falta de qualidade no vapor é caracterizada pela presença de água condensada e impurezas [19]. Algumas condições como o design da caldeira, a pressão do sistema e a composição química da água podem afetar a qualidade do vapor, o que pode conduzir, por exemplo, à contaminação do produto, transferência de calor insuficiente e estragos na caldeira [19].

2.1.2 Tecnologias de caldeiras

As caldeiras de vapor são componentes fundamentais do sistema de aquecimento industrial, sendo classificadas segundo critérios como:

- configuração construtiva (aquatubular ou pirotubular);
- tipo de combustível ou fonte de energia (fósseis, biomassa, elétrica, híbrida);
- pressão de operação (baixa, média ou alta pressão).

No entanto, para este estudo serão analisados apenas três tipo de caldeiras a vapor: aquatubular, pirotubular e elétrica.

2.1.2.1 Caldeira aquatubular

O princípio de funcionamento da caldeira aquatubular baseia-se na transferência de energia térmica entre água, que circula em tubos que são envolvidos por gases de combustão resultantes da queima de um combustível, como, por exemplo, o gás natural. O calor proveniente da combustão, geralmente derivado de um queimador, é transferido para a água, que percorre os tubos desde a entrada até à saída da caldeira, ocorrendo o processo de vaporização. Este tipo de equipamento é caracterizado por [18]:

- elevada eficiência térmica;
- capacidade de produção de vapor em condições de alta pressão e temperatura;
- rápida resposta operacional, o que a torna adequada a processos industriais de elevada variabilidade de carga.

A Figura 2.2 esquematiza os principais componentes de uma caldeira aquatubular.

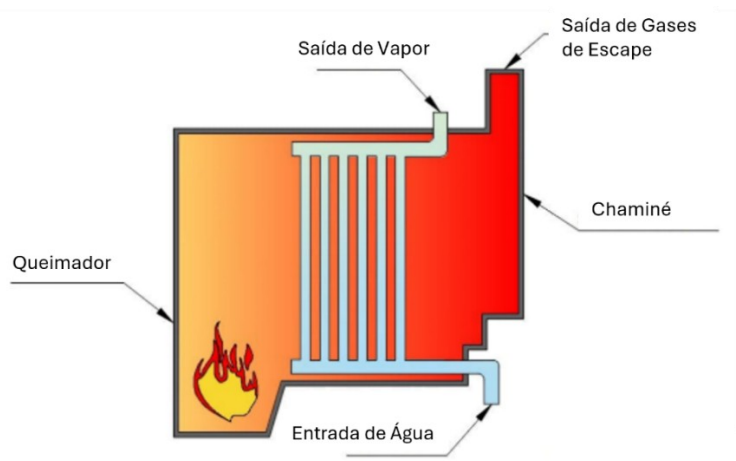


Figura 2.2 - Esquema de caldeira aquatubular, adaptado de [18].

2.1.2.2 Caldeira pirotubular

Na caldeira pirotubular, a transferência de calor ocorre de forma inversa à aquatubular: os gases de combustão percorrem tubos que atravessam um reservatório de água. À medida que a água é aquecida, parte do seu volume vaporiza. Dada a menor densidade do vapor em comparação com a água líquida, este acumula-se na zona superior do reservatório, de onde é extraído para utilização nos processos desejados. Este tipo de caldeiras é normalmente utilizado para aplicações de baixa a média pressão de trabalho [18].

A Figura 2.3 ilustra um esquema representativo do princípio de funcionamento da caldeira pirotubular e os seus principais componentes.

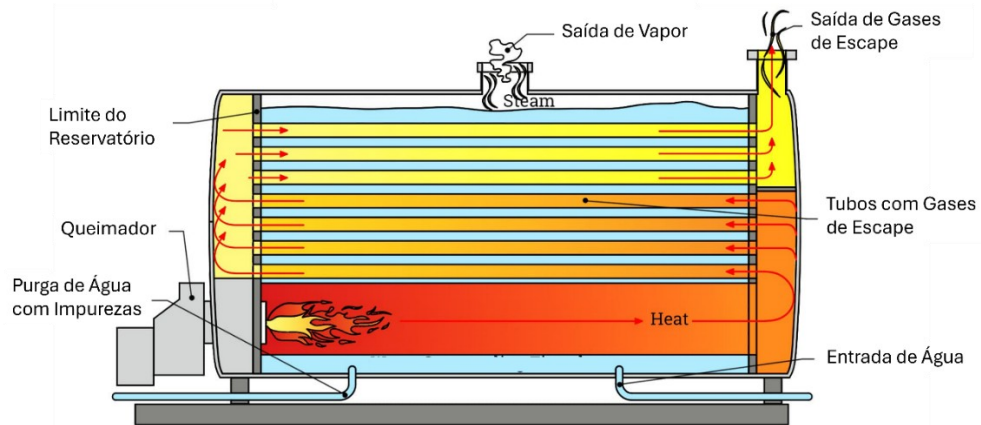


Figura 2.3 - Esquema de caldeira piro-tubular, adaptado de [18].

2.1.2.3 Caldeira elétrica

O princípio de funcionamento da caldeira elétrica é relativamente simples, dado que utiliza componentes elétricos, nomeadamente resistências elétricas, para produção de calor, o qual é posteriormente transferido para a água, originando água quente ou vapor. Diferencia-se, desta forma, das caldeiras convencionais a combustível fóssil, que utilizam queimadores como fonte de calor [18].

Este tipo de caldeiras constitui uma alternativa ambientalmente sustentável, caracterizando-se por apresentarem baixas emissões de gases com efeito estufa (GEE) e por um sistema mais limpo e simples. A ausência de gases de escape ou de subprodutos de combustão torna-as particularmente adequadas para instalações onde se privilegia a qualidade do ar interior e a qualidade ambiental [18].

Para além da sua eficiência energética, estas caldeiras evidenciam um tempo de vida útil prolongado, exigindo manutenção e limpeza reduzidas devido à ausência de queimadores e do número limitado de componentes mecânicos [18].

A sua aplicação é especialmente vantajosa em instalações de pequena escala, descentralizadas ou em pontos de consumo específicos, sobretudo em locais onde o ruído e as emissões de GEE constituem fatores críticos. No entanto, a sua operação requer monitorização regular devido à deposição de minerais no depósito de água, que pode comprometer a eficiência e reduzir a fiabilidade da instalação [18].

A Figura 2.4 ilustra uma caldeira elétrica e alguns dos seus componentes, destacando-se a válvula de segurança, um componente transversal a todas as caldeiras devido ao seu importante papel no funcionamento das mesmas.

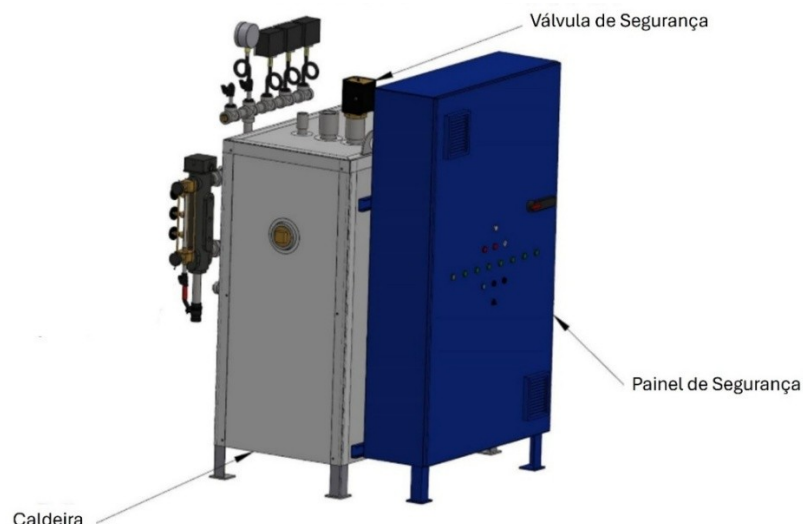


Figura 2.4 - Esquema de caldeira elétrica, adaptado de [18].

2.2 Limitações e impactos ambientais

Como referido na secção 2.1, o vapor é produzido através da ebulição da água em equipamentos sob pressão, sujeitos a normas de projeto e segurança rigorosas. O vapor é valorizado pela sua capacidade de atingir temperaturas elevadas em função da pressão de operação e pelo seu elevado coeficiente de transferência de calor, permitindo elevada eficácia em permutadores e processos de contacto direto. A sua temperatura de saturação varia em função do aumento da pressão de produção, aumentando à medida que esta se eleva.

Apesar do seu desempenho na indústria, devido à sua capacidade de transferir grandes quantidades de energia sob a forma de calor, em processos como aquecimento, secagem e esterilização [20], o vapor é um fluido com limitações tanto na sua utilização como na sua produção.

Do ponto de vista económico, o vapor caracteriza-se por ser um fluido com baixo custo de produção e uma enorme versatilidade, permitindo a sua utilização direta como meio de aquecimento, em comparação com outros fluidos térmicos. Contudo, o vapor é mais corrosivo do que a água líquida, exigindo a aplicação de tratamento químico prévio (desgaseificação, desmineralização, adição de inibidores de corrosão), para assegurar a integridade da instalação [21].

A rede de distribuição de vapor apresenta uma configuração relativamente simples, recorrendo a tubos de diâmetro reduzido. No entanto, a sua distribuição sob pressão exige um rigoroso controlo de fugas, pois estas não só aumentam os custos operacionais como comprometem a segurança e a eficiência global do sistema [21].

Após a cedência de calor nos processos, o vapor condensa, originando condensados a temperaturas elevadas que não podem ser descarregados diretamente na rede de esgotos, no caso de serem utilizados diretamente no fabrico do produto. Nesse sentido, torna-se indispensável a adição de equipamentos complementares destinados ao arrefecimento dos condensados antes da sua rejeição [21]. No caso da utilização de vapor para produção, sem que haja contacto direto com o produto, promove-se a recuperação de condensados, o que permite reduzir o consumo de água e energia, diminuindo o impacto ambiental e económico da instalação. Apesar das suas vantagens, a produção convencional de vapor recorre à combustão de combustíveis fósseis, o que resulta na emissão de GEE. Quanto maior for a necessidade de produção de vapor, maior será a dimensão do equipamento e a potência do queimador, conduzindo a custos de investimento e operação mais elevados.

2.3 Soluções energéticas alternativas

Como analisado na secção 1.2, o consumo de energia final é maioritariamente direcionado para a produção de calor para utilização em processos, nomeadamente para a produção de vapor, uma vez que requer pressões e temperaturas elevadas. Esta elevada necessidade de produção de calor reflete-se no uso intensivo de combustíveis fósseis, o que evidencia a necessidade de implementação de medidas de descarbonização. Entre estas medidas destaca-se a eletrificação dos processos industriais, em linha com os objetivos do Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) [3].

No contexto da redução da emissão de GEE e da transição energética, baseada na substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis ou de baixo impacto ambiental, têm vindo a ser estudadas e implementadas alternativas de produção de calor a alta temperatura. Destas destacam-se a bomba de calor (BC), por ser considerada a tecnologia central na transição global para garantir um aquecimento sustentável [22], e a caldeira elétrica (CE), por ser uma alternativa tecnológica capaz de combater necessidades térmicas altas e por apresentar uma eficiência energética superior às caldeiras convencionais [23].

As BC têm ganho crescente relevância no setor industrial, não só pelo seu elevado desempenho energético, como pela sua capacidade de eletrificação de processos até agora fortemente dependentes de combustíveis fósseis. O seu coeficiente de desempenho (COP) varia geralmente entre 3 e 5, ou seja, permitem produzir entre três e cinco unidades de energia térmica por cada unidade de energia elétrica consumida, o

que representa uma eficiência 3 a 5 vezes superior à das caldeiras convencionais a combustível fóssil [22].

Em contexto industrial, as BC configuram-se como uma solução viável, uma vez que já existem tecnologias que permitem a produção de água quente a temperaturas médias e elevadas (até 120–150 °C), adequadas a processos alimentares, e a processos de sanitização de espaços industriais. Para além disso, contribuem para a redução da dependência energética face à importação de gás natural, favorecendo a utilização de eletricidade proveniente de fontes renováveis [22].

Apesar das vantagens, importa considerar algumas limitações:

- o desempenho das BC depende fortemente das condições do meio envolvente (fonte de calor utilizada: ar, água ou geotermia);
- a sua aplicação em temperaturas muito elevadas (>150 °C) ainda se encontra em fase de desenvolvimento tecnológico;
- os custos de investimento inicial tendem a ser mais elevados do que os de soluções convencionais.

Ainda assim, a evolução tecnológica, em especial no desenvolvimento de bombas de calor de alta temperatura com fluidos frigorigéneos naturais (ex.: CO₂, NH₃), tem ampliado significativamente o seu campo de aplicação na indústria alimentar e noutros setores de processos térmicos.

Como alternativa às BC, destacam-se as CE apresentam-se como uma alternativa direta às caldeiras a gás natural (CGN). O seu princípio de funcionamento baseia-se na utilização de resistências elétricas para produzir calor, que é posteriormente transferido para a água, convertendo-a em água quente ou vapor.

As CE apresentam uma configuração tecnológica menos complexa quando comparadas com as BC, mas distinguem-se pela sua maior flexibilidade operacional em regimes de temperaturas mais elevadas, ao passo que as BC permanecem limitadas pelas condições térmicas do meio envolvente, o que as torna adequadas a processos industriais que requerem vapor de alta pressão e alta temperatura [24].

As principais vantagens das CE incluem:

- emissões diretas de GEE praticamente nulas, sobretudo quando alimentadas por eletricidade de origem renovável;
- simplicidade construtiva e de operação, com baixa necessidade de manutenção;
- possibilidade de instalação em sistemas descentralizados ou em pontos de consumo específicos.

Entre as desvantagens, destacam-se:

- custos operacionais potencialmente elevados, devido ao preço da eletricidade em comparação com o gás natural;
- a ausência de ganhos de eficiência intrínsecos como os observados nas BC, dado que o rendimento das CE se encontra limitado a valores próximos de 100%;
- necessidade de adaptação da infraestrutura elétrica das unidades industriais, muitas vezes dimensionada para cargas inferiores.

2.3.1 Bomba de calor

A BC é um equipamento cujo princípio de funcionamento assenta no ciclo frigorífico, através do qual é realizada a transferência de calor de uma fonte térmica (ar, água ou solo), para um meio de utilização onde esse calor é rejeitado a uma temperatura superior (Figura 2.5).

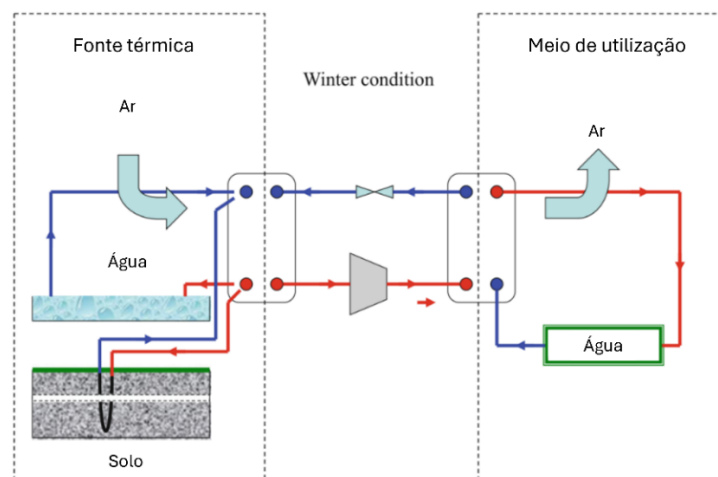


Figura 2.5 – Esquema do princípio da bomba de calor, adaptado de [25].

O ciclo frigorífico é composto por: evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão. Como representado na Figura 2.6, o fluido frigorífero capta calor da fonte térmica no evaporador, que atua como permutador de calor, e evapora devido à baixa pressão a que se encontra (1-2). Em seguida, é conduzido ao compressor, onde sofre um aumento significativo de pressão e temperatura, adquirindo maior conteúdo energético (2-3). No condensador, o fluido frigorífero cede energia sob a forma de calor ao meio de utilização e, devido à alta pressão a que se encontra, condensa (3-4). Por fim, o fluido frigorífero expande por intermédio de uma válvula de expansão, onde ocorre a redução de pressão e temperatura até atingir as condições adequadas para reiniciar o ciclo no evaporador (4-1).

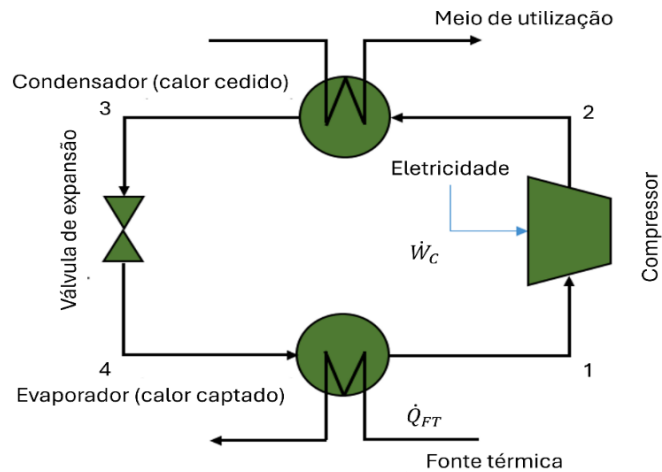


Figura 2.6 - Princípio de funcionamento de uma bomba de calor, adaptado de [26].

Paralelamente à Figura 2.6, a Figura 2.7 ilustra a evolução das características do fluido refrigerante nas várias etapas do ciclo de refrigeração. A etapa de evaporação (1-2) é caracterizada pela mudança do fluido refrigerante do estado de mistura para vapor sobreaquecido, a temperatura e pressão constantes, verificando-se apenas o aumento da sua energia contida, a entalpia. No estágio de compressão (2-3), a pressão do fluido aumenta e, conseqüentemente, a sua temperatura. Na etapa de condensação (3-4) ocorre cedência de energia, traduzindo-se na mudança de estado do fluido refrigerante de vapor sobreaquecido para líquido comprimido, a temperatura e pressão constantes. Por último, a etapa de expansão (4-1) traduz a redução da pressão do fluido, e, por sua vez, da sua temperatura, até às condições de funcionamento do evaporador.

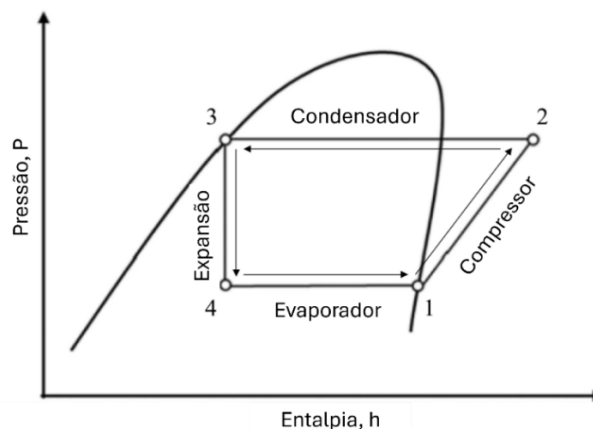


Figura 2.7 - Diagrama de pressão-entalpia para o ciclo de funcionamento de bomba de calor, adaptado de [26].

A eficiência da BC é caracterizada pelo COP, que compara a potência térmica útil gerada, correspondente à energia cedida na etapa de condensação por unidade de tempo, e a potência elétrica consumida pelo compressor, conforme apresentado na equação 2.1.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{FT}}{\dot{W}_C} \quad (2.1)$$

Onde,

COP - Coeficiente de desempenho;

\dot{Q}_{FT} - Potência térmica transferida para a fonte quente [kW];

\dot{W}_C – Potência elétrica consumida pelo compressor [kW].

2.3.1.1 Tipologias e aplicações industriais

As bombas de calor podem ser classificadas em três categorias principais, de acordo com os seus meios de captação e dissipação de calor: ar-ar, ar-água (ar-H₂O) e água-água (H₂O-H₂O), como ilustrado na Figura 2.5 – Esquema do princípio da bomba de calor, adaptado de [25].

Nas BC do tipo ar-ar, o fluido frigorigéneo retira calor do ar ambiente e, após a sua compressão e consequente aumento de energia, transfere-o novamente para o ar. Este tipo de sistema é frequentemente aplicado em climatização de espaços, recorrendo, por exemplo, a equipamentos de expansão direta [27].

As BC do tipo ar-H₂O apresentam um princípio de funcionamento semelhante às BC descritas anteriormente, diferenciando-se pelo facto de a energia térmica ser transferida para a água. Este tipo de tecnologia pode ser utilizado em sistemas de aquecimento de água quente sanitária (AQS), para uso doméstico, bem como em aplicações industriais que requeiram água aquecida [27].

Por sua vez, as BC do tipo H₂O-H₂O realizam, tanto a captação como a dissipação de calor através da água. Nestes sistemas, a fonte térmica pode ser, por exemplo, água proveniente de processos de arrefecimento industrial que contenham calor residual, o que contribui para o aproveitamento energético [27].

2.3.1.2 Fluidos frigoríficos e critérios de seleção

A evolução dos fluidos frigoríficos ao longo das últimas décadas tem sido impulsionada pela necessidade de mitigar o impacto ambiental associado às emissões de GEE. Com a implementação de regulamentos destinados a combater as alterações climáticas, verificou-se uma transição progressiva entre diferentes tipos de fluidos, como representado na Figura 2.8, com o objetivo de reduzir o Potencial de Aquecimento Global, do inglês *Global Warming Potential* (GWP), e o Potencial de Destruição da Camada de Ozono, do inglês *Ozone Destruction Potential* (ODP).

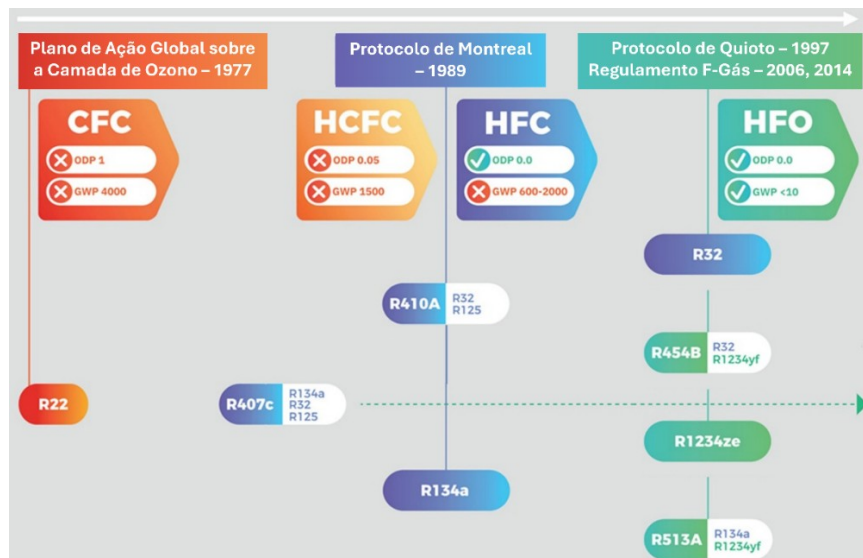


Figura 2.8 - Evolução dos fluidos frigoríficos, adaptado de [28].

Inicialmente, os clorofluorocarbonetos (CFC) foram amplamente utilizados, mas devido ao seu elevado ODP e GWP, foram gradualmente substituídos pelos hidroclorofluorocarbonetos (HCFC), que, embora apresentassem um ODP inferior, contribuíam igualmente para o aquecimento global.

Subsequentemente, os hidrofluorocarbonetos (HFC) emergiram como alternativa, apresentando um ODP nulo, mas um GWP relativamente elevado face ao objetivo de neutralidade. Exemplos comuns incluem os fluidos R410A e R134a, que se encontram em substituição gradual, e o R32.

O estabelecimento do Protocolo de Quioto [5], como mencionado na secção 1.1, pretendeu limitar a emissão de GEE. Em conjunto com o Regulamento F-Gás, inicialmente publicado em 2006, fundamentado para prevenir e reduzir as emissões de GEE dos gases fluorados abrangidos pelo Protocolo de Quioto, sendo eles, principalmente, os HFC [29].

Com o objetivo de reduzir a emissão de gases fluorados, o Regulamento F-Gás foi reescrito em 2014 e posteriormente atualizado em fevereiro de 2024.

Este regulamento estabelece normas relativas à contenção, utilização, reciclagem, valorização e destruição de gases fluorados de efeito estufa, incluindo medidas auxiliares, como a certificação e formação, que incluem manuseamento seguro desses gases e de substâncias alternativas que não são fluoradas [30]. Impõe restrições à produção, importação, exportação e comercialização de HFC, estabelecendo limites quantitativos para a sua colocação no mercado. Em 2014, a sua adoção teve como objetivo inverter o aumento das emissões de gases fluorados com efeito estufa, o que conduziu a uma diminuição de ano para ano. Como consequência, entre 2015 e 2019, a oferta de HFC diminuiu 37% em toneladas métricas e 47% em toneladas equivalentes. Paralelamente, registou-se uma clara transição para alternativas com baixo GWP, incluindo fluidos frigorigéneos naturais, como o ar, o R744 (dióxido de carbono), o R717 (amoníaco), hidrocarbonetos, nomeadamente o R290 (propano), e a água. Em 2021, o Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas concluiu que, até 2050, é necessário reduzir-se, a nível mundial, as emissões de gases fluorados com efeito estufa até 90%, relativamente aos níveis de 2015 [30].

Para assegurar a utilização de fluidos frigorigéneos com baixo GWP, o regulamento F-Gás, atualizado em fevereiro de 2024, aplica-se aos gases fluorados com efeito estufa isolados ou em mistura, bem como aos produtos, equipamentos e componentes, que contenham ou cujo funcionamento dependa destes gases [30].

Em resposta às restrições impostas pelo regulamento, surgiram os fluidos frigorigéneos de quarta geração, baseados na química da hidrofluorolefina (HFO). Estes fluidos apresentam um ODP nulo e um GWP inferior a 10. Exemplos de HFO incluem o R1234ze e o R1234yf, utilizados em equipamentos produtores de água arrefecida (*Chiller*) de baixa densidade com compressor parafuso, e de alta densidade com compressor *scroll* [28].

Como mencionado no regulamento F-Gás [30], foram adotadas alternativas naturais aos gases fluorados, caracterizadas por GWP muito reduzido, ou nulo, e um ODP nulo, tornando-as soluções ambientalmente favoráveis no combate às alterações climáticas associadas ao uso de gases fluorados.

Apesar das vantagens ambientais dos novos fluidos frigorigéneos, a sua toxicidade e inflamabilidade devem ser consideradas. A toxicidade está dividida em duas classes, conforme listado na Tabela 2.1: baixa toxicidade (A) e alta toxicidade (B). Já a inflamabilidade está dividida em quatro classes: altamente inflamável (3), inflamável (2), pouco inflamável (2L) e não inflamável (1) [31].

Tabela 2.1 - Classificação de segurança para fluidos frigorigéneos [31].

Inflamabilidade	Classificação do Fluido Frigorigéneo	
	Altamente Inflamável	A3
Inflamável	A2	B2
Ligeiramente Inflamável	A2L	B2L
Não Inflamável	A1	B1
Toxicidade	Toxicidade Baixa	Toxicidade Alta

A transição para fluidos frigorigéneos mais sustentáveis continua a constituir um desafio técnico e regulamentar, exigindo um equilíbrio entre desempenho energético, segurança e impacto ambiental, conforme na Tabela 2.2. Comparativamente aos fluidos sintéticos, os fluidos naturais apresentam níveis mais elevados de toxicidade e inflamabilidade, o que impõe limitações à sua utilização em determinadas aplicações.

Tabela 2.2 - Características de fluidos frigorigéneos, adaptado de [32] e [33].

Fluido Frigorigéneo	ODP	GWP	Classe de Segurança
R410a	2088	0	A1
R134a	1430	0	A1
R32	675	0	A2L
R1234ze	6	0	A2L
R1234yf	4	0	A2L
R717	0	0	B2L
R744	0	1	A1
R290	0	3,3	A3

Como mencionado anteriormente, o Regulamento F-Gás [29] foi adotado com o objetivo de inverter o aumento de GEE, promovendo a utilização de alternativas com baixo GWP, incluindo alternativas naturais [30]

Os fluidos frigoríficos naturais destacam-se das alternativas sintéticas por existirem nos ciclos químicos e biológicos da Natureza, sem intervenção humana [34]. Estes fluidos são utilizados em sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) desde o século XIX [34], pelo que as suas propriedades termodinâmicas não são desconhecidas, nomeadamente o baixo GWP e ODP, como demonstrado na Tabela 2.2. A seleção do fluido frigorífico natural mais adequado depende da aplicação e das suas propriedades termodinâmicas. Como se observa na Tabela 2.3, os fluidos naturais apresentam temperaturas e pressões críticas díspares entre si, assim como as temperaturas de fusão, sendo características que influenciam diretamente o seu desempenho e a sua viabilidade em diversas aplicações comerciais e industriais.

A temperatura crítica ($T_{crítica}$) corresponde ao valor de temperatura acima da qual um gás não pode ser condensado por aumento de pressão. Por sua vez, a pressão crítica ($P_{crítica}$) corresponde ao valor de pressão à qual esse gás atinge a $T_{crítica}$. A temperatura de fusão ($T_{fusão}$) corresponde ao valor de temperatura, à pressão atmosférica de cerca de 1 bar, à qual ocorre a transformação de um gás do estado líquido para o estado gasoso.

Tabela 2.3 – Propriedades termodinâmicas de fluidos frigoríficos naturais, adaptado de [35].

Fluido Frigorífico	$T_{crítica}$ [°C]	$P_{crítica}$ [bar]	$T_{fusão}$ [°C]
R744	31,1	73,7	-78,4
R717	133,0	114,2	-33,3
R290	96,7	42,5	-42,1

Dado que a maior parte do calor fornecido pelas BC é transferido de uma fonte térmica e não gerado internamente, estas apresentam uma eficiência significativamente superior a outras tecnologias de aquecimento, sendo também menos dispendiosas em operação. De facto, a energia térmica fornecida por uma BC tende a exceder consideravelmente a energia elétrica consumida para o seu funcionamento, resultando em valores de COP bastante elevados [36].

O valor de COP, depende da potência nominal da bomba de calor, uma vez que é referente à sua máxima eficiência. Com a diminuição da potência térmica, o COP também diminui, possivelmente, devido ao consumo elétrico do compressor ser superior à potência térmica desejada [37].

Tal declínio no valor do COP também ocorre quando a bomba de calor opera perto da sua capacidade máxima, por exemplo, devido à perda de eficiência do compressor a rotações altas e à maior diferença entre a temperatura da fonte térmica e a temperatura desejada [37], como se verifica na Figura 2.9.

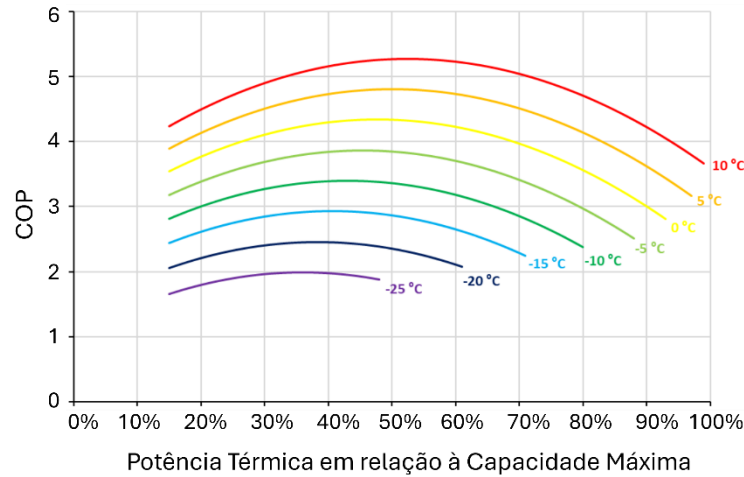


Figura 2.9 – COP em função da temperatura da fonte e da potência térmica, adaptado de [37].

Adicionalmente, o valor de COP varia com a temperatura da fonte térmica, no caso de bombas de calor dos tipos ar-H₂O e ar-ar. Quanto menor a temperatura, mais energia o equipamento tem de consumir para atingir a potência térmica desejada, resultando num baixo valor de COP. O contrário se verifica com o aumento da temperatura, uma vez que resulta no menor consumo de energia por parte do compressor e maior energia disponibilizada pela fonte térmica [38], como se verifica na Figura 2.9.

Para além dos parâmetros anteriores, as propriedades termodinâmicas do fluido frigorígeno utilizado no equipamento também afetam a eficiência da bomba de calor [31], em particular, o calor específico de cada um. Este determina a energia necessária para aumentar a sua temperatura em 1 °C, influenciando diretamente a sua capacidade de armazenar energia térmica: um fluido com um calor específico elevado pode absorver grandes quantidades de calor sem sofrer variações significativas de temperatura, permitindo a acumulação de energia sem atingir condições críticas de operação.

Para além das suas propriedades termodinâmicas, o seu rácio de compressão é igualmente relevante para o seu desempenho [38], pois especifica a capacidade de compressão do fluido. Verificou-se através de um estudo feito em análise ao COP obtido por diferentes fluidos frigorígenos (Tabela 2.4) nas mesmas condições de funcionamento de uma bomba de calor, que este varia, sendo o R717 o fluido que apresentou um maior valor de COP em comparação aos restantes fluidos [39].

Tabela 2.4 – COP para diferentes fluidos frigoríficos, adaptado de [39].

R717	3,1
R290	2,6
R134a	2,6
R410a	2,8
R1234yf	2,3

O R717 é um fluido frigorífico natural amplamente utilizado na indústria devido às suas propriedades termodinâmicas, elevada eficiência energética [31] e ao seu baixo custo de operação [40]. Não tem impacto ambiental, uma vez que possui GWP e ODP nulos. Permite a refrigeração de espaços a temperaturas baixas, beneficiando da sua baixa temperatura de fusão e alta temperatura crítica [40].

No entanto, por ser um fluido tóxico e de baixa inflamabilidade, o seu uso e manuseamento requer precauções na segurança e saúde ocupacional, na segurança pública, prevenção e contenção de incêndios e risco de corrosão. Adicionalmente, o seu odor característico permite a deteção rápida de eventuais fugas [31].

2.3.1.3 Bombas de calor de alta temperatura

As BC podem ser classificadas em BC de baixa temperatura (BT) e de alta temperatura (AT), sendo a principal diferença entre ambas a temperatura de operação. No caso das BC do tipo ar-H₂O, as BC de BT operam normalmente entre os 35 °C e os 55 °C e são predominantemente utilizadas em sistemas de climatização domésticos. Por sua vez, as BC de AT operam a temperaturas entre os 60 °C e os 85 °C, em uso doméstico, podendo alcançar temperaturas superiores em ambiente industrial [41], operando entre os 40 °C e os 100 °C [26].

As BC de AT possibilitam o aproveitamento de calor residual, produzindo água quente, ou vapor, a temperaturas superiores a 100 °C, dependendo da temperatura da fonte térmica. Esta capacidade de produzir vapor possibilita a sua utilização em processos industriais, substituindo as CGN e, assim, contribuir para a descarbonização das indústrias [42].

À medida que a diferença de temperatura entre a fonte térmica e o meio de dissipação aumenta, o caudal de fluido frigorígeno que circula no evaporador também se eleva, de modo a suprir a maior necessidade térmica. Contudo, é fundamental considerar as limitações e cuidados à sua utilização. O aumento do caudal de fluido implica igualmente um incremento no rácio de pressão do compressor, o que tende a diminuir a eficiência global do equipamento.

Para mitigar o esforço mecânico do compressor e contornar os limites de carga de fluido impostos, é implementado um sistema em cascata, exemplificado na Figura 2.10. Este método divide a diferença de temperatura em várias etapas menores, reduzindo assim a potência requerida pelo compressor e a quantidade de fluido frigorígeno necessária.

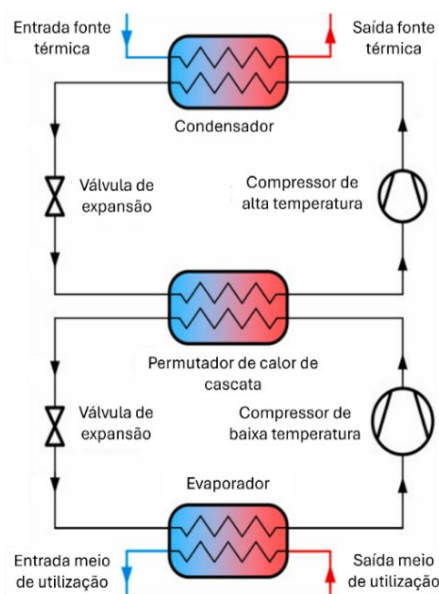


Figura 2.10 – Esquema de funcionamento em cascata de bomba de calor, adaptado de [43].

Contudo, as BC de AT enfrentam alguns desafios tecnológicos, principalmente ao nível do compressor. A necessidade de múltiplos estágios de compressão para atingir temperaturas elevadas, bem como a seleção do fluido frigorígeno mais adequado para operar em condições de pressões elevadas, são fatores críticos de conceção e operação destes equipamentos [42]. Apesar destes constrangimentos, apresentam versatilidade em várias aplicações, nomeadamente no setor industrial, sendo a sua adoção condicionada essencialmente pela temperatura de processos requerida, permitindo a sua adaptação a um vasto leque de utilizações.

Conforme mencionado anteriormente, o aproveitamento de calor residual proveniente de outros processos, Figura 2.11, pode melhorar significativamente o desempenho global destes sistemas.

A interligação da BC de AT com os sistemas de refrigeração de uma unidade fabril, não só permite reduzir o desperdício térmico como possibilita a obtenção de temperaturas mais elevadas [31].

Assim, em alternativa à dissipação do calor da linha de alta pressão do circuito de refrigeração através de um condensador convencional, essa energia térmica pode ser recuperada e utilizada pela BC para aquecimento de água de processos, promovendo ganhos de eficiência energética e redução de consumos [31].

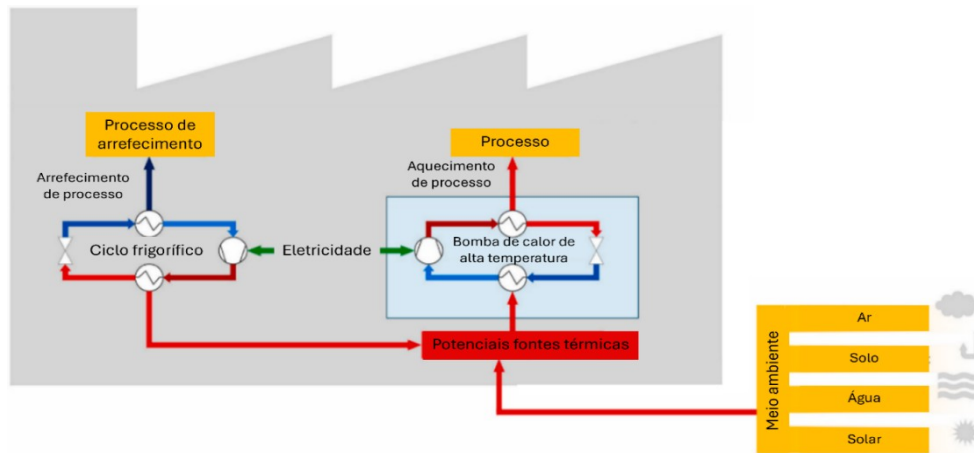


Figura 2.11 - Exemplo de fontes de calor de uma bomba de calor de alta temperatura na indústria, adaptado de [42].

Na ausência de fontes térmicas residuais, a integração de uma BC do tipo ar-H₂O com configuração em cascata também é considerada uma solução de integração em ambiente industrial, devido ao ar ser uma fonte de energia renovável e estar presente em qualquer ambiente.

Um estudo efetuado no Japão analisa a possibilidade de integração de uma BC do tipo ar-H₂O com duplo estágio de compressão e confirma a sua viabilidade de produzir água quente a 90 °C, ainda que com fonte térmica a baixa temperatura [44].

As BC de AT representam uma tecnologia emergente com elevado potencial para melhorar a eficiência global dos processos industriais e reduzir o consumo energético, promovendo simultaneamente a substituição de combustíveis fósseis por eletricidade [45]. São consideradas uma solução tecnológica promissora no âmbito da descarbonização na indústria alimentar [45].

Vários processos do setor alimentar, como a pasteurização, são particularmente adequados à integração deste tipo de equipamento como fonte de aquecimento devido à sua temperatura de operação [46].

Um estudo sobre os cinco ramos mais relevantes da industrial alimentar alemã, que inclui a indústria de laticínios, demonstrou que a implementação de BC de AT pode reduzir até 9% da emissão de GEE. Quando associadas à eletricidade proveniente de fontes de energia renováveis, resulta na redução de 26% da emissão de GEE [45].

Recentemente, as BC de AT têm beneficiado de avanços nas tecnologias de compressão e no desenvolvimento de fluidos frigoríficos de alto desempenho com baixo GWP, como o R717, o R744 e o R1234ze [26]. Adicionalmente, configurações de múltiplos estágios de compressão têm sido explorados, demonstrando melhorias significativas no seu desempenho e na estabilidade operacional [46].

A adoção desta tecnologia ocorre, principalmente, em países com políticas de eletrificação industrial e onde o custo da eletricidade inferior é competitivo face aos combustíveis fósseis [46]. Além de otimizar a eficiência industrial, as BC facilitam a integração com fontes renováveis, solar e eólica, contribuindo para sistemas industriais mais sustentáveis [46].

Contudo, o fator de emissão associado à produção elétrica utilizada permanece determinante na avaliação do potencial de mitigação. Em sistemas elétricos a redução de GEE introduzida pela sua integração [45], pode não ser significativa, ou até ser negativa nos casos em que a produção de eletricidade continue a emitir GEE [26].

2.3.2 Caldeira elétrica

As CE são equipamentos concebidos para gerar energia térmica através de energia elétrica, sendo utilizadas para produzir água quente ou vapor. A maioria da energia elétrica é convertida em energia térmica (Figura 2.12), traduzindo-se numa eficiência próxima de 100%.

Em virtude da sua fonte de alimentação, assumem um papel particularmente relevante no contexto atual, constituindo uma solução tecnológica capaz de responder aos desafios da otimização e descarbonização energética dos sistemas de aquecimento [47].

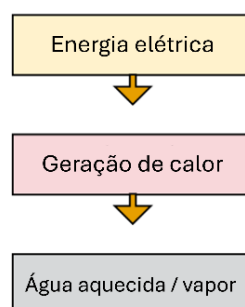


Figura 2.12 – Fluxograma do princípio de funcionamento da caldeira elétrica.

2.3.2.1 Tipologias e aplicações

As CE podem ser classificadas em caldeiras elétricas de resistência (CER) e caldeiras elétricas de eletrodo (CEE), conforme ilustrado na Figura 2.13. Enquanto as primeiras recorrem a elementos resistivos para converter a energia elétrica em energia térmica e, deste modo, aquecer a água, as segundas utilizam eletrodos como meio de aquecimento, estando subdivididas em submersíveis e de jato de alta velocidade [48]. Os eletrodos são componentes metálicos que conectam dois pontos, ou meios, para possibilitar a passagem de corrente elétrica.

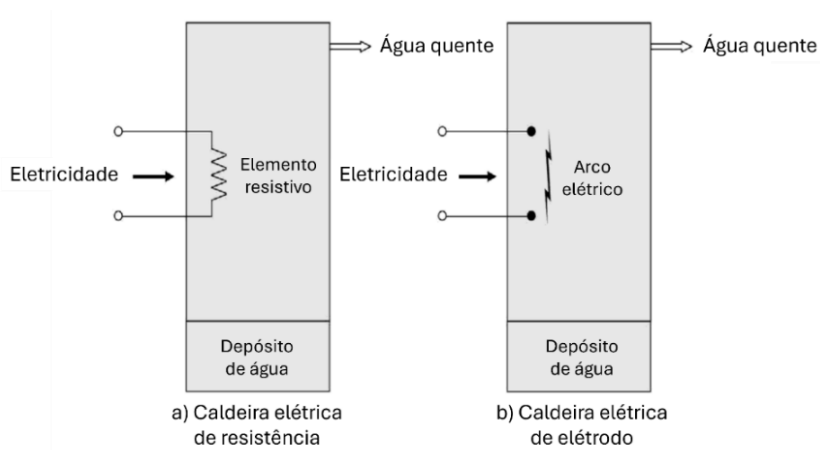


Figura 2.13 - Caldeira elétrica de resistência a) e de eletrodo b), adaptado de [49].

2.3.2.1.1 Caldeira elétrica de resistência

A caldeira elétrica de resistência (CER), como o nome indica, é uma caldeira que aquece água por intermédio de resistências elétricas (Figura 2.14), através da conversão de energia elétrica para resistência elétrica.

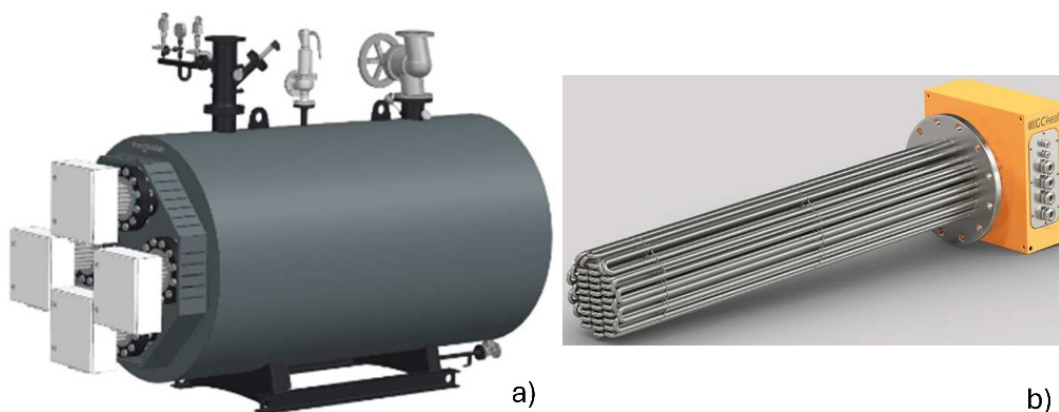


Figura 2.14 - Caldeira elétrica de resistência a) e conjunto de resistências elétricas b), adaptado de Anexo A.

Este tipo de caldeira está relacionado com a corrente elétrica de alimentação como método de variação da resistência elétrica gerada [50]. Quanto maior resistência, maior dissipação de calor por efeito Joule e maior potência térmica disponibilizada pela caldeira. Para este tipo de caldeira, a potência gerada varia tipicamente entre os 0,01 e os 4 MW [50].

2.3.2.1.2 Caldeira elétrica de eletrodo

A caldeira elétrica de eletrodo (CEE) está diretamente relacionada com a tensão de alimentação, nomeadamente alta tensão: quanto maior a tensão, maior a potência térmica gerada. Este tipo de caldeira foi concebido para grandes valores de potência térmica, desde 4 a 80 MW [50].

A caldeira elétrica de eletrodo submersível (CEES) utiliza eletrodos imersos em água salinizada, com sais dissolvidos para potencializar a condutividade da água [51], que conduzem a corrente elétrica através da água [48].

Esta é constituída, principalmente, num cilindro interior, onde ocorre a transferência de calor, um cilindro exterior, referente ao corpo metálico do depósito da caldeira, um cilindro central, onde circula a água para ser aquecida e cujo diâmetro é ajustado ao caudal volumico necessário para satisfazer a necessidade térmica. Ainda, contém eletrodos, componentes isolantes para reduzir perdas térmicas e tubos, onde circula a água [52].

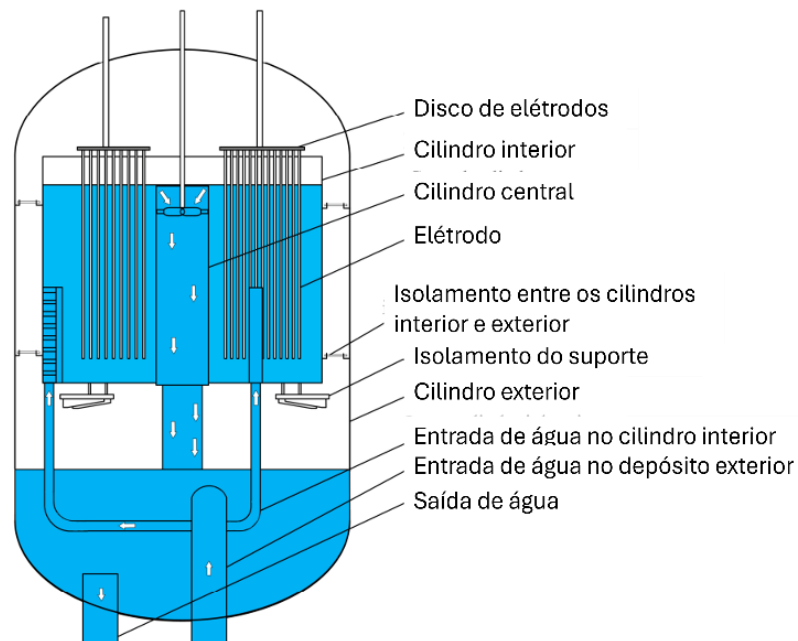


Figura 2.15 - Constituição da caldeira elétrica de eletrodos, adaptado de [52].

A relação entre a dimensão do conjunto de elétrodos e a resistência elétrica pretendida é determinada por vários fatores, entre os quais se destacam o material do eletrodo, a sua geometria, o espaçamento entre elétrodos e a intensidade da corrente elétrica. As consequências da sua implementação estão dispostas na Tabela 2.5

Em geral, elétrodos de maiores dimensões dispõem de uma área superior onde ocorre a transferência de calor e podem acomodar-se a correntes superiores, o que se traduz no aumento da potência térmica gerada e, conseqüentemente, na produção de água quente ou vapor [53]. Neste tipo de CE, a potência térmica pretendida é estabelecida por intermédio do ajuste da altura dos elétrodos submersos [54].

Tabela 2.5 – Exemplos de características dos elétrodos que afetam a eficiência da caldeira elétrica.

Material	<ul style="list-style-type: none"> • Titânio tem melhor resistência à corrosão, mas tem um custo elevado [55]; • Aço inoxidável 304 apresenta pontos de corrosão quando submetido a um certo valor de corrente elétrica [55]; • O aço inoxidável 316 é indicado quando se correlaciona resistência à corrosão, condutividade e custo [55].
Geometria	<ul style="list-style-type: none"> • Eletrodo alongado provoca a movimentação vertical, em espiral, da água no depósito da caldeira, o que promove a eficiência de aquecimento [52]; • Eletrodo com final esférico aquece uniformemente a água [52]; • Eletrodo com final aguçado promove o aumento da densidade de corrente elétrica nesse ponto, refletindo em temperaturas bastante elevadas na parte inferior do depósito de água [52].
Espaçamento	<ul style="list-style-type: none"> • Influencia a produção de bolhas e o fluxo de calor [56]; • Menor espaçamento provoca a ocorrência de fenômenos indesejados, como eletrólise da água [56]; • Maior espaçamento leva a pouca interação entre os elétrodos e a água [56].
Intensidade da corrente elétrica	<ul style="list-style-type: none"> • Valores elevados provocam a distribuição não uniforme de calor, aumentam o aparecimento de picos locais e favorece fenômenos, como aparecimento de bolhas [57].

Por sua vez, a caldeira elétrica de eletrodo de jato de alta velocidade (CEEJAV) utiliza jatos de água direcionados para embater em placas de eletrodos, sendo a sua principal função a produção de vapor, devido à sua capacidade de operar a valores de tensão elevados [48].

O seu princípio de funcionamento consiste numa bomba de circulação existente no circuito hidráulico que faz com que água seja ejetada sobre os eletrodos e, conseqüentemente, aqueça e seja vaporizada. Apenas cerca de 3% da água é transformada em vapor, sendo a restante armazenada na parte inferior do depósito da caldeira sob a forma de água quente [54].

A identificação dos componentes da CEEJAV pode ser feita com o auxílio da Figura 2.16. A bomba de circulação (1) fornece água para o coletor de injetores (2). A água flui através dos injetores (3), por onde é ejetada a alta velocidade. Após a sua ejeção, a água embate nos eletrodos energizados (4) e escorre até aos contra-eletrodos (5). Estes jatos de água (6) funcionam como condutores resistivos, permitindo a passagem de corrente elétrica que gera calor diretamente na água [58].

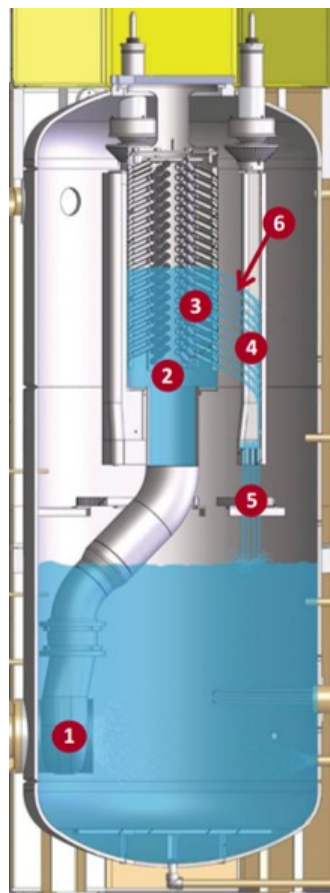


Figura 2.16 – Componentes da caldeira de eletrodo de jato de alta velocidade, adaptado de [58].

2.3.2.2 Condições de operação

As CE apresentam uma ampla gama de temperaturas e pressões de funcionamento, o que permite a sua aplicação em diversos contextos, incluindo processos industriais. A sua capacidade e flexibilidade de atingir certos pontos de funcionamento não acessíveis às BC torna ambos os equipamentos potencialmente complementares [59].

Tendo em conta a elevada flexibilidade operacional das CE, dado que podem ser ligadas e desligadas facilmente, e serem utilizadas em períodos de excedente de produção de energia elétrica, nomeadamente proveniente de fontes renováveis intermitentes, contribuem assim para a integração eficiente de energias renováveis no sistema energético.

No mercado as CE disponíveis atingem temperaturas até 400 °C e permitem a produção de vapor a temperaturas aproximadamente 350 °C e pressões até 70 bar [60]. Para além do referido, quando o equipamento é desligado, a água armazenada no depósito permanece quente durante um determinado período devido ao seu isolamento térmico. Desta forma, apesar de não estar em operação, a caldeira pode ser utilizada enquanto depósito térmico para reservar a água quente para outros processos [61].

Adicionalmente, devido ao reduzido número de partes móveis, caracterizam-se por uma baixa necessidade de manutenção e por uma longa vida útil, como mencionado na secção 2.1.2.3, fatores que reforçam a sua fiabilidade e atratividade em aplicações industriais [53].

3 Unidade de Produção de Margarina

O presente estudo incide sobre uma unidade industrial de produção de margarina, cujas necessidades de aquecimento são atualmente supridas através da utilização de vapor saturado. O vapor é produzido através de uma caldeira a gás natural (CGN), responsável por fornecer a energia térmica necessária às diferentes etapas do processo produtivo. Com o objetivo de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e de alinhar-se com os princípios de descarbonização e transição energética, a unidade industrial pretende substituir a caldeira do processo de produção de margarina existente, por uma solução tecnológica mais sustentável, capaz de eliminar o consumo de gás natural no processo de produção de calor.

As alternativas tecnológicas em estudo são a bomba de calor (BC) e a caldeira elétrica (CE), cujos princípios de funcionamento e principais características são apresentados nas secções 2.3.1 e 2.3.2, respetivamente. O objetivo é substituir o consumo de vapor na instalação por água quente produzida pelos equipamentos em estudo.

A unidade industrial dispõe de um circuito de refrigeração cujo fluido frigorigéneo utilizado é o R717. Este circuito encontra-se em operação durante o horário de funcionamento da unidade industrial, devido às necessidades de frio industrial em processos paralelos à produção de margarina. É sabido que o calor rejeitado pelo processo de refrigeração, dissipado através de um equipamento condensador, constitui energia térmica desperdiçada que, em condições adequadas, poderá ser recuperada e valorizada.

A análise desenvolvida tem, assim, como finalidade avaliar comparativamente as soluções propostas, em termos energéticos, tecnológicos e económicos, de modo a identificar a opção mais adequada ao perfil de necessidades da unidade industrial.

3.1 Caracterização do processo produtivo

A indústria de processamento alimentar é considerada uma das mais relevantes no processo de descarbonização do setor industrial, dado o seu elevado consumo energético, sobretudo em processos térmicos como cozedura, esterilização e pasteurização. Devido às necessidades de aquecimento nesses processos, esta indústria representa aproximadamente 12% do consumo total de eletricidade do setor industrial. Este consumo tem um grande impacto na emissão de GEE considerando que essa eletricidade é, em grande parte, produzida a partir da queima de combustíveis fósseis [62], não contabilizando com a utilização direta destes combustíveis por equipamentos de produção de calor.

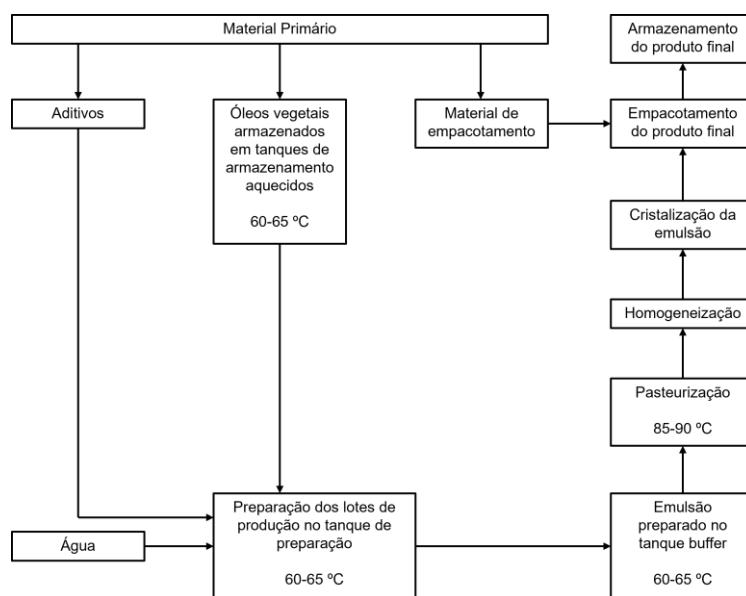


Figura 3.1 – Etapas do processamento de margarina, adaptado de [62].

Desde o material primário até ao produto final, a produção de margarina é constituída por várias etapas indispensáveis. Como representado na Figura 3.1, entre as etapas inerentes ao processo, algumas têm necessidades térmicas na sua execução.

Os lotes de produção são preparados devidamente num tanque dedicado. Após a preparação da emulsão dos ingredientes, o produto é bombeado para um tanque fechado, onde o produto é armazenado antes de ser transferido para a próxima etapa de produção (pasteurização).

A emulsão é transferida para a etapa de pasteurização, que ocorre através da existência de água quente a 85 °C, constituindo uma das fases críticas do ponto de vista energético, dado o rigor térmico necessário para assegurar a segurança alimentar [62].

Posteriormente à pasteurização, segue-se a homogeneização da emulsão, onde a gordura é fragmentada em partículas microscópicas, estabilizando a emulsão e prevenindo a separação de fases, maioritariamente constituída por água. De seguida, ocorre a cristalização, etapa em que, através do congelamento da água, intensifica a sua ligação das moléculas de água às moléculas de óleo, aprimorando a consistência da emulsão.

Finalmente, o produto passa por um processo de acabamento mecânico, no qual altera a sua consistência sólida para uma mais suave, sendo depois acondicionado e embalado para distribuição. Todos os processos descritos anteriormente dependem, direta ou indiretamente, de energia térmica [62].

3.2 Descrição da instalação existente

O presente estudo centra-se nas etapas de produção de margarina que tenham necessidades térmicas, satisfeitas anteriormente por intermédio de vapor com recurso a uma CGN. O esquema de princípio da unidade industrial, ilustrado na Figura 3.2, foi elaborado com base no P&ID desenvolvido pela ACET (Anexo B), para melhor compreensão das etapas em estudo.

De modo a garantir as necessidades térmicas em todas as etapas, a determinação da temperatura de produção de água quente considera, principalmente, a pasteurização pela sua necessidade de manter a margarina fluida através da alimentação de água quente a 85 °C, no circuito secundário do respetivo permutador de calor (circuito azul, Figura 3.2).

Com essa premissa, estabelece-se a temperatura de 90 °C da água quente no circuito primário do permutador de calor (circuito roxo, Figura 3.2), que alimenta as respetivas etapas de produção de margarina enumeradas acima, assegurando a transferência de calor e, por sua vez, a temperatura ótima da margarina, garantindo que esta conserva a sua consistência fluida.

Desta forma, cada permutador de calor, devidamente selecionado para garantir a potência necessária, é provido de água quente a 90 °C. Os permutadores de calor em análise são os representados na Figura 3.2 e listados de seguida:

- Tanques de armazenamento de óleos vegetais – M1 e M2;
- Tanque de preparação – M3 e M4;
- Tanque buffer – M5;
- Pasteurização – M6.

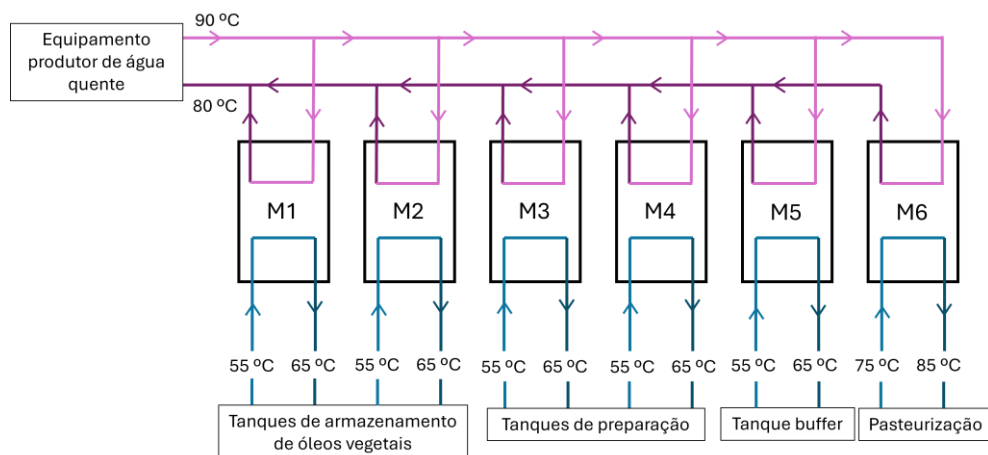


Figura 3.2 – Esquema da instalação existente.

No decorrer da produção de margarina, os processos integrantes da produção de margarina não ocorrem em simultâneo. Desta forma, a potência térmica necessária não é igual à soma das potências em cada permutador de calor. O presente trabalho incide no estudo comparativo de soluções para substituição do sistema convencional, que venham a ser mais eficientes e ambientalmente sustentáveis, e na substituição da produção de vapor por água quente:

- Bomba de calor de alta temperatura (BC de AT) - solução cujo coeficiente de desempenho (COP) permite produzir energia sob a forma de calor em maior quantidade do que a consumida sob a forma de eletricidade, como descrito na secção 2.3.1.2. Como explícito na secção 2.3.1.3, é uma tecnologia promissora no ramo alimentar da indústria capaz de promover a sua eficiência e atuar na descarbonização.
- Caldeira elétrica de resistência (CER) - solução mais simples em termos de conceção, que converte diretamente energia elétrica em calor, garantindo flexibilidade operacional e compatibilidade com as exigências térmicas da instalação [58]. A CER é ideal para aplicações com potência térmica inferior a 4 MW (secção 2.3.2.1.1).

De modo a apoiar a unidade industrial na escolha da solução mais adequada a implementar no processo em estudo, torna-se imprescindível realizar uma análise comparativa que permitirá não só identificar a alternativa mais eficiente sob os pontos de vista tecnológico, energético e económico, como também evidenciar aspetos críticos de ambas as soluções. Em forma de resumo, as características de cada equipamento em análise encontram-se dispostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo da análise tecnológica comparativa entre bomba de calor de alta temperatura e caldeira elétrica de resistência.

Critério	Bomba de Calor de Alta Temperatura (BC de AT)	Caldeira Elétrica de Resistência (CER)
Eficiência energética (COP/η)	COP típico 3–5 (300%–500% eficiência) [19]	$\eta \approx 0,95$ –1,00 (95%–100%) [20]
Faixa típica de temperatura	Até 120–150 °C (modelos de alta temperatura em desenvolvimento)	Até >200 °C (adequadas para vapor de alta pressão)
Dependência de condições externas	Elevada (fonte térmica: ar, água ou geotermia)	Nula (produção direta de calor por efeito Joule)
Custos de investimento inicial	Elevados (tecnologia mais complexa, maior custo de investimento)	Moderados (equipamento simples)
Custos operacionais	Reduzidos (elevada eficiência energética)	Potencialmente elevados (dependência do preço da eletricidade)
Complexidade tecnológica	Média a elevada (circuito frigorífico, compressores, permutadores)	Baixa (resistências elétricas e controlo básico)
Manutenção	Regular (verificação de fugas, compressores, fluido frigorífero)	Reduzida (poucos componentes móveis, ausência de queimadores)
Maturidade tecnológica	Em crescimento (particularmente nas versões industriais de alta T)	Elevada (tecnologia consolidada e simples)
Flexibilidade operacional	Limitada em altas temperaturas e rápidas variações de carga	Elevada, com resposta imediata a variações de carga
Impacto ambiental	Muito baixo (quando alimentadas com eletricidade renovável e uso de fluido frigoríferos naturais)	Muito baixo (emissões nulas na operação, dependente da origem da eletricidade)

3.3 Dimensionamento da instalação

3.3.1 Potência térmica necessária

Para dimensionamento da solução energética, a unidade industrial disponibilizou os valores do caudal volúmico de água quente ($\dot{V}_{\text{água}}$) no circuito secundário de cada permutador de calor, os quais se encontram sintetizados na Tabela 3.2.

Este circuito é responsável pela permuta térmica com o circuito de margarina. Adicionalmente, foram fornecidas as temperaturas de entrada (T_{entrada}) e saída ($T_{\text{saída}}$) da água quente no circuito secundário de cada permutador de calor, correspondentes às respetivas temperaturas de cada processo (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Características da água quente no circuito secundário de cada permutador de calor.

Permutador de calor	T _{entrada} / T _{saída} [°C / °C]	$\dot{V}_{\text{água}}$ [L/s]	$\dot{V}_{\text{água}}$ [m ³ /s]
M1	65 / 55	9,9	0,0099
M2	65 / 55	9,9	0,0099
M3	65 / 55	6,4	0,0064
M4	65 / 55	6,4	0,0064
M5	65 / 55	2,5	0,0025
M6	85 / 75	5,9	0,0059

A potência necessária em cada permutador de calor foi calculada através da equação 3.1, a qual relaciona o \dot{V} , tomando os valores de $\dot{V}_{\text{água}}$, as propriedades termofísicas do fluido em estudo e a diferença entre T_{entrada} e T_{saída}, ΔT , do permutador de calor.

Como demonstração do cálculo efetuado para a totalidade do caso em estudo, considerou-se o permutador de calor M1, cujas características se encontram na Tabela 3.2. Admitiu-se os valores dispostos na Tabela 3.3 para as propriedades termofísicas consideradas no estudo: massa volúmica (ρ), calor específico (c_p) e ΔT . Pressupõe-se que estes parâmetros sejam constantes ao longo do estudo, sendo valores de referência tipicamente utilizados pela ACET:

$$P = \dot{V} \times \rho \times c_p \times \Delta T \quad (3.1)$$

Onde,

P – Potência térmica [kW]

\dot{V} – Caudal volúmico [m³/s]

ρ – Massa volúmica [kg/m³]

c_p – Calor específico [kJ/kg K]

ΔT – Diferença entre as temperaturas de entrada e saída [K]

Tabela 3.3 - Propriedades termofísicas consideradas e respectivos valores.

ρ [kg/m ³]	1000
c_p [kJ/kg K]	4,19
ΔT [K]	10

Um aspeto determinante é a simultaneidade de funcionamento dos permutadores de calor, uma vez que estes não operam em simultâneo. A sua consideração é essencial para evitar o sobredimensionamento da potência a instalar face às necessidades reais.

O coeficiente de simultaneidade foi determinado com base numa auditoria energética realizada à unidade industrial, a qual permitiu a construção do perfil de consumo do vapor, traduzido na potência térmica efetivamente requerida para o funcionamento dos permutadores de calor, ao longo de um período estabelecido de 1343 horas de operação, sendo que apenas 727 horas representam trabalho contínuo.

Pela análise do gráfico circular da Figura 3.3, que apresenta o resumo do Anexo C, é possível concluir que em mais de 50% do tempo de produção, a unidade industrial necessita entre 1,5 e 2 MW de potência térmica, o que corresponde a 50,2% da potência térmica total teórica. Desta forma, assume-se o valor de 50% de coeficiente de simultaneidade para os restantes cálculos.

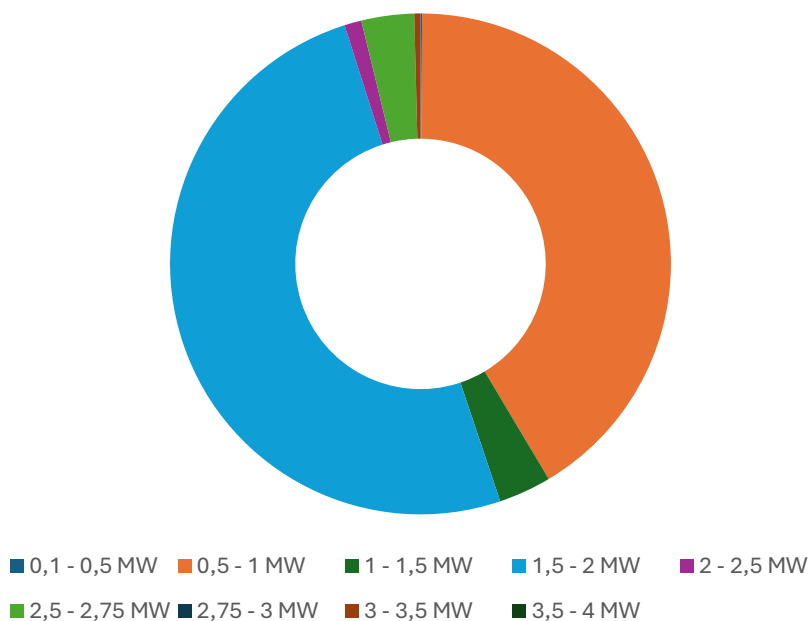


Figura 3.3 – Gráfico de resumo das necessidade térmicas reais da unidade industrial.

A potência térmica teórica ($P_{teórica}$) foi inicialmente calculada com base na equação 3.1. Tendo-se obtido para o permutador de calor M1 o valor de 414,81 kW. A Tabela 3.4 apresenta os valores obtidos de $P_{teórica}$ para todos os permutadores de calor.

A potência térmica efetiva ($P_{efetiva}$) considerada em cada permutador de calor foi obtida pela multiplicação entre a $P_{teórica}$ e coeficiente de simultaneidade. Foi obtido o valor de 207,41 kW para o permutador de calor M1 e aplicou-se o coeficiente de simultaneidade nos restantes valores de $P_{teórica}$, obtendo-se os valores dispostos na Tabela 3.4.

Desta forma, foi obtida a potência efetiva total, resultante da soma dos valores de $P_{efetiva}$ de todos os permutadores de calor. O valor de 858,95 kW corresponde à carga térmica mínima que deverá ser satisfeita pelo equipamento produtor de água quente.

Tabela 3.4 - Potência térmica teórica e efetiva em cada permutador de calor.

Permutador de calor	$P_{teórica}$ [kW]	$P_{efetiva}$ [kW]
M1	414,81	207,41
M2	414,81	207,41
M3	268,16	134,08
M4	268,16	134,08
M5	104,75	52,38
M6	247,21	123,61

Com o objetivo de garantir a fiabilidade e segurança operacional da instalação, é recomendado considerar um fator de sobredimensionamento. Este fator permite que o equipamento selecionado se adeque às necessidades térmicas da unidade industrial mesmo quando estas ultrapassem os valores teóricos considerados. Por ser o valor definido pela ACET, foi considerado um acréscimo de 25% sobre a $P_{efetiva}$ total, obtendo-se a potência a disponibilizar pelo equipamento produtor de água quente (P_{equip}), com valor de 1 075 kW.

3.3.2 Seleção dos equipamentos

Conforme discutido na secção 3.2, as soluções tecnológicas selecionadas são BC de AT e a CER.

Apesar de ambas as tecnologias partilharem o propósito de produzir água quente, apresentam diferenças significativas em parâmetros determinantes, como o consumo energético, o investimento inicial, os custos de operação e manutenção, a fiabilidade tecnológica e a integração na instalação existente. Estes fatores condicionam a escolha da solução mais adequada para a unidade industrial, pelo que devem ser considerados num enquadramento energético-económico e operacional.

A potência térmica foi previamente determinada em 1 075 kW, assegurando a temperatura de 90 °C da água à entrada dos permutadores de calor. Esta condição representa uma premissa fundamental para a seleção dos equipamentos, sendo comum às alternativas analisadas.

3.3.2.1 Bomba de calor

3.3.2.1.1 Bomba de calor de alta temperatura amoníaco-água

Foi considerada uma BC de AT do tipo amoníaco-água (R717-H₂O). A existência do circuito de refrigeração na unidade industrial, onde a condensação do seu fluido frigorigéneo, R717, resulta na dissipação de calor. Este caracteriza uma fonte térmica viável e vantajosa, o que levou à escolha deste tipo de BC de AT, aproveitando, assim, a energia que viria a ser desperdiçada.

A auditoria realizada evidencia o consumo elétrico por parte dos compressores do circuito de refrigeração e do consumo elétrico para produção de vapor, ilustrados no gráfico da Figura 3.4. A informação da auditoria, presente no Anexo C, constou apenas de análise para o júri da prova pública, não sendo disponibilizada ao público em geral.

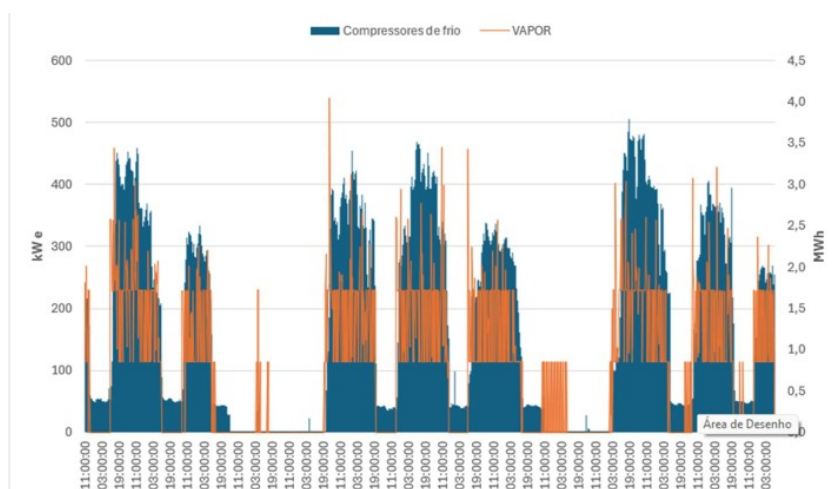


Figura 3.4 – Perfil de produção de vapor face ao consumo elétrico dos compressores de frio, adaptado de Anexo C.

Através da análise dos resultados verifica-se que quando há necessidade de produzir vapor, os compressores do circuito de refrigeração estão a trabalhar em paralelo. Deste modo, constata-se que a energia rejeitada pelo sistema de refrigeração pode ser tecnicamente recuperada e considerada como uma fonte térmica disponível durante o processo de produção de margarina, contribuindo para a redução do consumo energético global da instalação.

O esquema de princípio da BC de AT R717-H₂O está representado na Figura 3.5

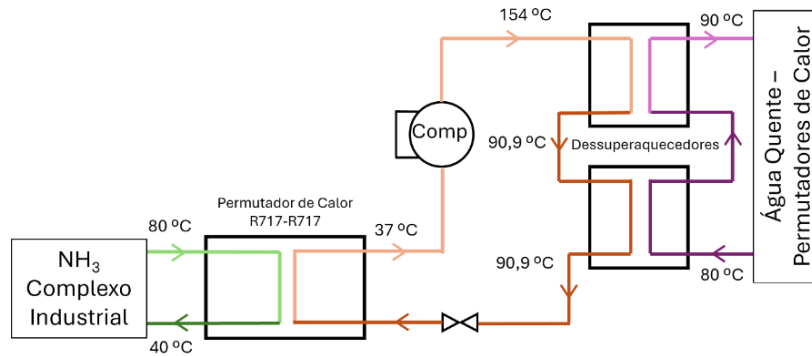


Figura 3.5 - Esquema de princípio da BC de AT R717-H₂O, adaptado de Anexo D.

A BC de AT é integrada por dois circuitos:

- Circuito frigorífico - funciona com R717 como fluido frigorígeno, onde ocorre a compressão, condensação e expansão do fluido, permitindo elevar a sua temperatura (circuito laranja, Figura 3.5);
- Circuito hidráulico - responsável por transferir o calor através da circulação da água quente, destinada ao processo industrial (circuito roxo, Figura 3.5).

O funcionamento da BC de AT baseia-se no princípio de cascata, devido à elevada potência requerida. O R717 integrante do circuito de refrigeração é condensado, reduzindo a sua temperatura de 80°C para 40°C (circuito verde, Figura 3.5). Por sua vez, o R717 do circuito primário da BC de AT (circuito laranja, Figura 3.5), inicialmente a 37 °C, é comprimido até atingir temperatura na ordem dos 154 °C.

Na BC de AT, a energia resultante da compressão do R717 é transferida para a água do circuito primário que alimenta os permutadores de calor (circuito roxo, Figura 3.5).

A transferência desta energia ocorre em dois dessuperaquecedores. A função deste componente consiste no arrefecimento do R717, que se encontra em estado de vapor sobreaquecido, até que este se encontre no estado de vapor saturado.

Embora, na maioria das aplicações seja habitual a utilização de um único dessuperaquecedor, a solução selecionada integra dois dessuperaquecedores, de modo a garantir um controlo térmico mais eficaz do fluido frigorígeno e uma melhor adaptação às exigências operacionais do sistema. Desta forma, a energia transferida em dois dessuperaquecedores, montados em série, eleva a temperatura da água de alimentação dos permutadores de calor de 80 °C para 90 °C, e, por sua vez, diminui a temperatura do R717 de 154 °C para 91 °C.

A BC de AT conta com um orçamento médio de 337 121 € e as características técnicas e construtivas apresentadas na Tabela 3.5, com base no Anexo D.

Apesar da potência devolvida pela seleção do equipamento (Tabela 3.5), visível no Anexo D, ser inferior à calculada (secção 3.3.1), uma vez que para o cálculo da última foi considerado um coeficiente de sobredimensionamento, a primeira não limita a capacidade da BC suprir as necessidades térmicas da unidade industrial. Desta forma, evita-se a seleção de um modelo acima do proposto e, conseqüentemente, obter um orçamento superior ao obtido, sem que seja necessário.

Tabela 3.5 – Características técnicas e construtivas da BC de AT R717-H₂O.

Potência [kW]	1 036
COP	4,07
Potência Elétrica Absorvida [kW]	254,8
Comprimento [mm]	6 400
Largura [mm]	2 200
Altura [mm]	2 500
Peso em operação [kg]	18 000

3.3.2.1.2 Bomba de calor de alta temperatura ar-água

A utilização de uma BC de AT ar-H₂O constitui uma alternativa tecnicamente viável e energeticamente eficiente para o sistema de aquecimento considerado.

A aproveitação do ar (secção 2.3.1.3), uma fonte de energia renovável e disponível, torna esta tecnologia uma solução atrativa.

A solução seleccionada é constituída por uma BC ar-H₂O e uma BC água-água (H₂O-H₂O), dispostas numa configuração em cascata por intermédio de um depósito de acumulação de água quente, como apresentado na Figura 3.6.

Esta configuração permite aproveitar o ar como fonte térmica, na BC ar-H₂O, e potencializar a sua energia através da BC H₂O-H₂O, possibilitando assim a produção de água quente a alta temperatura.

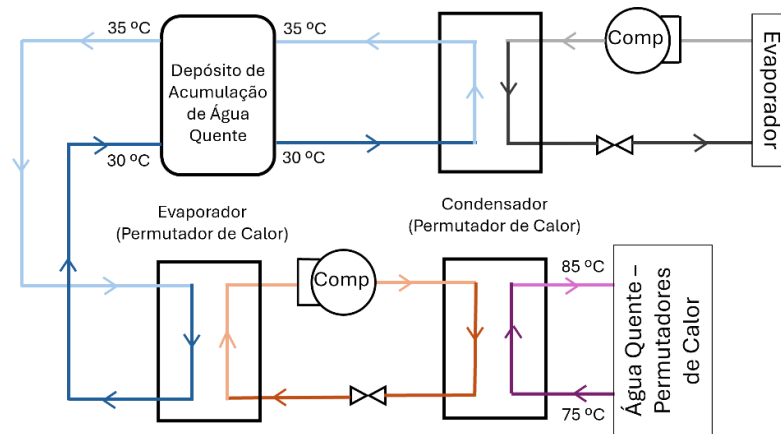


Figura 3.6 – Esquema de princípio da BC de AT ar-H₂O-H₂O

O equipamento foi seleccionado considerando como condições exteriores 5 °C de temperatura de bolbo seco e humidade relativa de 80%, sendo condições reais no outono/inverno. A P_{equip} requerida foi de 1 075 kW. A BC de AT é integrada por três circuitos:

- Dois circuitos frigoríficos – o circuito cinzento destina-se à permuta de calor entre o ar e o circuito hidráulico intermédio (azul), enquanto o circuito laranja destina-se à permuta entre o circuito hidráulico intermédio e a água quente destinada ao processo produtivo (Figura 3.6);
- Circuito hidráulico intermédio- responsável por transferir o calor desde a BC de AT ar-H₂O para a BC de AT H₂O-H₂O (circuito azul, Figura 3.6).

O fluido frigorigéneo utilizado no ciclo frigorífico da BC de AT ar-H₂O é o R32, enquanto o fluido aplicado na BC de AT H₂O-H₂O é o R1234ze que, tal como mencionado na secção 2.3.1.2, é um fluido de nova geração e apresentar um baixo ODP e um GWP nulo. Esta combinação assegura o cumprimento das diretivas europeias relativas à sustentabilidade ambiental e à redução do impacto climático dos fluidos frigorigéneos.

A seleção efetuada condiciona a produção de água quente a uma temperatura ligeiramente inferior à requerida (85°C), dado que a adoção de um modelo acima, cuja produção de água quente atinge os 120 °C, implicaria um investimento inicial substancialmente superior à solução aqui considerada. Desta forma, na eventualidade de haver a possibilidade de reduzir a temperatura necessária no processo de produção de margarina para 80 °C, foi considerada a solução acima descrita.

Dado tratar-se de uma configuração em cascata, o COP global da solução é calculado com base na equação (2.1), considerando a potência elétrica absorvida da BC de AT ar-H₂O (\dot{W}_1), a potência elétrica absorvida (\dot{W}_2) e a potência térmica (\dot{Q}_{TOTAL}) da BC de AT H₂O-H₂O, conforme indicado na Tabela 3.6. A potência elétrica total absorvida resulta da soma das potências absorvidas referidas.

Tabela 3.6 - Cálculo do COP global da BC de AT ar-H₂O-H₂O

\dot{W}_1 [kW]	255
\dot{W}_2 [kW]	407
\dot{Q}_{TOTAL} [kW]	1274

Com um COP global de 1,92, a solução conta com as características técnicas e construtivas apresentadas na Tabela 3.7, e com um investimento médio de 400 000 €, conforme indicado no Anexo E. As dimensões e o peso são referentes à BC de AT ar-H₂O/ BC de AT H₂O-H₂O, excluindo o depósito de acumulação.

Tabela 3.7 - Características técnicas e construtivas da BC de AT ar-H₂O-H₂O.

Potência [kW]	1 274
COP	1,92
Potência Elétrica Absorvida [kW]	662
Comprimento [mm]	10 068/4 730
Largura [mm]	2 253/1 125
Altura [mm]	2 324/2 002
Peso em operação [kg]	6 631/7 265

3.3.2.2 Caldeira elétrica

Como alternativa às BC de AT, foi analisada a instalação de uma CER (Figura 3.7). Foi selecionado este tipo de CE devido à potência térmica requerida ser inferior a 4 MW, como revisto na secção 2.3.2.1.1..

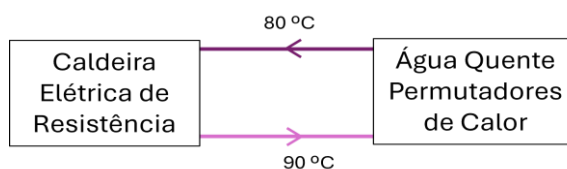


Figura 3.7 - Esquema da CER.

As principais vantagens desta tecnologia prendem-se pela sua simplicidade de operação, flexibilidade em regimes variáveis de carga e a ausência de emissões diretas de GEE, dado que não utiliza combustíveis fósseis na produção de calor (secção 2.1.2.3 e secção 2.3.2.1.1). Contudo, apresenta tipicamente um consumo energético específico superior e custos operacionais dependentes da tarifa elétrica aplicada, fatores que devem ser cuidadosamente ponderados no contexto económico da unidade industrial.

A CER selecionada, cujo orçamento médio ascende a 331 155 €, retirado do Anexo A, conta com características técnicas e construtivas típicas descritas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Características técnicas e construtivas da CER.

Potência Térmica [kW]	1 056
Eficiência [%]	99,16
Potência Elétrica Absorvida [kW]	1 214
Comprimento [mm]	3 990
Largura [mm]	1 600
Altura [mm]	2 000
Peso em operação [kg]	1 760

4 Análise Técnico-Económica

Após seleção dos equipamentos e a apresentação das respetivas características técnicas e construtivas, procedeu-se à análise comparativa sob os pontos de vista tecnológico, energético e económico, permitindo uma avaliação integrada das soluções e a identificação da opção a sugerir para a implementação na unidade fabril.

4.1 Análise tecnológica

A bomba de calor (BC) de alta temperatura (AT) R717-H₂O apresenta-se como um equipamento de elevada complexidade tecnológica, cuja operação depende do ciclo frigorífico para garantir o fornecimento de energia térmica. A BC de AT selecionada integra um conjunto significativo de componentes, entre os quais se destacam:

- compressor de pistões do circuito secundário de R717;
- dois dessuperaquecedores, responsáveis pela transferência de calor do R717 para a água quente;
- permutador de calor intermédio, no qual ocorre a transferência de energia térmica entre o circuito primário e secundário de R717;
- permutador de calor para arrefecimento do óleo do compressor.

Em semelhança à BC descrita anteriormente, a BC de AT ar-H₂O-H₂O opera por intermédio do ciclo frigorífico, apresentando um circuito de menor complexidade, embora integre um maior número de componentes, nomeadamente a existência de duas BC em configuração de cascata, entre os quais se destacam:

- dois evaporadores/permutadores de calor;
- dois condensadores/permutadores de calor;
- dois compressores;
- um depósito de acumulação de água quente, necessário ao funcionamento.

No caso das BC, a existência de vários componentes mecânicos implica a adoção de um plano de manutenção mais exigente e por sua vez mais dispendioso, de modo a garantir a fiabilidade operacional e a longevidade da instalação [63].

Em contrapartida, a caldeira elétrica de resistência (CER) caracteriza-se como um equipamento tecnologicamente mais simples, sendo essencialmente composta por:

- um depósito de acumulação de água;
- um armário de comando e proteção;
- quatro aquecedores de flange elétricos (resistências elétricas de imersão).

A simplicidade tecnológica da CER reflete-se em diversas vantagens práticas como:

- a sua implantação facilitada, mesmo em espaços limitados;
- o menor número de componentes sujeitos a desgaste e, com isso, que necessitem de manutenção;
- a redução das ligações hidráulicas necessárias face às BC de AT.

Através da análise comparativa das características construtivas apresentadas na Tabela 3.5, na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8 verifica-se que a CER revela ser a solução mais favorável em contextos de instalação em locais com restrições de espaço e peso. O seu volume e área de implementação correspondem a 36% e 45%, respetivamente, dos valores referentes à BC de AT R717-H₂O, e 20% e 23%, respetivamente, aos valores referentes à BC de AT ar-H₂O-H₂O. Quanto ao peso da CER, é significativamente inferior quando comparado com as restantes tecnologias, correspondendo a 10% do peso da BC de AT R717-H₂O e 13% do peso da BC de AT ar-H₂O-H₂O.

No que se refere à vida útil dos equipamentos, esta situa-se tipicamente entre 15 e 25 anos, dependendo das condições de operação e da manutenção aplicadas [22].

4.2 Análise energética

Do ponto de vista energético, cada tecnologia apresenta vantagens e desvantagens relativamente às tecnologias concorrentes:

- A BC de AT R717-H₂O destaca-se pelo seu coeficiente de desempenho (COP) de 4,07, resultando numa potência absorvida de 254,80 kW. Adicionalmente, a solução valoriza o calor residual proveniente da instalação frigorífica presente na unidade industrial, anulando o consumo de energia elétrica utilizado no condensador previamente instalado;

- A BC de AT ar-H₂O-H₂O distingue-se pela sua capacidade de potencializar a energia térmica produzida através de um baixo consumo de energia elétrica, assim como a BC de AT R717-H₂O. No entanto, a sua configuração, é caracterizada por ser uma tecnologia mais suscetível a perdas energéticas adicionais, refletindo-se no seu COP global de 1,92 e na potência absorvida de 662 kW;
- A CER apresenta uma eficiência (η) praticamente unitária ($\eta=0,99$), na qual a energia elétrica consumida é convertida, quase na sua totalidade, em energia térmica, não beneficiando do mesmo efeito multiplicador das BC. Desta forma, apresenta uma potência absorvida de 1 214 kW.

A Tabela 4.1 sintetiza as características energéticas das soluções.

Tabela 4.1 - Comparação energética entre as tecnologias em estudo.

Propriedades	BC de AT R717-H ₂ O	BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O	CER
Eficiência	4,07	1,92	0,99
Potência Absorvida [kW]	254,80	662,00	1 214,00

Através da análise dos dados apresentados na Tabela 4.1, verifica-se que a diferença de eficiência entre a CER e os restantes equipamentos tem uma expressiva repercussão na potência absorvida elétrica. A potência absorvida elétrica da CER é 4,7 vezes superior à da BC de AT R717-H₂O e 1,8 vezes superior à da BC de AT ar-H₂O-H₂O. Devido à configuração da BC de AT ar-H₂O-H₂O, a BC de AT R717-H₂O apresenta um COP bastante superior, pelo que a sua potência elétrica absorvida é 2,6 vezes inferior.

4.3 Análise económica

Apesar das vantagens energéticas e tecnológicas associadas às soluções analisadas, o investimento inicial e os custos de operação e manutenção dos equipamentos são os elementos diferenciadores na identificação da solução mais adequada para o caso de estudo. Nesse sentido, recorre-se à realização de estudos de viabilidade económica, os quais permitem avaliar a fiabilidade e atratividade do investimento.

No presente estudo, foi desenvolvida uma análise de viabilidade económica com o objetivo de comparar o desempenho económico da BC de AT R717-H₂O, da BC de AT ar-H₂O-H₂O e da CER, considerando um horizonte temporal de 20 anos de operação.

Adicionalmente, foi determinado o período de retorno simples associado à substituição de uma solução por outra (*payback* simples).

O custo de investimento corresponde às despesas iniciais associadas à aquisição dos equipamentos. Os valores considerados para os orçamentos, apresentados na Tabela 4.2, encontram-se descritos na secção 3.3.2, e a informação consta em maior detalhe nos Anexos A, D e E.

Tabela 4.2 – Custo de investimento das tecnologias em estudo.

BC de AT R717-H₂O	337 121 €
BC de AT ar-H₂O-H₂O	400 000 €
CER	331 155 €

O custos de operação refletem o custo do tempo de vida útil dos equipamentos. Estes definem se o investimento inicial é compensado face aos custos de operação e manutenção da tecnologia durante esse período. Para o cálculo do custo anual do consumo energia elétrica considerou-se que a unidade industrial opera em regime contínuo:

- 24 horas/dia nos dias úteis;
- 16 horas ao sábado;
- 8 horas ao domingo.

De acordo com o Operador do Mercado Elétrico [64], à data de 31 de julho de 2025, o preço médio anual da eletricidade encontrava-se a 64,22 €/MWh, o que corresponde a 0,06422 €/kWh. Uma vez que não foi possível obter informação específica relativa ao preço da eletricidade em alta tensão aplicável ao custo de consumo elétrico da unidade industrial, utilizou-se o valor acima para elaboração dos cálculos.

Considerando um regime de funcionamento anual de 7512 horas e adotando um valor médio para uma tarifa elétrica simples com preço constante, calculou-se o custo da energia consumida anualmente $C_{energia}$, para cada equipamento. O cálculo foi efetuado com base na equação 4.1, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.3:

$$C_{energia} = P_{abs} \times h_{op} \times C_{elet} \quad (4.1)$$

Onde,

$C_{energia}$ - Custo da energia consumida anualmente [€];

P_{abs} - Potência Absorvida [kW];

h_{op} - Horas de operação [h];

C_{elet} - Custo de eletricidade [€/kWh].

Tabela 4.3 - Custo de consumo anual de eletricidade por equipamento.

Parâmetro	BC de AT R717-H ₂ O	BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O	CER
Potência Absorvida [kW]	254,8	662	1 214
Custo Anual [€]	122 930	319 362	585 660

Os custos de manutenção dos equipamentos dependem da sua complexidade tecnológica e dos componentes sujeitos a desgaste. A manutenção pode ser dividida em corretiva e preventiva, onde a manutenção preventiva ocorre de forma a prevenir a falha do equipamento, e a manutenção corretiva ocorre após ocorrência de falha.

Os valores médios considerados no presente trabalho são valores estimados pela ACET tendo em conta a sua experiência. O custo de manutenção da CER é inferior aos das BC de AT devido à sua simplicidade tecnológica. Por sua vez, a diferença entre o custo de manutenção de ambas as BC de AT deve-se à complexidade da instalação (secção 4.1): a BC de AT R717-H₂O, com uma configuração em cascata de R717, é constituída por componentes mais complexos, destacando-se os dessuperaquecedores e um compressor de pistão, enquanto a BC de AT ar-H₂O-H₂O, apesar de apresentar um maior número de componentes, são menos complexos. Para o presente estudo, considerou-se que a manutenção corretiva ocorre apenas uma vez no período de análise estabelecido.

Definidos os valores de custo de operação, dispostos na Tabela 4.4, iniciou-se a análise de viabilidade económica com o intuito de averiguar qual a solução mais adequada e, por fim, elaborar uma conclusão. A viabilidade de um investimento é verificada através do seu retorno ao longo de um período, preferencialmente inferior ao tempo de vida útil do investimento, neste caso, um equipamento produtor de água quente. Para o caso em estudo foi considerado não haver constrangimentos a nível monetário para o investimento inicial, sendo o período de retorno a única variável decisiva.

Tabela 4.4 - OPEX das tecnologias em estudo.

Custos	BC de AT R717-H ₂ O	BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O	CER
Consumo anual de eletricidade [€]	122 930	319 632	585 660
Manutenção anual preventiva [€]	1 500	1 500	1 000
Manutenção corretiva (Ano 10) [€]	35 000	30 000	15 000

O custo do ciclo de vida, do inglês *Lifecycle Cost* (LCC), dos equipamentos permite comparar e analisar qual a solução mais adequada. Este parâmetro soma o custo de investimento (C_{inv}) e o custo de operação (C_{om}) ao longo do período de vida útil definido [65], e subtrai o valor de revenda do equipamento, não considerado neste caso (equação 4.2).

$$LCC = C_{inv} + C_{om} - C_{REV} \quad (4.2)$$

Onde,

C_{inv} – custo de investimento [€];

C_{om} – custo de operação e manutenção [€];

C_{REV} – custo de revenda do equipamento [€].

Para a análise de viabilidade económica, recorreu-se ao *software Engineering Economics Analysis* [66] com a finalidade de comparar o desempenho económico da BC de AT R717-H₂O, da BC de AT ar-H₂O-H₂O e da CER ao longo de 20 anos de operação. Este *software* analisa e compara o LCC de cada equipamento, devolvendo qual a solução mais adequada e o período de retorno respetivo a cada caso.

Após a abertura do programa, foi iniciado um novo estudo e selecionou-se a análise pretendida. Para o presente estudo, selecionou-se a opção “*Private Sector Lifecycle Analysis*”, que corresponde a uma análise do ciclo de vida detalhada, e a opção “*Mutually Exclusive*”, o que implica a escolha de apenas uma das soluções. O ano base considerado foi o ano 1, a moeda de referência adotada foi o Euro (€).

O período de análise definido corresponde a 20 anos, um valor médio entre os intervalos apresentados na secção 4.1. Não foram consideradas taxas de retorno, assumindo-se a inexistência de financiamento externo ou recurso a empréstimos.

De seguida, foram definidos os casos de análise, correspondentes aos equipamentos selecionados:

- BC de AT R717-H₂O;
- BC de AT ar-H₂O-H₂O;
- CER.

Foram, assim, criados três cenários independentes, nos quais foram introduzidos os dados técnicos e económicos de cada tecnologia, nomeadamente:

- designação do equipamento;
- custo de investimento - valor e ano de ocorrência;
- custos de operação - valor, ano de ocorrência, duração e aumento anual dos custos estimado em 2%.

Os valores de custo de investimento e custo de operação das tecnologias em estudo, introduzidos no *software*, foram retirados da Tabela 4.2 e da Tabela 4.4, e encontram-se na Tabela 4.5. Estes valores permitem avaliar o custo anual de cada tecnologia e, por fim, determinar o respetivo LCC de cada uma, que constitui um parâmetro determinante na identificação da solução mais adequada.

Tabela 4.5 - Valores de custos de investimento e operação introduzidos no *software*.

Parâmetro	BC de AT R717-H ₂ O	BC de AT ar-H ₂ O- H ₂ O	CER
Investimento inicial [€]	337 121	400 000	331 155
Consumo anual de eletricidade [€]	122 930	319 632	585 660
Manutenção anual preventiva [€]	1 500	1 500	1 000
Manutenção corretiva (Ano 10) [€]	35 000	30 000	15 000

Por fim, o *software* foi executado e foram gerados dois relatórios comparativos que analisam os cenários em estudo e identificam a solução mais economicamente viável. O primeiro relatório apresenta uma análise resumida dos custos acumulados ao longo do período de vida útil de cada equipamento (Anexo F), enquanto o segundo relatório discrimina os custos anuais e não anuais, ao longo de 20 anos, para cada solução tecnológica (Anexo G). Este último estabelece a comparação direta entre tecnologias, nomeadamente: CER vs. BC de AT R717-H₂O e BC de AT R717-H₂O vs. BC de AT ar-H₂O-H₂O. Os valores obtidos, retirados de ambos os relatórios, permitiram o cálculo do LCC para tecnologia, cujos resultados estão apresentados na Figura 4.1.

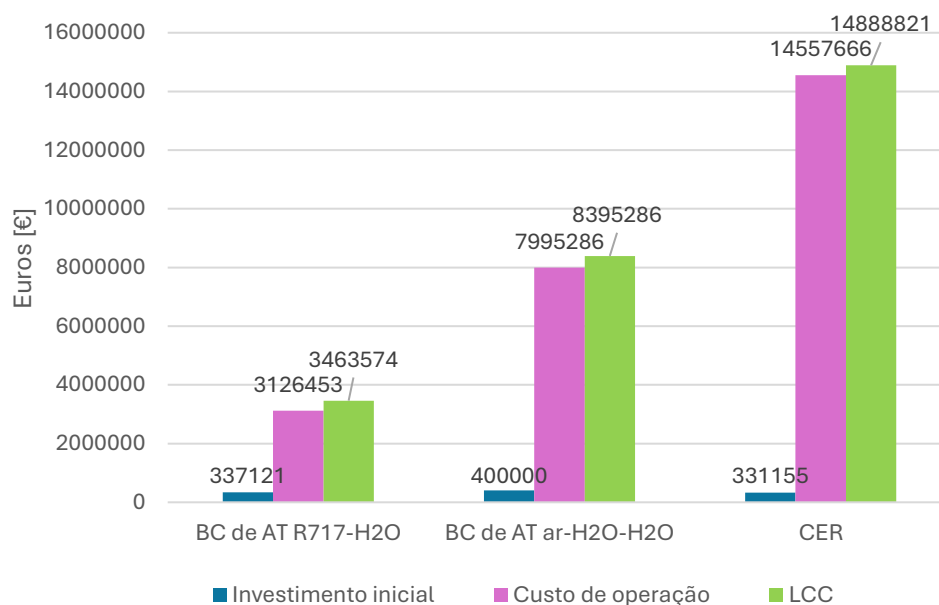


Figura 4.1 – Gráfico para análise do LCC das tecnologias em estudo

Analisando a Figura 4.1 conclui-se que apesar da CER apresentar um investimento inicial e custos de manutenção inferiores aos das BC de AT, o seu custo total de operação é significativamente superior, sendo 4,7 vezes superior aos custos de operação da BC de AT R717-H₂O e 1,8 vezes superior aos da BC de AT ar-H₂O-H₂O, resultando num elevado custo do ciclo de vida (LCC). A BC de AT R717-H₂O, cujo LCC representa aproximadamente 41% do LCC da BC de AT ar-H₂O-H₂O e 23% do LCC da CER, evidencia o menor custo total de operação.

Com base nos resultados do Anexo G, relativo aos resultados das comparações efetuadas, o período de retorno do investimento (*payback*) foi determinado através da poupança resultante da utilização de uma tecnologia face à outra, indicando o número de anos necessários para que o investimento inicial seja compensado. A primeira comparação, entre a CER e a BC de AT R717-H₂O, e o respetivo período de retorno encontram-se apresentados na Tabela 4.6.

A análise comparativa permite destacar as seguintes conclusões:

- A CER, apesar da sua simplicidade construtiva, operacional e de instalação, apresenta um custo de operação extremamente elevado, que inviabiliza a sua implementação como alternativa economicamente sustentável;

- A BC de AT R717-H₂O apresenta uma maior complexidade tecnológica e custos de manutenção superiores, contudo, estes são amplamente compensados pelo reduzido consumo elétrico, decorrente do seu elevado desempenho energético. Em consequência, o LCC total da BC de AT R717-H₂O é substancialmente inferior ao da CER;
- A substituição da CER pela BC de AT R717-H₂O conduz a uma poupança acumulada de 11 425 247 € ao longo do período de vida útil analisado. Esta diferença reflete-se num período de retorno nulo (0 anos), uma vez que o baixo custo de operação verificado logo no ano 1 gera uma poupança anual de 471 475 €, suficiente para compensar de imediato a diferença de investimento inicial entre as duas tecnologias (superior em apenas 5 966 € face à CER).

Tabela 4.6 - Resultado da comparação entre CER e BC de AT R717-H₂O.

Caso base	Caldeira elétrica de resistência (CER)
Caso de comparação	Bomba de calor R717-H ₂ O (BC de AT R717-H ₂ O)
LCC CER [€]	14 888 821
LCC BC de AT R717-H₂O [€]	3 463 574
Poupança total [€]	11 425 247
Período de retorno [ano]	0

A segunda comparação incide sobre as duas bombas de calor de alta temperatura, BC de AT R717-H₂O e BC de AT ar-H₂O-H₂O, sendo o resultado dessa análise comparativa e o respetivo período de retorno apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultado da comparação entre BC de AT R717-H₂O e BC de AT ar-H₂O-H₂O.

Caso base	Bomba de calor R717-H ₂ O (BC de AT R717-H ₂ O)
Caso de comparação	Bomba de calor ar-H ₂ O-H ₂ O (BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O)
LCC BC de AT R717-H₂O [€]	3 463 574
LCC BC de AT ar-H₂O-H₂O [€]	8 395 286
Poupança total [€]	- 4 868 833
Período de retorno [ano]	n/a

A comparação efetuada permite retirar as seguintes conclusões principais:

- A BC de AT R717-H₂O apresenta custos de manutenção equivalentes aos da BC de AT ar-H₂O-H₂O. A diferença do LCC entre ambas resulta, essencialmente, do custo associado ao consumo energético, uma vez que a BC de AT R717-H₂O possui um COP superior, refletindo-se num menor consumo elétrico;
- A BC de AT R717-H₂O evidencia igualmente um investimento inicial inferior, com uma diferença de 62 879 € relativamente à BC de AT ar-H₂O-H₂O, o que acentua a vantagem económica da sua adoção desde o momento da sua aquisição;
- A substituição da BC de AT R717-H₂O pela BC de AT ar-H₂O-H₂O traduz-se num acréscimo total estimado de 4 931 712 € em termos de LCC. Neste caso, não é aplicável a definição de período de retorno, uma vez que tanto o investimento inicial como os custos operacionais da BC de AT R717-H₂O são inferiores, face aos da BC de AT ar-H₂O-H₂O, resultando numa poupança imediata desde a sua implementação.

Para complementar o estudo comparativo, foi ainda realizada uma análise adicional entre a CER e a BC de AT ar-H₂O-H₂O, segundo os mesmos critérios e metodologia das comparações anteriores, cujos resultados se encontram na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultado da comparação entre CER e BC de AT ar-H₂O-H₂O.

Caso base	Caldeira elétrica de resistência (CER)
Caso de comparação	Bomba de calor ar-H ₂ O-H ₂ O (BC de AT ar-H ₂ O-H ₂ O)
LCC BC de CER [€]	14 888 821
LCC BC de AT ar-H₂O [€]	8 395 286
Poupança total [€]	6 493 535
Período de retorno [ano]	0

A comparação efetuada entre a BC de AT ar-H₂O-H₂O e a CER permite evidenciar os seguintes aspetos principais:

- Embora o investimento inicial da BC de AT ar-H₂O-H₂O seja superior 68 845 € face ao da CER, a maior eficiência energética da primeira traduz-se em custos de operação substancialmente inferiores, correspondendo a uma poupança de 6 562 379 € no custo total de operação ao longo do período de vida útil em análise;
- A CER, apesar do menor investimento inicial, apresenta custos de operação muito elevados, sobretudo devido ao elevado consumo energético resultante da sua baixa eficiência, o que compromete a sua viabilidade económica;
- A adoção da BC de AT ar-H₂O-H₂O em substituição da CER conduz a uma poupança global estimada de 6 493 535 € em termos de LCC. Consequentemente, o período de retorno é nulo (0 anos), uma vez que a poupança anual obtida no primeiro ano de operação (201 993 €) é suficiente para compensar a diferença entre o investimento inicial de ambas as tecnologias.

5 Conclusões e trabalho futuro

No decurso do desenvolvimento do presente trabalho foi possível obter conclusões relevantes no âmbito da análise técnico-económica de soluções alternativas ao aquecimento por vapor na indústria alimentar, com particular enfoque numa unidade industrial de produção de margarina. Foram estudadas três soluções tecnológicas para substituição da caldeira a gás natural atualmente utilizada para a produção de vapor para a unidade industrial: a bomba de calor de alta temperatura amoníaco-água (BC de AT R717-H₂O), as bombas de calor de alta temperatura em cascata ar-água e água-água (BC de AT ar-H₂O-H₂O) e a caldeira elétrica de resistência (CER).

Sob o ponto de vista tecnológico, a CER distingue-se pela simplicidade construtiva e pela facilidade de manutenção, resultante do reduzido número de componentes mecânicos, o que se traduz em menores custos associados. Por outro lado, ambas as BC de AT apresentam maior complexidade tecnológica, devido à integração de um ciclo termodinâmico de compressão de vapor, o que implica planos de manutenção mais exigentes. A BC de AT R717-H₂O requer uma grande área de instalação e um maior número de permutadores de calor. Porém, esta tecnologia é vantajosa pela utilização de calor residual proveniente do sistema de refrigeração existente, reduzindo simultaneamente o consumo elétrico global e o desperdício térmico. Por sua vez, a BC de AT ar-H₂O-H₂O, apresenta a maior área e volume de implantação, com valores 2 e 1,8 vezes, respetivamente, superiores aos da BC de AT R717-H₂O, e 4,4 e 5 vezes, respetivamente, superiores aos da CER. O tempo de vida útil das três tecnologias situa-se entre 15 e 25 anos.

Na vertente energética, verificou-se que a solução CER, apesar de uma eficiência nominal elevada ($\eta \approx 0,99$), apresenta um consumo elétrico muito elevado (1 214 kW) para satisfazer uma potência térmica requerida de 1 075 kW, refletindo-se num custo anual de consumo elétrico de, aproximadamente, 585 660 €, valor superior ao seu investimento inicial (331 155 €), comprometendo a sua viabilidade económica.

A BC de AT R717-H₂O, com um COP de 4,07, satisfaz a mesma potência térmica com 254,8 kW de potência elétrica absorvida, o que corresponde a um custo anual de consumo elétrico de 122 930 €. Apesar do maior investimento inicial (337 121 €), a diferença de consumo energético face à CER traduz-se numa poupança anual de cerca de 462 730 €. A BC de AT ar-H₂O-H₂O, com COP global de 1,92, consome 662 kW de potência elétrica, traduzindo-se num custo anual de consumo elétrico de 319 362 €, também inferior ao da CER em 143 368 €, embora o seu investimento inicial seja superior ao das restantes tecnologias (400 000 €).

A análise económica, realizada através do software *Engineering Economics Analysis*, permitiu comparar o custo do ciclo de vida (LCC) das três alternativas ao longo de 20 anos. Os resultados obtidos confirmam as tendências energéticas observadas: o LCC da CER foi estimado em 14 888 821 €, enquanto os das BC de AT R717-H₂O e de ar-H₂O-H₂O foram de 3 463 574 € e 8 395 286 €, respetivamente. Assim, a BC de AT R717-H₂O revelou-se a solução mais economicamente vantajosa, pelo seu baixo investimento inicial e baixo custo de operação anual, apresentando uma diferença de LCC de 11 425 247 € e 4 931 712 € face à CER e à BC de AT ar-H₂O-H₂O, respetivamente.

Apesar da seleção e análise efetuadas para a BC de AT ar-H₂O-H₂O, a necessidade de manter a margarina a uma temperatura de 85 °C em diversas etapas do seu processo produtivo impossibilita a redução da temperatura de produção de água quente de 90 °C para 85 °C, o que inviabiliza a implementação desta tecnologia e, conseqüentemente, a sua consideração como solução alternativa ao sistema de aquecimento por vapor.

Contudo, a BC de AT ar-H₂O-H₂O poderia constituir parcialmente uma solução para produção de água quente destinada às etapas de produção que necessitem de água quente a 65 °C. Neste caso, a sua aplicação poderia ser complementada com uma caldeira elétrica que alimenta exclusivamente a etapa da pasteurização, garantindo o cumprimento dos requisitos térmicos do processo produtivo.

Considerando os critérios tecnológicos, energéticos e económicos, conclui-se que BC de AT R717-H₂O constitui a solução mais indicada como alternativa à caldeira a gás natural para o sistema de aquecimento por vapor da unidade industrial de produção de margarina, corroborando a solução prevista pela ACET. Para além das vantagens económicas e energéticas, esta tecnologia contribui diretamente para a redução da dependência de combustíveis fósseis e mitigação das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), alinhando-se com os objetivos de sustentabilidade e transição energética da indústria alimentar.

No âmbito de trabalhos futuros, considera-se pertinente aprofundar a avaliação da redução das emissões de GEE, não apenas durante a fase de operação dos equipamentos, mas também ao longo das etapas associadas ao fabrico, transporte, operação e fim de vida dos equipamentos. Esta abordagem permitirá quantificar de forma mais precisa o balanço global de emissões de GEE, apoiar a definição de estratégias de descarbonização industrial e incentivar o desenvolvimento de materiais e tecnologias mais sustentáveis para o setor alimentar e energético.

Para além das soluções analisadas no presente estudo, existem outras soluções com potencial interesse que poderão ser objeto de análise futura. Destaca-se, por exemplo, a implementação de um sistema de recuperação de calor numa BC de AT H₂O-H₂O utilizando o circuito de refrigeração já existente na unidade industrial, à semelhança da solução BC de AT R717-H₂O. Esta solução poderia dispensar a utilização da BC de AT ar-H₂O, proporcionando um pré-aquecimento da água e contribuindo para uma redução adicional do consumo energético global do sistema.

Quanto aos fluidos frigorigéneos viáveis para utilização na produção de água quente a alta temperatura, a análise de outros fluidos naturais, como o butano e o isobutano, pode constituir outra possível solução devido à sua alta eficiência e baixo impacto ambiental. Desta forma, seria interessante a comparação do desempenho de uma BC de AT cujo ciclo frigorífico utiliza um desses fluidos frigorigéneos, face à BC de AT R717-H₂O, cujo fluido de trabalho é o amoníaco.

Referências bibliográficas

- [1] P. Europeu, «Como a UE poderá atingir a neutralidade carbónica até 2050», Abr. 2023.
- [2] P. Europeu, «Emissões de gases com efeito de estufa por país e setor (Infografia)», Dez. 2024. Acedido: 27 de Janeiro de 2025, [Online]. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20190926STO62270/como-a-ue-podera-atingir-a-neutralidade-carbonica-ate-2050>
- [3] Direção-Geral da Comunicação, «PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030)», Nov. 2024. Acedido: 27 de Janeiro de 2025. [Online]. Disponível em: https://commission.europa.eu/publications/portugal-final-updated-necp-2021-2030-submitted-2024_en
- [4] Observatório Da Energia, D. de S. de P. E. e E. DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia, e D. de F. I. e E. ADENE - Agência para a Energia, «Energia em Números - Edição 2024», *Energia em Números*, 29 de Junho de 2024. [Online]. Disponível em: https://www.observatoriodaenergia.pt/wp-content/uploads/2024/05/Energia_em_numeros_2024-1.pdf. Acedido: 22 de Setembro de 2025.
- [5] APA, «Protocolo de Quioto», APA - Agência Portuguesa do Ambiente, [Online] Disponível em: <https://apambiente.pt/clima/protocolo-de-quioto>. Acedido: 24 de Janeiro de 2025.
- [6] APA, «Acordo de Paris», APA - Agência Portuguesa do Ambiente, [Online]. Disponível em: <https://apambiente.pt/clima/acordo-de-paris>. Acedido: 24 de Janeiro de 2025.
- [7] República Portuguesa, Fundo Ambiental, e APA – Agência Portuguesa do Ambiente, «ROTEIRO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA 2050 (RNC2050)», Jun. 2019.
- [8] Jornal Oficial da União Europeia, «Diretiva (UE) 2024/1275 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de abril de 2024, relativa ao desempenho energético dos edifícios», *Jornal Oficial da União Europeia*, Mai. 2024, [Online]. Disponível em: <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
- [9] APA - Agência Portuguesa do Ambiente, «Memorando sobre emissões GEE - Inventário Nacional de Emissões 2024», 2024.
- [10] Observatório Da Energia, DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia, e D. de F. I. e E. ADENE - Agência para a Energia, «Energia em Números - Edição 2023», *Energia em Números*, 26 de Junho de 2023.

- [11] CCENERGIA, «Eletrificação da indústria portuguesa: oportunidades e barreiras», CCENERGIA. [Online]. Disponível em: <https://ccenergia.com/conhecimento/eletrificacao-industria-portuguesa-oportunidades-barreiras>. Acedido: 29 de Janeiro de 2025.
- [12] A. Hasanbeigi, C. Springer, e A. Sibal, «Electrifying European Industry - Part 1: Electrification of Industrial Processes», Industrial Electrification Center. [Online]. Disponível em: <https://www.industryelectrification.com>
- [13] C. Springer, A. Hasanbeigi, e A. Sibal, «Electrifying European Industry - Part 2: Electric Boilers and Steam Generating Heat Pumps», Industrial Electrification Center. [Online]. Disponível em: <https://www.industryelectrification.com>
- [14] APEG, «Ciclo de Fornecimento de Gás», APEG - Associação Portuguesa de Empresas de Gás, [Online]. Disponível em: <https://www.apeg.pt/setor/fornecimento/>. Acedido: 27 de Janeiro de 2025.
- [15] PORDATA, «Emissões de Gases de Efeito Estufa: Total e por Setor de Emissões de Gases», PORDATA, [Online]. Disponível em: https://www.pordata.pt/pt/estatisticas/ambiente/clima-e-acao-climatica/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa-total-e-por?_gl=1*28rdj5*_up*MQ..*_ga*NjkkODc5NjE3LjE3Mzc1Nzc2MzI.*_ga_HL9EXBCVBZ*MTczNzU3NzYzMi4xLjAuMTczNzU3NzYzMi4wLjAuMA. Acedido: 7 de Fevereiro de 2025.
- [16] Comissão Europeia, «PME Pequenas e Médias Empresas», Portugal 2020. [Online]. Disponível em: <https://portugal2020.pt/glossario/pme-pequenas-e-medias-empresas/>. Acedido: 25 de Setembro de 2025.
- [17] X. Zhao, H. Xing, A. Ribeiro, e S. Hurter, «Modeling the Initiation of Groundwater Flash Vaporization During Mining Within an Active Geothermal System», *Transp Porous Media*, vol. 144, n. 3, Ago. 2022.
- [18] IQS Directory, «Steam Boilers: Types, Uses and Manufacturing», IQS Directory. [Online]. Disponível em: <https://www.iqsdirectory.com/articles/boiler/steam-boilers.html>. Acedido: 30 de Julho de 2025.
- [19] C. Merritt, «Steam Quality: It Matters», em *Process Steam Sysytems: A Pratical Guide for Operators, Maintainers, and Designers*, Wiley, 2015, pp. 39–46.
- [20] K. I. Matouta, S. Aouhassi, e K. Mansouri, «Sustainable energy transition: A steam system optimization case study from a Moroccan food industry», *Results in Engineering*, vol. 24, Dez. 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302401199X>. Acedido: 24 de Setembro de 2025
- [21] C. Pimparel, «Perspetivas de Instrumentos de Eficiência Energética em Portugal», em *Eficiência Energética em Geradores de Calor*, 2019. Acedido: 30 de Julho de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.sgcie.pt/wp-content/uploads/2019/07/Apresenta%C3%A7%C3%A3o-Workshop-Caldeiras_26.06.2019.pdf
- [22] IEA, «The Future of Heat Pumps», IEA, 2022, Acedido: 30 de Julho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
- [23] D. N. Patel, P. Matalon, e G. Oluleye, «A novel temporal mixed-integer market penetration model for cost-effective uptake of electric boilers in the UK chemical industry», *J Clean Prod*, vol. 446, Mar. 2024.
- [24] J. S. Lagendijk, «An Exploration of the Company Perspective on the Adoption of Industrial Electric Boilers», Eindhoven University of Technology, 2023. Acedido: 30 de Julho de 2025. [Online]. Disponível em:

https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/313517534/1253492_final_version_master_thesis_JSLagendijk.pdf

- [25] W. Grassi, *Heat Pumps - Fundamentals and Applications*. 2018. Acedido: 30 de Janeiro de 2025. [Online]. Disponível em: https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=h5wwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=heat+pumps&ots=raa8B-5noN&sig=iGjE79rDBuCF-_L2wH3Y3bVJ3Xg&redir_esc=y#v=onepage&q=heat%20pumps&f=false
- [26] M. J. S. Zuberi, A. Hasanbeigi, e W. Morrow, «Bottom-up assessment of industrial heat pump applications in U.S. Food manufacturing», vol. 272, Nov. 2022.
- [27] EHPA, «Types of heat pumps», EHPA - European Heat Pump Association. [Online]. Disponível em: <https://www.ehpa.org/about-heat-pumps/types-of-heat-pumps/>. Acedido: 30 de Janeiro de 2025.
- [28] J. Smurthwaite, «Refrigerants – a new focus on GWP», Mitsubishi Electric.
- [29] P. Europeu, «REGULAMENTO (CE) N.º 842/2006 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 17 de Maio de 2006 relativo a determinados gases fluorados com efeito de estufa», *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. 1–11, Jun. 2006, Acedido: 19 de Setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R0842>
- [30] *Jornal Oficial da União Europeia*, «Regulamento (UE) 2024/573 do Parlamento Europeu e do Conselho. de 7 de fevereiro de 2024, relativo aos gases fluorados com efeito estufa, que altera a Diretiva (UE) 2019/1937 e que revoga o Regulamento (UE) n.º 517/2014», *Jornal Oficial da União Europeia*, Fev. 2024, Acedido: 1 de Fevereiro de 2025. [Online]. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202400573
- [31] C. Geelen e R. van Gerwen, «Natural refrigerants in heat pumps», Nov. 2022.
- [32] Danfoss, «Refrigerants with low GWP», Danfoss. [Online]. Disponível em: <https://www.danfoss.com/en-us/service-and-support/refrigerant-center/refrigerants-with-low-gwp/>. Acedido: 14 de Setembro de 2025.
- [33] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, «Fourth Assessment Report». [Online]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/>. Acedido: 14 de Setembro de 2025.
- [34] N. Abas, A. R. Kalair, N. Khan, A. Haider, Z. Saleem, e M. S. Saleem, «Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 557–569, Abr. 2018.
- [35] ASHRAE, «ASHRAE Fundamentals Handbook - Refrigerants», em *ASHRAE Fundamentals Handbook*, 2001, p. 19.3.
- [36] IEA - International Energy Agency, «World Energy Outlook Special Report The Future of Heat Pumps», Dez. 2022. [Online]. Disponível em: www.iea.org
- [37] T. Marsik, V. Stevens, R. Garber-Slaght, C. Dennehy, R. T. Strunk, e A. Mitchell, «Empirical Study of the Effect of Thermal Loading on the Heating Efficiency of Variable-Speed Air Source Heat Pumps», *Sustainability*, 2023.
- [38] L. Neumaier, D. Roskosch, J. Schilling, G. Bauer, J. Gross, e A. Bardow, «Refrigerant Selection for Heat Pumps: The Compressor Makes the Difference», *Energy Technology*, vol. 11, n. 4, Fev. 2023.
- [39] S. Nielsen, S. W. Christensen, R. S. Thorsen, e B. Elmegaard, «Comparison of Heat Pump Design and Performance for Modern Modern Refrigerants», *Proceedings of the 13th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants*, vol. 1, pp. 307–314, 2018, Acedido: 27 de Setembro de 2025. [Online]. Disponível em:

- https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/150054840/Comparison_of_heat_pump_design_and_performance_for_modern_refrigerants_GL2018.pdf
- [40] Intersam, «The Use of Natural Refrigerants in Industrial Processes», Intersam. [Online]. Disponível em: <https://intersam.es/en/the-use-of-natural-refrigerants-in-industrial-processes/>. Acedido: 7 de Fevereiro de 2025.
- [41] SUNAMP, «Low vs high-temperature heat pumps and the role they play in decarbonising heating and domestic hot water», SUNAMP. [Online]. Disponível em: <https://sunamp.com/blog/low-vs-high-temperature-heat-pumps-for-hot-water/>. Acedido: 7 de Fevereiro de 2025.
- [42] H. Jouhara, A. Żabnieńska-Góra, B. Delpech, V. Olabi, T. El Samad, e A. Sayma, «High-temperature heat pumps: Fundamentals, modelling approaches and applications», *Energy*, vol. 303, Set. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131882.
- [43] B. Dai *et al.*, «Life cycle performance evaluation of cascade-heating high temperature heat pump system for waste heat utilization: Energy consumption, emissions and financial analyses», *Energy*, vol. 261, Dez. 2022, Acedido: 7 de Fevereiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222021983>
- [44] T. Takayama, H. Suzuki, Y. Iwata, Y. Miyaoka, T. Nishiyama, e S. Numata, «Development of High Temperature Water Circulation Type Heat Pump for Industries (Air-to-Water Heat Pump with a Maximum Output Water Temperature of 90°C) », *IEA Heat Pump Conference*, Montréal, pp. 1–11, 12 de Maio de 2014.
- [45] M. Dumont, R. Wang, D. Wenzke, K. Blok, e R. Heijungs, «The techno-economic integrability of high-temperature heat pumps for decarbonizing process heat in the food and beverages industry», *Resour Conserv Recycl*, vol. 188, Jan. 2023.
- [46] J. Cox, S. Belding, e T. Lowder, «Application of a novel heat pump model for estimating economic viability and barriers of heat pumps in dairy applications in the United States», *Appl Energy*, vol. 310, Mar. 2022.
- [47] Babcock Wanson, «Caldeiras elétricas industriais», Babcock Wanson. [Online]. Disponível em: <https://www.babcock-wanson.com/pt-pt/categoria-produto/caldeiras-eletricas-industriais/>. Acedido: 7 de Fevereiro de 2025.
- [48] S. C. Sugarman, *HVAC Fundamentals - System Design, Operation, Selection, and Optimization*. River Publishers, 2024. Acedido: 7 de Fevereiro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.google.pt/books/edition/HVAC_Fundamentals/ak8hEQAAQBAJ?hl=pt-PT&gbpv=1
- [49] C. Gellings, *Saving Energy and Reducing CO2 Emissions with Electricity*. 2020.
- [50] EPBC Boiler, «Analysis on the Application of Electric Boiler and Design of Boiler Room», Boiler Operations SKILLS. [Online]. Disponível em: <https://www.epcbboiler.com/analysis-on-the-application-of-electric-boiler-and-design-of-boiler-room.html?> . Acedido: 16 de Setembro de 2025.
- [51] M. Manni, A. Nicolini, e F. Cotana, «Performance assessment of an electrode boiler for power-to-heat conversion in sustainable energy districts», *Energy Build*, vol. 277, Dez. 2022.
- [52] M. Wang, J. Wang, Y. Zhang, L. Li, W. Zhou, e Z. Lei, «The Influence of Electrode Shape on the Electric and Temperature Fields in an Immersed High-Voltage Electrode Boiler», *Energies (Basel)*, vol. 18, n. 4, Fev. 2025.
- [53] A. S. Mahir, *Boilers: A Comprehensive Guide to Boiler Systems*. 2023.

- [54] P. Novikov, O. Teslenko, V. Beldii, E. Lenchevsky, e O. Shtifzon, «Dynamic Model of a High-Capacity Electric Boiler with an Immersed Electrode», *Systems, Decision and Control in Energy VI*, pp. 243–260, Set. 2024.
- [55] Z. Zhong, Z. Yuanxiang, e L. Yongyin, «AC Corrosion Behavior of Several Metallic Materials as Candidate for Boiler Electrode», *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, vol. 43, n. 1, pp. 202–208, 2023.
- [56] P. C. Okonkwo, H. Bhowmik, I. B. Mansir, M. Ahmed Awadh Al Sarj Al Marhoon, e N. Fawaz Ahmed Al Sfarini, «Effect of electrode spacing on hydrogen production using a home-made alkaline electrolyzer», *Mater Lett*, vol. 306, Jan. 2022.
- [57] X. He, Y. Ruan, e W. Wang, «Three-Dimensional Transient Electric Field Characteristics of High Pressure Electrode Boilers», *Electronics (Basel)*, vol. 13, n. 9, Abr. 2024.
- [58] Energy Efficiency and Conservation Authority, «Electrode and Electric Resistance Steam Generators and Hot Water Heaters for low carbon process heating», *Technical Information Document 2019*, New Zealand, pp. 2–13, 2019. Acedido: 17 de Setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.genless.govt.nz/assets/Business-Resources/Electrode-electric-resistance-steam-generators-hot-water-heaters-for-low-carbon-process-heating.pdf?>
- [59] J. S. Lagendijk, «An Exploration of the Company Perspective on the Adoption of Industrial Electric Boilers A Multi-case Study on the Hampering Electrification of the Dutch Industrial Heat Demand in Relation to the Congestion Issues on the Electricity Grid», 2023.
- [60] Forest Solutions Group e McKinsey Sustainability, «Switch to industrial electric boilers», *The Climate Drive*. [Online]. Disponível em: <https://www.theclimatedrive.org/es/action-library/switch-to-industrial-electric-boilers>. Acedido: 7 de Fevereiro de 2025.
- [61] Sympower, «E-Boilers and Demand Response: How it works», Sympower. [Online]. Disponível em: <https://sympower.net/articles/how-it-works-e-boilers-demand-response>. Acedido: 7 de Fevereiro de 2025.
- [62] A. D. Aleksic, D. Gordic, V. Vukasinovic, M. Josijevic, e J. Nikolic, «Achieving sustainable carbon neutrality of food processing: Toward a net-zero margarine production facility», *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 44, n. 2, Fev. 2025, Acedido: 30 de Julho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ep.14570>
- [63] W. D. Seitz, «Productive Efficiency in the Steam-Electric Generating Industry», *Journal of Political Economy*, vol. 79, n. 4, Jul. 1971.
- [64] OMIE, «Mercado Diário de Eletricidade», OMIE - Operador do Mercado Eléctrico. [Online]. Disponível em: <https://www.omie.es/pt>. Acedido: 22 de Setembro de 2025.
- [65] U. Khan, R. Zevenhoven, L. Stougie, e T.-M. Tveit, «Life cycle cost analysis (LCCA) of Stirling-cycle-based heat pumps vs. conventional boilers», *Cleaner Environmental Systems*, vol. 8, Mar. 2023, Acedido: 22 de Setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666789422000368?via%3Dihub>
- [66] Carrier, «Engineering Economics Analysis », 2014, *Carrier*: 3.06.

Anexos

Anexo A – Ficha Técnica Caldeira Elétrica de Resistência

**OFERTA TÉCNICA ECONÓMICA : CALDEIRA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA
QUENTE**

VITOMAX HW-ME Elétrico

MODELO: ME0A40A - 1.000 kWh – 6 bar

2.-ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

2.1.- DESCRIÇÃO DA CALDEIRA

Os geradores VIESSMANN selecionados são o modelo VITOMAX 200 HW-ME0A40A correspondente a um gerador para a produção de água quente, por meio de um sistema de resistência elétrica flangeado, de construção horizontal e configuração monobloco, projetado e construído de acordo com os códigos AD-MERKANBLATTER e TRD (Technisches Regelwerk Dampfgeräte).

O gerador está incluído na Diretiva Europeia de Equipamentos sob Pressão 2014/68/UE, tendo a aprovação de acordo com a referida Diretiva adaptada à legislação espanhola com o Real Decreto 809/2021 de 11 de outubro de 2021, que estabelece os requisitos essenciais de segurança para a comercialização de equipamentos sob pressão.

É uma caldeira CLASSE SEGUNDA (Pms x VT > 15.000, 6 bar x 3.770 l) de acordo com o ITC-EP-1 da RD 809/2021 de 11 de outubro de 2021, que aprova o Regulamento de Equipamentos sob Pressão e suas instruções técnicas complementares.

2.2.- VANTAGENS COMPETITIVAS PARA A POUPANÇA DE ENERGIA

1. CONSTRUÇÃO DE QUALIDADE

As características estruturais dos geradores são projetadas usando as mais recentes técnicas de cálculo de elementos finitos e projeto assistido por computador. Isso dá aos geradores uma construção robusta e permite que os geradores recebam alta confiabilidade operacional e uma longa vida útil. Os materiais utilizados para a construção do corpo de pressão passam pelos mais rigorosos controles de qualidade.

Como método de união permanente das diferentes peças sob pressão, utiliza-se a soldadura por arco elétrico, realizada sob atmosfera de gás inerte, e estas são posteriormente comparadas por meio de ensaios não destrutivos. O gerador é então submetido a um teste de pressão superior aos valores estabelecidos pela legislação vigente, um teste certificado por um organismo notificado. Tudo isto em conformidade com a norma de fabrico DIN ISO 9001/2000 (certificado de registo 6470/QM/06.2003).

Os registos de manutenção localizados na caldeira permitem o acesso total à câmara de aquecimento, massas de água e tubos para total manutenção e acessibilidade, o que reduz custos e tempos de manutenção.



Fig. 1. Invólucro exterior Vitomax 200 HW-ME com diferentes saídas de potência

1. ALTO DESEMPENHO, ECONOMIA DE ENERGIA E CONSERVAÇÃO AMBIENTAL:

A caldeira tem uma grande superfície de troca de calor, distribuída nos tubos que compõem os blocos de resistência elétrica embutidos no interior da câmara de água, através dos quais se consegue um elevado desempenho.

Graças à forma construtiva do corpo principal, em que existem ancoragens de canto dispostas pelo menos em pares na versão com tubos de apoio, consegue-se uma alta resistência das soldas, além disso consegue-se uma distribuição correta da contribuição calórica, reduzindo as tensões nos materiais de construção, alcançando longa durabilidade e alto desempenho.

Limpeza da abertura na parte traseira do fundo da caldeira. Boa acessibilidade para fácil comissionamento, manutenção, inspeção e testes.

O fornecimento de calor é feito através de resistências flangeadas conectadas à caixa de junção. Os cartuchos de aquecimento são projetados como aquecedores flangeados e são ligados à caldeira por buchas. Os flanges são projetados de acordo com DIN.

Graças à elevada espessura de parede dos cartuchos de aquecimento utilizados, até 2,1 mm, consegue-se uma elevada resistência à corrosão e a cargas mecânicas.

Dependendo da versão, são possíveis mergulhos de até 4,5 m.

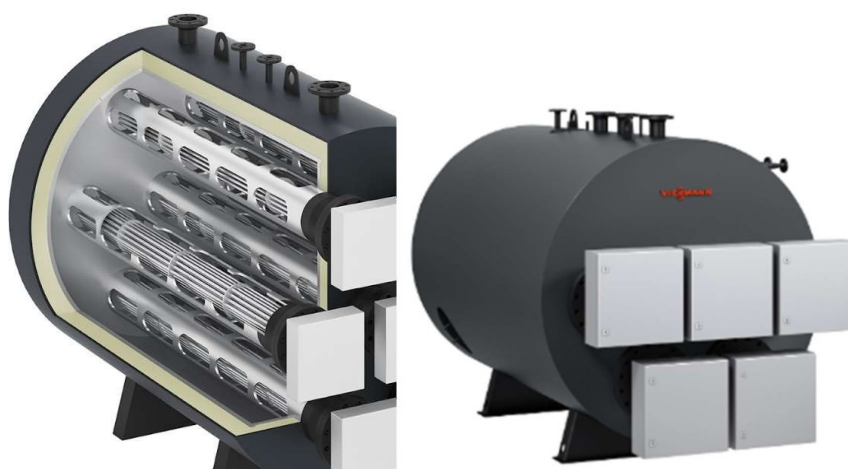


Fig. 2. Tubos longitudinais com resistências flangeadas

As principais vantagens do sistema de aquecimento elétrico são:

Arranque a frio mais rápido em comparação com caldeiras a combustível fóssil (Time), custos operacionais mais baixos através da utilização de eletricidade barata ("eletricidade noturna" ou eletricidade excedentária autogerada) em comparação com a utilização de combustíveis fósseis.

Compensação de carga de pico.

Ampla faixa de controle → melhor fornecimento com reduções parciais de carga.

Alta eficiência de mais (ver dados técnicos da caldeira).

Sem emissões de gases de escape (COx/NOx) → taxas de emissão mais baixas para a empresa (€).

Não são necessários sistemas de escape, queimadores, fornecimento de combustível ou armazenamento.

Segurança do aprovisionamento em caso de avaria dos combustíveis fósseis quando utilizado como caldeira de redundância.

Disponibilidade rápida graças ao aquecimento elétrico em modo reduzido/modo standby.

Aquecimento mais favorável da caldeira por elementos de aquecimento em comparação com caldeiras alimentadas → sem ciclos de queimador → redução do desgaste e poupanças de custos (€).

Ganho de imagem para as empresas através do uso sustentável da energia.

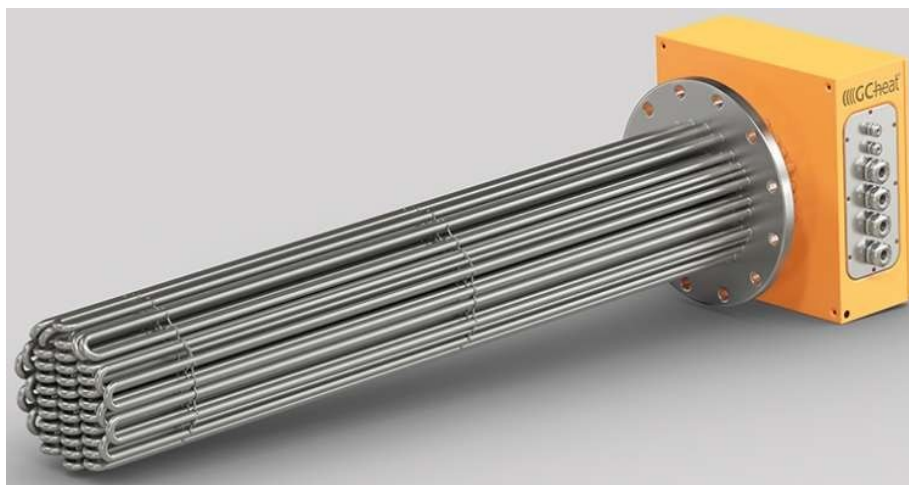


Fig. 3. Resistor elétrico flangeado com caixa de junção

Graças a um design bem pensado do gerador e a fim de reduzir as perdas de energia térmica devido à transmissão (radiação e convecção), o corpo do gerador é termicamente isolado com fibra de vidro de alta densidade específica para o isolamento de caldeiras VIESSMANN e 100 mm de espessura e protegido externamente por um envelope de metal em chapa de aço totalmente lacado em uma cor chamada Vitosilber. mas com a possibilidade de personalizar em diferentes cores corporativas. A redução do maior número de perdas permite obter rendimentos elevados.

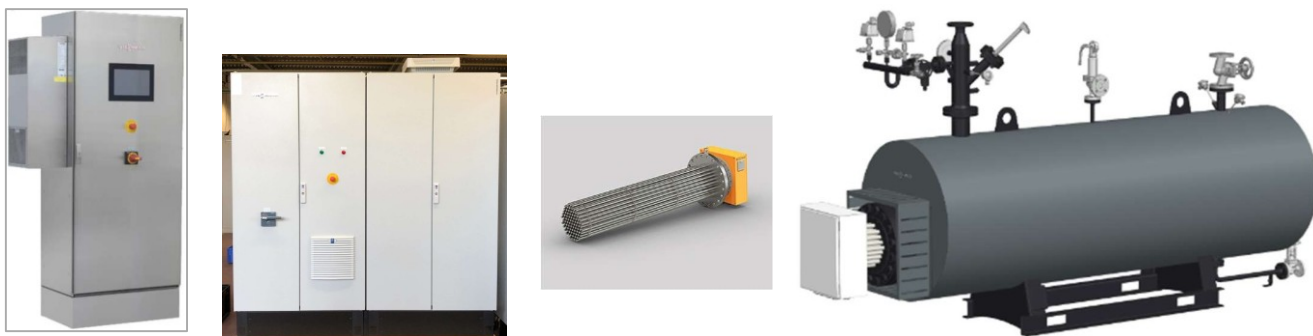


Fig. 4. Sistema Viessmann, Caldeira Vitocontrol/gabinete de controlo em cascata, armário eléctrico e Aquecedor com flange

A utilização de câmaras húmidas frontais, completamente banhadas e arrefecidas pela água contida no gerador, reduz as perdas de energia devido à radiação na caldeira. Isto significa que há arrefecimento de água atrás da câmara de aquecimento e que, apesar das altas temperaturas no interior da caldeira, a superfície exterior não arde em contacto. A combinação de isolamento e câmaras húmidas reduz absolutamente as perdas de radiação da caldeira e, assim, aumenta a sua eficiência. Os custos de eletricidade são reduzidos através da redução das perdas desnecessárias de radiação.

2. TRANSMISSÃO DE CALOR E DESEMPENHO:

Graças a um projeto estudado do gerador, tem um grande volume de água (970 litros) e uma grande superfície de transferência de calor. Tudo isto com o objetivo de proporcionar um elevado desempenho (até 99,16%) (ver dados técnicos).

3. MANUTENÇÃO FÁCIL E SEGURA:

O gerador é equipado com uma série de elementos que permitem o trabalho de manutenção e inspeção de forma segura e fácil, tais como: visor de inspeção da câmara de aquecimento refrigerada a ar, bueiro de acordo com a norma VdTÜV 451-85/1.

As ligações aos acessórios e ao resto da instalação devem ser feitas por meio de ligações de flange ou flange em conformidade com a norma DIN 2634/2635.

A coisa toda repousa sobre um banco de aço.

Observação:

- a) Esta descrição inclui componentes e acessórios que podem não corresponder ao equipamento selecionado, e estes podem variar dependendo do modelo de gerador de calor e da configuração final escolhida, para mais informações ver Anexo I (Dados técnicos).
- b) Os dados desta oferta estão sujeitos a alterações, e a Viessmann reserva-se o direito de alterar.

2.3.- DADOS TÉCNICOS DA CALDEIRA

A caldeira selecionada é a seguinte:

VITOMAX 200 HW-E (tipo ME0A)

- Modelo no.: ME0A40A
- Tipo de caldeira : Água quente
- Pressão máxima admissível (PS): 6 bar
- Pressão de funcionamento até 6,0 bar
- Volume de água: 3,77 m³
- Temperatura máxima, termostato de segurança: 120°C
- Temperatura de alimentação da caldeira 90 °C
- Temperatura de retorno da caldeira 70 °C
- Retorno da temperatura mínima 35° C
- Combustíveis Eletricidade

Especificação, baseada em:

- Dados de dimensionamento da caldeira de acordo com o ponto 2.2 acima referido.
- Determinado com referência à norma EN 12953

O ponto de operação selecionado corresponde a 100% de carga.

- Potência garantida: 1055,9 kW
- Corrente Elétrica (Consumo de Energia) 1.751,80 A
- Eficiência da caldeira, 100% carga 99,16%
- Eficiência da caldeira, 80% carga 98,97%
- Eficiência da caldeira, 60% carga 98,66%
- Eficiência da caldeira, 40% carga 98,05% Conexões
- Aquecedor com flange DN250 PN40
- Movimentação: DN 100 PN16
- Devolução: DN1000 PN16
- Número de conectores do aquecedor de flange 4

- Ligações a equipamentos de medição, controlo e limitação G 1/2
- Número de conectores da válvula de segurança: 2 DN32 PN40
- Esvaziamento/enchimento G 1/2
- Localização da conexão: Topo
-

Dimensões

- Comprimento total da caldeira incluindo isolamento térmico 3.780 mm
- Comprimento total da caldeira incluindo resistência elétrica 3.990 mm
- Largura total da caldeira incluindo isolamento térmico 1.600 mm
- Altura total da caldeira incluindo isolamento térmico 2.000 mm

Peso de envio $\pm 10\%$: 1.60 t

Dimensões de envio, incluindo embalagem

- Comprimento de envio: 3.800 mm
- Largura de envio: 1.650 mm
- Altura de envio: 2.030 mm
- Espessura de isolamento térmico da camada da caldeira: 100 mm
- Material da carcaça chapa de aço galvanizado, cor da carcaça Vitographit

Dados do aquecedor de flange elétrico (dados da unidade, 4 unidades)

Potência nominal: 303,4 kW

Amperagem por aquecedor: 441,0 A

Potência mínima: 0-100%

Tensão 400 V

Flange DN250 PN40

Peso 288.00 kilos

Caixa de junção de dados

Comprimento 210mm

Largura 500 mm

Altura 500 mm

Aquecedores elétricos do conjunto de dados de energia

- Tensão 400,0 V
- Avaliação atual 1751.8 A
- Número de aquecedores de flange 4
- Capacidade de aquecimento 1055,9 kW
- Sistema ferroviário de distribuição interna.

2.3.- EQUIPAMENTO DE CALDEIRAS

No. 1 - Corpo da caldeira No. 2 -

Acessórios de Segurança nº 3 -

Armário de comando de caldeiras

No. 4 - Aquecedor de Flange Elétrico

No. 6 - Gabinete de energia do aquecedor elétrico No. 7 - Gabinete de

controle de cascata de 2 caldeiras nº 13 - Cama transversal metálica para suporte de caldeira na sala das caldeiras

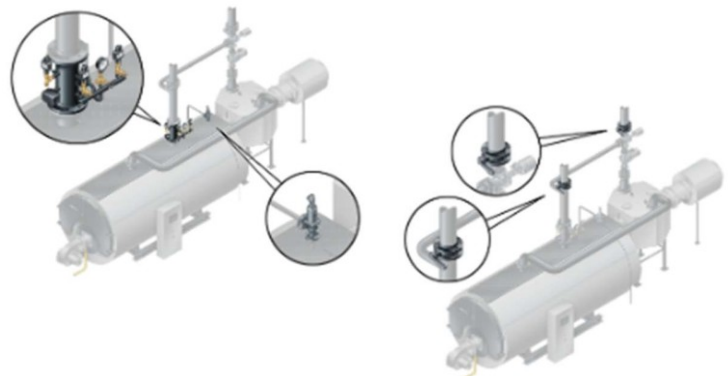
INCLUÍDO NO ÂMBITO DA ENTREGA:

Válvula de segurança

- Pressostato de segurança
- Termóstato de segurança
- Baixo nível de segurança
- Manômetro
- Termómetro

Válvulas para:

- Corte de acionamento (manual)
- Corte de retorno (manual)
- Enchimento e esvaziamento



- Suportes de caldeira fono-absorventes e anti-vibração.
Composto por uma mistura de borracha altamente elástica e resistente às intempéries com alta resistência ao envelhecimento
Carga total máxima 15 t
Altura de instalação (sem tensão) 15 mm
Comprimento por base 250 mm
Largura por base 100 mm
Número de bases absorventes 4
- Peça de alimentação intermédia
Para fixação ao conector de alimentação da caldeira de água quente. Conexões para instalação de equipamentos de medição, controle e segurança de acordo com a EN 12953, parte 6:
• 1 conector para montagem de montagem
• 1 conector para eletrodo limitador de nível de água
5 mangas para termômetro, válvula de enchimento e amostragem e outros equipamentos de medição/controle
• Conexões - Entrada, adequado para conector de alimentação de caldeira
DN100 PN16- Tomada 100 PN
Largura de 500 mm
- Válvula de fecho para meios gasosos e líquidos. Equipado com operação manual.
Acionamento montado em válvula. (1 unidade) Válvula tipo ARI-FABA-PLUS, Conexão, flange DN40 PN16, Valor KVS 170 m³/h Material da carcaça EN-JS 1049. Válvula de fluxo direto do projeto
- Válvula de fecho para meios gasosos e líquidos. Equipado com acionamento elétrico. Acionamento montado em válvula. (1 unidade) 2 interruptores de limite. Operação manual de emergência Válvula tipo BR405. Conexão, flange DN100 PN16, valor KVS 170 m³/h EN-JS 1049 material da carcaça. Unidade ARI-PREMIO 5kN
- Válvula de fecho para meios gasosos e líquidos. Equipado com operação manual.
Acionamento montado em válvula. (1 unidade) Válvula tipo ARI-FABA-PLUS, Conexão, flange DN25 PN16, valor KVS 12 m³/h Material da carcaça EN-JS 1049. Válvula de fluxo direto do projeto
- Válvula de fecho com dispositivo de bloqueio, válvula de fecho G 1/2" (PN250) com tampa para instalação entre a ligação de montagem do encaixe e o manómetro ou limitador de pressão. (2 unidades)
- Válvula de segurança (2 unidades). Feita como uma válvula de segurança de elevação completa, ação direta, carregada por mola, pressão de resposta 6 bar Saída de descarga- Fluxo mássico de vapor saturado 1.940 kg/h- Conexão de entrada DN32 PN40- Conexão de saída DN50 PN16- Material da carcaça EN-JS1049- Contrapressão máxima própria para manter 0,6 bar

- Eléctrodo de nível (1 unidade). Em combinação com o interruptor de nível correspondente, para limitar o nível de água em caldeiras a vapor e instalações de água quente, CE aprovado de acordo com EN 12952 /EN 12953.- Tipo NRG 16-50- Comprimento 1.000 mm- Conexão mecânica G 3/4- Pressão nominal PN40

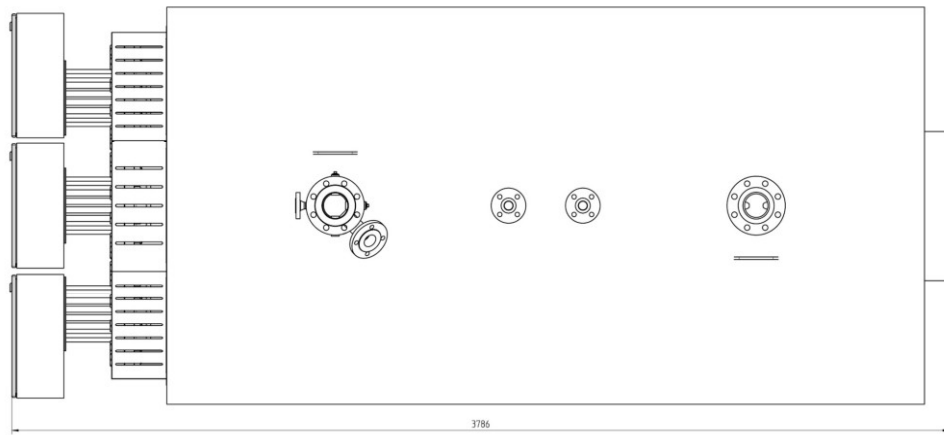
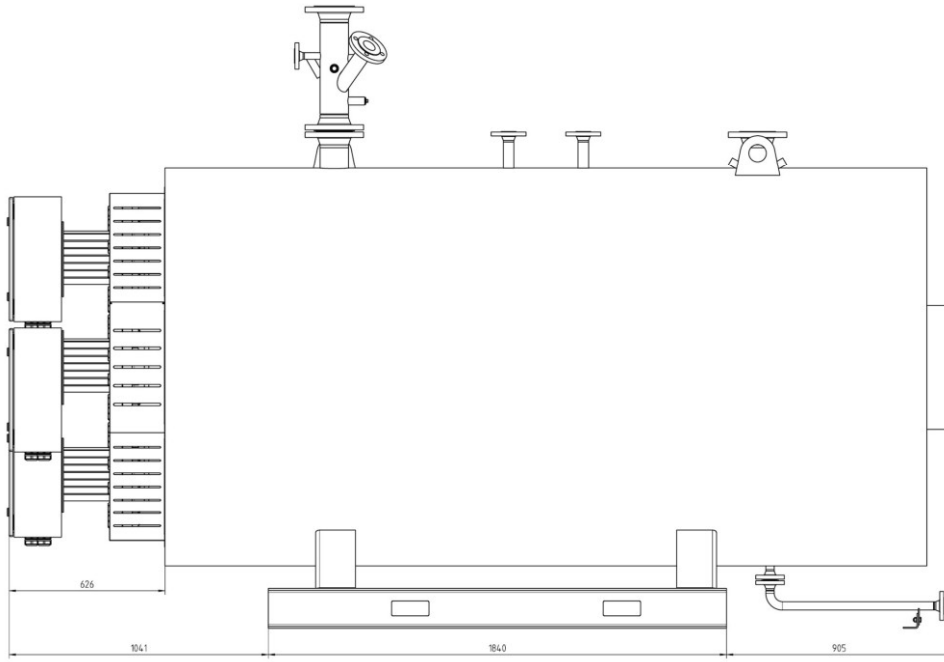
- Dispositivo limitante de pressão, constituído por (1 unidade): Montagem com ligações para medir, controlar e limitar o equipamento. Válvula de drenagem para montagem de encaixe. Válvula de fecho com interruptor de limite, para a ligação da caldeira. Parafusos, porcas, juntas. Limitador de pressão máxima, aprovado pela CE. Limitador de pressão mínima, aprovado pela CE. Manómetro, com indicador de marca vermelho. Válvula de teste, manómetro e anel de vedação incluídos. Limitador de pressão máxima- Tipo: BCP3H- Faixa de controle: 1-6 bar- Diferencial de salto 0,4 bar Limitador de pressão mínimo- Tipo: BCP3L- Faixa de controle: 1-6 bar- Diferencial de salto 0,4 bar Gauge- Valor exibido 0,0 - 6 bar- Classe de precisão 1,6- Tamanho nominal NG160- Tipo de mola

- Sensor de corte de segurança de alto limite de acordo com. de acordo com DIN 14597 (1 peça) Versão com cabeça de conexão forma B Mechanical connection

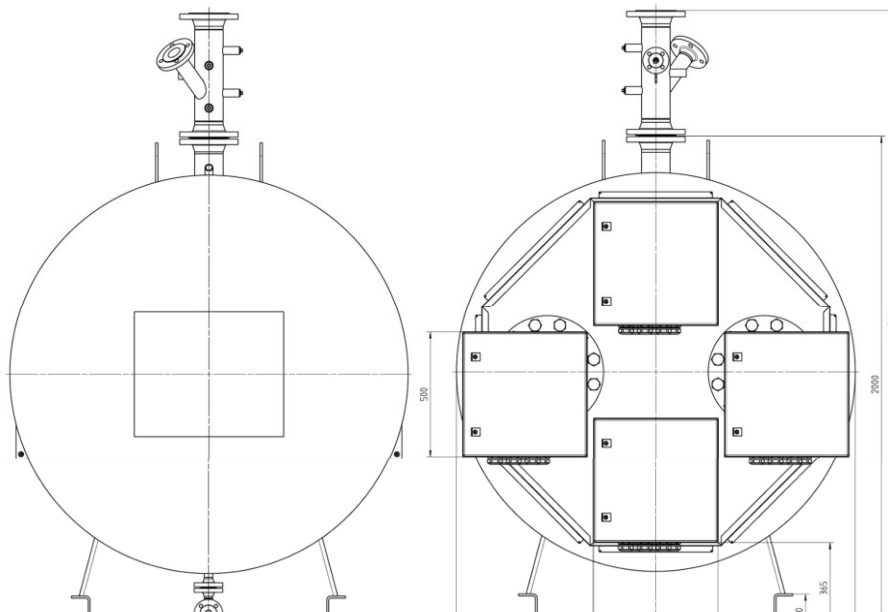
- Limitador de temperatura de segurança (interruptor) de acordo com a norma DIN EN 14597 (2 unidades) Com exame de tipo CE. Projetado para instalação no gabinete de controle, ele pode ser usado em conjunto com sensores de temperatura, como dispositivo limitador de temperatura de segurança.

- Termómetro para circuitos fechados de água (1 peça) Intervalo de medição 0-200°C Category precisão 2 Tamanho nominal NG160 Conexão G 1/2 Pressão máxima 13 bar

- Sonda de temperatura de imersão para medição de temperatura em líquidos e meios gasosos. Bainha e O-ring estão incluídos na entrega padrão. (2 unidades) Tipo Pt 1000 Faixa de medição -50 - 400 °C Conconexão G 1/2 Comprimento nominal do tubo de proteção 150 mm



3.4.- ORÇAMENTO



A VIESSMANN, S.L. receberá, do Comprador, os seguintes montantes descritos na secção 2, relativamente a:

FORNECIMENTO:

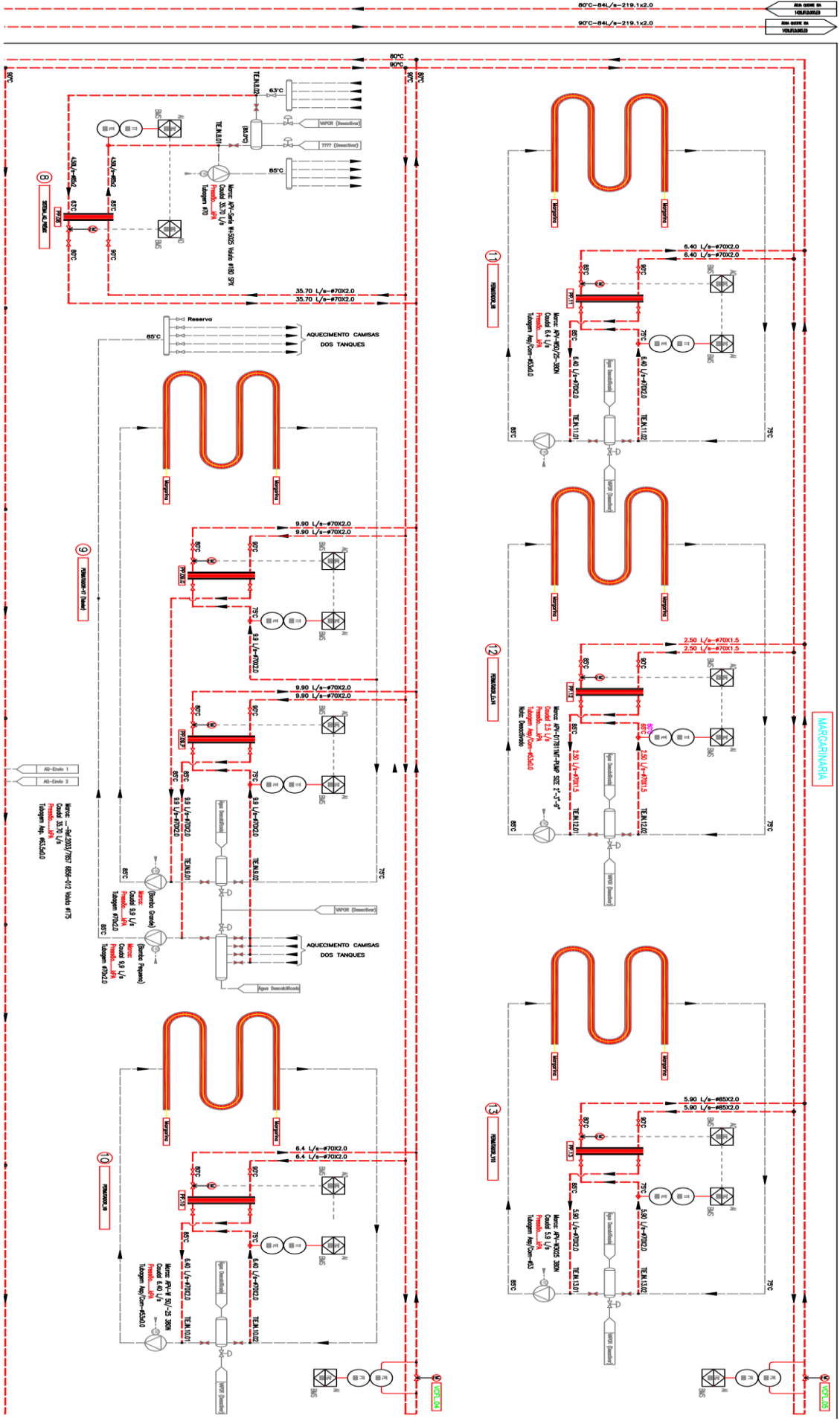
- Caldeira ME0A40A com resistência a 4 flanges:
incluída
- Armário de controle PLC Vitocontrol
incluído
- Vitocontrol E-L_FHK Gabinete Elétrico Potencial.....
incluído
- Transporte do equipamento por camião até ao estaleiro:.....
incluído
- Arranque da
caldeira.....:.....incluído

PREÇO DE TABELA UNITÁRIO

.....331.155,00 €

Estes valores não incluem o valor resultante da aplicação do Imposto sobre o Valor Acrescentado (IVA) aplicável, que será cobrado posteriormente.

Anexo B – Excerto de P&ID da Unidade Industrial desenvolvido pela ACET



Anexo C – Dados da Auditoria da Unidade Industrial de Produção de Margarina

Apenas disponível ao Júri da prova por ser informação reservada da empresa.

Anexo D – Ficha Técnica Bomba de Calor R717-H₂O

Layout

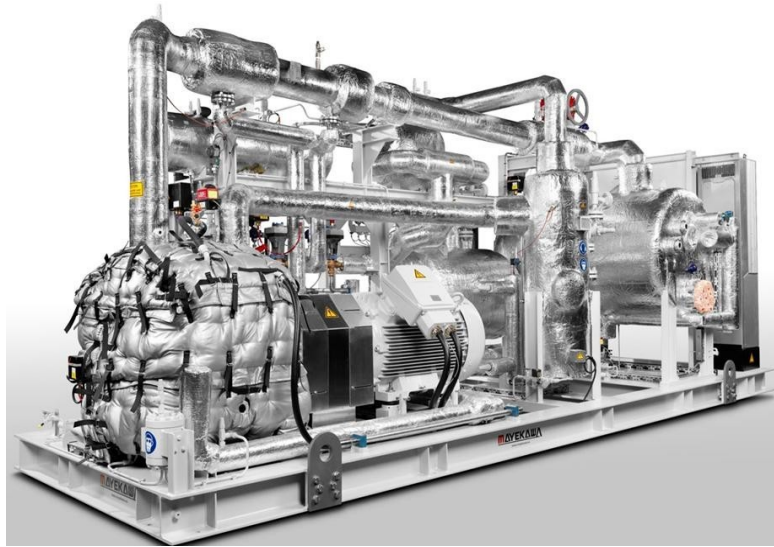


Figure 1 Layout

Concept

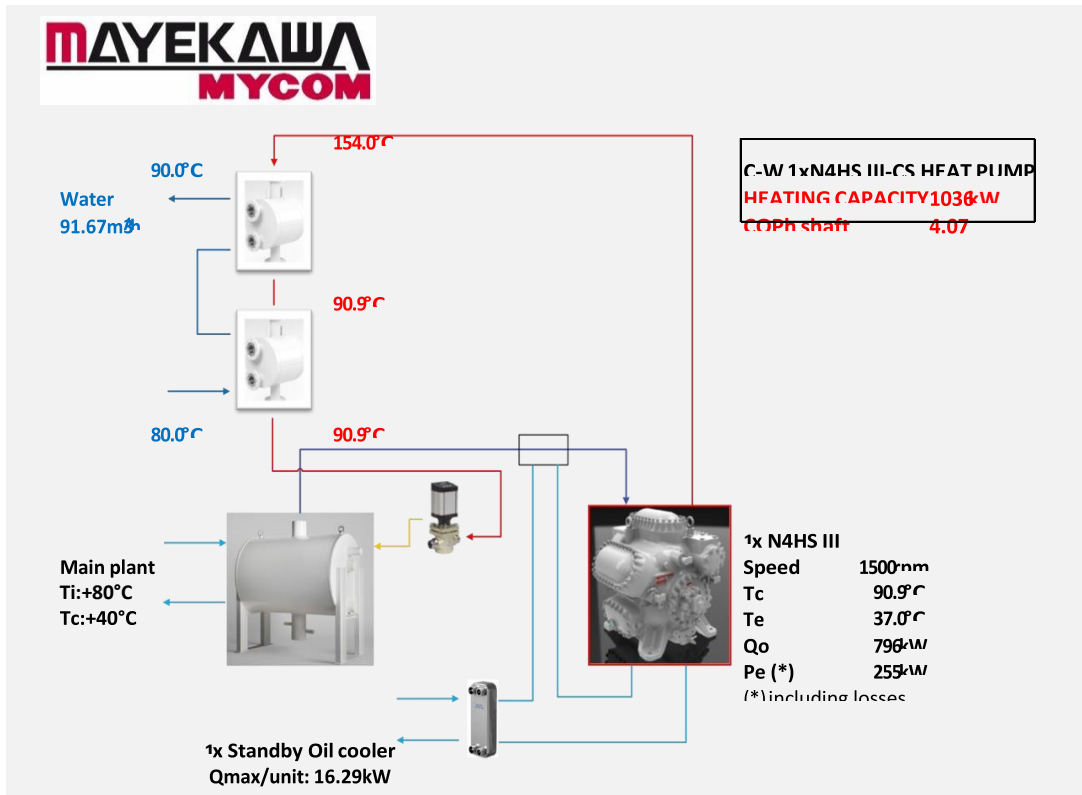


Figure 2 -Heat Pump for design conditions

Heat pump data

Model	:	C-W 1xN4HS Heat Pump
Refrigerant	:	R717
Heating capacity	[kW] :	1035.9
Absorbed power, with losses	[kW] :	254.8
COPheating	:	4.07

General

Dimension L x W x H	[mm] :	6400x2200x2500, delivered in parts
Net weight	[kg] :	18000

Compressors

Number	[units] :	1		
Make	:	Mycom		
Type	:	Piston		
Model	:	4HS		
Refrigerant	:	R717		
Design speed	[rpm] :	1500		
Speed range min/max	[rpm] :	750-1500		
Refrigeration capacity, per compressor	[kW] :	796.2		
Shaft power, per compressors	[kW] :	239.7		
Evaporating temperature	[°C] :	+37 Suction superheat	[K] :	5
Subcooling	[K] :	0		
Condensing temperature	[°C] :	+90.9		



Motors

Make	:	WEG or similar
Motor rated power	[kW] :	315
Number of poles	:	4
Speed	:	Variable – 750 to 1500 rpm
Efficiency	:	IE3

Protection : IP55
Supply : 3 x 400 / 50 Hz
Temperature class : F

Desuperheater

Number [units] : 1
Make : Vahterus, or similar
Type : Plate and shell heat exchanger
Model : To be confirmed upon order
Material shell / plates : Carbon / stainless steel
Capacity [kW] : 246.6

Heat pump side

Refrigerant : R717
Inlet temperature [°C] : 154
Outlet temperature [°C] : 90.9
Design pressure [barg] : 60

Secondary side

Medium : Water
Inlet temperature [°C] : 87.6
Outlet temperature [°C] : 90
Medium flow [m³/h] : 91.67
Pressure drop [bar] : <0,8
Design pressure [barg] : 10

Condenser

Number [units] : 1
Make : Vahterus, or similar
Type : Plate and shell heat exchanger
Model : To be confirmed upon order
Material shell / plates : Carbon / stainless steel
Capacity [kW] : 789.3

Heat pump side

Refrigerant : R717
 Inlet temperature [°C] : 90.9
 Condensing temperature [°C] : 90.9
 Design pressure [barg] : 60

Secondary side

Medium : Water
 Inlet temperature [°C] : 80
 Outlet temperature [°C] : 87.6
 Medium flow [m³/h] : 91.67
 Pressure drop [bar] : <0,8
 Design pressure [barg] : 10

Combined evaporator, separator and condenser

Number [units] : 1
 Make : Vahterus, or similar
 Type : Plate and shell heat exchanger
 Model : To be confirmed upon order
 Material shell / plates : Carbon / stainless steel
 Capacity [kW] : 796.2

Heat pump side

Refrigerant : R717
 Liquid temperature [°C] : +90.9
 Evaporating temperature [°C] : +37
 Design pressure [barg] : 25



Secondary side

Refrigerant : R717
 Discharge temperature [°C] : +80 Condensing temperature [°C] : +40
 Design pressure [barg] : 25

Sales person:	Pedro Santos
Contact:	Inês Inverno
Company:	ACET
Date of issue:	15-07-2025

Revision: 0 Reference: MPT2025057

Dear Inês Inverno,

Further to your request, we hereby send our offer for the following equipment:

Nr	Code	DESCRIPTION	QTT	UNIT PRICE	TOTAL
1	C-W 1xN4HS III Heat Pump	Cascade-Water NH3 Heat Pump with 1xN4HS compressor, 1036kW heating capacity with desuperheater	1	337 121 €	337 121 €
TOTAL without VAT			1	337 121€	337 121€

Delivery conditions: FCA from Belgium

Delivery time: To be confirmed

Payment method: To be confirmed

Warranty: 12 months after commissioning or 18 months after delivery, whichever comes first.

Please refer to the technical specifications for detail information about these products.

With friendly regards,

Pedro Santos

Anexo E – Ficha Técnica Bomba de Calor Ar-H₂O-H₂O



Standard Report

JOSE LUIS MOURATO MORGADO
MOURA (27/09/2025 08:09:41)

Project
Project 152211
Tag
30RQP

30RQP 940R -A

Air-to-Water scroll heat pump with Greenspeed® Intelligence

Eurovent certified value

Performance Information ⁽³⁾			
Mode		Cooling	Heating
Cooling Capacity ⁽²⁾	kW	856	-
Instantaneous Heating Capacity ⁽¹⁾	kW	-	910
Heating Capacity ⁽²⁾	kW	-	910
Cooling Efficiency (EER) ⁽²⁾	kW/kW	2.55	-
Heating Efficiency (COP) ⁽²⁾	kW/kW	-	3.58
Unit Power Input ⁽²⁾	kW	335	255
Sound power level (LwA) ⁽²⁾	dB(A)	97.5	97.0
Sound Pressure Level at 10.0m (LpA) ⁽²⁾	dB(A)	64.5	64.5
Minimum Capacity ⁽⁴⁾	kW	138	146
Maximum Capacity	kW	856	910

(1) Not certified value not taking the potential hot gas defrost cycles into account resulting of the climatic outdoor conditions.
 (2) All performances are compliant with EN14511 - 3 : 2022. Sound power level according to ISO9614 - 1.
 (3) Performances are calculated in parallel configuration.
 (4) Due to the minimum flow rate allowable a lower inlet water temperature might have to be specified to achieve this performance.

Operating Conditions			
System element		Cooling	Heating
Water heat exchanger			
		Fresh Water	Fresh Water
Fluid	Fluid Type		
	Fouling Factor (sqm-K)/kW	0.000	0.000
	Leaving Temperature °C	7.0	35.0
	Entering Temperature °C	12.0	30.0
	Fluid Flow l/s	40.7	43.9
Hydronic Module	External Static Pressure kPa	188	173
	Pump Power Input kW	8.49	8.76
Air heat exchanger			
Air	Entering dry bulb Air Temperature °C	35.0	7.0
	Entering Wet bulb Air Temperature °C	-	6.0
	Relative Humidity %	-	86.7
	Altitude m	0	

Unit Configuration	
3A	Corrosion protection traditional coils
116W	HP VSD dual-pump hydraulic module
149B	Modbus over IP and RS485
159B	Phases monitor



Noncontractual picture

Ecodesign data ⁽⁵⁾⁽⁶⁾		
Allowed applications for CE mark:		
Low Temp. Comfort Heating : T<55°C	SCOP 30/35°C ηs heat	3.86 152
Low Temp. Comfort Cooling : T>=2°C*	SEER 12/7°C ηs cool	4.85 191
Medium Temp. Comfort Cooling : T>=13°C*	SEER 23/18°C ηs cool	5.76 227
High Temp. Process Cooling : T>=2°C	SEPR 12/7°C	5.36
Sound Power Level as EN12102-1	dB(A)	92.5
Other Application:		
Intermediate Temp. Comfort Heating	SCOP 40/45°C ηs heat	3.32 130

(5) *ECODESIGN Compliant per (EU) N°2016/2281
 (6) All data related to seasonal efficiency are given for standard units and main options (Brine pump energy efficiency...).

Unit Information			
Manufacturing Source	Montluel		
Refrigerant type	R32		
Refrigerant Weight	kg	128.0	
Tonnes CO2 Equivalent	Tonnes	86.40	
Category PED	CAT IV		
Number of Refrigerant Circuit	4		
Number of Passes (Evaporator)	1		
Number of Compressor	14		
Number of Fan	14		
Fan Power Input	kW	23.7	
Total Fan Air Flow	m3/h	274489.7	
Operating	Weight	kg	6631
	Length	mm	10068
	Width	mm	2253
	Height	mm	2324
Shipping ⁽⁷⁾	Module		1 2
	Weight	kg	3399 3399
	Length	mm	4784 4784
	Width	mm	2253 2253
	Height	mm	2324 2324

(7) Delivered separately in several units.

Electric Information		
Unit Voltage	V-Ph-Hz	400-3-50
Standby Power	kW	1
Power Factor		0.84
Electrical Circuit		1 2
Maximum Current	A	374 374
Startup Current	A	587 587

Documentation	
	Technical documents (IOM, PSD, ...)
	TDS



This unit is certified in the LCPHP Programme of Eurovent Certita Certification, with its allowed component options as per the TCR document in force at all the conditions with a fouling factor of 0 m2K/kW (except ISEER) and with no antifreeze solution (except MT and LT Process Chiller applications when certified). The certified standard performances and the certified selection software version can be verified in www.eurovent-certification.com.

Outside the scope of AHRI Air-Cooled Water-Chilling Packages Certification Program, but is rated in accordance with AHRI Standard 550/590 (I-P) and AHRI Standard 551/591 (SI).

Packaged Chiller Builder-EMEA v5.27.0.0 (date 23/09/2025)

61XWHH10ZE

Water-cooled high temperature heat pump

Performance Information		
Mode		Heating
Heating Capacity ⁽¹⁾	kW	1274
Cooling Capacity to Source ⁽¹⁾	kW	895
Heating Efficiency (COP) ⁽¹⁾	kW/kW	3.13
Unit Power Input ⁽¹⁾	kW	407
Sound power level (L _{WA}) ⁽¹⁾	dB(A)	100.2
Sound Pressure Level at 1.0m (L _{pA}) ⁽¹⁾	dB(A)	82.2
Minimum Capacity ⁽²⁾	kW	321
Maximum Capacity	kW	1274

(1) All performances are compliant with EN14511 - 3 : 2022. Sound power level according to ISO9614 - 1.
(2) Due to the minimum flow rate allowable a lower inlet water temperature might have to be specified to achieve this performance.



Non contractual picture

Operating Conditions		
System element		Heating
Evaporator		
Fluid Type Fresh Water		
Fluid	Fouling Factor (sqm-K)/kW	0.000
	Leaving Temperature °C	30.0
	Entering Temperature °C	35.0
	Fluid Flow l/s	43.1
	Total pressure drop kPa	34.3
Condenser		
Fluid Type Fresh Water		
Fluid	Fouling Factor (sqm-K)/kW	0.000
	Leaving Temperature °C	85.0
	Entering Temperature °C	75.0
	Fluid Flow l/s	31.2
	Total pressure drop kPa	15.0
Altitude m		0

Unit Configuration		
25A	Star / delta start	
81	Single power connection point	
298A	BluEdge Digital (Connectivity embedded) Only available where CE & UKCA marking is applicable.	

Unit Information			
Manufacturing Source		Montluel	
Refrigerant type		R1234ZE	
Refrigerant Weight	kg	280.0	
Tonnes CO2 Equivalent	Tonnes	0.38	
Category PED		CAT IV	
Number of Refrigerant Circuit		2	
Number of Passes (Evaporator)		2	
Connection Diameter (Evaporator)	mm	203.2	
Connection Diameter (Condenser)	mm	203.2	
Number of Compressor		2	
Operating	Weight	kg	7265
	Length	mm	4730
	Width	mm	1125
Shipping	Height	mm	2002
	Weight	kg	6656
	Length	mm	4730
	Width	mm	1125
	Height	mm	2002

Electric Information		
Unit Voltage	V-Ph-Hz	400-3-50
Standby Power	kW	0
Power Factor		0.80
Maximum Current	A	720
Startup Current	A	947

Documentation	
	Technical documents (IOM, PSD, ...)
	TDS

Anexo F - Relatório Engineering Economic Analysis: Lifecycle Summary

TFM - BC vs CE

BC R717-H2O

BC ar-H2O

CE

Type of Analysis..... Private Sector Lifecycle Analysis

Type of Design Alternatives Mutually Exclusive

Length of Analysis20 yrs

Minimum Attractive Rate of Return 0,00 %

Income Taxes Not Considered

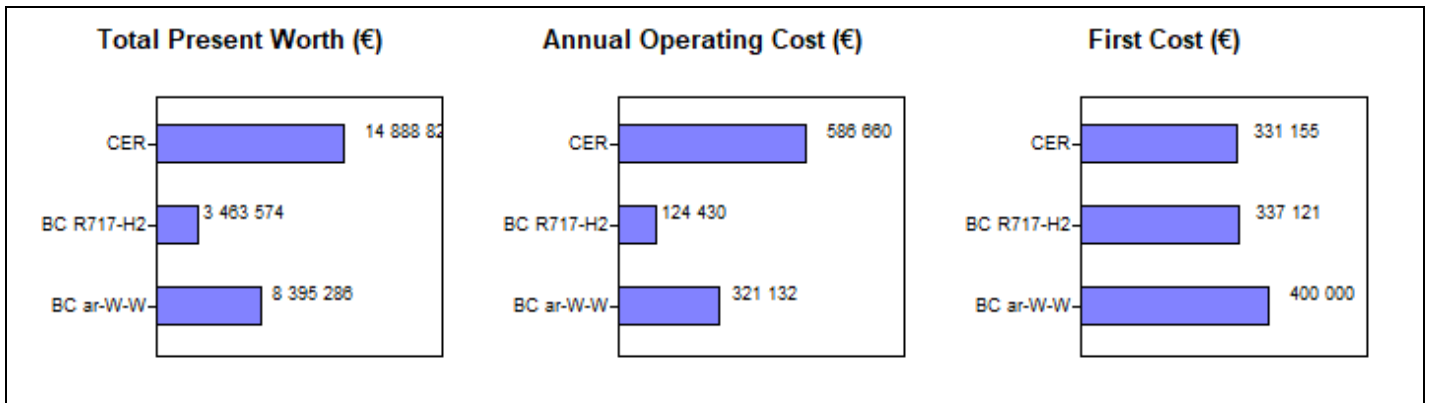


Table 1. Executive Summary

Economic Criteria	Best Design Case for Each Criteria	Value (€)
Incremental NPW Savings Analysis	Bomba de Calor R717-H2O	-
Lowest Total Present Worth	Bomba de Calor R717-H2O	3 463 574
Lowest Annual Operating Cost	Bomba de Calor R717-H2O	124 430
Lowest First Cost	Caldeira Elétrica de Resistência	331 155

Table 2. Design Cases Ranked by First Cost

Design Case Name	Design Case Short Name	Total Present Worth (€)	Annual Operating Cost (€/yr)	First Cost (€)
Caldeira Elétrica de Resistência	CER	14 888 821	586 660	331 155
Bomba de Calor R717-H2O	BC R717-H2	3 463 574	124 430	337 121
Bomba de Calor ar-H2O-H2O	BC ar-W-W	8 395 286	321 132	400 000

Table 3. Incremental Analysis Data

Challenger	Base Case	Additional First Cost (€)	NPW Savings (€)	IRR (%)	Payback Period (yrs)
BC R717-H2 [Winner]	CER	5 966	11 425 247	7 904,70	0,0
BC ar-W-W	BC R717-H2 [Winner]	62 879	-4 931 712	n/a	n/a

Anexo G - Relatório Engineering Economic Analysis: Analysis Details

TFM - BC vs CE

BC R717-H2O

BC ar-H2O

CE

Type of Analysis..... Private Sector Lifecycle Analysis
 Type of Design Alternatives Mutually Exclusive
 Length of Analysis20 yrs
 Minimum Attractive Rate of Return 0,00 %
 Income Taxes Not Considered

1A. Summary of Results

Base Case	Caldeira Elétrica de Resistência [CER]
Challenger [Winner]	Bomba de Calor R717-H2O [BC R717-H2]
[CER] Total Present Worth (€)	14 888 821
[BC R717-H2] Total Present Worth (€)	3 463 574
Net Present Worth Savings (€)	11 425 247
Internal Rate of Return	7 904,7 %
Payback Period (yrs)	0,0 years

1B. Comparative Analysis Details

		Cash Flow (Present Worth €)			SIR and Payback Calculation (Present Worth €)				
Year	Date	[CER] Cash Flow (€)	[BC R717- H2] Cash Flow (€)	Net Present Worth Savings (€)	Operating Cost Savings (€)	Cumulative Operating Cost Savings (€)	Additional Investment Cost (€)	Cumulative Additional Investment Cost (€)	Year-End SIR
0	Initial	331 155	337 121	-5 966	0	0	5 966	5 966	0,000
1	1	598 393	126 919	471 475	471 475	471 475	0	5 966	79,027
2	2	610 361	129 457	480 904	480 904	952 379	0	5 966	159,634
3	3	622 568	132 046	490 522	490 522	1 442 901	0	5 966	241,854
4	4	635 020	134 687	500 333	500 333	1 943 233	0	5 966	325,718
5	5	647 720	137 381	510 339	510 339	2 453 573	0	5 966	411,259
6	6	660 674	140 128	520 546	520 546	2 974 119	0	5 966	498,511
7	7	673 888	142 931	530 957	530 957	3 505 076	0	5 966	587,509
8	8	687 366	145 790	541 576	541 576	4 046 652	0	5 966	678,286
9	9	701 113	148 705	552 408	552 408	4 599 060	0	5 966	770,878
10	10	733 420	194 344	539 076	539 076	5 138 135	0	5 966	861,236
11	11	729 438	154 713	574 725	574 725	5 712 860	0	5 966	957,570
12	12	744 027	157 807	586 219	586 219	6 299 080	0	5 966	1 055,830
13	13	758 907	160 963	597 944	597 944	6 897 024	0	5 966	1 156,055
14	14	774 085	164 183	609 903	609 903	7 506 926	0	5 966	1 258,285
15	15	789 567	167 466	622 101	622 101	8 129 027	0	5 966	1 362,559

		Cash Flow (Present Worth €)			SIR and Payback Calculation (Present Worth €)				
Year	Date	[CER] Cash Flow (€)	[BC R717- H2] Cash Flow (€)	Net Present Worth Savings (€)	Operating Cost Savings (€)	Cumulative Operating Cost Savings (€)	Additional Investment Cost (€)	Cumulative Additional Investment Cost (€)	Year-End SIR
16	16	805 358	170 816	634 543	634 543	8 763 570	0	5 966	1 468,919
17	17	821 466	174 232	647 234	647 234	9 410 803	0	5 966	1 577,406
18	18	837 895	177 717	660 178	660 178	10 070 981	0	5 966	1 688,063
19	19	854 653	181 271	673 382	673 382	10 744 363	0	5 966	1 800,933
20	20	871 746	184 896	686 849	686 849	11 431 213	0	5 966	1 916,060
Totals		14 888 821	3 463 574	11 425 247	11 431 213		5 966		

2A. Summary of Results

Base Case	[Winner]	Bomba de Calor R717-H2O [BC R717-H2]
Challenger		Bomba de Calor ar-H2O-H2O [BC ar-W-W]
[BC R717-H2] Total Present Worth (€)		3 463 574
[BC ar-W-W] Total Present Worth (€)		8 395 286
Net Present Worth Savings (€)		-4 931 712
Internal Rate of Return		n/a
Payback Period (yrs)		n/a

2B. Comparative Analysis Details

		Cash Flow (Present Worth €)			SIR and Payback Calculation (Present Worth €)				
Year	Date	[BC R717-H2] Cash Flow (€)	[BC ar-W-W] Cash Flow (€)	Net Present Worth Savings (€)	Operating Cost Savings (€)	Cumulative Operating Cost Savings (€)	Additional Investment Cost (€)	Cumulative Additional Investment Cost (€)	Year-End SIR
0	Initial	337 121	400 000	-62 879	0	0	62 879	62 879	0,000
1	1	126 919	327 555	-200 636	-200 636	-200 636	0	62 879	-3,191
2	2	129 457	334 106	-204 649	-204 649	-405 285	0	62 879	-6,445
3	3	132 046	340 788	-208 742	-208 742	-614 027	0	62 879	-9,765
4	4	134 687	347 604	-212 917	-212 917	-826 943	0	62 879	-13,151
5	5	137 381	354 556	-217 175	-217 175	-1 044 118	0	62 879	-16,605
6	6	140 128	361 647	-221 518	-221 518	-1 265 636	0	62 879	-20,128
7	7	142 931	368 880	-225 949	-225 949	-1 491 585	0	62 879	-23,722

		Cash Flow (Present Worth €)			SIR and Payback Calculation (Present Worth €)				
Year	Date	[BC R717- H2] Cash Flow (€)	[BC ar-W- W] Cash Flow (€)	Net Present Worth Savings (€)	Operating Cost Savings (€)	Cumulative Operating Cost Savings (€)	Additional Investment Cost (€)	Cumulative Additional Investment Cost (€)	Year-End SIR
8	8	145 790	376 257	-230 468	-230 468	-1 722 053	0	62 879	-27,387
9	9	148 705	383 782	-235 077	-235 077	-1 957 130	0	62 879	-31,125
10	10	194 344	428 028	-233 684	-233 684	-2 190 814	0	62 879	-34,842
11	11	154 713	399 287	-244 574	-244 574	-2 435 388	0	62 879	-38,731
12	12	157 807	407 273	-249 466	-249 466	-2 684 854	0	62 879	-42,699
13	13	160 963	415 418	-254 455	-254 455	-2 939 309	0	62 879	-46,745
14	14	164 183	423 727	-259 544	-259 544	-3 198 853	0	62 879	-50,873
15	15	167 466	432 201	-264 735	-264 735	-3 463 588	0	62 879	-55,083
16	16	170 816	440 845	-270 030	-270 030	-3 733 617	0	62 879	-59,378
17	17	174 232	449 662	-275 430	-275 430	-4 009 048	0	62 879	-63,758
18	18	177 717	458 656	-280 939	-280 939	-4 289 987	0	62 879	-68,226
19	19	181 271	467 829	-286 558	-286 558	-4 576 544	0	62 879	-72,783
20	20	184 896	477 185	-292 289	-292 289	-4 868 833	0	62 879	-77,432
Totals		3 463 574	8 395 286	-4 931 712	-4 868 833		62 879		