



# Comparação de aquecimento de AQS com bomba de calor e com outras fontes energéticas

FRANCISCO MIGUEL MACIEIRA MOÇA ALVES ROCHA

Junho de 2025

**Comparação de aquecimento de AQS com bomba de calor (R-134a, NH<sub>3</sub> e CO<sub>2</sub>) e com outras fontes energéticas (gás natural, eletricidade da rede e auto geração)**

**Francisco Miguel Macieira Moça Alves Rocha**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica,  
Área de Especialização em Energia**

**Orientador: Leonardo José da Silva Ribeiro, Doutor do ISEP**

**Júri:**

Presidente:

[Nome do Presidente, Categoria, Escola]

Vogais:

[Nome do Vogal1, Categoria, Escola]

[Nome do Vogal2, Categoria, Escola] (até 4 vogais)

Porto, Junho 2025











# Resumo

Esta dissertação incide sobre a análise técnico-económica e ambiental de diferentes tecnologias para produção de água quente sanitária (AQS) e climatização em habitações unifamiliares, com principal foco em soluções de elevada eficiência energética e baixa pegada de carbono. A investigação centrou-se em sistemas de bombas de calor do tipo monobloco com instalação exterior, com ligação a depósitos de inércia e AQS. Considerou-se também a integração com sistemas solares, tanto térmicos como fotovoltaicos. Em alternativa, estudou-se a viabilidade da aplicação de uma caldeira de condensação a gás natural.

Foram analisadas as configurações dos sistemas em termos de constituição, funcionamento termodinâmico e modos de operação. No estudo realizou-se o dimensionamento de um sistema de AQS para uma unidade familiar composta por quatro pessoas, com base em perfis de consumo diários. No caso da climatização, considerou-se uma habitação com uma área útil de 100 m<sup>2</sup>, com cargas térmicas arbitradas de 10 Kw por m<sup>2</sup>.

Foi efetuada uma análise dos fluidos frigorigénios utilizados nas bombas de calor, nomeadamente R32 e R290, tendo em conta parâmetros como o *GWP (Global warming potencial)*, o *ODP (Ozone depletion potencial)* e *TEWI* e foi também analisado o impacto regulamentar segundo o *F-GAS regulation*.

Do ponto de vista económico, a dissertação contempla a avaliação da viabilidade financeira de cada solução, com levantamento de custos de investimento inicial, operação e manutenção, com cenários baseados em tarifas elétricas e preços do gás natural.

Na análise comparativa foram ainda considerados fatores como a facilidade de instalação, requisitos de espaço técnico e necessidade de manutenção periódica. O estudo conclui com uma síntese dos principais benefícios e limitações de cada abordagem, contribuindo para a definição do sistema a adotar em diferentes contextos.

**Palavras-chave:** Eficiência energética, bomba de calor, caldeira de condensação, AQS, climatização, sustentabilidade



# Abstract

This dissertation focuses on the technical, economic and environmental analysis of different technologies for producing domestic hot water (DHW) and air conditioning in single-family homes, with the focus on solutions with high energy efficiency and a low carbon footprint. The research centered on monobloc heat pump systems with outdoor installation, connected to inertial and DHW tanks. Integration with solar systems, both thermal and photovoltaic, was also considered. Alternatively, the feasibility of using a natural gas condensing boiler was studied.

The system configurations were analyzed in terms of constitution, thermodynamic functioning and operating modes. The study analyzed the sizing of a DHW system for a family unit comprising four people, based on daily consumption profiles. In the case of air conditioning, a dwelling with a floor area of 100 m<sup>2</sup> was considered, with arbitrated thermal loads of 10 Kw per m<sup>2</sup>.

An analysis was made of the refrigerants used in heat pumps, namely R32 and R290, considering parameters such as GWP (Global warming potential), ODP (Ozone depletion potential) and TEWI, and the regulatory impact according to the F-GAS regulation was also analyzed.

From an economic point of view, the dissertation includes an assessment of the financial viability of each solution, with a survey of initial investment, operation and maintenance costs, with scenarios based on electricity tariffs and natural gas prices.

The comparative analysis also considered factors such as ease of installation, technical space requirements and the need for periodic maintenance. The study concludes with a summary of the main benefits and limitations of each approach, helping to define the system to be adopted in different contexts.

**KEYWORDS:** Energy efficiency, heat pump, condensing boiler, DHW, space heating, sustainability



## Conteúdo

|   |       |
|---|-------|
| Resumo .....  | v     |
| Abstract.....   | vii   |
| Lista de Figuras.....   | xiii  |
| Lista de Tabelas .....  | xvi   |
| Lista de Equações.....  | xviii |
| Acrónimos e Símbolos.....   | xx    |
| 1. Introdução.....  | 1     |
| 1.1. Contextualização .....   | 1     |
| 1.2. Objetivo .....   | 1     |
| 1.3. Estrutura.....   | 2     |
| 2. Revisão Bibliográfica .....  | 5     |
| 2.1. Caldeiras.....   | 5     |
| 2.1.1. Tipologia.....   | 5     |
| <b>2.1.2. EFICIÊNCIA DE CALDEIRAS CONVENCIONAIS E DE CONDENSAÇÃO</b> .....                                      | 8     |
| 2.1.3. Eficiência caldeiras de condensação.....   | 9     |
| 2.1.4. Constituição de uma caldeira de condensação .....  | 10    |
| <b>2.1.5. Legislação aplicada a caldeiras</b> .....   | 10    |
| <b>2.1.6. Combustíveis</b> .....  | 12    |
| 2.2. Bombas de calor.....   | 13    |
| 2.2.1. Princípio de funcionamento de uma bomba de calor .....   | 13    |
| <b>2.2.2. Tipologias de bombas de calor</b> .....   | 15    |
| <b>2.2.3. Comparação solução bomba de calor monobloco e <i>split</i></b> .....                                  | 18    |
| <b>2.2.4. Fluidos frigoríficos</b> .....  | 19    |
| 3. Métodos e Aplicação.....   | 23    |
| 3.1. Dimensionamento bomba de calor AQS + climatização .....  | 23    |
| <b>3.1.1. Dimensionamento da bomba de calor para AQS</b> .....  | 23    |
| <b>3.1.2. Dimensionamento da bomba de calor para climatização</b> .....   | 27    |
| 3.2. Dimensionamento sistema bomba de calor AQS + climatização com apoio de painéis solares térmicos.....       | 30    |
| <b>3.2.1. Análise da viabilidade de Instalação de 2 ou 4 metros quadrados de painéis solares térmicos</b> ..... | 31    |
| 3.3. Dimensionamento sistema bomba de calor AQS + climatização com apoio de painéis solares fotovoltaicos ..... | 39    |
| 3.3.1. Dimensionamento dos painéis solares fotovoltaicos .....  | 39    |
| 3.4. Dimensionamento da caldeira de condensação .....   | 43    |

|   |    |
|---|----|
| 3.4.1. Dimensionamento da caldeira .....  | 43 |
| 3.5. Cálculo dos custos .....   | 46 |
| <b>3.5.1. Custos eletricidade e gás natural</b> .....                               | 46 |
| <b>3.5.2. Custos sistemas bomba de calor</b> .....                                  | 48 |
| <b>3.5.2.2. Custos operação bomba de calor</b> .....                                | 48 |
| <b>3.5.2.3. Custos manutenção bomba de calor</b> .....                              | 48 |
| <b>3.5.3. Custos sistemas bomba de calor + painel solar térmico</b> .....           | 49 |
| <b>3.5.3.1. Custos aquisição bomba de calor + painel solar térmico</b> .....        | 49 |
| <b>3.5.3.2. Custos operação bomba de calor + painel solar térmico</b> .....         | 50 |
| <b>3.5.3.1. Custos manutenção bomba de calor + painel solar térmico</b> .....       | 50 |
| <b>3.5.4. Custos sistemas bomba de calor + painel solar fotovoltaico</b> .....      | 51 |
| <b>3.5.4.1. Custos aquisição bomba de calor + painel solar fotovoltaico</b> .....   | 51 |
| <b>3.5.4.2. Custos operação bomba de calor + painel solar fotovoltaico</b> .....    | 52 |
| <b>3.5.4.3. Custos manutenção bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos</b> .. | 52 |
| <b>3.5.5. Custos sistemas caldeira de condensação</b> .....                         | 53 |
| <b>3.5.5.1. Custos aquisição sistema caldeira de condensação</b> .....              | 53 |
| <b>3.5.5.2. Custos operação caldeira de condensação</b> .....                       | 53 |
| <b>3.5.5.3. Custos manutenção caldeira de condensação</b> .....                     | 54 |
| 4. Resultados e Discussão .....   | 55 |
| 4.1. Custos de aquisição e instalação .....   | 55 |
| 4.1.1. Sistema bomba de calor .....   | 55 |
| 4.1.2. Bomba de calor + painéis solares térmicos .....                              | 56 |
| 4.1.3. Bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos .....                         | 56 |
| 4.1.4. Caldeira de condensação .....  | 57 |
| 4.2. Custos de operação .....   | 58 |
| 4.2.1. Sistema bomba de calor .....   | 58 |
| 4.2.2. Sistema bomba de calor + painéis solares térmicos .....                      | 60 |
| 4.2.3. Sistema bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos .....                 | 63 |
| 4.2.4. Caldeira de condensação .....  | 66 |
| 4.3. Discussão de resultados .....  | 69 |
| <b>4.3.1. Custos de aquisição</b> .....   | 69 |
| <b>4.3.2. Custos de manutenção</b> .....  | 70 |
| <b>4.3.3. Custos de operação</b> .....  | 70 |
| <b>4.3.4. Análise de investimento a 20 anos</b> .....                               | 71 |
| 5. Conclusão .....  | 75 |
| 5.1. Conclusões finais .....  | 75 |
| 5.2. Limitações e trabalhos futuros .....   | 75 |
| Referências .....   | 78 |

|  |     |
|--|-----|
| Declaração de Integridade .....  | 81  |
| Apêndice A- Energia diária AQS .....   | 83  |
| Apêndice B- Energia mensal AQS.....  | 84  |
| Apêndice C- Energia num sistema de 2 painéis solares térmicos.....   | 85  |
| Apêndice D- Energia num sistema de 1 painel solar térmico .....  | 86  |
| Apêndice E- Energia radiação ângulo 33° .....  | 87  |
| Apêndice F- Carga numa instalação com 1 e 2 painéis solares térmicos.....                                      | 88  |
| Apêndice G- Energia fornecida por uma instalação com 1 e 2 painéis solares térmicos .....                      | 89  |
| Apêndice H- Energia da bomba de calor numa instalação com 1 e 2 painéis solares térmicos                       | 90  |
| Apêndice I- Energia fornecida numa instalação com 1 painel solar fotovoltaico.....                             | 91  |
| Apêndice J- Energia num sistema de 1 painel solar fotovoltaico .....   | 92  |
| Apêndice K- Custo operação bomba de calor (AQS).....   | 93  |
| Apêndice L- Custo operação bomba de calor (climatização).....  | 94  |
| Apêndice M- Custo mensal operação sistema bomba de calor com painel solar térmico (AQS)                        | 95  |
| Apêndice N- Energia num sistema com painel solar térmico (climatização).....                                   | 96  |
| Apêndice O- Custo mensal operação sistema bomba de calor com painel solar térmico (climatização) .....         | 97  |
| Apêndice P- Custo mensal operação sistema de bomba de calor com painel solar fotovoltaico (AQS) .....          | 98  |
| Apêndice Q- Energia sistema de bomba de calor com painel solar fotovoltaico (climatização)                     | 99  |
| Apêndice R- Custo mensal operação sistema de bomba de calor com painel solar fotovoltaico (climatização) ..... | 100 |
| Apêndice S- Custo mensal operação caldeira (AQS).....  | 101 |
| Apêndice T- Custo mensal operação caldeira (climatização).....   | 102 |
| Apêndice U- Análise de investimento ao longo de 20 anos.....   | 103 |



# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1-Esquema de princípio de uma caldeira de combustão aberta (esquerda) vs estanque (direita)-Adaptada (Alejandra R, 2013).....   | 6  |
| Figura 2-Princípio de funcionamento de uma caldeira convencional vs de condensação .....   | 7  |
| Figura 3-Gráfico eficiência caldeiras de convencionais, de alta eficiência e de condensação. Adaptado de (Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration (Including Corrigenda - April 2016) (No Longer Current but Cited in Building Regulations Guidance), 2005) ..... | 8  |
| Figura 4- Curva de eficiência de uma caldeira de condensação a gás natural. Adaptado de (Baldi et al., 2017) .....   | 9  |
| Figura 5--Constituição de uma caldeira de condensação. Adaptado (Vignali, 2017) .....  | 10 |
| Figura 6-Requisitos mínimos de eficiência energética de caldeiras, (Portaria n.o 17-A/2016 de 4 de Fevereiro, n.d.) .....  | 11 |
| Figura 7-Rendimento nominal de caldeiras e esquentadores, (Portaria n.o 17-A/2016 de 4 de Fevereiro, n.d.).....  | 11 |
| Figura 8--Princípio de funcionamento de uma bomba de calor. (Salvadori, n.d.).....   | 13 |
| Figura 9-Diagrama p-h de um ciclo de compressão real.....  | 14 |
| Figura 10-Esquema de princípio bomba de calor split com depósito integrado. Fonte (France Air Portugal, n.d.) .....  | 16 |
| Figura 11-Esquema de princípio de uma bomba de calor split sem depósito integrado. Fonte (France Air Portugal, n.d.).....  | 17 |
| Figura 12-Esquema de princípio de uma bomba de calor monobloco sem depósito integrado. Fonte(Kandlikar, n.d.) .....  | 18 |
| Figura 13-Excertos legislação F-GAS FONTE (COMISSÃO EUROPEIA, 2025) .....  | 21 |
| Figura 14-Fluidos frigorigênicos e respetivos GWP .....  | 22 |
| Figura 15-Consumo diário de AQS para edifícios de habitação, conforme previsto na Norma EN 12831-3, (Portaria n.o 138-I/2021AMBIENTE E AÇÃO CLIMÁTICA E INFRAESTRUTURAS E HABITAÇÃO-, n.d.) .....  | 23 |
| Figura 16-Temperaturas da água (°C) .....  | 24 |
| Figura 17-Necessidades diárias de aquecimento de AQS (J), APÊNDICE A.....  | 25 |
| Figura 18-Energia mensal de aquecimento AQS (J), APÊNDICE B.....   | 25 |
| Figura 19-Características técnicas da bomba de calor FONTE (Guia Online France Air Portugal, n.d.).....  | 28 |
| Figura 20-Gráfico COP bomba de calor para diferentes temperaturas Adaptado de (CAIROX BULGARIA, n.d.) .....  | 29 |
| Figura 21-Esquema de instalação de 2 painéis solares térmico Adaptado de (SOLTERM, n.d.)   | 31 |
| Figura 22-Energia numa instalação de 2 painéis solares térmicos (kWh), APÊNDICE C .....  | 31 |
| Figura 23-Esquema de instalação de 2 painéis solares térmicos Adaptado de (SOLTERM, n.d.) .....  | 32 |
| Figura 24-Energia numa instalação de 1 painel solar térmico (kWh), APÊNDICE D .....  | 33 |
| Figura 25-Dados radiação num plano inclinado a 33º com orientação ao azimute sul (kWh/m <sup>2</sup> ), APÊNDICE E .....   | 33 |
| Figura 26-Carga numa instalação de 1 e 2 painéis solares térmicos (kWh), APÊNDICE F.....   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 27-Energia fornecida por uma instalação de 1 e 2 painéis solares térmicos (kWh), APÊNDICE G.....   | 35 |
| Figura 28-Energia bomba de calor numa instalação com 1 e 2 painéis solares térmicos (kWh), APÊNDICE H.....  | 36 |
| Figura 29-Instalação de um sistema de bomba de calor e painéis solares térmicos Adaptado de (WOLF, n.d.) .....  | 37 |
| Figura 30-Dados técnicos painel solar fotovoltaico Adaptado de (Phono, n.d.) .....  | 39 |
| Figura 31-Energia radiação incidente (kWh/m <sup>2</sup> ) e energia gerada por uma instalação de 1 painel solar fotovoltaico (kWh), APÊNDICE I ..... | 40 |
| Figura 32-Energia fornecida pelo painel solar fotovoltaico e pela rede à bomba de calor (kWh), APÊNDICE J.....  | 40 |
| Figura 33-Microinversores Adaptado de (GROWATT, n.d.) .....   | 41 |
| Figura 34-Instalação de um sistema de bomba de calor e painéis solares fotovoltaicos Adaptado de (Guia Online France Air Portugal, n.d.) .....        | 42 |
| Figura 35-Características técnicas caldeira Adaptado de (BOSCH, n.d.).....  | 45 |
| Figura 36-Custos de aquisição e instalação do sistema bomba de calor (€) .....  | 55 |
| Figura 37-Custos de aquisição e instalação do sistema bomba de calor + painéis solares térmicos (€).....  | 56 |
| Figura 38-Custo aquisição sistema bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos (€).....   | 57 |
| Figura 39-Custo aquisição caldeira de condensação (€) .....   | 57 |
| Figura 40-Energia fornecida pela rede à bomba de calor (kWh) .....  | 58 |
| Figura 41-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE K.....   | 58 |
| Figura 42-Energia fornecida pela rede à bomba de calor (kWh) .....  | 59 |
| Figura 43-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE L .....  | 59 |
| Figura 44-Energia sistema com painel solar térmico (kWh) .....  | 60 |
| Figura 45-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE M.....   | 61 |
| Figura 46-Energia em climatização no sistema de painel solar térmico (kWh), APÊNDICE N ...  | 61 |
| Figura 47-Custo mensal operação (€), APÊNDICE O .....   | 62 |
| Figura 48-Energia sistema com painel solar fotovoltaico (kWh) .....   | 63 |
| Figura 49-Custo mensal operação (€), APÊNDICE P .....   | 64 |
| Figura 50-Energia em climatização no sistema com painel solar fotovoltaico (kWh), APÊNDICE Q .....  | 65 |
| Figura 51-Custo mensal operação (€), APÊNDICE R.....  | 65 |
| Figura 52- Volume de gás a fornecer à caldeira mensalmente (m <sup>3</sup> ).....   | 66 |
| Figura 53-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE S .....  | 67 |
| Figura 54-Volume de gás a fornecer à caldeira mensalmente (m <sup>3</sup> ).....  | 67 |
| Figura 55-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE T .....  | 68 |
| Figura 56-Custos de aquisição dos diferentes sistemas (€) .....   | 69 |
| Figura 57-Custos manutenção (€) .....   | 70 |
| Figura 58-Custos de operação anual dos diferentes sistemas (€) .....  | 70 |
| Figura 59-Análise de investimento a 20 anos (€), APÊNDICE U .....   | 71 |
| Figura 60-Investimento acumulado a 20 anos (€) .....  | 72 |



# Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1-Composição molecular do gás natural comercializado.....                                     | 12 |
| Tabela 2-Características do gás natural comercializado .....   | 12 |
| Tabela 3-Carga térmica aquecimento .....   | 27 |
| Tabela 4-Equipamentos sistema bomba de calor .....   | 30 |
| Tabela 5-Equipamentos selecionados sistema bomba de calor + painéis solares térmicos .....           | 38 |
| Tabela 6-Equipamentos selecionados sistema bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos .....      | 43 |
| Tabela 7-Equipamento selecionado sistema caldeira.....   | 46 |
| Tabela 8-Tarifário eletricidade .....  | 46 |
| Tabela 9-Tarifário gás natural .....   | 47 |
| Tabela 10-Custos aquisição + instalação sistema bomba de calor .....                                 | 48 |
| Tabela 11-Custos aquisição + instalação sistema bomba de calor e painéis solares térmicos..          | 49 |
| Tabela 12-Custos aquisição + instalação sistema bomba de calor e painéis solares fotovoltaicos ..... | 51 |
| Tabela 13-Custos aquisição + instalação caldeira de condensação .....                                | 53 |



# Lista de Equações

|                 |    |
|-----------------|----|
| Equação 1.....  | 21 |
| Equação 2.....  | 23 |
| Equação 3.....  | 24 |
| Equação 4.....  | 25 |
| Equação 5.....  | 26 |
| Equação 6.....  | 29 |
| Equação 7.....  | 39 |
| Equação 8.....  | 44 |
| Equação 9.....  | 45 |
| Equação 10..... | 46 |
| Equação 11..... | 47 |
| Equação 12..... | 47 |



# Acrónimos e Símbolos

## Lista de Acrónimos

|      |   |
|------|---|
| AQS  | Águas quentes sanitárias                  |
| EPBD | Energy Performance of Buildings Directive |
| VSD  | Variable speed drive                      |
| GWP  | Global warming potential                  |
| ODP  | Ozone depletion potential                 |
| TEWI | Total Equivalent Warming Impact           |
| PCI  | Poder calorífico inferior                 |
| PCS  | Poder calorífico superior                 |
| HCFC | Hidroclorofluorocarbonetos                |
| HFC  | Hidrofluorocarbonetos                     |
| PFC  | Perfluorocarbonetos                       |
| HC   | Hidrocarbonetos                           |
| UE   | União Europeia                            |
| PSF  | Painel solar fotovoltaico                 |
| PDT  | Painel solar térmico                      |
| BC   | Bomba de calor                            |

## Lista de Símbolos

|                |                                      |            |
|----------------|--------------------------------------|------------|
| m              | massa                                | Kg         |
| T              | temperatura                          | °C         |
| p              | pressão                              | Pa         |
| h <sub>s</sub> | Entalpia do fluido na saída          | kJ/kg      |
| h <sub>e</sub> | Entalpia do fluido na entrada        | kJ/kg      |
| M AQS          | Consumo de água quente sanitária     | L (Litros) |
| ΔT             | Diferença de temperatura             | °C         |
| nd             | Número de dias de consumo            | —          |
| L              | Perdas por fugas durante a vida útil | —          |
| cp             | Calor específico                     | J/(kg·K)   |



# 1. Introdução

Neste primeiro capítulo é realizada uma introdução ao relatório da dissertação da tese de mestrado, no âmbito do mestrado de engenharia mecânica, com especialização em energia. Será feita uma contextualização, definido o objetivo e uma pequena descrição da estrutura.

## 1.1. Contextualização

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a procura por soluções energéticas mais eficientes tem impulsionado o desenvolvimento e a adoção de tecnologias alternativas no setor de aquecimento. Nesse contexto, a escolha entre diferentes sistemas para produção de água quente sanitária (AQS) e climatização desempenha um papel central na estratégia de redução de emissões de gases com efeito estufa e no aumento da eficiência energética em edifícios residenciais, comerciais e industriais.

Dois tecnologias amplamente utilizadas para esse fim são as bombas de calor e as caldeiras. Cada uma destas soluções apresenta características técnicas, económicas e ambientais distintas, que as tornam mais adequadas em determinados contextos de aplicação. As bombas de calor, por exemplo, destacam-se pela sua eficiência energética, podendo utilizar fontes de energia renovável como complemento. Por outro lado, as caldeiras, tradicionalmente alimentadas por combustíveis fósseis ou biomassa, oferecem robustez e confiabilidade, especialmente em cenários de altas necessidades térmicas, podendo também ser interligadas a tecnologias de energia renovável.

## 1.2. Objetivo

Este relatório tem como principal objetivo realizar um comparativo detalhado entre bombas de calor e caldeiras para sistemas de AQS e climatização, abordando aspetos como eficiência energética, impacto ambiental, custo de instalação e operação, bem como a viabilidade técnica em diferentes cenários. A análise procura fornecer dados para ajudar numa tomada de decisão informada, aliada às normas em vigor e metas de sustentabilidade.

Com esta revisão teórica das tecnologias, pretende-se enriquecer o debate técnico no que diz respeito ao aquecimento de AQS e climatização, contribuindo para o desenvolvimento de soluções energeticamente mais eficientes e com menor pegada de carbono.

### **1.3. Estrutura**

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, desde o enquadramento teórico até à análise e discussão dos resultados. O capítulo 1 (introdução) apresenta o contexto do tema em estudo, os objetivos definidos para a investigação e a estrutura global do trabalho. No capítulo 2 (revisão bibliográfica), são abordados os principais fundamentos teóricos e técnicos relacionados com caldeiras e bombas de calor, incluindo os respetivos princípios de funcionamento, componentes, tipologias e o enquadramento regulamentar em vigor.

No capítulo 3 (métodos e aplicação), é descrita a metodologia adotada, nomeadamente os critérios utilizados para o dimensionamento dos sistemas e a seleção dos equipamentos. Seguidamente, o capítulo 4 (resultados e discussão), apresenta os resultados obtidos ao longo do estudo, com uma análise económica comparativa entre as diferentes soluções analisadas. Por fim, o capítulo 5 (conclusão e trabalhos futuros), sintetiza as principais conclusões retiradas da investigação, identifica limitações do trabalho realizado e propõe linhas de desenvolvimento para estudos futuros.



## Introdução

## 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo irão ser abordadas duas tecnologias de caldeiras (condensação e convencionais), assim como a tecnologia de bomba de calor monobloco (com depósito de AQS e climatização), explorando temas como respetivos componentes, conceitos teóricos, custos, legislação, etc.

### 2.1. Caldeiras

As caldeiras são equipamentos em que há queima de combustível de modo que o calor produzido por essa queima é transferido para um fluido, designado como fluido de trabalho, que, por sua vez, cede o calor que recebeu a um ou vários consumidores de calor.

Normalmente o funcionamento numa caldeira decorre em regime estacionário: a caldeira é continuamente abastecida por combustível e o fluido de trabalho circula continuamente entre a caldeira, onde recebe calor, e o consumidor ou consumidores de calor, onde cede calor.

Num permutador há troca de calor entre dois fluidos a diferentes temperaturas; não há reação química de combustão no seio de nenhum dos dois fluidos. Ora nas caldeiras há o fluido de trabalho, que não sofre reação química, mas há reação química de combustão no seio do combustível.

Os combustíveis queimados nas caldeiras podem ser sólidos, líquidos ou gasosos.

#### 2.1.1. Tipologia

As caldeiras podem ser classificadas segundo 3 parâmetros:

1. Combustível
2. Forma de combustão
3. Tipologia

##### 1. Combustíveis:

- Sólidos
- Líquidos
- Gasosos

##### 2. Forma de combustão:

- Estanques
- Abertas

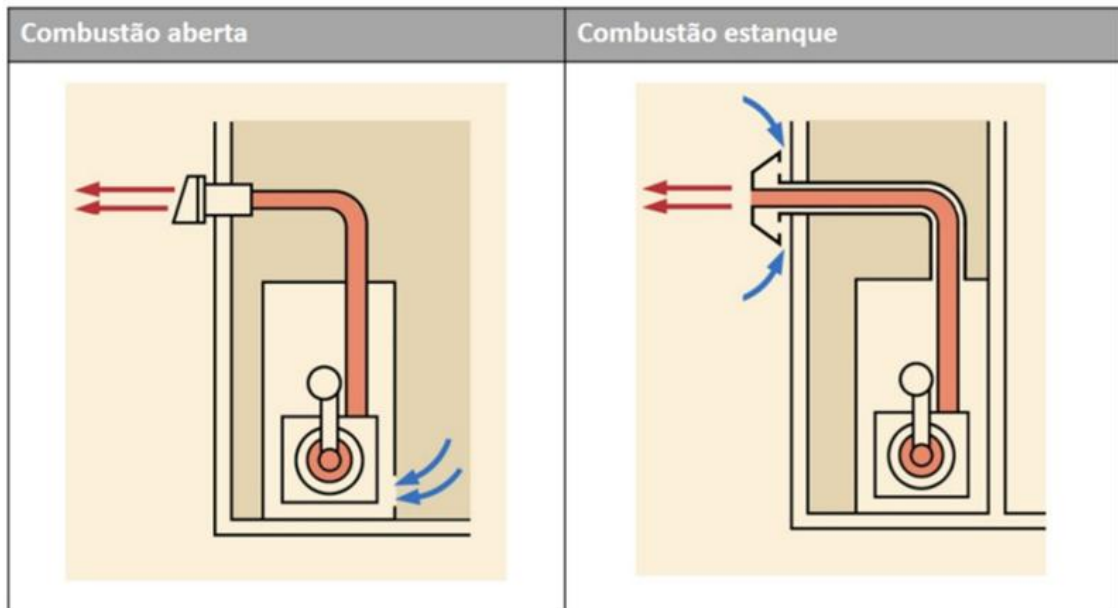


Figura 1-Esquema de princípio de uma caldeira de combustão aberta (esquerda) vs estanque (direita)-Adaptada (Alejandra R, 2013)

Na figura 1, está demonstrado o princípio de funcionamento de uma caldeira de combustão aberta e combustão estanque.

Numa caldeira de combustão aberta, o ar de combustão é admitido diretamente do espaço onde a caldeira está inserida e os gases de exaustão são expelidos por uma conduta até ao exterior.

Por outro lado, as caldeiras estanques, admitem o ar de combustão do exterior, fazendo-o passar em contra-corrente com os fumos, rejeitados para o exterior.

Na tecnologia de caldeiras estanques, o ar de exaustão pré-aquece o ar admitido, aumentando a sua temperatura até uma temperatura mais próxima da de combustão, reduzindo a energia necessária para este efeito, aumentando deste modo a eficiência da queima.

3. Tipologia:

- Condensação
- Convencional

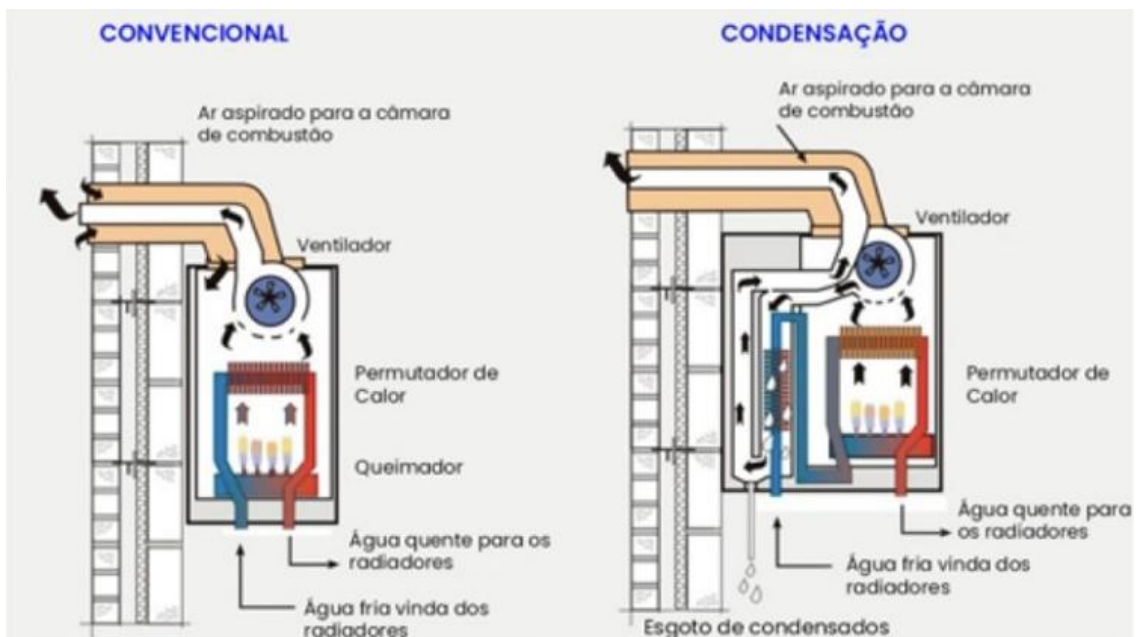


Figura 2-Princípio de funcionamento de uma caldeira convencional vs de condensação

Na figura 2, do lado esquerdo, está demonstrado o princípio de funcionamento de uma caldeira convencional. A água da rede/que retorna dos sistemas de climatização passa pelo permutador de calor, é aquecida e os gases de combustão são direcionados para o exterior.

Na figura do lado direito está ilustrada a tecnologia de uma caldeira de condensação, que consiste na adição de mais um permutador de calor (que recupera energia dos gases de combustão), por onde a água da rede/água de retorno do sistema de climatização irá passar, arrefecendo os gases de combustão, condensando-os e reaproveitando essa energia.

### 2.1.2. EFICIÊNCIA DE CALDEIRAS CONVENCIONAIS E DE CONDENSAÇÃO

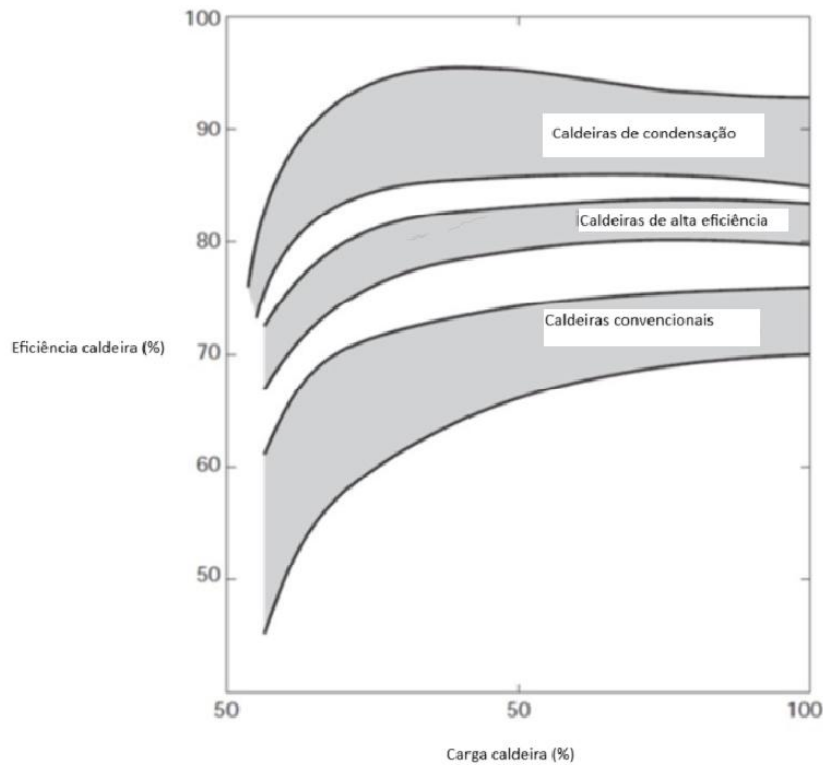


Figura 3-Gráfico eficiência caldeiras de convencionais, de alta eficiência e de condensação. Adaptado de (Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration (Including Corrigenda - April 2016) (No Longer Current but Cited in Building Regulations Guidance), 2005)

A figura 3, representa a curva de eficiência das caldeiras de condensação, caldeiras de alta eficiência e caldeiras convencionais a diferentes cargas parciais.

Após análise do gráfico, é possível concluir que para diferentes percentagens de cargas parciais, as caldeiras de condensação são substancialmente superiores às caldeiras convencionais.

A carga de uma caldeira refere-se à proporção da capacidade total que está a ser utilizada num determinado momento, variando de 0 a 1 (ou 0% a 100%).

Uma carga de 0 significa que a caldeira não está em funcionamento (a produzir vapor ou calor) e uma carga de 1 (ou 100%) indica que a caldeira está a trabalhar na sua capacidade máxima nominal. A carga varia de acordo com as necessidades de vapor ou calor do sistema que a caldeira está a alimentar e como tal, um controlo adequado, irá permitir aumentar a eficiência do equipamento assim como a sua vida útil.

### 2.1.3. Eficiência caldeiras de condensação

Como já foi possível comprovar anteriormente, as caldeiras de condensação são, efetivamente mais eficientes do que as caldeiras convencionais.

Como tal irá ser analisada em maior detalhe a eficiência das caldeiras de condensação.

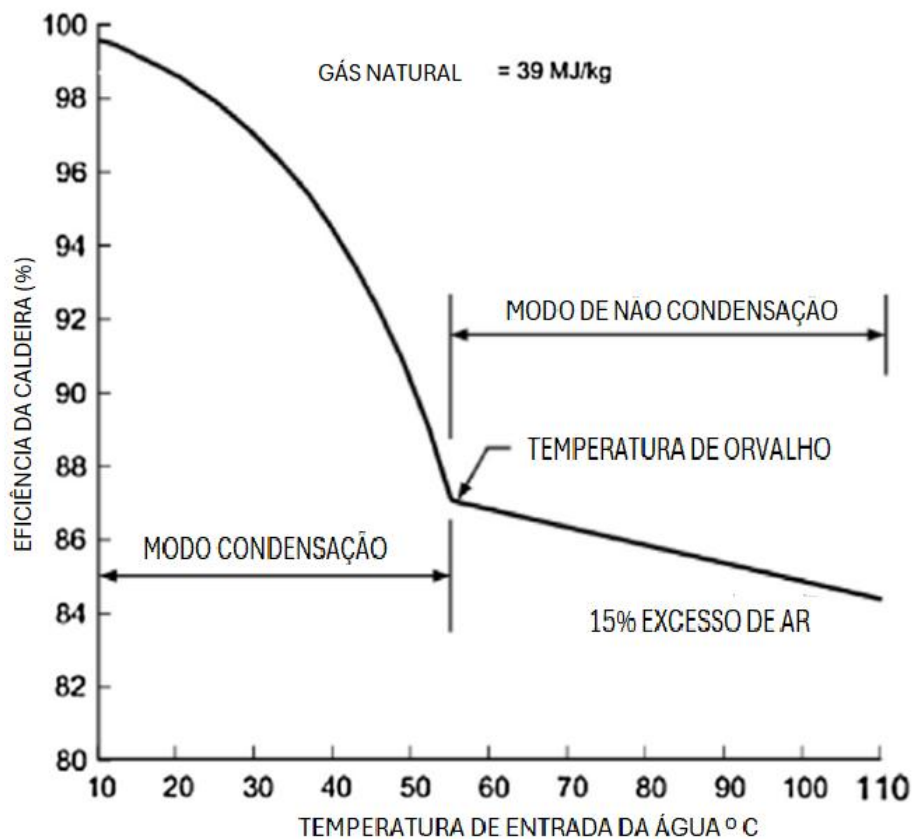


Figura 4- Curva de eficiência de uma caldeira de condensação a gás natural. Adaptado de (Baldi et al., 2017)

O gráfico da figura 4, representa a evolução da curva de eficiência de uma caldeira condensação cujo combustível é gás natural, para diferentes temperaturas de entrada/retorno da água.

Através da análise do mesmo, podemos concluir que quanto menor a temperatura de entrada/retorno da água, maior será a eficiência da caldeira, nos diferentes valores de carga a que está sujeita. Isso deve-se ao facto de que para temperaturas de água de entrada/retorno menores, a caldeira consegue fazer maior recuperação do calor latente presente nos gases de exaustão, aumentando assim a eficiência da mesma ( $T_{ent} < T_{cond}$ ), utilizando o permutador de secundário (de condensação).

Para temperaturas mais elevadas de entrada/retorno de água esse calor latente não é tão aproveitado, sendo algum desperdiçado para o meio ambiente ( $T_{ent} > T_{cond}$ ), só sendo recuperado o calor sensível.

#### 2.1.4. Constituição de uma caldeira de condensação

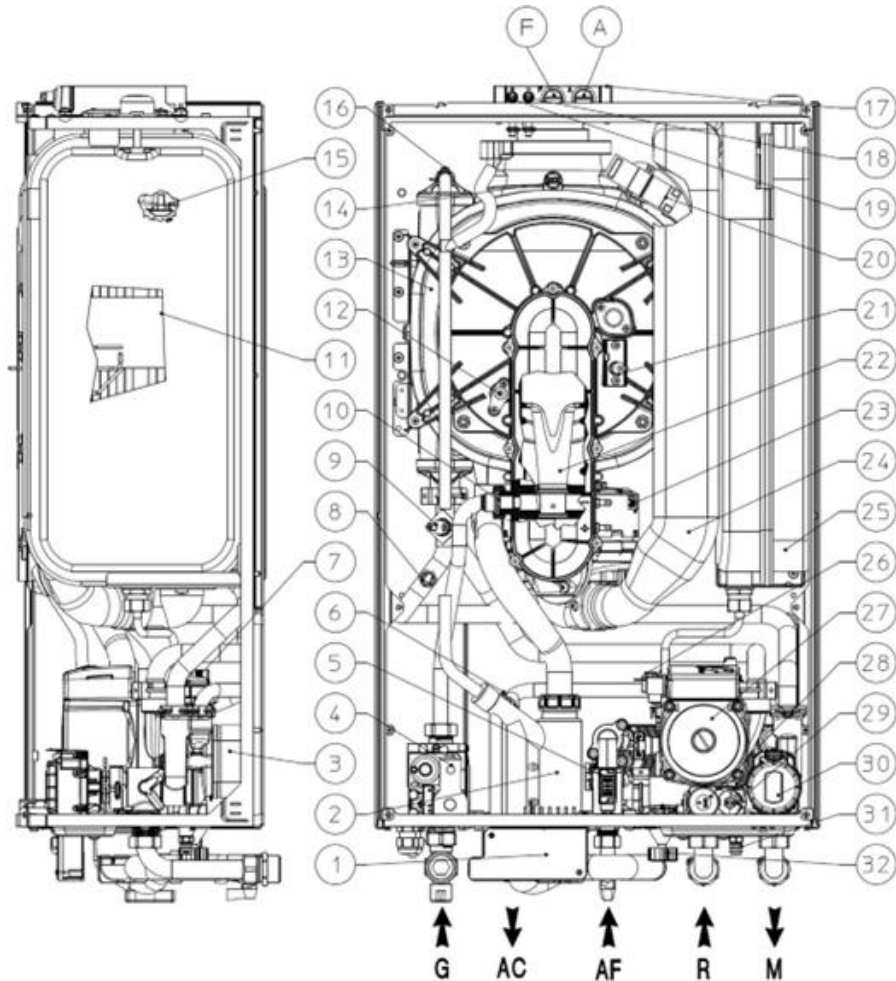


Figura 5--Constituição de uma caldeira de condensação. Adaptado (Vignali, 2017)

1- Placa de bornes de ligação elétrica; 2- Sifão de drenagem de condensados; 3 - Permutador de calor AQS; 4 - Válvula de gás; 5 - Interruptor de fluxo de água quente doméstica; 6 - Sonda de água quente doméstica; 7 - Válvula de ventilação; 8 - Sonda de fluxo; 9 - Termóstato de segurança; 10 - Bocal de gás; 11 - Queimador; 12 - Eléctrodo de deteção; 13 - Módulo de condensação, 14 - Sonda de combustão, 15 - Termo fusível de segurança do permutador de calor, 16 - Válvula manual de purga de ar; 17 - Pontos de amostragem (ar A) e (gases de combustão F); 18 - Ponto de pressão de sinal negativo; 19 - Ponto de pressão de sinal positivo; 20 - Faiscador; 21 - Eléctrodo de ignição; 22 - Venturi; 23 - Ventilador; 24 - Tubo de admissão de ar; 25 - Vaso de expansão do sistema; 26 - Interruptor de pressão do sistema; 27 - Bomba da caldeira; 28 - Válvula de segurança de 3 bar; 29 - Derivação; 30 - Válvula de 3 vias (motorizada); 31 - Válvula de drenagem do sistema; 32 - Válvula de enchimento do sistema

Na figura 5 estão representados os principais componentes de uma caldeira de condensação.

#### 2.1.5. Legislação aplicada a caldeiras

As crescentes necessidades de adoção de soluções energeticamente mais eficientes têm vindo a aumentar, como podemos comprovar pelas diretivas presentes em “ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS DIRECTIVE” da União Europeia que, embora não especifiquem quais os métodos a adotar, favorecem a implementação de sistemas mais eficientes. (Comissão Europeia, 2024)

Para além das recomendações feitas em “EPBD” 2024/1275, as caldeiras a combustível líquido ou gasoso devem obedecer aos requisitos mínimos de eficiência indicados na tabela I.18 da portaria nº17-A/2016, na forma de classe de eficiência, sendo que o seu rendimento deve ser superior ao disposto na Tabela I.19 da mesma portaria, (Portaria n.º 17-A/2016 de 4 de Fevereiro, n.d.).

| Tipo de equipamento | Classe de eficiência mínima após... |             |
|---------------------|-------------------------------------|-------------|
|                     | entrada em vigor                    | 31 dez 2015 |
| Caldeira            | B                                   | A           |

Figura 6-Requisitos mínimos de eficiência energética de caldeiras, (Portaria n.º 17-A/2016 de 4 de Fevereiro, n.d.)

Na figura 6 está representada a tabela I.18 da portaria nº17-A/2016, onde está indicada a classe de eficiência mínima que uma caldeira deve ter desde 31 de janeiro de 2015. Segundo a esta portaria a classe mínima de eficiência é a A.

| Caldeiras | Classe de eficiência energética | Rendimento nominal ( $\eta$ ) |
|-----------|---------------------------------|-------------------------------|
|           |                                 | A++ (1)                       |
|           | A+ (2)                          | $96\% \geq \eta > 92\%$       |
|           | A                               | $92\% \geq \eta > 89\%$       |
|           | B                               | $89\% \geq \eta > 86\%$       |
|           | C                               | $86\% \geq \eta > 83\%$       |

Figura 7-Rendimento nominal de caldeiras e esquentadores, (Portaria n.º 17-A/2016 de 4 de Fevereiro, n.d.).

Na figura 7 está representado um excerto da tabela I.19 da portaria nº17-A/2016. Conforme é possível analisar, a partir de 31 de dezembro de 2015, as caldeiras têm de ter uma eficiência superior a 89 %.

### 2.1.6. Combustíveis

É importante referir que a composição do gás natural pode variar conforme o fornecedor, e por isso irá ser apresentada uma tabela com as composições molares, disponibilizada pela distribuidora "PORTGÁS".

*Tabela 1-Composição molecular do gás natural comercializado*

| CONSTITUINTES      | FÓRMULA QUÍMICA                | COMPOSIÇÃO MOLAR (%) |
|--------------------|--------------------------------|----------------------|
|                    |                                | kmol                 |
| METANO             | CH <sub>4</sub>                | 90,05                |
| ETANO              | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 6,45                 |
| PROPANO            | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 1,74                 |
| I-BUTANO           | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,23                 |
| N-BUTANO           | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,27                 |
| I-PENTANO          | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,02                 |
| N-PENTANO          | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,01                 |
| N-HEXANO           | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | 0,01                 |
| AZOTO              | N <sub>2</sub>                 | 0,58                 |
| DIÓXIDO DE CARBONO | CO <sub>2</sub>                | 0,63                 |
| <b>TOTAL</b>       |                                | <b>100,00</b>        |

Na tabela 1 estão indicados os principais constituintes do gás natural que é comercializado em Portugal, assim como a respetiva fórmula química e composição molecular em percentagem.(PORTGÁS, n.d.)

*Tabela 2-Características do gás natural comercializado*

|  |       |
|--|-------|
| PESO MOLECULAR                                       | 17,92 |
| MASSA VOLÚMICA (kg/ m <sup>3</sup> )                 | 0,80  |
| DENSIDADE RELATIVA                                   | 0,62  |
| PODER CALORIFICO SUPERIOR (kWh/m <sup>3</sup> )      | 11,90 |
| PODER CALORIFICO INFERIOR ((kWh/m <sup>3</sup> )     | 10,78 |
| ÍNDICE DE WOBBE (SOBRE PCS)<br>(kWh/m <sup>3</sup> ) | 15,12 |

Na tabela 2 estão representadas algumas características do gás natural comercializado. (PORTGÁS, n.d.)

## 2.2. Bombas de calor

As bombas de calor são uma solução inovadora e eficiente para o aquecimento das águas quentes sanitárias que, dependendo da tipologia adotada, podem também integrar sistemas de climatização.

Estes equipamentos extraem energia térmica do ar ambiente e transferem-na para a água, oferecendo uma alternativa, muitas vezes mais económica e ecológica aos sistemas convencionais, nomeadamente caldeiras e esquentadores.

A escolha de bombas de calor têm-se tornado uma escolha cada vez mais popular, devido à sua elevada eficiência e ao facto de reduzirem as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), tornando-se soluções mais ecológicas.

Neste capítulo irão ser abordadas as diferentes tecnologias de bombas de calor, princípios de funcionamento de uma bomba de calor, legislação aplicada e também uma análise mais detalhada às bombas de calor monobloco com depósito de AQS e inércia à parte.

### 2.2.1. Princípio de funcionamento de uma bomba de calor

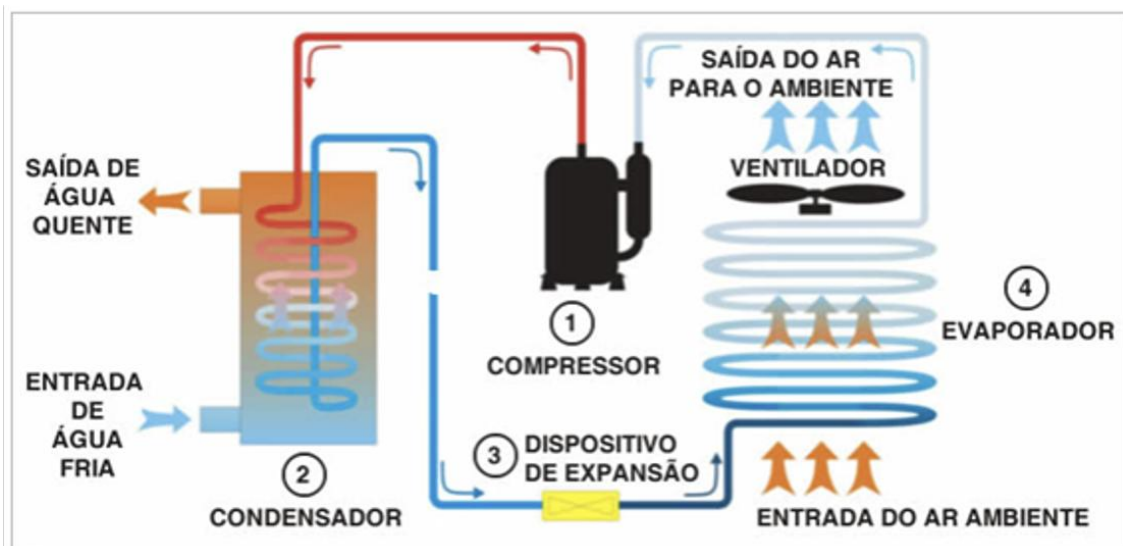


Figura 8--Princípio de funcionamento de uma bomba de calor. (Salvadori, n.d.)

Na figura 8 estão representados os principais componentes que constituem um sistema de bomba de calor: condensador, evaporador, compressor e vaso de expansão.

No evaporador, o fluido frigorígeno absorve calor do ambiente (ar) e evapora.

De seguida, no compressor, o vapor do fluido frigorígeno é comprimido, aumentando sua temperatura e pressão.

No condensador, o vapor quente e comprimido transfere o calor para a água, condensando-se novamente

No vaso de expansão, o fluido frigorígeno reduz sua pressão e temperatura, preparando-se para reiniciar o ciclo.

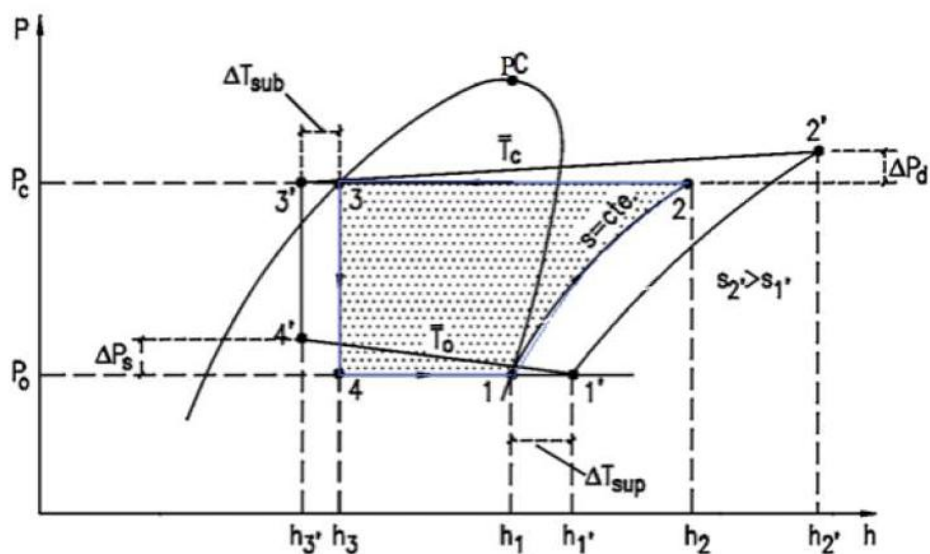


Figura 9-Diagrama p-h de um ciclo de compressão real

O gráfico da figura 9, representa um ciclo de compressão ideal (1-2-3-4) e um real (1'-2'-3'-4').

A análise deste gráfico será importante, uma vez que através dos valores de 2' e 3', conseguimos perceber o calor libertado pelo condensador e que será transferido para a água.

4'-1' -> Evaporação (real)

1'-2' -> Compressão (real)

2'-3' -> Condensação

3'-4' -> Expansão

Inicialmente, o fluido entra no compressor como vapor superaquecido, sendo submetido a uma compressão até uma pressão mais elevada. Em condições ideais, esta compressão seria isentrópica ( $1 \rightarrow 2$ ), mantendo a entropia constante ( $s_1 = s_2$ ). No entanto, em situações reais ( $1 \rightarrow 2'$ ), há um aumento de entropia devido às irreversibilidades do sistema, como o atrito mecânico e dissipações internas, o que leva a um maior consumo e aumento da entalpia final ( $h_2' > h_2$ ).

Após a etapa de compressão, o fluido entra no condensador, onde ocorre a condensação ( $2 \rightarrow 3$ ) a pressão constante. Durante esta fase, o vapor de alta pressão liberta calor e passa para o estado líquido saturado. Segue-se uma etapa de subarrefecimento ( $3 \rightarrow 3'$ ), onde o fluido frigorígeno é arrefecido abaixo da sua temperatura de saturação, também a pressão constante, com o objetivo de prevenir a formação de vapor antes da válvula de expansão.

Na etapa seguinte ( $3 \rightarrow 4$ ) ou ( $3' \rightarrow 4'$ ), o fluido sofre uma expansão isentálpica na válvula de expansão, resultando numa diminuição da pressão, sem variação de entalpia ( $h_3 = h_4$ ) ou ( $h_3' = h_4'$ ). Este processo converte parte do líquido em vapor, criando uma mistura bifásica. A mistura resultante entra no evaporador, onde ocorre a evaporação ( $4 \rightarrow 1$ ) ou ( $4' \rightarrow 1'$ ). Durante este processo, o fluido absorve calor da fonte fria, evaporando a uma pressão constante e passando para vapor saturado ou ligeiramente superaquecido.

## 2.2.2. Tipologias de bombas de calor

Existem diversas tecnologias de bombas de calor, tanto para aquecimento de águas quentes sanitárias como para climatização. Irão ser abordadas as tecnologias de bombas de calor monobloco e bombas de calor *split*.

### 2.2.2.1. Bombas de calor *Split*

Uma bomba de calor *split* é caracterizada por ter uma unidade exterior e uma unidade interior.

A unidade exterior é constituída pelos equipamentos mais ruidosos nomeadamente compressor, ventilador.

A unidade interior é composta pelo módulo hidráulico (nomeadamente bomba circuladora), pelo condensador e pelo sistema de controlo.

Dentre as soluções *split* existem ainda duas variantes: unidade interior já com depósito integrado ou a utilização de um depósito de AQS em separado. (O Instalador, 2024)

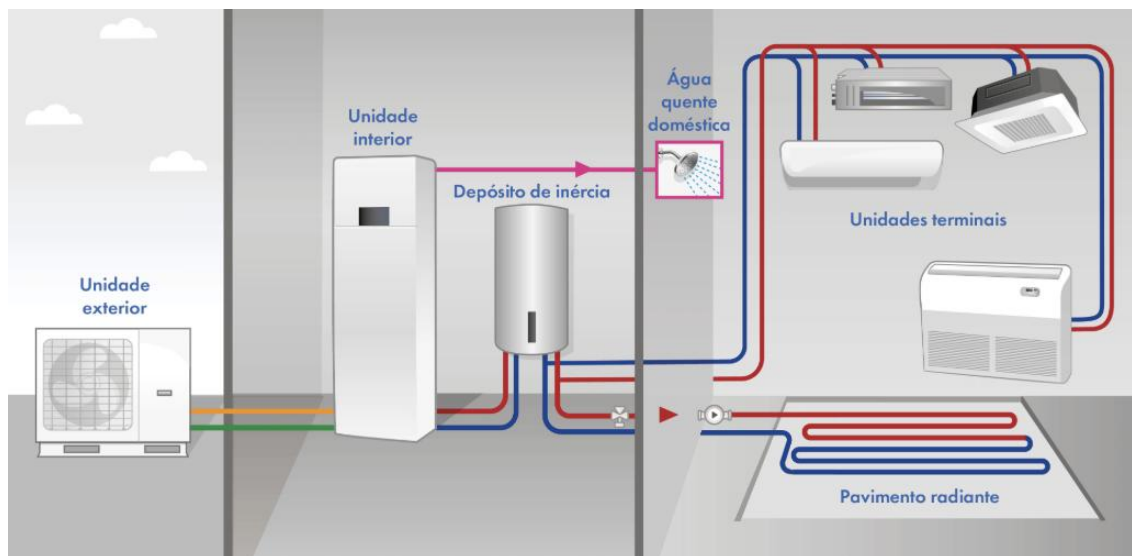


Figura 10-Esquema de princípio bomba de calor split com depósito integrado. Fonte (France Air Portugal, n.d.)

Na figura 10 está representado um sistema de bomba de calor *split* com a unidade interior equipada com depósito de AQS e um depósito de inércia para a climatização.

Também é possível observar alguns elementos terminais utilizados para climatização: radiadores, ventiloconvectores, piso radiante e para AQS o chuveiro de duche.

O depósito de inércia é um reservatório de água usado em sistemas de climatização cuja função é armazenar energia térmica (calor ou frio).

O depósito armazena a água já aquecida ou arrefecida por uma fonte de energia (como uma bomba de calor, caldeira, etc), antes de ser fornecida aos elementos terminais do sistema de climatização (radiadores, ventiloconvectores, piso radiante, etc.).

Os objetivos desta acumulação de água são diversos, nomeadamente:

- Estabilização do funcionamento do sistema, evitando ciclos curtos da bomba de calor,
- Compatibilização de caudais, garantindo o caudal mínimo requerido por muitas bombas de calor, e os caudais exigidos pelos elementos terminais de climatização.

De salientar que os depósitos de inércia funcionam em circuito fechado, ou seja, não é abastecido por água da rede durante o seu período de operação.

Por outro lado, um depósito de acumulação de água para AQS é um reservatório térmico que serve para armazenar água aquecida, destinada ao consumo doméstico (banhos, lavagens, cozinhas, etc.).

A água é previamente aquecida pela unidade de produção térmica (bomba de calor, caldeira, energia solar, etc.) e armazenada no depósito, disponível para ser utilizada a qualquer instante pelo utilizador final.

A água fria da rede entra no depósito, é-lhe transferido calor através da serpentina que liga à unidade de produção térmica, elevando a sua temperatura. Quando um elemento terminal é utilizado (chuveiro, torneira, etc.) a água quente é fornecida através do depósito, que é cheio novamente pela água da rede.

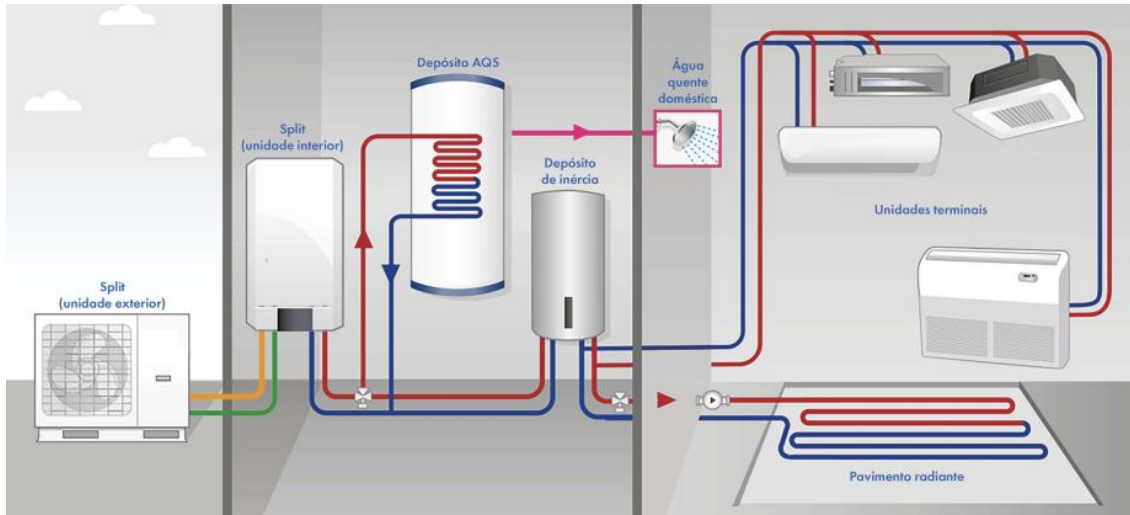


Figura 11-Esquema de princípio de uma bomba de calor split sem depósito integrado. Fonte (France Air Portugal, n.d.)

A figura 11, representa um esquema de princípio de uma instalação de uma bomba de calor *split* com o depósito de AQS e depósito de inércia externos.

Também é possível observar alguns elementos terminais utilizados para climatização: radiadores, ventiloconvectores, piso radiante e para AQS o chuveiro de duche.

### 2.2.2.1. Bombas de calor monobloco

Ao contrário das bombas de calor *split*, a monobloco caracterizam-se por todos os equipamentos estarem incorporados na unidade.

As bombas de calor monobloco são caracterizadas pela unidade exterior monobloco mais um depósito de acumulação de AQS e um depósito de inércia em separado.

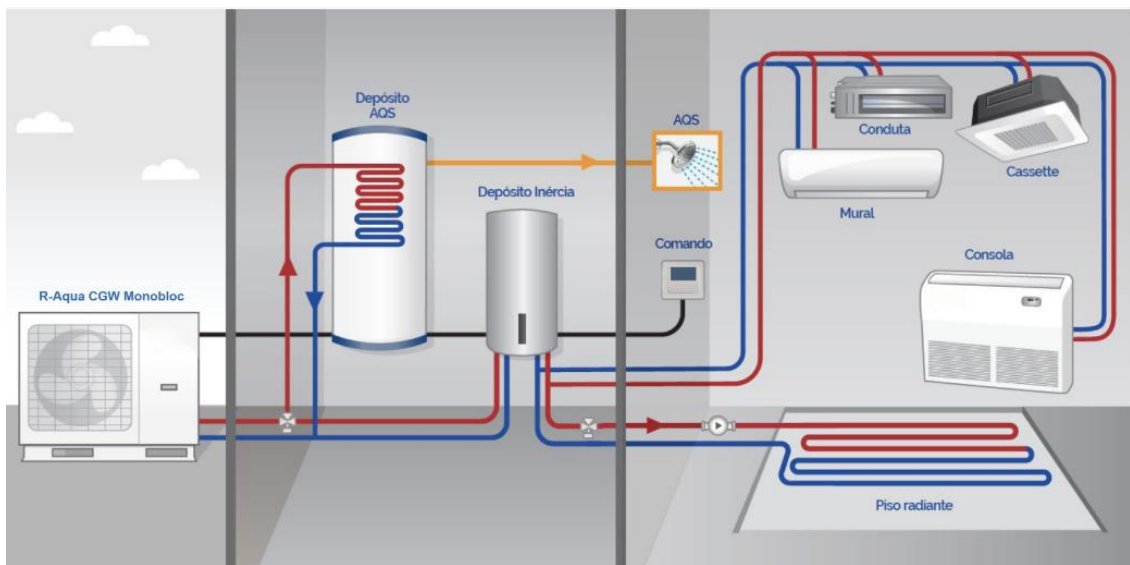


Figura 12-Esquema de princípio de uma bomba de calor monobloco sem depósito integrado. Fonte(Kandlikar, n.d.)

A figura 12, representa um esquema de princípio de uma instalação de uma bomba de calor monobloco com o depósito de AQS e depósito de inércia externos. Também é possível observar alguns elementos terminais utilizados para climatização: radiadores, ventiloconvectores, piso radiante e para AQS o chuveiro de duche.

### 2.2.3. Comparação solução bomba de calor monobloco e *split*

A seleção de uma solução de bomba de calor para aquecimento ambiente e produção de água quente sanitária deve considerar múltiplos parâmetros técnicos, incluindo eficiência energética, facilidade de instalação, segurança, adaptabilidade ao edifício e condições climáticas. Neste contexto, comparam-se duas configurações correntes: (1) bomba de calor monobloco exterior, combinada com depósito de AQS e depósito de inércia, e (2) bomba de calor split, composta por unidade exterior e unidade interior interligadas por circuito frigorígeno.

A solução monobloco caracteriza-se pela concentração de todo o circuito frigorígeno e os componentes ativos (compressor, permutador de calor, válvulas de expansão, ventilador) numa única unidade instalada no exterior. A transferência térmica é realizada por meio de um circuito hidráulico que liga a unidade exterior ao interior do edifício, onde se encontram os depósitos de inércia e o depósito de AQS.

Esta configuração apresenta vantagens significativas do ponto de vista da instalação e segurança. Por não existirem ligações frigorígenas no interior do edifício, elimina-se o risco de fuga de refrigerante em espaços habitados, para além de que a manutenção torna-se mais simples e segura. Para além disso, o nível de ruído no interior da habitação é diminuto, uma vez que todos os elementos ruidosos se encontram no exterior.

Contudo, esta solução implica algumas limitações, especialmente em regiões com temperaturas exteriores negativas. A circulação de água nas tubagens exteriores expõe o sistema a riscos de congelamento, exigindo medidas adicionais como o isolamento térmico. Para além disso, uma vez que a instalação exige espaço exterior suficiente e acessível para a unidade monobloco, bem como espaço interior para acomodar os dois depósitos, o que pode ser um fator limitativo em instalações com restrições de espaço.

A unidade exterior é constituída pelos equipamentos mais ruidosos nomeadamente compressor, ventilador.

A unidade interior é composta pelo módulo hidráulico (nomeadamente bomba circuladora), pelo condensador e pelo sistema de controlo.

Por outro lado, a solução *split* contempla nomeadamente o compressor e o ventilador na unidade exterior e o módulo hidráulico e permutador de calor hidráulico na unidade interior. A transferência de energia térmica entre as duas unidades é realizada por fluido frigorígeno.

A principal vantagem desta configuração reside no facto de, por circular apenas fluido frigorígeno no exterior e água no interior, esta solução é mais robusta em climas frios, eliminando o risco de congelamento nos circuitos exteriores.

Por outro lado, existe o risco de fugas de fluido frigorígeno, que, além de comprometerem o desempenho do sistema, têm elevado impacto ambiental. Do ponto de vista acústico, a presença de componentes ativos (como a bomba de circulação) no interior pode introduzir níveis de ruído no interior da habitação, sendo este outro aspeto negativo da solução *split*.

Outro fator de elevada relevância, é o facto de ainda não existirem soluções de bombas de calor *split*, que utilizem fluidos frigorígenos com GWP inferior a 150 (nomeadamente R290), enquanto este fluido tem sido introduzido nas soluções monobloco, tornando esta soluções ecologicamente mais apelativa.

#### **2.2.4. Fluidos frigorígenos**

A escolha do fluido frigorígeno é de elevada importância e depende de diversos fatores tais como: estabilidade química, custo, segurança (toxicidade e inflamabilidade), desempenho energético (o calor específico e/ou calor latente de evaporação e condensação influencia diretamente a capacidade de absorção e rejeição de calor do fluido, o que conseqüentemente afeta a eficiência do ciclo), pegada de carbono, etc.

Neste subcapítulo irão ser estudados os diferentes fluidos, os mais utilizados em sistemas de bomba de calor, assim como os fluidos com maior impacto ambiental e legislação aplicada aos fluidos frigorígenos.

#### 2.2.4.1. Tipos de fluidos

Os fluidos frigorigénios podem ser divididos em:

- Clorofluorcarbonetos (CFC) - consistem na combinação de derivados voláteis do metano e do etano como o cloro e o flúor. Contêm cloro, flúor e carbono.
- Hidroclorofluorcarbonetos (HCFC) - moléculas compostas por carbono, cloro, flúor e hidrogénio.
- Hidrofluorcarbonetos (HFC) - são moléculas compostas por carbono, flúor e hidrogénio, sendo o grupo de gases fluorados mais comum.
- Halocarbonetos totalmente fluorados (PFC) - moléculas compostas por carbono e flúor.
- Hidrocarbonetos (HC)- contêm apenas hidrogénio e carbono.
- Fluidos puros (SÉRIE 1, 2 e 3) - São espécies de matéria formada por moléculas quimicamente iguais. Exemplo: R-22
- Misturas (Séries 4 e 5) - São espécies de matéria formada por moléculas quimicamente diferentes. O frigorigénio é constituído por, no mínimo, duas substâncias. Exemplo: R-410A
- Substâncias orgânicas - Substâncias de origem vegetal ou animal. Exemplo: Butano (R600)
- Substâncias inorgânicas - Têm origens em minerais. Exemplo: NH<sub>3</sub> (Amoníaco) e CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono).

#### 2.2.4.2. Legislação e fluidos mais utilizados em sistemas de bomba de calor

Dentre os fluidos mencionados anteriormente, os hidroclorofluorcarbonetos (HFC) são dos mais utilizados em sistemas de bombas de calor.

No entanto, e com a entrada em vigor de novas normas da União Europeia, nomeadamente a UE2024/573, que entre outros, visa reduzir o consumo destes fluidos com vista à descarbonização, estes gases serão cada vez menos utilizados dando espaço a fluidos com menor *GWP*, (OJ\_L\_202400573\_PT\_TXT, n.d.).

Nesta estratégia de redução da utilização de gases com efeito de estufa, os fluidos frigorigénios naturais designadamente o propano (R290), o dióxido de carbono (R-744) e o amoníaco (NH<sub>3</sub>), têm desempenhado um papel crucial na medida em que possuem um *GWP* baixo ou inexistente e não danificam a camada de ozono uma vez que o seu *ODP* é 0. Além disso estes fluidos naturais possuem uma elevada eficiência.

2.2.4.3. Impacto ambiental

O impacto ambiental é usualmente medido através de três indicadores: *GWP*, *ODP* e *TEWI*.

O *GWP* (*Global warming potencial*) é um indicador do dano ecológico associados aos fluidos frigorígenos, e que indica o efeito dos mesmos no aquecimento global, em comparação com o efeito do CO<sub>2</sub>. Para efeitos de avaliação/comparação, considera-se que o *GWP* do CO<sub>2</sub> é 1.

O *ODP* (*Ozone depletion potencial*) é o número que compara o impacto do frigorígeno na camada de ozono com o impacto do R11 na camada de ozono.

O *TEWI* é outra forma de avaliar o aquecimento global: combina a contribuição direta das emissões de frigorígeno para a atmosfera com a contribuição indireta de CO<sub>2</sub>.

Equação 1

$$TEWI = GWP \times L \times n + (GWP \times m \times (1 - \alpha_{recuperado})) + n \times E_{anual} \quad (1)$$

O indicador *TEWI* é expresso em kg (CO<sub>2</sub>)

$GWP \times L \times n$  → impacto das perdas por fugas durante a vida do equipamento

$GWP \times m \times (1 - \alpha_{recuperado})$  → impacto causado por perdas de recuperação

$n \times E_{anual} \times \beta$  → impacto do consumo de energia

| EQUIPAMENTOS DE AR CONDICIONADO FIXOS E BOMBAS DE CALOR FIXAS                                |   |
|--|---|
|  | a) Se ligarem a equipamentos de ar condicionado residenciais recarregáveis que os utilizadores finais podem deslocar de um compartimento para outro e que contêm HFC com PAG igual ou superior a 140; 1 de janeiro de 2020  |
|  | b) Se ligarem a equipamentos de ar condicionado residenciais, a equipamentos de ar condicionado monobloco, a outros equipamentos de ar condicionado autónomos e bombas de calor autónomas, com uma capacidade nominal máxima igual ou inferior a 12 kW, que contenham gases fluídos com efeito de estufa com um PAG igual ou superior a 150, exceto se necessário para cumprir requisitos de segurança. Se os requisitos de segurança no local da operação não permitirem a utilização de gases fluídos com efeito de estufa com PAG inferior a 150, o limite de PAG é de 750; 1 de janeiro de 2027 |
| (8) Equipamentos de ar condicionado e bombas de calor autónomos, exceto refrigeradores, que: |   |
|  | c) Se ligarem a equipamentos de ar condicionado residenciais, a equipamentos de ar condicionado monobloco, a outros equipamentos de ar condicionado autónomos e bombas de calor autónomas, com uma potência nominal máxima igual ou inferior a 12 kW, que contenham gases fluídos com efeito de estufa, exceto se necessário para cumprir requisitos de segurança. Se os requisitos de segurança no local da operação não permitirem a utilização de alternativas aos gases fluídos com efeito de estufa, o limite de PAG é de 750; 1 de janeiro de 2032  |
|  | d) Equipamentos de ar condicionado monobloco e outros equipamentos de ar condicionado e bombas de calor autónomas, com uma capacidade nominal máxima superior a 12 kW mas não superior a 50 kW, que contenham gases fluídos com efeito de estufa com um PAG igual ou superior a 150, exceto se necessário para cumprir requisitos de segurança. Se os requisitos de segurança no local da operação não permitirem a utilização de gases fluídos com efeito de estufa com PAG inferior a 150, o limite de PAG é de 750; 1 de janeiro de 2027   |
|  | e) Outros equipamentos de ar condicionado e bombas de calor autónomas que contenham gases fluídos com efeito de estufa com um PAG igual ou superior a 150, exceto se necessário para cumprir requisitos de segurança. Se os requisitos de segurança no local da operação não permitirem a utilização de gases fluídos com efeito de estufa com PAG inferior a 150, o limite de PAG é de 750 no local da operação. 1 de janeiro de 2030  |

ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj>

55/67

PT

JO L de 20.2.2024

| Produtos e equipamentos   | Data de proibição    |
|---|----------------------|
| a) Sistemas em dois componentes que contenham menos de 3 kg de gases fluídos com efeito de estufa enumerados no anexo I, que contenham, ou cujo funcionamento dependa de gases fluídos com efeito de estufa enumerados no anexo I com PAG igual ou superior a 750;                              | 1 de janeiro de 2025 |
| b) Sistemas ar-água em dois componentes com uma potência nominal igual ou inferior a 12 kW que contenham, ou cujo funcionamento dependa de, gases fluídos com efeito de estufa com PAG igual ou superior a 150, exceto se necessário para cumprir requisitos de segurança no local da operação; | 1 de janeiro de 2027 |
| (9) Equipamentos de ar condicionado e bombas de calor em dois componentes (1):  |                      |
| c) Sistemas ar-ar em dois componentes com uma potência nominal igual ou inferior a 12 kW que contenham, ou cujo funcionamento dependa de, gases fluídos com efeito de estufa com PAG igual ou superior a 150, exceto se necessário para cumprir requisitos de segurança no local da operação;   | 1 de janeiro de 2029 |
| d) Sistemas com componentes separados com uma potência nominal igual ou inferior a 12 kW que contenham, ou cujo funcionamento dependa de, gases fluídos com efeito de estufa, exceto se necessário para cumprir requisitos de segurança no local da operação;                                   | 1 de janeiro de 2035 |
| e) Sistemas com componentes separados com uma no-   |                      |

Figura 13-Excertos legislação F-GAS FONTE (COMISSÃO EUROPEIA, 2025)

A figura 13 representa excertos da legislação *F-GAS* da União Europeia, nomeadamente o anexo 4, com referências ao artigo 11 n.º1, e onde estão mencionadas algumas das proibições a entrar em vigor no espaço da União Europeia.

De enaltecer os pontos 7 alínea b), onde é referida a proibição de bombas de calor autónomas (monobloco) em utilizações residenciais, com potências iguais ou inferiores a 12 kW e com PAG (*GWP*) superior a 150, a partir de 1 de Janeiro de 2027. Nesta alínea também é mencionado que, se por requisitos de segurança no local da operação, não for possível instalar uma unidade que utilize um fluido frigorígeno com PAG inferior a 150, este valor poderá ser de até 750.

No ponto 9 alínea b), é descrito que será proibida a comercialização de bombas de calor de 2 componentes (*split*), que utilizem fluidos frigorígenos com PAG superior a 150, com a exceção se necessário para cumprir requisitos de segurança no local da operação, (COMISSÃO EUROPEIA, 2025).

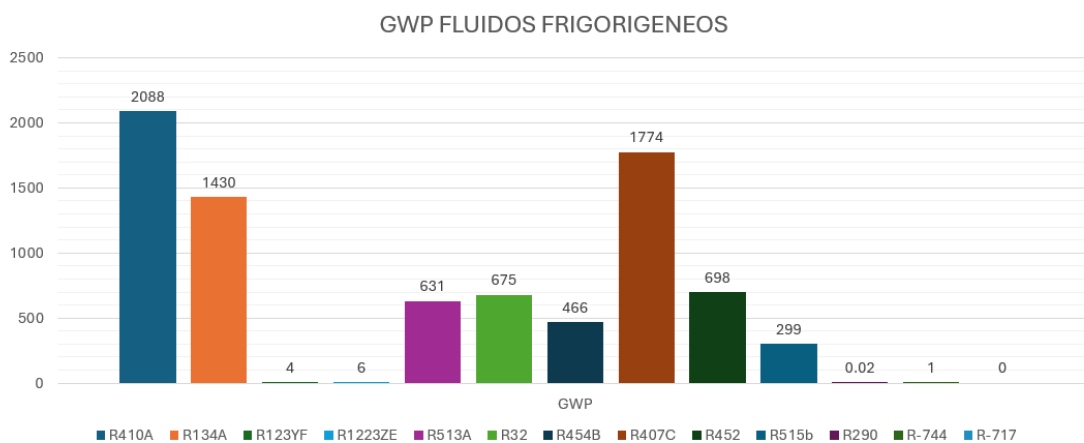


Figura 14-Fluidos frigorígenos e respetivos GWP

Na figura 14 estão representados alguns fluidos frigorígenos e o respetivo *GWP*, sendo possível observar que fluidos como R410A, R134A, R407C, ainda hoje utilizados em unidades de produção térmica, apresentam valores de *GWP* extremamente elevados, quando comparados com as soluções mais ecológicas, e para as quais se tem feito a transição, nomeadamente R290, R-744 e R717.

## 3. Métodos e Aplicação

Neste capítulo irão ser apresentados os cálculos realizados para o dimensionamento dos sistemas, bem como os custos associados aos mesmos.

### 3.1. Dimensionamento bomba de calor AQS + climatização

A bomba de calor será dimensionada para aquecimento de AQS e climatização.

Serão também avaliadas as soluções de sistemas de bomba de calor em conjunto com painéis solares térmicos e fotovoltaicos.

#### 3.1.1. Dimensionamento da bomba de calor para AQS

Neste subcapítulo será calculado o consumo expectável de água quente por uma família constituída por 4 pessoas.

| Subcategoria do edifício | Consumo de AQS (l/pessoa) |
|--------------------------|---------------------------|
| Unifamiliar .....        | 40                        |
| Multifamiliar .....      | 30                        |

Figura 15-Consumo diário de AQS para edifícios de habitação, conforme previsto na Norma EN 12831-3, (Portaria n.º 138-I/2021 AMBIENTE E AÇÃO CLIMÁTICA E INFRAESTRUTURAS E HABITAÇÃO-, n.d.)

A figura 15 apresenta um excerto da portaria 138-I de 1 de Julho de 2021, onde estão indicados os valores do consumo de AQS, em litros por pessoa, mediante a subcategoria do edifício (unifamiliar ou multifamiliar), remetendo estes valores para a norma EN 12831-3.

Equação 2

$$M_{AQS} = 40 \times n \times f_{eh} \text{ (litros)} \quad (2)$$

$n$  → número de ocupantes

$f_{eh}$  → Fator de eficiência hídrica, aplicável a chuveiros ou sistemas de duche com certificação e rotulagem de eficiência hídrica, de acordo com um sistema de certificação de eficiência hídrica da responsabilidade de uma entidade independente reconhecida pelo sector das instalações prediais.

Nota: No edifício de referência o fator de eficiência hídrica toma sempre o valor 1.

$$M_{AQs} = 40 \times 4 \times 1 = 160 \text{ litros}$$

Cálculo das necessidades energéticas para aquecimento de 160 litros de água desde os 15 até aos 50 °C, segundo o guia SCE:

Equação 3

$$Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (3)$$

$$Q = 160 \times 4186 \times (50 - 15)$$

$$Q = 23441600 \text{ J}$$

Para efeitos académicos, irão ser calculadas as necessidades energéticas para todos os meses, e desta forma avaliar a influência da temperatura de entrada da água da rede.

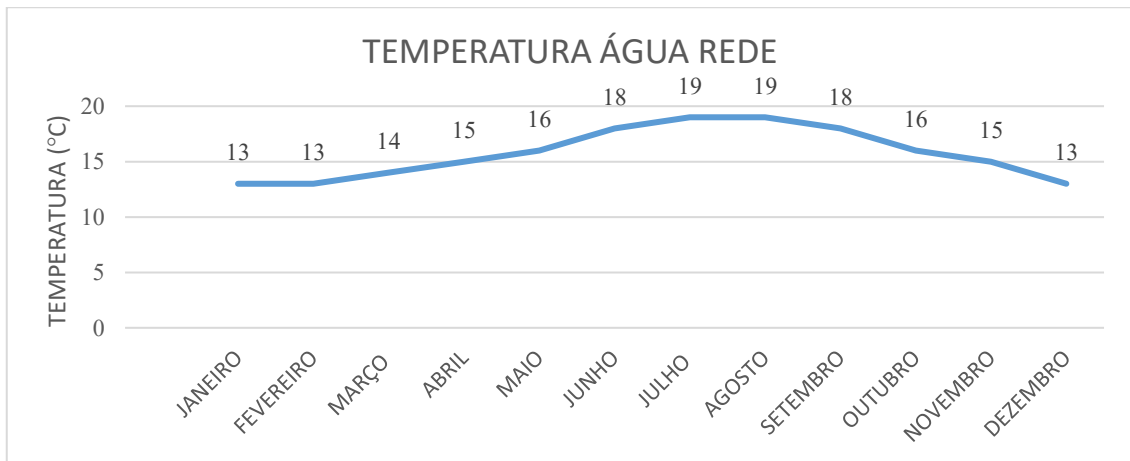


Figura 16-Temperaturas da água (°C)

No gráfico da figura 16, são apresentadas as temperaturas de entrada da água da rede, na região do Porto. (SOLTERM, n.d.)

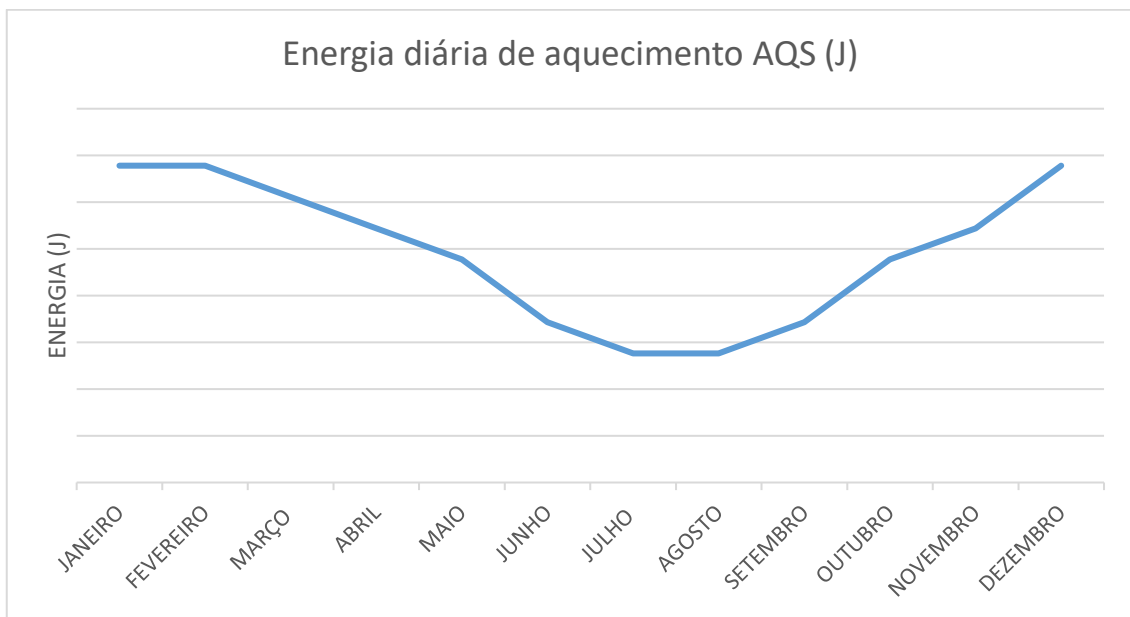


Figura 17-Necessidades diárias de aquecimento de AQS (J), APÊNDICE A

Na figura 17 estão representas as necessidades de aquecimento de AQS por dia ao longo do ano, tendo sido utilizada a equação 3 para o cálculo.

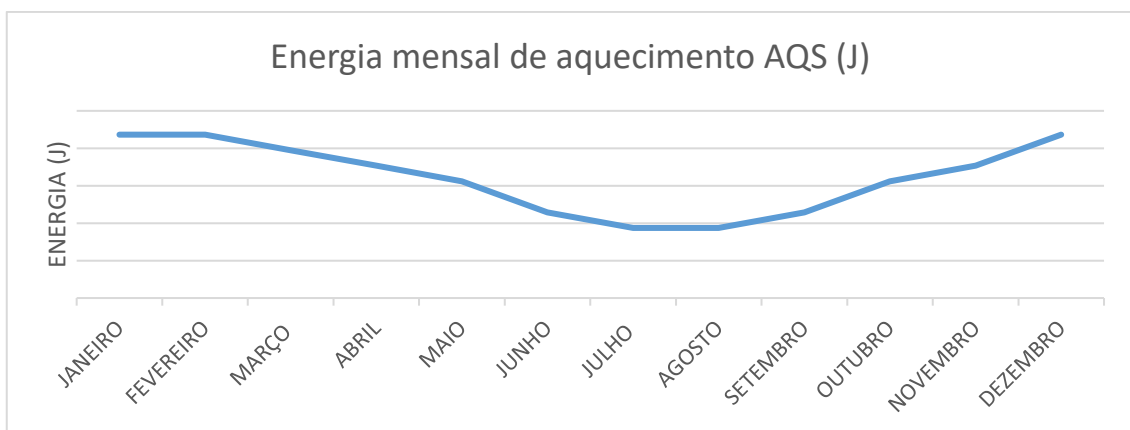


Figura 18-Energia mensal de aquecimento AQS (J), APÊNDICE B

A figura 18 demonstra a evolução das necessidades mensais de aquecimento das águas quentes sanitárias ao longo do ano.

Para o cálculo das necessidades mensais, utilizou-se a equação 4.

Equação 4

$$Q_{\text{mês}} = Q_{\text{dia}} \times 31 \quad (4)$$

## Métodos e Aplicação

Como já mencionado anteriormente foram considerados 40 litros por pessoa e por essa razão adotou-se um depósito de acumulação de AQS com 160 litros de capacidade e um tempo de recuperação de 4 horas, sendo expectável que os utilizadores consumam a grande maioria da água quente de manhã e, eventualmente ao meio-dia em situações pontuais ou até mesmo ao fim de semana.

O tempo de recuperação é o tempo necessário para a bomba de calor voltar a aquecer a água contida no depósito.

Uma vez que o tempo de recuperação é de 4 horas, a potência que a bomba de calor terá para AQS é de:

*Equação 5*

$$P = \frac{Q}{t} \quad (5)$$

P-> Potência da bomba de calor

Q-> Energia necessária aquecimento

t-> Tempo

$$P = \frac{6,51}{4} = 1,63 \text{ kW}$$

### 3.1.2. Dimensionamento da bomba de calor para climatização

Para efeitos académicos, foi considerada uma habitação com 100 metros quadrados e uma carga térmica de 100 W por metro quadrado, totalizando uma carga de 10 kW. Considerou-se ainda que durante os meses de Maio, Junho, Julho e Agosto não existem necessidades de aquecimento, e por isso a carga térmica de aquecimento é 0.

Tabela 3-Carga térmica aquecimento

| <b>AQUECIMENTO CLIMATIZAÇÃO</b> | <b>CARGA TÉRMICA (kW)</b> |
|---------------------------------|---------------------------|
| <b>JANEIRO</b>                  | 10                        |
| <b>FEVEREIRO</b>                | 10                        |
| <b>MARÇO</b>                    | 10                        |
| <b>ABRIL</b>                    | 10                        |
| <b>MAIO</b>                     | 0                         |
| <b>JUNHO</b>                    | 0                         |
| <b>JULHO</b>                    | 0                         |
| <b>AGOSTO</b>                   | 0                         |
| <b>SETEMBRO</b>                 | 10                        |
| <b>OUTUBRO</b>                  | 10                        |
| <b>NOVEMBRO</b>                 | 10                        |
| <b>DEZEMBRO</b>                 | 10                        |

Na tabela 3 estão representadas as cargas térmicas de aquecimento ao longo do ano.

Uma boa prática no dimensionamento do depósito de inércia é considerar entre 10 e 20 litros por cada kW de potência da bomba de calor. Como tal o depósito escolhido possui 140 litros de capacidade.

Ao contrário do que acontece com o depósito de AQS, não se considera tempo de recuperação no depósito de inércia, visto que as necessidades de climatização são permanentes e não pontuais.

Em resumo, a potência da bomba de calor terá de ser, no mínimo igual à soma da potência de AQS mais climatização:

$$P = 1,63 + 10 = 11,63 \text{ kW}$$

## Métodos e Aplicação

Após calculada a potência da bomba, o equipamento selecionado foi: France Air R-AQUA CHP 12

| Modelo                               |             | R-Aqua<br>CHP-006TC1 | R-Aqua<br>CHP-008TC1 | R-Aqua<br>CHP-012TC1 | R-Aqua<br>CHP-018TC1 | R-Aqua<br>CHP-012TC3 | R-Aqua<br>CHP-018TC3 |
|--------------------------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Potência de Aquecimento A7/W35-30*   | kW          | 2,92-9,10            | 4,10-12,10           | 4,30-15,20           | 7,24-21,90           | 4,30-15,20           | 7,24-21,90           |
| Potência Absorvida*                  | kW          | 0,61-2,11            | 0,79-2,85            | 0,87-3,73            | 1,50-5,88            | 0,87-3,73            | 1,50-5,88            |
| COP*                                 | -           | 4,77                 | 4,96                 | 4,62                 | 4                    | 4,62                 | 4                    |
| Potência de Aquecimento A7/W55-47*   | kW          | 2,99-8,16            | 4,05-12,15           | 4,25-14,55           | 6,36-19,45           | 4,25-14,55           | 6,36-19,45           |
| Potência Absorvida*                  | kW          | 1,03-2,92            | 1,38-4,06            | 1,45-4,28            | 2,15-6,87            | 1,45-4,28            | 2,15-6,87            |
| COP*                                 | -           | 3,06                 | 3,12                 | 3,01                 | 3,02                 | 3,01                 | 3,02                 |
| Potência de Arrefecimento A35/W18-23 | kW          | 1,85-7,41            | 4,56-10,14           | 4,56-13,03           | 5,59-22,36           | 4,56-13,03           | 5,59-22,36           |
| Potência Absorvida*                  | kW          | 0,56-2,68            | 1,44-4,80            | 1,44-4,80            | 1,69-8,04            | 1,44-4,80            | 1,69-8,04            |
| EER A35/W18-23*                      | -           | 3,16                 | 3,61                 | 3,1                  | 3,2                  | 3,1                  | 3,2                  |
| Potência de Arrefecimento A35/W7-12* | kW          | 1,38-5,7             | 3,65-8,59            | 3,65-11,04           | 4,55-17,2            | 3,65-11,04           | 4,55-17,2            |
| Potência Absorvida*                  | kW          | 0,67-2,44            | 1,12-3,31            | 1,12-3,97            | 1,85-7,31            | 1,12-3,97            | 1,85-7,31            |
| EER A35/W7-12*                       | -           | 2,67                 | 3,08                 | 2,59                 | 2,44                 | 2,59                 | 2,44                 |
| SCOP**                               | -           | 4,83                 | 4,93                 | 4,77                 | 4,81                 | 4,74                 | 4,79                 |
| SCOP***                              | -           | 3,71                 | 3,72                 | 3,77                 | 3,72                 | 3,70                 | 3,71                 |
| Classe energética                    | 35°/55°C    | A+++ / A++           |                      |                      |                      |                      |                      |
| Refrigerante (GWP)                   | -           | R290 (0,02)          |                      |                      |                      |                      |                      |
| Refrigerante                         | kg          | 0,55                 | 0,9                  | 1,4                  | 0,9                  | 1,4                  |                      |
| Alimentação eléctrica                | V / Ph / Hz | 230/1/50             |                      |                      | 400/3/50             |                      |                      |
| Potência Eléctrica Máx.              | kW          | 3,50                 | 5,40                 | 7,50                 | 5,85                 | 10,50                |                      |
| Corrente Máx.                        | A           | 15                   | 25                   | 35                   | 10                   | 17                   |                      |

Figura 19- Características técnicas da bomba de calor FONTE (Guia Online France Air Portugal, n.d.)

Na figura 19, estão representados os dados fornecidos pelo fabricante, de onde se retira que o COP da bomba de calor é de 3,01, para um regime de água de 55°C-47°C e temperatura exterior de 7°C.

É importante referir que o COP está calculado para uma temperatura de exterior de 7°C, contudo a temperatura de exterior poderá não ser essa. Como tal, em seguida será avaliado o impacto da temperatura exterior no COP da bomba de calor.

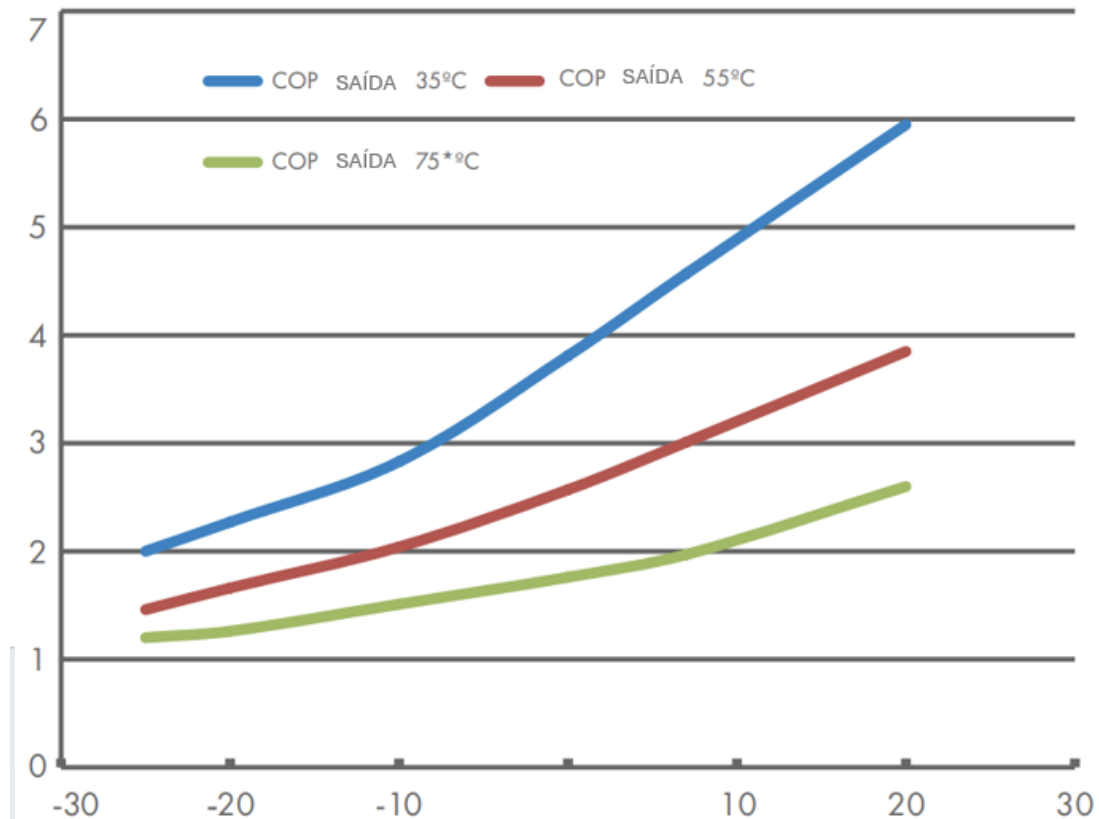


Figura 20-Gráfico COP bomba de calor para diferentes temperaturas Adaptado de (CAIROX BULGARIA, n.d.)

O gráfico da figura 20, representa as curvas com os valores do *COP* da bomba de calor R-AQUA-CHP 12TC3, para diferentes temperaturas exteriores. Apesar de ser a versão trifásica, consegue-se perceber claramente o impacto da temperatura exterior no *COP* da bomba de calor.

Pode-se constatar que à medida que a temperatura exterior desce, o *COP* da unidade diminui. Isso deve-se ao facto de quanto mais baixa a temperatura do ar exterior, mais baixa terá de ser a temperatura de evaporação do fluido frigorígeno, para que possa absorver calor do ar exterior. Como tal, a pressão de evaporação terá de ser menor, o que fará com que seja necessário o compressor realizar mais trabalho para comprimir o fluido até à pressão de condensação.

Ao analisar a fórmula do *COP*, para o mesmo calor retirado pelo evaporador ao ar exterior, quanto maior a energia consumida pelo compressor, menor o *COP*.

A partir da figura 18, onde estão apresentadas as características da bomba de calor, é possível calcular a energia que é necessário fornecer à unidade (compressor), para que esta produza a potência anteriormente calculada.

Equação 6

$$COP = \frac{Q_{evaporador}}{W_{compressor}} \quad (6)$$

$Q_{evaporador}$  → Calor extraído pelo evaporador

$W_{compressor}$  → Energia elétrica consumida pelo compressor

Tabela 4-Equipamentos sistema bomba de calor

|                                      |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| <b>BOMBA DE CALOR</b>                | FRANCE AIR CHP 12T C1 |
| <b>DEPÓSITO DE ACUMULAÇÃO DE AQS</b> | BAXI AS 160 1-E       |
| <b>DEPÓSITO DE INÉRCIA</b>           | BAXI ASA 140-IN       |

Na tabela 4 estão representados os equipamentos para o sistema bomba de calor.

### 3.2. Dimensionamento sistema bomba de calor AQS + climatização com apoio de painéis solares térmicos

No dimensionamento do sistema de painéis solares térmicos foi necessário avaliar a viabilidade da instalação de 2 ou 4 metros quadrados de painéis.

Isto porque, seguindo as boas práticas, devem ser considerados 75 litros de depósito de acumulação por cada metro quadrado de painel e, como tal, se utilizarmos 2 metros quadrados de painel, deverá ter-se um depósito de AQS com aproximadamente 150 litros de capacidade e se instalados 4 metros quadrados de painel, um depósito com aproximadamente 300 litros. (Duffie et al., 2020)

Para a realização destes cálculos, foi utilizado o software *SOLTERM*, disponibilizado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (*LNEG*), de onde foram retirados diversos dados nomeadamente energia de radiação, energia fornecida pelos painéis, etc.

### 3.2.1. Análise da viabilidade de Instalação de 2 ou 4 metros quadrados de painéis solares térmicos

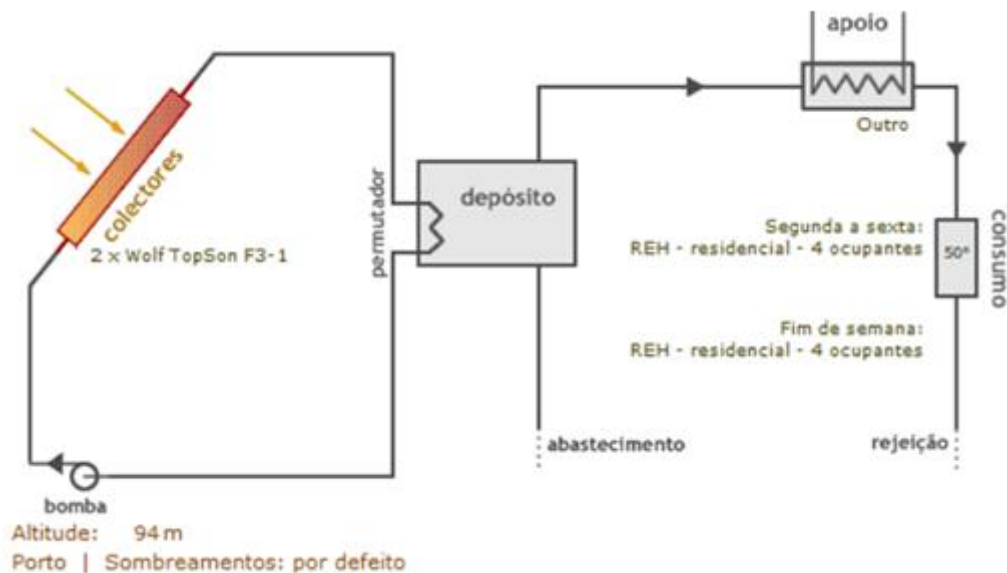


Figura 21-Esquema de instalação de 2 painéis solares térmico Adaptado de (SOLTERM, n.d.)

A figura 21 representa uma instalação de um sistema composto por uma bomba de calor, por 2 painéis solares térmicos e por um depósito de 300 litros. Como já explicado anteriormente, para cada metro quadrado de painel solar térmico, utilizou-se 75 litros para o depósito de acumulação. Uma vez que nesta instalação temos 4 metros quadrados de painéis solares térmicos, o depósito selecionado, possui uma capacidade de 300 litros.

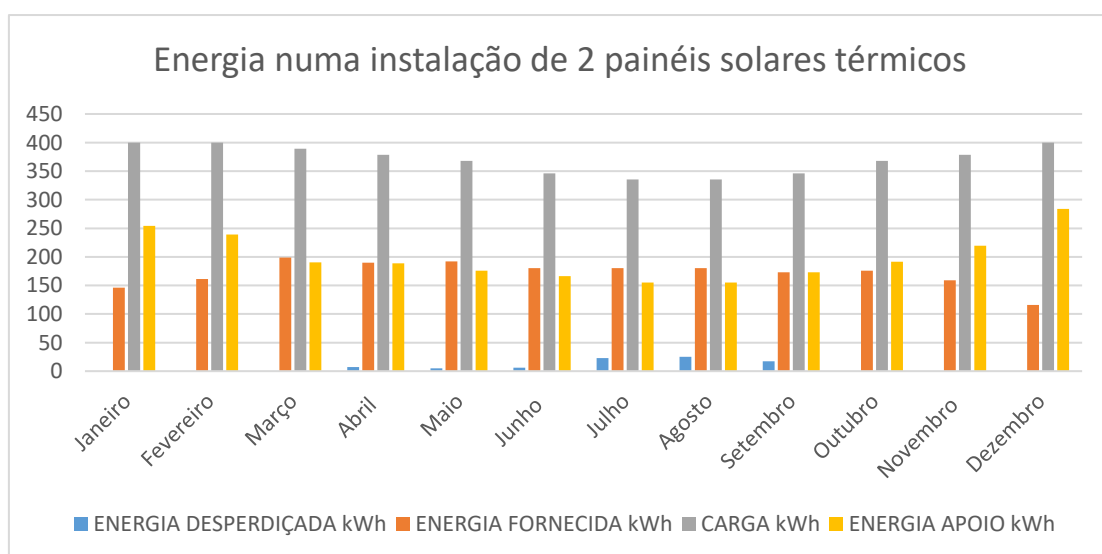


Figura 22-Energia numa instalação de 2 painéis solares térmicos (kWh), APÊNDICE C

O gráfico da figura 22 representa a energia desperdiçada pelos painéis, que é a energia acumulada em excesso, a energia fornecida pelos painéis, a energia necessária para aquecer 300 litros de água (carga) e a energia que o sistema de apoio necessita fornecer (nesta situação a bomba de calor), ao longo dos 12 meses do ano.

Após uma análise mais detalhada podemos constatar que, durante o ano, a energia fornecida pelos painéis solares é de 2052 kWh, o que representa 46,17 % da energia necessária para aquecer os 300 litros, que é de 4444,49 kWh e a energia dissipada é de 83 kWh.

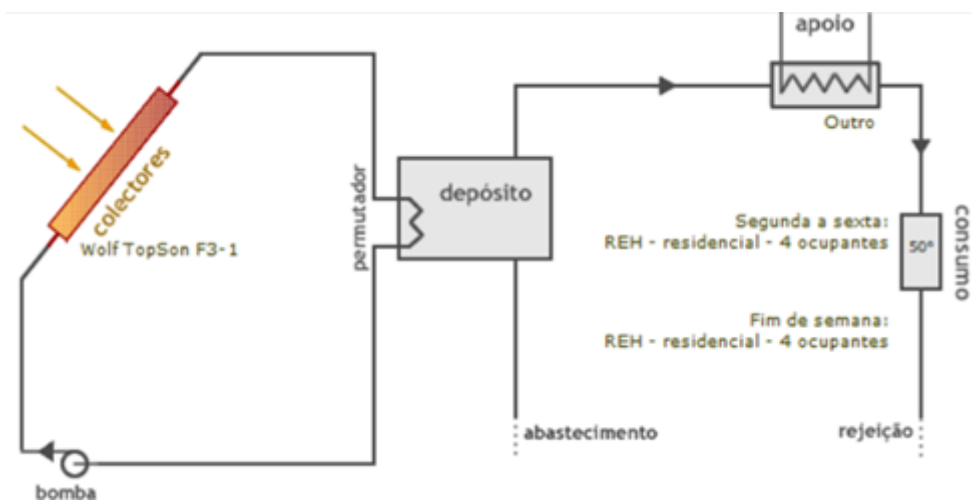


Figura 23-Esquema de instalação de 2 painéis solares térmicos Adaptado de (SOLTERM, n.d.)

A figura 23 representa uma instalação de um sistema composto por uma bomba de calor, por 1 painel solar térmico e por um depósito de 200 litros.

Como já explicado anteriormente, para cada metro quadrado de painel solar térmico, utilizou-se 75 litros para o depósito de acumulação. Uma vez que nesta instalação temos 2 metros quadrados de painel solar térmico, o depósito selecionado, deveria possuir uma capacidade de 150 litros. No entanto, uma vez que no mercado se encontra com maior facilidade depósitos de dupla serpentina com 200 litros, este foi o volume do depósito escolhido.

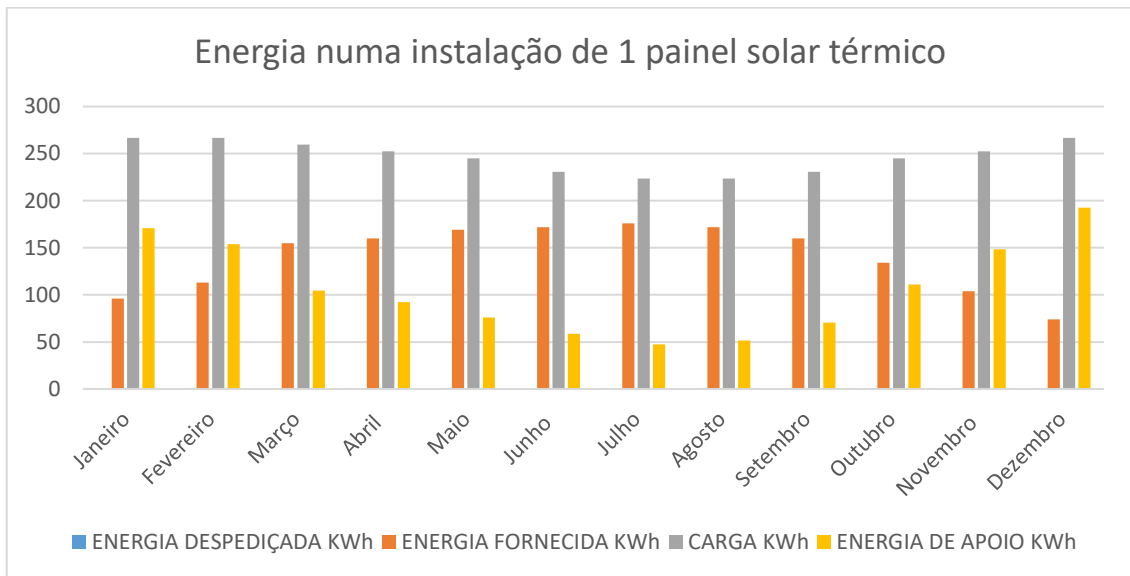


Figura 24-Energia numa instalação de 1 painel solar térmico (kWh), APÊNDICE D

O gráfico da figura 24 representa a energia desperdiçada pelos painéis, que é a energia acumulada em excesso (kWh), a energia fornecida pelos painéis, a energia necessária para aquecer 200 litros de água (carga) e a energia que o sistema de apoio necessita fornecer (nesta situação a bomba de calor) ao longo dos 12 meses do ano.

Após uma análise mais detalhada podemos constatar que, durante o ano, a energia fornecida pelos painéis solares é de 1685 kWh, o que representa 56,87 % da energia necessária para aquecer os 200 litros, que é de 2962,99 kWh e a energia dissipada é de 0 kWh.

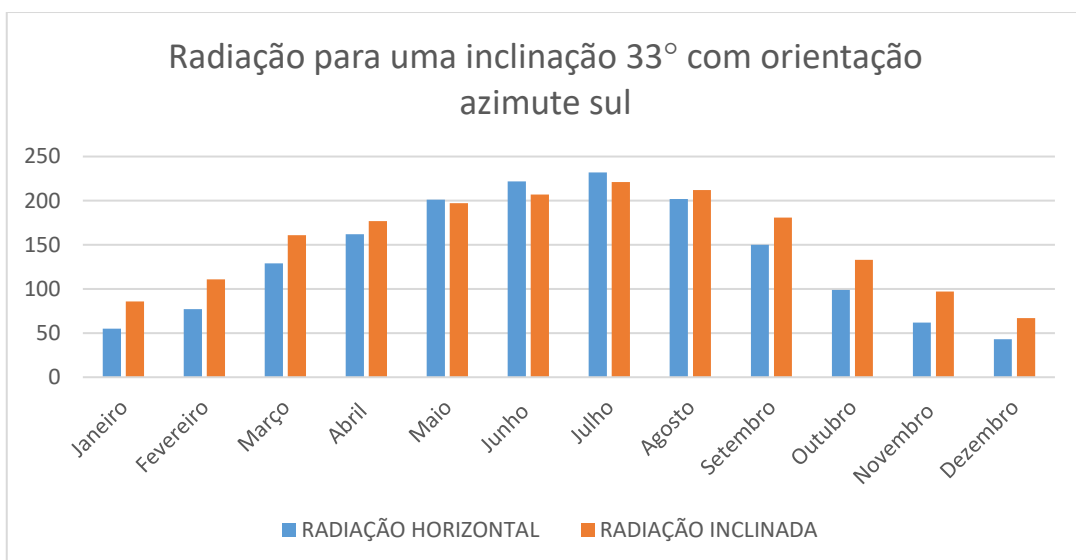


Figura 25-Dados radiação num plano inclinado a 33° com orientação ao azimute sul (kWh/m²), APÊNDICE E

Na figura 25 está representado o gráfico com os dados da radiação horizontal e inclinada por metro quadrado, para um ângulo de 33° com orientação ao azimute sul.

## Métodos e Aplicação

O ângulo de 33° foi obtido através do *software SOLTERM*, onde foi solicitada uma otimização do ângulo do coletor.

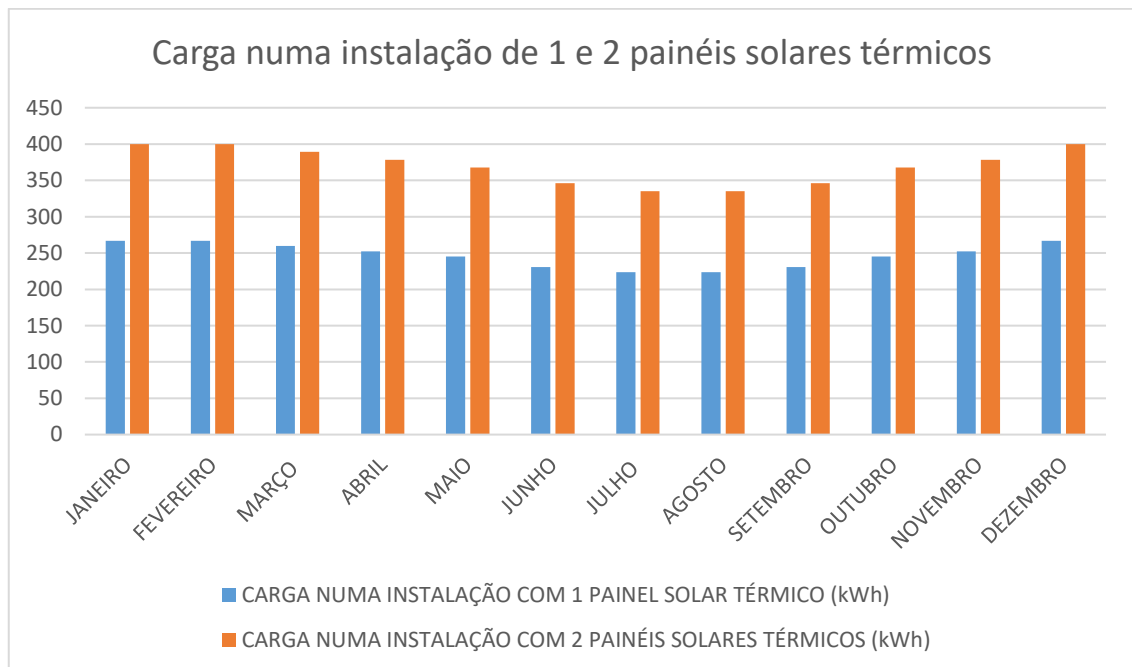


Figura 26-Carga numa instalação de 1 e 2 painéis solares térmicos (kWh), APÊNDICE F

No gráfico da figura 26, estão representadas as cargas de AQS para as 2 situações: instalação com 2 painéis solares térmicos com depósito de 300 litros e instalação com 1 painel solar térmico com depósito de 200 litros.

Pode-se concluir que carga anual numa instalação com 1 painel corresponde a aproximadamente 66,67 % da carga anual numa instalação com 2 painéis.

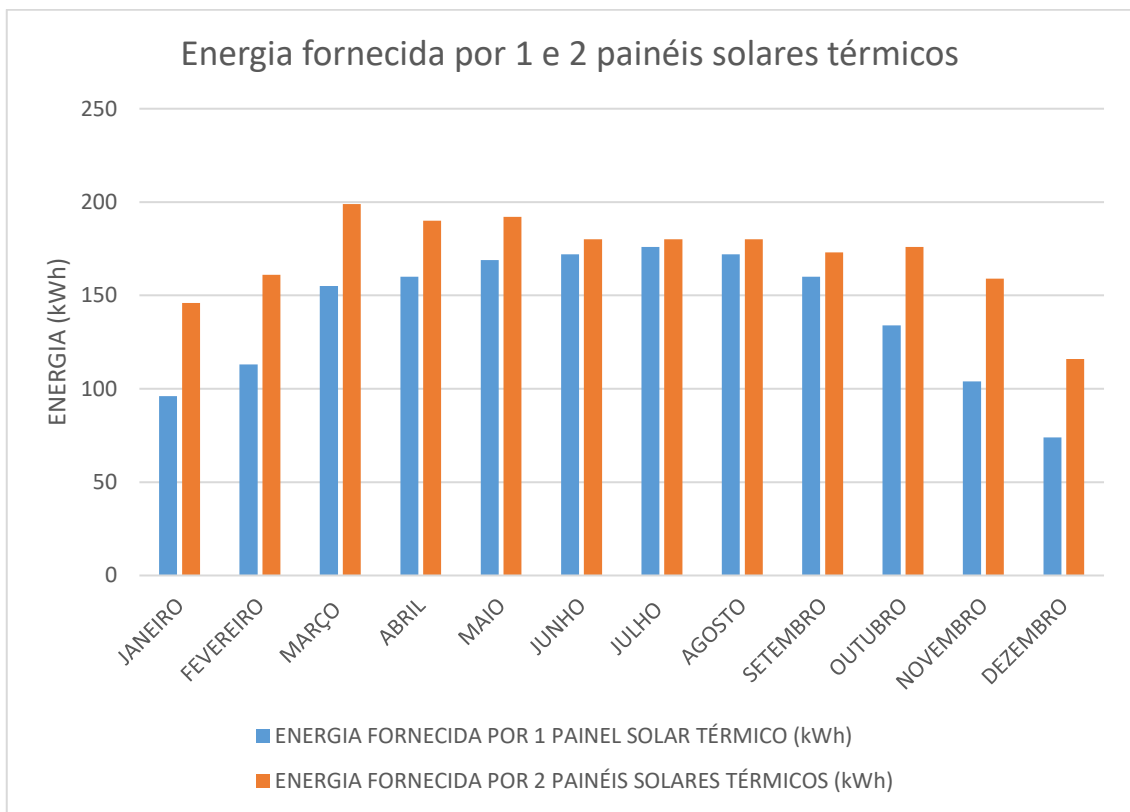


Figura 27-Energia fornecida por uma instalação de 1 e 2 painéis solares térmicos (kWh), APÊNDICE G

O gráfico da figura 27 representa a energia fornecida na instalação de 1 e 2 painéis solares térmicos.

Pode-se concluir que energia fornecida anualmente por 1 painel (1685 kWh) corresponde a 82,12 % da energia fornecida por uma instalação de 2 painéis solares térmicos (2052 kWh).

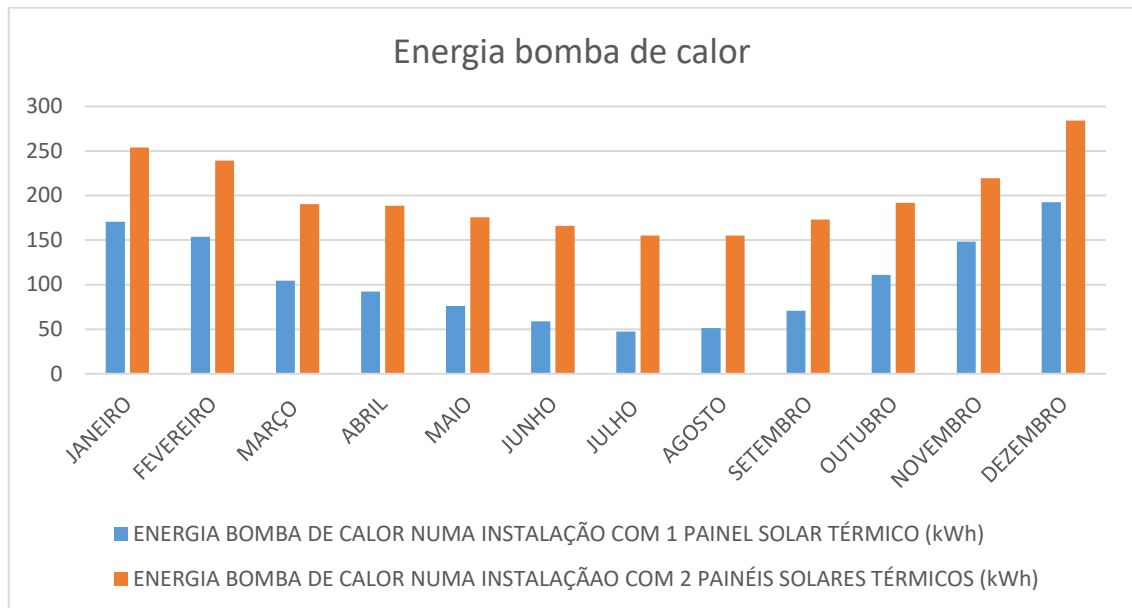


Figura 28-Energia bomba de calor numa instalação com 1 e 2 painéis solares térmicos (kWh), APÊNDICE H

O gráfico da figura 28 representa a energia que a bomba de calor tem de fornecer anualmente tanto na instalação de 1 painel como na de 2 painéis solares térmicos. Pode-se concluir que a energia da bomba de calor tem de fornecer numa instalação de 1 painel solar (1277,99 kWh) representa 53,42 % da energia que terá de fornecer numa instalação com 2 painéis solares (2392,49 kWh).

Após a análise feita anteriormente, podemos concluir que a instalação com um único painel é mais viável, visto que a energia necessária que a bomba de calor necessita fornecer para aquecer a água é menor.

Como tal, será adotada a solução de um único painel solar térmico com 2 metros quadrados.

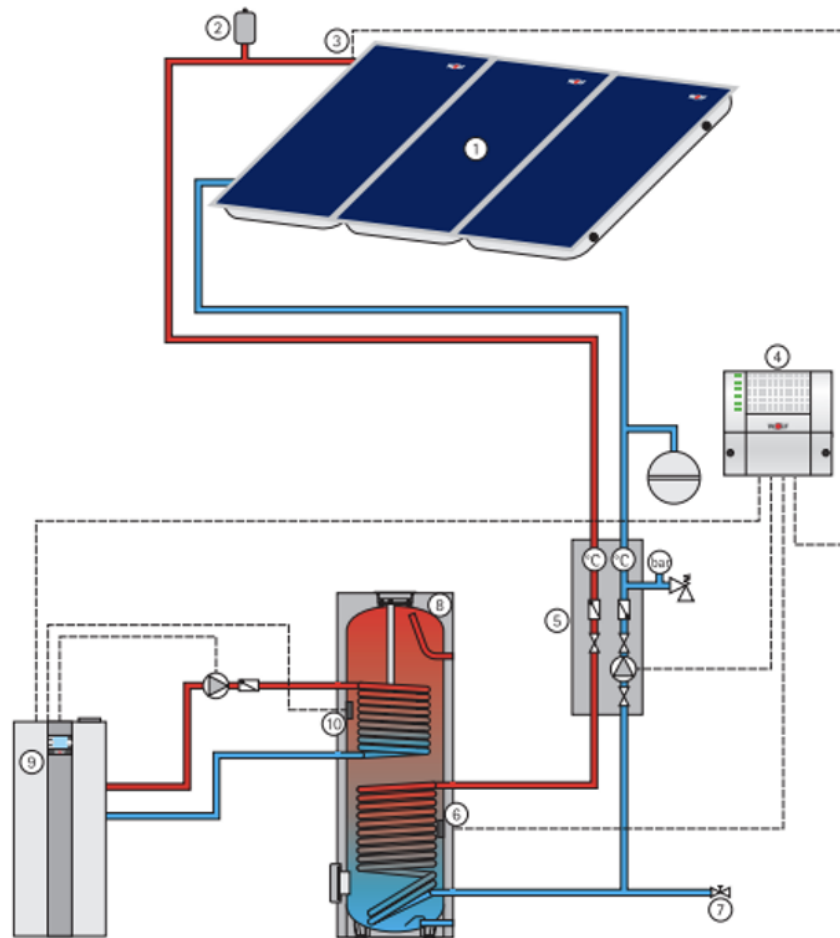


Figura 29-Instalação de um sistema de bomba de calor e painéis solares térmicos Adaptado de (WOLF, n.d.)

1 – Coletor solar térmico; 2 – Purgador de ar; 3 – Sensor de temperatura do coletor; 4 – Módulo de controlo solar; 5 – Conjunto de bomba e acessórios; 6 – Sensor temperatura sistema solar; 7 – Válvula de enchimento e drenagem; 8 – Depósito de AQS; 9 – Bomba de calor; 10 – Sensor de temperatura bomba de calor

Na figura 29 está representada uma possível instalação de um sistema de bomba de calor com painéis solares térmicos.

Em seguida serão descritas as principais funções de cada um dos equipamentos:

1- Os coletores solares são responsáveis pela captação da radiação solar e pela sua conversão em energia térmica. Esta energia aquece um fluido térmico que circula em circuito fechado e transfere calor para a água na serpentina adicional no depósito de AQS.

2- O purgador de ar é instalado na parte superior do circuito, e a sua principal função é eliminar o ar acumulado no interior das tubagens. Esta função é essencial para evitar nomeadamente, cavitação na bomba de circulação do sistema.

3- O sensor de temperatura do sistema solar mede a temperatura do fluido térmico na saída dos coletores solares. Esta informação é transmitida ao controlador solar, que compara este

## Métodos e Aplicação

valor com a temperatura da água no depósito para averiguar se é necessário ativar a bomba de circulação.

4- O módulo de controlo solar é a unidade de gestão eletrónica responsável pelo controlo do funcionamento do sistema solar.

5- Constituído por uma bomba de circulação, e acessórios hidráulicos. Este conjunto garante a circulação do fluido térmico entre os coletores e o depósito.

6- O sensor de temperatura do sistema solar mede a temperatura da água na zona correspondente ao permutador solar. Este dado é utilizado pelo controlador para avaliar se há necessidade de transferência de calor dos coletores para a água sanitária.

7- A válvula de enchimento e drenagem permite o enchimento inicial e a drenagem do circuito solar, nomeadamente durante a instalação, manutenção do sistema, etc.

8- O depósito de AQS de dupla serpentina armazena a água quente sanitária. A serpentina inferior é ligada ao circuito solar, enquanto a superior é associada ao sistema de apoio (bomba de calor).

9- A bomba de calor entra em funcionamento sempre que a energia solar não é suficiente para atingir a temperatura desejada de AQS.

10- O sensor de temperatura da bomba de calor mede a temperatura da água na zona de apoio e fornece essa informação ao controlador da bomba, permitindo-lhe atuar sempre que a energia solar for insuficiente.

*Tabela 5-Equipamentos selecionados sistema bomba de calor + painéis solares térmicos*

|                                      |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| <b>BOMBA DE CALOR</b>                | FRANCE AIR CHP 12T C1 |
| <b>DEPÓSITO DE ACUMULAÇÃO DE AQS</b> | BAXI AS 200-2E        |
| <b>DEPÓSITO DE INÉRCIA</b>           | BAXI ASA 140-IN       |
| <b>PAINEIS SOLARES TÉRMICOS</b>      | WOLF TOPSON F3-1      |

Na tabela 5 estão representados os equipamentos para o sistema bomba de calor com painéis solares térmicos.

### 3.3. Dimensionamento sistema bomba de calor AQS + climatização com apoio de painéis solares fotovoltaicos

Neste subcapítulo, irá ser analisado e dimensionado do sistema de bomba de calor mais painéis solares fotovoltaicos.

Uma vez mais, os dados da radiação foram retirados do software *SOLTERM*.

#### 3.3.1. Dimensionamento dos painéis solares fotovoltaicos

Após retirados os dados da radiação inclinada, presentes no gráfico da figura 26, é possível calcular a energia que os painéis solares fotovoltaicos produzem, sabendo a sua eficiência.

Para efeitos de cálculo da energia gerada pelo painel, foi escolhido o modelo *PHONO SOLAR MONOCRISTALINO 550 W*.

| Electrical Typical Values   |       |                |       |                |       |                |       |                |       |                |       |       |
|-----------------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|-------|
| Model                       | 1000V | PS535M6-24/TH  |       | PS540M6-24/TH  |       | PS545M6-24/TH  |       | PS550M6-24/TH  |       | PS555M6-24/TH  |       |       |
|                             | 1500V | PS535M6H-24/TH |       | PS540M6H-24/TH |       | PS545M6H-24/TH |       | PS550M6H-24/TH |       | PS555M6H-24/TH |       |       |
| Testing Condition           | STC   |                | NOCT  |                | STC   |                | NOCT  |                | STC   |                | NOCT  |       |
| Rated Power (Pmpp)          | 535   |                | 403   |                | 540   |                | 407   |                | 545   |                | 411   |       |
| Rated Current (Impp)        | 12.97 | 10.46          | 13.06 | 10.54          | 13.15 | 10.61          | 13.24 | 10.68          | 13.33 | 10.75          | 13.33 | 10.75 |
| Rated Voltage (Vmpp)        | 41.25 | 38.53          | 41.35 | 38.62          | 41.45 | 38.71          | 41.55 | 38.80          | 41.64 | 38.89          | 41.64 | 38.89 |
| Short Circuit Current (Isc) | 13.52 | 10.91          | 13.62 | 10.99          | 13.72 | 11.07          | 13.82 | 11.15          | 13.92 | 11.23          | 13.92 | 11.23 |
| Open Circuit Voltage (Voc)  | 49.29 | 46.73          | 49.39 | 46.82          | 49.49 | 46.92          | 49.59 | 47.01          | 49.69 | 47.11          | 49.69 | 47.11 |
| Module Efficiency (%)       | 20.71 |                | 20.90 |                | 21.10 |                | 21.29 |                | 21.48 |                | 21.48 |       |

STC(Standard Testing Conditions): Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, AM 1.5, Cell Temperature 25°C  
 NOCT (Nominal Operation Cell Temperature): Irradiance 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20°C, Spectra at AM1.5, Wind at 1m/s

Figura 30-Dados técnicos painel solar fotovoltaico Adaptado de (Phono, n.d.)

Através da análise da figura 30, verificamos que a eficiência do painel é de 21,48%.

Com esse dado e com os dados da radiação retirados do software *SOLTERM*, representados no gráfico da figura 26, podemos calcular a energia produzida pelo painel.

Equação 7

$$\text{Energia gerada} = \text{Área do painel} \times \text{Radiação incidente} \times \text{eficiência} \quad (7)$$

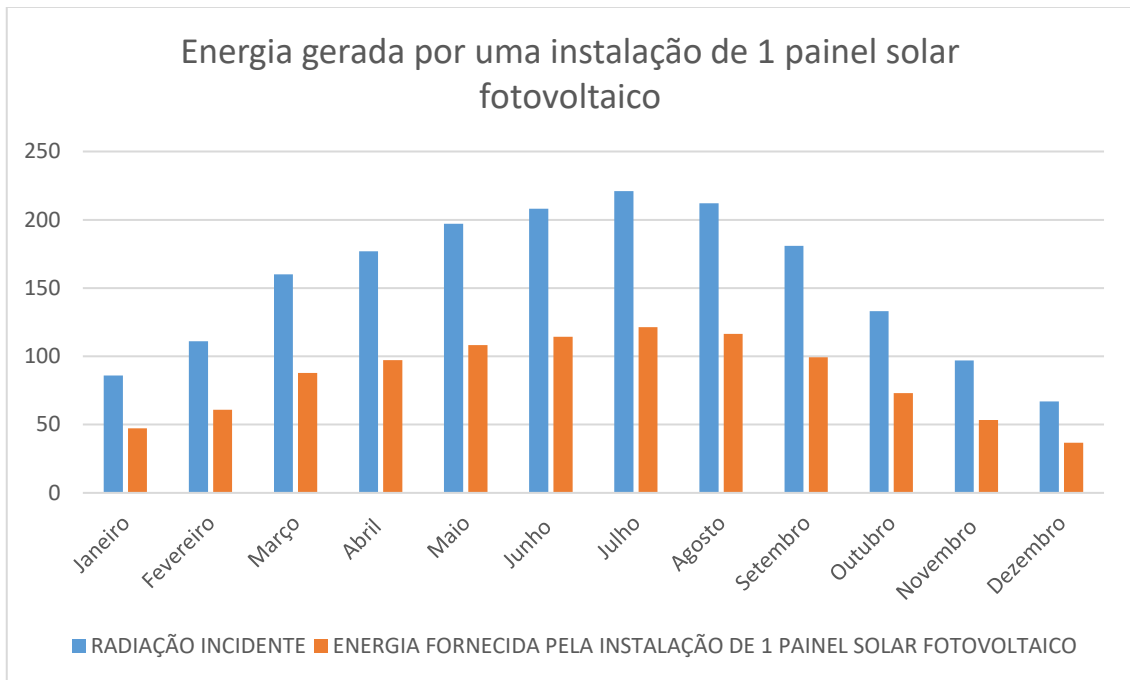


Figura 31-Energia radiação incidente (kWh/m<sup>2</sup>) e energia gerada por uma instalação de 1 painel solar fotovoltaico (kWh), APÊNDICE I

No gráfico representado na figura 31 está representada a radiação inclinada incidente e a energia fornecida pela instalação do painel solar fotovoltaico ao longo do ano, tendo esta energia sido calculada através da equação 7.

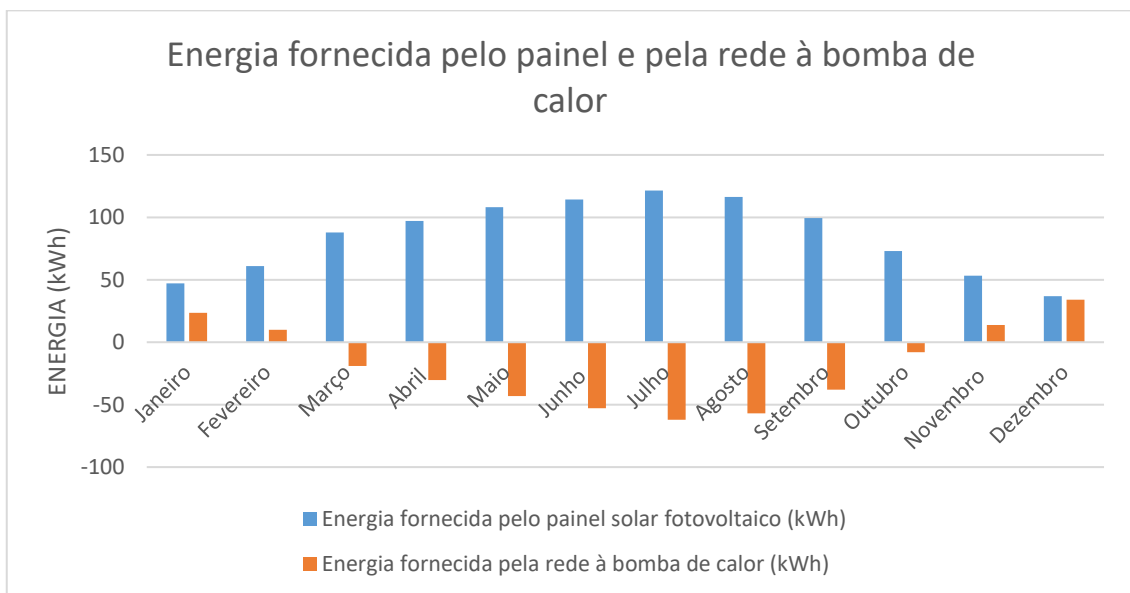


Figura 32-Energia fornecida pelo painel solar fotovoltaico e pela rede à bomba de calor (kWh), APÊNDICE J

Após uma análise ao gráfico da figura 32, podemos concluir que o painel solar é capaz de fornecer toda a energia necessária à bomba de calor tanto para aquecimento de AQS como climatização, durante os meses de Março, Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro e Outubro. Esta conclusão é suportada pelo facto de no gráfico a energia fornecida pela rede à bomba de calor ser negativa, o que significa que o painel solar fotovoltaico produz mais energia do que o que a bomba de calor necessita.

Durante os meses de Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro, a rede elétrica necessita fornecer energia, para que, em conjunto com a energia elétrica fornecida pelos painéis solares fotovoltaicos, a bomba de calor tenha energia para aquecer os 160 litros de água.

| Ficha técnica                                | NEO 600M-X (LoRa) | NEO 800M-X (LoRa)             | NEO 1000M-X (LoRa) |
|--|-------------------|-------------------------------|--------------------|
| <b>Datos de Entrada (CC)</b>                 |                   |                               |                    |
| Rango Potencia FV recomendado (módulo STC)   | 240W a 405W+      | 320W a 540W+                  | 400W a 670W+       |
| Tensión max. de entrada                      |                   | 60V                           |                    |
| Tensión de arranque                          |                   | 16V                           |                    |
| Tensión nominal                              |                   | 16-60V                        |                    |
| Rango de tensión MPP                         |                   | 28V-60V                       |                    |
| Número de MPPTs                              |                   | 2                             |                    |
| Número de string por MPPT                    |                   | 1/1                           |                    |
| Corriente de entrada max. por MPPT           |                   | 18A                           |                    |
| Corriente de cortocircuito max. por MPPT     |                   | 23A                           |                    |
| <b>Datos de Salida (CA)</b>                  |                   |                               |                    |
| Potencia nominal                             | 600W              | 800W                          | 1000W              |
| Potencia max. aparente                       | 600VA             | 800VA                         | 1000VA             |
| Tensión nominal / Rango                      |                   | 230V (180-253V)               |                    |
| Rango de tensión de salida ajustable         |                   | 170V-278V                     |                    |
| Frecuencia de red                            |                   | 50/60 Hz                      |                    |
| Rango de frecuencia de red ajustable         |                   | 45-55Hz/55-65 Hz              |                    |
| Corriente max. de salida                     | 2.61A             | 3.48A                         | 4.35A              |
| Factor de potencia                           |                   | 0,8 delante ... 0,8 retrasado |                    |
| THDI   |                   | <3%                           |                    |
| Tipo de conexión a Red                       |                   | Monofásico                    |                    |
| Unidades máximas por rama 12AWG <sup>d</sup> | 8                 | 6                             | 5                  |
| <b>Eficiencia</b>                            |                   |                               |                    |
| Max. Eficiencia                              |                   | 97.3%                         |                    |
| Eficiencia MPPT                              |                   | 99.5%                         |                    |
| Consumo nocturno                             |                   | 30mW                          |                    |
| <b>Dispositivos de Protección</b>            |                   |                               |                    |
| Protección contra polaridad inversa          |                   | Si                            |                    |
| Protección contra sobretensiones AC/DC       |                   | Clase III                     |                    |
| Protección frente a fallas a tierra          |                   | Si                            |                    |
| Protección contra cortocircuitos de CA       |                   | Si                            |                    |
| Monitorización Grid                          |                   | Si                            |                    |
| Protección frente a fallos de isla           |                   | Si                            |                    |
| Control de la resistencia de aislamiento     |                   | Si                            |                    |
| <b>Datos Generales</b>                       |                   |                               |                    |
| Dimensiones (ancho/alto/largo)               |                   | 270/252/41.5mm                |                    |
| Peso   |                   | 3.1kg                         |                    |

Figura 33-Microinversores Adaptado de (GROWATT, n.d.)

Na figura 33 estão representados 3 modelos de microinversores da marca GROWATT, e assinalado a vermelho o modelo selecionado para o projeto.

Para a instalação em questão, optou-se por um microinversor ao invés de um inversor tradicional, uma vez que se trata de uma pequena instalação com 1 painel de baixa potência.

## Métodos e Aplicação

A principal função do microinversor é converter a corrente contínua-DC, em corrente alternada-AC, para uso doméstico.

Após a análise das especificações técnicas do painel solar *PS555M6-24/TH* e dos microinversores presentes na figura 34, conclui-se que o modelo *NEO 800M-X (LoRa)* é a escolha mais adequada para ligação a um único painel.

O painel *PS555M6-24/TH* apresenta, em condições *STC (Standard Test Conditions)*, uma potência nominal de 555 W, tensão de operação ( $V_{mp}$ ) de 41,64 V e corrente nominal ( $I_{mp}$ ) de 13,33 A. Esses valores são compatíveis com os parâmetros de entrada do microinversor *NEO 800M-X*, que opera numa gama de tensões nominais de 16 a 60 V, corrente máxima por *MPPT* de 18 A e potência fotovoltaica recomendada entre 320 e 540 W. Apesar da potência do painel estar ligeiramente acima da faixa recomendada, este excedente é tolerável e não compromete a operação do sistema, considerando as condições reais de funcionamento (*NOCT*), onde a potência efetiva do painel diminui para cerca de 418 W.

O *NEO 800M-X* oferece ainda uma elevada eficiência (97,3%) e eficiência *MPPT* de 99,5%, garantindo uma conversão energética otimizada.

*MPPT* significa *Maximum Power Point Tracker*. É uma tecnologia utilizada para otimizar a produção de energia dos painéis solares, e a sua função é gerir a combinação de tensão (V) e corrente (A) de modo a maximizar a potência.

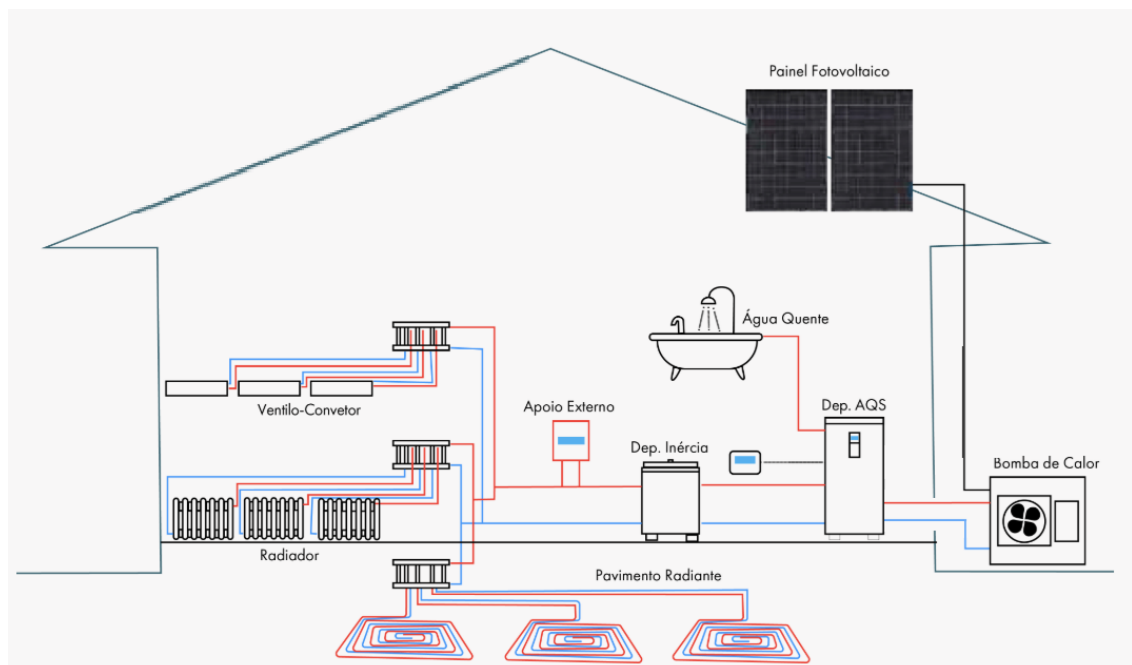


Figura 34-Instalação de um sistema de bomba de calor e painéis solares fotovoltaicos Adaptado de (Guia Online France Air Portugal, n.d.)

Na figura 34 está representada uma instalação do sistema bomba de calor, com depósito de AQS e inércia externos.

Estão também representados possíveis elementos terminais, nomeadamente piso radiante, ventilo-convectores ou até mesmo radiadores.

*Tabela 6-Equipamentos selecionados sistema bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos*

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <b>BOMBA DE CALOR</b>                | FRANCE AIR CHP 12T C1  |
| <b>DEPÓSITO DE ACUMULAÇÃO DE AQS</b> | BAXI AS 160 1-E  |
| <b>DEPÓSITO DE INÉRCIA</b>           | BAXI ASA 140-IN  |
| <b>PAINEIS SOLARES FOTOVOLTAICOS</b> | PHONO SOLAR MONOCRISTALINO 550 W +<br>MICROINVERSOR DE 800 W |

Na tabela 7 estão representados os equipamentos para o sistema bomba de calor com painéis solares fotovoltaicos.

### 3.4. Dimensionamento da caldeira de condensação

Neste subcapítulo irá ser dimensionada a caldeira de condensação e avaliadas algumas características do gás natural, que servirá de combustível à caldeira.

#### 3.4.1. Dimensionamento da caldeira

Para a solução da caldeira, foi considerado um uso simultâneo de 2 duches, visto ser uma das situações mais críticas numa habitação de 4 pessoas.

Desta forma a caldeira tem de ser capaz de produzir água quente instantânea para servir estes 2 pontos de consumo, garantindo um caudal de conforto.

O caudal considerado em cada um dos duches foi de 9 litros por minuto de água. Destes 9 litros, a caldeira tem de fornecer um determinado caudal de água quente, para que, depois de feita a mistura no elemento terminal (misturadora) com água fria, sejam atingidos os 9 litros por minuto.

Para o cálculo da potência da caldeira, considerou-se que a temperatura à saída mesma é de 50 °C e que a temperatura de conforto da água nos elementos terminais (lavatórios, duches, etc) será de 38 °C.

Como tal irá ser calculada o caudal de água quente que a caldeira terá de ser capaz de fornecer, de modo que, quando misturada com a água da rede a 15 °C, a água se encontre a 38 °C.

### EQUAÇÃO DO EQUILIBRIO TÉRMICO

*Equação 8*

$$T = \frac{V_Q \times T_Q + V_F \times T_F}{V_Q + V_F} \quad (8)$$

A temperatura desejada é de 38 °C.  
A temperatura de quente é de 50 °C  
A temperatura de frio é de 15 °C.  
V<sub>Q</sub>+V<sub>F</sub> é de 9 litros por minuto.

Utilizando a equação 8, tem-se:

$$38 = \frac{V_Q \times 50 + (9 - V_Q) \times 15}{9} \Leftrightarrow V_Q = 5,91 \text{ L/min}$$

O caudal instantâneo que a caldeira tem de ser capaz para cada duche é de aproximadamente 5,91 L/min.

Para efeitos de projeto foi considerado que 2 chuveiros estariam a ser utilizados em simultâneo, então:

$$V_{total} = 2 \times 5,91 = 11,82 \text{ L/min}$$

Utilizando as equações 3 e 5, a potência que a caldeira terá de ter para fazer o aquecimento das AQS é de:

$$Q = 11,82 \times 4,186 \times 35 = 1731,748 \text{ kJ}$$

$$Q = \frac{1731,48}{60} = 28,86 \text{ Kw}$$

Através da análise da ficha técnica da caldeira, presente na figura 34, observamos que o caudal instantâneo para AQS é dado para um  $\Delta T$  de 25 °C (desde os 15 °C até aos 40 °C).

Uma vez que o pretendido são 50 °C à saída da caldeira, irá ser calculado o novo caudal instantâneo da caldeira para um  $\Delta T$  de 35 °C (desde os 15 °C até aos 50 °C).

Equação 9

$$V_{real} = \frac{\Delta T_{referência}}{\Delta T_{real}} \times V_{referência} \quad (9)$$

$$V_{real} = \frac{25}{35} \times 20,6 = 14,71 \text{ L/min}$$

Definidas as capacidades que a caldeira deverá ter em climatização (10 kW) e AQS podemos escolher o modelo de caldeira a adotar.

Após os cálculos do caudal instantâneo e potência da caldeira, foi escolhida o modelo C6000W 25/36 da marca Bosch.



|   |                 | C6000W 25/36  |
|---|-----------------|---|
| <b>Modelo</b>                                   | <b>Unidades</b> |   |
| <b>Dados de aquecimento</b>                     |                 |   |
| Potência calorífica nominal                     | kW              | 24  |
| Pressão máx. circuito                           | bar             | 3   |
| Capacidade vaso de expansão                     | l.              | 5   |
| <b>Dados a.q.s.</b>                             |                 |   |
| Método de produção                              | -               | Microacumulação   |
| Potência calorífica nominal máx.                | kW              | 36  |
| Caudal instantâneo $\Delta T25^{\circ}\text{C}$ | -               | 20,6  |
| <b>Dados ErP</b>                                |                 |   |
| Eficiência em a.q.s.                            | %               | 85%   |
| Eficiência em aquecimento                       | %               | 94%   |
| Classificação aquecimento                       | -               |  A |
| Perfil de consumo e classificação em a.q.s.     | -               |  A |
| Eficiência em a.q.s.                            | -               | A+++→D  |
| Nível de potência sonora no interior            | dB              | 52  |
| Peso total sem embalagem                        | kg              | 38,7  |
| Peso da caldeira + suporte                      | -               | 32 + 6,7  |
| Dimensões (Alt. x Larg. x Prof.)                | mm.             | 690 x 390 x 280   |
| Kit exaustão standard                           | -               | FC-set60-C13x   |
| Emissão de óxido de nitrogénio para gás natural | mg/kWh          | 25  |

Figura 35- Características técnicas caldeira Adaptado de (BOSCH, n.d.)

Na figura 35, estão representadas as características técnicas da caldeira selecionada.

Tabela 7-Equipamento selecionado sistema caldeira

|                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| <b>CALDEIRA</b> | <b>BOSCH C6000W 25/36</b> |
|-----------------|---------------------------|

Na tabela 7 estão representados os equipamentos para o sistema de caldeira.

### 3.5. Cálculo dos custos

Neste subcapítulo, irão ser analisados os custos das soluções previamente apresentadas, nomeadamente o custo de aquisição, operação e manutenção.

#### 3.5.1. Custos eletricidade e gás natural

##### 3.5.1.1. Custos eletricidade

Tabela 8-Tarifário eletricidade

|                    |  |                  |
|--------------------|--|------------------|
| <b>DGEG (fixo)</b> | Taxa de Exploração Direção-Geral de Energia e Geologia | 0,35 €           |
| <b>IEC</b>         | Imposto Especial de Consumo de Eletricidade            | 0,001 €          |
|                    |  |                  |
|                    | <b>PREÇO kWh ELETRICIDADE</b>                          | <b>0,19580 €</b> |

Na tabela 8 estão apresentados os valores das taxas e preço do kWh de eletricidade, no mercado português, (EDP, n.d.)

Equação 10

$$Custo = Consumo (kWh) \times 0,1958 + 0,35 + Consumo (kWh) \times IEC \quad (10)$$

## 3.5.1.2. Custos gás natural

Tabela 9-Tarifário gás natural

|                                    |             |
|------------------------------------|-------------|
| CONSUMO (1)                        | 0,06380 €   |
| TERMO TARIFÁRIO FIXO (2)           | 0,0692 €    |
| TERMO TARIFÁRIO FIXO-OUTROS (3)    | 0,01470 €   |
|                                    |             |
| <b>TAXAS</b>                       |             |
| IEC GN (4)                         | 0,0147130 € |
| TAXA OCUPAÇÃO SUBSOLO VARIÁVEL (5) | 0,0064230 € |
| TAXA OCUPAÇÃO SUBSOLO FIXO (6)     | 0,0074770 € |

Na tabela 9 estão apresentados os valores das taxas e preço do kWh de gás natural, no mercado português. (GÁS SU, n.d.)

Equação 11

$$VOLUME DE GÁS = \frac{Energia\ necessária}{PCS} \quad (11)$$

$$PCS=11,9 \text{ kWh/m}^3$$

Equação 12

$$Custo = Energia\ necessária \times (1) + 31 \times (2) + 31 \times (3) + Energia\ necessária \times 4 + Energia\ necessária \times (5) + 31 \times (6) \quad (12)$$

### 3.5.2. Custos sistemas bomba de calor

#### 3.5.2.1. Custos de aquisição e instalação

*Tabela 10-Custos aquisição + instalação sistema bomba de calor*

|                                      |                       |            |
|--------------------------------------|-----------------------|------------|
| <b>BOMBA DE CALOR</b>                | FRANCE AIR CHP 12T C1 | 5 068,30 € |
| <b>DEPÓSITO DE ACUMULAÇÃO DE AQS</b> | BAXI AS 160 1-E       | 943,00 €   |
| <b>DEPÓSITO DE INÉRCIA</b>           | BAXI ASA 140-IN       | 482,45 €   |
|                                      | INSTALAÇÃO            | 250,00 €   |

Na tabela 10 estão indicados os valores de aquisição dos equipamentos para o sistema de bomba de calor mais depósito de inércia mais depósito de AQS (acessórios hidráulicos não considerados).

Relativamente ao preço de instalação, é importante salientar que é uma estimativa e que o valor real pode variar dependendo de vários fatores técnicos (existência ou não de uma pré-instalação de rede de águas, local preparado para a instalação dos equipamentos, localização da obra, etc.).

É importante também referir que os preços de aquisição indicados podem variar de fornecedor para fornecedor ou de instalador para instalador.

#### 3.5.2.2. Custos operação bomba de calor

Para o cálculo dos custos de operação da bomba de calor, têm de ser analisados os valores do gráfico da figura 18 (carga térmica AQS) e da tabela 6 (carga térmica climatização).

Após serem analisadas estas tabelas, e sabendo o COP da bomba, calcula-se a energia que é necessária a rede fornecer através da equação 6 e, conseqüentemente calculamos o custo de eletricidade, através da equação 10, cujo resultado será apresentado no capítulo 4.

#### 3.5.2.3. Custos manutenção bomba de calor

Numa instalação de bomba de calor, existem operações de manutenção que devem ser realizadas periodicamente nomeadamente:

- Verificação do fluido frigorígeno (controlo de pressões e verificação de fugas)
- Inspeção do compressor e componentes elétricos: avaliação do estado dos cabos, terminais condensadores, etc

- Inspeção circuito hidráulico: bombas circuladoras e acessórios hidráulicos
- Análise parâmetros de operação do *software*: verificar se o sistema está a operar de acordo com os parâmetros previamente definidos
- Verificação dos drenos de condensados: limpeza do tubo

Relativamente ao depósito de AQS, também existem cuidados a ter, tais como:

- Verificação do estado do ânodo de magnésio e eventual substituição do mesmo caso seja necessário
- Verificação da resistência elétrica de apoio
- Drenagem e limpeza do depósito
- Verificação da válvula de segurança
- Verificação do funcionamento do termostato (ajustar caso necessário)

Relativamente ao depósito de inércia, também existem algumas verificações a serem feitas:

- Controlo de pressão do circuito hidráulico
- Análise do funcionamento da(s) bomba(s) circuladora(s)
- Limpeza interna do depósito

Para os custos de manutenção do sistema bomba de calor, foi considerado um valor de 2% do custo inicial de aquisição dos equipamentos, (Harrison Kelly, 2024)

### 3.5.3. Custos sistemas bomba de calor + painel solar térmico

#### 3.5.3.1. Custos aquisição bomba de calor + painel solar térmico

*Tabela 11-Custos aquisição + instalação sistema bomba de calor e painéis solares térmicos*

|                                      |                       |            |
|--------------------------------------|-----------------------|------------|
| <b>BOMBA DE CALOR</b>                | FRANCE AIR CHP 12T C1 | 5 068,30 € |
| <b>DEPÓSITO DE ACUMULAÇÃO DE AQS</b> | BAXI AS 200-2E        | 1 590,00 € |
| <b>DEPÓSITO DE INÉRCIA</b>           | BAXI ASA 140-IN       | 482,45 €   |
| <b>PAINEL SOLAR TÉRMICO</b>          | WOLF TOPSON F3-1      | 995,00 €   |
|                                      | INSTALAÇÃO            | 500,00 €   |

Na tabela 12 estão indicados os valores de aquisição dos equipamentos para o sistema de bomba de calor, depósito de inércia mais depósito de AQS e painel solar térmico (acessórios hidráulicos não considerados).

Relativamente ao preço de instalação, é importante salientar que é uma estimativa e que o valor real pode variar dependendo de vários fatores técnicos (existência ou não de uma pré-instalação de rede de águas, local preparado para a instalação dos equipamentos, localização da obra, necessidade da realização de trabalhos de reforço da cobertura para a instalação do painel solar térmico, etc.).

É importante também referir que os preços de aquisição indicados podem variar de fornecedor para fornecedor ou de instalador para instalador.

### **3.5.3.2. Custos operação bomba de calor + painel solar térmico**

Para avaliarmos o custo de operação do sistema bomba de calor + painéis solares térmicos, em primeiro lugar temos de avaliar qual o contributo dos painéis solares térmicos.

Para avaliarmos o contributo dos painéis, temos de analisar o gráfico da figura 24. Após esta análise, e recolhida a informação referente ao contributo dos painéis solares, é necessário perceber qual a energia que a bomba de calor tem de ser capaz de fornecer para aquecer os 160 litros de água, caso os painéis por si só não o consigam. Consequentemente calcula-se o custo da energia que é necessário fornecer à bomba para se calcular o custo de operação para AQS.

Para analisar o custo de operação em climatização, analisa-se os valores da tabela 3.

Depois de saber qual a energia que a bomba de calor tem de fornecer (AQS e climatização), e sabendo o *COP* da bomba de calor, utiliza-se a equação 6 (para calcular a energia a ser fornecida à bomba de calor), e de seguida calcula-se o preço da eletricidade através da equação 10.

É importante referir que para efeitos de cálculo, e uma vez que os valores podem ser considerados desprezáveis, não foi considerado o consumo da bomba de circulação do circuito solar.

### **3.5.3.1. Custos manutenção bomba de calor + painel solar térmico**

Numa instalação de bomba de calor mais painel solar térmico, para além da manutenção a ser feita na bomba e depósitos, já abordados no ponto 3.5.2.3, também é necessária a realização de manutenção no sistema dos painéis solares.

Algumas medidas a serem tomadas no sentido de garantir o bom funcionamento dos equipamentos, são:

- Verificação do fluido térmico: nível, pressão e estado do fluido

- Inspeção dos painéis: Limpeza da superfície, verificar estanquidade do vidro, verificar estabilidade da estrutura de fixação, etc.
- Verificação do vaso de expansão solar
- Inspeção das válvulas de segurança e purgadores
- Verificação da bomba de circulação do sistema solar
- Análise ao controlador solar

Para os custos de manutenção do sistema bomba de calor com painel solar térmico, foi considerado um valor de 2% do custo inicial de aquisição dos equipamentos, (Harrison Kelly, 2024).

### 3.5.4. Custos sistemas bomba de calor + painel solar fotovoltaico

#### 3.5.4.1. Custos aquisição bomba de calor + painel solar fotovoltaico

*Tabela 12-Custos aquisição + instalação sistema bomba de calor e painéis solares fotovoltaicos*

|                                      |                                  |            |
|--------------------------------------|----------------------------------|------------|
| <b>BOMBA DE CALOR</b>                | FRANCE AIR CHP 12T C1            | 5 068,30 € |
| <b>DEPÓSITO DE ACUMULAÇÃO DE AQS</b> | BAXI AS 160 1-E                  | 943,00 €   |
| <b>DEPÓSITO DE INÉRCIA</b>           | BAXI ASA 140-IN                  | 482,45 €   |
| <b>PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO</b>     | PHONO SOLAR MONOCRISTALINO 550 W | 320,75 €   |
|                                      | INSTALAÇÃO                       | 500,00 €   |

Na tabela 13 estão indicados os valores de aquisição dos equipamentos para o sistema de bomba de calor, depósito de inércia mais depósito de AQS (acessórios hidráulicos não considerados) e painel solar fotovoltaico (não estão incluídos alguns acessórios nomeadamente conetores, cabo de potência, quadro de proteção AC/DC, cabo solar e fio terra).

Relativamente ao preço de instalação, é importante salientar que é uma estimativa e que o valor real pode variar dependendo de vários fatores técnicos (existência ou não de uma pré-instalação de rede de águas, local preparado para a instalação dos equipamentos, localização da obra, necessidade da realização de trabalhos de reforço da cobertura para a instalação do painel solar fotovoltaico, viabilidade da instalação elétrica existente na habitação, etc.).

É importante também referir que os preços de aquisição indicados podem variar de fornecedor para fornecedor ou de instalador para instalador.

### **3.5.4.2. Custos operação bomba de calor + painel solar fotovoltaico**

Para avaliarmos o custo de operação do sistema bomba de calor com painel solar fotovoltaico, em primeiro lugar temos de avaliar qual o contributo do painel solar fotovoltaico.

Para avaliarmos o contributo dos painéis, temos de analisar o gráfico da figura 32. Após esta análise, e recolhida a informação referente ao contributo do painel solar fotovoltaico e à energia que a bomba de calor tem de ser capaz de fornecer para aquecer os 160 litros de água (AQS), calcula-se o custo da energia que é necessário fornecer à bomba, caso a energia que o painel fornece não seja suficiente.

Para analisar o custo de operação em climatização, analisa-se os valores da tabela 3.

É importante ter em consideração que a energia fornecida pelo painel solar fotovoltaico, visto não se estar a considerar um sistema com bateria, poderá não ser fornecida nos momentos exatos em que a bomba de calor precisa funcionar para aquecer a água no depósito, mantendo-a na temperatura pré-definida.

Depois de saber qual a energia que a bomba de calor tem de fornecer (AQS e climatização), e sabendo o *COP* da bomba de calor, utiliza-se a equação 6 (para calcular a energia a ser fornecida à bomba de calor), e de seguida calcula-se o preço da eletricidade através da equação 10.

### **3.5.4.3. Custos manutenção bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos**

Numa instalação de bomba de calor mais painéis solares fotovoltaicos, para além da manutenção a ser feita na bomba e depósitos, já abordados no ponto 3.5.2.3, também é necessária a realização de manutenção no sistema dos painéis solares fotovoltaicos.

Algumas medidas a serem tomadas no sentido de garantir a manutenção dos equipamentos, tais como:

- Limpeza dos painéis
- Inspeção visual dos painéis de modo a averiguar a existência de fissuras, delaminações, etc.
- Verificação do microinversor
- Verificação do quadro elétrico
- Monitorização da produção e rendimento do sistema

Para os custos de manutenção do sistema bomba de calor com painel solar fotovoltaico, foi considerado um valor de 2% do custo inicial de aquisição dos equipamentos, (Harrison Kelly, 2024).

### 3.5.5. Custos sistemas caldeira de condensação

#### 3.5.5.1. Custos aquisição sistema caldeira de condensação

*Tabela 13-Custos aquisição + instalação caldeira de condensação*

|                 |                    |            |
|-----------------|--------------------|------------|
| <b>CALDEIRA</b> | BOSCH C6000W 25/36 | 1 999,00 € |
|                 | INSTALAÇÃO         | 250,00 €   |

Na tabela 14 estão indicados os valores de aquisição do equipamento para o sistema de caldeira de condensação (acessórios hidráulicos não considerados).

Relativamente ao preço de instalação, é importante salientar que é uma estimativa e que o valor real pode variar dependendo de vários fatores técnicos (existência ou não de uma pré-instalação de rede de águas e de gás, local preparado para a instalação do equipamento, localização da obra, constrangimentos em obra, nomeadamente dificuldade na passagem de condutas até ao exterior, etc.).

É importante também referir que os preços de aquisição indicados podem variar de fornecedor para fornecedor ou de instalador para instalador.

#### 3.5.5.2. Custos operação caldeira de condensação

Para avaliar os custos de operação da caldeira, tem de se avaliar as necessidades de AQS e climatização, cujos dados estão indicados no gráfico da figura 18 e na tabela 3.

Após se analisar estas necessidades, utiliza-se a equação 12 para o cálculo do custo em gás natural (para AQS e para climatização).

É importante referir que para efeitos de cálculo, e uma vez que os valores podem ser considerados desprezáveis, não foi considerado o consumo de alimentação da caldeira, tanto em funcionamento como em espera.

### **3.5.5.3. Custos manutenção caldeira de condensação**

Numa instalação com uma caldeira de condensação devem ser adotadas medidas de manutenção/prevenção, nomeadamente:

- Limpeza do queimador e da câmara de combustão (remoção de fuligens e possíveis obstruções)
- Verificação do ventilador e condutas (obstruções/sujidades acumuladas)
- Verificação de fugas de água/gás
- Análise da pressão do circuito de aquecimento
- Verificação da bomba circuladora
- Inspeção ao vaso de expansão

Para os custos de manutenção da caldeira, foi considerado um valor de 2% do custo inicial de aquisição dos equipamentos,(Harrison Kelly, 2024).

## 4. Resultados e Discussão

Neste capítulo irão ser apresentados os custos de aquisição, manutenção e operação de cada uma das soluções tanto para AQS como para climatização.

### 4.1. Custos de aquisição e instalação

#### 4.1.1. Sistema bomba de calor

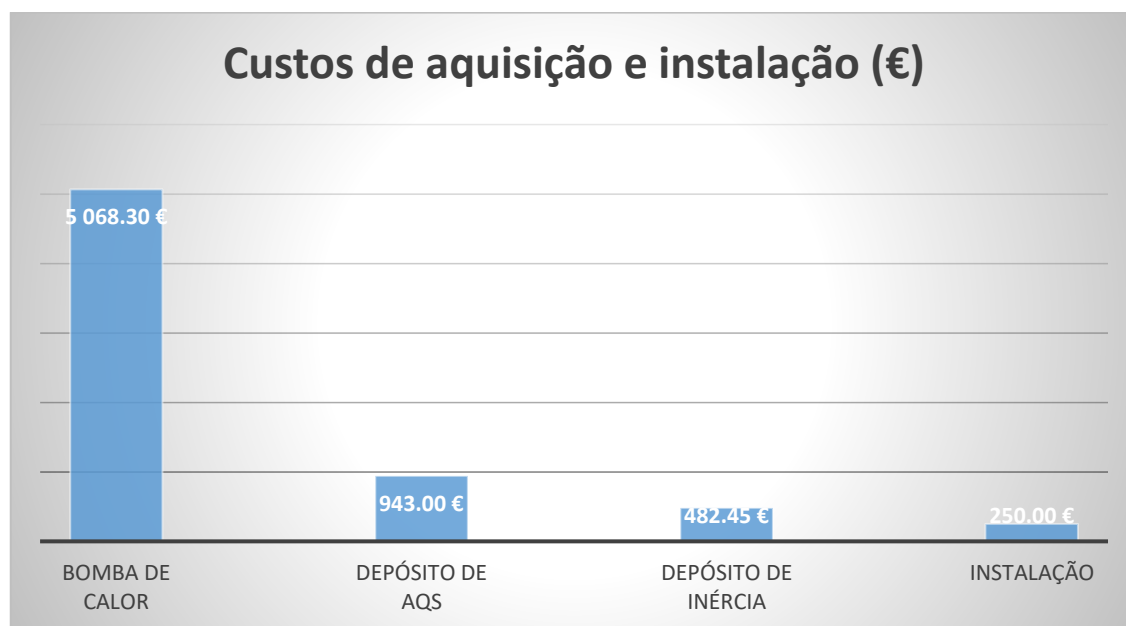


Figura 36-Custos de aquisição e instalação do sistema bomba de calor (€)

No gráfico da figura 36 estão representados os custos de aquisição e instalação do sistema bomba de calor.

Pode-se constatar que dentre os equipamentos do sistema, aquele que consome a maior parte do orçamento é mesmo a bomba de calor, que representa cerca de 78,05 % do custo total.

#### 4.1.2. Bomba de calor + painéis solares térmicos

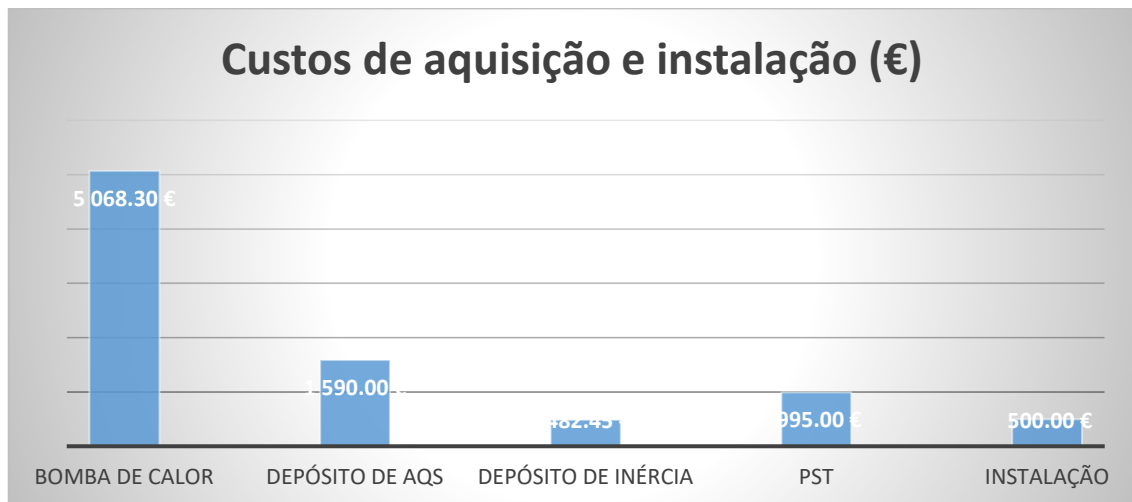


Figura 37-Custos de aquisição e instalação do sistema bomba de calor + painéis solares térmicos (€)

No gráfico da figura 37 estão representados os custos de aquisição e instalação do sistema bomba de calor mais painéis solares térmicos.

Pode-se constatar que dentre os equipamentos do sistema, aquele que consome a maior parte do orçamento continua a ser a bomba de calor, que representa cerca de 58,69% do custo total.

#### 4.1.3. Bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos

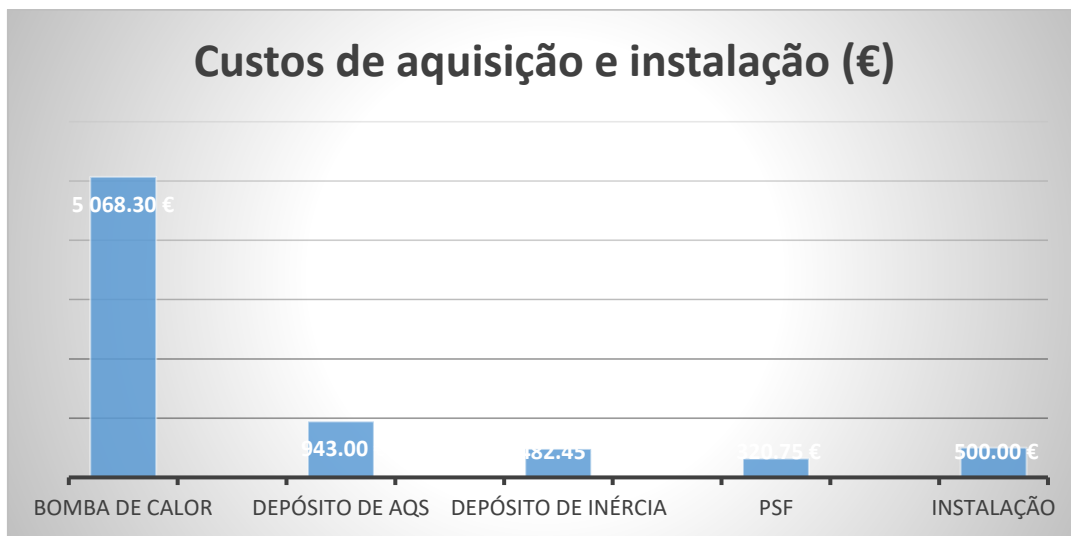


Figura 38-Custo aquisição sistema bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos (€)

No gráfico da figura 38 estão representados os custos de aquisição e instalação do sistema bomba de calor mais painéis solares fotovoltaicos.

Pode-se constatar que dentre os equipamentos do sistema, aquele que consome a maior parte do orçamento continua a ser a bomba de calor, que representa cerca de 69,29% do custo total.

#### 4.1.4. Caldeira de condensação

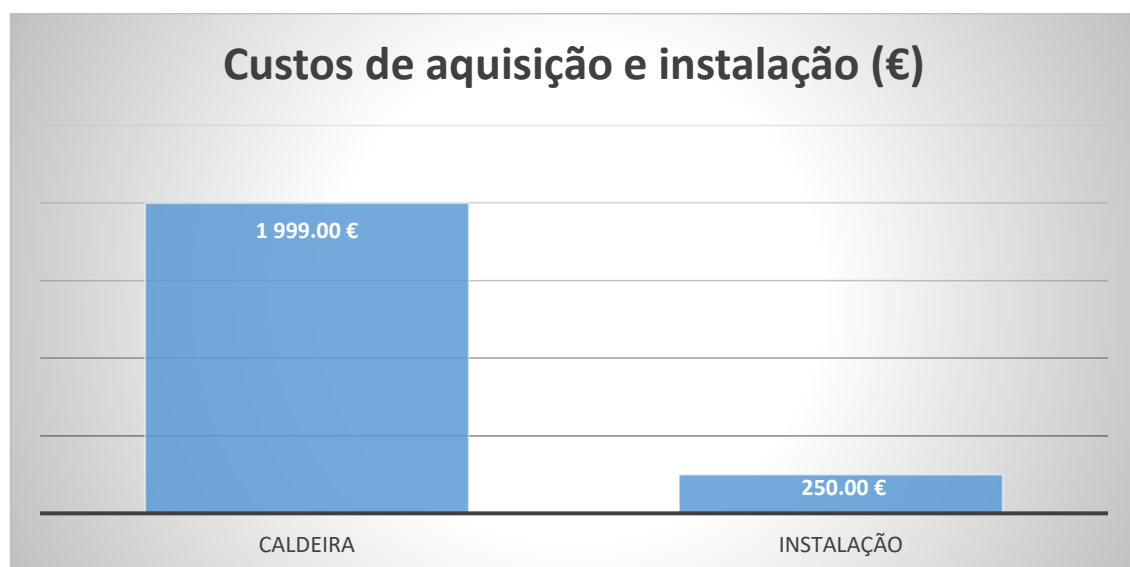


Figura 39-Custo aquisição caldeira de condensação (€)

No gráfico da figura 39 estão representados os custos de aquisição e instalação da caldeira. De notar que neste sistema o único equipamento que é necessário adquirir é a própria caldeira.

## 4.2. Custos de operação

### 4.2.1. Sistema bomba de calor

#### 4.2.1.1. AQS

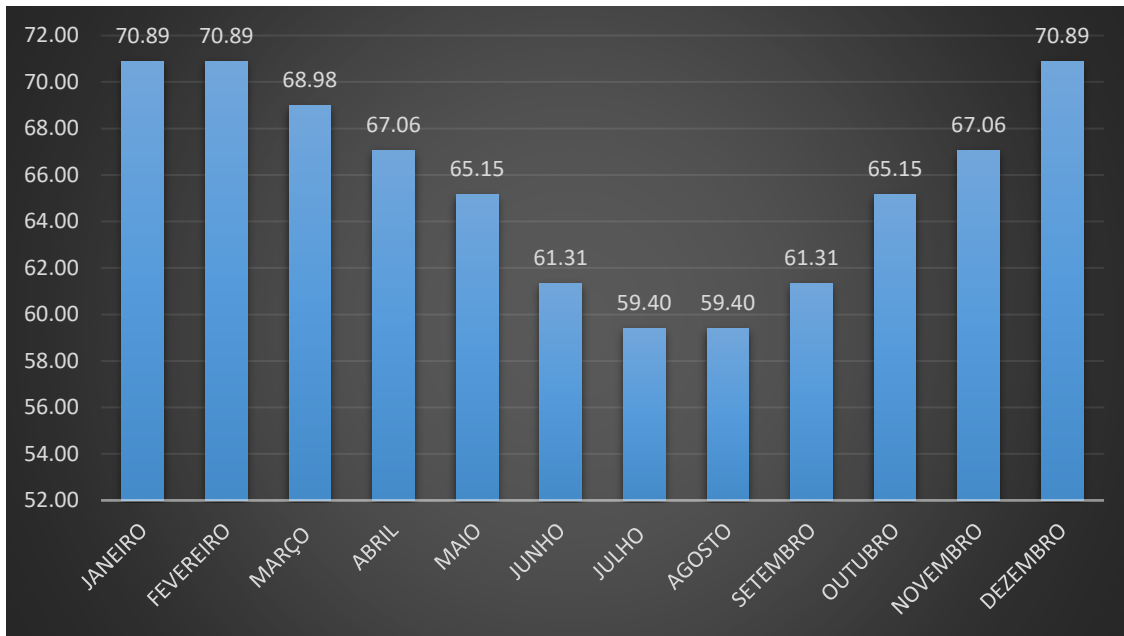


Figura 40-Energia fornecida pela rede à bomba de calor (kWh)

No gráfico da figura 40 está representada a energia que é necessário a rede elétrica fornecer à bomba de calor para AQS.

A metodologia utilizada para o cálculo dos valores representados graficamente está descrita no capítulo 3.5.2.2.

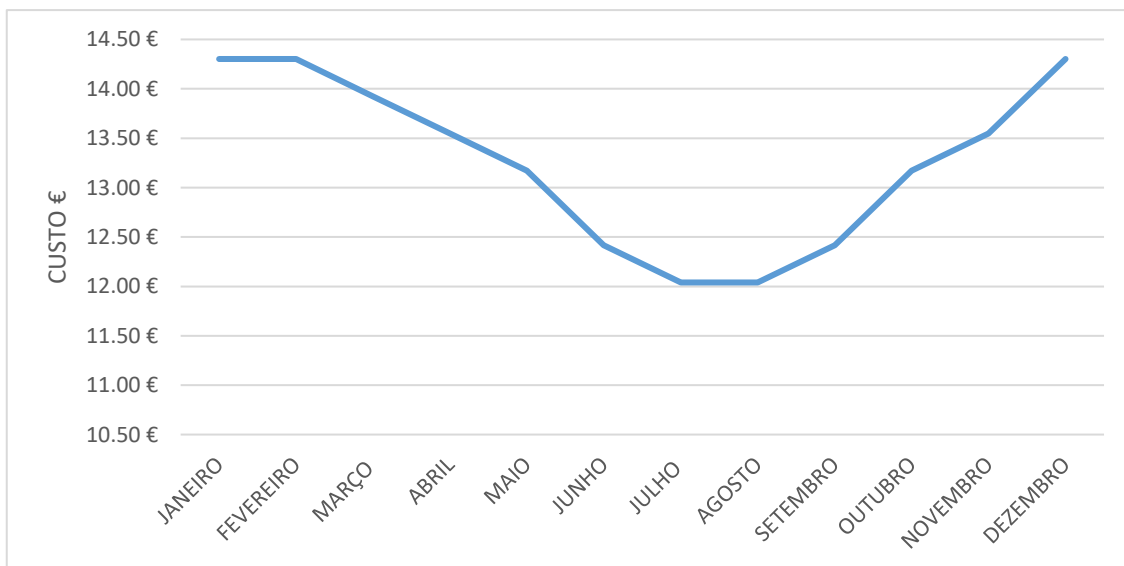


Figura 41-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE K

No gráfico da figura 41, estão representados os custos de operação do sistema bomba de calor para AQS.

A metodologia de cálculo destes valores está descrita no capítulo 3.5.1.1 e 3.5.2.2.

#### 4.2.1.1. Climatização

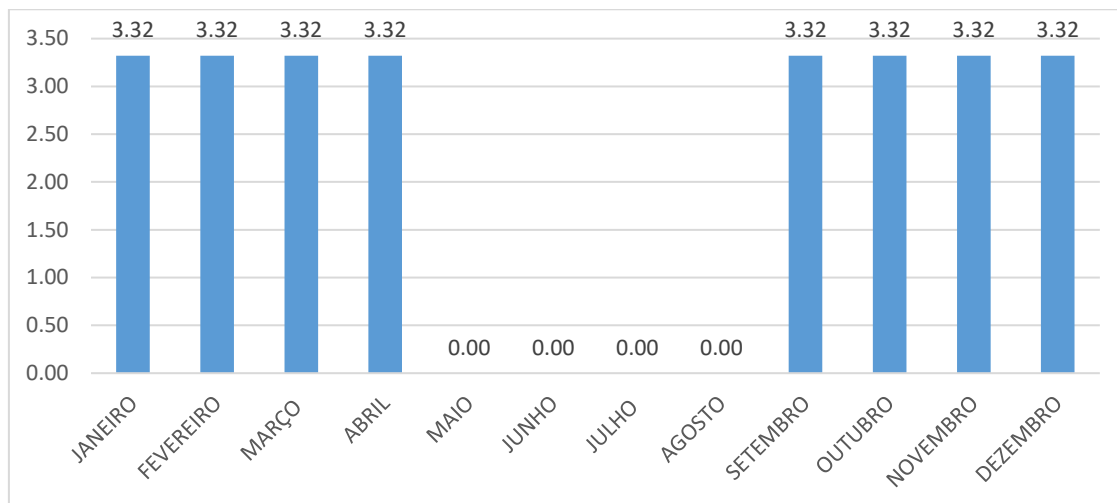


Figura 42-Energia fornecida pela rede à bomba de calor (kWh)

No gráfico da figura 42 está representada a energia que é necessário a rede elétrica fornecer à bomba de calor para climatização.

A metodologia utilizada para o cálculo dos valores representados graficamente está descrita nos capítulos 3.5.1.1 e 3.5.2.2.

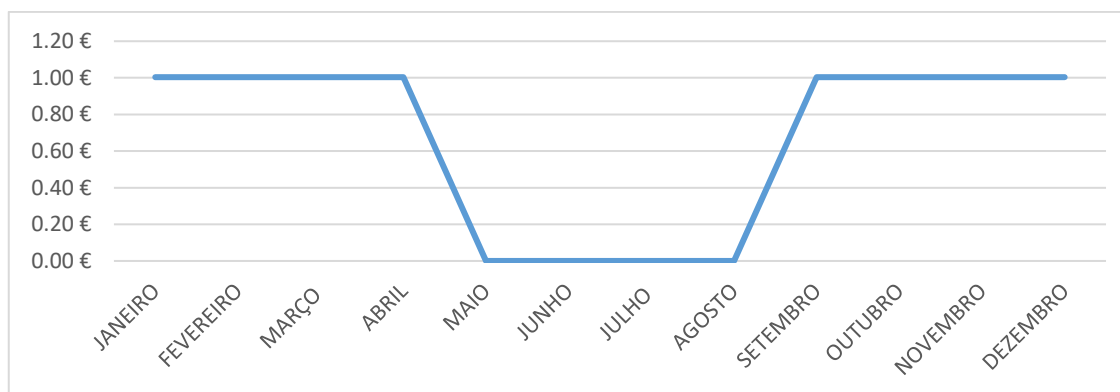


Figura 43-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE L

No gráfico da figura 43, estão representados os custos de operação do sistema bomba de calor para climatização.

A metodologia de cálculo destes valores está descrita no capítulo 3.5.1.1 e 3.5.2.2.

#### 4.2.2. Sistema bomba de calor + painéis solares térmicos

##### 4.2.2.1. AQS

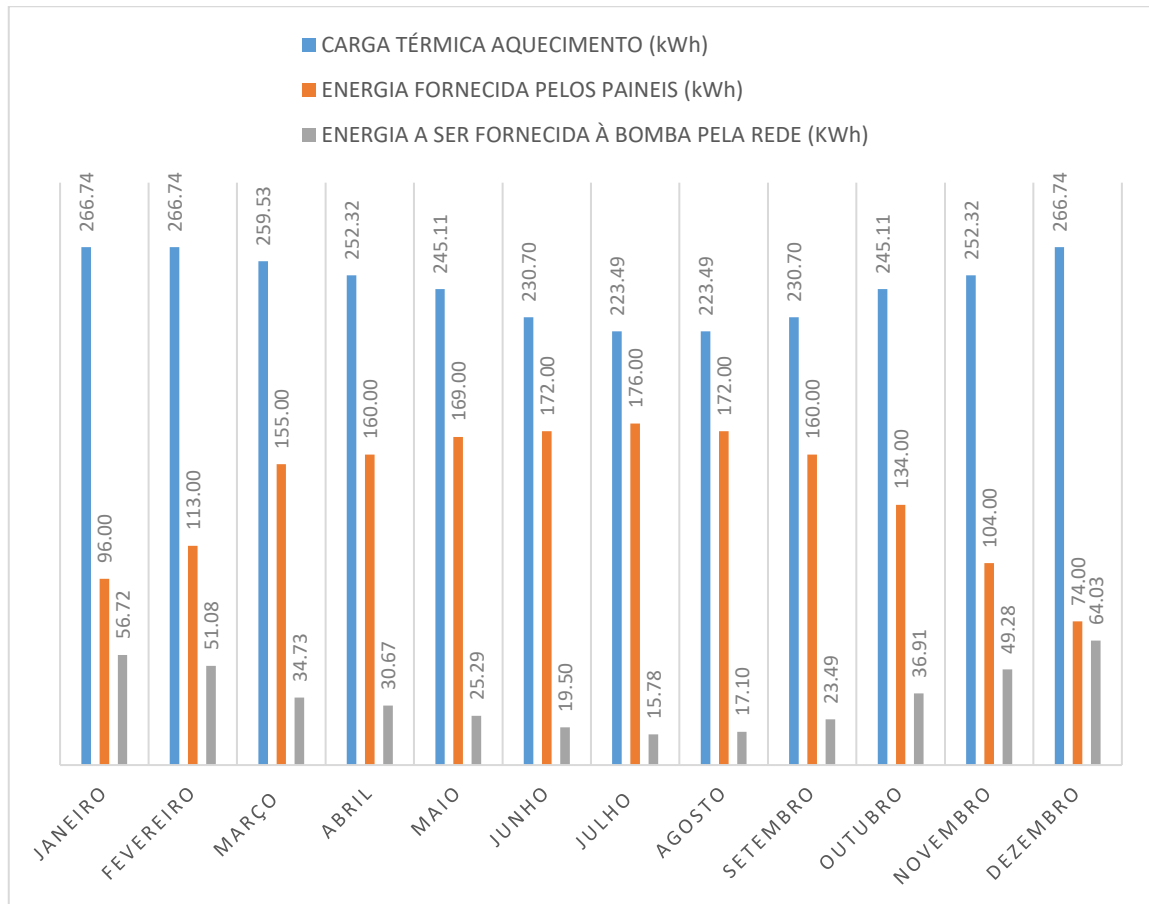


Figura 44-Energia sistema com painel solar térmico (kWh)

No gráfico da figura 44 estão representados 3 valores: a carga de aquecimento dos 200 litros de água contida no depósito, a energia fornecida pelo painel solar térmico e a energia que a rede tem de fornecer à bomba de calor.

A energia que a rede tem de fornecer à bomba de calor é a carga de aquecimento dos 200 litros de água menos a energia fornecida pelo painel, sobre o *COP* da bomba de calor que é 3,01.

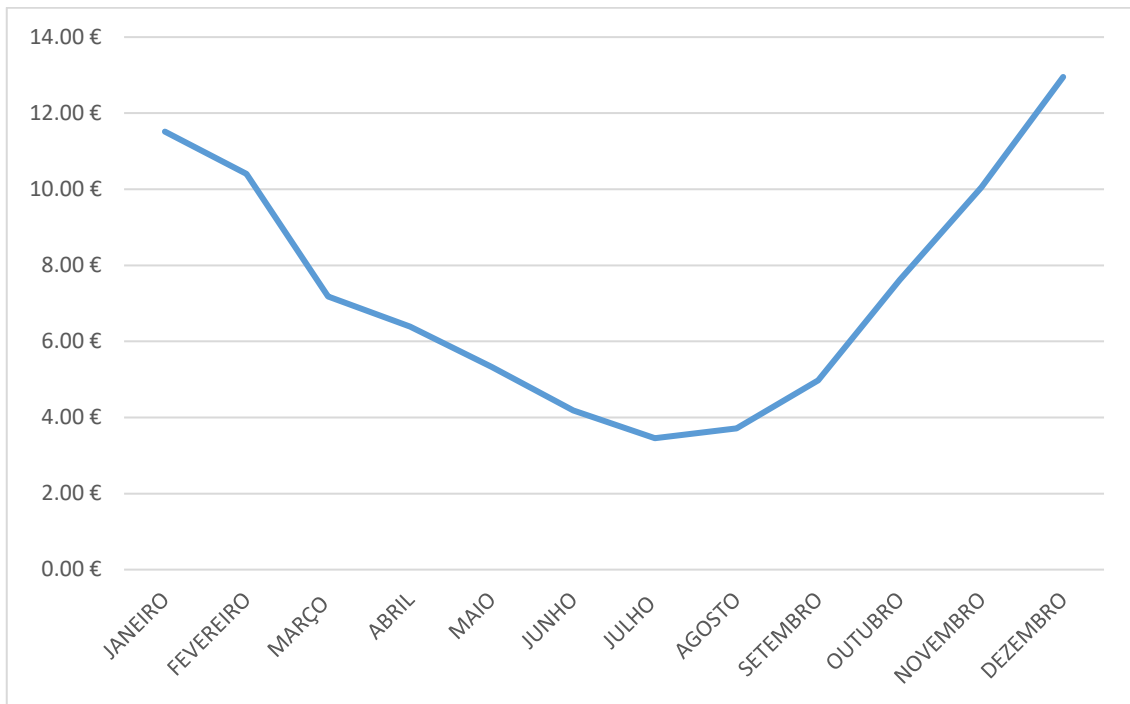


Figura 45-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE M

O gráfico presente na figura 45 representa a curva dos custos de operação do sistema bomba de calor com painéis solares térmicos para AQS.

A metodologia utilizada para cálculo dos valores está descrita no capítulo 3.5.3.2 e 3.5.1.1.

#### 4.2.2.1. Climatização

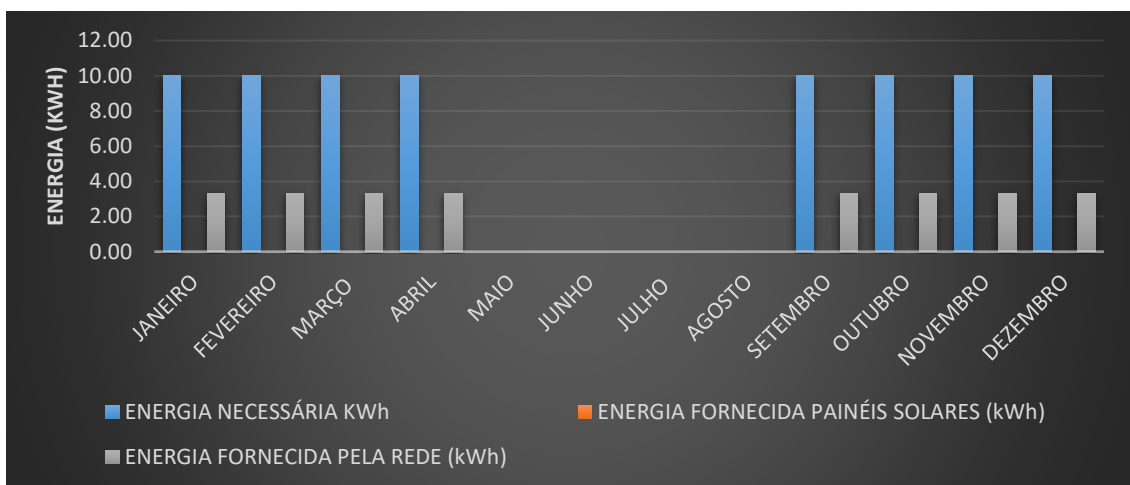


Figura 46-Energia em climatização no sistema de painel solar térmico (kWh), APÊNDICE N

## Resultados e Discussão

No gráfico da figura 46 estão representados 3 valores: a carga de aquecimento de climatização, a energia fornecida pelos painéis solares térmicos e a energia que a rede tem de fornecer à bomba de calor.

É possível constatar que os painéis solares térmicos não contribuem para o sistema de climatização, pois este serve exclusivamente o sistema de AQS.

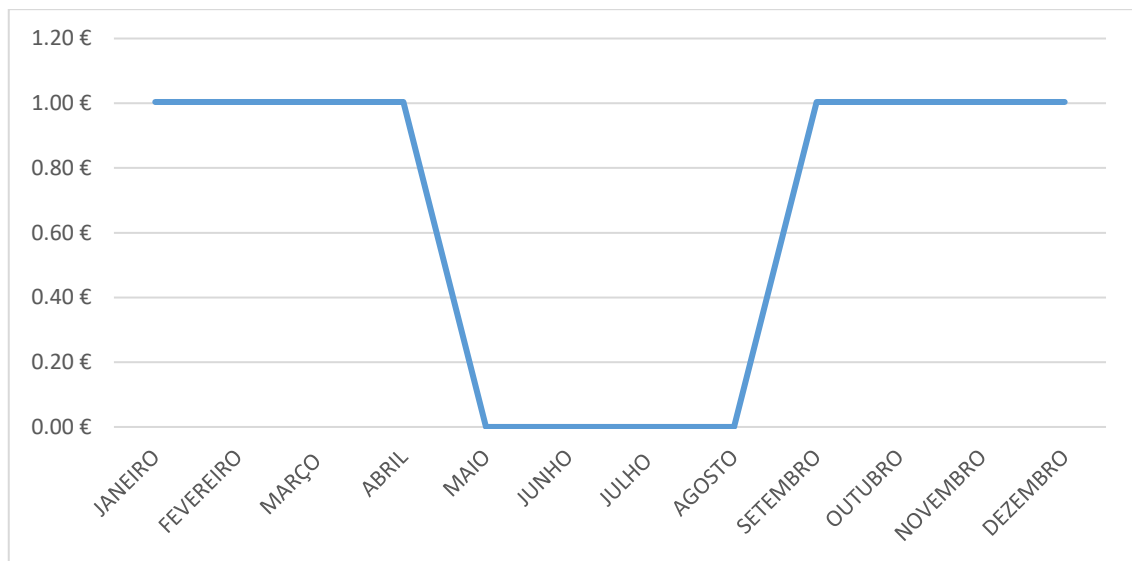


Figura 47-Custo mensal operação (€), APÊNDICE O

O gráfico presente na figura 47 representa a curva dos custos de operação do sistema bomba de calor com painéis solares térmicos para AQS.

A metodologia utilizada para cálculo dos valores está descrita no capítulo 3.5.3.2 e 3.5.1.1.

### 4.2.3. Sistema bomba de calor + painéis solares fotovoltaicos

#### 4.2.3.1. AQS

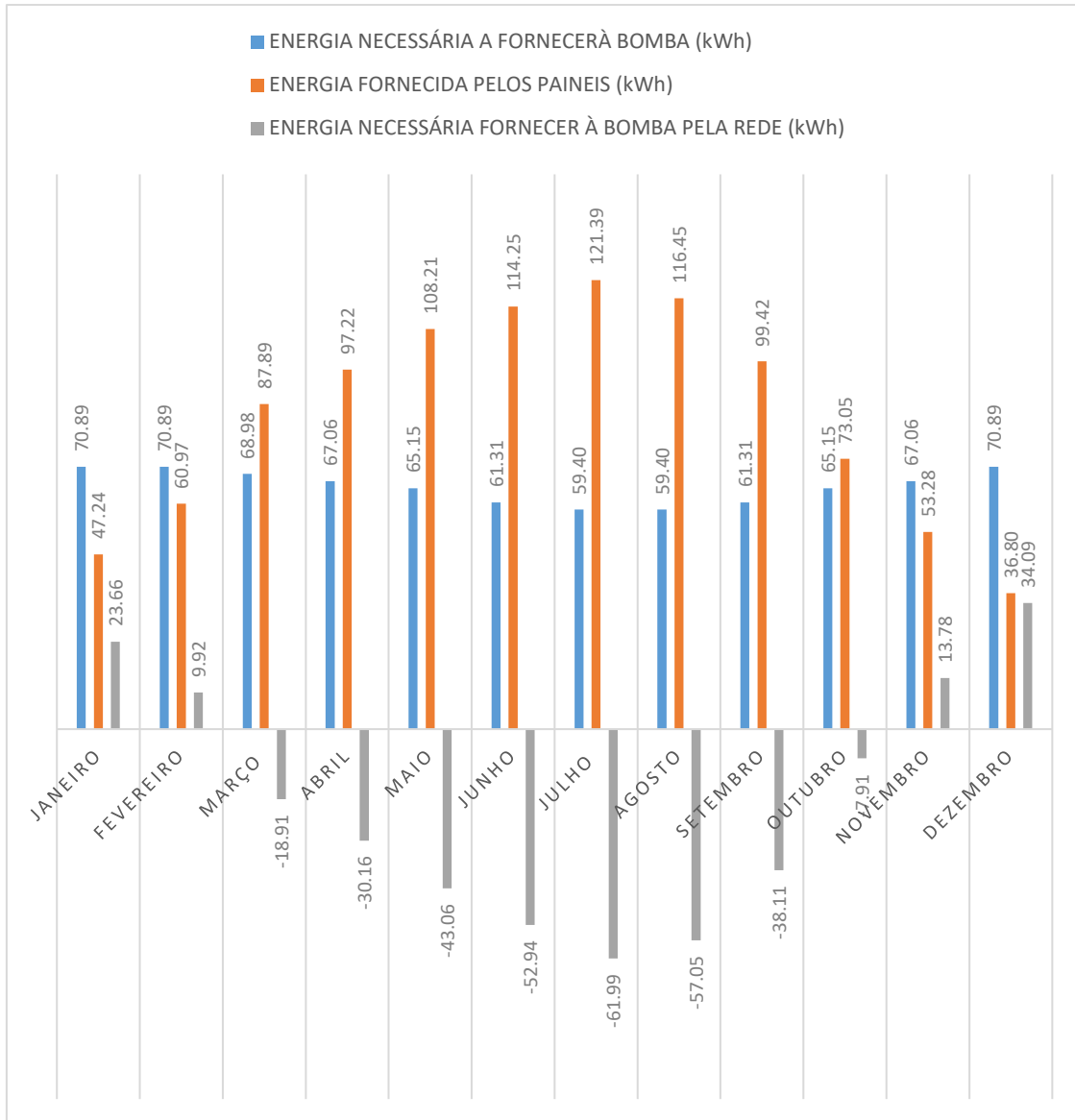


Figura 48-Energia sistema com painel solar fotovoltaico (kWh)

No gráfico da figura 48 estão representados 3 valores: a energia que é necessário fornecer à bomba de calor para AQS, a energia fornecida pelos painéis solares fotovoltaicos à bomba de calor e a energia que a rede tem de fornecer à bomba de calor.

A energia que é necessário fornecer à bomba de calor é a soma algébrica da energia fornecida pelo painel solar fotovoltaico e a energia fornecida pela rede elétrica.

É possível observar que durante os meses de Março, Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro e Outubro, o painel solar fotovoltaico fornece mais energia do que a que é necessária fornecer à bomba, o que quer dizer que não é, eventualmente necessário a rede elétrica fornecer energia.

## Resultados e Discussão

De notar que, uma vez que o sistema não contempla baterias, apesar do painel solar fotovoltaico fornecer tal energia, e uma vez que se trata de energia instantânea, os momentos em que o painel fornece energia podem não corresponder aos momentos em que a bomba de calor necessita que esta lhe seja fornecida.

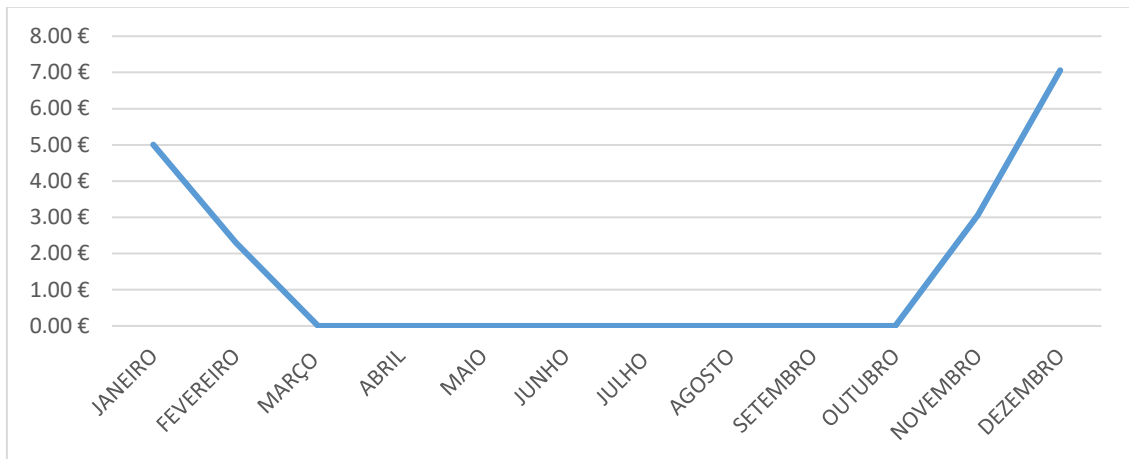


Figura 49-Custo mensal operação (€), APÊNDICE P

O gráfico presente na figura 49 representa a curva dos custos de operação do sistema bomba de calor com painel solar fotovoltaico para AQS.

A metodologia utilizada para cálculo dos valores está descrita no capítulo 3.5.4.2 e 3.5.1.1.

4.2.3.1. Climatização

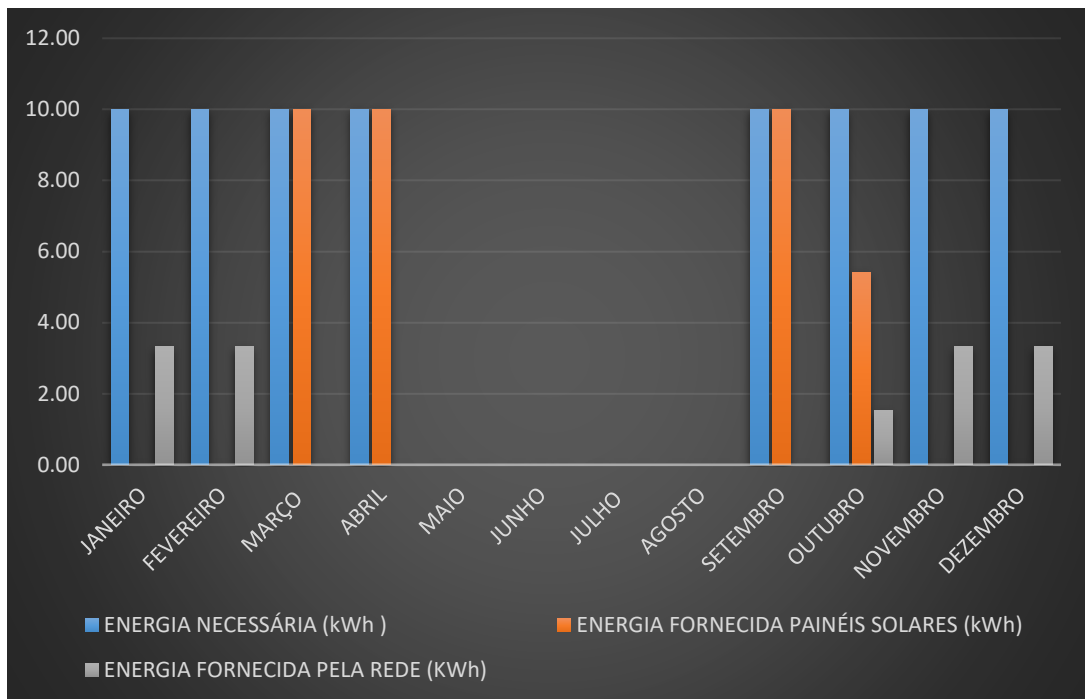


Figura 50-Energia em climatização no sistema com painel solar fotovoltaico (kWh), APÊNDICE Q

No gráfico da figura 50 estão representados 3 valores: a energia necessária para o aquecimento de climatização, a energia fornecida pelo painel solar fotovoltaico e a energia que a rede tem de fornecer à bomba de calor.

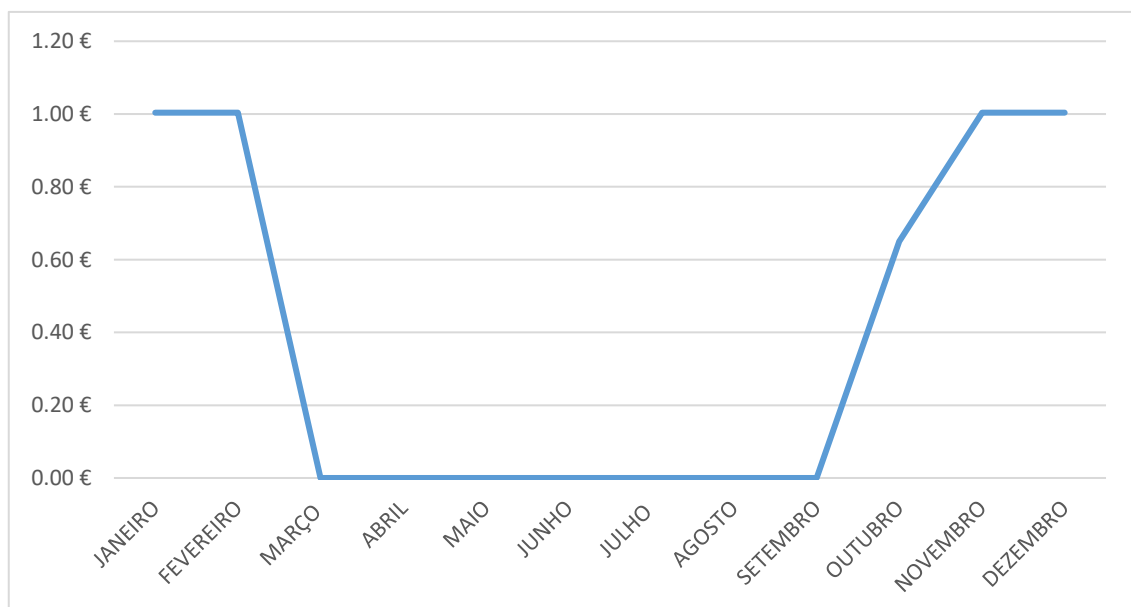


Figura 51-Custo mensal operação (€), APÊNDICE R

## Resultados e Discussão

O gráfico presente na figura 51 representa a curva dos custos de operação do sistema bomba de calor com painel solar fotovoltaico para climatização.

A metodologia utilizada para cálculo dos valores está descrita no capítulo 3.5.4.2 e 3.5.1.1.

### 4.2.4. Caldeira de condensação

#### 4.2.4.1. AQS

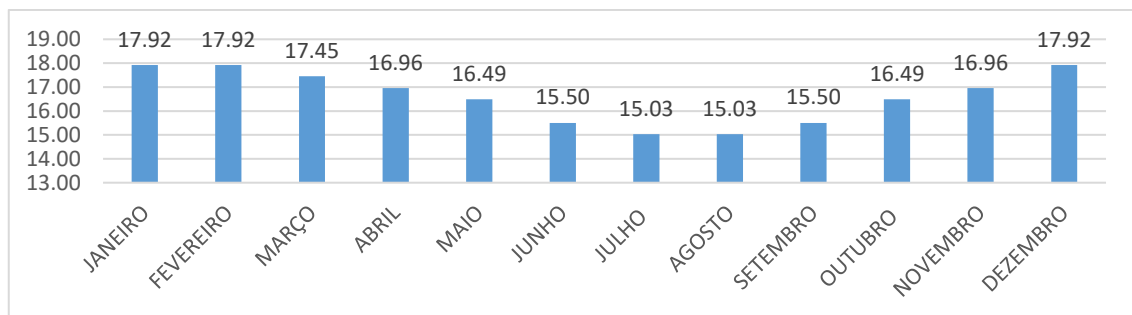


Figura 52- Volume de gás a fornecer à caldeira mensalmente (m³)

O gráfico da figura 52 representa o volume de gás a ser fornecido todos os meses à caldeira para aquecimento das águas quentes sanitárias.

A metodologia utilizada para cálculo dos valores está descrita no capítulo 3.5.5.2 e 3.5.1.2.

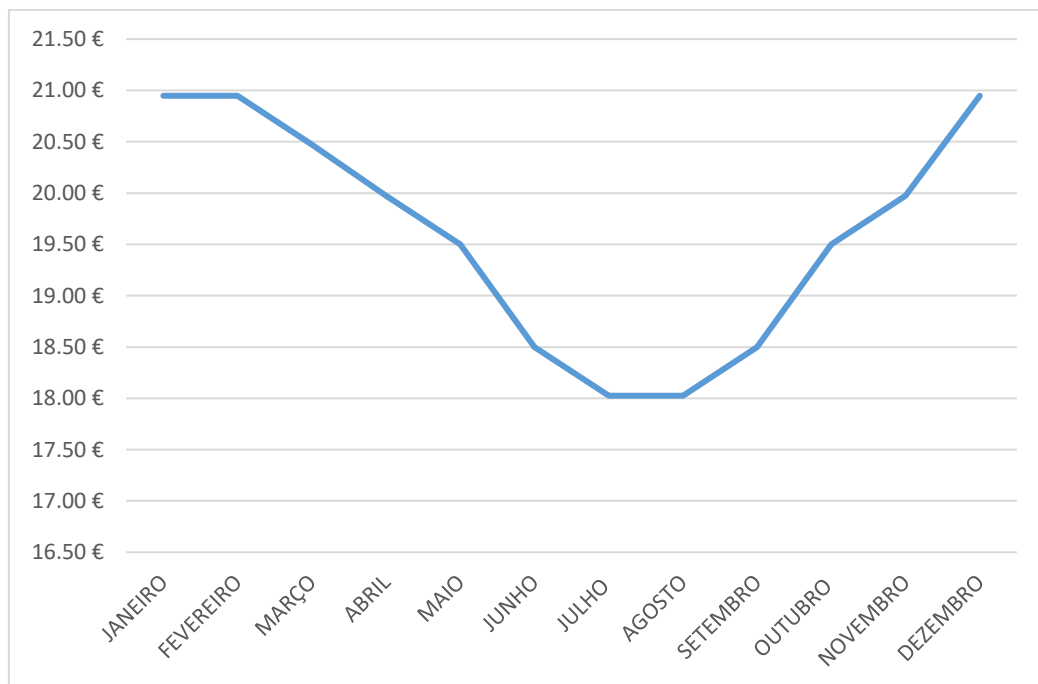


Figura 53-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE 5

O gráfico da figura 53 representa o custo mensal de operação da caldeira de condensação para AQS.

A metodologia utilizada para o cálculo dos custos está descrita no capítulo 3.5.5.2 e 3.5.1.2.

#### 4.2.4.1. Climatização

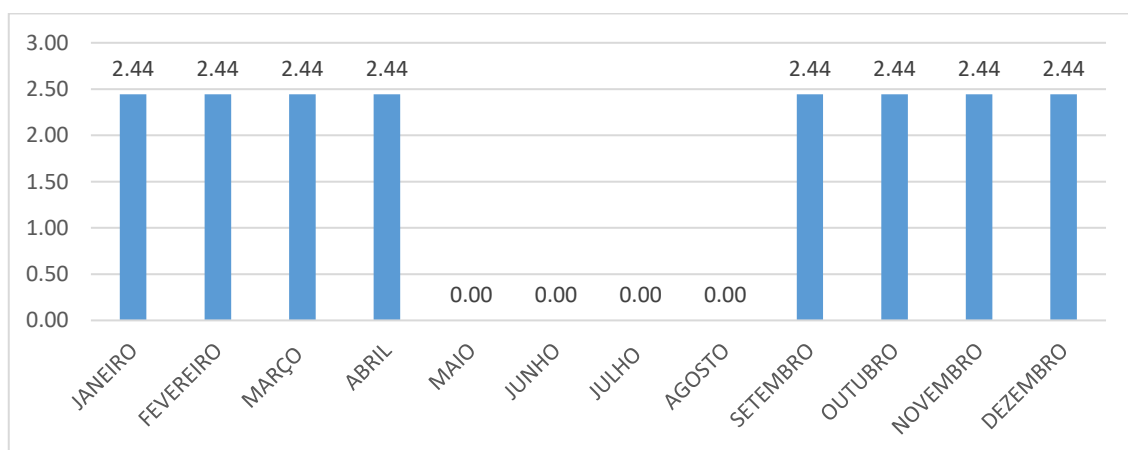


Figura 54-Volume de gás a fornecer à caldeira mensalmente (m³)

O gráfico da figura 54 representa o volume de gás a fornecer à caldeira todos os meses para climatização. O cálculo do volume de gás foi realizado através da equação 11.

## Resultados e Discussão

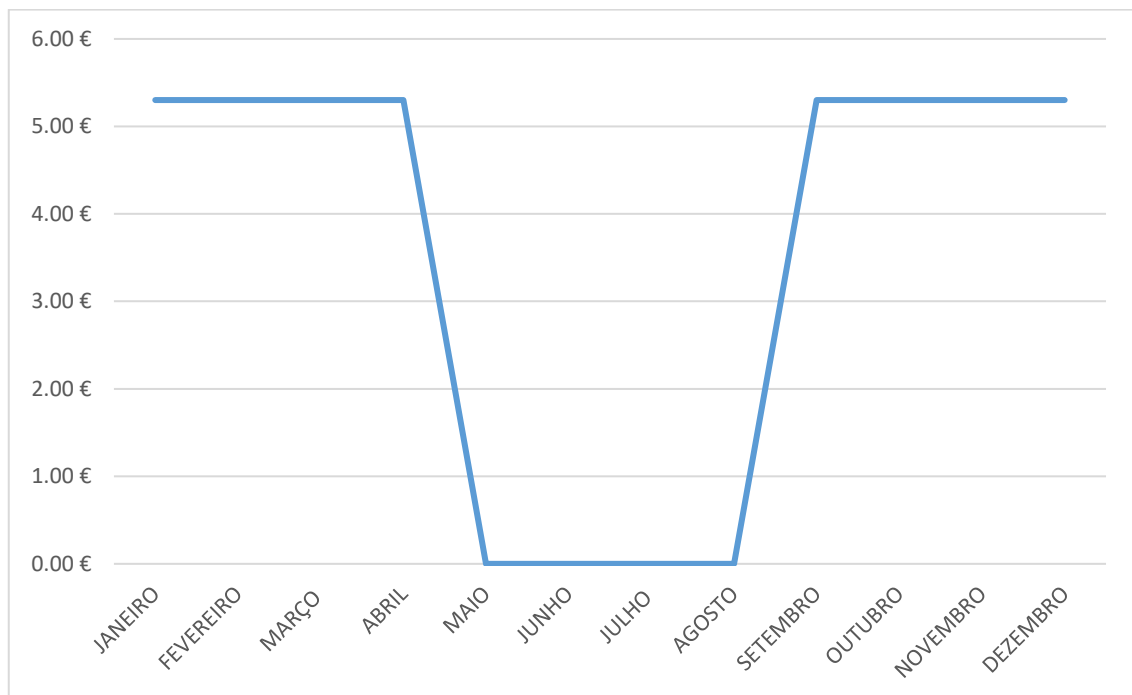


Figura 55-Custo mensal de operação (€), APÊNDICE T

O gráfico da figura 55 representa o custo mensal de operação da caldeira de condensação para climatização.

A metodologia utilizada para o cálculo dos custos está descrita no capítulo 3.5.5.2 e 3.5.1.2.

### 4.3. Discussão de resultados

Neste subcapítulo irão ser apresentados os comparativos entre as soluções anteriormente apresentadas.

#### 4.3.1. Custos de aquisição

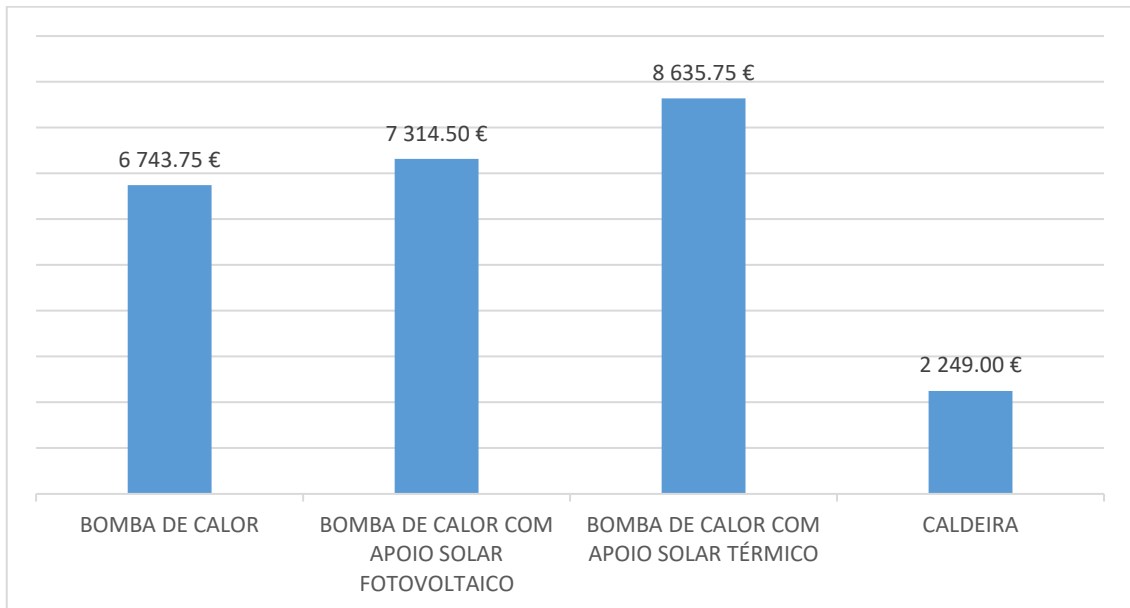


Figura 56-Custos de aquisição dos diferentes sistemas (€)

No gráfico da figura 56 estão representados os custos iniciais de aquisição e instalação dos equipamentos das 4 soluções previamente estudadas: sistema de bomba de calor, bomba de calor mais painéis solares térmicos, bomba de calor mais painéis solares fotovoltaicos e caldeira de condensação.

É possível precisar que o custo inicial da caldeira de condensação é substancialmente inferior ao das restantes soluções, tendo um custo 66,65 % inferior ao do sistema de bomba de calor. Pode-se concluir também que o sistema de caldeira tem um custo inicial 69,25 % inferior ao sistema de bomba de calor com painel solar fotovoltaico e 73,96 % em relação ao sistema de bomba de calor com painel solar térmico.

### 4.3.2. Custos de manutenção

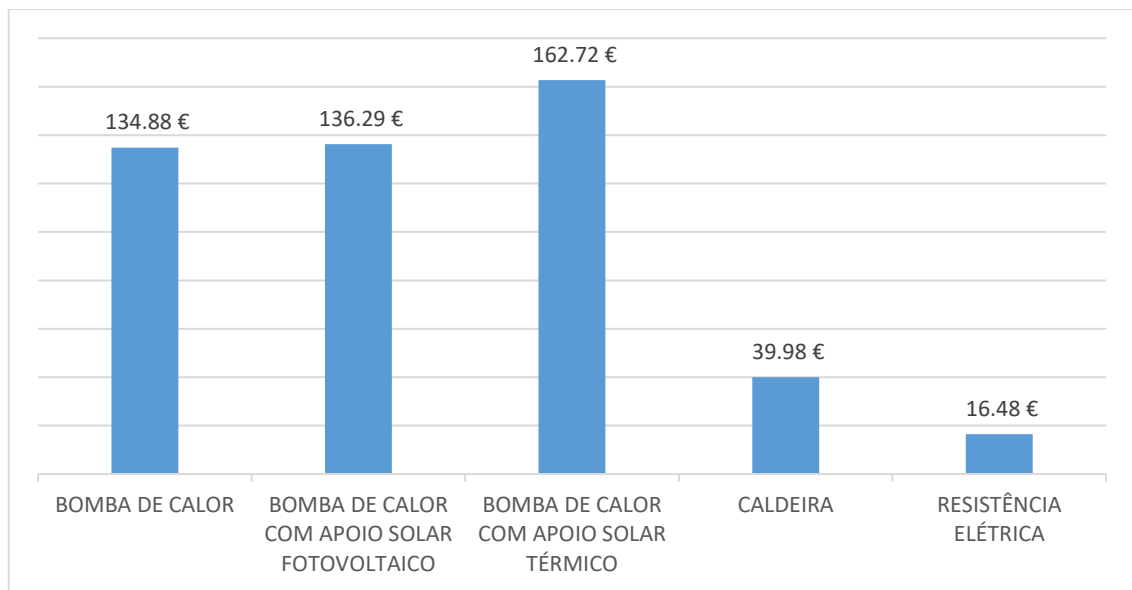


Figura 57-Custos manutenção (€)

No gráfico da figura 57 estão representados os custos de manutenção expectáveis num ano (1º ano).

Conforme descrito nos capítulos 3.5.2.3, 3.5.3.1, 3.5.4.2, 3.5.5.3 foi considerado um custo de manutenção anual no valor de 2% do valor de aquisição dos respetivos equipamentos.

### 4.3.3. Custos de operação

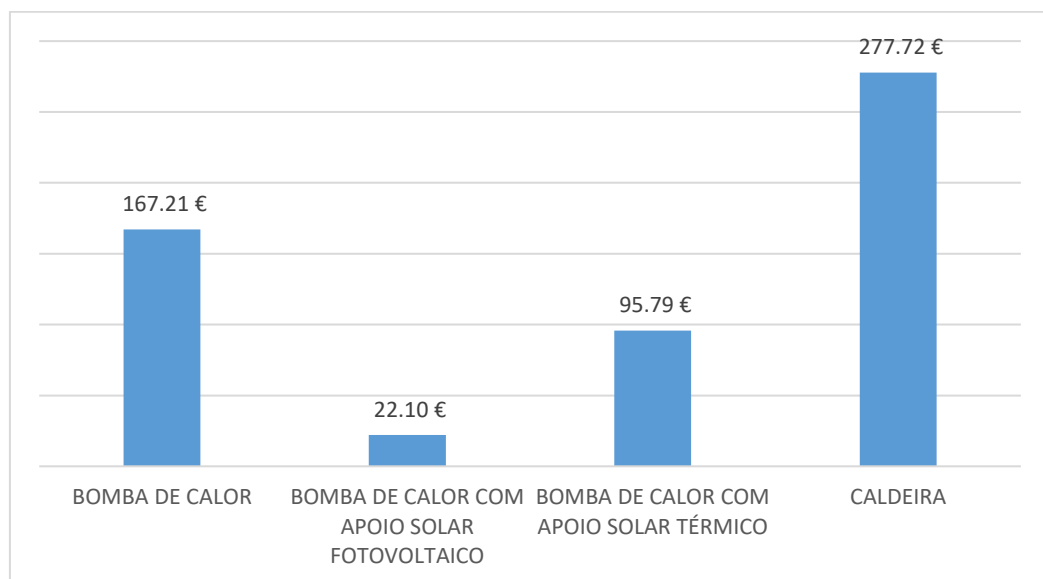


Figura 58-Custos de operação anual dos diferentes sistemas (€)

No gráfico da figura 58 estão representados os custos anuais de operação das 4 soluções para AQS e climatização.

É possível observar que a caldeira é o equipamento cujo custo de operação é mais elevado, sendo 39,79 % mais elevado do que o sistema de bomba de calor, 92,04% mais elevado do que o sistema bomba de calor com painel solar fotovoltaico e 65,51% mais elevado do que o sistema de bomba de calor com painel solar térmico.

#### 4.3.4. Análise de investimento a 20 anos

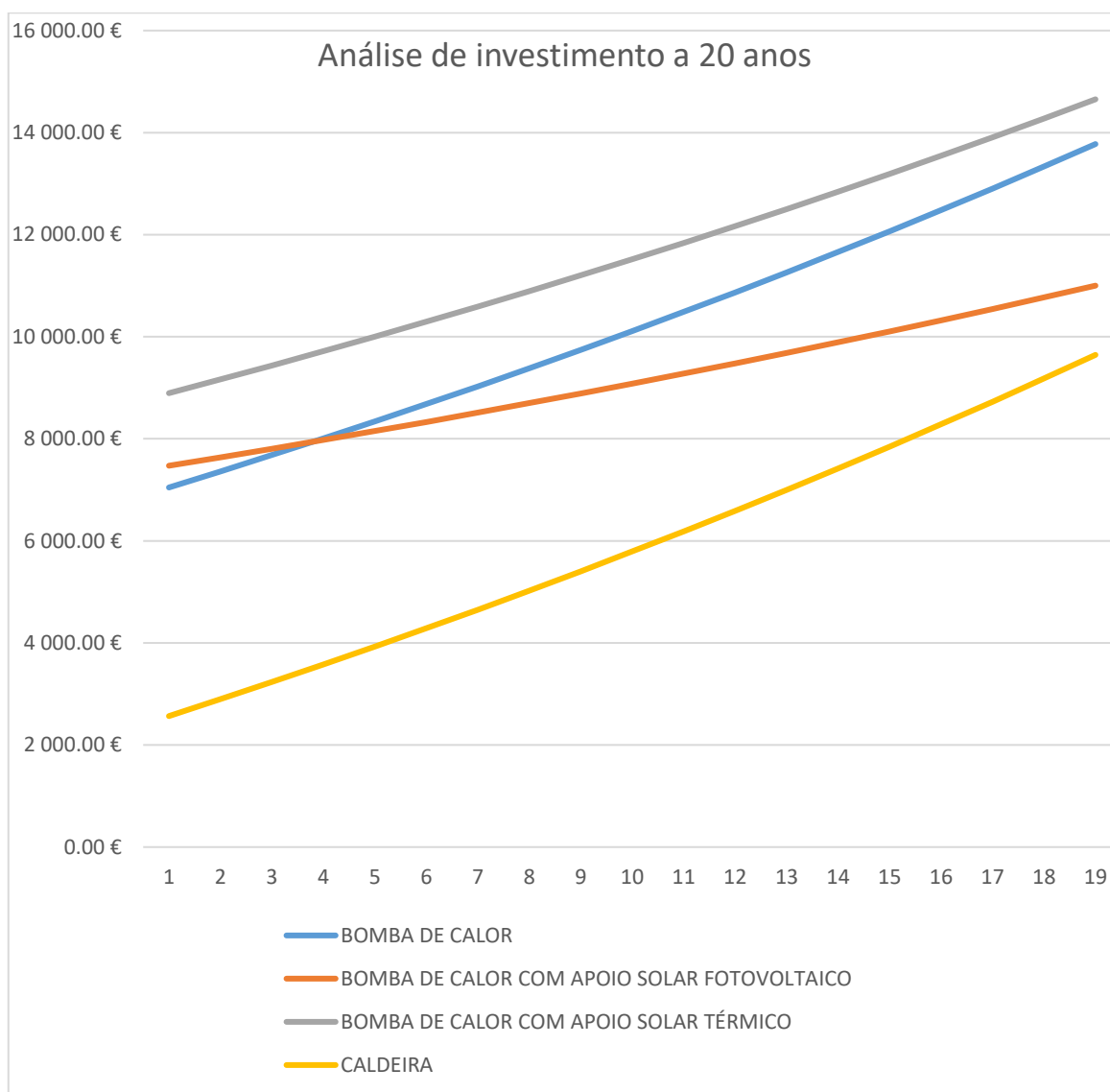


Figura 59-Análise de investimento a 20 anos (€), APÊNDICE U

No gráfico da figura 59 está representada uma análise de investimento ao longo de 20 anos. Nesta análise foi considerada uma inflação anual de 2%.

## Resultados e Discussão

Após uma análise ao gráfico, conclui-se que a caldeira de condensação, apesar do seu custo de operação mais elevado em relação às restantes soluções, é a opção cujo investimento ao longo de 20 anos é inferior.

Também é possível observar o momento em que as curvas que representam o investimento do sistema bomba de calor (azul) e sistema bomba de calor com painel solar fotovoltaico (laranja) se cruzam ao fim de aproximadamente 5,5 anos. Esta interseção representa o momento do retorno do investimento do sistema de bomba de calor com painel solar fotovoltaico.

De referir que as curvas do sistema bomba de calor e bomba de calor com painel solar térmico tendencialmente vão se aproximando, contudo, o sistema de bomba de calor com painel solar térmico é aquele cujo investimento é maior.

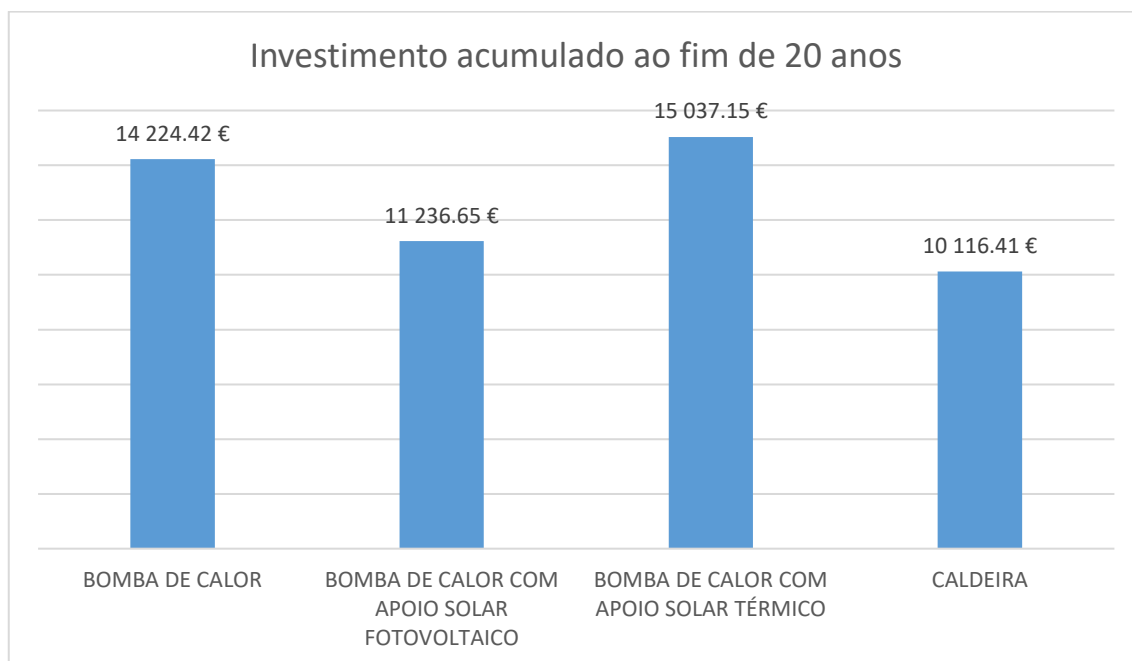


Figura 60-Investimento acumulado a 20 anos (€)

O gráfico da figura 60 representa o investimento acumulado das 4 soluções ao longo dos 20 anos.

Pode-se concluir que o investimento no sistema de bomba de calor com apoio solar térmico é o mais elevado, sendo 5,40 % superior ao do sistema de bomba de calor, 25,27 % em relação ao sistema de bomba de calor com painel solar fotovoltaico e 32,72 % em relação ao sistema de caldeira.



**Inserir esta página em branco, apenas se necessário, de modo que o próximo capítulo comece numa página à direita (ou seja com um número ímpar)**

[apagar este comentário]

## **5. Conclusão**

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões ao estudo feito nesta dissertação, assim como as limitações e trabalhos futuros, de modo a aprofundar o conhecimento neste tema.

### **5.1. Conclusões finais**

Após uma análise técnica e económica, conclui-se que, apesar dos avanços em eficiência e sustentabilidade das soluções baseadas em energia renovável, a caldeira de condensação apresenta-se como a opção economicamente mais viável no contexto estudado. Esta solução apresenta um custo total, ao longo de um período de 20 anos, inferior ao das restantes soluções.

Este resultado reforça a importância de considerar não apenas os aspetos técnicos e ambientais, mas também a viabilidade económica na seleção de sistemas energéticos, sobretudo em contextos residenciais e de pequena escala. Ainda assim, é importante salientar que fatores como o impacto ambiental, a evolução do preço da energia, os incentivos públicos e as metas de descarbonização poderão, no futuro, alterar este cenário de viabilidade.

### **5.2. Limitações e trabalhos futuros**

Embora o presente trabalho tenha contribuído para uma melhor compreensão e análise das soluções energéticas consideradas, existem ainda diversas vertentes que podem ser aprofundadas em investigações futuras.

Em primeiro lugar, recomenda-se a realização de uma análise de impacto ambiental completa (LCA – Life Cycle Assessment) para cada uma das soluções estudadas. Esta abordagem permitiria avaliar os efeitos ambientais associados ao ciclo de vida completo dos equipamentos, incluindo as fases de fabrico, operação e desmantelamento. Tal análise é fundamental para assegurar que as opções energéticas propostas não apenas sejam eficientes do ponto de vista técnico e económico, mas também sustentáveis a longo prazo.

Em segundo lugar, sugere-se a integração de sistemas de armazenamento de energia, nomeadamente baterias, em instalações com produção de energia solar fotovoltaica, visto que a inclusão de armazenamento pode aumentar significativamente a taxa de autoconsumo, reduzindo a dependência da rede elétrica e melhorando a eficiência global do sistema.

## Conclusão

Em terceiro lugar é sugerida a integração de sistemas de energia renovável na solução com a caldeira, tendo como objetivo diminuir o custo de operação, assim como aumentar a sustentabilidade ambiental da solução.

Por fim, outra linha de desenvolvimento relevante seria a consideração da venda de excedentes de eletricidade produzida pelos sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. A análise técnico-económica desta possibilidade permitiria avaliar a viabilidade de modelos híbridos de autoconsumo e venda, maximizando o retorno do investimento e contribuindo para a estabilidade e sustentabilidade do sistema elétrico.

**Inserir esta página em branco, apenas se necessário, de modo que o próximo capítulo comece numa página à direita (ou seja com um número ímpar)**

[apagar este comentário]

## Conclusão

## Referências

- Alejandra R. (2013, May 13). *SUPPLY HOUSE*. Venting Options for Boilers and Water Heaters.
- Baldi, S., Quang, T. Le, Holub, O., & Endel, P. (2017). Real-time monitoring energy efficiency and performance degradation of condensing boilers. *Energy Conversion and Management*, 136, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.016>
- BOSCH. (n.d.).
- CAIROX BULGARIA. (n.d.).
- Comissão Europeia. (2024). *Diretiva (UE) 2024/1275 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de abril de 2024, relativa ao desempenho energético dos edifícios, (reformulação), (Texto relevante para efeitos do EEE)*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
- COMISSÃO EUROPEIA. (2025). *REGULAMENTO (UE) 2024/573 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 7 de fevereiro de 2024 relativo aos gases fluorados com efeito de estufa, que altera a Diretiva (UE) 2019/1937 e que revoga o Regulamento (UE) n.º 517/2014*.
- Duffie, J. A. ., Beckman, W. A. ., & Blair, Nate. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. Wiley.
- EDP.
- GÁS SU.
- GROWATT. (n.d.).
- Guia Online France Air Portugal*. (n.d.).
- Harrison Kelly. (2024, September 18). *COAST*. How to Budget for Building Maintenance Costs. *Heating, ventilating, air conditioning and refrigeration (including corrigenda - April 2016) (No longer current but cited in Building Regulations guidance)*. (2005). Chartered Institution of Building Services Engineers.
- O Instalador. (2024, December 4). *Bombas de calor para melhoria da eficiência energética: desafios e oportunidades*. O Instalador.
- OJ\_L\_202400573\_PT\_TXT*. (n.d.).
- Phono*. (n.d.).
- Portaria n.º 17-A/2016 de 4 de fevereiro*. (n.d.).
- Portaria n.º 138-I/2021AMBIENTE E AÇÃO CLIMÁTICA E INFRAESTRUTURAS E HABITAÇÃO-*. (n.d.).
- PORTGÁS. (n.d.). *PORTGÁS*. Composição Do Gás Natural.
- Salvadori, R. (n.d.). *Bomba de calor na prática industrial: Uma tecnologia disruptiva para a descarbonização de calor*. Programa PotencializEE.
- SOLTERM. (n.d.).
- Vignali, G. (2017). Environmental assessment of domestic boilers: A comparison of condensing and traditional technology using life cycle assessment methodology. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2493–2508. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.025>
- WOLF. (n.d.).

## Referências

**Inserir esta página em branco, apenas se necessário, de modo que o próximo capítulo comece numa página à direita (ou seja com um número ímpar)**

[apagar este comentário]

# Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Francisco Miguel Macieira Moça Alves Rocha

ISEP, Porto, 14 de Junho de 2025

**Inserir esta página em branco, apenas se necessário, de modo que o próximo capítulo comece numa página à direita (ou seja com um número ímpar)**

[apagar este comentário]

## Apêndice A- Energia diária AQS

| MÊS       | ENERGIA DIÁRIA DE AQUECIMENTO AQS |
|-----------|-----------------------------------|
|           | (J)                               |
| JANEIRO   | 24781120,00                       |
| FEVEREIRO | 24781120,00                       |
| MARÇO     | 24111360,00                       |
| ABRIL     | 23441600,00                       |
| MAIO      | 22771840,00                       |
| JUNHO     | 21432320,00                       |
| JULHO     | 20762560,00                       |
| AGOSTO    | 20762560,00                       |
| SETEMBRO  | 21432320,00                       |
| OUTUBRO   | 22771840,00                       |
| NOVEMBRO  | 23441600,00                       |
| DEZEMBRO  | 24781120,00                       |

## Apêndice B- Energia mensal AQS

| MÊS       | ENERGIA MENSAL DE AQUECIMENTO AQS |
|-----------|-----------------------------------|
|           | (J)                               |
| JANEIRO   | 768214720,00                      |
| FEVEREIRO | 768214720,00                      |
| MARÇO     | 747452160,00                      |
| ABRIL     | 726689600,00                      |
| MAIO      | 705927040,00                      |
| JUNHO     | 664401920,00                      |
| JULHO     | 643639360,00                      |
| AGOSTO    | 643639360,00                      |
| SETEMBRO  | 664401920,00                      |
| OUTUBRO   | 705927040,00                      |
| NOVEMBRO  | 726689600,00                      |
| DEZEMBRO  | 768214720,00                      |

## Apêndice C- Energia num sistema de 2 painéis solares térmicos

| MÊS       | ENERGIA FORNECIDA | CARGA  | APOIO  |
|-----------|-------------------|--------|--------|
|           | kWh               | kWh    | kWh    |
| JANEIRO   | 146,00            | 400,11 | 254,11 |
| FEVEREIRO | 161,00            | 400,11 | 239,11 |
| MARÇO     | 199,00            | 389,3  | 190,3  |
| ABRIL     | 190,00            | 378,48 | 188,48 |
| MAIO      | 192,00            | 367,67 | 175,67 |
| JUNHO     | 180,00            | 346,04 | 166,04 |
| JULHO     | 180,00            | 335,23 | 155,23 |
| AGOSTO    | 180,00            | 335,23 | 155,23 |
| SETEMBRO  | 173,00            | 346,04 | 173,04 |
| OUTUBRO   | 176,00            | 367,67 | 191,67 |
| NOVEMBRO  | 159,00            | 378,48 | 219,48 |
| DEZEMBRO  | 116,00            | 400,11 | 284,11 |

## Apêndice D- Energia num sistema de 1 painel solar térmico

| MÊS              | ENERGIA FORNECIDA | CARGA  | APOIO  |
|------------------|-------------------|--------|--------|
|                  | kWh               | kWh    | kWh    |
| <b>Janeiro</b>   | 96,00             | 266,74 | 170,74 |
| <b>Fevereiro</b> | 113,00            | 266,74 | 153,74 |
| <b>Março</b>     | 155,00            | 259,53 | 104,53 |
| <b>Abril</b>     | 160,00            | 252,32 | 92,32  |
| <b>Maio</b>      | 168,00            | 245,11 | 76,11  |
| <b>Junho</b>     | 172,00            | 230,70 | 58,70  |
| <b>Julho</b>     | 176,00            | 223,49 | 47,49  |
| <b>Agosto</b>    | 172,00            | 223,49 | 51,49  |
| <b>Setembro</b>  | 160,00            | 230,70 | 70,70  |
| <b>Outubro</b>   | 134,00            | 245,11 | 111,11 |
| <b>Novembro</b>  | 104,00            | 252,32 | 148,32 |
| <b>Dezembro</b>  | 74,00             | 266,74 | 192,74 |

## Apêndice E- Energia radiação ângulo 33°

| <b>MÊS</b>       | <b>RADIAÇÃO HORIZONTAL</b> | <b>RADIAÇÃO INCLINADA</b> |
|------------------|----------------------------|---------------------------|
|                  | kWh                        | kWh/m2                    |
| <b>Janeiro</b>   | 55,00                      | 86,00                     |
| <b>Fevereiro</b> | 77,00                      | 111,00                    |
| <b>Março</b>     | 129,00                     | 161,00                    |
| <b>Abril</b>     | 162,00                     | 177,00                    |
| <b>Mai</b>       | 201,00                     | 197,00                    |
| <b>Junho</b>     | 222,00                     | 207,00                    |
| <b>Julho</b>     | 232,00                     | 221,00                    |
| <b>Agosto</b>    | 202,00                     | 212,00                    |
| <b>Setembro</b>  | 150,00                     | 181,00                    |
| <b>Outubro</b>   | 99,00                      | 133,00                    |
| <b>Novembro</b>  | 62,00                      | 97,00                     |
| <b>Dezembro</b>  | 43,00                      | 67,00                     |

## Apêndice F- Carga numa instalação com 1 e 2 painéis solares térmicos

| <b>MÊS</b>       | <b>CARGA NUMA INSTALAÇÃO DE 2 PST</b> | <b>CARGA NUMA INSTALAÇÃO DE 1 PST</b> |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                  | kWh                                   | kWh                                   |
| <b>Janeiro</b>   | 400,11                                | 266,74                                |
| <b>Fevereiro</b> | 400,11                                | 266,74                                |
| <b>Março</b>     | 389,3                                 | 259,53                                |
| <b>Abril</b>     | 378,48                                | 252,32                                |
| <b>Mai</b>       | 367,67                                | 245,11                                |
| <b>Junho</b>     | 346,04                                | 230,70                                |
| <b>Julho</b>     | 335,23                                | 223,49                                |
| <b>Agosto</b>    | 335,23                                | 223,49                                |
| <b>Setembro</b>  | 346,04                                | 230,70                                |
| <b>Outubro</b>   | 367,67                                | 245,11                                |
| <b>Novembro</b>  | 378,48                                | 252,32                                |
| <b>Dezembro</b>  | 400,11                                | 266,74                                |

## Apêndice G- Energia fornecida por uma instalação com 1 e 2 painéis solares térmicos

| <b>MÊS</b>       | <b>ENERGIA FORNECIDA POR 2 PST</b> | <b>ENERGIA FORNECIDA POR 1 PST</b> |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                  | kWh                                | kWh                                |
| <b>Janeiro</b>   | 146,00                             | 96,00                              |
| <b>Fevereiro</b> | 161,00                             | 113,00                             |
| <b>Março</b>     | 199,00                             | 155,00                             |
| <b>Abril</b>     | 190,00                             | 160,00                             |
| <b>Mai</b>       | 192,00                             | 169,00                             |
| <b>Junho</b>     | 180,00                             | 172,00                             |
| <b>Julho</b>     | 180,00                             | 176,00                             |
| <b>Agosto</b>    | 180,00                             | 172,00                             |
| <b>Setembro</b>  | 173,00                             | 160,00                             |
| <b>Outubro</b>   | 176,00                             | 134,00                             |
| <b>Novembro</b>  | 159,00                             | 104,00                             |
| <b>Dezembro</b>  | 116,00                             | 74,00                              |

## Apêndice H- Energia da bomba de calor numa instalação com 1 e 2 painéis solares térmicos

| <b>MÊS</b>       | <b>ENERGIA BC INSTALAÇÃO COM 2 PST</b> | <b>ENERGIA BC INSTALAÇÃO COM 1 PST</b> |
|------------------|--|--|
|                  | kWh                                    | kWh                                    |
| <b>Janeiro</b>   | 254,11                                 | 170,74                                 |
| <b>Fevereiro</b> | 239,11                                 | 153,74                                 |
| <b>Março</b>     | 190,30                                 | 104,53                                 |
| <b>Abril</b>     | 188,48                                 | 92,32                                  |
| <b>Mai</b>       | 175,67                                 | 76,11                                  |
| <b>Junho</b>     | 166,04                                 | 58,70                                  |
| <b>Julho</b>     | 155,23                                 | 47,49                                  |
| <b>Agosto</b>    | 155,23                                 | 51,49                                  |
| <b>Setembro</b>  | 173,04                                 | 70,70                                  |
| <b>Outubro</b>   | 191,67                                 | 111,11                                 |
| <b>Novembro</b>  | 219,48                                 | 148,32                                 |
| <b>Dezembro</b>  | 284,11                                 | 192,74                                 |

## Apêndice I- Energia fornecida numa instalação com 1 painel solar fotovoltaico

| <b>MÊS</b>       | <b>ENERGIA FORNECIDA</b> | <b>RADIAÇÃO INCLINADA</b> |
|------------------|--------------------------|---------------------------|
|                  | kWh                      | kWh/m <sup>2</sup>        |
| <b>Janeiro</b>   | 47,24                    | 86,00                     |
| <b>Fevereiro</b> | 60,97                    | 111,00                    |
| <b>Março</b>     | 87,89                    | 160,00                    |
| <b>Abril</b>     | 97,22                    | 177,00                    |
| <b>Mai</b>       | 108,21                   | 197,00                    |
| <b>Junho</b>     | 114,25                   | 208,00                    |
| <b>Julho</b>     | 121,39                   | 221,00                    |
| <b>Agosto</b>    | 116,45                   | 212,00                    |
| <b>Setembro</b>  | 99,42                    | 181,00                    |
| <b>Outubro</b>   | 73,05                    | 133,00                    |
| <b>Novembro</b>  | 53,28                    | 97,00                     |
| <b>Dezembro</b>  | 36,80                    | 67,00                     |

## Apêndice J- Energia num sistema de 1 painel solar fotovoltaico

| <b>MÊS</b>       | <b>ENERGIA FORNECIDA PELO PSF</b> | <b>ENERGIA ELÉTRICA FORNECIDA PELA REDE</b> |
|------------------|-----------------------------------|---|
|                  | kWh                               | kWh   |
| <b>Janeiro</b>   | 47,24                             | 23,66                                       |
| <b>Fevereiro</b> | 60,97                             | 9,92  |
| <b>Março</b>     | 87,89                             | -18,91                                      |
| <b>Abril</b>     | 97,22                             | -30,16                                      |
| <b>Mai</b>       | 108,21                            | -43,06                                      |
| <b>Junho</b>     | 114,25                            | -52,94                                      |
| <b>Julho</b>     | 121,39                            | -61,99                                      |
| <b>Agosto</b>    | 116,45                            | -57,05                                      |
| <b>Setembro</b>  | 99,42                             | -38,10                                      |
| <b>Outubro</b>   | 73,05                             | -7,91                                       |
| <b>Novembro</b>  | 53,28                             | 13,78                                       |
| <b>Dezembro</b>  | 36,80                             | 34,09                                       |

## Apêndice K- Custo operação bomba de calor (AQS)

| <b>MÊS</b>       | <b>CUSTO MENSAL OPERAÇÃO BOMBA DE CALOR</b> |
|------------------|---|
|                  | €   |
| <b>Janeiro</b>   | 14,30                                       |
| <b>Fevereiro</b> | 14,30                                       |
| <b>Março</b>     | 13,92                                       |
| <b>Abril</b>     | 13,55                                       |
| <b>Mai</b>       | 13,17                                       |
| <b>Junho</b>     | 12,42                                       |
| <b>Julho</b>     | 12,04                                       |
| <b>Agosto</b>    | 12,04                                       |
| <b>Setembro</b>  | 12,42                                       |
| <b>Outubro</b>   | 13,17                                       |
| <b>Novembro</b>  | 13,55                                       |
| <b>Dezembro</b>  | 14,30                                       |

## Apêndice L- Custo operação bomba de calor (climatização)

| MÊS              | CUSTO MENSAL OPERAÇÃO |
|------------------|-----------------------|
|                  | €                     |
|                  |                       |
| <b>Janeiro</b>   | 1,00                  |
| <b>Fevereiro</b> | 1,00                  |
| <b>Março</b>     | 1,00                  |
| <b>Abril</b>     | 1,00                  |
| <b>Maio</b>      | 0,00                  |
| <b>Junho</b>     | 0,00                  |
| <b>Julho</b>     | 0,00                  |
| <b>Agosto</b>    | 0,00                  |
| <b>Setembro</b>  | 1,00                  |
| <b>Outubro</b>   | 1,00                  |
| <b>Novembro</b>  | 1,00                  |
| <b>Dezembro</b>  | 1,00                  |

## **Apêndice M- Custo mensal operação sistema bomba de calor com painel solar térmico (AQS)**

| <b>MÊS</b>       | <b>CUSTO MENSAL DE OPERAÇÃO</b> |
|------------------|---------------------------------|
|                  | €                               |
| <b>Janeiro</b>   | 11,51                           |
| <b>Fevereiro</b> | 10,40                           |
| <b>Março</b>     | 7,18                            |
| <b>Abril</b>     | 6,39                            |
| <b>Maio</b>      | 5,33                            |
| <b>Junho</b>     | 4,19                            |
| <b>Julho</b>     | 3,45                            |
| <b>Agosto</b>    | 3,72                            |
| <b>Setembro</b>  | 4,97                            |
| <b>Outubro</b>   | 7,61                            |
| <b>Novembro</b>  | 10,05                           |
| <b>Dezembro</b>  | 12,95                           |

## Apêndice N- Energia num sistema com painel solar térmico (climatização)

| <b>MÊS</b>       | <b>CARGA</b> | <b>ENERGIA FORNECIDA PELO PST</b> | <b>ENERGIA FORNCIDA PELA REDE À BC</b> |
|------------------|--------------|-----------------------------------|--|
|                  | kWh          | kWh                               | kWh                                    |
| <b>Janeiro</b>   | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Fevereiro</b> | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Março</b>     | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Abril</b>     | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Mai</b>       | 0,00         | 0,00                              | 0,00                                   |
| <b>Junho</b>     | 0,00         | 0,00                              | 0,00                                   |
| <b>Julho</b>     | 0,00         | 0,00                              | 0,00                                   |
| <b>Agosto</b>    | 0,00         | 0,00                              | 0,00                                   |
| <b>Setembro</b>  | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Outubro</b>   | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Novembro</b>  | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Dezembro</b>  | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |

## **Apêndice O- Custo mensal operação sistema bomba de calor com painel solar térmico (climatização)**

| <b>MÊS</b>       | <b>CUSTO MENSAL OPERÇÃO</b> |
|------------------|-----------------------------|
|                  | €                           |
| <b>Janeiro</b>   | 1,00                        |
| <b>Fevereiro</b> | 1,00                        |
| <b>Março</b>     | 1,00                        |
| <b>Abril</b>     | 1,00                        |
| <b>Mai</b>       | 0,00                        |
| <b>Junho</b>     | 0,00                        |
| <b>Julho</b>     | 0,00                        |
| <b>Agosto</b>    | 0,00                        |
| <b>Setembro</b>  | 1,00                        |
| <b>Outubro</b>   | 1,00                        |
| <b>Novembro</b>  | 1,00                        |
| <b>Dezembro</b>  | 1,00                        |

## **Apêndice P- Custo mensal operação sistema de bomba de calor com painel solar fotovoltaico (AQS)**

| <b>MÊS</b>       | <b>CUSTO MENSAL OPERÇÃO</b> |
|------------------|-----------------------------|
|                  | €                           |
| <b>Janeiro</b>   | 5,01                        |
| <b>Fevereiro</b> | 2,30                        |
| <b>Março</b>     | 0,00                        |
| <b>Abril</b>     | 0,00                        |
| <b>Maiο</b>      | 0,00                        |
| <b>Junho</b>     | 0,00                        |
| <b>Julho</b>     | 0,00                        |
| <b>Agosto</b>    | 0,00                        |
| <b>Setembro</b>  | 0,00                        |
| <b>Outubro</b>   | 0,00                        |
| <b>Novembro</b>  | 3,06                        |
| <b>Dezembro</b>  | 7,06                        |

## Apêndice Q- Energia sistema de bomba de calor com painel solar fotovoltaico (climatização)

| <b>MÊS</b>       | <b>CARGA</b> | <b>ENERGIA FORNECIDA PELO PSF</b> | <b>ENERGIA FORNCIDA PELA REDE À BC</b> |
|------------------|--------------|-----------------------------------|--|
|                  | kWh          | kWh                               | kWh                                    |
| <b>Janeiro</b>   | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Fevereiro</b> | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Março</b>     | 10,00        | 10,00                             | 0,00                                   |
| <b>Abril</b>     | 10,00        | 10,00                             | 0,00                                   |
| <b>Mai</b>       | 0,00         | 0,00                              | 0,00                                   |
| <b>Junho</b>     | 0,00         | 0,00                              | 0,00                                   |
| <b>Julho</b>     | 0,00         | 0,00                              | 0,00                                   |
| <b>Agosto</b>    | 0,00         | 0,00                              | 0,00                                   |
| <b>Setembro</b>  | 10,00        | 10,00                             | 0,00                                   |
| <b>Outubro</b>   | 10,00        | 5,41                              | 1,52                                   |
| <b>Novembro</b>  | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |
| <b>Dezembro</b>  | 10,00        | 0,00                              | 3,32                                   |

## **Apêndice R- Custo mensal operação sistema de bomba de calor com painel solar fotovoltaico (climatização)**

| <b>MÊS</b>       | <b>CUSTO MENSAL OPERÇÃO</b> |
|------------------|-----------------------------|
|                  | €                           |
| <b>Janeiro</b>   | 1,00                        |
| <b>Fevereiro</b> | 1,00                        |
| <b>Março</b>     | 0,00                        |
| <b>Abril</b>     | 0,00                        |
| <b>Mai</b>       | 0,00                        |
| <b>Junho</b>     | 0,00                        |
| <b>Julho</b>     | 0,00                        |
| <b>Agosto</b>    | 0,00                        |
| <b>Setembro</b>  | 0,00                        |
| <b>Outubro</b>   | 0,65                        |
| <b>Novembro</b>  | 1,00                        |
| <b>Dezembro</b>  | 1,00                        |

## Apêndice S- Custo mensal operação caldeira (AQS)

| <b>MÊS</b>       | <b>CUSTO MENSAL OPERÇÃO CALDEIRA</b> |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | €                                    |
| <b>Janeiro</b>   | 20,95                                |
| <b>Fevereiro</b> | 20,95                                |
| <b>Março</b>     | 20,47                                |
| <b>Abril</b>     | 19,97                                |
| <b>Mai</b>       | 19,50                                |
| <b>Junho</b>     | 18,50                                |
| <b>Julho</b>     | 18,03                                |
| <b>Agosto</b>    | 18,03                                |
| <b>Setembro</b>  | 18,50                                |
| <b>Outubro</b>   | 19,50                                |
| <b>Novembro</b>  | 19,97                                |
| <b>Dezembro</b>  | 20,95                                |

## Apêndice T- Custo mensal operação caldeira (climatização)

| <b>MÊS</b>       | <b>CUSTO MENSAL OPERÇÃO CALDEIRA</b> |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | €                                    |
|                  |                                      |
| <b>Janeiro</b>   | 5,30                                 |
| <b>Fevereiro</b> | 5,30                                 |
| <b>Março</b>     | 5,30                                 |
| <b>Abril</b>     | 5,30                                 |
| <b>Mai</b>       | 0,00                                 |
| <b>Junho</b>     | 0,00                                 |
| <b>Julho</b>     | 0,00                                 |
| <b>Agosto</b>    | 0,00                                 |
| <b>Setembro</b>  | 5,30                                 |
| <b>Outubro</b>   | 5,30                                 |
| <b>Novembro</b>  | 5,30                                 |
| <b>Dezembro</b>  | 5,30                                 |

## Apêndice U- Análise de investimento ao longo de 20 anos

| ANÁLISE INVESTIMENTO AO LONGO DE 20 ANOS |          |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|----------|
|  | BC       | BC + PSF | BC + PST | CALDEIRA |
| €  |          |          |          |          |
| ANO                                      |          |          |          |          |
| 1  | 7045,84  | 7472,89  | 8894,25  | 2566,70  |
| 2  | 7360,13  | 7637,67  | 9163,20  | 2897,24  |
| 3  | 7680,70  | 7805,75  | 9437,53  | 3234,39  |
| 4  | 8007,69  | 7977,19  | 9717,34  | 3578,29  |
| 5  | 8341,22  | 8152,06  | 10002,75 | 3929,06  |
| 6  | 8681,42  | 8330,43  | 10293,86 | 4286,84  |
| 7  | 9028,42  | 8512,37  | 10590,80 | 4651,79  |
| 8  | 9382,37  | 8697,94  | 10893,68 | 5024,03  |
| 9  | 9743,39  | 8887,22  | 11202,61 | 5403,71  |
| 10                                       | 10111,63 | 9080,30  | 11517,73 | 5790,99  |
| 11                                       | 10487,24 | 9277,23  | 11839,14 | 6186,02  |
| 12                                       | 10870,35 | 9478,10  | 12166,99 | 6588,94  |
| 13                                       | 11261,14 | 9682,99  | 12501,39 | 6999,93  |
| 14                                       | 11659,73 | 9891,97  | 12842,48 | 7419,13  |
| 15                                       | 12066,30 | 10105,14 | 13190,39 | 7846,72  |
| 16                                       | 12481,00 | 10322,57 | 13545,26 | 8282,86  |
| 17                                       | 12904,00 | 10544,35 | 13907,23 | 8727,72  |
| 18                                       | 13335,45 | 10770,56 | 14276,43 | 9181,48  |
| 19                                       | 13775,53 | 11001,30 | 14653,02 | 9644,32  |
| 20                                       | 14224,42 | 11236,65 | 15037,15 | 10116,41 |

