

• U



C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo comparativo de alternativas baseadas em energia renovável para produção de AQS no sector residencial**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

**Autor**

**Diogo Fernando Ferreira Martins**

**Orientador**

**Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites**, Professor da Universidade de Coimbra

**Coorientador**

**Nelson da Silva Brito**, Arquiteto

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites</b> <b>Professor da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, setembro de 2016**

## **Agradecimentos**

Ao longo dos meus vinte e três anos detenho uma enorme gratidão a todos aqueles que contribuíram não só para o meu sucesso académico como a nível pessoal. Este é sem dúvida o ponto mais alto da minha formação académica resultado de muito esforço e dedicação.

Em primeiro, quero agradecer ao meu orientador de dissertação, Professor Gonçalo Brites pela proposta, motivação e conhecimento transmitido do tema ao longo destes oito meses. Gostaria igualmente de agradecer toda a sua paciência e disponibilidade demonstrada mesmo em período de descanso do ano letivo. Ao arquiteto Nelson Brito deixo o meu agradecimento pela disponibilização de dados da caracterização do edifício, bem como todas as ideias sugeridas no desenvolvimento da dissertação.

Aos meus pais agradeço todos os valores transmitidos, bem como o esforço, dedicação e motivação quando tudo parecia complicar-se. Agradeço à minha namorada Cátia Simões toda a paciência, compreensão e motivação nos momentos mais difíceis. A toda a minha família deixo o meu apreço por estar presente em todos os momentos.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer a todos os meus amigos. Aos que me acompanharam desde sempre e fazem parte da minha vida, em especial à Ana Paula Silva pela ajuda e experiência transmitida na realização da dissertação. Agradeço igualmente as amizades desenvolvidas em Coimbra, em particular aos meus colegas de casa com os quais tive oportunidade de conviver diariamente e partilhar emoções.

## Resumo

A presente dissertação compreende o estudo e análise energética de alternativas de produção de energia renovável num edifício de habitação antigo, situado no centro histórico da cidade de Coimbra, na zona protegida pela UNESCO. O estudo tem como finalidade encontrar opções vantajosas, económica e energeticamente, que permitam contribuir para o cumprimento das metas impostas pela União Europeia.

Este estudo dá continuidade a projetos anteriores da autoria do Nelson da Silva Brito (Arq.) e do Gonçalo Brites (Eng.) [1], e da Sara Henriques (Eng.) [2], explorando alternativas de energia renovável para a produção de águas quentes sanitárias

O estudo energético dos diferentes sistemas de preparação de AQS foi realizado através da modelação destes sistemas no *software EnergyPlus 8.5*. A simulação inicial compara três tipos de sistemas de preparação de AQS viáveis para serem instalados no edifício habitacional, considerando uma ocupação de 2 pessoas: um cilindro elétrico (considerado como a solução de base e que serve para comparação dos sistemas com energias renováveis), um sistema solar térmico e uma bomba de calor com painéis fotovoltaicos. A análise dos resultados da simulação possibilita a quantificação detalhada dos gastos energéticos e monetários no aquecimento da água ao longo do ano. Foram igualmente realizados estudos para avaliação do impacto de maiores consumos de AQS na eficiência do sistema solar térmico e o solar fotovoltaico com bomba de calor, e testadas medidas como a instalação de temporizadores e de baterias, bem como a alteração da inclinação dos painéis.

Esta dissertação demonstra que as alternativas baseadas em energias renováveis na preparação de AQS representam um contributo para alcançar edifícios de balanço energético quase nulo, com um desempenho energético sustentável.

**Palavras-chave:** Energias Renováveis, Eficiência Energética, nZEB, Sistema Solar Térmico, Sistema Solar Fotovoltaico, Bomba de Calor, AQS.

## Abstract

This dissertation presents an energetic and economical analysis of renewable energy alternatives for Domestic Hot Water (DHW) production in an old building, located in Coimbra's historic center - UNESCO protected area. This study aims to find economical and energetic advantageous options that contribute to the targets set by the European Union.

This study is a continuation of previous projects performed by the Nelson da Silva Brito (Arc.) and the Gonçalo Brites (Eng.) [1], and Sara Henriques (Eng.) [2], exploring renewable energy alternatives for the production of domestic hot water.

The energetic analysis of the different DHW production systems was performed through different system simulations using EnergyPlus 8.5. The initial simulations compare three types of feasible DHW preparation systems to be installed on the house with two occupants. The systems simulated in EnergyPlus are an electrical cylinder (considered the correspondent base solution and used for comparison purposes), a solar thermal system and a heat pump with photovoltaic panels. The analysis of the simulation results provides a detailed quantification of energy and operating costs on heating water through the year. Studies were also conducted in order to assess the impact of higher DHW consumption in the solar thermal and solar photovoltaic with heat pump system efficiency, and to test measures such as installing timer and batteries, as well as the modification of the tilt angle of PV panels.

This dissertation aims to demonstrate alternatives based on renewable energy in the preparation of DHW to contribute for nearly zero building balance, with a sustainable energy performance.

**Key-words:** Renewable Energy, Energy Efficiency, nZEB, Solar Thermal System, Solar Photovoltaic System, Heat Pump, DHW.

## Índice

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE TABELAS .....	VI
SIMBOLOGIA E SIGLAS .....	VII
SIMBOLOGIA .....	VII
SIGLAS .....	VIII
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.3. METODOLOGIA .....	4
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	5
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>7</b>
2.1. EDIFÍCIOS NZEB .....	7
2.2. PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL .....	7
2.2.1. <i>Energia solar fotovoltaica</i> .....	8
2.2.2. <i>Bomba de calor</i> .....	9
2.2.3. <i>Sistemas solares térmicos</i> .....	10
<b>3. MODELO DE SIMULAÇÃO ENERGÉTICA.....</b>	<b>14</b>
3.1. EDIFÍCIO HABITACIONAL .....	14
3.1.1. <i>Caracterização física do edifício habitacional</i> .....	15
3.1.2. <i>Sistema de aquecimento de águas sanitárias</i> .....	18
3.2. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA INICIAL .....	19
3.2.1. <i>Sistema com cilindro elétrico</i> .....	19
3.2.2. <i>Sistema solar térmico</i> .....	21
3.2.3. <i>Sistema fotovoltaico com bomba de calor para AQS</i> .....	26
3.3. VARIAÇÃO DOS CONSUMOS DE AQS .....	32
3.3.1. <i>Sistema solar térmico</i> .....	32
3.3.2. <i>Sistema solar fotovoltaico com implementação de uma bomba de calor</i>	
36	
<b>4. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA OTIMIZADA .....</b>	<b>42</b>
4.1. INSTALAÇÃO DE UM TEMPORIZADOR NA BOMBA DE CALOR .....	42
4.2. ALTERAÇÃO DA INCLINAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS .....	46
4.3. INSTALAÇÃO DE BATERIAS .....	50
<b>5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>56</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>67</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema fotovoltaico ligado à rede .....	8
Figura 2.2 - Ciclo de aquecimento da bomba de calor .....	9
Figura 2.3 - Eficiência de um sistema solar térmico em função da diferença de temperatura .....	11
Figura 2.4 - Sistema de circulação forçada.....	12
Figura 2.5 - Sistema de circulação por termossifão.....	13
Figura 3.1 - Vista da habitação alvo de estudo .....	15
Figura 3.2 - Alçado principal da habitação.....	16
Figura 3.3 - Alçado secundário da habitação.....	17
Figura 3.4 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica no sistema com cilindro elétrico .....	18
Figura 3.5 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica no sistema solar térmico .....	22
Figura 3.6 - Esquema do circuito elétrico do sistema solar fotovoltaico com bomba de calor .....	26
Figura 3.7 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica utilizando uma bomba de calor.....	27
Figura 3.8 - Curvas do COP da bomba de calor .....	28
Figura 3.9 - Curvas da capacidade de aquecimento da bomba de calor .....	28
Figura 4.1 - Esquema do circuito elétrico do sistema solar fotovoltaico com baterias e bomba de calor.....	51
Figura A.1 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica no sistema com cilindro elétrico .....	75
Figura A.2 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica no sistema solar térmico .....	76
Figura A.3 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica utilizando uma bomba de calor.....	77
Figura A.4 - Esquema do circuito elétrico do sistema solar fotovoltaico com bomba de calor .....	77
Figura A.5 - Esquema do circuito elétrico do sistema solar fotovoltaico com baterias e bomba de calor.....	78

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Ponto de situação Portugal 2020 .....	1
Tabela 3.1 - Caudal de água dos equipamentos domésticos.....	18
Tabela 3.2 - Resultados energéticos do sistema com cilindro elétrico .....	20
Tabela 3.3 - Custos do sistema com cilindro elétrico.....	20
Tabela 3.4 - Especificações das componentes do sistema solar térmico .....	22
Tabela 3.5 - Resultados energéticos do sistema solar térmico .....	23
Tabela 3.6 - Custos do sistema solar térmico e cilindro elétrico. ....	24
Tabela 3.7 - Especificações do sistema solar fotovoltaico, bomba de calor e inversor..	27
Tabela 3.8 - Resultados energéticos do sistema solar fotovoltaico com implementação de uma bomba de calor .....	29
Tabela 3.9 - Custos do sistema de bomba de calor sem painéis fotovoltaicos, com painéis fotovoltaicos e do sistema com cilindro elétrico .....	30
Tabela 4.1 - Resultados energéticos do sistema solar fotovoltaico com temporizador implementado na bomba de calor .....	43
Tabela 4.2 - Custos do sistema solar fotovoltaico com implementação de temporizador na bomba de calor .....	45
Tabela 4.3 - Resultados energéticos do sistema solar fotovoltaico com alteração dos painéis fotovoltaicos para 52° .....	47
Tabela 4.4 - Custos do sistema solar fotovoltaico com inclinação dos painéis fotovoltaicos para 52° .....	49
Tabela 4.5 - Especificações das componentes constituintes do sistema solar fotovoltaico com implementação de baterias .....	51
Tabela 4.6 - Resultados energéticos do sistema solar fotovoltaico com implementação de baterias .....	52
Tabela 4.7 - Custos do sistema solar fotovoltaico com implementação de baterias.....	53
Tabela A.1 - Fração de ocupação do piso 00 ao longo do ano .....	67
Tabela A.2 - Fração de ocupação do piso 01 ao longo do ano .....	68
Tabela A.3 - Fração de ocupação do piso 03 ao longo do ano .....	69
Tabela A.4 - Perfil de utilização da AQ no lavatório .....	70
Tabela A.5 - Perfil de utilização da AQ no chuveiro .....	71
Tabela A.6 - Perfil de utilização da AQ na cozinha .....	72
Tabela A.7 - Perfil de utilização da AQ na máquina de lavar roupa .....	73

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

€ - Euros

$a_0$  – Rendimento ótico do coletor solar

$a_1$  – Coef. linear global de perdas térmicas do coletor solar  $[W/(m^2 \cdot K)]$

$a_2$  – Coef. quadrático global de perdas térmicas do coletor solar  $[W/(m^2 \cdot K)]$

COP (Coefficient of performance) – Coeficiente de desempenho

$I$  – Corrente elétrica [A]

$I_{sc}$  – Intensidade de curto-circuito [A]

$P$  – Potência [W]

$V$  – Tensão [V]

$V_{oc}$  – Tensão de circuito aberto [V]

## Siglas

Arq – Arquiteto

AQS – Aguas Quentes Sanitárias

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*

BC – Bomba de Calor

CELE – Comércio Europeu de Licença de Emissão

DOE – *The United States Department of Energy*

Eng – Engenheiro

ER – Energias Renováveis

GEE – Gases Efeito de Estufa

INE – Instituto Nacional de Estatística

IVA – Imposto de Valor Acrescentado

nZEB – *Nearly Zero Energy Building*

PT – Portugal

PV – Sistema Solar Fotovoltaico

REBC – Roteiro Europeu Baixo Carbono

UE – União Europeia

UNESCO - *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*

DHW – *Domestic Water Water*

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento e motivação

O crescimento económico, evolução industrial e o desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos estão associados a um intensivo consumo de energia proveniente de fontes fósseis. O recurso a fontes de energia de origem fóssil, acumuladas ao longo de milhões de anos, contribui para o aumento da temperatura média do planeta pelas emissões de CO<sub>2</sub> que resultam da sua combustão. A civilização enfrenta cada vez mais problemas ambientais graves, com consequências potencialmente catastróficas para as próximas gerações.

A União Europeia (UE), com o objetivo de melhorar a situação ambiental e económica da zona euro, criou planos e estratégias de longo prazo para promover um crescimento sustentável e eficiente. Estes planos consistem na utilização de energia renovável (ER) em detrimento da energia fóssil, reduzindo assim o consumo de recursos naturais e a compra de energia importada fora da comunidade europeia. Esta estratégia permite, por um lado, resolver vários problemas relacionados com as alterações climáticas e por outro tornar a economia mais competitiva. Para sua concretização foi criado o Horizonte 2020 - Programa-Quadro Comunitário de Investigação & Inovação [3], um programa financeiro que visa garantir a competitividade global da Europa, e o cumprimento da Diretiva 2012/27/UE de 25 de outubro de 2012 [4] define que até ao ano de 2020 sejam alcançadas as seguintes metas:

- Melhoria em 20% a eficiência energética;
- Aumento de 20% no consumo energético proveniente de fontes renováveis;
- Redução de 20% nas emissões de gases de efeito de estufa, relativamente aos dados registados em 1990

A tabela 1.1 relata o último ponto de situação das metas em Portugal. [5]

Objetivo	Indicadores	2013	Meta PT2020
Clima/Energia	Eficiência energética (ganho % no consumo de energia primária face a 2005)	24.6%	20.0%
	% Energias renováveis no consumo de energia final	24.6%	31.0%
	Emissões de Gases de Efeito de Estufa (variação % face a 2005 em emissões não CELE)	-12.0%	+1%

Tabela 1.1 - Ponto de situação Portugal 2020

De acordo com o ponto de situação das metas em Portugal, realizado em abril de 2014, Portugal cumpre atualmente dois indicadores, como é possível verificar, sendo que a eficiência energética melhorou 24.6% (4.6% acima da meta a atingir em 2020) e a emissão dos gases de efeito de estufa diminuiu 12.0% (a meta mínima seria de aumentar a emissão dos gases de efeito de estufa apenas 1%). A percentagem de energia renovável no consumo de energia final situa-se ainda abaixo da meta a atingir, estando atualmente quantificada em 24.6% (menos 6.4% do exigido pela UE).

A Diretiva 2012/27/UE de 14 de novembro de 2012 contribui de igual modo para a concretização das metas estabelecidas no Roteiro Europeu Baixo Carbono 2050 (REBC) [6], em que os países desenvolvidos terão um limite do aumento de temperatura média global de 2°C, sendo que deverão reduzir até 2050 a emissão de gases de efeito de estufa entre 80 a 95%, em comparação com os níveis medidos em 1990. Esta meta inclui etapas intermédias onde se preveem reduções de 25%, 40% e 60% até 2020, 2030 e 2040, respetivamente.

No entanto, para Portugal, segundo uma análise efetuada e de acordo com a elaboração do Roteiro Nacional de Baixo Carbono [7] foi determinado pela Resolução de Conselho de Ministros n.º 93/2010, de 26 de Novembro que apenas se prevê uma redução das emissões nacionais de GEE entre 50 a 60%, face aos níveis de 1990 estipulado no REBC, mas que permite alcançar uma redução de aproximadamente 2 toneladas de dióxido de carbono equivalente por habitante (CO<sub>2</sub> eq/hab).

Deste modo, teremos uma Europa economicamente mais competitiva, com baixos consumos e custos de energia, menores emissões de GEE e elevada eficiência energética, garantindo a continuidade da qualidade de vida da população europeia com menores impactes ambientais.

Dados publicados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), no ano de 2013 [8] referem que o setor doméstico foi responsável por 26.2% do consumo de energia final na UE, sendo que em Portugal esse mesmo consumo foi de 17.3%. No ano de 2014 [9], verificou-se um decréscimo do consumo de energia final relativo ao setor doméstico em 1.5% atingindo a marca dos 15.8%, dos quais 26.4% correspondem ao consumo final de eletricidade. Os edifícios na União Europeia são responsáveis por 40% do consumo de energia final total na Europa, o que conseqüentemente equivale a 36% das emissões de CO<sub>2</sub>. Geralmente os edifícios existentes consomem mais energia que os edifícios novos. Atualmente na UE 35% dos edifícios apresentam mais de 50 anos de idade, exigindo um

melhoramento da eficiência energética de modo a reduzir o consumo energético de 5 a 6% e menores emissões de CO<sub>2</sub> em cerca de 5%. [10]

Os edifícios localizados em Portugal têm um consumo de energia final total equivalente a 30%. Contudo, é neste setor que pode ocorrer uma elevada poupança de energia, pois cerca de 50% do atual consumo pode ser reduzido através de medidas de eficiência energética. [11]

Segundo dados do INE no ano de 2014 [12], existiam em Portugal cerca de 3 588 239 edifícios de habitação, correspondendo a um acréscimo de 0.2% comparativamente a 2013. Estes valores revelam o peso que os edifícios de habitação existentes têm nas metas da eficiência energética que os países europeus se comprometeram a atingir.

A presente dissertação contribui para o estudo e avaliação de métodos de melhoria do desempenho energético de um edifício habitacional já existente, focando-se nos sistemas de preparação de AQS com recurso a fontes de energia renováveis.

## 1.2. Objetivos

A presente dissertação, pretende comparar energeticamente e economicamente sistemas de preparação de águas quentes sanitárias através de energias renováveis, possivelmente oferecendo um pequeno contributo nas metas impostas pela União Europeia, particularmente na Diretiva 2012/27/UE de 14 de novembro de 2012 e REBC 2050. Assim sistemas solares térmicos e sistemas solares fotovoltaicos com bomba de calor serão analisados, de modo a aumentar a eficiência energética no edifício existente e diminuir as emissões de gases de efeito de estufa, mas tendo em atenção as necessidades e a qualidade de vida exigida pelos utilizadores do edifício. Deste modo os objetivos incidem sobre os seguintes tópicos:

- Aumento da eficiência energética em edifícios antigos, evitando a construção de novos edifícios e a perda de espaço nas zonas urbanas;
- Produção de energia renovável para reduzir o consumo de eletricidade proveniente da rede pública, em linha com os objetivos traçados para os nZEB;
- Estudo de sistemas energéticos alternativos ao sistema convencional de cilindro elétrico para aquecimento de águas sanitárias;
- Otimização de um dos sistemas de geração de energia, aumentando a eficiência energética do sistema fotovoltaico com bomba de calor

### 1.3. Metodologia

A obtenção de energia proveniente de fontes renováveis em detrimento das fontes fósseis, é uma das soluções necessárias para o cumprimento das metas impostas pela União Europeia.

Uma revisão bibliográfica permitiu encontrar diversos sistemas de preparação de AQS através de energia renovável, sendo que cada sistema possui diferentes eficiências energéticas e investimentos económicos.

A presente dissertação compara dois sistemas de preparação de AQS que utilizam energias renováveis – a bomba de calor com painéis fotovoltaicos e o sistema solar térmico – com o convencional cilindro elétrico. Deste modo pretende-se encontrar o sistema de preparação de AQS economicamente e energeticamente mais compensatório para o caso específico.

Para obviar o custo e tempo que a execução prática do estudo implicaria, muito dispendiosa na compra dos diferentes sistemas de preparação de AQS, optou-se por recorrer a métodos de simulação energética, neste caso o *EnergyPlus 8.5*, o interface *OpenStudio* e o programa de desenho *SketchUp 2016*. Segundo os autores Drury B. Crawley, Curtis O. Pedersen, Linda K. Lawrie e Frederick C. Winkelmann, [13] os métodos de simulação energética tiveram origem na década de 60. A contínua expansão das capacidades dos métodos de simulação energética, sem que os programas sofressem uma reestruturação tornaram estes *softwares* complicados, demorados e caros de utilizar. Todavia os desenvolvimentos tecnológicos e a melhoria dos métodos de análise computacional tornaram possível o aperfeiçoamento e a flexibilidade destas ferramentas. Em 1995 o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), criou uma nova ferramenta de simulação energética com base na experiência desenvolvida, onde combina as melhores capacidades e funcionalidades dos programas DOE-2 (Lawrence Berkeley National Laboratory) e BLAST (U.S. Army Construction Engineering Laboratory e University of Illinois), originando o *EnergyPlus*. Este *software* permite a introdução de modelos detalhados de fluxos de energia como aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação, entre outros, bem como a inclusão do consumo de água da habitação. O programa calcula e fornece os resultados considerando os balanços de fluxo de massa (ventilação, infiltrações de ar, etc.), o equilíbrio das zonas térmicas e as trocas de calor (condução, convecção e radiação).

O *EnergyPlus* necessita de um ficheiro com a caracterização do clima da região onde se situa o edifício como dado de entrada. Este ficheiro contém os dados hora a hora, para um ano completo, das componentes da radiação solar (radiação direta e difusa horizontal e radiação solar no exterior da atmosfera terrestre), velocidade do vento, temperaturas médias do ar exterior e do solo, entre outras. A localização do edifício (latitude, longitude e elevação) também é necessário como dado de entrada, bem como os valores das potências dos equipamentos elétricos e eletrónicos, o sistema de iluminação e o número de ocupantes em cada zona térmica existente na habitação. Para o edifício ficar completamente caracterizado é necessário também definir os horários de funcionamento dos equipamentos e o horário de ocupação.

O *SketchUp* é um *software* de desenho, que permite criar o edifício em estudo num espaço tridimensional. Assim a introdução das coordenadas espaciais limitam as várias zonas térmicas da habitação.

O conhecimento de todas estas ferramentas, permite a simulação energética do edifício para um determinado intervalo de tempo, selecionado pelo utilizador. [13]

## **1.4. Estrutura da dissertação**

A dissertação está escrita em 6 capítulos. A divisão encontra-se de acordo com os diferentes conteúdos tratados, facilitando a identificação dos mesmos por parte do leitor.

O primeiro capítulo, denominado “INTRODUÇÃO”, aborda a posição da União Europeia no sector energético. Nele encontram-se normas, legislação e metas a alcançar por Portugal, principalmente na Diretiva 2012/27/UE de 25 de outubro de 2012 e REBC 2050. Também são analisados neste capítulo alguns dados estatísticos relativos ao sector imobiliário, como consumos de energia e emissões de gases de efeito de estufa. Este capítulo termina com a descrição da metodologia utilizada.

O segundo capítulo, denominado “ESTADO DA ARTE”, apresenta os conceitos teóricos acerca das matérias alvo de estudo. Neste capítulo estão presentes definições e conceitos acerca dos edifícios nZEB e produção de energia renovável, mais concretamente os sistemas solares térmicos, sistemas solares fotovoltaicos e bombas de calor.

O “MODELO DE SIMULAÇÃO ENERGÉTICA” compõe o terceiro capítulo. Neste encontra-se toda a informação acerca do edifício habitacional, desde a

localização do mesmo, tipologia, características físicas bem como o sistema de aquecimento de águas sanitárias. O número de ocupantes do edifício bem como os equipamentos são igualmente definidos neste capítulo. A simulação energética inicial é também alvo de análise no terceiro capítulo: são investigados os resultados obtidos para os sistemas com cilindro elétrico, sistemas solares térmicos e sistemas solares fotovoltaicos com implementação de uma bomba de calor, sem medidas de otimização.

O quarto capítulo designado de “SIMULAÇÃO ENERGÉTICA OTIMIZADA”, constitui todas as medidas e resultados de otimização energética implementados no sistemas solar fotovoltaico com instalação de uma bomba de calor.

A “DISCUSSÃO DE RESULTADOS” compõe o capítulo cinco. Aqui estão presentes os resultados alcançados na simulação energética inicial, bem como na simulação otimizada para cada tipo de sistema de produção de energia.

O sexto capítulo designado de “CONCLUSÃO”, apresenta as ilações retiradas na realização da presente dissertação.

Na secção “REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS”, estão presentes as referências citadas e utilizadas no desenvolvimento da dissertação.

O “ANEXO A” contém informação detalhada acerca dos valores utilizados nas simulações que caracterizam as frações de ocupação e os perfis de utilização de AQS.

## **2. ESTADO DA ARTE**

### **2.1. Edifícios nZEB**

A sustentabilidade e a eficiência energética têm uma importância cada vez maior na Europa e no mundo. A crise económica, bem como a consciencialização da população nas alterações climáticas vivida no seio Europeu, obriga a uma redução de custos e a um aumento da produção de energia a partir de fontes de energia renováveis, fazendo com que a melhoria da eficiência energética dos edifícios seja uma estratégia prioritária da União Europeia.

O consumo energético dos edifícios da UE tem vindo a aumentar, sendo responsável por uma fração considerável do seu consumo total, conduzindo a elevados custos económicos e ambientais. De modo a reduzir o consumo energéticos nos edifícios europeus e, conseqüentemente minorar os problemas económicos e ambientais adjacentes, a UE publicou a Diretiva 2010/31/UE do parlamento europeu e do conselho de 19 de Maio de 2010, exigindo que todos os edifícios construídos a partir de 1 de janeiro de 2021, possuam balanço energético quase nulo. [14]

Neste contexto surgem os nZEB, edifícios energeticamente sustentáveis, que apresentam elevada eficiência energética [15]. Este conceito define que a produção de energia no edifício iguala o seu consumo. As necessidades energéticas podem ser alcançadas através de tecnologias que utilizem energias renováveis. No Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de agosto [16] estes edifícios são designados por edifícios com elevado desempenho energético e com necessidades quase nulas de energia.

Estes edifícios constituem uma das soluções para os problemas energéticos da UE e do mundo, promovendo a cooperação na proteção ambiental com a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> produzidas no funcionamento dos edifícios habitacionais.

### **2.2. Produção de Energia Renovável**

Os tipos de sistemas a estudar são: fotovoltaicos com implementação de uma bomba de calor e sistemas solares térmicos. Estes sistemas de produção de energia renovável encontram-se detalhadamente descritos nos seguintes subcapítulos.

### 2.2.1. Energia solar fotovoltaica

As células fotovoltaicas possuem materiais semicondutores como por exemplo o silício, (segundo elemento mais abundante na crosta terrestre) podendo ser constituídas por cristais monocristalinos, policristalinos, de silício amorfo ou de filme fino. As Células fotovoltaicas monocristalinas e policristalinas são células de primeira geração, que apresentam um rendimento elétrico relativamente elevado (mais de 16% e 13% respetivamente), mas têm a desvantagem de utilizarem técnicas de produção complexas e caras. As células fotovoltaicas de segunda geração como células de silício amorfo e de filme fino não possuem estrutura cristalina. Estas células apresentam um rendimento elétrico mais baixo que as células de estrutura cristalina, cerca de 10%, mas apresentam como vantagem um custo mais baixo nas técnicas aplicadas na sua produção.[17]

A produção de energia elétrica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Fenómeno Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico foi descoberto pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel, em 1839. O polo negativo que constitui a célula, ao ser atingido pela luz solar, vai absorver a energia proveniente dos fótons de luz, fornecendo energia aos elétrons que, quando superior à energia intrínseca, provoca a libertação de um elétron da camada de valência. Este deslocar-se-á para o polo negativo, deixando o polo positivo com falta de elétrons. A circulação dos elétrons deve-se à força eletromotriz que cria uma corrente elétrica no sistema. [18]

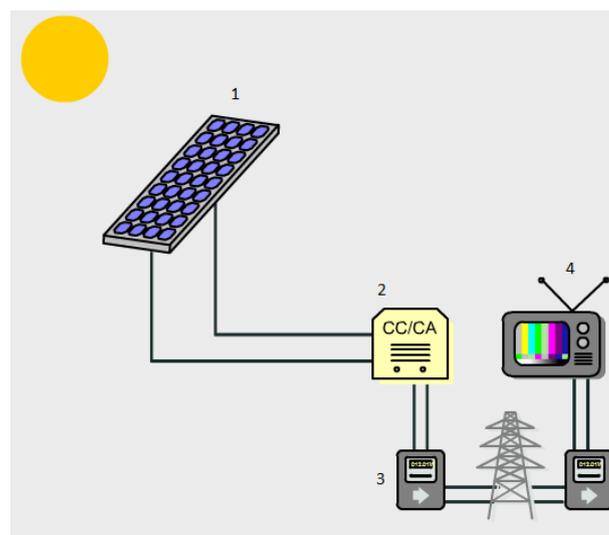


Figura 2.1 - Sistema fotovoltaico ligado à rede. Fonte: [19]

Os painéis fotovoltaicos (1) transformam a energia solar diretamente em energia elétrica, contudo a energia encontra-se em corrente contínua sendo necessário um inversor ou ondulador (2) que converte a energia em corrente alternada, podendo esta ser utilizada no consumo doméstico (4) ou fornecida à rede elétrica (3). Quando o consumo de energia é baixo e existe elevada produção de energia elétrica, este excesso de produção pode ser fornecido à rede elétrica ou acumulado em baterias para utilizar nas horas em que não há sol.

A utilização deste tipo de tecnologia na produção de energia elétrica constitui uma fonte inesgotável e ambientalmente favorável. No entanto exibe algumas desvantagens como as irregularidades da luz ao longo das 24 horas, a presença de condições climáticas desfavoráveis (nuvens, nevoeiro), o sombreamento causado por árvores e edifícios, bem como os custos de investimento inicial, manutenção e substituição de equipamentos. Contudo estes sistemas com um estudo e dimensionamento corretos podem tornar-se compensatórios. [20]

### 2.2.2. Bomba de calor

As bombas de calor apresentam-se como solução na produção de AQS, sendo reconhecidas como uma tecnologia de aquecimento renovável segundo o Despacho nº. 14985/2015. D.R. nº. 246, Série II de 2015-12-17 [21]. Estas transferem calor de um ambiente para o outro através de um fluido [21]. A figura 2.2 mostra o ciclo de aquecimento da bomba de calor.

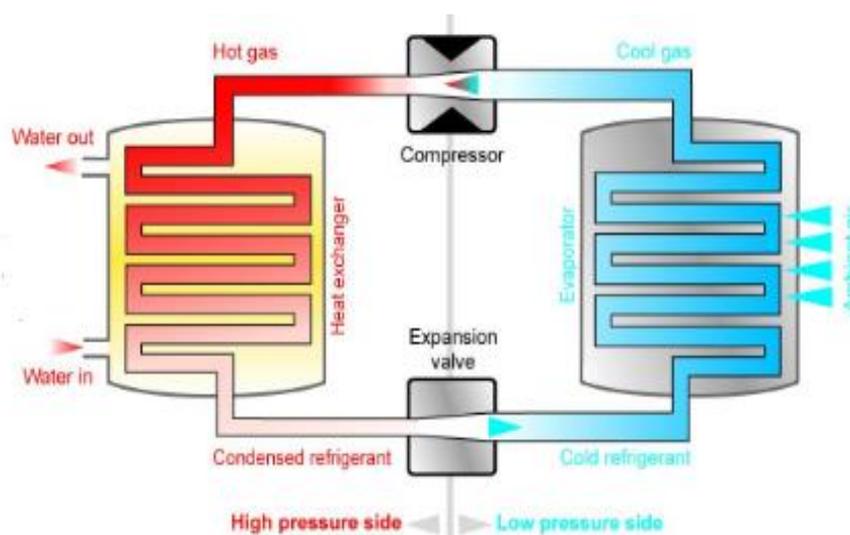


Figura 2.2 - Ciclo de aquecimento da bomba de calor [23]

O calor do ar ambiente é transferido para um fluido frigorigénio no evaporador, que passa do estado líquido ao estado gasoso a baixa pressão e a baixa temperatura. O fluido frigorigénio passa de seguida para o compressor, onde é transferido trabalho mecânico para o fluido, elevando a sua pressão e a sua temperatura. O gás quente à saída do compressor passa para o condensador, que tem a forma de uma serpentina e está colocado no interior do reservatório de água quente. No condensador o gás quente transfere calor para a água do reservatório à medida que vai mudando de fase, saindo do condensador como líquido saturado. A válvula de expansão provoca uma queda de pressão do evaporador, e o fluido passa do estado líquido saturado à temperatura do condensador para mistura bifásica à temperatura do evaporador. Este circuito funciona em regime permanente enquanto o compressor estiver ligado. [24]

Segundo a Daikin [22], as bombas de calor apresentam uma eficiência de cerca de 300%, significando que por cada unidade de energia utilizada pela bomba de calor, são geradas três ou mais unidades de calor para aquecimento, apesar de que estes níveis de desempenho só são atingidos em condições muito específicas.

Existem diversas fontes de calor que podem alimentar a bomba de calor. A fonte de calor mais estável é o solo. O solo além de acumular energia solar, armazena igualmente energia geotérmica. Deste modo a temperatura do solo ao longo do ano não sofre grandes variações. As águas do mar, lagos, rios e águas estagnadas podem também ser utilizadas como fontes de calor. Contudo nos meses mais frios do ano (inverno), as baixas temperaturas podem congelar a água. O ar interior ou exterior é outra fonte de calor que pode ser utilizada. O ar exterior encontra-se sempre disponível, dispensando meios de captação. No entanto as temperaturas inferiores a 5 - 6°C sentidas principalmente em alguns dias dos meses de inverno, interferem no rendimento da bomba de calor, podendo baixá-lo consideravelmente. [25]

### **2.2.3. Sistemas solares térmicos**

Os sistemas solares térmicos são compostos por um ou mais coletores solares térmicos que captam energia solar para o aquecimento de água ou do ambiente, convertendo energia solar em calor. Os coletores solares planos são usualmente caixas planas em alumínio, isoladas termicamente na parte inferior e nas laterais e com um vidro na face superior. A parte superior do coletor encontra-se exposta à radiação solar, existindo dentro do coletor uma placa absorvedora que recebe a energia e a transforma em

calor. O vidro do coletor solar apresenta propriedades opacas à radiação infravermelha, de modo a impedir que a radiação absorvida seja perdida novamente através do vidro para o exterior, produzindo assim um efeito equivalente ao efeito de estufa. O calor produzido no coletor solar é transferido para um fluido térmico, que circula num conjunto de tubos soldados na placa absorvedora. [26]

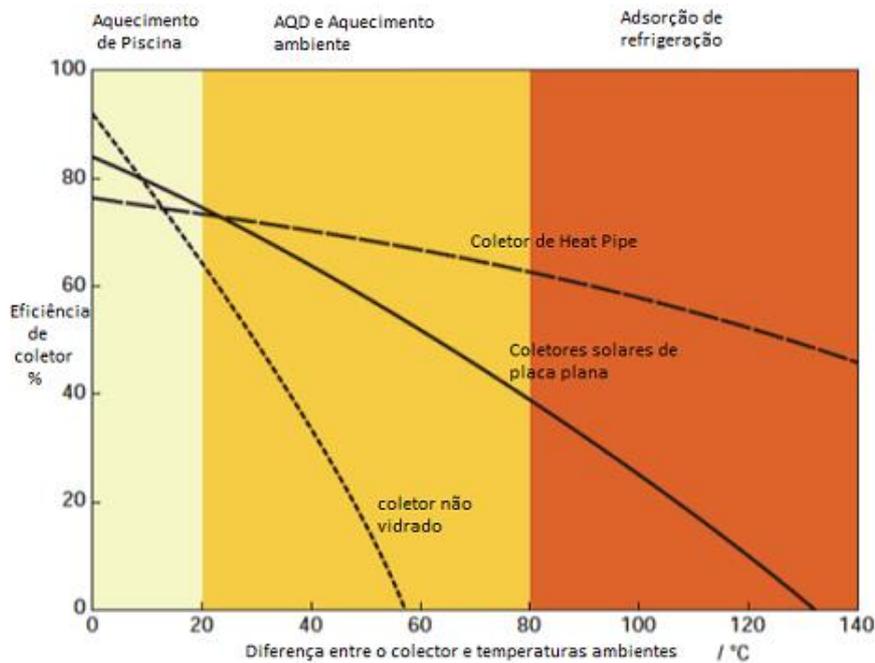


Figura 2.3 - Eficiência de um sistema solar térmico em função da diferença de temperatura. Fonte: [27]

Existem diversos tipos de coletores dos quais se destacam os coletores planos, os coletores de tubos de vácuo e os coletores concentradores. Todos estes coletores possuem diferentes características que lhes permitem absorver energia. De modo a seleccionar um sistema o mais económico possível deve-se escolher o tipo de coletor mais adequado para a temperatura de funcionamento desejada, uma vez que a eficiência de um coletor depende da diferença de temperatura entre o coletor e o meio ambiente. A figura 2.3 é exemplo de um dos gráficos possíveis de analisar na escolha dos coletores solares.

Os coletores planos são os dispositivos mais simples e comuns destinando-se à produção de água quente a temperaturas inferiores a 90 °C. O fluido, ao circular através dos tubos, absorve o calor solar libertando-o depois num permutador para aquecer o depósito de água. [28]

Coletores de tubos de vácuo são normalmente constituídos por um tubo de vidro de parede dupla. Como o interior dos tubos são livres de ar eliminam perdas por

convecção, elevando o rendimento a altas temperaturas [28]. Esta tecnologia permite a absorção da energia radiante garantindo o aquecimento de águas mesmo em dias de maior nebulosidade [29]. Os coletores de tubos de vácuo destinam-se ao aquecimento de água a temperaturas superiores a 90 °C. [30]

Coletores concentradores são dispositivos capazes de atingir temperaturas elevadas, diminuindo as perdas térmicas direcionando a radiação solar diretamente nos tubos do fluido circulante através de refletores. [28]

A preparação de AQS é realizada geralmente através de dois diferentes grupos de sistemas solares: o sistema por circulação forçada e o sistema de circulação por termossifão.

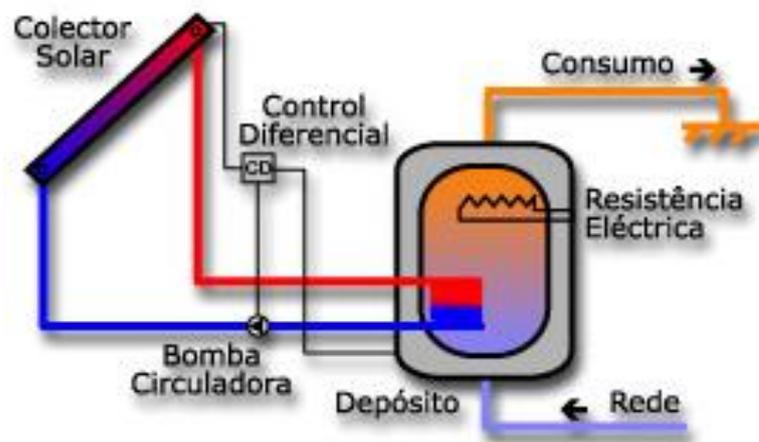


Figura 2.4 - Sistema de circulação forçada. Fonte [31]

No sistema de circulação forçada (figura 2.4) o fluido térmico presente no depósito é impulsionado por uma bomba. O depósito possibilita o armazenamento da água aquecida quando a incidência solar é elevada e não há necessidades de consumo. De modo a obter um bom funcionamento do sistema, é de extrema importância a instalação de um controlador, que mede as temperaturas no depósito e no coletor para ligar a bomba sempre que é possível captar energia solar. Quando a indisponibilidade solar é elevada, é necessário recorrer a um sistema de apoio: este aquece a água através de uma resistência ou permutador. A vantagem deste tipo de sistema solar é a sua elevada eficiência uma vez que a gestão da energia é regulada pelo controlador, no entanto é um sistema complexo e caro. [31]

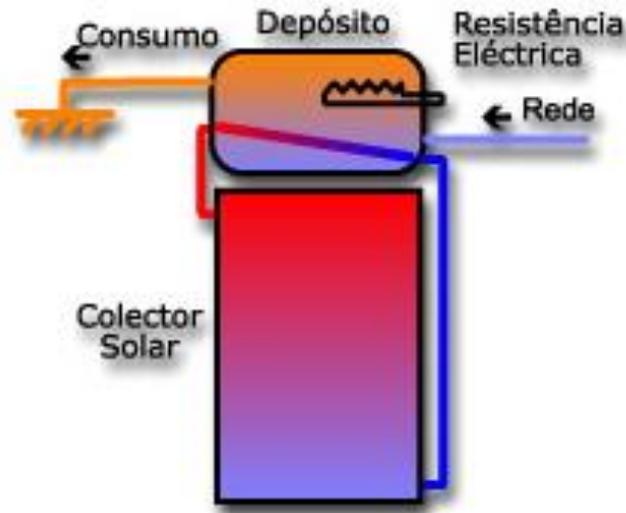


Figura 2.5 - Sistema de circulação por termosifão. Fonte [31]

Sistemas do tipo circulação por termosifão recorrem à variação de densidade do fluido térmico. O calor é transferido para o fluido circulante tornando este menos denso, o que o faz subir até ao depósito. O fluido quente transfere para a água presente no depósito, arrefece e torna-se mais denso e desce novamente para os coletores fechando o ciclo. O depósito deve ficar sempre acima dos coletores solares, sendo desnecessária a utilização de uma bomba, uma vez que a circulação do fluido circulante ocorre por convecção natural. Este tipo de sistema solar tem como vantagem a sua simplicidade e o baixo custo de investimento. No entanto a sua eficiência é inferior em comparação com o sistema por circulação forçada [31].

### 3. MODELO DE SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

Após uma introdução e uma explicação teórica dos conhecimentos básicos acerca do tema desta dissertação de mestrado, torna-se necessário descrever e esclarecer mecanismos, processos e dados utilizados na elaboração do modelo de simulação.

A realização do modelo de simulação energética tem origem no *software SketchUp/OpenStudio*, este programa permitiu a criação do edifício habitacional numa representação em três dimensões.

De modo a implementar sistemas de produção de energia renovável (sistema solar térmico e sistema solar fotovoltaico com uma bomba de calor, neste estudo em concreto) e medidas de melhoria dos consumos, é imprescindível dispor de dados reais acerca do consumo no edifício habitacional. Como atualmente o edifício não se encontra habitado, não existem valores relativos ao seu consumo. Assim optou-se por simular o funcionamento da habitação no *EnergyPlus* idealizando uma ocupação de duas pessoas no edifício habitacional, considerando os consumos que existiriam caso estes residissem no imóvel. Para obter resultados credíveis efetuou-se uma simulação de consumos de água [32].

Após recolha e análise dos dados que descrevem a habitação, dos dados climáticos e dos consumos de água, foi possível a sua introdução no *EnergyPlus*, obtendo todos os gastos energéticos relacionados com o aquecimento de águas sanitárias do edifício ao longo de um ano. O modelo de simulação do edifício foi adaptado a partir da tese de dissertação da aluna Sara Henriques [2].

#### 3.1. Edifício habitacional

O edifício residencial alvo de estudo cuja vista se encontra na figura 3.1, está localizado na Travessa de Montarroio (40,212° N, e 8,428°O), situada no centro histórico da cidade de Coimbra. Segundo a UNESCO, este local onde se situa o edifício de habitação, pertence à zona que foi qualificada como património mundial da humanidade[33].



Figura 3.1 - Vista da habitação alvo de estudo

O edifício pode ser classificado como correspondendo a uma tipologia T1, com uma ocupação de duas pessoas. A habitação é composta por três pisos, onde os dois pisos superiores (piso 01 e 02) estão ligados por uma escada interior. O piso 01 possui apenas a sala de estar enquanto o piso 02 oferece acesso ao quarto, cozinha e casa de banho. Relativamente ao piso inferior (piso 00), este é utilizado como espaço de arrumação, em que o acesso ocorre apenas por uma porta situada no exterior da habitação. Para simplificação considerou-se o pavimento de cada piso com uma área útil de 18.4 m<sup>2</sup>, os dois pisos superiores têm um pé direito de 2.2 m, e o piso inferior 2.10 m.

O imóvel encontra-se orientado com o maior alçado –a Sul, com fachadas viradas a norte, e este. No alçado oeste as paredes estão em contacto com outro edifício, enquanto na cave, as paredes localizadas a norte e este estão em contacto com o solo. Durante a tarde a habitação pode sofrer sombreamento devido a um outro edifício localizado a oeste uma vez que este apresenta mais um piso que o edifício em estudo. O alçado orientado para sul possui boa exposição solar durante todo o dia.

### 3.1.1. Caracterização física do edifício habitacional

A caracterização física do edifício habitacional passa pela descrição detalhada das secções constituintes do imóvel como as paredes, pavimentos, cobertura, portas, janelas e portadas. De modo a entender, caracterizar e identificar mais facilmente as divisões do edifício, este está representado na figura 3.2 e 3.3 em perspetiva.

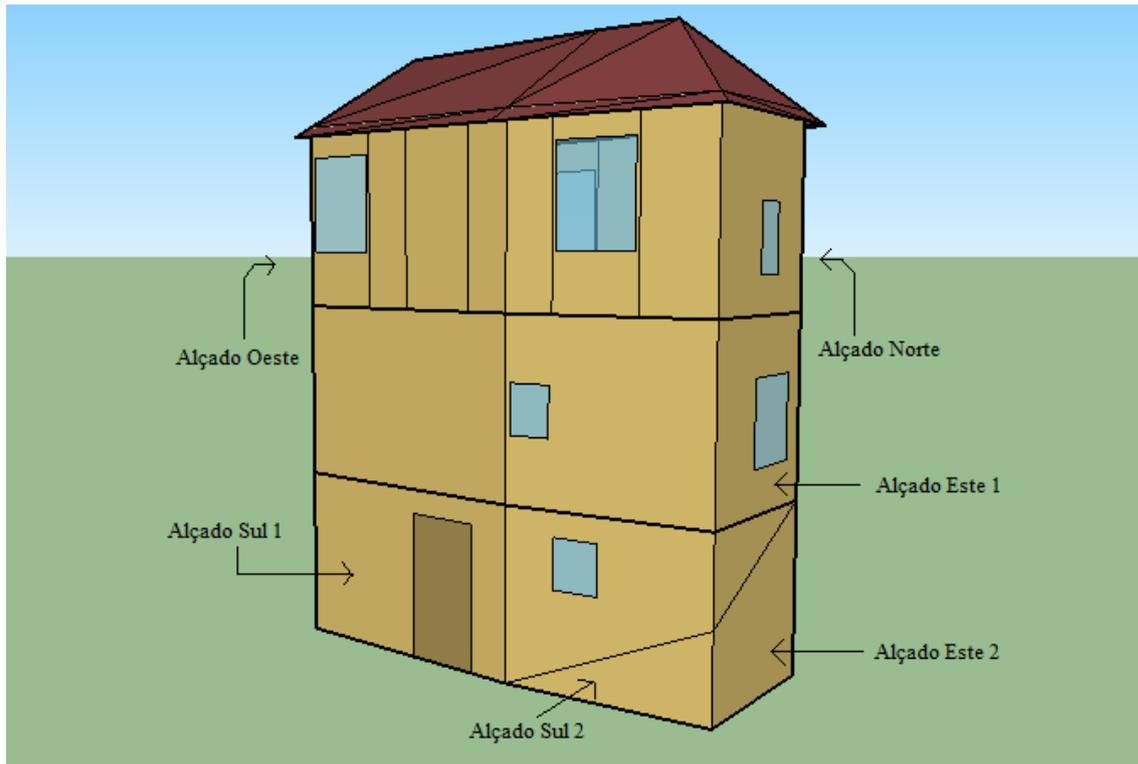


Figura 3.2 - Alçado principal da habitação

As paredes exteriores são, na sua maioria, compostas por pedra de origem calcária, variando a sua espessura entre os 300, 650 e 750 mm. O acabamento foi realizado com argamassa do tipo reboco na parte exterior e argamassa do tipo estuque na parte interior ao edifício. A parede localizada na zona norte do piso inferior (piso 00) encontra-se completamente em contacto com o solo, e as paredes da zona este 2 e sul 2 estão parcialmente em contacto com o solo, 75% e 27% respetivamente. A superfície da parede exterior que se encontra no piso 02 e está em contacto direto com o telhado e a casa situada a oeste possui uma área de  $1.47 \text{ m}^2$ . No mesmo piso, localizada no alçado sul 1, existe uma parede com  $2.42 \text{ m}^2$  de área, na qual existe uma chaminé embutida.

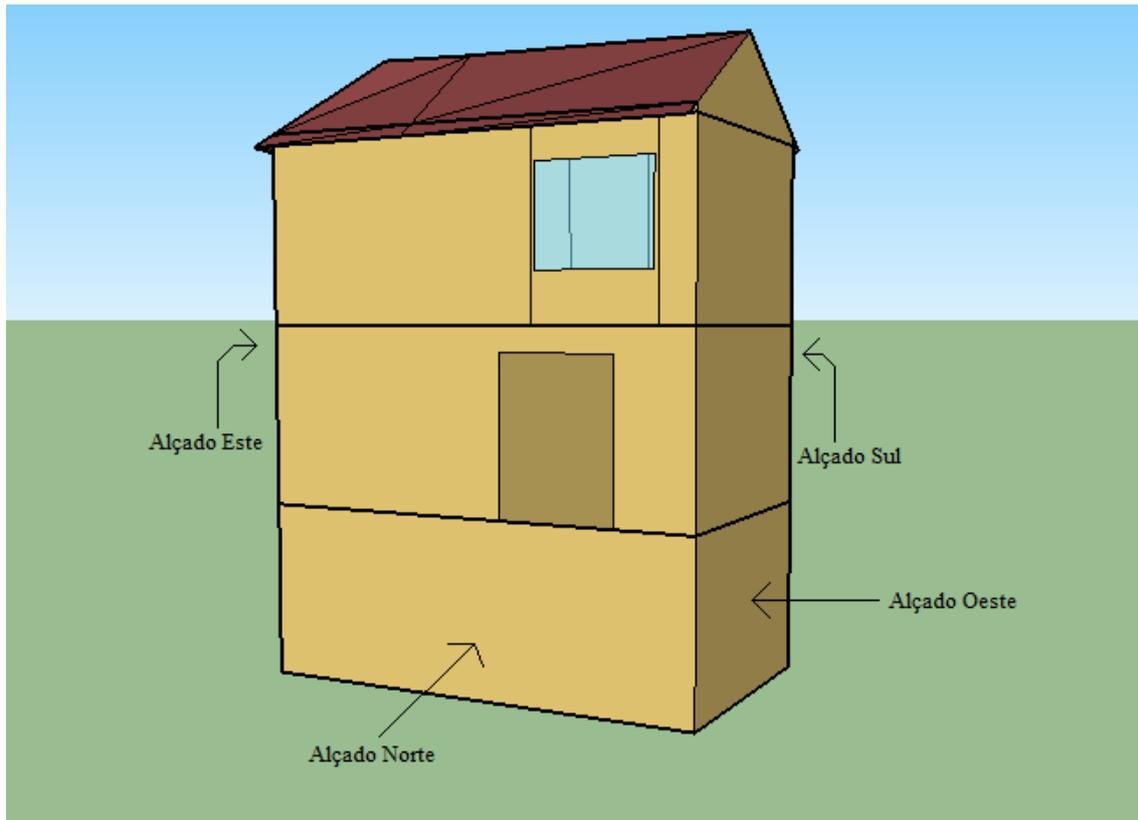


Figura 3.3 - Alçado secundário da habitação

Relativamente ao pavimento, no piso inferior este é constituído por material cerâmico na superfície, seguido de argamassa. No piso 01 o pavimento é formado por pinho duro na camada inferior, seguido por um espaçamento de ar e por pinho macio na camada superior. No piso 02 o teto é composto apenas por pinho macio. O telhado, com uma área de 48.26 m<sup>2</sup>, é constituído por telha cerâmica.

O edifício possui sete janelas localizadas nos três pisos, como demonstra as figuras 3.2 e 3.3. Estas apresentam portada de madeira de pinho macio e vidro com 3 mm de espessura. A única diferença entre as janelas é o tipo de abertura, sendo do tipo giratória ou do tipo guilhotina.

As portadas da habitação estão localizadas no piso inferior e na entrada principal situada no piso 01. A porta existente no piso 00 é composta por pinho duro e um vidro simples de 30 mm, a do piso 01 apresenta apenas pinho duro como material de construção.

### 3.1.2. Sistema de aquecimento de águas sanitárias

O sistema de aquecimento de águas sanitárias convencional é composto por um cilindro vertical com capacidade para 75 L e com uma altura de 1.17m. O circuito inserido no modelo do *EnergyPlus* inclui um sistema de canalização, formado por nodos e tubos, uma resistência elétrica e uma bomba. O esquema do circuito encontra-se na figura 3.4 e mais detalhadamente explicado na figura A.1 do Anexo A.

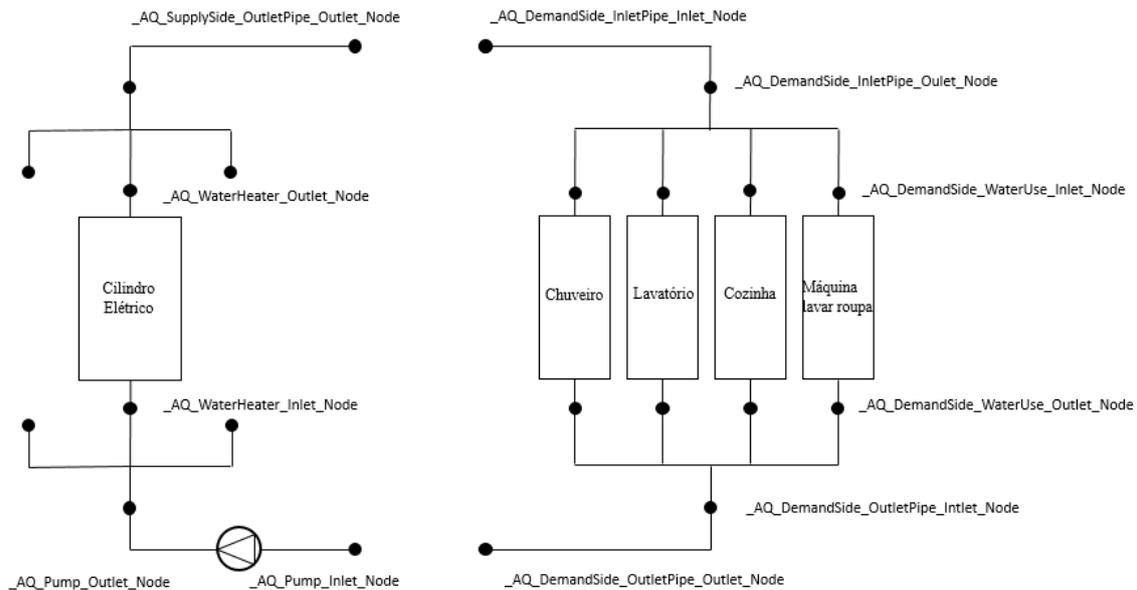


Figura 3.4 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica no sistema com cilindro elétrico

Equipamentos	Caudal de água (L/s)
Banca da cozinha	0.29
Lavatório	0.29
Chuveiro	0.16
Máquina de lavar roupa	0.0416

Tabela 3.1 - Caudal de água dos equipamentos domésticos

Os equipamentos onde ocorrem consumos de águas quentes sanitárias (AQS) estão descritos na tabela 3.1, seguidos dos respetivos caudais. O caudal de água quente utilizado na banca da cozinha e no lavatório da casa de banho é semelhante, equivalendo a 0.29 L/s. A fração de utilização, bem como os perfis de consumo de água quente encontram-se no Anexo A.

De acordo com ASHRAE [34], existem três tipos de chuveiros: pequenos, médios e grandes, com caudais de 0.16, 0.28 e 0.38 L/s, respetivamente. Assumiu-se para

o edifício em estudo a existência de um chuveiro pequeno na casa de banho, e a duração média de um duche em cerca de seis minutos, correspondendo ao consumo diário de 57.6 L/pessoa. No lavatório adotou-se um consumo total diário de 5 L/pessoa de AQS.

Relativamente aos consumos na cozinha, considerou-se um gasto de AQS de 10 L para o pequeno-almoço, 50 L no jantar e 60 L em almoços realizados ao fim de semana. O consumo de AQS na máquina de lavar foi estimado em 50 L/lavagem equivalendo a 0.0416 L/s. Apesar de a máquina de lavar oferecer lavagens a frio, a temperatura média da água em cada lavagem é de 30 °C.

A temperatura média de utilização de água quente ronda os 40 °C, mas segundo a Direção Geral da Saúde e do Turismo a água armazenada deve estar sujeita a temperaturas igual ou superiores a 60°C, evitando a reprodução da bactéria *Legionella* [35].

O período normal de ocupação do edifício habitacional é interrompido nas férias de verão e de Natal. As férias de verão situam-se entre 1 a 15 de agosto, sendo que nesse mesmo período o edifício encontra-se desocupado. As férias de natal ocorrem entre 20 a 27 de dezembro, neste período os habitantes encontram-se mais tempo no edifício, sendo o perfil de utilização superior ao perfil normal.

## **3.2. Simulação energética inicial**

A simulação energética através do programa *EnergyPlus* permite obter dados detalhados acerca da energia produzida e/ou consumida através de sistemas de energias não renováveis e renováveis, bem como a energia necessária ao normal funcionamento do sistema de aquecimento de água sanitárias. Os sistemas de obtenção de energia renovável alvo de estudo são o sistema solar térmico e o sistema solar fotovoltaico.

### **3.2.1. Sistema com cilindro elétrico**

Os sistemas de obtenção de água quente convencionais na zona do estudo utilizam o cilindro elétrico. O cilindro elétrico selecionado tem capacidade para 75 L e uma potência de 2000 W. O cilindro elétrico encontra-se programado para manter a temperatura da água no reservatório a 60 °C, ligando a resistência quando a temperatura da água é inferior a este valor. A tabela 3.2 mostra os resultados obtidos.

Mês	Energia térmica total consumida para AQS (a) (kWh)	Perdas térmicas no tanque de armazenamento (kWh)	Custo da eletricidade com cilindro elétrico (€)
Janeiro	131.8	28.7	25.68
Fevereiro	119.3	25.8	23.22
Março	127.3	28.7	24.96
Abril	117.0	28.1	23.22
Maio	109.7	29.4	22.26
Junho	98.0	28.8	20.29
Julho	97.0	29.9	20.30
Agosto	49.4	31.4	12.93
Setembro	97.2	28.8	20.16
Outubro	108.4	29.5	22.06
Novembro	113.7	28.2	22.70
Dezembro	130.6	28.8	25.49
Total	1299.3	346.2	263.28

Tabela 3.2 - Resultados energéticos do sistema com cilindro elétrico. (a) Excluindo as perdas térmicas.

Os dados alcançados demonstram que ao longo de um ano é necessário aproximadamente 1299.3 kWh de energia térmica no aquecimento das águas sanitárias, tendo perdas de energia na ordem dos 346.2 kWh. Assumindo um preço da eletricidade proveniente da rede elétrica pública de 0.16 €/kWh, determina-se que o gasto anual em eletricidade para AQS é de 263.28€, valor indicado na tabela 3.3.

	Custos totais do sistema com cilindro elétrico
Eletricidade (€)/ano	263.28
Manutenção (€)/ano	0
Total (€)/ano	263.28
Equipamentos (€)	299.89

Tabela 3.3 - Custos do sistema com cilindro elétrico.

A tabela 3.3 indica os gastos anuais de eletricidade, bem como o custo de equipamentos. Como já referido o único equipamento necessário é o cilindro elétrico cujo valor está avaliado em 229.99 € (IVA incluído) mais o gasto na montagem do mesmo, sendo este de 69.90 €.

Ao longo dos últimos anos, o aumento do preço da eletricidade proveniente da rede elétrica pública tem sido uma realidade constante. Por forma a alcançar dados

mais credíveis admitiu-se que o preço da eletricidade terá um aumento anual de 0.005€. O gráfico 3.1 demonstra a evolução dos custos durante 20 anos.

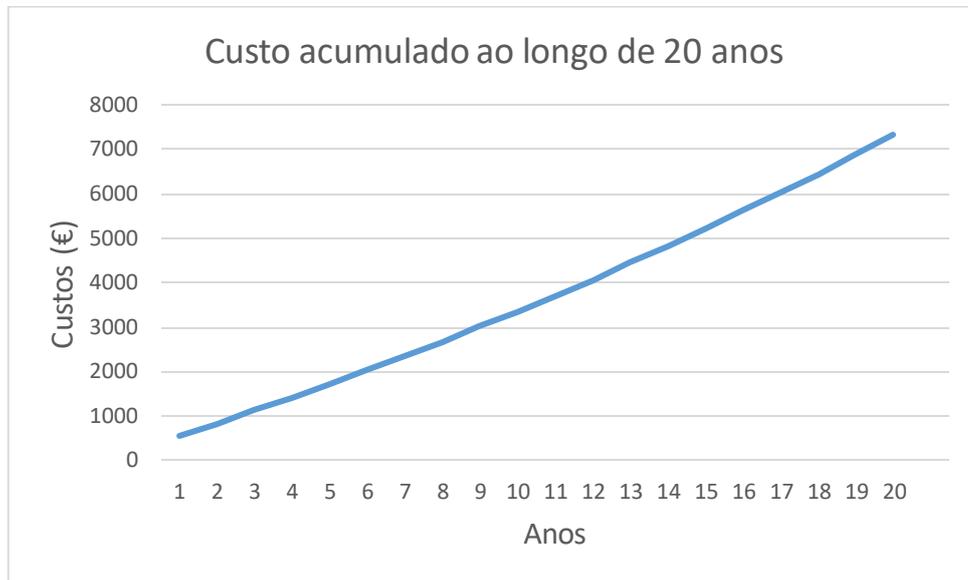


Gráfico 3.1 - Evolução dos custos do sistema com cilindro elétrico ao longo de 20 anos

Através do gráfico acima representado é possível verificar que o custo total do sistema constituído pelo cilindro elétrico ao longo de 20 anos é de 7325.12€.

### 3.2.2. Sistema solar térmico

Na realização da simulação energética utilizando o modelo do sistema solar térmico, é necessário a escolha de um coletor solar. O coletor solar escolhido possui uma área de abertura de 2.52 m<sup>2</sup>. De acordo com o certificado do coletor o rendimento ótico do coletor ( $a_0$ ) tem o valor de 0.7162, e os coeficientes de perdas térmicas ( $a_1$  e  $a_2$ ) o valor de -3.0562 W/(m<sup>2</sup> K) e -0.00674 W/(m<sup>2</sup> K<sup>2</sup>). O caudal de fluido térmico que atravessa o coletor é de 0.0000498 m<sup>3</sup>/s. De salientar que o *EnergyPlus* utiliza o modelo de eficiência de coletores solares segundo as normas ASHRAE.

Na figura 3.5 encontra-se o esquema do circuito utilizado na simulação energética. A figura A.2 localizada no Apêndice A apresenta uma explicação mais detalhada do esquema.

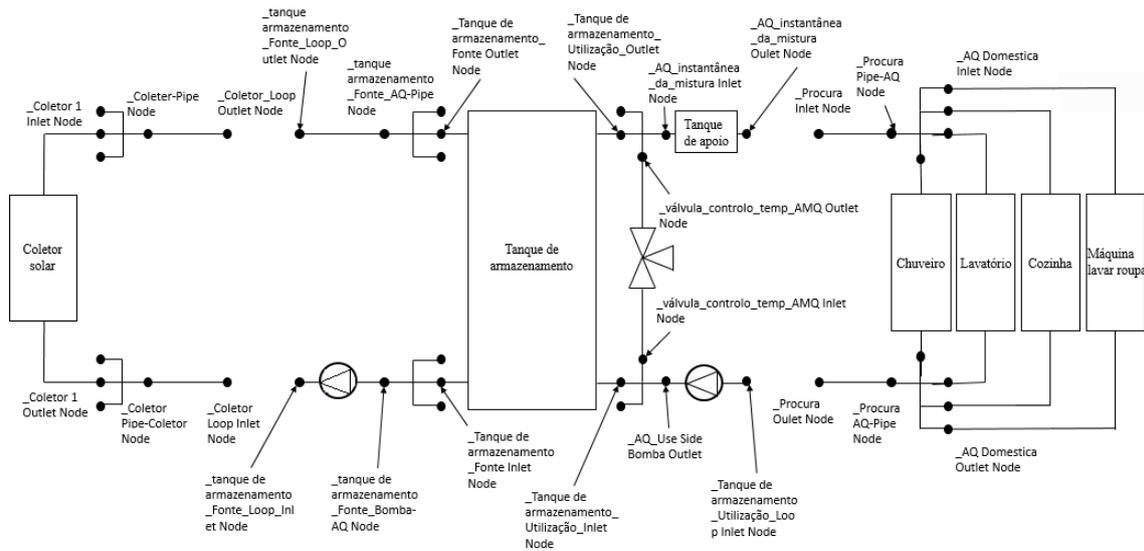


Figura 3.5 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica no sistema solar térmico

O sistema solar térmico é composto por um tanque de armazenamento com capacidade para 120 L, para armazenar a água aquecida com a energia solar captada pelos coletores. Após o tanque de armazenamento, existe um reservatório com capacidade para 5.68 L, cuja função é auxiliar no aquecimento da água através de uma resistência elétrica, satisfazendo as necessidades dos ocupantes quando a energia solar não é suficiente. O termostato tem como objetivo regular a temperatura da água para um determinado valor. Quando a temperatura da água que sai do tanque é superior a 60°C, o sistema auxiliar desliga. Caso contrário, quando a temperatura da água é inferior a 60°C, o sistema auxiliar liga. Através da comparação de temperaturas entre o coletor e o tanque de armazenamento, a bomba é ligada ou desligada, conforme a possibilidade de existirem ganhos úteis de calor ou não. A introdução de uma válvula de controlo de temperatura permite a mistura de água muito quente com a água fria da rede, fazendo chegar aos habitantes do edifício água a uma temperatura intermédia, que permita evitar o risco de queimaduras. As especificações dos componentes do sistema solar térmico encontram-se resumidas na tabela 3.4.

Componente	Especificação
Número de coletores	1
Área do coletor	2.52 m <sup>2</sup>
Volume do tanque de armazenamento	120 L
Volume do tanque de apoio	5.68 L

Tabela 3.4 - Especificações das componentes do sistema solar térmico

Os resultados da simulação podem ser consultados na tabela 3.5.

Mês	Energia térmica total consumida para AQS (a)(kWh)	Energia térmica fornecida à água no tanque de apoio (kWh)	Perdas de energia no tanque de armazenamento (kWh)	Energia térmica produzida pelos coletores solares (kWh)	Energia utilizada para AQS proveniente do sol (%)
Janeiro	131.8	56.9	10.1	88.7	62.49
Fevereiro	119.3	46.1	9.5	82.3	63.90
Março	127.3	23.4	15.4	127.7	89.45
Abril	117.0	7.6	17.2	125.6	93.57
Maió	109.7	7.1	17.9	123.2	96.57
Junho	98.0	0.4	19.9	118.0	100.00
Julho	97.0	0.6	20.7	117.3	99.69
Agosto	49.37	0.5	22.0	71.1	99.45
Setembro	97.2	3.2	18.8	110.6	95.36
Outubro	108.4	12.5	16.6	114.4	91.61
Novembro	113.7	53.8	9.2	72.3	58.85
Dezembro	130.6	76.7	7.5	69.3	50.20
Total	1299.3	288.7	184.9	1220.4	82.23

Tabela 3.5 - Resultados energéticos do sistema solar térmico. (a) Excluindo as perdas térmicas.

Após análise dos dados obtidos é possível verificar que ao longo de um ano são necessários 1299.3 kWh de energia térmica para proceder ao aquecimento das águas sanitárias, acrescentando as perdas de energia no tanque de armazenamento, que para o mesmo período tem o valor aproximado de 184.9 kWh. Os coletores solares produzem 1220.4 kWh nesse mesmo período de tempo. Como a energia produzida pelos coletores solares não é suficiente para o AQS, bem como o consumo de água quente não coincide maioritariamente com os picos de maiores ganhos energéticos proveniente dos coletores, torna-se indispensável a obtenção de um tanque de apoio cuja função é fornecer a energia necessária ao sistema de AQS. A energia fornecida pelo tanque de apoio é de 288.7 kWh/ano de energia elétrica, sendo esta proveniente da rede elétrica pública.

Através da tabela 3.5 e do gráfico 3.2 verificamos que a época do ano em que existe maior produção de energia proveniente dos coletores solares é de março a outubro, onde a produção de energia renovável chega mesmo a ser superior à energia consumida no AQS. Relativamente à energia proveniente do tanque de apoio temos o comportamento inverso, ou seja enquanto a energia produzida pelos coletores solares aumenta, a energia que é fornecida pelo tanque de apoio diminui. As perdas de energia são ligeiramente

superiores de março a outubro, pois a diferença de temperatura entre o tanque de armazenamento e a temperatura ambiente é maior.

A fração renovável anual do sistema solar térmico é de 82.23%.

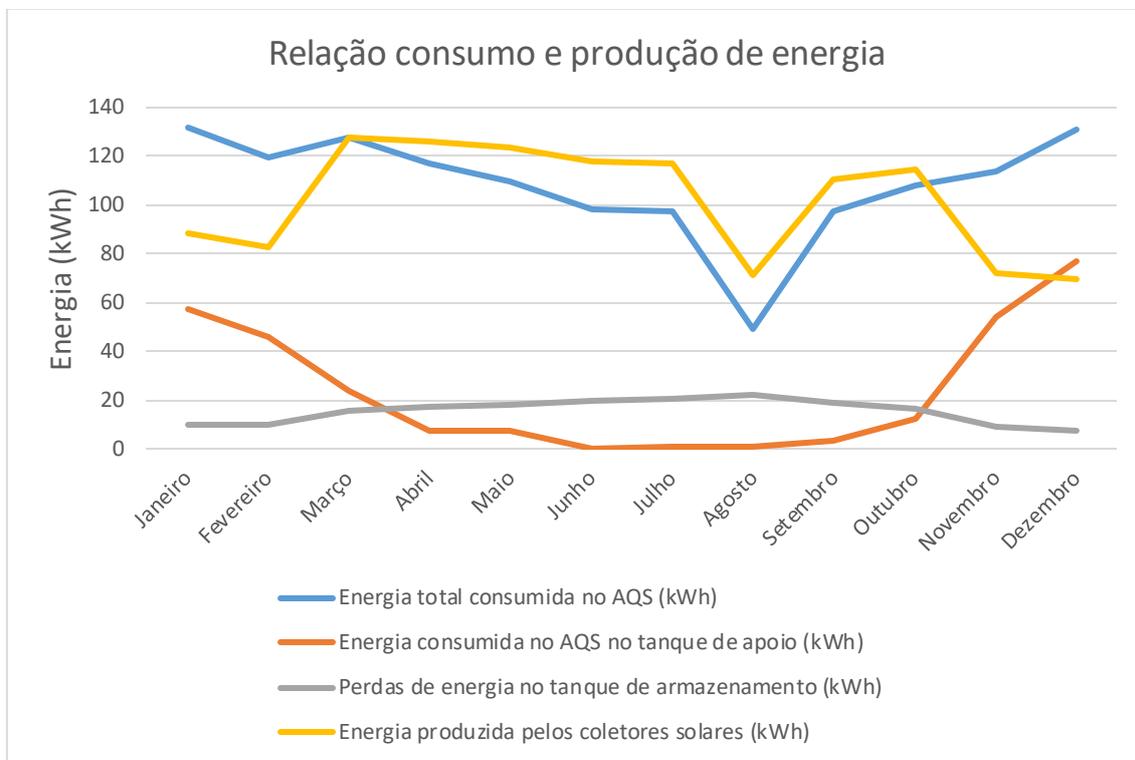


Gráfico 3.2 - Relação consumo e produção de energia

Do ponto de vista financeiro, como demonstra a tabela 3.6, cada sistema apresenta os seus custos e investimentos iniciais.

	Custos totais com cilindro elétrico	Custos totais com sistema solar térmico
Eletricidade (€)/ano	263.28	46.19
Manutenção (€)/ano	0	60.00
Total (€/ano)	263.28	106.19
Equipamentos (€)	299.89	2020.00

Tabela 3.6 - Custos do sistema solar térmico e cilindro elétrico.

No sistema convencional, sistema composto pelo cilindro elétrico, obtém-se um custo de investimento inicial de 299.89 €. No caso do sistema solar térmico o investimento inicial tem um valor de 2020.00€; este refere-se à compra de um kit solar

térmico completo. Relativamente às despesas anuais, o sistema convencional apresenta uma despesa de 263.28€/ano referente à eletricidade consumida, enquanto o sistema solar apresenta um gasto de 46.19€/ano mais a manutenção anual no valor de 60.00€. O sistema solar térmico apresenta uma poupança anual de 157.09€ relativamente ao sistema convencional.

O gráfico 3.3 revela a quantidade monetária despendida nos próximos 20 anos em cada tipo de sistema energético da habitação. Como referido anteriormente o custo da eletricidade apresenta um aumento de 0.005€/ano.

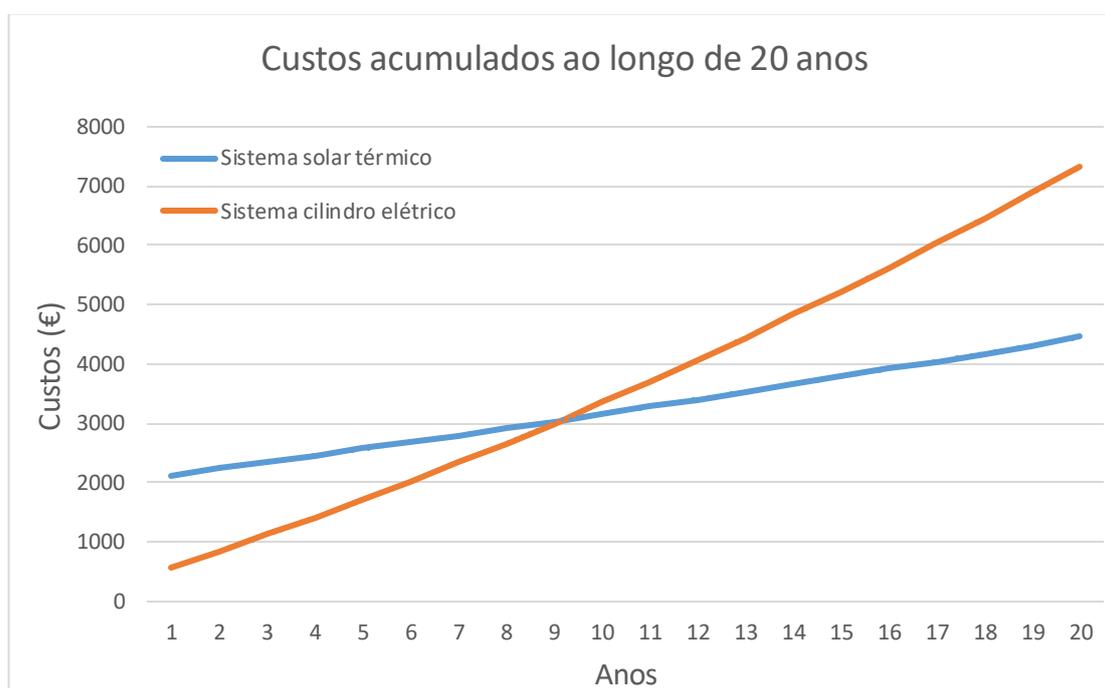


Gráfico 3.3 - Evolução dos custos do sistema solar térmico ao longo de 20 anos.

O ano um refere-se ao ano de implementação do sistema, neste caso concreto 2016, no qual o preço da eletricidade situa-se no 0.16€/kWh. No ano 20, o sistema que utiliza o cilindro elétrico terá um gasto total de 7325.12€, enquanto o sistema solar térmico beneficiará de um gasto total de 4452.63€. Optando pelo sistema solar térmico as poupanças energéticas atingem os 2872.49€.

O período de retorno representa o tempo em que um determinado investimento se encontra completamente pago. Neste caso em específico o período de retorno do sistema solar térmico em comparação com o cilindro elétrico situa-se nos 9 anos e 2 meses.

### 3.2.3. Sistema fotovoltaico com bomba de calor para AQS

O sistema fotovoltaico implementado no modelo de simulação, cujo esquema do circuito se encontra na figura 3.6 e mais detalhadamente explicado na figura A.4 do Anexo A, é composto por dois módulos solares fotovoltaicos, localizados no telhado do alçado sul. Os módulos eleitos apresentam 60 células, com uma área útil de 1.46 m<sup>2</sup>. Segundo o certificado do coletor, este apresenta uma potência (P), tensão (V) e intensidade (A) nominal de 250 W, 30.75 V e 8.14 A respetivamente. A tensão de circuito aberto (V<sub>OC</sub>) é de 32.50 V e a intensidade de curto-circuito (I<sub>sc</sub>) de 8.58 A.

O sistema requer igualmente um inversor, de modo a converter a corrente contínua em corrente alternada. O inversor selecionado possui uma eficiência de 94%.

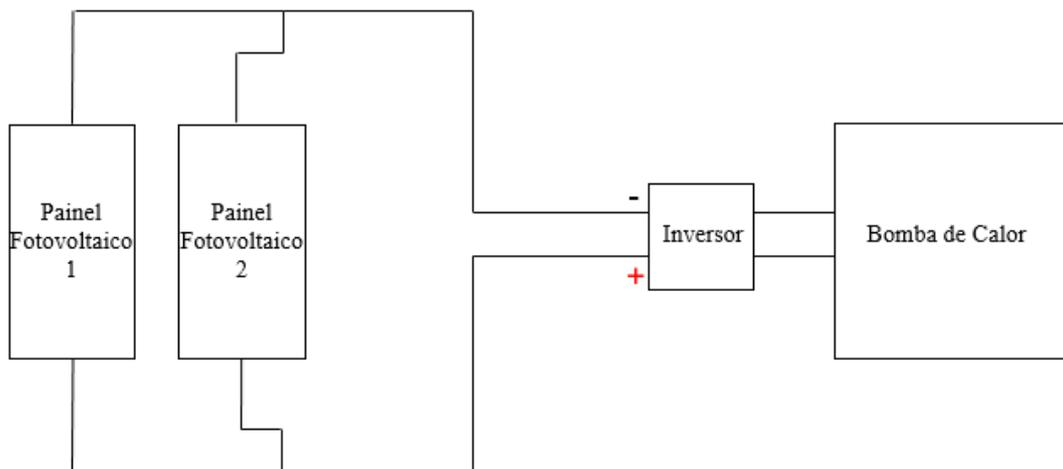


Figura 3.6 - Esquema do circuito elétrico do sistema solar fotovoltaico com bomba de calor

A bomba de calor possui capacidade para 190 L e temperatura máxima de 62 °C. O COP nominal, com a temperatura do ar a 7 °C e 20 °C e temperatura da água a 35°C, é de 3.7 e 4.7 respetivamente. A potência térmica nominal a uma temperatura do ar de 20 °C é de 850 W. A bomba de calor encontra-se programada para manter a água aquecida até aos 60°C, ligando sempre que a temperatura da água seja inferior. As curvas associadas à bomba de calor estão representadas nas figuras 3.4 e 3.5. O esquema do circuito da bomba de calor está representado na figura 3.6 e mais detalhadamente explicado na figura A.3 localizada no Anexo A.

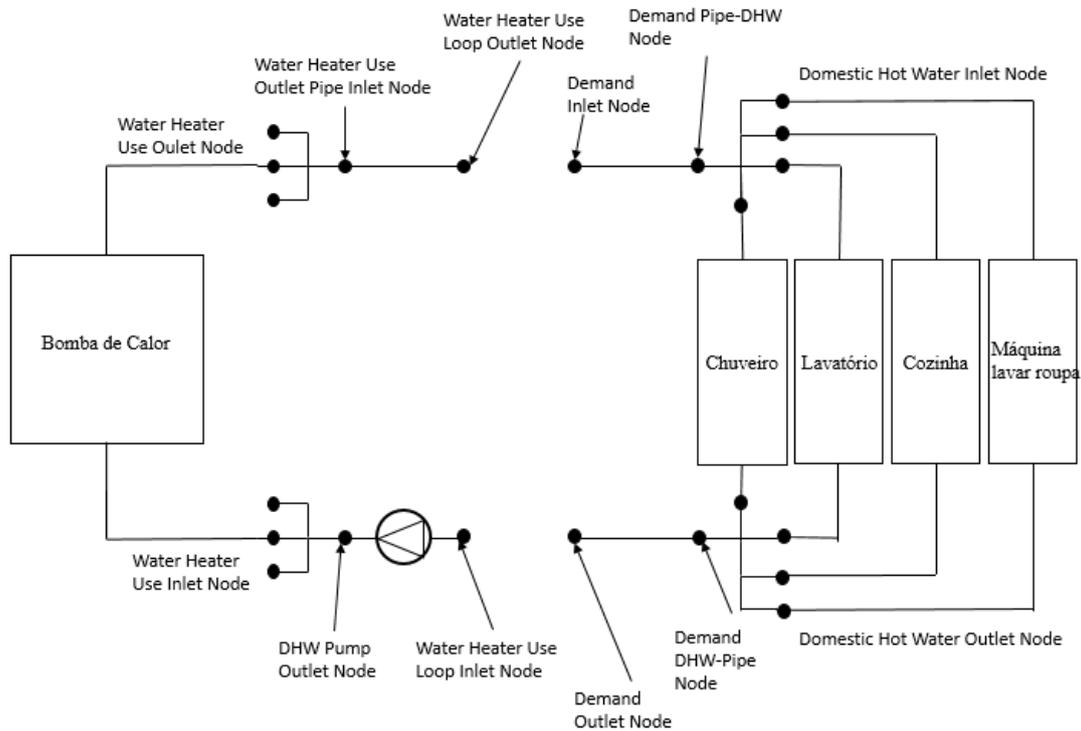


Figura 3.7 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica utilizando uma bomba de calor

As especificações das componentes constituintes do sistema solar fotovoltaico e da bomba de calor encontram-se resumidas na tabela 3.7.

Componente	Especificação
<b>Painel Fotovoltaico</b>	
Número de painéis	2
Número de células por painel	60
Área do painel	1.46 m <sup>2</sup>
Potência (P)	250 W
Tensão (V)	30.75 V
Intensidade (I)	8.14 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>OC</sub> )	32.50 V
Intensidade de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	8.58 A
<b>Bomba de calor</b>	
Capacidade	190 L
COP nominal (T <sub>ar</sub> = 20 °C)	3.4
Potência nominal (T <sub>ar</sub> = 20 °C)	850 W
<b>Inversor</b>	
Eficiência	94 %

Tabela 3.7 - Especificações do sistema solar fotovoltaico, bomba de calor e inversor

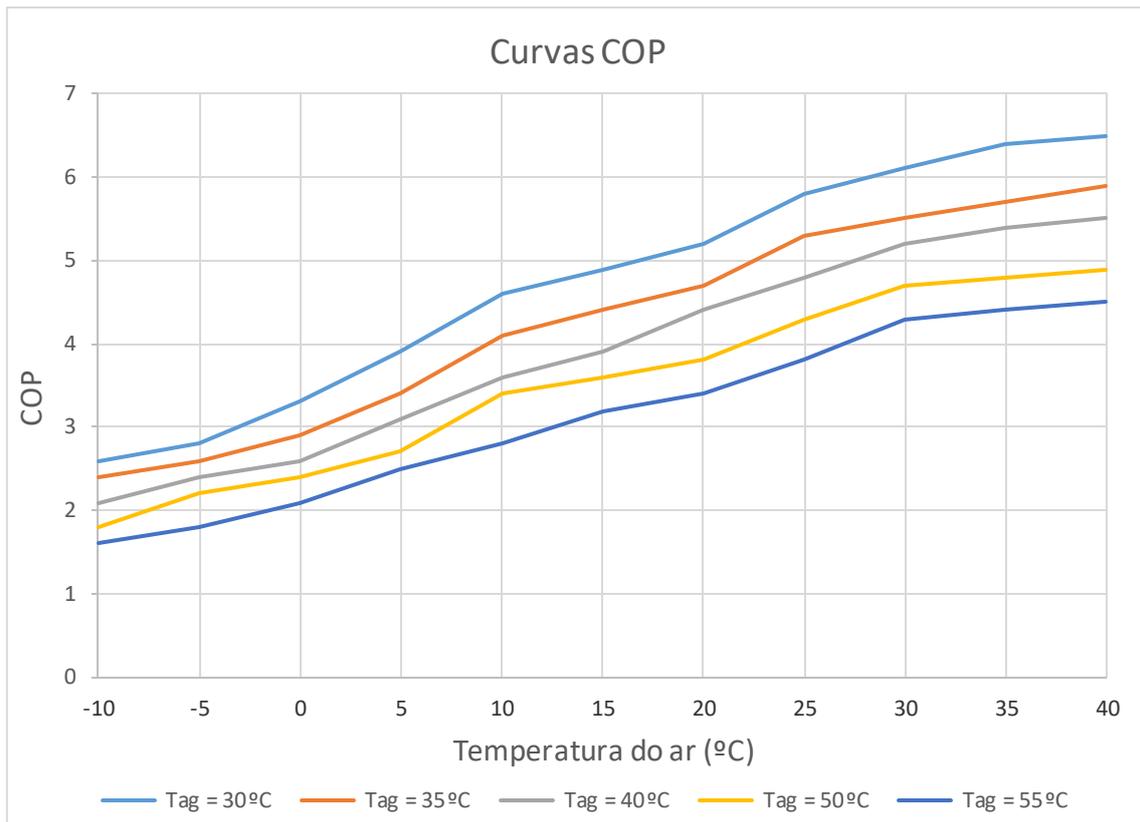


Figura 3.8 - Curvas do COP da bomba de calor

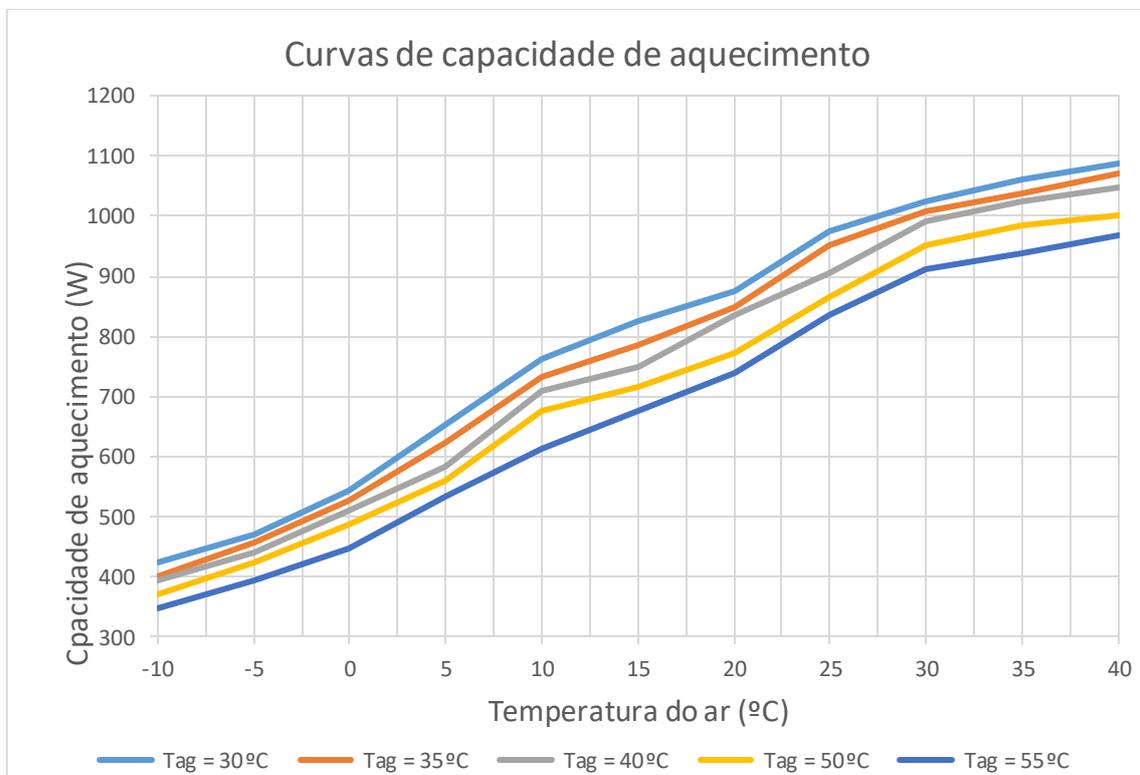


Figura 3.9 - Curvas da capacidade de aquecimento da bomba de calor

Os resultados da simulação energética encontram-se na tabela 3.8.

Mês	Eletricidade total consumida pela bomba de calor (kWh)	Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos (kWh)	Eletricidade consumida proveniente dos painéis fotovoltaicos (kWh)	Eletricidade consumida proveniente da rede elétrica pública (kWh)	Eletricidade total consumida proveniente dos painéis fotovoltaicos (%)
Janeiro	73.2	33.5	30.4	42.8	41.50
Fevereiro	65.3	31.4	27.2	38.1	41.63
Março	68.9	49.6	34.9	34.0	50.63
Abril	65.1	55.7	35.3	29.8	54.28
Maio	60.8	57.3	28.7	32.1	47.24
Junho	53.0	62.5	27.3	25.7	51.56
Julho	52.6	67.3	28.9	23.7	54.93
Agosto	36.4	67.6	16.4	20.0	45.07
Setembro	52.4	53.8	24.5	27.8	46.86
Outubro	59.3	44.7	23.2	36.1	39.10
Novembro	65.7	27.6	20.6	45.1	31.36
Dezembro	73.1	26.0	23.6	49.4	32.31
Total	725.7	577.0	321.0	404.6	44.24

Tabela 3.8 - Resultados energéticos do sistema solar fotovoltaico com implementação de uma bomba de calor

A análise detalhada dos dados obtidos na tabela 3.8 e no gráfico 3.4, permite confirmar que a bomba de calor ao longo de um ano consome 725.7 kWh de eletricidade, sendo que os painéis fotovoltaicos produzem um total de 577 kWh/ano dos quais 321 kWh são fornecidos à bomba de calor sendo a eletricidade consumida proveniente da rede elétrica pública de 404.6 kWh/ano. Como explicado anteriormente, a necessidade de recorrer à energia proveniente da rede elétrica pública ocorre devido à maioria dos consumos não sucederem em simultâneo com os picos de maior produção de energia elétrica, sendo esta desperdiçada.

A fração renovável do sistema solar fotovoltaico com bomba de calor é de 44.24%.

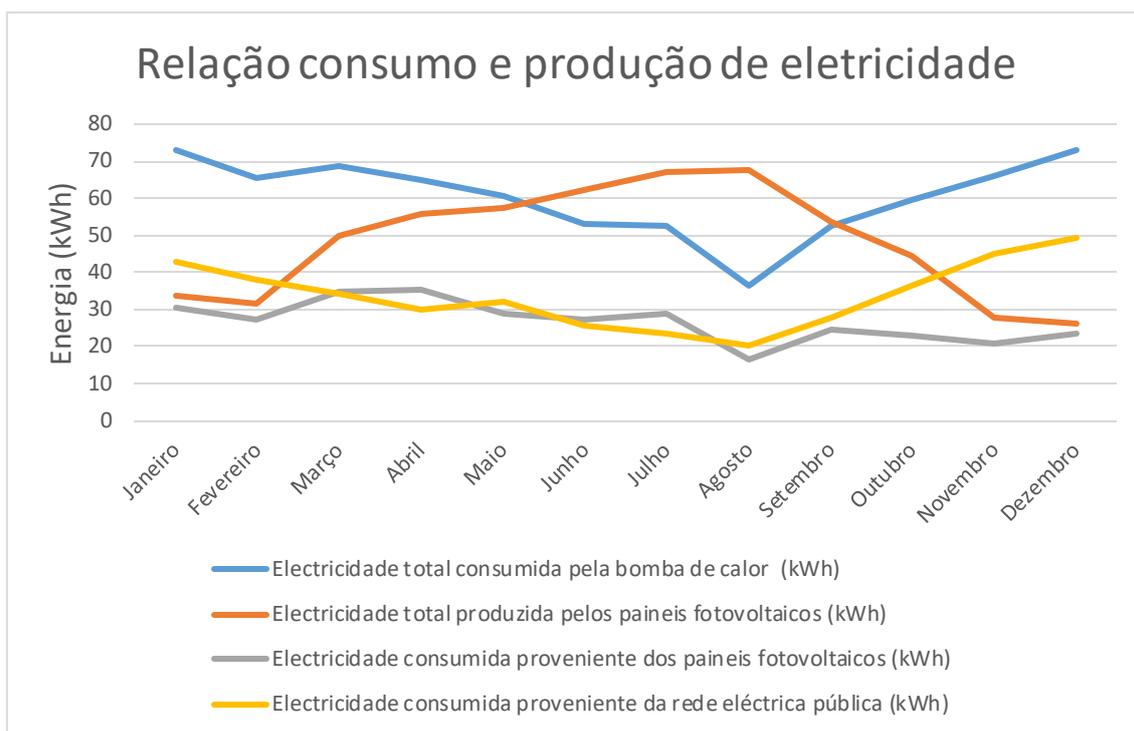


Gráfico 3.4 - Relação consumo e produção de eletricidade

Através do gráfico 3.4 percebe-se facilmente que no intervalo de março a outubro existe uma maior produção de eletricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos, sendo nesse mesmo período onde o consumo de eletricidade proveniente da rede elétrica pública é ligeiramente inferior. Neste intervalo de tempo é possível verificar que existe um maior fornecimento de eletricidade à bomba de calor através dos painéis fotovoltaicos do que da rede elétrica pública.

Os resultados financeiros estão explícitos na tabela 3.9. Analisando dois cenários, o sistema de bomba de calor sem painéis fotovoltaicos e com painéis fotovoltaicos, verifica-se um custo de eletricidade de 116.11€/ano e 64.74€/ano respetivamente.

	Custos totais com bomba de calor (sem fotovoltaico)	Custos totais com sistema fotovoltaico e bomba de calor	Custos com cilindro eléctrico
Eletricidade (€)/ano	116.11	64.74	263.28
Manutenção (€)/ano	30.00	30.00	0
Total (€)/ano	146.11	94.74	263.28
Equipamentos (€)	1322.25	2341.89	299.89

Tabela 3.9 - Custos do sistema de bomba de calor sem painéis fotovoltaicos, com painéis fotovoltaicos e do sistema com cilindro eléctrico

Relativamente ao sistema convencional como referido anteriormente, o investimento inicial é de 299.89€ correspondentes ao valor do cilindro elétrico no mercado. O sistema composto apenas pela bomba de calor tem um custo inicial de 1322.25€, sendo este o custo da bomba de calor no mercado com instalação incluída e com uma manutenção de 60.00€ de dois em dois anos. O sistema solar fotovoltaico e bomba de calor tem um custo inicial de 2341.89€, este valor refere-se ao kit completo do sistema solar fotovoltaico (819.64€ mais 200.00€ de instalação), bomba de calor (1322.25€ com instalação incluída), a este valor acresce 60.00€ de dois em dois anos de manutenção.

O sistema composto apenas pela bomba de calor permite uma poupança anual de 117.17€, enquanto o sistema solar fotovoltaico com a bomba de calor apresenta uma poupança anual de 168.54€ em comparação ao sistema convencional. O sistema fotovoltaico com bomba de calor admite uma poupança anual de 51.37€ relativamente ao sistema constituído somente pela bomba de calor.

O gráfico 3.5 apresenta o custo total do sistema composto pelo cilindro elétrico, e sistema fotovoltaico com bomba de calor. Apresentam-se também resultados só com bomba de calor (sem painéis) para comparação. De salientar que o custo da eletricidade tem, nesta análise, um aumento anual médio de 0.005€/ano.

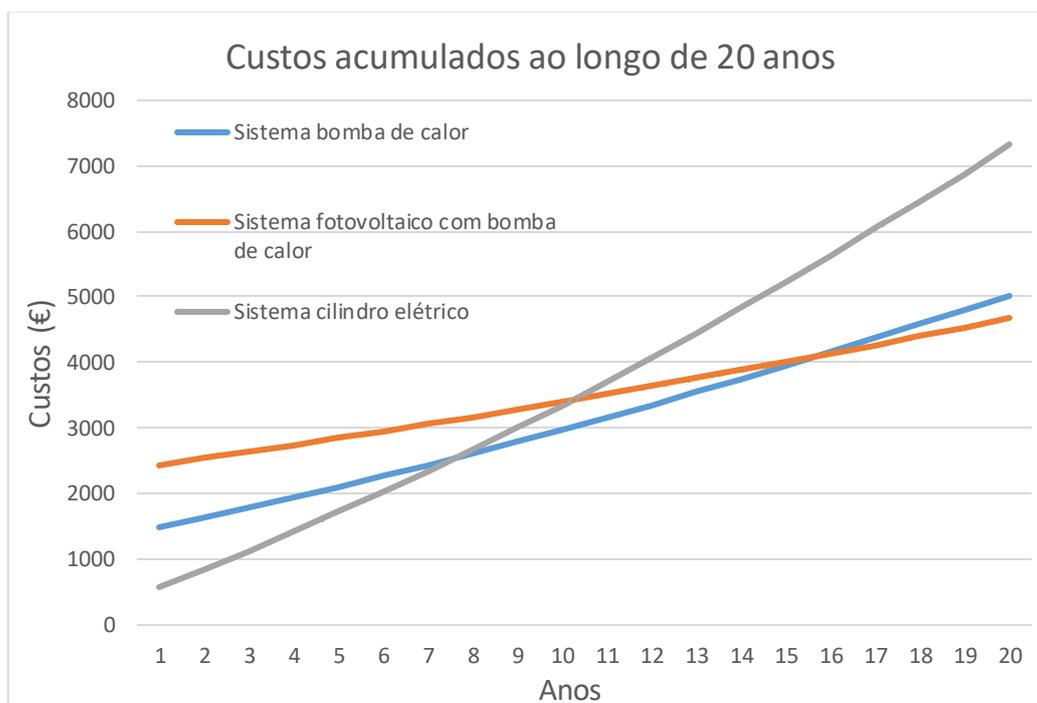


Gráfico 3.5 - Evolução dos custos ao longo de 20 anos.

De acordo com o gráfico acima exibido, no ano 20 o sistema composto pelo cilindro elétrico será o mais dispendioso atingindo custos de 7325.12 €, enquanto o sistema constituído pela bomba de calor e o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor apresentam custos de 5020.47€ e 4669.51€ respetivamente. O sistema formado pela bomba de calor e o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor apresentam poupanças no valor de 2304.65€ e 2655.61€ respetivamente em comparação ao sistema convencional. Deste modo o sistema composto apenas pela bomba de calor apresenta um tempo de retorno de 7 anos e 7 meses, enquanto o sistema fotovoltaico com a bomba de calor ostenta um período de retorno de 10 anos e 2 meses relativamente ao cilindro elétrico.

Relacionando o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor e o sistema constituído apenas pela bomba de calor, verifica-se que o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor apresenta uma poupança em 20 anos de 350.96€, sendo o período de retorno de 15 anos e 9 meses.

### **3.3. Variação dos consumos de AQS**

#### **3.3.1. Sistema solar térmico**

O aumento do consumo de água quente, serve apenas para verificar o que acontece quando se aumentam os consumos (por exemplo, aumentando o número de 3 habitantes da casa). De modo a perceber o comportamento do sistema solar térmico com a variação do consumo de AQS, será estudado um aumento de 25%, 50%, 75%, 100% e 125%. As especificações das componentes constituintes do sistema solar térmico encontram-se na tabela 3.4.

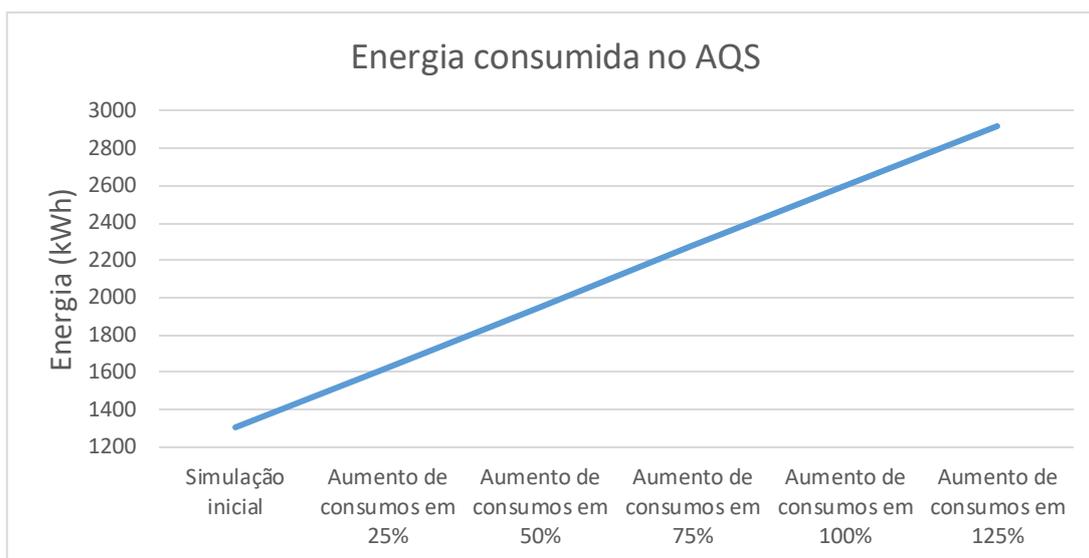


Gráfico 3.6 – Energia térmica consumida no aquecimento de águas sanitárias

Como demonstra o gráfico 3.6, com o aumento dos consumos de AQS, aumenta a energia térmica total a fornecer ao sistema.

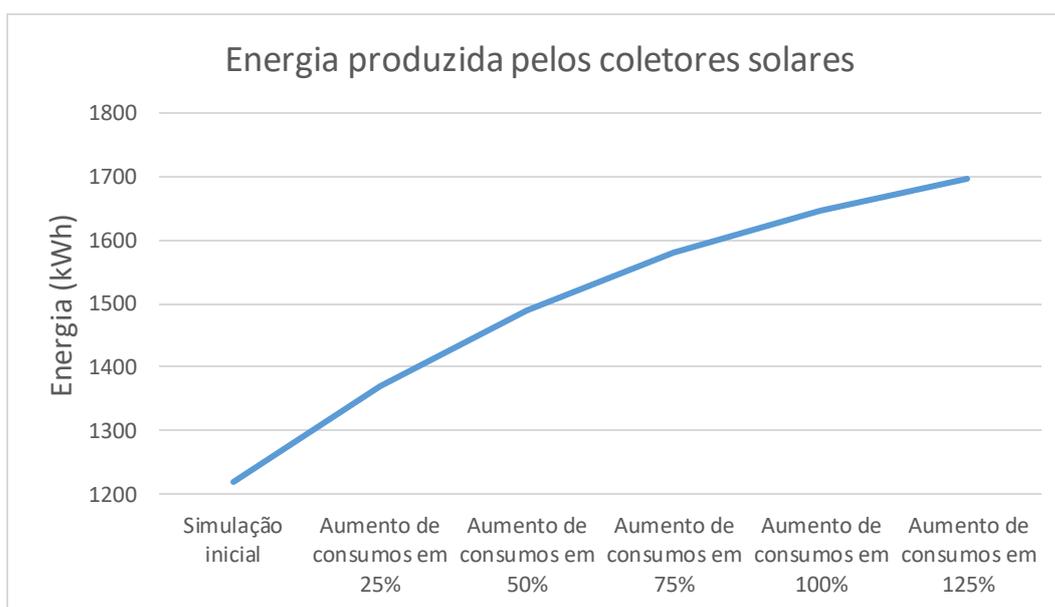


Gráfico 3.7 – Energia térmica produzida pelos coletores solares

Relativamente à energia térmica produzida pelos coletores solares, verifica-se que esta aumenta com o aumento dos consumos de AQS. Apesar deste aumento de produção de energia pelos coletores, esse crescimento ocorre a uma taxa cada vez menor. Os resultados estão representados no gráfico 3.7.

Os constantes crescimentos de consumo, bem como o crescimento da produção de energia proveniente dos coletores solares a uma taxa inferior, implica uma maior necessidade de obtenção de energia num sistema de apoio.

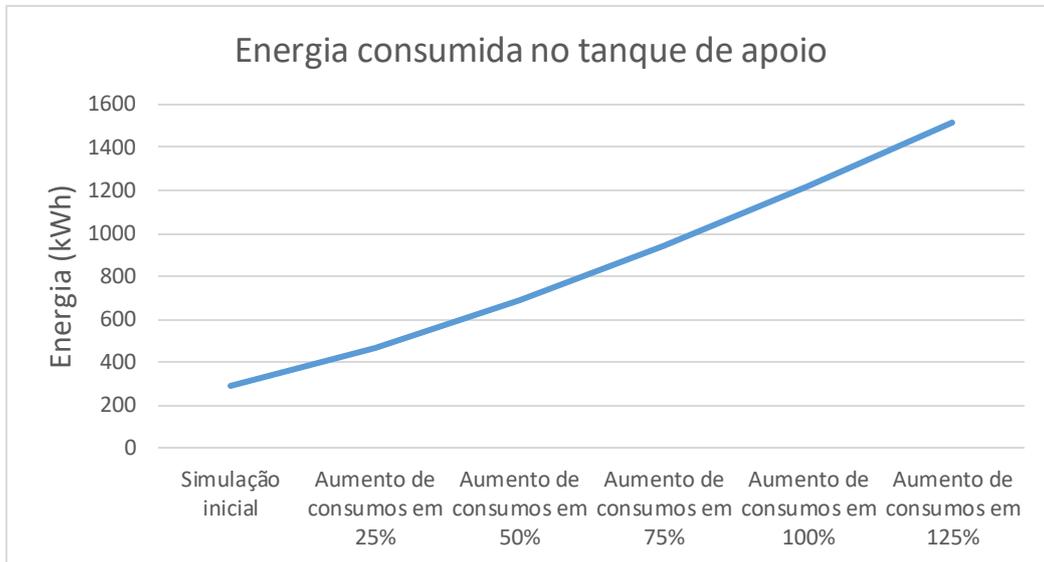


Gráfico 3.8 – Energia térmica consumida no tanque de apoio

O gráfico 3.8 demonstra a energia térmica necessária a fornecer ao sistema, proveniente do tanque de apoio. Esta energia é oriunda da rede elétrica pública. Uma análise cuidada permite perceber que apesar do aumento da obtenção de energia proveniente do sol esta ocorre a uma taxa baixa, sendo que a necessidade de energia proveniente do tanque de apoio sofre um aumento a uma taxa cada vez mais superior.

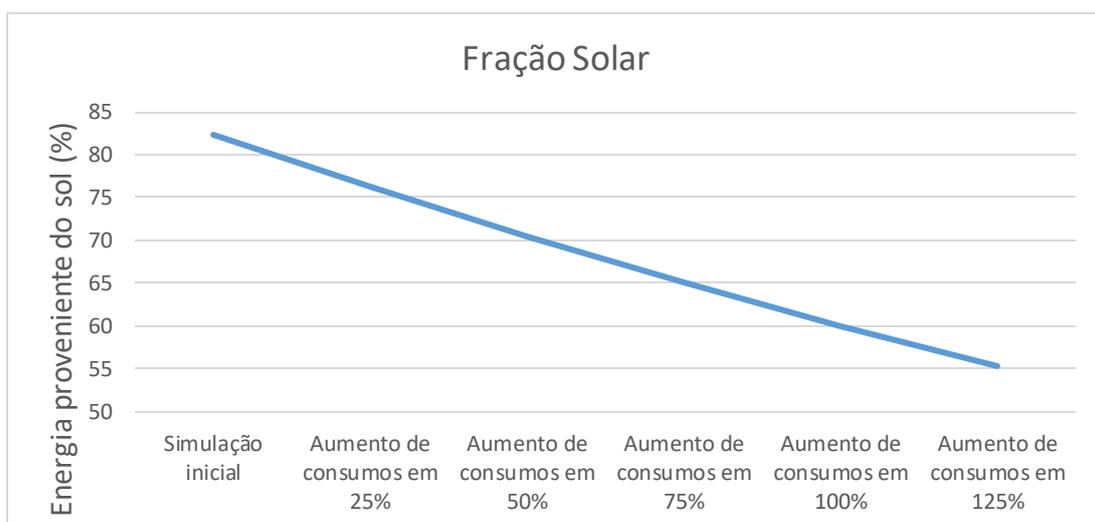


Gráfico 3.9 - Fração solar

Deste modo como descreve o gráfico 3.9, obtém-se uma diminuição da fração solar com o aumento dos consumos. A fração solar descreve a percentagem de energia proveniente do sol utilizada no aquecimento das águas sanitárias. A fração solar é máxima na utilização dos consumos iniciais, contrariamente, a fração solar é mínimo aquando o aumento do consumo em 125% em relação ao inicial.

Economicamente o gráfico 3.10 apresenta os resultados obtidos, relativos ao período de retorno.



Gráfico 3.10 - Período de retorno do sistema solar térmico

O sistema solar térmico composto pelos itens numerados na simulação inicial, apresenta um ponto ótimo quando o consumo da habitação é superior em 75% ao consumo inicial. O período de retorno neste caso é de 7 anos e 7 meses relativamente ao cilindro elétrico, o que parece demonstrar que o sistema solar térmico instalado era mais adequado para 3 pessoas. No entanto, os kits solares já vêm pré-definidos, não existindo no catálogo escolhido um kit de menor dimensão.

O fator financeiro é peça chave na decisão de implementação de sistemas alternativos ao tradicional cilindro elétrico. Assim a realização de um estudo de previsão de custos dos próximos 20 anos torna-se um dado importante. Como referido no ponto 3.2.1. o preço da eletricidade aumenta 0.005€/ano.

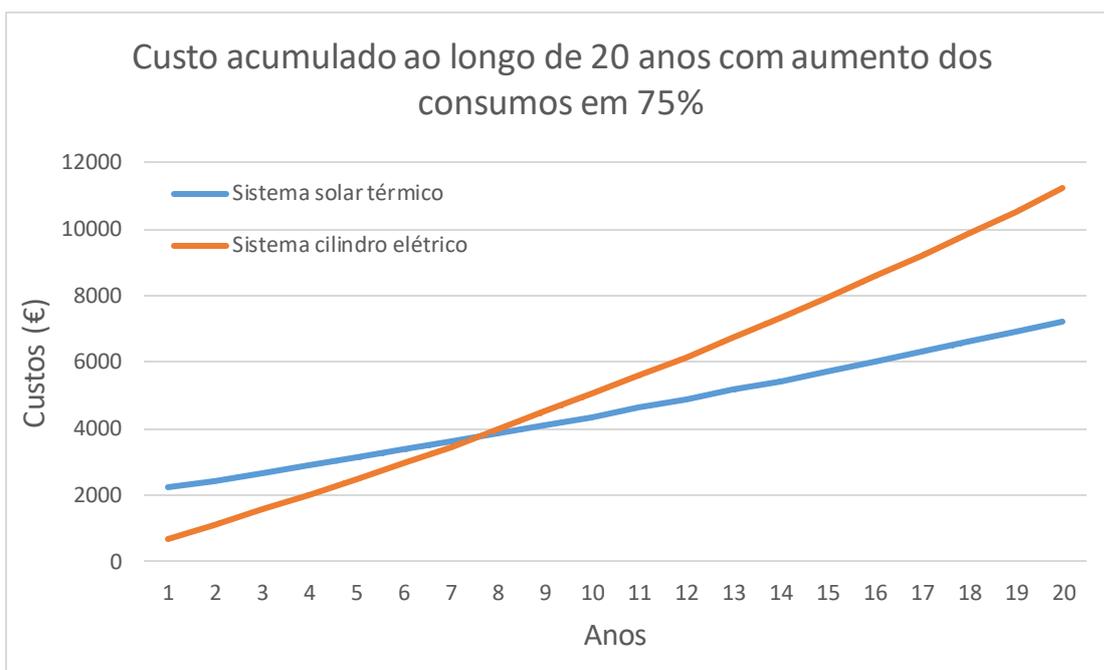


Gráfico 3.11 - Custo ao longo de 20 anos em consumos aumentados em 75%

Deste modo efetuou-se o estudo no ponto ótimo, este indica um custo total no ano 20 de 11228.40€ e 7219.41€ no sistema de cilindro elétrico e sistema solar térmico respetivamente. A implementação do sistema solar térmico em relação ao cilindro elétrico permite uma poupança total de 4008.99€.

### 3.3.2. Sistema solar fotovoltaico com implementação de uma bomba de calor

O aumento do consumo de água quente tem referência igual ao ponto 3.3.1., sendo este analisado de modo a entender o comportamento do sistema solar fotovoltaico em variações de consumo.

As especificações das componentes constituintes do sistema solar fotovoltaico encontram-se na tabela 3.7 localizado no subcapítulo 3.2.3. A energia elétrica consumida pela bomba de calor encontra-se representada no gráfico 3.12.

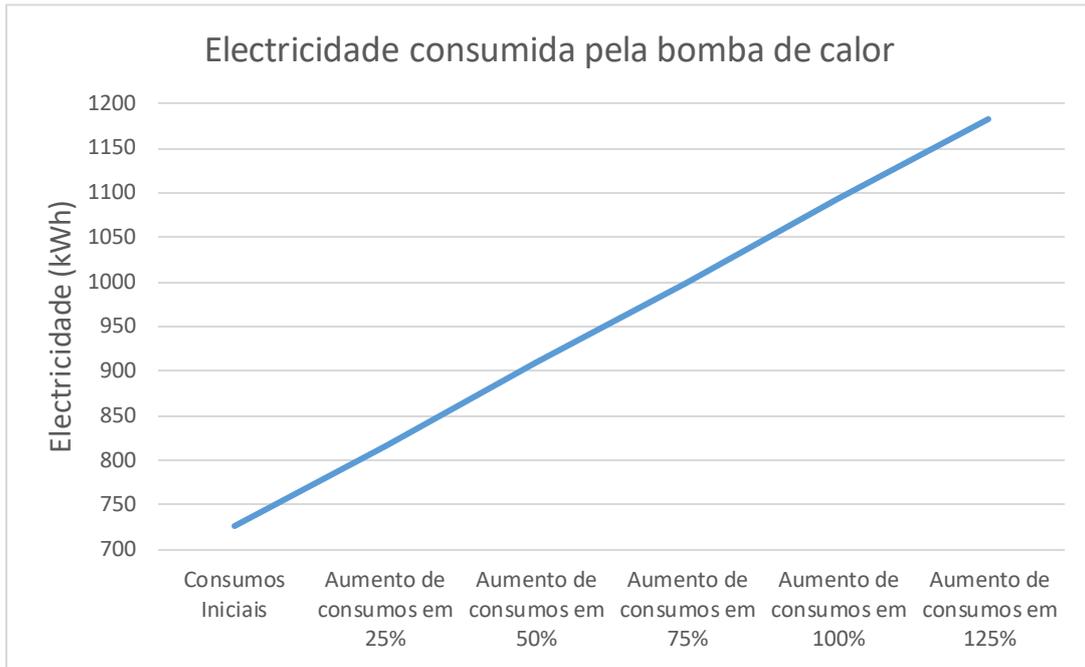


Gráfico 3.12 - Energia elétrica consumida pela bomba de calor

Como previsível, quanto maior o consumo de água quente maior a energia elétrica a fornecer à bomba de calor. Uma fração da energia elétrica fornecida à bomba de calor provém dos painéis fotovoltaicos. O gráfico 3.13 quantifica a energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos.

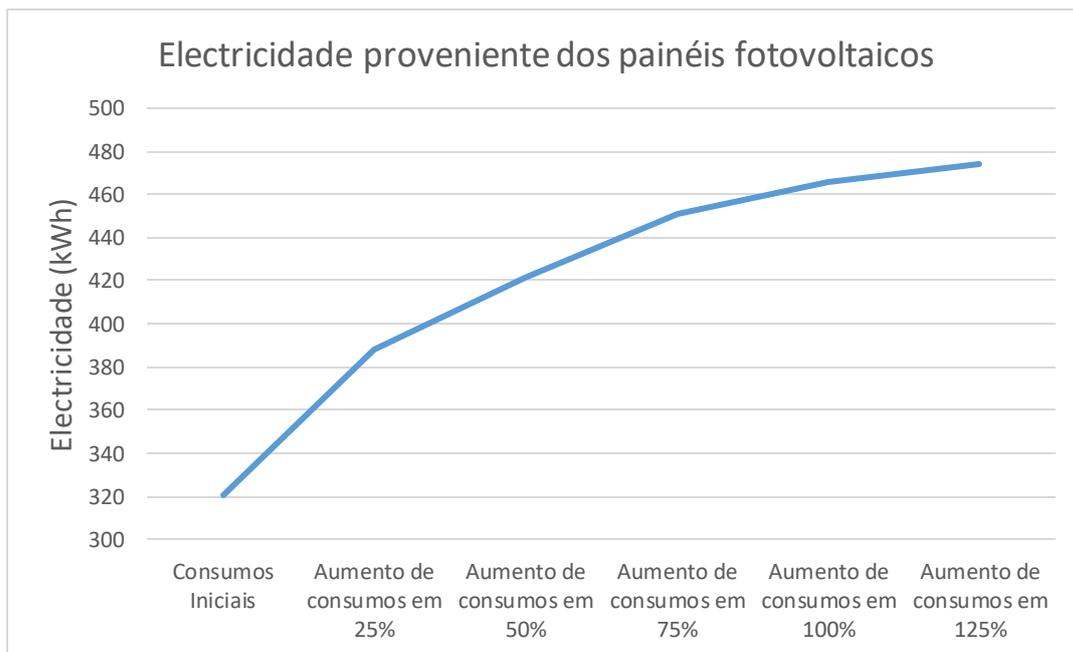


Gráfico 3.13 - Energia elétrica originária dos painéis fotovoltaicos.

Semelhante ao sistema solar térmico, no sistema solar fotovoltaico a energia fornecida à bomba de calor aumenta de acordo com o aumento do consumo de AQS. Contudo esse aumento ocorre a uma taxa cada vez menor.

Sendo a energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos à bomba de calor insuficiente, a necessidade de obtenção de energia elétrica proveniente da rede elétrica pública é uma realidade que se pretende mínima. A quantificação da energia proveniente da rede elétrica pública a fornecer à bomba de calor encontra-se no gráfico 3.14.

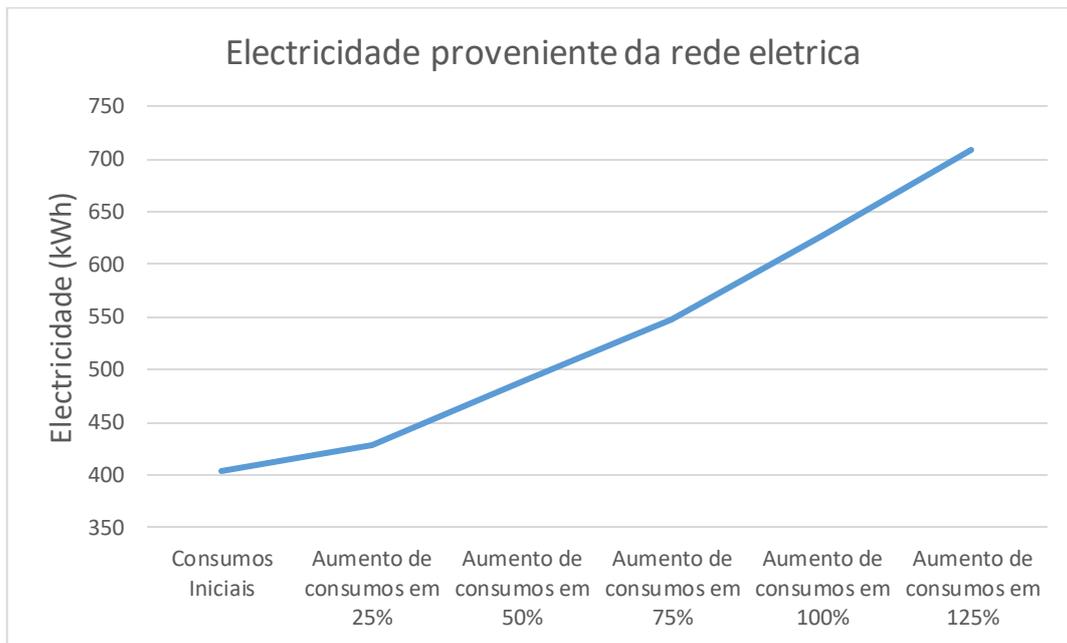


Gráfico 3.14 - Energia elétrica originária da rede elétrica pública

Analisando o gráfico acima representado, verifica-se que com o aumento do consumo de água quente a necessidade de energia elétrica proveniente da rede elétrica pública é maior. Esta necessidade deve-se ao fato de a energia originária dos painéis fotovoltaicos aumentarem a uma taxa inferior às necessidades energéticas exigidas pela bomba de calor.

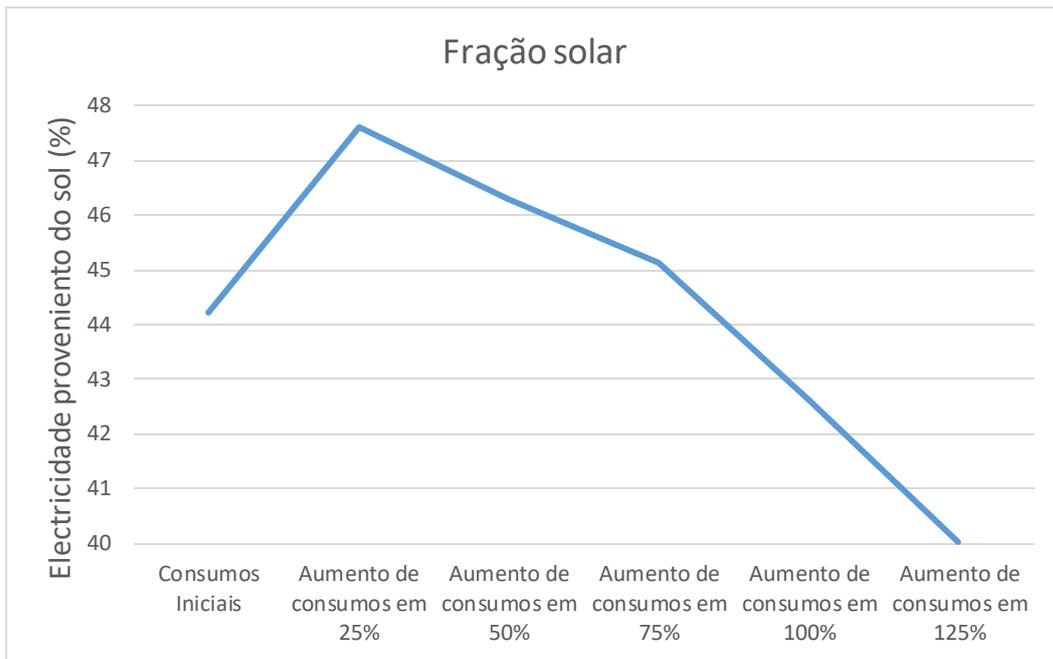


Gráfico 3.15 - Fração solar do sistema solar fotovoltaico com bomba de calor para AQS.

O gráfico 3.15 indica a fração solar do sistema de preparação de AQS com bomba de calor e painéis fotovoltaicos. A fração solar é máxima quando os consumos sofrem um aumento de 25% relativamente aos consumos iniciais. A fração solar é mínima quando ocorre um aumento de 125% do consumo. Neste caso, e de acordo com o gráfico, o sistema mantém uma fração solar elevada tanto com 2 como com 3 ocupantes (+ 50% de consumos).

Concluído o estudo energético torna-se essencial o estudo económico, de modo a verificar a viabilidade económica do sistema. O gráfico 3.16 representa o período de retorno do sistema solar fotovoltaico e do sistema constituído unicamente pela bomba de calor.

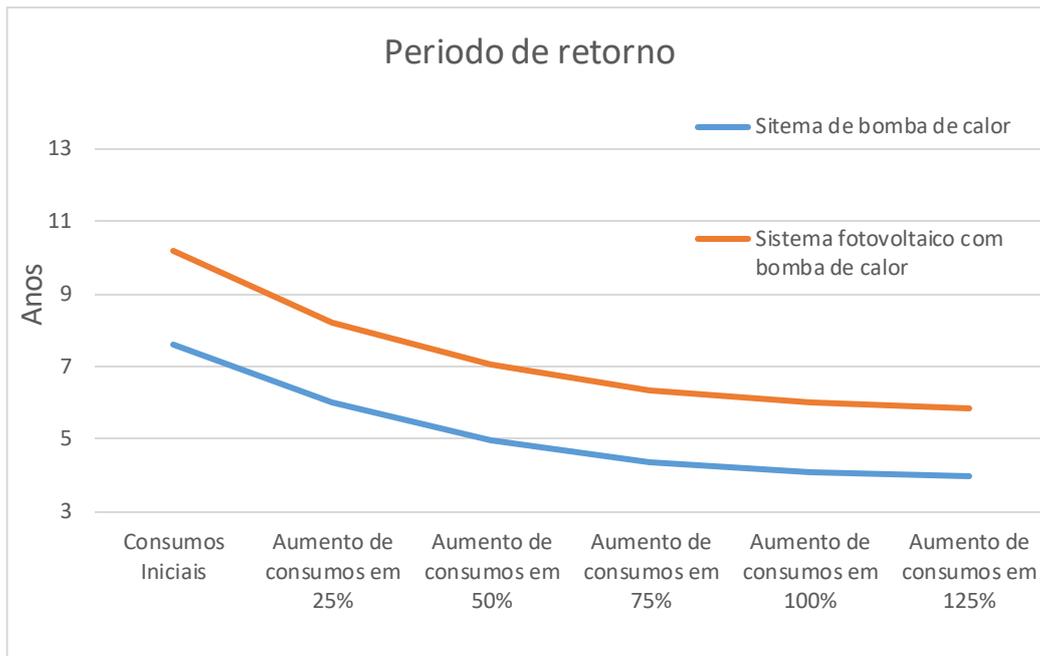


Gráfico 3.16 - Período de retorno do sistema solar fotovoltaico

Analisando economicamente dois sistemas, bomba de calor e sistema solar fotovoltaico com bomba de calor, verifica-se que com o aumento dos consumos de água quente o período de retorno em comparação ao cilindro elétrico diminui. O sistema composto apenas pela bomba de calor oferece um período de retorno menor do que o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor, isto deve-se ao fato do diferente custo de investimento inicial dos distintos sistemas. Em ambos os cenários o período de retorno é ótimo quando ocorre um aumento de 125% do consumo relativamente aos consumos iniciais, sendo este valor de 4 anos, e 5 anos e 10 meses, respetivamente para a bomba de calor e sistema solar fotovoltaico com bomba de calor. Deste modo conclui-se que o sistema fotovoltaico com a bomba de calor e o sistema constituído apenas pela bomba de calor, são mais rentáveis economicamente para consumos de 3 ou 4 pessoas e não tanto a 2 ocupantes.

De modo semelhante ao ponto 3.3.1. a realização de um estudo de previsão de custos dos próximos 20 anos, é peça chave na seleção do sistema por parte do utilizador.

O gráfico 3.17 exhibe os gastos monetários dos próximos 20 anos para cada sistema energético da habitação utilizando os consumos do ponto ótimo, aumento de 125% dos consumos em relação aos iniciais.

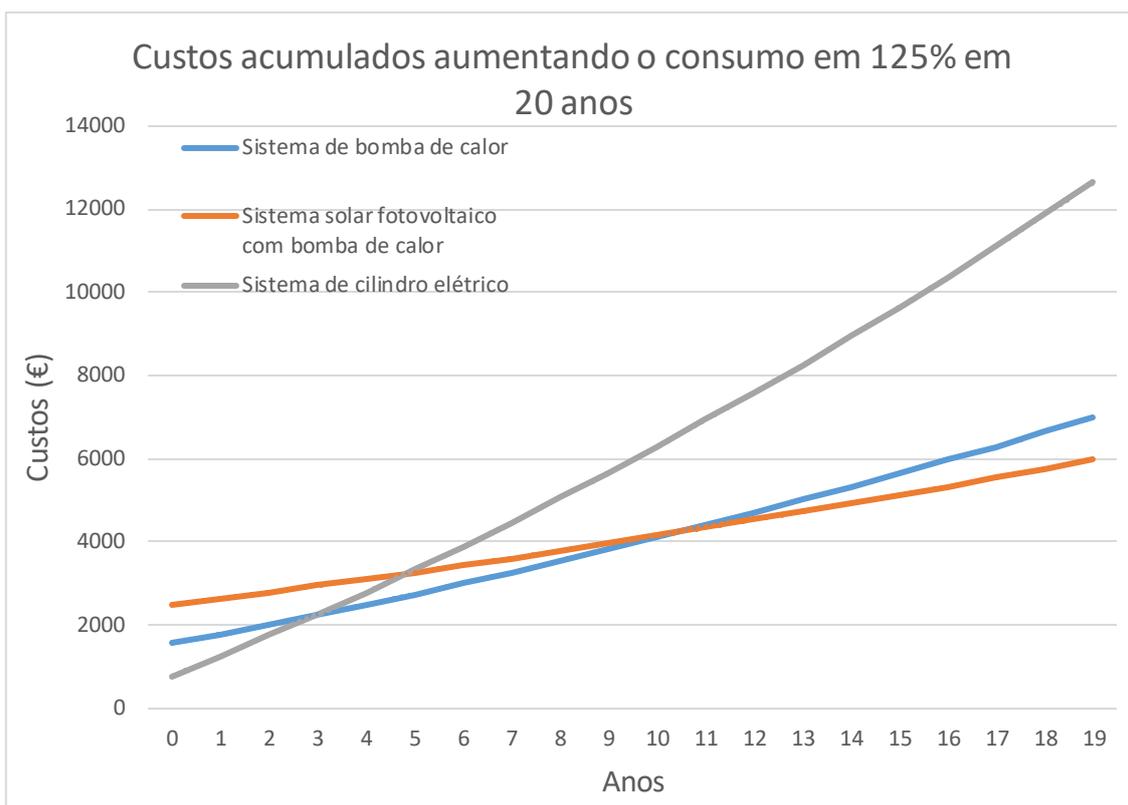


Gráfico 3.17 - Custo ao longo de 20 anos em consumos aumentados em 125%

Atingindo o ano 20 o custo total do sistema composto pelo cilindro elétrico é de 12627.80€, enquanto o sistema constituído pela bomba de calor e o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor é de 6973.14€ e 5970.19 € respetivamente. O sistema formado apenas pela bomba de calor e o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor possuem poupanças respetivas de 5654.66€ e de 6657.61€. A comparação realizada entre o sistema constituído somente pela bomba de calor e o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor indica uma poupança de 1002.95 € e um tempo de retorno de 11 anos e 5 meses, caso opção recaia sobre o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor. O estudo parece indicar que com o aumento dos consumos, ou seja, com mais habitantes na casa, a viabilidade económica torna-se bem mais interessante.

## **4. SIMULAÇÃO ENERGÉTICA OTIMIZADA**

Concluída a simulação energética inicial dos diferentes sistemas de aquecimento de águas sanitárias, torna-se de elevada importância a otimização destes. A melhoria dos diferentes sistemas de AQS tem como objetivo a máxima rentabilização energética e económica, de modo a serem considerados mais atrativos para o consumidor final.

No que se refere apenas à otimização do sistema bomba de calor com solar fotovoltaico, medidas como a implementação de um temporizador na bomba de calor, a alteração do ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos, bem como a instalação de baterias serão igualmente estudadas e avaliadas.

### **4.1. Instalação de um temporizador na bomba de calor**

A implementação de um temporizador no controlo da bomba de calor com sistema solar fotovoltaico é uma medida interessante de modo a otimizar o sistema em análise. O objetivo da instalação do temporizador na bomba de calor é restringir o período em que esta se encontra ligada. O temporizador está programado para ligar a bomba de calor entre as 10 horas e as 18 horas durante o período de inverno (de 30 de setembro até 30 de abril), e entre as 09 horas e as 18 horas durante o período de verão (de 30 de abril até 30 de setembro). Deste modo, a bomba de calor encontra-se apenas ligada durante o período de radiação solar.

O temporizador tem a desvantagem de impedir a produção de água quente durante o período noturno, o que pode ser limitativo principalmente no período de inverno. Para além disso, a potência de aquecimento da bomba de calor é de apenas 850 W, pelo que o aquecimento da água do reservatório é efetuada de forma relativamente lenta. Isto pode ser problemático durante as primeiras horas da manhã, momento em que ocorre um elevado consumo nos chuveiros. Embora se verificasse um decréscimo da temperatura do tanque, a água dos chuveiros esteve sempre pelo menos a 40°C pelo que esta solução com temporizador não é inviável. Para isso contribui o elevado volume de armazenamento do reservatório, com 190 L, que permite produzir e armazenar uma grande quantidade de água quente quando o temporizador está ligado.

As especificações dos componentes constituintes do sistema bomba de calor com solar fotovoltaico encontram-se na tabela 3.7 localizado no subcapítulo 3.2.3. Os resultados da simulação energética encontram-se na tabela 4.1.

Mês	Eletricidade total consumida pela bomba de calor (kWh)	Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos (kWh)	Eletricidade consumida proveniente dos painéis fotovoltaicos (kWh)	Eletricidade consumida proveniente da rede elétrica pública (kWh)	Eletricidade total consumida proveniente dos painéis fotovoltaicos (%)
Janeiro	56.5	35.7	30.2	26.3	53.46
Fevereiro	51.5	33.4	28.7	22.8	55.69
Março	57.7	52.8	41.4	16.3	71.79
Abril	56.3	59.2	42.5	13.8	75.56
Maio	55.5	61.0	43.8	11.8	78.80
Junho	49.2	66.5	42.9	6.3	87.15
Julho	49.1	71.6	43.0	6.1	87.62
Agosto	33.8	71.9	28.8	5.0	85.15
Setembro	48.4	57.2	39.7	8.7	82.06
Outubro	52.9	47.5	37.1	15.7	70.23
Novembro	56.0	29.4	25.3	30.7	45.26
Dezembro	57.2	27.6	24.3	32.9	42.52
Total	624.1	613.8	427.8	196.3	68.55

Tabela 4.1 - Resultados energéticos do sistema solar fotovoltaico com temporizador implementado na bomba de calor

Efetuada uma análise aos dados da tabela 4.1 e gráfico 4.1, é possível afirmar que a bomba de calor consome 624.1 kWh/ano de energia elétrica, sendo que os painéis fotovoltaicos produzem um total de 613.8 kWh/ano de eletricidade, dos quais 427.8 kWh/ano alimenta a bomba de calor. A restante energia elétrica fornecida à bomba de calor é proveniente da rede elétrica pública, registando um valor de 196.3 kWh/ano. Comparativamente com a simulação inicial, a instalação do temporizador na bomba de calor, permite uma poupança anual de 101.6 kWh de energia consumida pela bomba de calor e 208.4 kWh de energia proveniente da rede elétrica pública, uma vez que a eletricidade fornecida pelos painéis fotovoltaicos aumentou em 106.8 kWh.

A fração renovável do sistema solar fotovoltaico com bomba de calor subiu em 24.31% atingindo os 68.55% em comparação à simulação inicial.

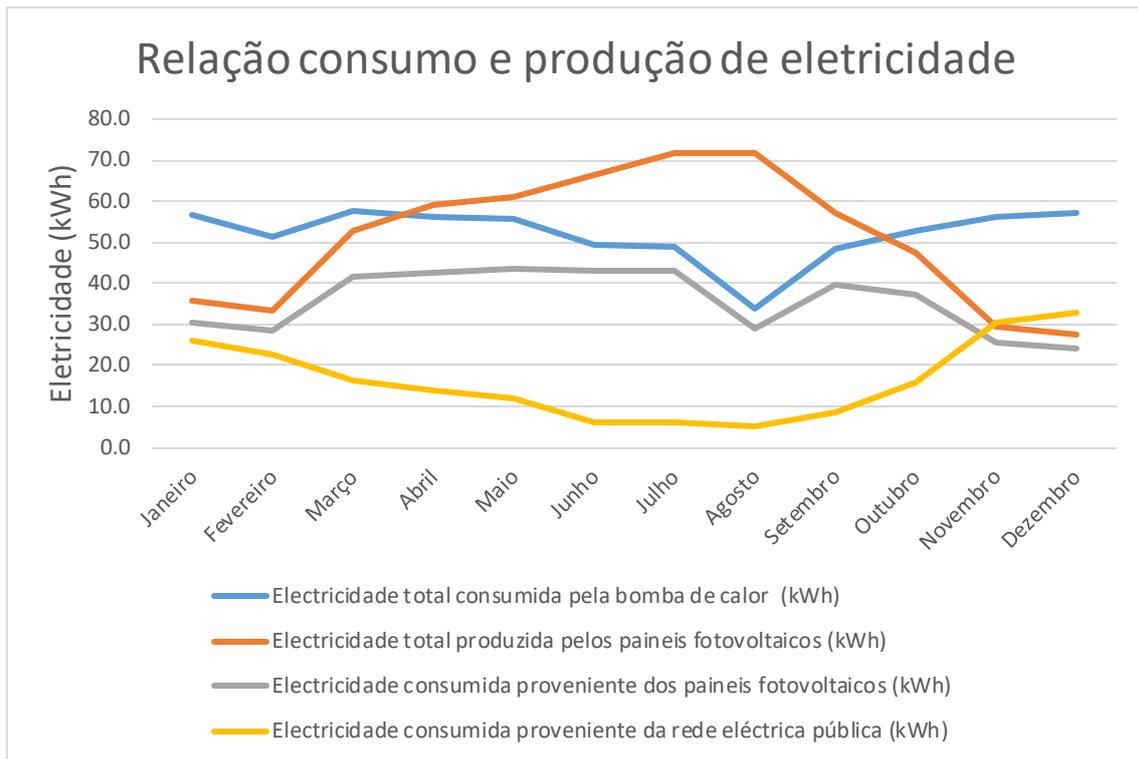


Gráfico 4.1 - Relação consumo e produção de eletricidade

O gráfico 4.1 indica que entre março a outubro o fornecimento de energia elétrica à rede é maioritariamente proveniente dos painéis fotovoltaicos. O período onde a eletricidade fornecida à bomba de calor é maioritariamente originária da rede elétrica pública situa-se entre novembro e dezembro.

A poupança ao nível energético traduz naturalmente uma poupança económica. O sistema constituído pelo sistema fotovoltaico com bomba de calor e implementação de um temporizador possui um gasto elétrico anual de 31.40€, permitindo uma poupança elétrica anual de 33.34€ em comparação com a simulação inicial localizada na tabela 3.9 do subcapítulo 3.2.3.

	Custos totais com sistema solar fotovoltaico e bomba de calor sem implementação de temporizador	Custos totais com sistema solar fotovoltaico e bomba de calor com implementação de temporizador	Custos com cilindro elétrico
Eletricidade (€)/ano	64.74	31.40	263.28
Manutenção (€)/ano	30.00	30.00	0
Total (€/ano)	94.74	61.40	263.28
Equipamentos (€)	2341.89	2350.64	299.89

Tabela 4.2 - Custos do sistema solar fotovoltaico com implementação de temporizador na bomba de calor

Analisando a tabela 4.2, conclui-se que o sistema fotovoltaico com a bomba de calor sem temporizador e com temporizador possibilitam uma poupança total anual de 168.54€ e 201.88€ respetivamente relativamente ao sistema com cilindro elétrico.

Note-se que o preço dos equipamentos relativos ao sistema compostos pela bomba de calor sofreu um acréscimo de 8.75€ referente ao valor do temporizador, traduzindo-se no preço final de 2350.64€ para o sistema fotovoltaico com bomba de calor.

O gráfico 4.2 ilustra o custo total do sistema com cilindro elétrico, sistema fotovoltaico com bomba de calor sem temporizador e com temporizador durante 20 anos.

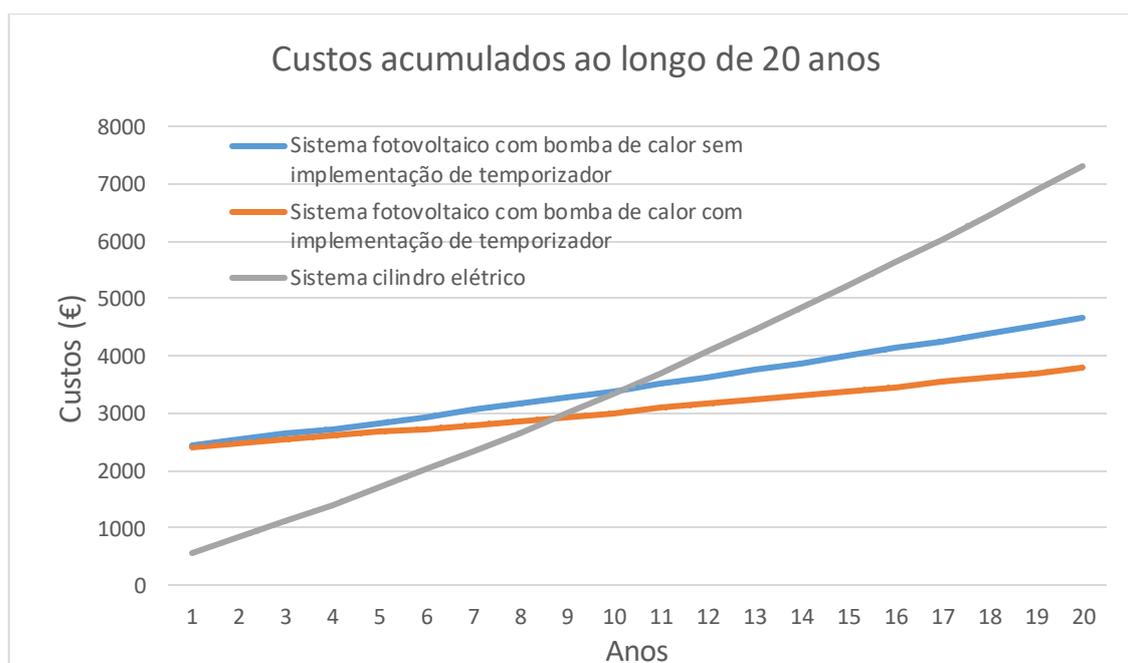


Gráfico 4.2 - Custo ao longo de 20 anos do sistema solar fotovoltaico com implementação de temporizador na bomba de calor

O gráfico acima representado indica que o custo total de instalação do sistema fotovoltaico com bomba de calor e implementação de um temporizador é de 3788.60€, traduzindo-se numa poupança de 3536.52€ e 880.91€ respetivamente, em relação ao sistema de cilindro elétrico e sistema fotovoltaico com bomba de calor sem implementação de um temporizador. O período de retorno situa-se nos 10 anos e 2 meses para o sistema fotovoltaico com bomba de calor sem implementação de um temporizador, e de 8 anos e 9 meses para o sistema fotovoltaico com bomba de calor e implementação de temporizador.

Comparativamente com o sistema fotovoltaico com bomba de calor sem instalação de temporizador, o sistema fotovoltaico com bomba de calor e implementação de temporizador admite um período de retorno de 3 meses.

## **4.2. Alteração da inclinação dos painéis fotovoltaicos**

Os painéis fotovoltaicos instalados na habitação apresentam a mesma inclinação da construção do telhado, sendo que este ostenta um declive de 34.7°. De modo a obter um sistema mais eficiente durante o inverno, e compreender que alterações significativas ocorreriam, alterou-se a inclinação do painel fotovoltaico para os 52°. As especificações das componentes constituintes do sistema solar fotovoltaico encontram-se na tabela 3.78 localizado no subcapítulo 3.2.3. Os resultados da simulação energética com os painéis fotovoltaicos a uma inclinação de 52°, estão representados na tabela 4.3.

Mês	Eletricidade total consumida pela bomba de calor (kWh)	Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos (kWh)	Eletricidade consumida proveniente dos painéis fotovoltaicos (kWh)	Eletricidade consumida proveniente da rede elétrica pública (kWh)	Eletricidade total consumida proveniente dos painéis fotovoltaicos (%)
Janeiro	73.2	35.7	31.4	41.8	42.87
Fevereiro	65.3	32.2	27.3	38.0	41.87
Março	68.9	49.2	34.1	34.8	49.50
Abril	65.1	53.2	33.9	31.2	52.13
Mai	60.8	53.0	26.9	33.9	44.28
Junho	53.0	57.2	25.6	27.4	48.32
Julho	52.5	61.9	27.1	25.5	51.50
Agosto	36.4	64.1	15.8	20.6	43.35
Setembro	52.3	52.6	23.9	28.4	45.74
Outubro	59.3	45.6	23.1	36.3	38.86
Novembro	65.7	28.7	21.2	44.6	32.19
Dezembro	73.0	27.6	24.6	48.4	33.69
Total	725.7	561.0	314.9	410.8	43.39

Tabela 4.3 - Resultados energéticos do sistema solar fotovoltaico com alteração dos painéis fotovoltaicos para 52°

A análise detalhada dos dados da tabela 4.3 e do gráfico 4.3, permite verificar que a bomba de calor possui um consumo de 725.7 kWh/ano de energia elétrica, e os painéis fotovoltaicos têm uma produção de 561 kWh/ano, da qual apenas 314.9 kWh/ano sustenta a bomba de calor. Naturalmente a restante energia elétrica necessária de modo a satisfazer os gastos provocados pelo funcionamento da bomba de calor, é requerida pela rede elétrica pública. O valor energético proveniente da rede elétrica pública é de 410.8 kWh/ano. A confrontação com os resultados originários da simulação inicial, a alteração dos painéis fotovoltaicos para um declive de 52°, apresenta um défice anual de 16 kWh e 6.1 kWh, respetivamente na produção de energia elétrica e consumo de eletricidade oriundos dos painéis fotovoltaicos. Consequentemente a energia fornecida pela rede elétrica pública obteve um aumento de 6.2 kWh/ano.

Os meses associados à época de inverno, como seria esperado melhoraram a sua fração solar. Ocorreu um crescimento de 1.37%, 0.24%, 0.83% e 1.38% respetivamente nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro do aproveitamento

solar. No sentido contrário todos os restantes meses do ano sofreram um decréscimo da fração solar. Assim o sistema fotovoltaico com implementação da bomba de calor possui uma fração renovável de 43.39%, menos 0.85% do que nas condições de simulação inicial.

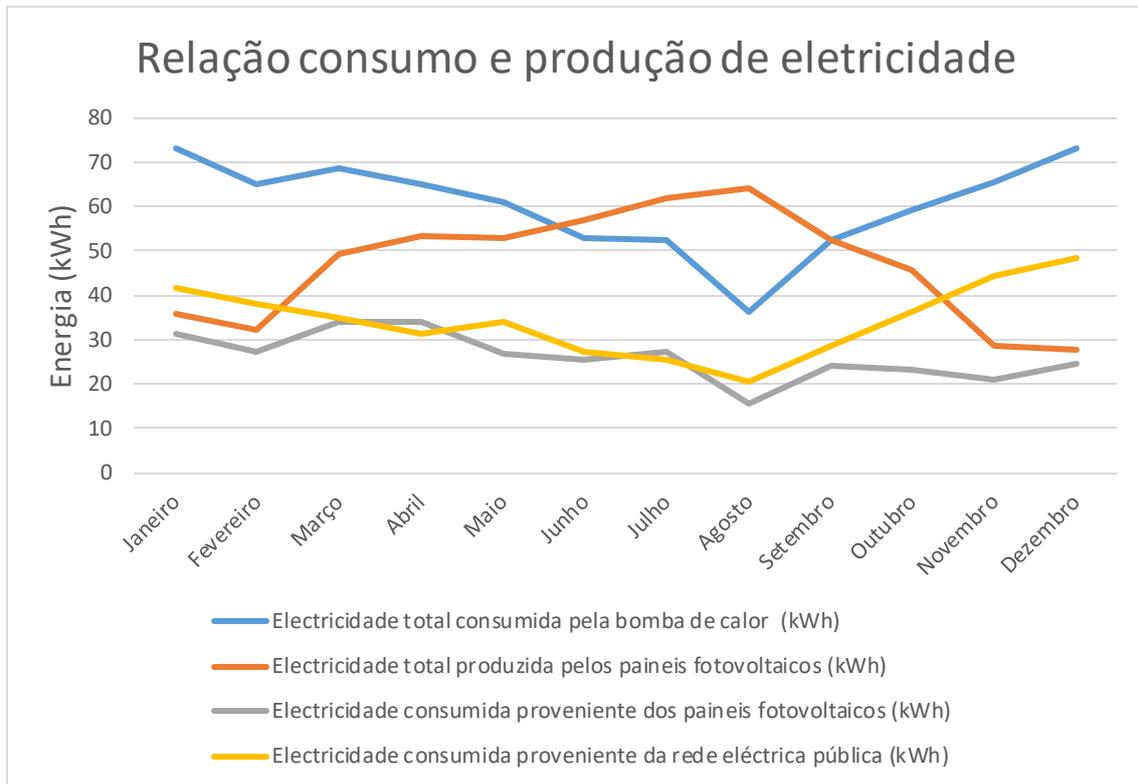


Gráfico 4.3 - Relação consumo e produção de eletricidade

O gráfico 4.3 exhibe o comportamento energético ao longo do ano, onde se percebe que abril e junho são os únicos meses onde a eletricidade proveniente dos painéis é superior à eletricidade oriunda da rede elétrica pública. Como descrito anteriormente apesar do aumento da fração solar na época de inverno, a eletricidade originária da rede elétrica pública continua a ser superior à fornecida pelos painéis fotovoltaicos.

Após análise energética, o estudo económico permite verificar que os gastos anuais são mais avultados no sistema fotovoltaico com os painéis a uma inclinação de 52° que painéis fotovoltaicos com a inclinação inicialmente estudada (34.7°). O sistema fotovoltaico com bomba de calor possui um gasto de 65.72€/ano, mais 0.98€/ano em relação à simulação inicial.

	Custos totais com sistema solar fotovoltaico e bomba de calor com inclinação de 34.7º	Custos totais com sistema solar fotovoltaico e bomba de calor com inclinação de 52º	Custos com cilindro elétrico
Eletricidade (€)/ano	64.74	65.72	263.28
Manutenção (€)/ano	30.00	30.00	0
Total (€/ano)	94.74	95.72	263.28
Equipamentos (€)	2341.89	2341.89	299.89

Tabela 4.4 - Custos do sistema solar fotovoltaico com inclinação dos painéis fotovoltaicos para 52º

A análise à tabela 4.4, indica que o sistema fotovoltaico com bomba de calor e inclinação dos painéis a 52º sofreu um ligeiro aumento relativamente à simulação inicial, perfazendo o custo total anual de 95.72 € mais 0.98€. Assim em comparação com o cilindro elétrico, o sistema fotovoltaico com bomba de calor e inclinação dos painéis de 52º apresenta uma poupança de 167.56 €/ano.

Com o intuito de estudar os diferentes sistemas, o gráfico 4.4 demonstra o custo total dos três sistemas alvo de estudo durante 20 anos.

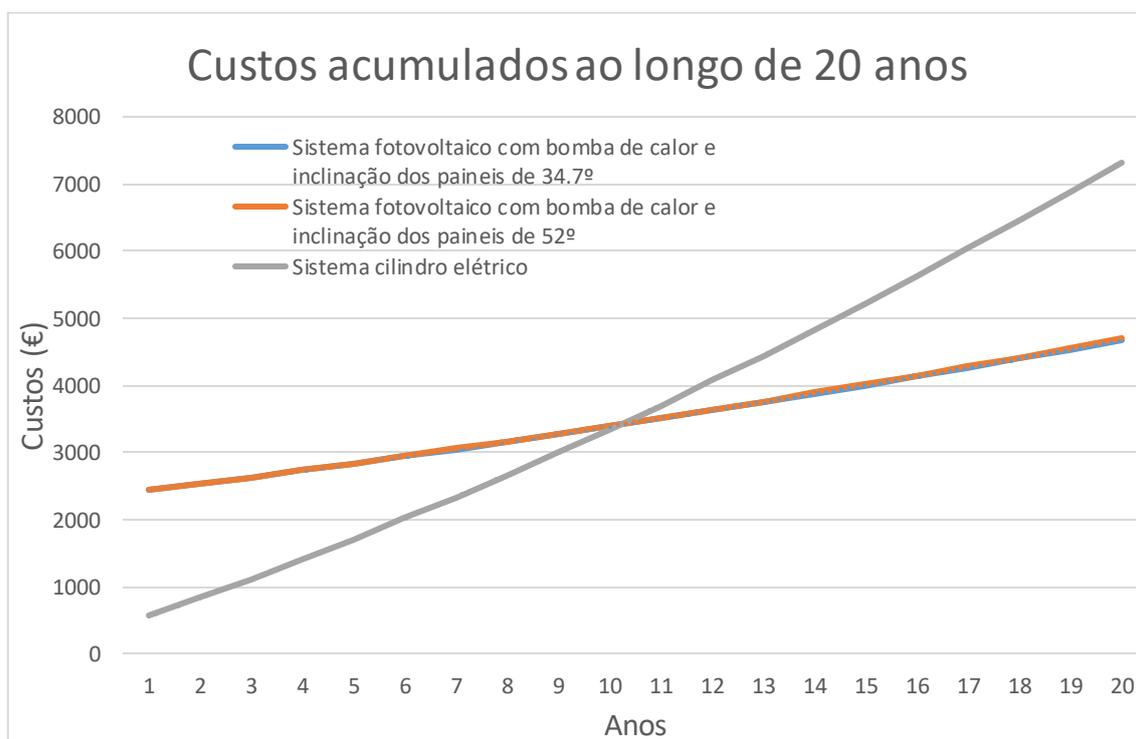


Gráfico 4.4 - Custo ao longo de 20 anos do sistema solar fotovoltaico com inclinação dos painéis fotovoltaicos para 52º

O gráfico acima representado demonstra um custo total na instalação do sistema solar fotovoltaico com bomba de calor e inclinação dos painéis a 34.7° igual ao da simulação inicial, sendo este de 4669.51 €, enquanto o sistema fotovoltaico com bomba de calor e inclinação dos painéis a 52° sofreu um ligeiro aumento de 26.18 €, obtendo um custo final de 4695.69 €. Estes valores traduzem-se numa poupança em relação ao sistema com cilindro elétrico de 2655.61 € e de 2629.43 €, respetivamente para sistema fotovoltaico com bomba de calor e inclinação a 34.7° e sistema fotovoltaico com bomba de calor e inclinação de 52°.

O período de retorno estimado situa-se nos 10 anos e 2 meses para o sistema fotovoltaico com bomba de calor e inclinação dos painéis a 34.7° e nos 10 anos e 3 meses para o sistema fotovoltaico com bomba de calor e inclinação dos painéis a 52°.

### **4.3. Instalação de baterias**

A instalação de baterias no sistema solar fotovoltaico é uma medida alvo de estudo aliciente na otimização do sistema em análise.

O principal objetivo da implementação das baterias no sistema solar fotovoltaico é armazenar a energia adquirida pelos painéis fotovoltaicos; assim esta é fornecida à bomba de calor quando necessária, diminuindo a compra de eletricidade à rede elétrica pública.

De modo a tirar o máximo proveito da eletricidade gerada pelos painéis, é necessário dimensionar a capacidade bem como o número de baterias necessárias a adicionar ao sistema. O pico máximo diário de geração de energia pelos painéis fotovoltaicos é de 1.34 kWh, assim a seleção de baterias com capacidade de 54 Ah e voltagem de 12V permite o armazenamento de 0.648 kWh. Como o armazenamento de cada bateria é de 0.648 kWh torna-se necessário a instalação de 2 baterias em série permitindo uma capacidade de armazenamento total de 1.3 kWh. A instalação de baterias em série permite o aumento da tensão elétrica, sendo esta igual à soma das tensões elétricas individuais de cada bateria. Deste modo a tensão elétrica total do sistema é de 24V. Na figura 4.1 encontra-se o esquema do circuito utilizado na simulação energética. Este está explicado mais detalhadamente na figura A.5 localizado no Anexo A.

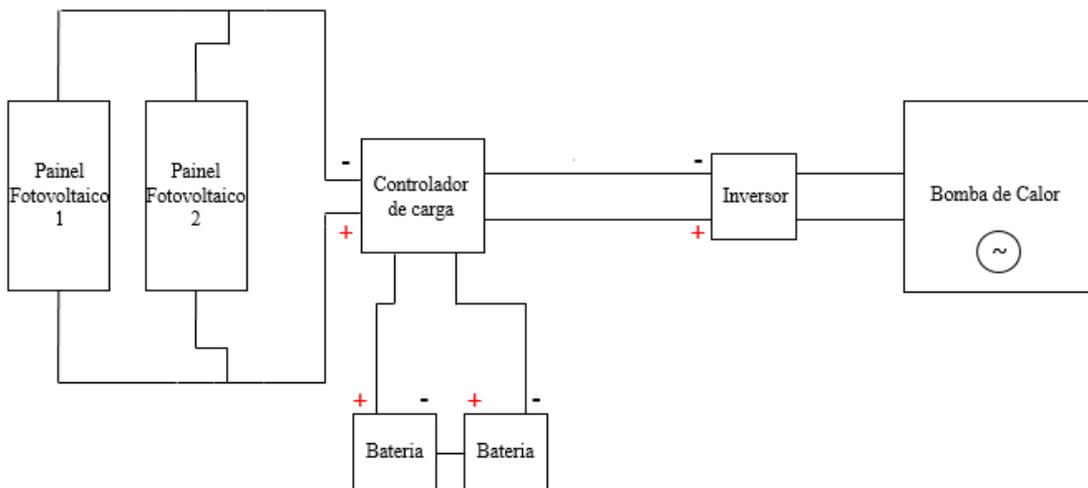


Figura 4.1 - Esquema do circuito elétrico do sistema solar fotovoltaico com baterias e bomba de calor

As especificações das componentes constituintes do sistema solar fotovoltaico encontram-se resumidas na tabela 4.5.

Componente	Especificação
<b>Painel Fotovoltaico</b>	
Número de painéis	2
Número de células por painel	60
Área do painel	1.46 m <sup>2</sup>
Potência (P)	250 W
Tensão (V)	30.75 V
Intensidade (A)	8.14 A
Tensão de circuito aberto (VOC)	32.50 V
Intensidade de curto-circuito (Isc)	8.58 A
<b>Bomba de calor</b>	
Capacidade do reservatório	110 L
COP nominal	3.4
Potência térmica nominal (ar 20 °C)	850 W
<b>Inversor</b>	
Eficiência	94 %
<b>Baterias</b>	
Número de baterias	2
Capacidade	54 Ah
Voltagem	12 V

Tabela 4.5 - Especificações das componentes constituintes do sistema solar fotovoltaico com implementação de baterias

Os resultados da simulação energética encontram-se na tabela 4.6.

Mês	Eletricidade total consumida pela bomba de calor (kWh)	Eletricidade total produzida pelos painéis fotovoltaicos (kWh)	Eletricidade consumida proveniente dos painéis fotovoltaicos (kWh)	Eletricidade consumida proveniente da rede elétrica pública (kWh)	Eletricidade total consumida proveniente dos painéis fotovoltaicos (%)
Janeiro	55.8	35.7	29.6	26.1	53.11
Fevereiro	50.2	33.4	26.5	23.7	52.79
Março	52.7	52.8	35.9	16.8	68.08
Abril	49.2	59.2	38.1	11.2	77.34
Maió	46.5	61.0	35.9	10.6	77.27
Junho	40.7	66.5	33.7	7.0	82.76
Julho	41.2	71.6	35.2	6.0	85.48
Agosto	30.9	71.9	25.6	5.3	82.74
Setembro	40.5	57.2	31.7	8.8	78.22
Outubro	45.1	47.5	29.0	16.1	64.33
Novembro	49.5	29.4	23.3	26.2	47.04
Dezembro	54.7	27.6	24.8	29.9	45.38
Total	556.9	613.8	369.2	187.8	66.30

Tabela 4.6 - Resultados energéticos do sistema solar fotovoltaico com implementação de baterias

A análise aos dados da tabela 4.6 e gráfico 4.5 indica que a bomba de calor possui um consumo de 556.9 kWh/ano de energia elétrica

Os painéis fotovoltaicos produzem um total de 613.8 kWh/ano, dos quais 369.2 kWh/ano são fornecidos à bomba de calor. De modo a satisfazer as restantes necessidades energéticas da bomba de calor, torna-se necessário a compra de eletricidade proveniente da rede elétrica pública, essa compra regista um valor de 187.8 kWh/ano. A instalação de baterias no sistema solar fotovoltaico comparativamente à simulação inicial situado no subcapítulo 3.2.3., permite uma poupança de 216.9 kWh/ano de compra de eletricidade à rede elétrica pública.

A fração renovável do sistema solar fotovoltaico com bomba de calor subiu em 22.06% atingindo os 66.30% em comparação à simulação inicial.

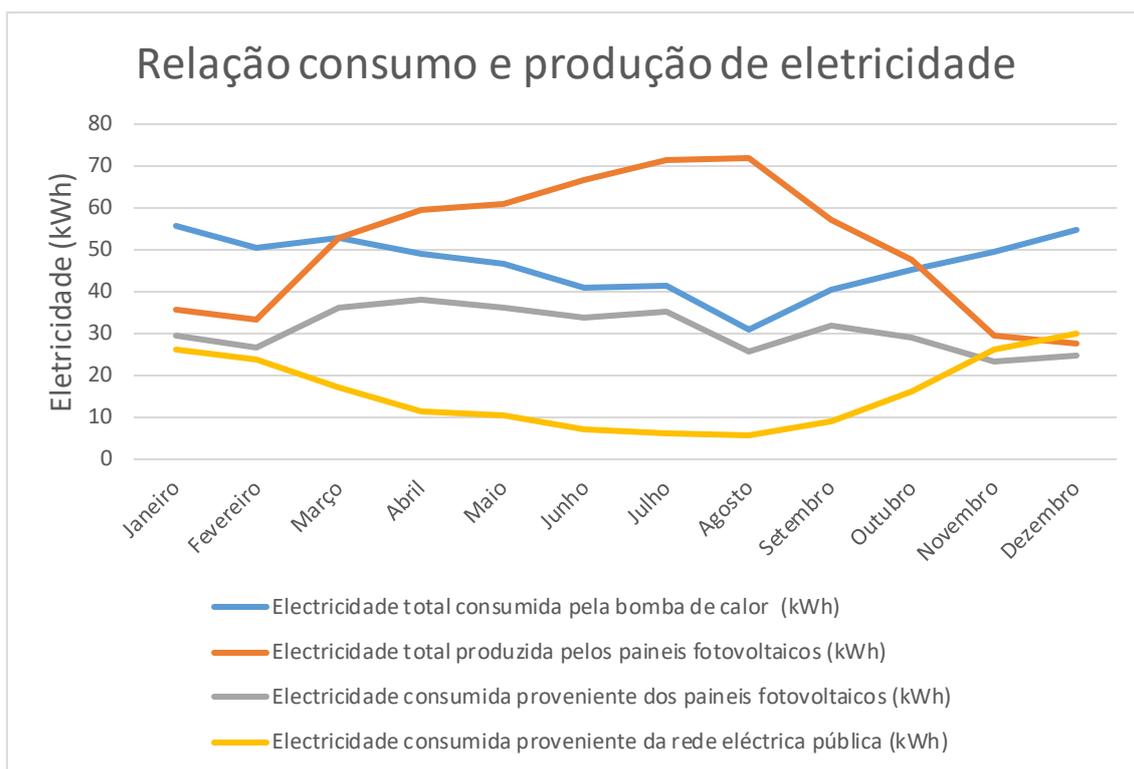


Gráfico 4.5 - Relação consumo e produção de eletricidade

O gráfico 4.5 indica que a energia fornecida à bomba de calor é maioritariamente proveniente dos painéis fotovoltaicos, sendo que apenas nos meses de novembro e dezembro a energia originária da rede elétrica pública é superior à energia oriunda dos painéis fotovoltaicos.

Ao nível económico o sistema solar fotovoltaico com implementação de uma bomba de calor e instalação de baterias apresenta um gasto anual de 30.05€ em eletricidade, permitindo uma poupança de 34.69€/ano em comparação à simulação inicial.

	Custos totais com bomba de calor (sem painéis fotovoltaicos)	Custos totais com sistema solar fotovoltaico e bomba de calor	Custos com cilindro eléctrico
Eletricidade (€)/ano	64.74	30.05	263.28
Manutenção (€)/ano	30.00	30.00	0
Total (€/ano)	94.74	60.05	263.28
Equipamentos (€)	2341.89	2551.89	299.89

Tabela 4.7 - Custos do sistema solar fotovoltaico com implementação de baterias

A análise à tabela 4.7 permite concluir que o sistema composto apenas pelo sistema fotovoltaico com bomba de calor e o sistema fotovoltaico com bomba de calor e instalação de baterias, proporcionam uma poupança anual de 168.54€ e 203.23€ respetivamente em comparação ao sistema com cilindro elétrico. De salientar que o preço total do sistema solar fotovoltaico sofreu um aumento de 210.00€, relativos à compra de duas baterias com um custo unitário de 105.00€ com IVA incluído.

O gráfico 4.6 apresenta o comportamento do custo total dos três sistemas alvo de estudo ao longo de 20 anos.

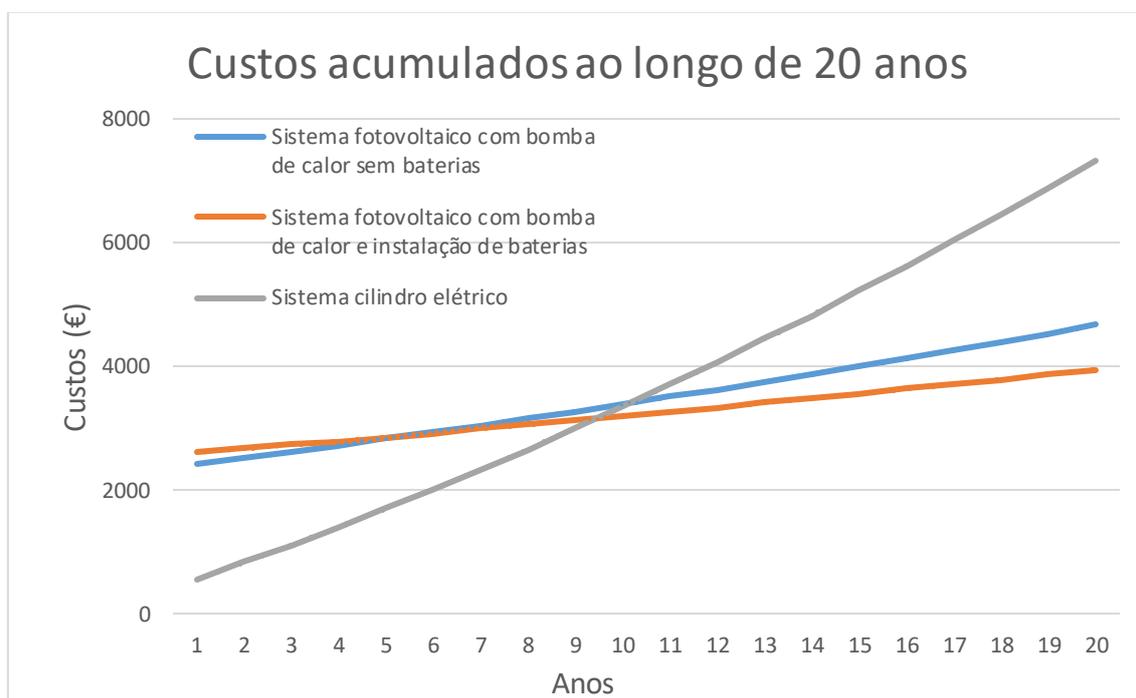


Gráfico 4.6 - Custos ao longo de 20 anos do sistema solar fotovoltaico com implementação de baterias

O gráfico acima apresentado demonstra um custo total de instalação do sistema constituído apenas pelo sistema fotovoltaico com bomba de calor de 4669.51€, sendo que o sistema fotovoltaico com bomba de calor e instalação de baterias indica um custo total de 3953.75€, deste modo obtém-se uma poupança de 2655.61€ e 3371.37€ respetivamente em comparação ao sistema com cilindro elétrico. O sistema solar fotovoltaico com bomba de calor e instalação de baterias apresenta uma poupança de 715.76 € em relação ao sistema fotovoltaico com bomba de calor sem baterias.

O período de retorno situa-se nos 10 anos e 2 meses para o sistema fotovoltaico com bomba de calor e 9 anos e 6 meses para o sistema fotovoltaico com bomba de calor e instalação de baterias.

O sistema fotovoltaico com bomba de calor e instalação de baterias possui um período de retorno de 5 anos e 7 meses, em comparação com o sistema fotovoltaico com bomba de calor sem baterias.

## 5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Nesta dissertação foi realizado um estudo sobre diferentes sistemas de AQS, tendo como principal finalidade uma comparação energética e económica dos sistemas de obtenção de energia de origem renovável para produção de AQS.

Para obviar o custo e tempo recorreu-se ao *EnergyPlus* e Excel na obtenção de dados energéticos dos diferentes sistemas de preparação de AQS. Os gráficos 5.1 e 5.2 demonstram esses mesmos dados.

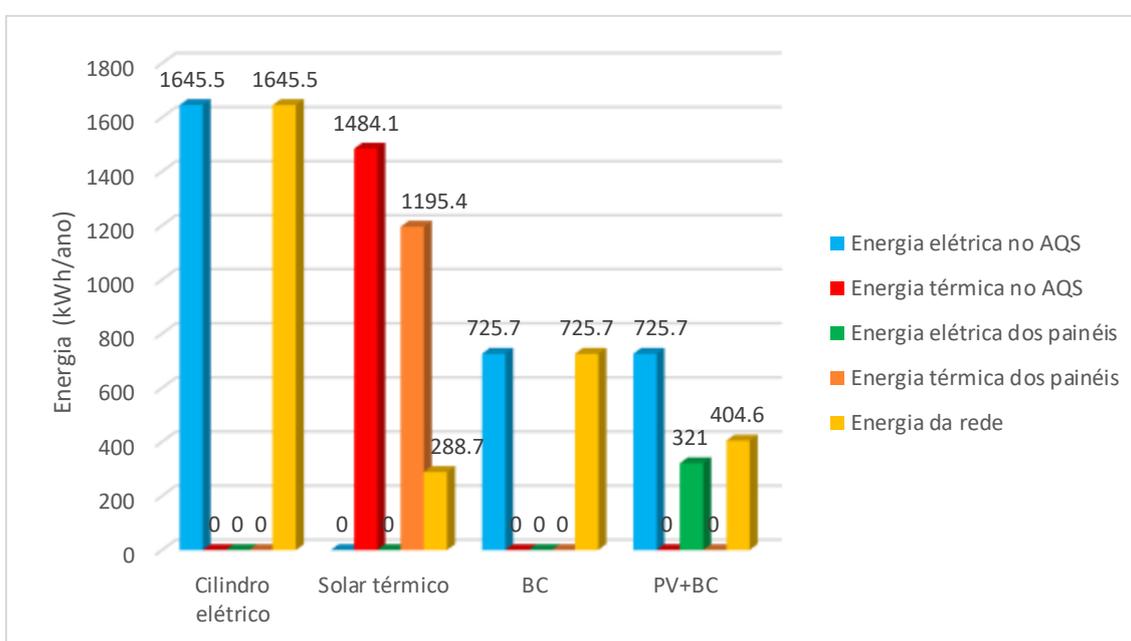


Gráfico 5.1 - Resultados energéticos anuais dos diferentes sistemas de obtenção de energia para AQS

A análise ao gráfico acima representado permite concluir que, energeticamente, o sistema com o cilindro elétrico possui um consumo de 1645.5 kWh/ano de energia elétrica, sendo esta proveniente da rede elétrica pública. Por outro lado, com o sistema solar térmico são necessários 1484.1 kWh/ano de energia térmica para aquecer a água, sendo que este consome 1195.4 kWh/ano de energia térmica proveniente dos coletores solares. A restante energia necessária ao aquecimento das águas sanitárias é oriunda da rede elétrica pública, consumindo 288.7 kWh/ano de energia elétrica. O sistema constituído apenas por uma bomba de calor, (sem painéis fotovoltaicos) possui um consumo de 725 kWh/ano, de energia elétrica originária da rede elétrica pública. O sistema fotovoltaico com bomba de calor possui um consumo de

energia elétrica de 725.7 kWh/ano, onde 321.0 kWh/ano de energia elétrica são oriundos dos painéis fotovoltaicos. Assim torna-se necessário o consumo de 404.7 kWh/ano de energia elétrica proveniente da rede elétrica pública.

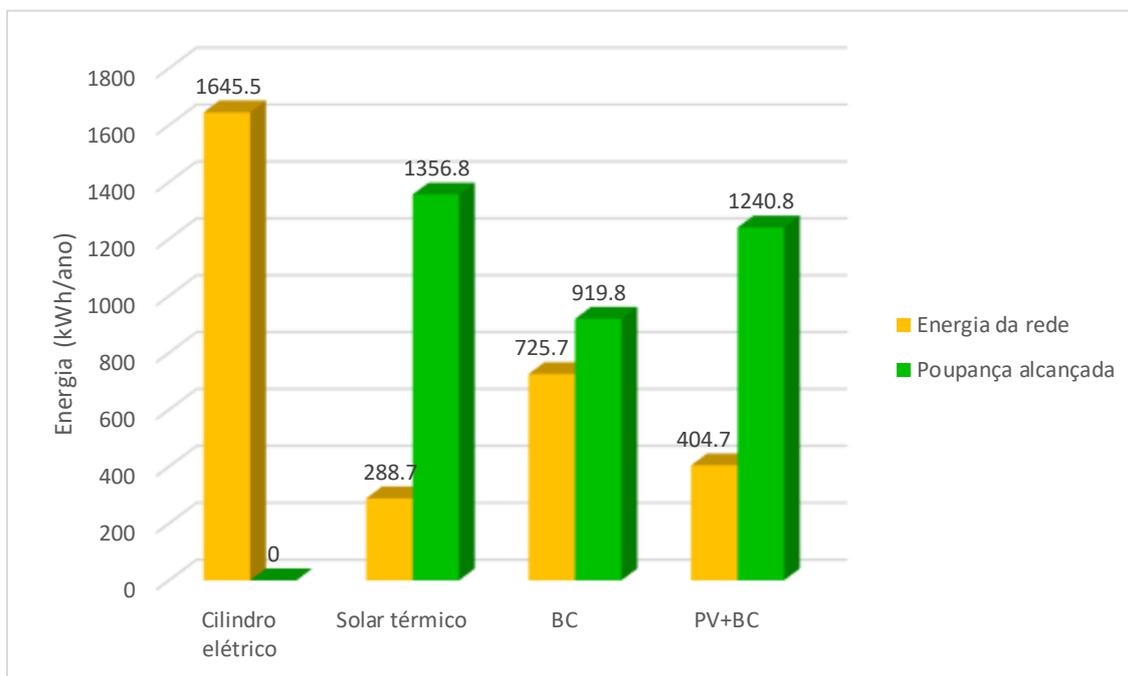


Gráfico 5.2 - Poupanças energéticas anuais dos diferentes sistemas de obtenção de energia para AQS

Os sistemas de obtenção de energia renovável permitem poupanças significativas em comparação com o cilindro elétrico. O sistema solar térmico possibilita uma poupança de energia elétrica anual de 1356.8 kWh (82.45%), enquanto o sistema fotovoltaico com bomba de calor concede uma economia de 1240.8 kWh/ano (75.41%), o sistema constituído apenas pela bomba de calor permite poupar 919.8 kWh/ano (55.9%).

Os gráficos 5.3 e 5.4 apresentam os resultados económicos para a simulação inicial.

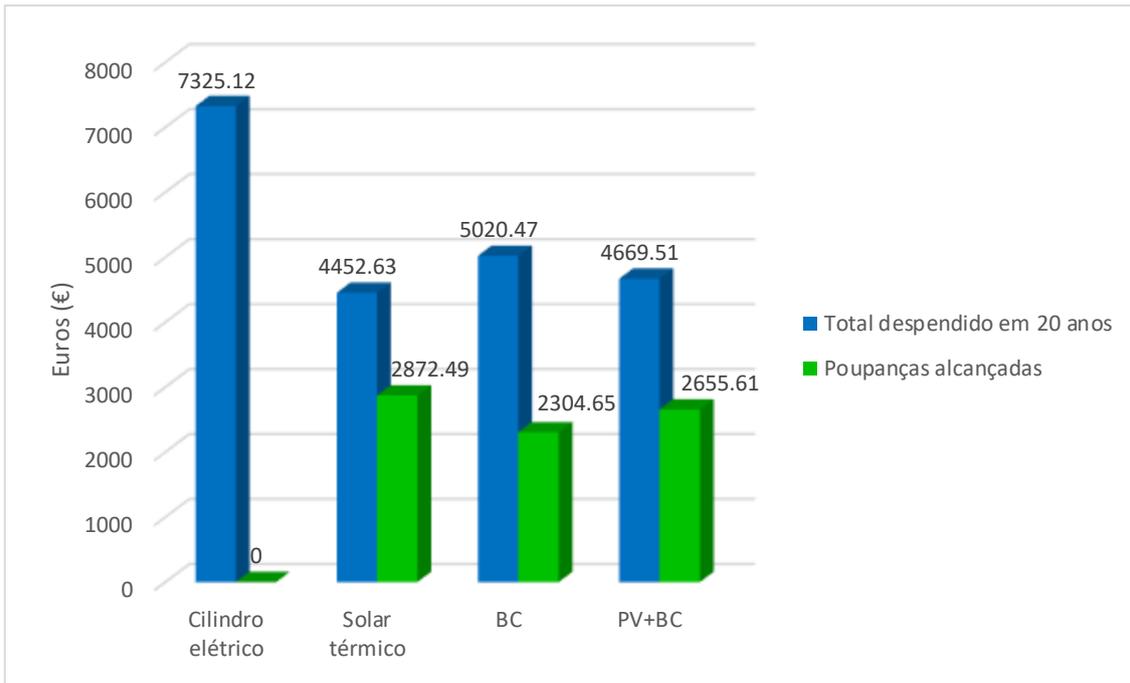


Gráfico 5.3 - Resultados económicos ao longo de 20 anos dos diferentes sistemas de obtenção de energia para AQS

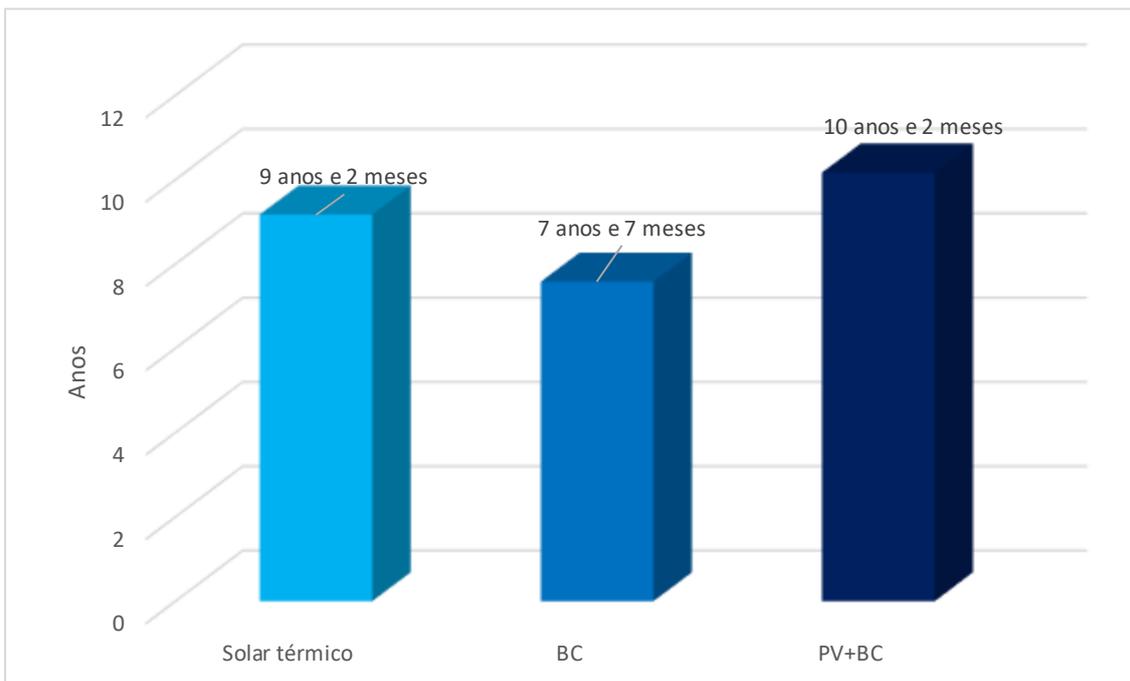


Gráfico 5.4 - Período de retorno dos diferentes sistemas de obtenção de energia para AQS

O sistema composto pelo cilindro elétrico apresenta um custo total em equipamentos de 299.89 € totalizando um custo total em 20 anos de 7325.12 €. O sistema solar térmico possui um investimento inicial em equipamentos de 2020.00 € ascendendo a um custo total de 4452.63€ ao fim de 20 anos. O sistema constituído unicamente pela

bomba de calor (sem painéis fotovoltaicos) detém um custo em equipamentos de 1322.25 €, alcançando um gasto total de 5020.47 € ao fim de 20 anos. O sistema fotovoltaico com bomba de calor possui um dispêndio em equipamentos de 2341.89 €, totalizando um desembolso em 20 anos de 4669.51 €.

A implementação de sistemas de obtenção de energia renovável na preparação de AQS permitem poupanças consideráveis. Em comparação com o cilindro elétrico, o sistema solar térmico apresenta uma poupança de 2872.49 € e um período de retorno de 9 anos e 2 meses. O sistema formado apenas pela bomba de calor possibilita uma economia de 2304.65 € e um período de retorno de 7 anos e 7 meses, enquanto o sistema fotovoltaico com bomba de calor possui uma poupança de 2655.61 € e um período de retorno de 10 anos e 2 meses.

A implementação de medidas de otimização nos diferentes sistemas de obtenção de energia permite aumentar a eficiência energética dos consumos de AQS.

Os resultados energéticos com implementação de medidas de otimização encontram-se nos gráficos 5.5 e 5.6.

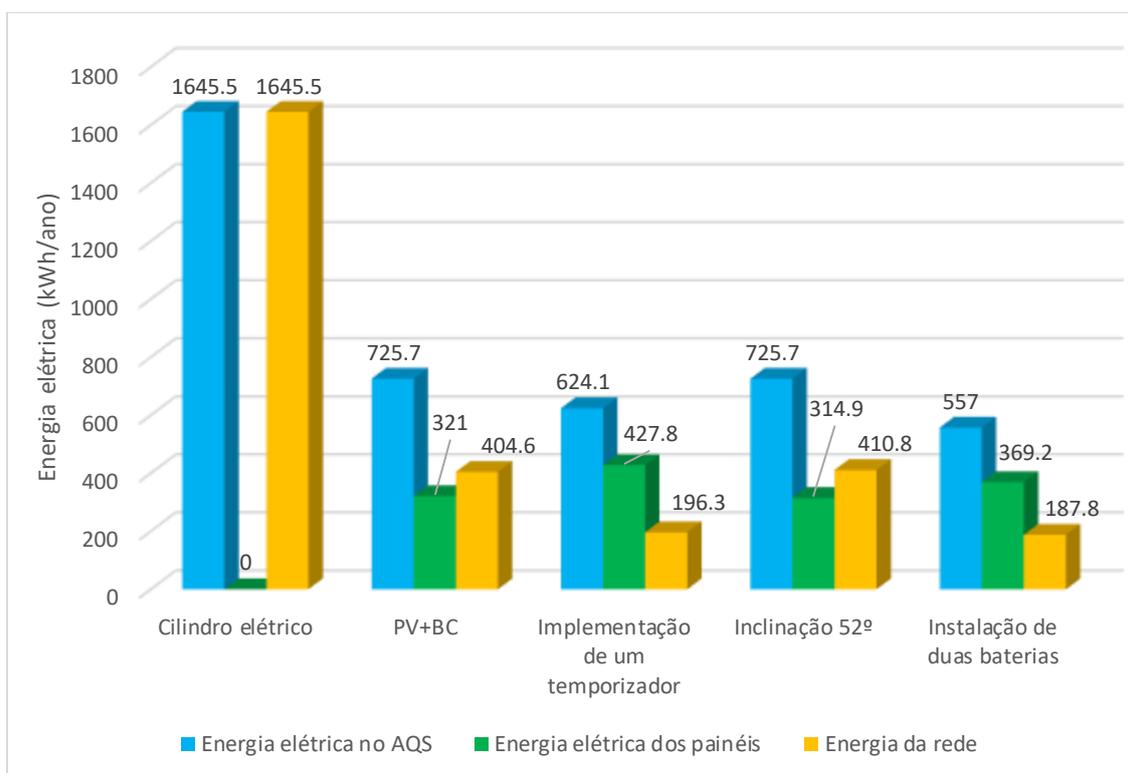


Gráfico 5.5 - Resultados energéticos anuais dos diferentes sistemas de obtenção de energia com medidas de otimização

A implementação de um temporizador na bomba de calor possibilita um consumo de 624.1 kWh/ano de energia elétrica, sendo que 427.8 kWh/ano é proveniente dos painéis fotovoltaicos, tornando-se necessário um consumo de 196.3 kWh/ano de energia elétrica proveniente da rede elétrica pública. A alteração da inclinação dos painéis fotovoltaicos de 34.7° para 52°, permite um consumo da bomba de calor de 725.7 kWh/ano de energia elétrica, onde 314.9 kWh/ano de energia elétrica é originária dos painéis fotovoltaicos, obtendo uma necessidade de energia elétrica proveniente da rede elétrica pública de 410.8 kWh/ano. A instalação de baterias no sistema fotovoltaico possibilita um consumo anual de 557 kWh de energia elétrica, sendo que 369.2 kWh/ano é oriunda dos painéis fotovoltaicos e 187.8 kWh provém da rede elétrica pública.

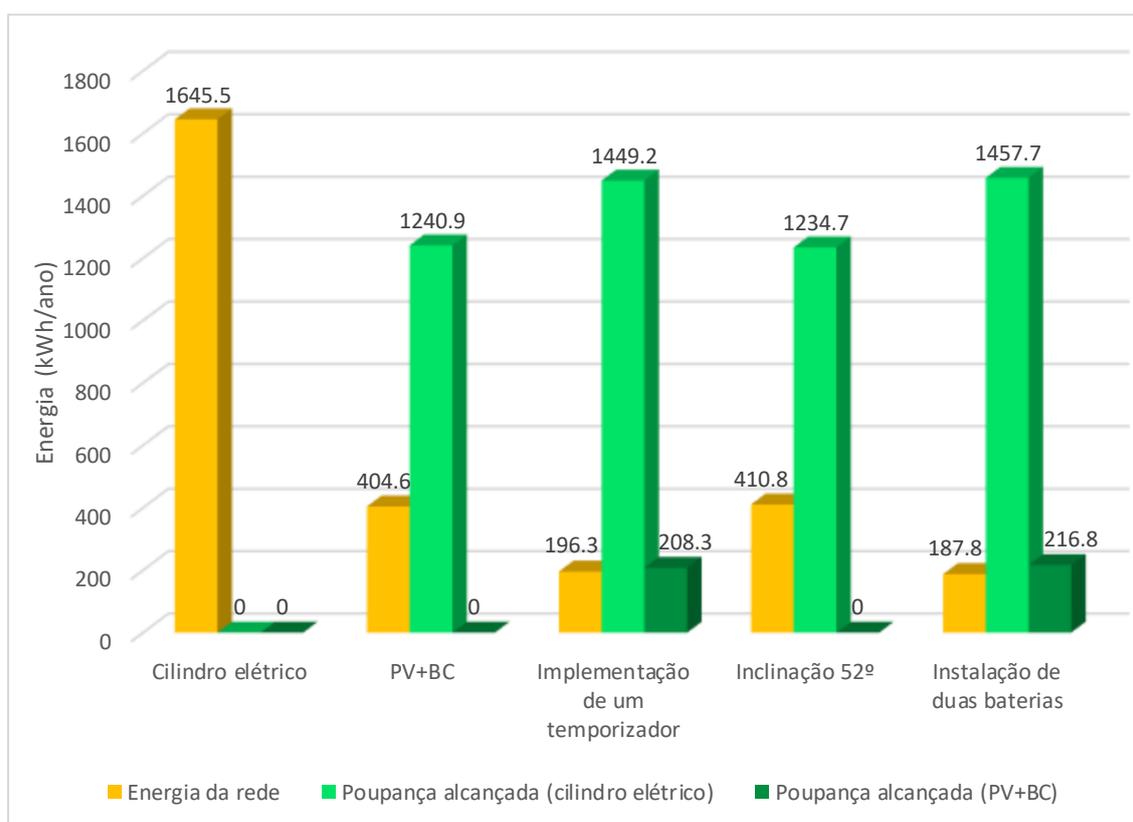


Gráfico 5.6 - Poupanças energéticas anuais dos diferentes sistemas de obtenção de energia com medidas de otimização

Deste modo a implementação de medidas como um temporizador na bomba de calor e a instalação de baterias permitem poupanças energéticas mais significativas em relação ao cilindro elétrico. A prática destas duas medidas possibilitam poupanças de

energia elétrica de 1449.2 kWh/ano (88.07%) na implantação do temporizador na bomba de calor, e de 1457.7 kWh/ano (88.59%) na instalação de baterias.

Os gráficos 5.7 e 5.8 demonstram os resultados económicos das várias medidas de otimização.

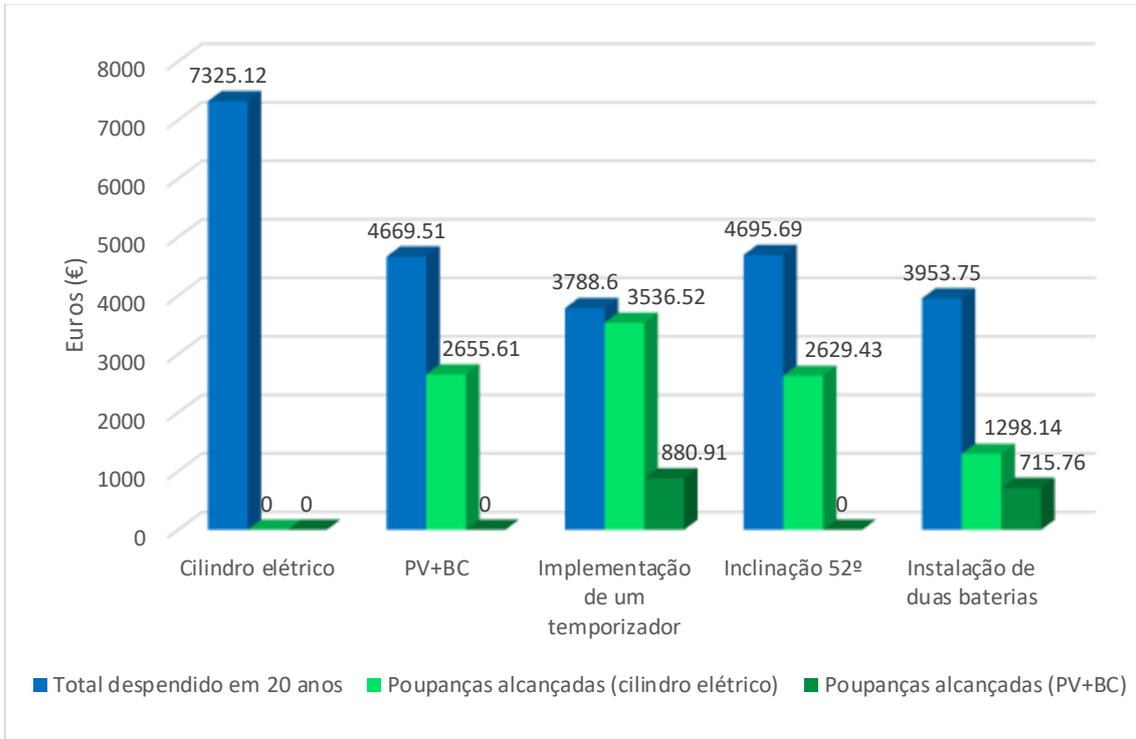


Gráfico 5.7 - Resultados económicos ao longo de 20 anos dos diferentes sistemas de obtenção de energia com medidas de otimização

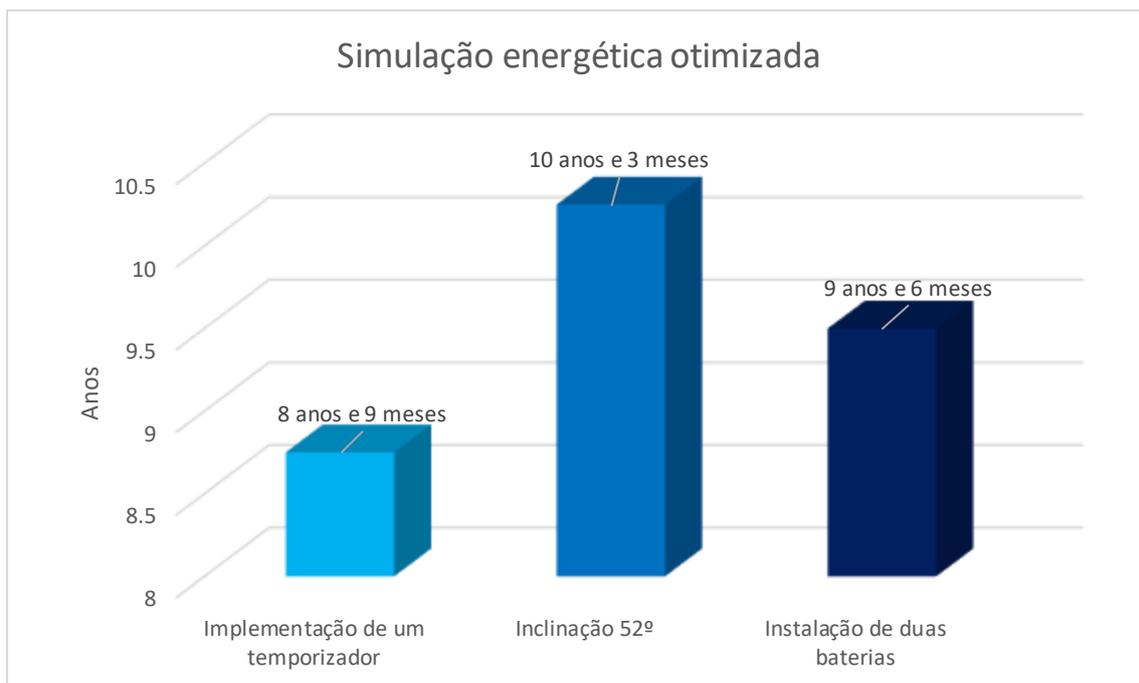


Gráfico 5.8 - Período de retorno dos diferentes sistemas de obtenção de energia com medidas de otimização

A implementação de um temporizador na bomba de calor em parceria com o sistema solar fotovoltaico totaliza um custo em equipamentos de 2350.64 €, ascendendo a um gasto total ao fim de 20 anos de 3788.60 €. A alteração da inclinação dos painéis fotovoltaicos apresenta uma despesa em equipamentos de 2341.89 € alcançando um custo total em 20 anos de 4695.69 €. A instalação de baterias no sistema solar fotovoltaico juntamente com a bomba de calor possui um gasto em equipamentos de 2551.89 € totalizando um custo de 3953.75 € ao longo de 20 anos.

A execução de medidas como a instalação do temporizador na bomba de calor, possibilita poupanças monetárias em comparação ao cilindro elétrico no valor de 3536.52€ e um período de retorno de 8 anos e 9 meses. A instalação de baterias no sistema solar fotovoltaico permite poupanças monetárias no valor de 1298.14€ e um período de retorno de 9 anos e 6 meses.

## 6. CONCLUSÃO

A realização desta dissertação permitiu concluir que a instalação de sistemas de preparação de AQS de origem renovável, possibilitam elevadas poupanças ao nível energético e económico em relação ao cilindro elétrico. O sistema que admite uma maior poupança energética bem como económica sem qualquer implementação de medidas de melhoria é o sistema solar térmico.

A implementação de medidas de melhoria permitiu um aumento da eficiência energética no sistema solar fotovoltaico com bomba de calor. Do ponto de vista energético a instalação de duas baterias, que armazenam a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, permitiu o menor gasto energético e consequentemente a maior poupança energética. Em termos económicos, a implementação de um temporizador na bomba de calor possibilitou um menor custo ao longo de 20 anos e consequentemente uma maior poupança monetária. A implementação do temporizador na bomba de calor permitia que esta se encontrasse ligada apenas durante o período de radiação solar.

O estudo de um eventual aumento de consumos de água quente sanitária foi igualmente analisada. Verificou-se que o ponto ótimo do sistema solar térmico situa-se num aumento de consumos de 75%, parecendo demonstrar que o sistema solar térmico instalado é economicamente mais rentável para consumos de 3 pessoas. Relativamente ao sistema solar fotovoltaico com bomba de calor, o ponto ótimo ocorre quando os consumos de água quente aumentam em 125%, aparentando indicar que o sistema solar fotovoltaico com bomba de calor instalado é mais rentável economicamente para consumos de 3 ou 4 pessoas.

O elevado investimento associado aos kits dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos, a atual crise financeira e os baixos rendimentos das famílias em geral não permitem que estes investimentos sejam prioritários. A falta de incentivos governamentais na instalação de sistemas de obtenção de energia renovável, bem como o baixo preço de venda do excedente energético produzido, são também dois fatores para a população optar pela opção mais fácil e economicamente mais barata a curto prazo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Simulação em EnergyPlus – Soluções de Elevada Eficiência Energética na Reabilitação de um Edifício Residencial de Construção Antiga”, 2016 e “Solar Cooling as an Optimization of Convencional Solar Thermal Systems for Existing Buildings’ Upgrade Interventions”
- [2] “Soluções de Elevada Eficiência Energética na Reabilitação de um Edifício de Habitação”, 2015
- [3] Comissão europeia, “What is Horizon 2020”:  
<http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>
- [4] Diretiva 2012/27/EU de 25 de outubro de 2012 do Parlamento Europeu e do Conselho  
[https://www.portugal2020.pt/Portal2020/Media/Default/Docs/Legislacao/Nacional/DiretivaUE2012\\_27.pdf](https://www.portugal2020.pt/Portal2020/Media/Default/Docs/Legislacao/Nacional/DiretivaUE2012_27.pdf)
- [5] Governo de Portugal, (2014), “Estratégia Europa 2020: Ponto de Situação das Metas em Portugal”:  
[http://ec.europa.eu/europe2020/pdf/csr2014/nrp2014\\_portugal\\_pt.pdf](http://ec.europa.eu/europe2020/pdf/csr2014/nrp2014_portugal_pt.pdf)
- [6] APA - Agência Portuguesa do Ambiente, (2016), “Roteiro Europeu Baixo Carbono 2050”:  
<http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=119&sub3ref=508>
- [7] APA - Agência Portuguesa do Ambiente, (2016), “Roteiro Nacional de Baixo Carbono (RNBC))” :  
<http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=117&sub3ref=301>
- [8] INE - Instituto Nacional de Estatística, (2014), “Estatísticas do Ambiente 2013”:  
[https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESTipo=ea&PUBLICACOEScoleccion=107664&selTab=tab0&xlang=pt](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESTipo=ea&PUBLICACOEScoleccion=107664&selTab=tab0&xlang=pt)
- [9] INE - Instituto Nacional de Estatística, (2015), “Estatísticas do Ambiente 2014”:  
[https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESTipo=ea&PUBLICACOEScoleccion=107664&selTab=tab0&xlang=pt](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESTipo=ea&PUBLICACOEScoleccion=107664&selTab=tab0&xlang=pt)
- [10] European Commission, (2016), “Buildings”:  
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>
- [11] DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia, (2016), “Áreas Sectoriais – Eficiência Energética – Edifícios”  
<http://www.dgeg.pt/>
- [12] INE - Instituto Nacional de Estatística, (2015), “Estatísticas da Construção e Habitação 2014”

- [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESTipo=ea&PUBLICACOEScoleccion=107827&selTab=tab0&xlang=pt](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESTipo=ea&PUBLICACOEScoleccion=107827&selTab=tab0&xlang=pt)
- [13] Drury B. Crawley, Curtis O. Pedersen, Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelmann, (2000), “EnergyPlus: Energy Simulation Program”, ASHRAE Journal 42 (2000) 49-56
- [14] European Commission, EUR – Lex, (2010), “DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings”
- <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>
- [15] Clara Good, Inger Andresen, Anne Grete Hestnes (2015), “Solar energy for net zero energy buildings – A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic–thermal (PV/T) systems”, ScienceDirect.
- [16] DECRETO-LEI N.º 118/2013 de 20 de Agosto. “Diário da República n.º 159/2013 – I Série”. Ministério da Economia e do Emprego
- <https://dre.pt/application/file/499375>
- [17] Portal da Energia – Energia Renováveis, (2011), “Principais tipos de células fotovoltaicas constituintes de painéis solares”.
- <http://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituientes-de-paineis-solares/>
- [18] NASA- National Aeronautic and Space Administration, (2002), “How do Photovoltaics Work?”.
- <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>
- [19] Portal das Energias Renováveis.
- [http://energiasrenovaveis.com/images/upload/flash/anima\\_como\\_funciona/pv6.swf](http://energiasrenovaveis.com/images/upload/flash/anima_como_funciona/pv6.swf)
- [20] Portal da Energia – Energia Renováveis, (2009), “Teoria de funcionamento energia solar fotovoltaica”.
- <http://www.portal-energia.com/teoria-funcionamento-energia-solar-fotovoltaica/>
- [21] Despacho n.º 14985/2015 “Diário da República n.º 246, Série II”. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.
- [22] Daikin, (2016), “Tecnologia de bomba de calor”.
- <http://www.daikin.pt/about-daikin/leading-technologies/heat-pump/>
- [23] Scurfield Solar & Heating, “Heat Pumps”.
- <http://www.scurfieldsolar.com/heat-pumps.php>
- [24] Junkers, (2016), “Bomba de calor”
- [https://www.junkers.pt/consumer/produtos\\_consumidor/product\\_know\\_how\\_bomba\\_de\\_calor/bomba\\_de\\_calor](https://www.junkers.pt/consumer/produtos_consumidor/product_know_how_bomba_de_calor/bomba_de_calor)
- [25] Hidraulica, (2009), “As bombas de calor”, CALEFFI

- [26] Sá, A. F. R. (2010), “Guia de Aplicações de Gestão de Energia e Eficiência Energética”, 2ªEd., Publindústria.
- [27] Gonçalo Brites, (2015), “ Acetatos das aulas de sistemas energéticos” Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente – DEM
- [28] Portal das Energias Renováveis, (2016), “Tecnologias: Coletores Solares Térmicos”  
[http://energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID\\_conteudo=41&ID\\_area=8&ID\\_sub\\_area=26](http://energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=41&ID_area=8&ID_sub_area=26)
- [29] TISST, (2015), “COLECTORES DE TUBOS DE VÁCUO”  
<http://www.tisst.net/products/colectores-de-tubos-de-vacu/>
- [30] Lusosol, (2015), “Coletores Solares”  
<http://www.lusosol.com/colectores.htm>
- [31] Painel Solar Térmico, (2009), “Sistemas solares térmicos”  
<http://www.painelsolartermico.com/sistemas-solares-termicos/>
- [32] EPAL – Empresa Pública de Águas Livres “Simulador de consumo de água”  
[http://www.epal.pt/epal/banner\\_simulador.swf](http://www.epal.pt/epal/banner_simulador.swf)
- [33] UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, (2013), “University of Coimbra – Alta and Sofia”  
<http://whc.unesco.org/en/list/1387/>
- [34] ASHRAE HANDBOOK, (2011), “ HVAC Applications”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [35] DGS – Direção Geral da Saúde e DGT – Direção Geral do Turismo, (2001), “Doença dos Legionários Guia Prático”, Lisboa

## ANEXO A

Tabela A.1 - Fração de ocupação do piso 00 ao longo do ano

Horas		Piso 00					
		Perfil de utilização habitual			Férias de natal		
		Segunda a Sexta	Sábado	Domingo	Segunda a Sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00						
01:00	02:00						
02:00	03:00						
03:00	04:00						
04:00	05:00						
05:00	06:00						
06:00	07:00						
07:00	08:00						
08:00	09:00						
09:00	10:00						
10:00	11:00						
11:00	12:00		0.25				
12:00	13:00						
13:00	14:00						
14:00	15:00				0.25		
15:00	16:00						
16:00	17:00						
17:00	18:00						
18:00	19:00						
19:00	20:00						
20:00	21:00						
21:00	22:00						
22:00	23:00						
23:00	00:00						

Tabela A.2 - Fração de ocupação do piso 01 ao longo do ano

Horas		Piso 01					
		Perfil de utilização habitual			Férias de natal		
		Segunda a Sexta	Sábado	Domingo	Segunda a Sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00						
01:00	02:00						
02:00	03:00						
03:00	04:00						
04:00	05:00						
05:00	06:00						
06:00	07:00						
07:00	08:00						
08:00	09:00	0.5					
09:00	10:00						
10:00	11:00		0.5	0.5	1	0.5	0.5
11:00	12:00		0.375	0.5	1	0.5	0.5
12:00	13:00		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
13:00	14:00				0	0.5	0.5
14:00	15:00				0.5	0.375	0.5
15:00	16:00					0.5	0.5
16:00	17:00						
17:00	18:00						
18:00	19:00	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
19:00	20:00	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20:00	21:00	1	1	1	1	1	1
21:00	22:00	1	1	1	1	1	1
22:00	23:00	1	1	1	1	1	1
23:00	00:00	1	1	1	1	1	1

Tabela A.3 - Fração de ocupação do piso 03 ao longo do ano

Horas		Piso 02					
		Perfil de utilização habitual			Férias de natal		
		Segunda a Sexta	Sábado	Domingo	Segunda a Sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00	1	1	1	1	1	1
01:00	02:00	1	1	1	1	1	1
02:00	03:00	1	1	1	1	1	1
03:00	04:00	1	1	1	1	1	1
04:00	05:00	1	1	1	1	1	1
05:00	06:00	1	1	1	1	1	1
06:00	07:00	1	1	1	1	1	1
07:00	08:00	1	1	1	1	1	1
08:00	09:00	0.5	1	1	1	1	1
09:00	10:00		1	1	1	1	1
10:00	11:00		0.5	0.5		0.5	0.5
11:00	12:00		0.375	0.5		0.5	0.5
12:00	13:00		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
13:00	14:00		1	1	0	0.5	0.5
14:00	15:00		1	1	0.5	0.375	0.5
15:00	16:00					0.5	0.5
16:00	17:00						
17:00	18:00						
18:00	19:00	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
19:00	20:00	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20:00	21:00						
21:00	22:00						
22:00	23:00						
23:00	00:00						

Tabela A.4 - Perfil de utilização da AQ no lavatório

Horas		Lavatório					
		Perfil de utilização habitual			Férias de natal		
		Segunda a Sexta	Sábado	Domingo	Segunda a Sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00						
01:00	02:00						
02:00	03:00						
03:00	04:00						
04:00	05:00						
05:00	06:00						
06:00	07:00						
07:00	08:00	0.0048					
08:00	09:00					0.0048	
09:00	10:00				0.0048		0.0048
10:00	11:00		0.0048	0.0048			
11:00	12:00						
12:00	13:00						
13:00	14:00		0.0048	0.0048		0.0048	0.0048
14:00	15:00						
15:00	16:00						
16:00	17:00						
17:00	18:00						
18:00	19:00	0.0024			0.0024		
19:00	20:00	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024
20:00	21:00						
21:00	22:00						
22:00	23:00						
23:00	00:00						

Tabela A.5 - Perfil de utilização da AQ no chuveiro

Horas		Chuveiro					
		Perfil de utilização habitual			Férias de natal		
		Segunda a Sexta	Sábado	Domingo	Segunda a Sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00						
01:00	02:00						
02:00	03:00						
03:00	04:00						
04:00	05:00						
05:00	06:00						
06:00	07:00						
07:00	08:00	0.2					
08:00	09:00					0.2	
09:00	10:00				0.2		0.2
10:00	11:00		0.2	0.2			
11:00	12:00						
12:00	13:00						
13:00	14:00						
14:00	15:00						
15:00	16:00						
16:00	17:00						
17:00	18:00						
18:00	19:00						
19:00	20:00						
20:00	21:00						
21:00	22:00						
22:00	23:00						
23:00	00:00						

Tabela A.6 - Perfil de utilização da AQ na cozinha

Horas		Cozinha					
		Perfil de utilização habitual			Férias de natal		
		Segunda a Sexta	Sábado	Domingo	Segunda a Sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00						
01:00	02:00						
02:00	03:00						
03:00	04:00						
04:00	05:00						
05:00	06:00						
06:00	07:00						
07:00	08:00						
08:00	09:00	0.01				0.01	
09:00	10:00				0.01		0.01
10:00	11:00		0.01	0.01			
11:00	12:00						
12:00	13:00		0.06	0.06			
13:00	14:00				0.05	0.05	0.05
14:00	15:00						
15:00	16:00						
16:00	17:00						
17:00	18:00						
18:00	19:00					0.024	
19:00	20:00	0.05	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
20:00	21:00		0.024	0.024	0.024		0.024
21:00	22:00						
22:00	23:00						
23:00	00:00						

Tabela A.7 - Perfil de utilização da AQ na máquina de lavar roupa

Horas		Máquina de lavar roupa					
		Perfil de utilização habitual			Férias de natal		
		Segunda a Sexta	Sábado	Domingo	Segunda a Sexta	Sábado	Domingo
00:00	01:00						
01:00	02:00						
02:00	03:00						
03:00	04:00						
04:00	05:00						
05:00	06:00						
06:00	07:00						
07:00	08:00						
08:00	09:00						
09:00	10:00						
10:00	11:00						
11:00	12:00		1				
12:00	13:00						
13:00	14:00						
14:00	15:00					1	
15:00	16:00						
16:00	17:00						
17:00	18:00						
18:00	19:00						
19:00	20:00						
20:00	21:00						
21:00	22:00						
22:00	23:00						
23:00	00:00						

Os circuitos simulados no *EnergyPlus*, não correspondem na totalidade aos circuitos reais de aquecimento de água doméstica. O *EnergyPlus* utiliza um único subprograma que calcula os circuitos de ar ou de água, e todos eles necessitam de se apresentar de uma forma semelhante para a concretização dos cálculos. Deste modo todos os circuitos têm de ser fechados, quando na realidade após a utilização da água nos equipamentos (lavatório, cozinha, chuveiro, máquina de lavar) essa mesma água dirige-se para os esgotos. Também é obrigatório todos os circuitos estarem divididos em dois subsistemas: o primário (onde é feita a produção de energia térmica) e o secundário (onde estão os consumos de energia térmica), podendo nalguns casos existir dois circuitos, cada um deles constituído por um subsistema primário e um subsistema secundário (ver o caso dos coletores solares térmicos, na figura A2). Existem regras para a realização dos circuitos, nomeadamente quando à colocação dos componentes. Por exemplo, cada circuito completo tem de conter sempre uma bomba ou um ventilador, e estes têm de estar sempre do lado do primário. Para além disso, tanto o primário como o secundário têm de ter um par de componentes chamados “splitters” e “mixers” cuja função é permitir a colocação de vários equipamentos em paralelo. Mesmo que só exista um equipamento, é sempre obrigatório colocar este par de componentes em cada subsistema.

A colocação de uma bomba no circuito do cilindro elétrico (ver figura A.1) é assim necessária para que o programa execute corretamente. De modo a anular o efeito desta bomba, pode-se colocar um valor de aumento de pressão na bomba igual a zero, e assim o programa calcula a potência elétrica da bomba como sendo zero. Isto não altera o funcionamento do circuito uma vez que o caudal é especificado na bomba e a variação de pressão apenas é utilizada pelo programa para calcular a potência elétrica da bomba.

As figuras abaixo indicadas representam os circuitos do aquecimento da água doméstica nos diferentes sistemas alvo de estudo simuladas no *EnergyPlus*.

Figura A.1 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica no sistema com cilindro elétrico

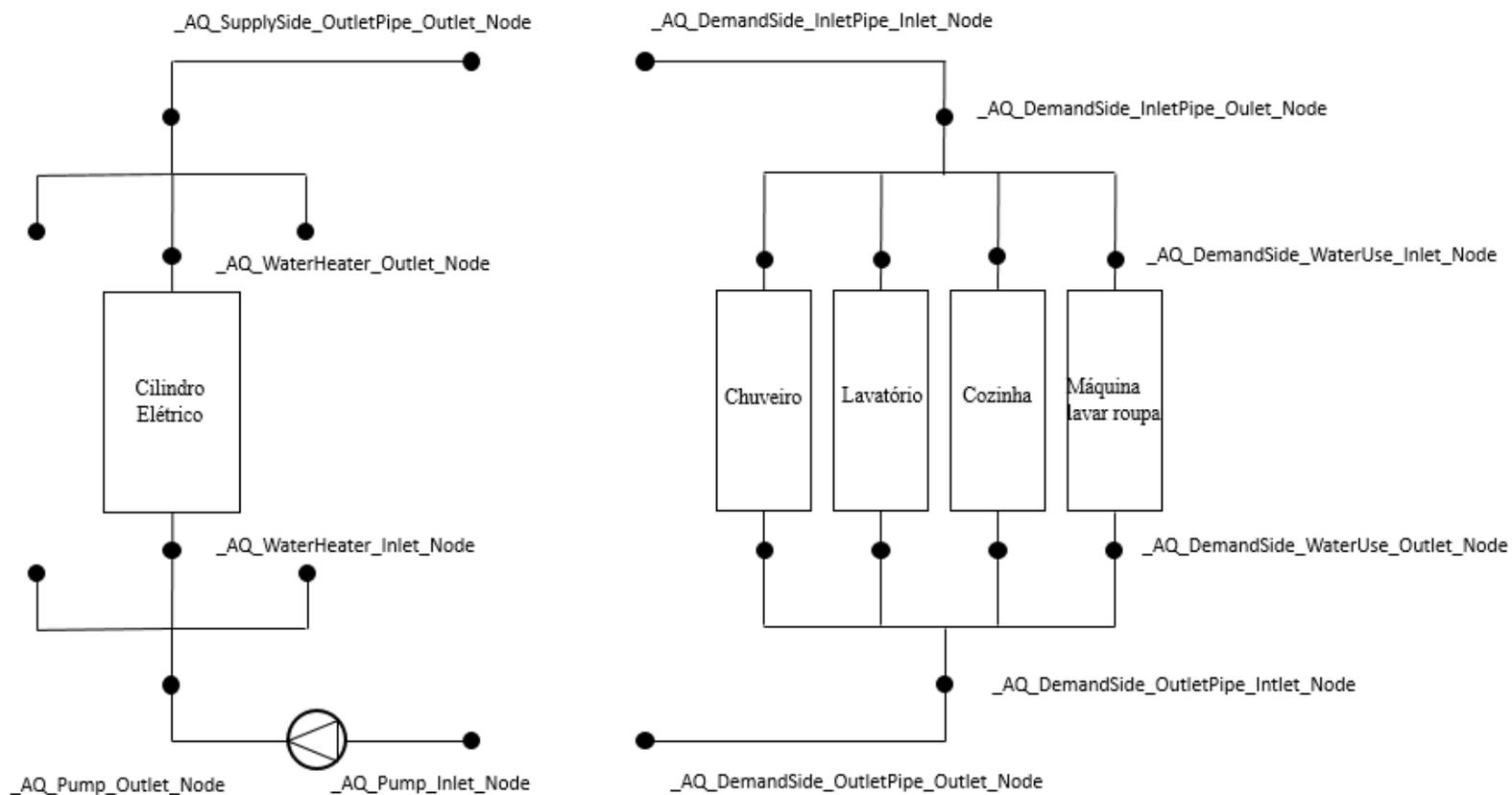


Figura A.2 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica no sistema solar térmico

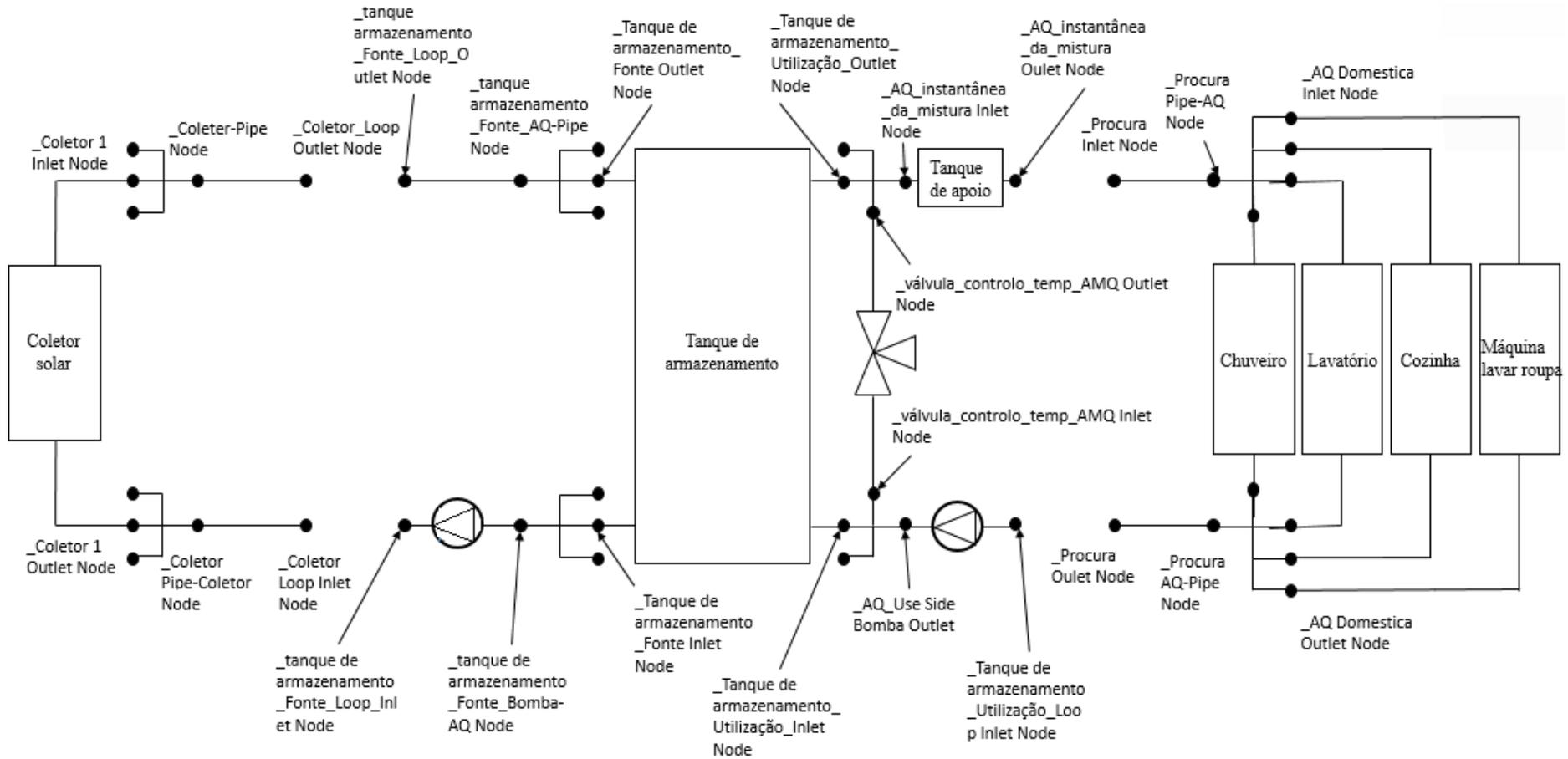


Figura A.3 - Esquema do circuito de aquecimento da água doméstica utilizando uma bomba de calor

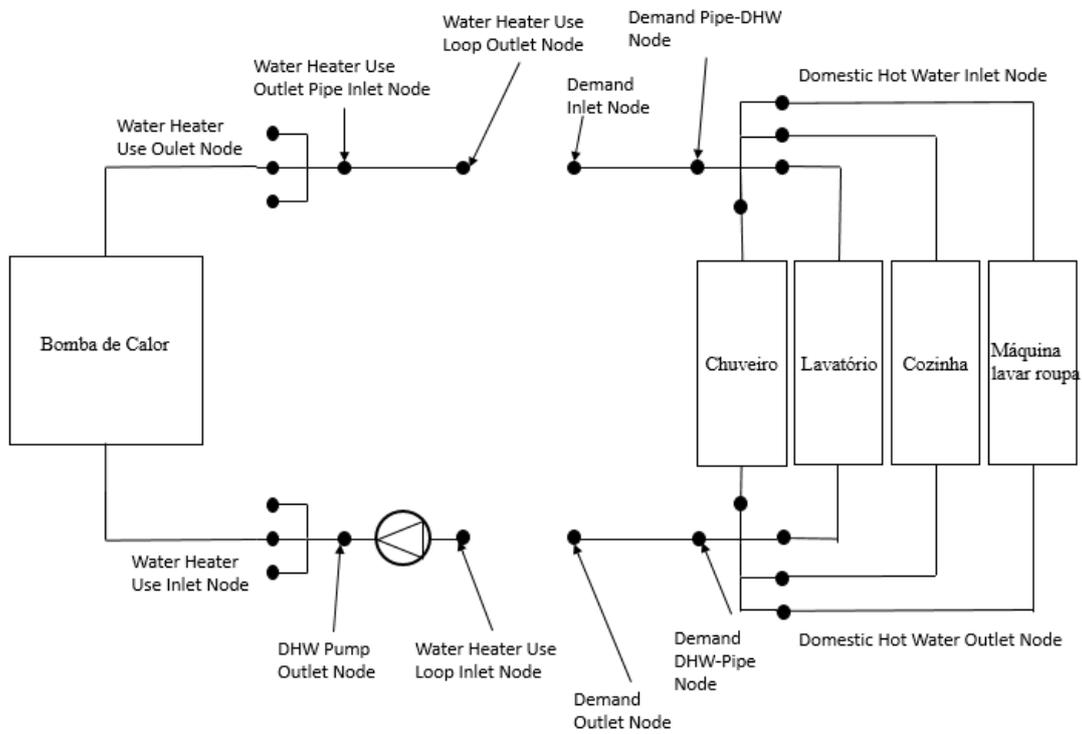


Figura A.4 - Esquema do circuito elétrico do sistema solar fotovoltaico com bomba de calor

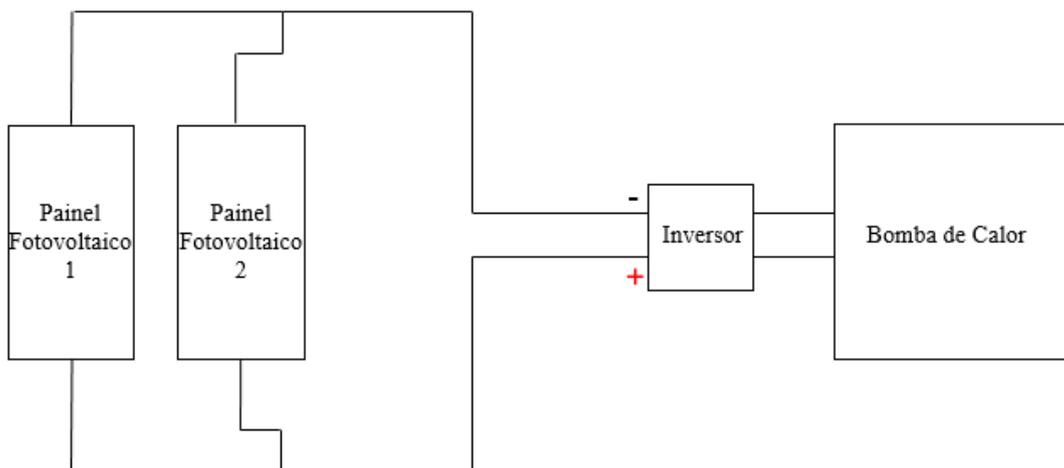


Figura A.5 - Esquema do circuito elétrico do sistema solar fotovoltaico com baterias e bomba de calor

