

Simone Vanessa Nascimento Ribeiro

SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO AMBIENTE COM ARMAZENAMENTO TÉRMICO SAZONAL

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente
na Especialidade de Gestão e Tecnologia do Ambiente

Julho/2017

• U • C •



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Sistema solar de aquecimento ambiente com armazenamento térmico sazonal

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

Autor

Simone Vanessa Nascimento Ribeiro

Orientador

Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites, Professor da Universidade de Coimbra

Júri

Presidente Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2017

Aos meus pais.

Agradecimentos

Este espaço serve de agradecimento a todos aqueles que contribuíram de uma forma direta ou indireta para o trabalho que aqui apresento, o qual só foi possível graças à sua colaboração e apoio.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Professor Gonçalo Brites, o meu orientador da dissertação, por toda a paciência e disponibilidade demonstrada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer aos meus pais, avós e irmão, os principais responsáveis por estar onde estou hoje, por todo o apoio, confiança e compreensão que me depositaram.

Agradeço também a todos os meus amigos que fizeram parte do meu percurso académico, por todas as memórias inesquecíveis que levo comigo para sempre. E aqueles que continuam presentes, mesmo estando longe. Um grande obrigada todos eles!

Por fim, agradeço também à Susana por me ter disponibilizado alguns dados importantes para a realização deste trabalho.

Resumo

Devido à sazonalidade da radiação solar, a disponibilidade desta nem sempre coincide com as necessidades de aquecimento ambiente. Sendo assim, uma forma de otimizar a utilização da energia solar durante todo o ano será o recurso ao armazenamento de energia térmica durante o período do verão para posterior utilização no inverno.

Este trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo paramétrico de diferentes configurações de um sistema de armazenamento sazonal de energia solar térmica, com um depósito de água aquecida, por forma a climatizar uma unidade habitacional em Penacova, no concelho de Coimbra, demonstrando qual a viabilidade destes sistemas em termos energéticos e económicos.

O modelo geométrico da habitação foi desenvolvido com o programa de desenho *Google SketchUp 8*, sendo obtido um ficheiro IDF através do plugin *OpenStudio* para o *SketchUp*. O modelo de simulação foi posteriormente completado através da interface gráfica do editor do *EnergyPlus*. Os principais dados de entrada do modelo são a localização, o ficheiro climático, os materiais de construção da habitação, horários de controlo de diversas variáveis, ocupação, iluminação artificial, equipamentos elétricos e eletrónicos, ventilação natural, e o sistema de aquecimento com energia solar e armazenamento de energia térmica.

A primeira simulação foi efetuada sem sistema de aquecimento com energia solar, apenas utilizando as cargas térmicas ideais (Ideal loads) de modo a caracterizar a habitação em termos energéticos, e em especial, para determinar as necessidades de aquecimento de modo a manter a temperatura do ar interior sempre no valor do setpoint especificado para a estação de aquecimento. Nas restantes simulações foi utilizada a energia solar com armazenamento sazonal e distribuição de energia térmica através de piso radiante hidráulico. A diferença entre as diversas configurações estudadas encontra-se apenas na variação de dois parâmetros cruciais: a área dos coletores e volume do depósito armazenamento de água aquecida. A área varia entre os 1,324 m² (apenas um coletor solar térmico) até aos 8,052 m² (6 coletores solares térmicos) e o volume do depósito varia entre

os 5m³ e os 25 m³. É também importante referir que estes sistemas não utilizam qualquer sistema de apoio.

No que diz respeito aos resultados finais e tendo como base a análise de alguns parâmetros fundamentais, como é o caso da temperatura da água no depósito, número de horas em que o *setpoint* de temperatura é cumprido, temperatura do ar ambiente e os consumos energéticos e económicos, é possível concluir que a utilização destes sistemas não leva à climatização total do modelo da habitação, no entanto, isso pode vir a ser colmatado através da utilização de aquecedores elétricos. Posto isto, a situação mais viável é a correspondente à área total de 8,052m² e ao volume de armazenamento de 25m³.

Palavras-chave: Sazonalidade da radiação solar, Climatização da habitação, Energy Plus 8.7, Armazenamento térmico sazonal

Abstract

Because of the solar radiation seasonality, its availability doesn't always match the buildings' heating loads, in other words, the offer doesn't, for the most part, answer the demand. Therefore, one way to optimize the use of solar energy for heating, during the whole year, would be storing the thermal energy during the summer for its use during the winter.

This work presents a parametric study of different seasonal thermal energy storing system configurations, using a hot water tank for the thermal energy storage, in order to acclimatize a residential building in Penacova, district of Coimbra. The results obtained allowed conclusions to be drawn about the energetic and economic viability of these systems.

The geometric model was built with the drawing program Google Sketchup 8, and an IDF file was created with OpenStudio Plugin for Sketchup. The simulation model was later completed in the graphic editor of Energy Plus. The main input data for the model is the location, climate data, constructions, schedules, occupation, electric equipment, lighting, natural ventilation, and heating system with solar energy and thermal storage.

The first simulation was done without the solar heating system, but using the ideal loads system in order to characterize the building energy consumption, particularly the heating energy necessary to keep the indoor temperature always above the setpoint value. The other simulations included the solar heating system with seasonal thermal storage and hydraulic radiant floor. The difference between the several configurations tested lies only in the variation of two key parameters: the solar collector area and the volume of the hot water storage tank. The collector area varies between 1,324 m² (with only one solar collector) and 8,052 m² (6 solar collectors) and the hot water tank volume varies between 5 m³ and 25 m³. It is important to note that no backup system was considered in the simulations

Regarding the final results based on the analysis of some fundamental parameters like: deposit water temperature and respective thermic losses, environmental temperature, number of hours the temperature setpoint is achieved and, energetic and economic consumptions; it is concluded that these systems do not achieve the requirements needed for the total acclimatization of the habitation model. However, that requirement can

be achieved by the use of electric heaters. Therefore, the most viable situation corresponds to the total area of 8,052 m² and the storage volume of 25m³.

Keywords Seasonality of solar radiation, House Heating, Energy Plus 8.7, Seasonal thermal storage

Índice

Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	x
Simbologia e Siglas	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e Motivação	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Metodologia	6
1.4. Estrutura do trabalho	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. Armazenamento de Energia Térmica	8
2.1.1. Armazenamento Térmico de Calor Sensível	11
2.1.2. S. de Armazenamento Térmico de Calor Sensível de Curta Duração	12
2.1.3. S. de Armazenamento Térmico de Calor Sensível de Longa Duração.	12
2.1.3.1. Armazenamento de Energia Térmica em Aquíferos	14
2.1.3.2. Armazenamento de Energia Térmica em Água Quente	15
2.1.3.3. Armazenamento de Energia Térmica em Água e Areia	16
2.1.3.4. Armazenamento de Energia em Orifícios	17
2.2. Sistema Solar Térmico	18
2.2.1. Principais Componentes de um Sistema Solar Térmico	18
2.2.2. Tipos de Sistemas Solares Térmicos	23
2.2.2.1. Sistema de Circulação em Termossifão	24
2.2.2.2. Sistema de Circulação por Circulação Forçada	25
2.2.2.3. Sistemas Diretos e Indiretos	25
2.3. Sistemas de Distribuição de Calor Utilizados para Aquecimento Ambiente	26
3. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	31
3.1. Descrição do modelo da habitação	31
3.1.1. Levantamento Dimensional	33
3.2. Soluções Construtivas	34
3.2.1. Caracterização das Soluções Construtivas	34
3.3. Cargas Internas na Habitação	36
3.3.1. Ocupantes	36
3.3.2. Iluminação Artificial	37
3.3.3. Equipamentos Elétricos e Eletrônicos	38
3.4. Ventilação Natural	38
3.5. Configuração do S. Solar Térmico de Armazenamento Sazonal de Energia	39
3.5.1. Fluido Térmico	40
3.5.2. Coletores Solares Térmicos	41
3.5.3. Reservatório	41
3.5.4. Sistema de Distribuição de Calor	44

3.5.5.	Esquema do Circuito do Sistema	44
3.5.6.	Outros constituintes	46
4.	RESULTADOS	47
4.1.	Parâmetros Avaliados	47
4.1.1.	Necessidades de aquecimento da habitação	48
4.1.2.	Cargas internas da habitação	49
4.1.3.	Temperatura da água no depósito	51
4.1.4.	Setpoint da temperatura	54
4.1.5.	Temperatura média do ar vs Temperatura do ar exterior	56
4.1.6.	Perdas térmicas no reservatório	55
4.1.7.	Energia armazenada	56
4.2.	Consumos Energéticos e Custos	59
5.	CONCLUSÕES	64
5.1.	Considerações finais	64
5.2.	Sugestões para trabalho futuro	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
	ANEXO A	70
	ANEXO B	73
	APÊNDICE A	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolução da dependência energética de Portugal % (DGEG, 2014).....	2
Figura 2.1. Tipos de armazenamento de energia térmica (Sharma, Tyagi et al, 2009).....	8
Figura 2.2. Volume necessário para o armazenamento de 6,7 MJ de calor (adaptado de Hadorn,2008).....	11
Figura 2.3. Disponibilidade anual de energia disponível e das necessidades de aquecimento (Golovca, 2016).....	13
Figura 2.4. Soluções de armazenamento térmico de calor sensível de longa duração (adaptado de Socaciu, 2011).	14
Figura 2.5. Ciclos de verão e inverno (adaptado de Socaciu, 2011).....	15
Figura 2.6. Armazenamento térmico de energia num tanque de água quente (Socaciu, 2011).....	16
Figura 2.7. Esquema do armazenamento em poços de água e areia (Socaciu, 2011).	17
Figura 2.8. Esquema do armazenamento em orifícios (adaptado de Socaciu, 2011).	17
Figura 2.9. Seleção do coletor solar de acordo com a temperatura (adaptado de LusoSol, 2015).....	20
Figura 2.10. Eficiências para diferentes tipos de coletores solares (adaptado de LusoSol, 2015).....	21
Figura 2.11. Controlo diferencial (adaptado de Manual Steca Control, 2017).	23
Figura 2.12. Sistema solar térmico de funcionamento em termosifão (adaptado de Cruicksank, 2009).	24
Figura 2.13. Sistema solar térmico de circulação forçada (adaptado de Cruicksank, 2009).....	25
Figura 2.14. Sistemas diretos e indiretos (Roriz, 2015).	26
Figura 2.15. Mecanismos de transmissão de calor em edifícios (Silva, 2006).	27
Figura 2.16. Esquema tipo de um piso radiante hidráulico (adaptado de Warmup, 2017)..	29
Figura 3.1. Imagem da habitação obtida através do Google Sketchup 8 para diferentes alçados.....	31
Figura 3.2. Imagem da habitação obtida a partir de uma montagem do local produzida pelo Google Earth.....	32
Figura 3.3. Traçado da envolvente da habitação.....	33
Figura 3.4. Imagem obtida a partir do Google Sketchup 8, quando inclui o sistema de armazenamento sazonal.....	40

Figura 3.5. Constituição do depósito em corte (adaptado de Durão, 2013)	42
Figura 4.1. Necessidades de aquecimento da habitação	48
Figura 4.2. Ganhos térmicos relativos aos ocupantes.....	49
Figura 4.3. Ganhos térmicos relativos aos equipamentos elétricos e eletrônicos.	50
Figura 4.4. Ganhos térmicos relativos à iluminação artificial.....	50
Figura 4.5. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 2.....	51
Figura 4.6. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 3.....	52
Figura 4.7. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 4.....	52
Figura 4.8. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 5.....	52
Figura 4.9. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 6.....	53
Figura 4.10. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 7.....	53
Figura 4.11. Número de horas em que o setpoint de temperatura não é cumprido.	55
Figura 4.12. Perdas térmicas do depósito de armazenamento para cada situação.....	56
Figura 4.13. Temperatura média do ar na Zona 2	57
Figura 4.14. Temperatura média do ar na Zona 5.	57
Figura 4.15. Temperatura média do ar na Zona 4	58
Figura 4.16. Energia armazenada para cada área de coletores e respetivos volumes.....	59
Figura A.1.1. Esquema do circuito de aquecimento	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Sistemas comuns de distribuição de calor (adaptado de Craven, 2013)	28
Tabela 3.1. Dimensionamento do modelo da habitação	33
Tabela 3.2. Características dos materiais das paredes interiores (adaptado de ITE 50, 2006)	34
Tabela 3.3. Características dos materiais das paredes exteriores (adaptado de ITE 50, 2006)	34
Tabela 3.4. Características dos materiais da cobertura (adaptado de ITE 50, 2006).....	35
Tabela 3.5. Características dos materiais do pavimento (adaptado de Pimenta, 2015).....	35
Tabela 3.6. Características dos materiais dos materiais das portas (adaptado de ITE 50,2006).....	35
Tabela 3.7. Características dos materiais dos envidraçados (adaptado de ITE 50, 2006)...	36
Tabela 3.8. Características do fluxo de ar (adaptado de Henriques, 2015)	39
Tabela 3.9. Características dos materiais constituintes do piso radiante (adaptado de Gil,2016).....	44
Tabela 4.1. Detalhes de cada situação	47
Tabela 4.2. Volume ótimo de armazenamento para cada situação.....	55
Tabela 4.3. Consumos energéticos obtidos para cada situação	60
Tabela 4.4. Eficiências do sistema para cada situação	61
Tabela 4.5. Custo aproximado do sistema para cada situação.....	62
Tabela A 1.1. Equipamentos elétricos e eletrônicos e respectivas potências.....	70
Tabela A 1.2. Número de lâmpadas existentes em cada zona e sua respectiva potência	71
Tabela B 1.1. Frações de ocupação do modelo da habitação para cada mês	73
Tabela B 1.2. Frações da utilização dos equipamentos elétricos e eletrônicos no modelo da habitação para cada mês	74
Tabela B 1.3. Frações da iluminação artificial utilizada no modelo da habitação para cada mês.....	75

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A – Área dos coletores (m^2)

a_0 – Coeficiente linear de perdas térmicas ($W/m^2.K$)

a_1 – Coeficiente quadrático de perdas térmicas ($W/m^2.K^2$)

c_p – Calor específico ($J/kg.^\circ C$)

F' – Fator de rendimento do coletor

\dot{G}_T – Radiância que incide no plano do coletor (W/m^2)

k – Condutividade térmica ($W/m.K$)

L – Espessura (m)

R – Resistências térmicas dos materiais ($m^2.K/W$)

Q – Calor (J)

T_{amb} – Temperatura ambiente exterior ($^\circ C$)

T_{col} – Temperatura do fluido a circular no coletor ($^\circ C$)

T_e – Temperatura do fluido à entrada ($^\circ C$)

T_s – Temperatura do fluido à saída ($^\circ C$)

U – Coeficiente global de transferência de calor do depósito obtido por unidade de área ($W/m^2.K$)

V – Volume (m^3)

α – Fator de transmissão da cobertura transparente (toma valores de 0,90 a 0,96 %)

ΔT – Variação da temperatura ($^\circ C$)

$\frac{dT}{dx}$ – Gradiente de temperatura em relação a uma coordenada espacial ($^\circ C/m$)

ε – Espessura (m)

η_{col} – Rendimento do coletor (%)

η_0 – Rendimento ótico do coletor (%)

ρ – Massa volúmica (kg/m^3)

ρc_p – Calor específico volumétrico ($J/m^3.^\circ C$)

τ – Fator de transmissão da cobertura transparente (toma valores de 0,88 a 0,91 %)

Siglas

ADENE – Agência para a Energia

AQS – Águas Quentes Sanitárias

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

Engineers

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

CP – Coeficiente de Pressão

DGEG – Direcção Geral da Energia e da Geologia

DOE – U.S Department of Energy

ENU – Espaços Não Úteis

HVAC – Heating Ventilation Air Conditioning

ITE50 – Informação Técnica de Edifícios

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

PE – X – Polietileno reticulado

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios

REH – Regulamento do Desempenho Energético de Edifícios de Habitação

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e Motivações

Hoje em dia, a energia é imprescindível para a maioria das atividades que realizamos e os recursos energéticos que utilizamos têm vindo a desempenhar todas as nossas necessidades. No entanto, a crescente diminuição das reservas dos combustíveis fósseis, acompanhada pelo aumento dos seus preços e o facto de causarem grandes problemas ambientais levaram a uma maior procura das fontes de energia renováveis. A sociedade veio desde então a procurar soluções alternativas e a utilizar fontes de energia até então menos exploradas, pelo que as tecnologias de energia solar ganharam um grande impulso ao oferecerem uma fonte de energia limpa, renovável e ao ser considerada uma excelente alternativa de fonte de energia para aquecimento de edifícios.

É neste contexto que surge a necessidade de armazenamento de energias renováveis, uma vez que estas têm um carácter irregular, ou seja, a sua oferta nem sempre vai de encontro com a sua procura, obrigando ao seu armazenamento, umas vezes durante curtos períodos de tempo (horas ou dias), outras vezes durante períodos sazonais (meses). O armazenamento térmico é utilizado como um mecanismo que pretende utilizar uma maior quantidade de energias renováveis e deixar de lado os combustíveis fósseis, tentando aumentar a eficiência dos sistemas de aquecimento (Craven, 2013). A utilização de armazenamento sazonal de energia pode reduzir significativamente o custo do sistema solar que é capaz de fornecer até 100% das necessidades energéticas dos edifícios (Golovca, 2016). Estes são sistemas desenvolvidos para armazenar energia solar durante o verão, reter o calor armazenado e posteriormente utilizá-lo durante o inverno.

Portugal é conhecido por apresentar uma grande disponibilidade solar, sendo que possui das maiores taxas de insolação e radiação incidentes anualmente, ao contrário de países como a Alemanha, Suécia, Noruega, etc, tornando-se assim num país com uma enorme capacidade para acumulação de energia solar. No entanto, em Portugal, poucos ainda são os exemplos/ estudos documentados sobre a matéria de armazenamento sazonal de

energia, e obviamente, só se poderá tirar partido desta potencialidade que detemos, se houver incentivos ao investimento, tanto em conhecimento como em infraestruturas nesta área (Cabral, 2015).

Não deixa de ser importante referir que o nosso país ainda é visto como um grande importador de energia, sendo um dos principais objetivos da atual política energética nacional reduzir a sua dependência energética do exterior (ADENE, 2017). A dependência energética de Portugal situava-se entre os 80 e 90%, um valor bastante elevado, devido à inexistência da produção nacional de fontes de energia fósseis, como o petróleo ou gás natural. A aposta que se tem verificado nas energias renováveis e na eficiência energética nestes últimos anos, permitiu a Portugal baixar a sua dependência para níveis inferiores a 80% (DGEG, 2014), Figura 1.1.

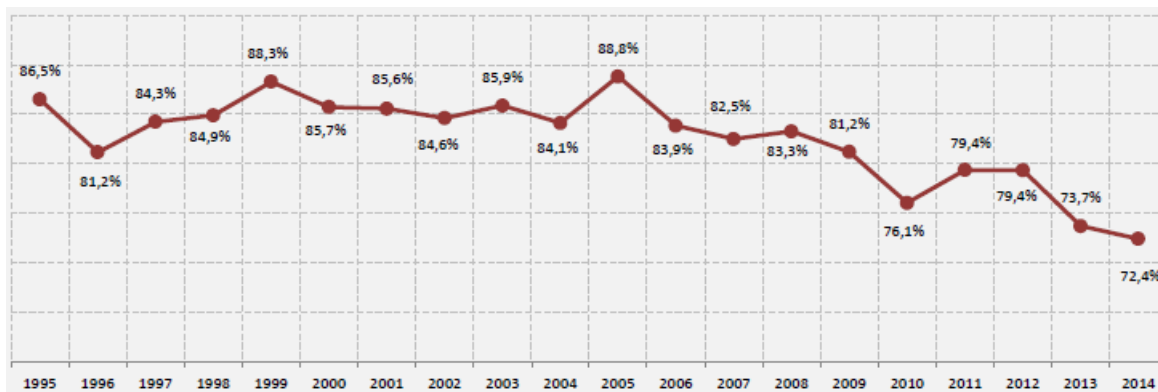


Figura 1.1. Evolução da dependência energética de Portugal %, (DGEG, 2014).

De acordo com a informação disponibilizada na Direção Geral da Energia e da Geologia (DGEG), no que diz respeito ao consumo das diferentes fontes de energia em 2014, é possível verificar que o petróleo continua a ser a principal fonte de energia primária (43%), seguido das renováveis (26%) e do gás natural (17%). No entanto, já é notável que a parcela do petróleo tem vindo a decrescer nos últimos anos (59% em 2005 vs. 43% em 2014), em contrapartida, as renováveis (13% em 2005 vs. 26% em 2014) e o gás natural (14% em 2005 vs. 17% em 2014) aumentaram significativamente.

Segundo a mesma fonte de informação, considerando o Consumo de Energia Final a nível sectorial em 2014, o sector dos Transportes continua a ser o grande consumidor

de energia (39%), seguido pela Indústria (31%), Doméstico (17%), Serviços (13%) e Agricultura e Pescas (3%).

Quanto ao consumo energético dos edifícios residenciais, este tem crescido nos últimos anos. Este crescimento está principalmente relacionado com o aumento das exigências de conforto térmico nos edifícios e consequentemente, ao aumento do número de equipamentos elétricos introduzido nas habitações. Verificou-se que a principal fonte de energia utilizada nas habitações, em 2010, foi a eletricidade, sendo maioritariamente utilizada para o aquecimento de AQS, no aquecimento e arrefecimento ambiente e em equipamentos da cozinha (Sousa e Silva, 2012)

Posto isto, conjuntamente com o aumento das preocupações ambientais e económicas, tem-se dado cada vez mais enfoque a sistemas que sejam energeticamente eficientes e que possam funcionar com energias renováveis. Tornou-se, deste modo, necessária a implementação de regras de monitorização que fossem capazes de controlar os gastos dos recursos. Uma das formas de se prever os gastos energéticos de uma habitação é através da simulação do seu comportamento térmico, recorrendo ao uso de ferramentas informáticas específicas, como é o caso do *EnergyPlus*, que irá ser utilizada ao longo deste trabalho.

As legislações e os regulamentos criados detêm de igual forma um papel bastante importante, dada a necessidade de se criarem situações que levem à obtenção de consumos moderados ou quase nulos, na construção de novos edifícios, com o intuito de se respeitarem os requisitos necessários para satisfazer o conforto térmico (Golovca, 2016). São exemplo o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei nº. 40/90, de 6 de Fevereiro, trata-se do primeiro instrumento legal em Portugal que impõe requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações, cuja principal finalidade era satisfazer as condições de conforto térmico, sem necessidades excessivas de energia quer no Inverno, quer no Verão (RCCTE,2016). Mais tarde, o RCCTE foi atualizado através do Decreto-Lei nº. 80/2006, de 4 de Abril e o seu principal objetivo passa pelo conforto térmico, tanto na estação de aquecimento como de arrefecimento, e de ventilação para garantir a qualidade do ar no interior dos edifícios, bem como as necessidades de água quente sanitária.

No ano de 2013, foi também aprovado o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), através do Decreto-Lei nº. 118/2013 de 20 de

agosto. Neste regulamento, para além da atualização dos requisitos de qualidade térmica, são também introduzidos requisitos de eficiência energética para os principais tipos de sistemas técnicos dos edifícios. Neste regulamento, encontram-se igualmente sujeitos a padrões mínimos de eficiência energética, os sistemas de climatização, de preparação de água quente sanitária, de iluminação e de aproveitamento de energias renováveis de gestão de energia. (Golovca, 2016).

Visto que, são poucos os estudos sobre captação e armazenamento de energia solar num longo período de tempo em residências familiares, é de grande interesse abordar esta temática. É nesta matéria que se vai debruçar esta dissertação – estudo e viabilidade de um sistema solar térmico de armazenamento sazonal de energia para aquecimento ambiente numa habitação de tipologia unifamiliar, apresentando diferentes configurações para o sistema. Inicialmente este estudo também vai apresentar algumas técnicas de armazenamento térmico sazonal, focando o armazenamento de calor sensível.

1.2. Objetivos

Pretende-se com este trabalho demonstrar que é possível utilizar energia solar térmica armazenada durante a época de Verão, para aquecimento de uma habitação no período de Inverno. Para este efeito são realizadas várias simulações com o programa *EnergyPlus 8.7* usando duas configurações, uma em que é utilizada um sistema solar térmico de armazenamento sazonal como fonte de energia e outra onde não é utilizada qualquer sistema de aquecimento. Os principais objetivos encontram-se descritos seguidamente:

- Construção de um modelo de uma habitação através do programa *GoogleSketchUp 8*; Idealização das diferentes configurações de um sistema solar com armazenamento sazonal de energia térmica (variação da área de coletores e do volume do depósito);
- Configuração do modelo de simulação da habitação, utilizando os programas *EnergyPlus.8.7* e *GoogleSketchUp 8*. Os parâmetros a ajustar no modelo são ao nível dos materiais de construção e suas propriedades, coeficientes de ventilação natural, horários de controlo de diversas variáveis, ocupação, equipamentos elétricos e eletrónicos, iluminação

artificial, etc; Implementação das configurações do modelo de um sistema solar térmico de armazenamento sazonal, utilizando os mesmos programas;

- Com base nos modelos configurados, são apresentadas sete situações para as quais são realizadas simulações energéticas, utilizando o software *EnergyPlus* 8.7. A primeira situação contempla todos os aspetos construtivos da habitação, onde não é suportado qualquer tipo de equipamento de climatização. Nas restantes situações, o modelo irá apresentar os mesmos aspetos construtivos, sendo que, irão possuir como fonte de energia o sol, tendo como base as configurações idealizadas do sistema solar com armazenamento sazonal de energia; como sistema de distribuição de calor utilizar-se-á o piso radiante hidráulico. Nestas configurações, apenas será alterada a área dos coletores e o volume do depósito de armazenamento de água quente, tentando atingir-se assim uma relação ótima entre estas duas variáveis e, ao mesmo tempo, assegurar o aquecimento da habitação;
- Análise dos resultados fornecidos pelos modelos de simulação, nomeadamente as temperaturas nas diferentes divisões da casa, número de horas em que o *setpoint* de aquecimento é cumprido, temperatura do depósito armazenamento de água quente, consumo energéticos e custos;
- Pretende-se que as configurações sejam capazes de satisfazer a totalidade das necessidades de aquecimento da unidade habitacional durante os meses de inverno.
- Após a análise dos resultados procede-se à verificação quanto à viabilidade do modelo, tendo em conta os parâmetros energéticos e económicos.

1.3. Metodologia

Os métodos necessários para a realização desta dissertação baseiam-se essencialmente na utilização do programa de simulação energética *EnergyPlus 8.7* e do programa de desenho *Google SketchUp 8*. O *Google Sketchup* é um programa de modelação em 3D, desenvolvido pela At Last Software. A geometria da habitação em estudo é realizada no *Google SketchUp8*, bem como a definição das zonas térmicas. O programa *EnergyPlus* é um programa de simulação que teve origem no Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, desenvolvido a partir de dois softwares BLAST e DOE-2, permite simular o comportamento térmico e energético de uma habitação, principalmente, no que diz respeito a determinados aspetos, como o aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e energia, permitindo assim uma análise de diversas características. Contudo, não possui uma interface de fácil acesso ao utilizador, sendo necessário introduzir-se uma série de dados (inputs) de forma a ser possível a obtenção dos resultados pretendidos (outputs).

É possível definir uma simulação baseada numa metodologia com quatro passos. Inicialmente é criado o modelo no programa *Google SketchUp 8*, de seguida são introduzindo os vários dados que definem a habitação no *IDFEditor*, como é o caso da sua constituição (materiais constituintes da envolvente e vãos envidraçados), bem como o conjunto das características dos materiais (espessura, condutibilidade, massa volúmica, entre outras); de igual modo, também é caracterizado o sistema solar de armazenamento térmico sazonal. A localização também constitui um dado de bastante relevância, assim como o conhecimento das cargas internas existentes em cada zona térmica e a definição de horários/calendários que permitem controlar diversas variáveis, tais como: iluminação, ocupação das zonas, equipamentos elétricos, equipamentos de climatização, as renovações do ar, nível de metabolismo, etc.

Em seguida o programa corre a simulação calculando o que foi proposto pelo utilizador, tendo em conta um ficheiro de dados climáticos, *Weather File*, também definido pelo mesmo. Este ficheiro é um dado de entrada com uma grande importância, uma vez que caracteriza o clima da região onde é implementada a habitação, permitindo assim obter informações relativas às temperaturas médias do ar exterior, velocidade do vento, componentes da radiação solar, entre outras.

Por último, analisam-se os resultados e tiram-se as conclusões acerca do comportamento térmico e energético do modelo proposto. A geometria do modelo pode ser consultada a partir de um ficheiro do tipo *drawing exchange format* (DXF); as variáveis que se definiram no *IDFEditor* a partir do objeto *Output:Variable* são gravadas num ficheiro do tipo *comma separated values* (CSV).

1.4. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, começando pelo primeiro capítulo, “INTRODUÇÃO”, onde são feitas algumas contextualizações em termos da energia em Portugal, bem como o interesse em abordar este tema da dissertação. Também são deliniados os objetivos e a metodologia a utilizar durante o trabalho.

O segundo capítulo, “ESTADO DE ARTE” é dedicado à apresentação de alguns conceitos sobre o armazenamento térmico de energia, centrando-se no armazenamento térmico de calor sensível. De seguida, é também feita uma breve revisão dos componentes que constituem um sistema solar térmico. Por fim, de uma forma muito resumida, são referidos alguns sistemas de distribuição de calor.

O terceiro capítulo “APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO” encontra-se uma descrição de todos os aspetos característicos da envolvente da habitação, assim como a caracterização quanto aos seus ocupantes, sistemas de iluminação artificial, equipamentos elétricos e eletrónicos e ainda o processo de ventilação natural. Também se encontra a descrição do sistema solar com armazenamento térmico sazonal e de todos os seus constituintes.

No quarto capítulo “RESULTADOS E DISCUSSÃO” são especificadas as setes situações idealizadas que irão ser implementadas nas simulações a partir do *Energy Plus 8.7*, e apresentados os resultados para cada uma. Os principais resultados passam pela análise das temperaturas do reservatório de armazenamento de água aquecida, da temperatura de *setpoint* e as temperaturas médias do ar no interior do modelo da habitação; energia armazenada em cada situação; consumos energéticos e os custos associados.

Por fim, o último capítulo, “CONCLUSÃO” é dedicado às conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho e referida qual a solução mais apropriada. Também são feitas propostas de trabalho futuro.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Armazenamento de energia

Existe uma grande variedade de tipos de armazenamento de energia que se encontram em desenvolvimento, sendo que alguns deles ainda de uma forma superficial. As tecnologias apresentam-se divididas em categorias e encontram-se associadas de acordo com a forma como a energia é armazenada: energia mecânica, energia térmica, energia biológica, energia química e a energia magnética (Dincer e Rosen, 2011). Neste trabalho apenas será abordado o armazenamento energia térmica de calor sensível.

Segundo (Sharma *et al.* 2009) pode dividir-se o armazenamento em dois grandes grupos: o térmico e o termoquímico, Figura 2.1. Por sua vez, o térmico é dividido em calor sensível e calor latente. Se um determinado aquecimento não implicar mudança de estado designa-se por calor sensível, caso implique designa-se por calor latente; no caso de desencadear uma reação química designa-se por termoquímico.

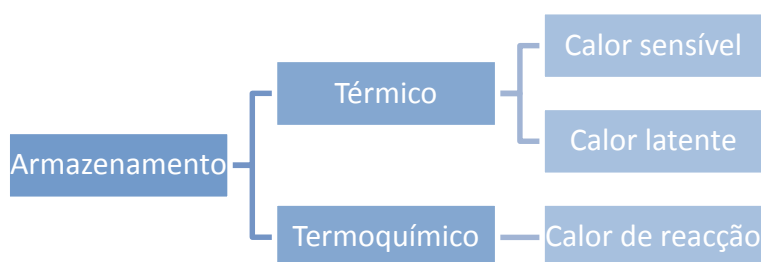


Figura 2.1. Tipos de armazenamento de energia (adaptado de Sharma *et al.*, 2009).

De acordo com Pilkington Solar International (2000), o armazenamento de energia térmica pode ser classificada de acordo com o mecanismo de armazenamento (sensível, latente ou químico) ou pelo conceito de armazenamento (ativo ou passivo). Por forma a escolher a opção mais ajustada à necessidade, é essencial ter em conta certas características de cada processo (Cruickshank, 2011), como:

- Capacidade de energia por unidade de volume ou peso;
- A temperatura em que opera;
- As propriedades do meio de transporte de energia (toxicidade, corrosividade, capacidade calorífica, etc)
- A estratificação da unidade de armazenamento;
- O material associado ao sistema de armazenamento;
- Os meios de controlo das perdas térmicas do sistema;
- Custos

Conceitos de Armazenamento

No caso dos sistemas de armazenamento térmico ativo, estes são caracterizados pela existência de convecção forçada do fluído de armazenamento. Neste tipo de sistemas são utilizados sistemas mecânicos como é o caso de uma bomba, por forma a facilitar a carga e a descarga. Este pode dividir-se em dois sub-sistemas: direto ou indireto. Por um lado os sistemas diretos ou de circuito fechado, onde o fluído de armazenamento de calor também circula nos coletores solares; por outro lado, os sistemas indiretos ou de circuito aberto, em que são utilizados diferentes fluídos nos coletores e no armazenamento.

No caso dos sistemas de armazenamento térmico passivo, este é habitualmente utilizado, quando é incorporado num edifício, mais propriamente nas suas paredes, tendo como principal objetivo suavizar oscilações de temperatura. Um exemplo particular é a utilização de uma parede de *Trombe*, uma grossa parede de alvenaria que absorve a radiação solar transmitida por um dos lados da parede. A temperatura da parede aumenta à medida que a energia é absorvida e vai transmitindo parte desse calor por radiação e convecção. Estas paredes podem também possuir controlos de fluxo de ar, com o intuito de controlar os ganhos internos de calor. Também os envidraçados e outros materiais de construção podem fazer parte destes sistemas. Ou seja, neste tipo de sistemas não são utilizados sistemas mecânicos como nos sistemas de armazenamento térmico ativo. Para este caso, também não são necessários sistemas de distribuição de calor, uma vez que, o calor é diretamente libertado para o edifício, quando a temperatura ambiente é mais baixa que a temperatura de massa térmica.

Note-se que estes sistemas de armazenamento ativo e passivo não devem ser confundidos com os sistemas solares térmicos ativos e passivos apresentados de seguida neste trabalho.

Duração do armazenamento

Uma das características que distingue os diferentes sistemas de armazenamento de energia térmica é também a duração do seu armazenamento: curta, média ou longa. Este fator é um dos mais importantes para a escolha do sistema.

O armazenamento de curto período de tempo é habitualmente utilizado para resolver cargas de potência de pico e é designado normalmente por armazenamento diurno. Já o armazenamento de médio ou de longo período de tempo é designado, frequentemente, por armazenamento anual ou sazonal.

Volume de armazenamento

O volume de armazenamento também é uma característica que os difere. Segundo Hadorn 2008, que determinou teoricamente o volume de armazenamento necessário para armazenar 6,7 MJ de calor, assumindo que 25% desse calor é perdido. Este utilizou diferentes mecanismos de armazenamento, conseguindo obter os resultados apresentados na Figura 2.2. É importante referir que o volume de água é calculado para o aumento de temperatura de 50°C, uma suposição que é bastante razoável para aplicações de aquecimento ambiente: a temperatura do espaço é de cerca de 20°C, enquanto a água pode facilmente ser armazenada a temperaturas até aproximadamente 100 °C.

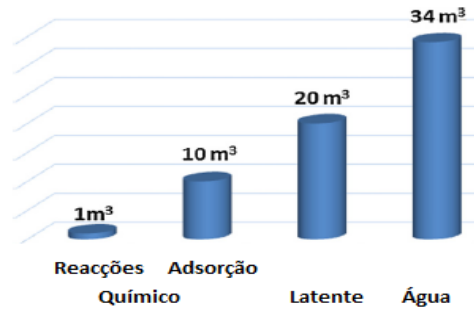


Figura 2.2. Volume necessário para o armazenamento de 6,7 MJ de calor (adaptado de Hadorn, 2008).

2.1.1 Armazenamento térmico de calor sensível

Num sistema de armazenamento de calor sensível a energia é acumulada numa substância devido à mudança de temperatura. A quantidade de energia introduzida para armazenamento de energia térmica por um mecanismo de armazenamento de calor sensível é diretamente proporcional à diferença entre a temperatura de armazenamento final e inicial, à massa e à respetiva capacidade calorífica, Equação (2.1).

$$Q = \rho \times cp \times V \times \Delta T \quad (2.1)$$

Na Equação 2.1, cp corresponde ao calor específico do material do suporte de armazenamento, ρ é a massa volúmica do material, V é o volume do armazenamento e ΔT é a variação de temperatura provocada no armazenamento.

A capacidade de armazenar calor sensível depende maioritariamente da quantidade de calor específico volumétrico, ρcp . O calor específico volumétrico de um material descreve a capacidade de um determinado volume de uma substância armazenar energia enquanto sofre alteração de temperatura, sem mudança de fase.

Para além disso, segundo (Dinçer e Rosen, 2011), para que um material seja atraente para aplicações de armazenamento de energia térmica, também terá de possuir um calor específico elevado, alta taxa de extração e libertação de calor, alta capacidade calorífica e alta condutividade térmica.

2.1.2 Sistemas de armazenamento de calor sensível de curta duração

Apenas apresento um exemplo para este tipo de sistemas:

Tanque para armazenamento de energia com estratificação

Os tanques estratificados termicamente têm a capacidade de armazenar frio e calor, e utilizam, maioritariamente, como suporte de armazenamento, líquidos. Estes deverão seguir alguns requisitos:

- Devem sustentar volumes de água separados e a diferentes temperaturas;
- As perdas de calor do tanque devem ser minimizadas.

Este tipo de armazenamento é geralmente utilizado em vastas aplicações residenciais, com integração de coletores solares. Existe um circuito próprio para o coletor, pelo qual a água da parte inferior do reservatório entra fria, aí é posteriormente aquecida, voltando de seguida para o reservatório. A água quente pode ser aproveitada para aquecedores e outros aparelhos que possuam de igual forma a água como fluido de trabalho. Entretanto, entra novamente água no tanque que se encontra à temperatura da água da rede e é assim iniciado um novo ciclo.

2.1.3 Sistemas de armazenamento de calor sensível de longa duração

O armazenamento sazonal de energia solar para aquecimento ambiente começou a ser investigado na Europa, nos meados da década de 70, em países com um clima mais frio que Portugal e que apresentavam um maior poder económico. Esta solução foi posta em prática no âmbito de projetos de aquecimento solar em grande escala. Os primeiros sistemas em larga escala foram construídos na Alemanha, Suécia, Dinamarca, Áustria e Países Baixos. A primeira implementação destes sistemas, que serviu de demonstração foi desenvolvida na Suécia, entre 1978 e 1979 (Pavlov e Olessen, 2011).

Como é de conhecimento geral é nos meses de verão que se dispõe da maior quantidade de energia solar, e no inverno é quando se recebe a menor quantidade desta

energia, isto para o caso do hemisfério norte. Quanto à necessidade de aquecimento de espaços a situação inverte-se, isto é, no inverno é quando existe a maior necessidade de aquecimento e no verão, de um modo geral, não existe essa necessidade. Como se pode verificar através da Figura 2.3., estas duas situações não coincidem, existindo assim a necessidade de se encontrar uma solução em que se consiga aproveitar a radiação em excesso e usá-la quando realmente ela é necessária. A solução consiste em armazenar a energia solar térmica durante a estação quente e usá-la apenas nos meses de inverno. As áreas intersectadas correspondem à energia solar útil. O grande objetivo do armazenamento sazonal é aumentar o quanto possível esta área de interseção.

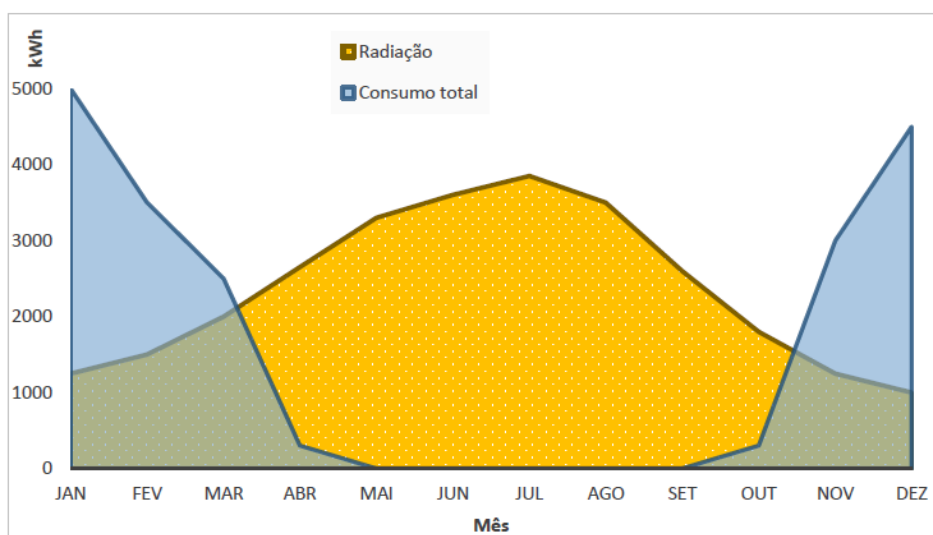


Figura 2.3. Disponibilidade anual da energia disponível e das necessidades de aquecimento (Golovca, 2016).

De um modo geral, existem quatro tipos de armazenamento de calor sensível de longa duração ou sazonal (Socaciu, 2011): armazenamento de energia térmica em água quente, armazenamento de energia térmica em aquíferos, armazenamento de energia térmica em água e areia e, por último, armazenamento de energia térmica em orifícios/poços, Figura 2.4.

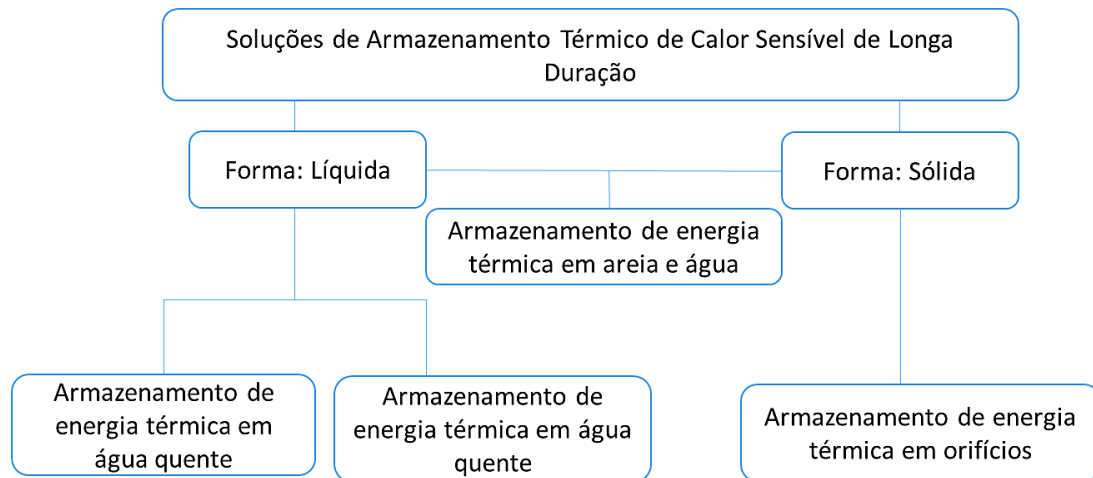


Figura 2.4. Soluções de armazenamento térmico de calor sensível de longa duração (adaptado de Socaciu, 2011).

2.1.3.1 Armazenamento de energia térmica em aquíferos

Um aquífero pode ser considerado um reservatório de água subterrâneo, sendo o material que o constitui permeável à água e a camada limite um material impermeável, por exemplo rocha ou barro (Rocha, 2013).

Este tipo de armazenamento conquistou bastante interesse por ter a capacidade de ser instalado em grande escala e apresentar uma longa duração. Neste tipo de armazenamento, o método utilizado é o seguinte, Figura 2.5: no inverno, o calor armazenado é utilizado para aquecer o ambiente dos edifícios; no verão, o arrefecimento é conseguido através da transferência de calor do interior dos edifícios para a água subterrânea, água que posteriormente pode servir para aquecimento no inverno (Socaciu, 2011).

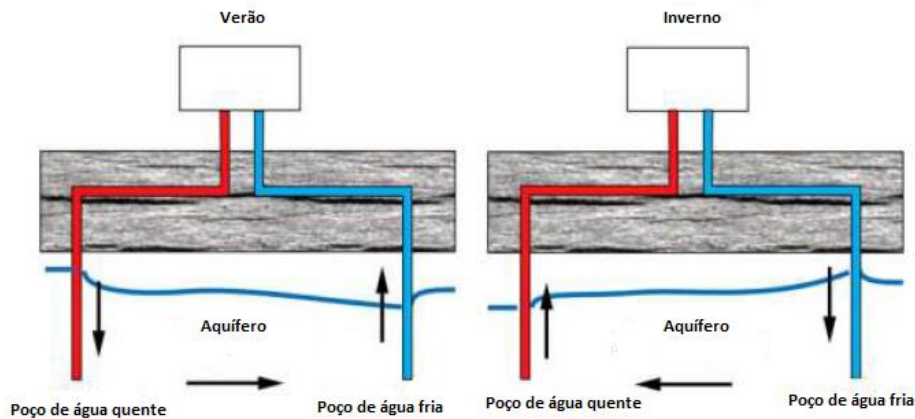


Figura 2.5. Ciclos de verão e inverno (adaptado, Socaciu 2011).

2.1.3.2. Armazenamento de energia térmica em água quente

Neste tipo de armazenamento existe um tanque, Figura 2.6, que funciona como retentor e que contém uma grande quantidade de água que é utilizada como material de armazenamento.

Este tanque pode ser parcial ou completamente enterrado e é termicamente isolado pelo menos na área do teto e das paredes verticais. Sendo a água o meio de armazenamento, tira-se proveito do seu calor específico. O primeiro tanque a ser implementado foi construído com revestimentos interiores de aço que permitiam a impermeabilidade e a minimização das perdas por evaporação através das paredes, no entanto, esta técnica deixou de ser utilizada, com o aparecimento de um novo material de betão de alta densidade que apresentava uma menor permeabilidade ao vapor de água (Pavlov e Olessen, 2011; Socaciu, 2011).

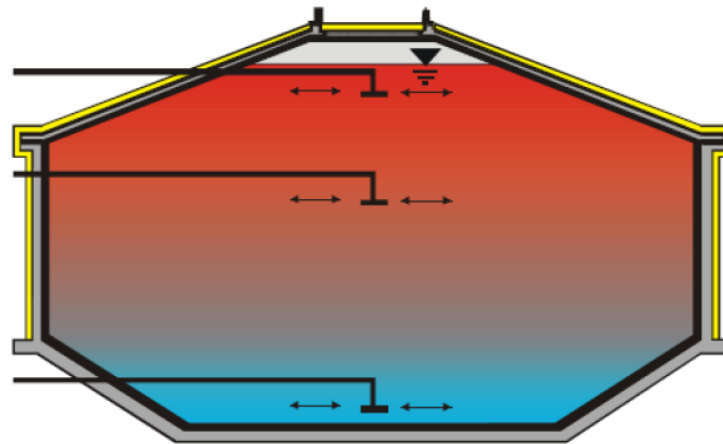


Figura 2.6. Armazenamento térmico de energia num tanque de água quente (Socaciu, 2011).

2.1.3.3. Armazenamento de energia térmica em água e areia

Este sistema de armazenamento com água e areia é composto por um poço enterrado em locais próximos da superfície, Figura 2.7, de forma a reduzir os custos de construção. É fundamental que o sistema seja isolado e impermeável no topo e ao longo das paredes inclinadas, sendo que, na superfície inferior do armazenamento, o isolamento pode ser evitado se estiver sobre um solo de baixa condutividade térmica. O meio de armazenamento trata-se de uma mistura de areia e água que tem menor calor específico, entre o da água e o da areia, assim, o volume de armazenamento tem de ser aproximadamente 50 % maior do que no caso da armazenamento por água quente, para acumular a mesma quantidade de calor. A extração e libertação de calor são feitas diretamente através da troca de água ou por tubos de plásticos instalados em diferentes camadas do armazenamento, e a temperatura máxima de armazenamento é de 95 °C (Pavlov e Olesen, 2011; Socaciu, 2011; Costa, 2014).

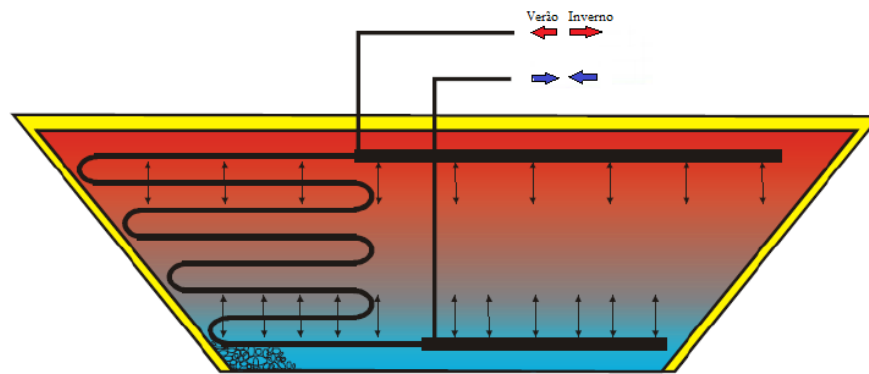


Figura 2.7. Esquema do armazenamento em poços de água e areia (Socaciu, 2011).

2.1.3.4. Armazenamento de energia térmica em orifícios

Neste tipo de armazenamento, o calor é armazenado diretamente no solo, não existindo neste caso volume de armazenamento. Têm como princípio de armazenamento permutadores de calor, sendo os mais comuns em forma de U, inseridos nos orifícios verticais a uma profundidade entre os 30 e 100 m, Figura 2.8. Os orifícios podem ser equipados com diferentes permutadores de calor, fazendo com que os orifícios atuem como um grande permutador de calor entre o solo e o sistema. O fluido que circula dentro dos permutadores é a água, ou em certas situações, água misturada com glicol ou álcool.

Durante a carga, o fluxo de calor desloca-se do centro para a periferia, obtendo-se maiores temperaturas no centro; na descarga o fluxo inverte o sentido.

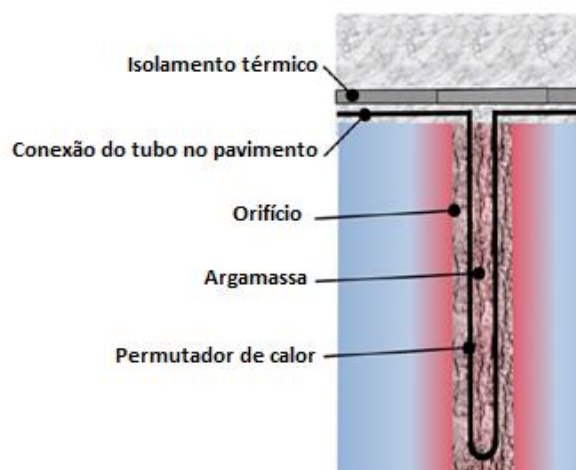


Figura 2.8. Esquema do armazenamento de energia térmica em orifícios (adaptado de Socaciu, 2011).

Ao contrário do que acontece nos outros tipos de armazenamento mencionados anteriormente, no que diz respeito à estratificação da temperatura, neste caso a estratificação ocorre na horizontal. Isto resulta do facto da transferência de calor ser maioritariamente por condução (Costa, 2014).

A grande vantagem deste tipo armazenamento passa por ter um custo mais baixo que as técnicas de armazenamento em água e areia e em água quente, uma vez que tem uma maior facilidade e várias possibilidades de construção. No entanto, quando comparado com um sistema de armazenamento de energia térmica em água quente, esta tecnologia precisa de ter um tamanho de cerca de três a cinco vezes superior, para armazenar a mesma quantidade de calor, isto deve-se ao fato de haverem menores taxas de calor durante a carga e descarga e à menor capacidade térmica do material (Costa,2014).

2.2. Sistema Solar Térmico

2.2.1. Principais Componentes de um Sistema Solar Térmico

Os elementos constituintes de um sistema solar térmico são (Mascarenhas, 2015):

- Coletor(es) solar(es): transformam a radiação incidente em energia térmica;
- Depósito acumulador: reservatório que acumula a água quente até que esta seja necessária para consumo;
- Unidade de controlo: elementos de regulação que asseguram o correto funcionamento do sistema;
- Unidade de apoio: sistemas complementares de aquecimento que apenas são acionados quando as radiações recebidas não são suficientes para o nível de aquecimento que se pretende;
- Sistema de circulação: conjunto de equipamentos e acessórios que fazem com que o fluido de trabalho circule do coletor solar para o depósito acumulador (no circuito primário), e a água a aquecer, circule desde a entrada do depósito, até à sua saída e conseqüente consumo.

Coletores Solares

Os coletores solares representam os componentes essenciais das instalações para aproveitamento de energia solar térmica. Têm como função captar e converter a luz solar em calor e transferir a energia obtida com o mínimo de perdas para o resto do sistema, geralmente através de água, óleo ou outro fluido, dependendo da temperatura de funcionamento do sistema. Estes também devem possuir algumas características (Cerveira, 2012):

- Apresentar uma superfície de absorção que permita um elevado nível de captação da energia radiante incidente para os baixos comprimentos de onda, da ordem de 0,3 a 3,0 μm ;
- Apresentar um reduzido índice de perdas, através da utilização de um bom isolamento térmico;
- Possuir baixo nível de emissividade para a radiação solar nos comprimentos de onda mais comuns que se situam entre 3,0 e 30 μm .

Existem vários tipos de coletores líquidos:

- Coletores Planos Simples Vitificados;
- Coletores Planos Seletivos;
- Coletores Planos Sem Vidro de Cobertura;
- Coletores Parabólicos Concentradores Compostos – CPC;
- Coletores de Tubos de Vácuo.

A escolha do coletor solar a utilizar vai depender da finalidade pretendida. No caso em estudo, os que mais se adequam são os do tipo plano e os de tubo de vácuo. Em Portugal, os coletores mais utilizados e conhecidos são os de tipo plano. Os de tubo de vácuo são menos conhecidos, uma vez que, estes são mais apropriados para climas mais frios, pois apresentam menos perdas para o exterior. Existem coletores em tubos de vácuo com vários formatos, sendo que o mais comercializado tem a designação de “*heat pipe*” ou tubo de calor. Devido às condições de revestimento dos tubos, consegue-se obter uma elevada eficiência e

captação de energia solar térmica, mesmo em dias nublados, através da radiação difusa em qualquer orientação (LusoSol,2015). Na Figura 2.9, representa os diferentes tipos de coletores solares de acordo com as temperaturas a que conseguem aquecer o fluido.

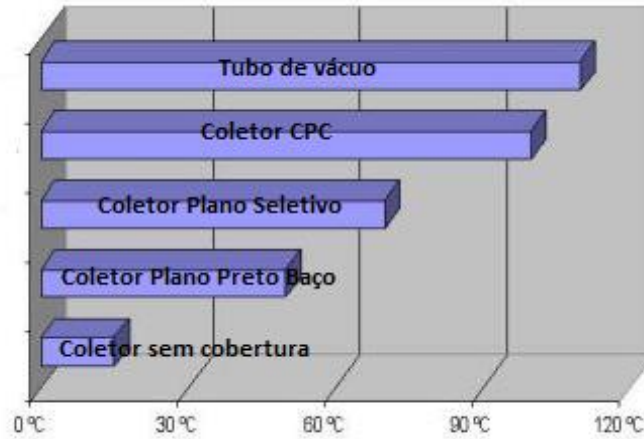


Figura 2.9. Seleção do coletor de acordo com a temperatura (adaptado de LusoSol, 2015).

Em Portugal, a eficiência dos coletores é determinada pela Norma EN 12975 (2006). Esta depende, fundamentalmente, de parâmetros como a radiação incidente na área de superfície do painel, temperatura ambiente e temperatura do fluido de transporte térmico que circula na tubagem do coletor. Calcula-se o rendimento do coletor a cada instante de tempo, como sendo o quociente entre a potência térmica útil e a radiação solar no plano de coletor, Equação 2.2.

$$\eta_{col} = \frac{\dot{Q}_{útil}}{\dot{G}_T \cdot A_{col}} \quad (2.2)$$

De acordo com a norma EN 12975 (2006), a eficiência pode ser representada através da Equação 2.3:

$$\eta_{col} = \eta_0 - \frac{a_0}{\dot{G}_T} (T_{col} - T_{amb}) - \frac{a_1}{\dot{G}_T} (T_{col} - T_{amb})^2 \quad (2.3)$$

$$\text{com, } \eta_0 = (\tau \cdot \alpha) \cdot F' \quad (2.4)$$

$$\text{e com, } T_{col} = \frac{(T_e - T_s)}{2} \quad (2.5)$$

Na Equação 2.3, η_{col} corresponde ao rendimento do coletor, η_0 ao rendimento ótico do coletor, T_{col} a temperatura do fluido a circular no coletor, T_{amb} a temperatura ambiente exterior, \dot{G}_T a radiância que incide no coletor solar, a_0 o coeficiente linear de perdas térmicas, a_1 coeficiente quadrático de perdas térmicas. Na Equação 2.4, τ representa o fator de transmissão da cobertura transparente (toma valores geralmente entre 0.88 a 0.91), α o fator de transmissão da cobertura transparente (toma valores geralmente entre 0.90 a 0.96) e F' o fator de rendimento do coletor solar (toma valores geralmente entre 0.92 a 0.97).

Na Equação 2.5, T_e e T_s , representam a temperatura do fluido à entrada e à saída do coletor respetivamente. Na Figura 2.10, são apresentadas diferentes eficiências para os diferentes tipos de coletores solares.

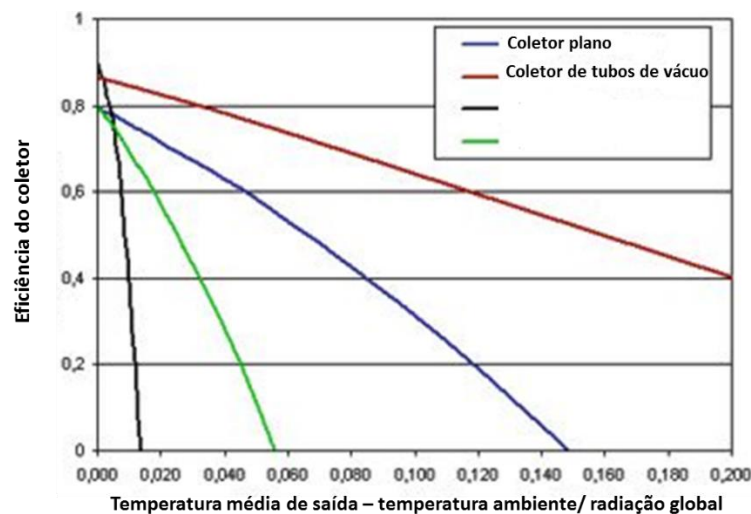


Figura 2.10 Eficiências para diferentes tipos de coletores solares (adaptado de LusoSol, 2015).

Reservatórios de Armazenamento

Representam os componentes que se destinam, como o próprio nome diz, armazenar energia solar, já que a produção térmica solar não coincide com o consumo de

água quente. Estes devem possuir estratificação térmica para aumentar a eficiência do sistema solar térmico, boa resistência mecânica, resistência à corrosão. Para além disto, deve estar bem isolado termicamente e sempre que possível, estar instalado no interior. Os depósitos acumuladores apresentam geralmente uma capacidade de armazenamento variável entre os 100 e os 5000 litros. Apoiando-se nas condições de transmissão do calor captado pelos coletores para aquecer a água nos sistemas solares térmicos, os depósitos acumuladores podem ser classificados em:

- Depósitos sem permutador;
- Depósitos com um permutador;
- Depósitos com dois ou mais permutadores.

Grupo Hidráulico

Contém uma bomba de circulação, um manómetro, termómetros e ligação ao vaso de expansão, e tem por função fazer circular a água entre os coletores e o depósito, de modo a existir permuta térmica.

Controlo Diferencial

É um mecanismo eletrónico que tem como função fazer funcionar a bomba quando existe energia solar disponível. Recebe sinais elétricos de sondas de temperatura instaladas no coletor e no depósito, e atua pela diferença de temperatura nestes dois pontos. Quando a diferença de temperatura, $T_1 - T_2$, é maior que 5 ou 6 °C, o sistema arranca; quando esta diferença, $T_1 - T_2$, é menor que 2°C, o sistema pára. Em sistemas mais completos, têm diversas funções, envolvendo interligações com outros componentes e cálculo da energia térmica.

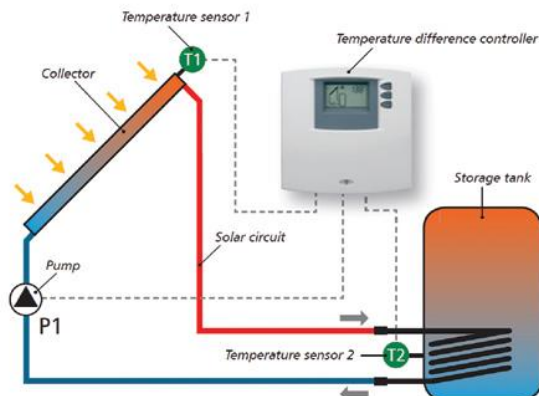


Figura 2.11. Controle diferencial (adaptado de Manual Steca Control, 2017).

Unidade de Apoio

O sistema de apoio tem a função de auxiliar o sistema quando o coletor solar não atinge temperatura suficiente para aquecer água do depósito. Frequentemente, esta unidade é colocada na parte superior do depósito, de modo a maximizar a captação de energia solar.

Tubagens

As tubagens devem possuir algumas características:

- Serem compatíveis com o fluido térmico;
- Têm de resistir a temperaturas de, pelo menos, 150 °C;
- Ter a capacidade de resistir a variações térmicas desde temperaturas negativas até aos 150°C;
- Estabilidade mecânica, especialmente em uniões, em virtude da dilatação ou contração

2.2.2. Tipos de sistemas solares térmicos

Os sistemas solares podem se caracterizados quanto o seu tipo de circulação (natural ou termossifão e circulação forçada) e segundo o sistema de transferência de calor entre o coletor e o acumulador (transferência direta ou indireta).

2.2.2.1. Sistema de Termossifão

O sistema de termossifão é o sistema solar térmico mais simples, uma vez que, a circulação do fluido térmico ocorre por convecção natural. Este sistema é composto por um coletor solar e um depósito de água que se encontra a um nível superior ao do coletor.

Desta forma, após incidir radiação no coletor, o fluido em contato com a placa absorvedora aquece, diminuindo a sua densidade, subindo até ao depósito. Ou seja, a água que se encontra no fundo do depósito será a primeira a ser aquecida, fazendo com que esta suba e a água fria que se encontra mais acima acabe por descer, formando-se assim uma corrente, Figura 2.12. É um processo natural e apresenta como vantagens o facto de não precisar de recorrer a outros tipos de energia e necessitar de uma menor manutenção, quando comparado com o sistema de circulação forçada, tornando-se assim mais económico. No entanto, existe a possibilidade de ocorrer uma inversão no sentido da circulação, quando a luz solar é nula, ou mesmo reduzida, por exemplo, à noite, onde o líquido que existe no depósito poderá sofrer arrefecimento. Para se evitar este tipo de situações é fundamental a utilização de válvulas antirretorno (Mascaranhas, 2015).

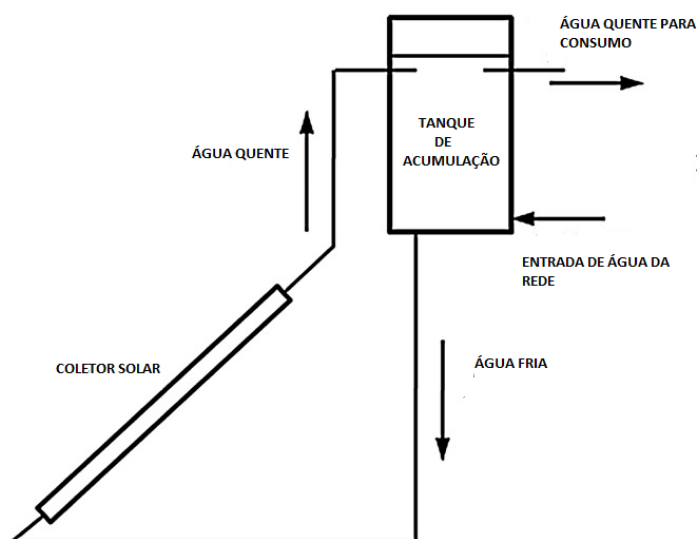


Figura 2.12. Sistema solar térmico de funcionamento termossifão (adaptado de Cruickshank, 2009).

2.2.2.2. Sistema de Circulação Forçada

Neste caso, a circulação faz-se por meio de equipamento mecânico, apresentando assim um rendimento superior, Figura 2.13. A bomba é acionada através de um mecanismo de controlo, ligando-a sempre que necessário. Apresenta como vantagens, por exemplo, o fato do acumulador ser colocado verticalmente, resultando numa melhor estratificação dos níveis de temperatura, o que leva também a um maior aproveitamento da energia solar; sistema é muito mais estético, uma vez que, o acumulador é instalado separadamente dos coletores num local protegido. Outra das vantagens é que sendo o acumulador colocado num local protegido, as perdas térmicas do depósito diminuem significativamente. Contudo, este sistema tem a desvantagem de apresentar um investimento mais elevado que o sistema por circulação de termossifão.

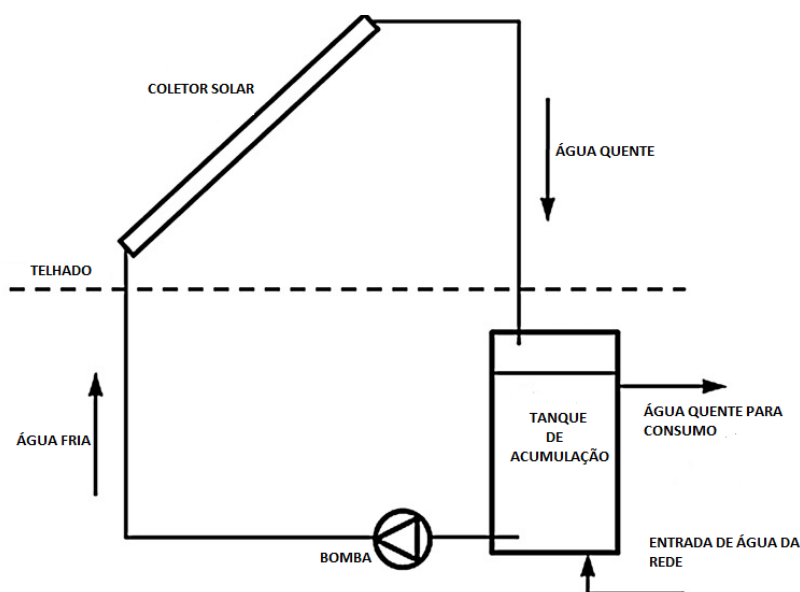


Figura 2.13. Sistema solar térmico de funcionamento de circulação forçada (adaptado de Cruickshank, 2009).

2.2.2.3 Sistemas diretos ou indiretos

Sistemas diretos e indiretos, Figura 2.14, caracterizam-se pela utilização do fluido. No caso dos sistemas indiretos, estes utilizam, em circuito fechado, um fluido intermediário, ou seja, um fluido de transporte da energia que é captada no coletor, e quando chega ao sistema de armazenamento, transfere essa energia por troca de calor graças à

utilização de um permutador de calor. Por outro lado, os sistemas diretos utilizam somente água, que, ao entrar no coletor, recebe a radiação solar e aquece. De seguida, é simplesmente acumulada no sistema de armazenamento ou circula diretamente para satisfação de consumo doméstico.

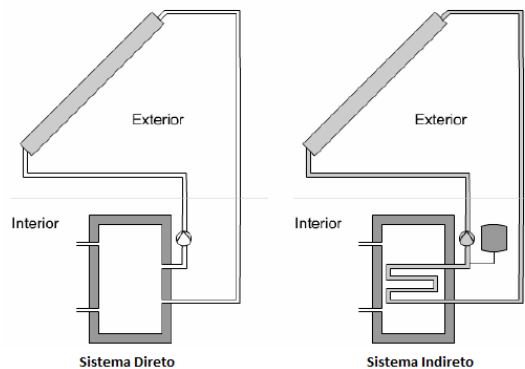


Figura 2.14. Sistema direto e indireto (Roriz, 2017).

2.3. Sistemas de distribuição de calor utilizados para o aquecimento ambiente

Conhecemos três tipos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. No caso da condução, o mecanismo de transferência de calor tem como base a transferência de energia cinética a nível molecular em sólidos, líquidos ou gases. Em edifícios, o processo de transmissão de calor mais significativo é a condução e esta vai depender da condutividade térmica dos materiais - λ (W/m.°C) e da espessura do elemento da envolvente - x (m), como se pode verificar na Lei de Fourier para a condução, Equação 2.6:

$$\dot{Q} = (A \cdot \lambda) \cdot \frac{dT}{dx} \tag{2.6}$$

com A = área do elemento (m²) e dT/dx = gradiente de temperatura em relação a uma coordenada espacial (°C/m).

A convecção é um mecanismo de transmissão de calor que tem por base a transferência de energia através do movimento de fluídos, líquidos ou gasosos, e difusão

molecular. Neste mecanismo ocorre transmissão de calor de um sólido para o ar adjacente, ou entre duas superfícies a diferentes temperaturas. A transmissão de calor por convecção aumenta na medida que aumenta a velocidade do fluxo do fluido. A convecção pode ser dividida em: natural ou forçada. A natural é gerada internamente devido à não homogeneidade da densidade por diferenças de temperaturas. A forçada ocorre quando o fluxo é produzido por fontes externas.

A radiação consiste na transferência de energia a partir de ondas eletromagnéticas. Para que ocorra este tipo de transmissão de calor, é somente necessária a existência de duas superfícies a diferentes temperatura (Silva, 2006).

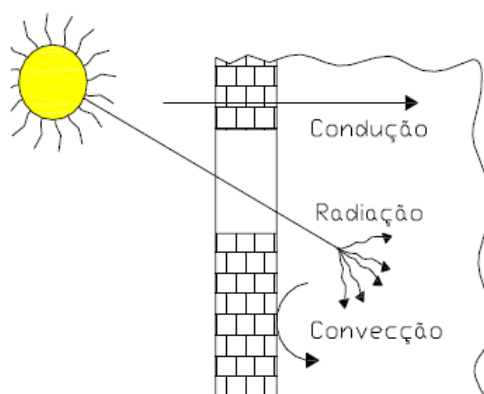


Figura 2.15. Mecanismos de transmissão de calor em edifícios (Silva,2006).

Os sistemas de aquecimento assistidos por energia solar são cada vez mais utilizados. No entanto, o armazenamento de energia térmica, complementa certas fontes de energia mais do que outras (Craven, 2013). A fonte de calor deve ter uma temperatura suficientemente alta para que possa carregar o sistema de armazenamento térmico a uma temperatura elevada para que depois possa ser usada pelo sistema de distribuição. Diferentes sistemas de distribuição requerem diferentes temperaturas do fluido para distribuir o calor para um espaço. Alguns sistemas comuns de distribuição e as suas temperaturas de funcionamento estão apresentados na Tabela 2.1. A distribuição de calor para aquecimento ambiente pode ser feito através de piso ou parede radiante hidráulicos, radiadores ou ventilos-convetores, etc.

O piso radiante apresenta a solução com maiores vantagens quando se pretende a construção de uma nova habitação, apresentando uma grande eficiência. Este tem a possibilidade de utilização de água a uma temperatura baixa (entre 29°C a 38°C).

No caso dos radiadores, estes utilizam a água a uma maior temperatura (entre 70°C e 90°C). Os ventilo-convetores são aparelhos de climatização e encontram-se localizados em cada divisão da habitação, podendo receber água refrigerada ou aquecida.

Tabela 2.1. Sistemas comuns de distribuição de calor (adaptado de Craven, 2013).

Sistema de distribuição	Temperatura
Ar forçado	Ar, 50 °C – 66 °C
Placa base hidráulica	Água, 66 °C – 82 °C
Radiador hidráulico	Água, 50 °C – 82 °C
Piso radiante hidráulico	Água, 29 °C – 38 °C
Sistemas de água quente sanitária	Água, 50 °C – 60 °C

Piso Radiante Hidráulico

Atualmente, as aplicações de piso radiante em habitações têm aumentado consideravelmente na Europa. Na Alemanha, Áustria e Dinamarca, 30% a 50% dos novos edifícios de habitação possuem aquecimento por piso radiante (Olesen, 2002).

Existem três tipos de pisos radiantes: piso radiante a ar quente, piso radiante elétrico e o piso radiante hidráulico. O funcionamento deste sistema consiste em bombear água aquecida a partir de uma fonte de produção de calor através de tubos colocados ao longo do pavimento. Em alguns sistemas, o controlo do fluxo de água quente é feito através de bombas e termostatos que regulam a temperatura ambiente. O piso radiante, quando alimentado por energia solar, opera a baixas temperaturas, como já tinha sido referido em cima. No que diz respeito à transferência de calor para o ambiente, esta dá-se através de radiação e convecção. Os custos de instalação para estes tipos de sistemas variam consoante a localização geográfica e podem depender da dimensão da casa, do tipo de instalação, do revestimento do piso e do custo de mão-de-obra (DOE, 2015).

Como se pode observar através da Figura 2.16, a constituição frequente do piso radiante passa por, na parte inferior uma camada de betão armado, seguido de uma camada com argamassa. Como isolante costuma usar-se uma camada de poliestireno extrudido de alta densidade, sendo que é nesta camada que são colocadas as tubagens por onde circula a água. A parte superior é constituída por uma camada de argamassa, seguida por pavimento

de madeira. Nas instalações de piso radiante hidráulico as tubagens de plástico tipo PE-X (polietileno reticulado) são atualmente as mais utilizadas (Gil, 2016).

Uma das grandes vantagens do piso radiante é a climatização através do mesmo, não envolvendo correntes de ar e permitindo assim uma distribuição uniforme do calor. Este flui de toda a superfície do pavimento e centra-se sobretudo nas zonas onde é indispensável e nas áreas em que nos movimentamos. Estes também são capazes de proporcionar níveis de conforto muito elevados, para além disso, são compatíveis com a maioria das fontes de energia, sejam estas, caldeiras a gás, a gasóleo, a biomassa ou elétricas, bombas de calor, mas especialmente com coletores solares térmicos, visto que estes trabalham com água a baixa temperatura. Para além disso, também são compatíveis com quase todos os tipos de pavimento.

As desvantagens deste sistema passam pela difícil instalação em edifícios construídos, devendo ser instalado durante a construção destes. Outra desvantagem é o tempo de resposta do sistema, considerando-se mais lento que outros sistemas de aquecimento e isso também vai depender do acabamento do piso (Mascaranhas, 2015). Num piso de madeira o tempo de resposta será maior que num piso de cerâmica. Também tem a desvantagem de não possuir capacidade de renovação do ar e o arrefecimento é apenas sensível (este sistema não consegue alterar a humidade absoluta do ar), pelo que deverá ser associado com outro dispositivo de tratamento de ar (Cabral,2001).

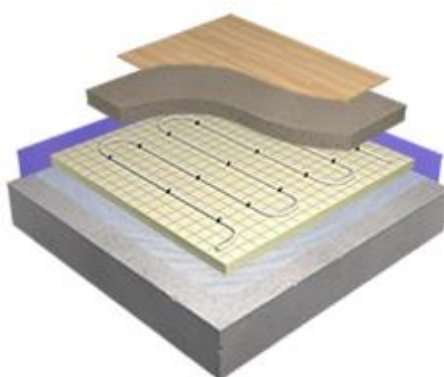


Figura 2.16. Esquema tipo de um piso radiante hidráulico (adaptado de Warmup, 2017).

3. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

No presente capítulo são descritos todos os mecanismos, processos e dados utilizados para a construção dos modelos de simulação energética e da configuração do sistema solar de armazenamento sazonal de energia. Encontra-se uma explicação de toda a informação utilizada, que permitiu desenvolver este modelo.

3.1 Descrição do modelo da habitação

O modelo da habitação foi construído através do software *Google Sketchup 8*, Figura 3.1, este apresenta uma tipologia T3 unifamiliar e será implementado no interior de uma zona rural, em Penacova, no Alto das Lamas. Na Figura 3.2, é possível observar a habitação a partir de uma montagem sobre uma imagem do local produzida pelo Google Earth.

A habitação desenvolve-se num só piso, sendo composta por uma sala de jantar e sala de estar com ligação à cozinha, dois quartos, três casas de banho, um jardim interior e uma garagem. É também composta por o hall de entrada e o corredor de acesso aos quartos e ao jardim interior. Apresenta uma porta exterior localizada na entrada principal e dois portões localizados na garagem. Quanto aos envidraçados, estes localizam-se ao longo de toda a habitação, perfazendo um total de sete. Por fim, existe ainda uma pala situada na entrada, apenas com efeito estético.

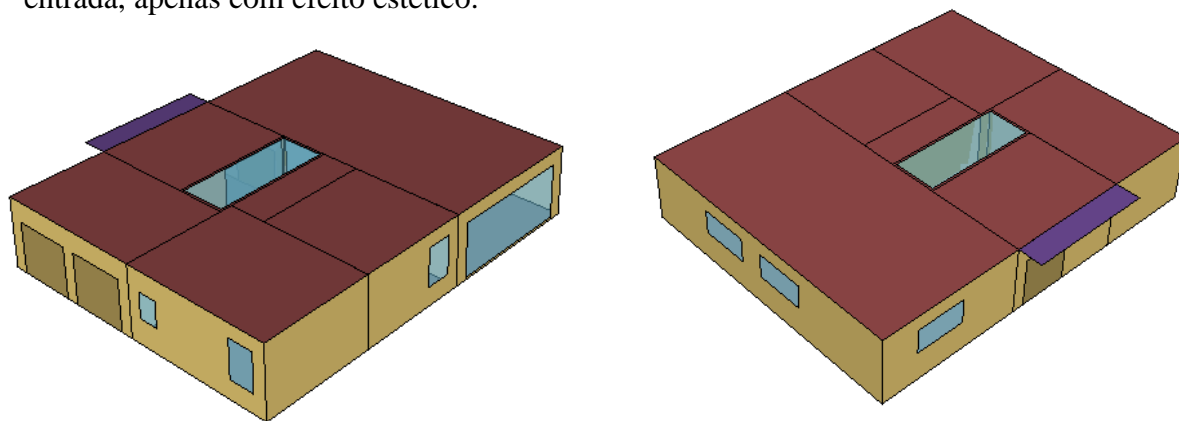


Figura 3.1. Imagem da habitação obtida a partir do *Google Sketchup 8*, em alçados diferentes.

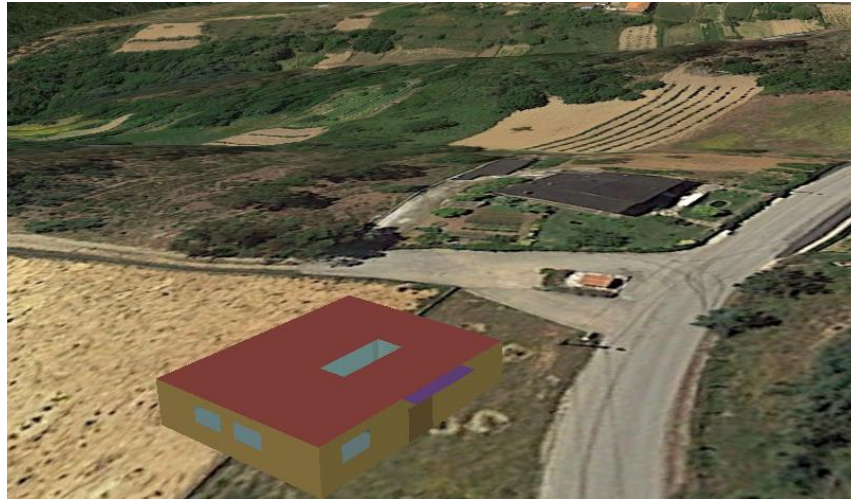


Figura 3.2. Imagem da habitação obtida a partir de uma montagem sobre uma imagem do local produzida pelo Google Earth.

Traçado da envolvente

A envolvente da habitação, de acordo com a alínea z) do artigo 2º, do Decreto-Lei nº 28/2016, de 23 de junho, é “o conjunto de elementos de construção do edifício ou fração, compreendendo as paredes, pavimentos, coberturas e vãos, que separam o espaço interior útil do ambiente exterior, dos edifícios ou frações adjacentes, dos espaços não úteis e do solo.”, encontrando-se de seguida na Figura 3.3, esta também apresenta as respetivas zonas térmicas. É importante referir que as partições interiores não fazem parte da envolvente.

A caracterização dos espaços não úteis (ENU) é um pouco arbitrária, podendo levar a equívocos, no entanto para o caso de estudo não há problemas, uma vez que o *EnergyPlus* não considera espaços não úteis, todos os espaços são considerados como zonas térmicas.

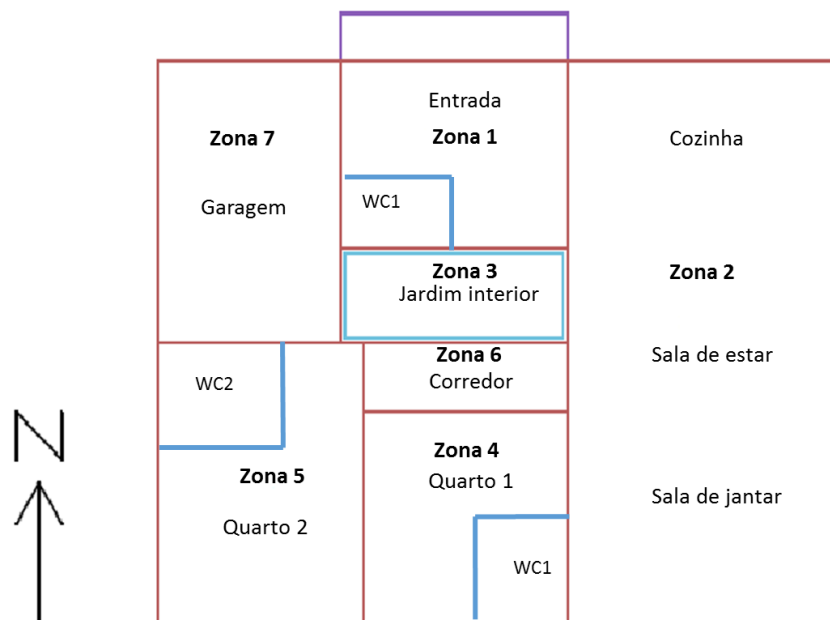


Figura 3.3. Traçado da envolvente da habitação.

3.1.1 Levantamento Dimensional

Depois de caracterizada a envolvente da habitação é também importante o seu dimensionamento, apresentado de seguida na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Dimensionamento do modelo habitação.

Zonas	Compartimento	Área (m ²)	Pé direito (m ²)	Volume (m ³)
1	All de entrada WC1	15	2,8	50
2	Cozinha Sala de Jantar Sala de Estar	60	2,8	168
3	Jardim Interior	10	2,8	28
4	Quarto 1 WC2	18,45	2,8	51,66
5	Quarto 2 WC3	27	2,8	75,6
6	Corredor	8,55	2,8	23,94
7	Garagem	24	2,8	67,2
		Total= 163 m ²		

3.2 Soluções Construtivas

3.2.1 Caracterização das soluções construtivas

O sistema construtivo utilizado corresponde a uma típica construção em Portugal. Seguem-se as Tabelas 3.2., 3.3., 3.4, 3.5, 3.6. e 3.7., as quais enumeram os materiais e as propriedades físicas de cada elemento construtivo.

Tabela 3.2. Características dos materiais das **paredes interiores** (adaptado de ITE50,2006).

Material	ϵ (m)	λ (W/m ⁰ C)	ρ (kg/m ³)	Cp(J/ kg ⁰ C)
Reboco tradicional	0,02	1,3	1900	1000
Pano de tijolo_150mm	0,15	0,38	840	835
Reboco tradicional	0,02	1,3	1900	1000
	Total = 0,19 m			

Tabela 3.3. Características dos materiais das **paredes exteriores** (adaptado de ITE50,2006).

Material	ϵ (m)	λ (W/m ⁰ C)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/ kg ⁰ C)
Reboco tradicional	0,02	1,3	1900	1000
Pano de tijolo_150 mm	0,15	0,38	840	835
Espaço de ar não ventilado_300mm	0,3			
Pano de tijolo_220 mm	0,22	0,42	755	835
Reboco tradicional	0,02	1,3	1900	1000
	Total= 0,71m			

Tabela 3.4. Características dos materiais dos **tetos** (adaptado de, ITE 50 2006).

Material	ϵ (m)	λ (W/m ⁰ C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/ kg ⁰ C)
Telha_10mm	0,01	0,6	1500	960
Argamassa de regularização_15mm	0,015	1,3	1800	780
Betão_200mm	0,2	0,4	1100	960
Espaço de ar não ventilado_300mm	0,3			
Placa de gesso cartonado_15mm	0,015	0,25	900	1090
	Total = 0,54			

Tabela 3.5. Características dos materiais do **pavimento** (adaptado de Pimenta, 2015).

Material	ϵ (m)	λ (W/m ⁰ C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/ kg ⁰ C)
Soalho de madeira_11mm	0,011	0,05	200	1500
Espaço de ar não ventilado_300mm	0,3			
Betão_200mm	0,2	0,4	1100	960
Argamassa de regularização_15mm	0,015	1,3	1800	780
Betão_300mm	0,3	0,4	110	960
	Total = 0,83			

Tabela 3.6. Características dos materiais das **portas** (adaptado de ITE 50,2006).

Material	ϵ (m)	λ (W/m ⁰ C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/ kg ⁰ C)
Pinho duro_25mm (interiores)	0,025	0,23	610	1255
Pinho duro_40mm (exteriores)	0,04	0,23	610	1255

Tabela 3.7. Características dos materiais dos **envidraçados** (adaptado de ITE 50, 2006)

Material	ϵ (m)	λ (W/m ⁰ C)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/ kg °C)
Janela de vidro duplo com abertura superior/inferior	0,03	2,40	2200	750
Janela de vidro duplo com abertura para os lados	0,03	1,40	2200	750

É importante realçar que existe sempre uma camada de ar com 13 mm de ϵ , entre duas camadas de vidro.

3.3. Cargas Internas da Habitação

Para o caso de estudo é necessário ter em consideração as cargas internas da habitação, uma vez que, existem vários equipamentos pertencentes à habitação, assim como os seus ocupantes, que irradiam energia sob a forma de calor e que necessitam de ser considerados nas simulações energéticas.

3.3.1. Ocupantes

O edifício será habitado por três pessoas, o que representa ganhos energéticos para a habitação, sendo que esses ganhos dependem dos horários de utilização da habitação e das suas atividades metabólicas. O calor gerado pelos habitantes é libertado através da superfície do corpo e pelas suas vias respiratórias. Para o caso de estudo, que tem como base o manual do programa *EnergyPlus 8.7* (Department of Energy, 2017) quando as atividades metabólicas dos ocupantes são do tipo relaxado (a dormir), que ocorre, de um modo geral, das 00:00 horas até às 07:00 horas, o valor dos níveis de atividade considerado na simulação é de 40 W/m². Para o caso das restantes atividades realizadas na habitação o valor estipulado foi de 125 W/m².

Os períodos normais da utilização ocorrem desde o dia 1 de janeiro até ao dia 31 de julho, retomando novamente a 15 de agosto até 19 de dezembro e por fim de 27 a 31 de dezembro. O período normal de ocupação é interrompido devido às férias de verão e de

Natal. O primeiro caso ocorre de 1 a 15 de Agosto e o segundo caso de 19 a 27 de Dezembro. Nestes períodos, os ocupantes encontram-se na habitação durante um intervalo de tempo superior ao do perfil normal de utilização. No anexo B, Tabela B1.1 é possível verificar as frações utilizadas para o caso da ocupação em cada mês.

3.3.2. Equipamentos eléctricos e eletrónicos

No que diz respeito aos ganhos térmicos que ocorrem por parte dos equipamentos eléctricos e eletrónicos, procede-se à introdução no programa de simulação os seus valores de potências, pelo que é necessário especificar o seu horário de funcionamento e os três tipos de dissipação de calor que podem ocorrer para a zona térmica onde estão inseridos: fração latente, a fração radiante e a fração perdida. Estas frações, são introduzidas pelo utilizador, já a fração convectiva é calculada pelo programa *EnergyPlus 8.7*, e corresponde à diferença entre a unidade e as frações indicadas (Department of Energy, 2017).

A parte da fração radiante é um número decimal compreendido entre 0,0 a 1,0 e utiliza-se para calcular a quantidade de calor radiante, que é emitida pelo equipamento eléctrico numa determinada zona (Department of Energy, 2017).

A fração perdida é igualmente um número decimal compreendido entre 0,0 e 1,0 e é utilizada para especificar a quantidade de calor que esta a ser «perdida» e que não afeta os balanços energéticos da zona. De uma forma simples, corresponde à energia que é libertada para o exterior de cada zona térmica considerada. Como tal, foi definido para os equipamentos das salas um valor de 0,8, uma vez que temos como exemplo um exaustor na cozinha, o que justifica este valor; para a zona dos quartos, quarto 1 e quarto 2, foi definido o valor de 0,5; por fim, na zona da garagem, também foi também definido um valor de 0,8, visto ter como equipamentos a máquina de lavar e secar roupa. Os únicos equipamentos que apresentam consumo em “Standby” são o frigorífico, o sistema de ligação à internet, tv-cabo e telefone, o despertador/rádio e a máquina de lavar.

Encontra-se no Anexo A, na Tabela A 1.1, os equipamentos eléctricos e eletrónicos que compõem a habitação e a sua respetiva potência, sendo que os valores das potências foram arbitrados. Também no Anexo B, na Tabela B.1.2, B1.3 e B1.4 é possível verificar as frações utilizadas.

3.3.3. Iluminação artificial

O programa permite especificar informações sobre os sistemas de iluminação artificial de cada zona, introduzindo a potência, o tempo de utilização e como o seu calor pode ser distribuído. Segundo o manual *EnergyPlus 8.7* (Department of Energy, 2017), o calor transmitido para o ar através da iluminação artificial pode ser dividido em cinco tipos de frações: a fração de retorno de ar, fração radiante, fração visível, fração substituível e fração convectiva. No caso da fração convectiva, esta é calculada automaticamente na simulação e corresponde à diferença entre a unidade e os valores das restantes frações. Quando a fração substituível toma o valor zero, significa que não existe controlo automático da luz natural na habitação (Henriques, 2015).

No Anexo A, encontra-se a Tabela A 1.2, com a informação detalhada acerca do tipo e da potência que caracterizam a iluminação artificial existente, assim como os seus horários de funcionamento. Também para este caso os valores das potência são arbitrados.

3.4. Ventilação natural

A ventilação dos edifícios é, cada vez mais, um aspeto a ter em conta no desempenho energético das habitações. Como tal, ao projetar uma habitação, é sempre necessário prever uma determinada taxa de ventilação.

A ventilação natural é conhecida por ser método eficiente para favorecer as necessidades de ventilação dos edifícios, uma vez que, não apresenta consumos de energia, ao contrário da ventilação mecânica. No que diz respeito à ventilação necessária para a qualidade do ar e prevenção das condensações, as taxas de renovação necessárias são normalmente atingidas por ventilação natural, exceto algumas situações, como é o exemplo das caves. No caso das necessidades para o conforto térmico, as taxas de ventilação necessárias podem ser mais difíceis de obter, mas se estiverem bem identificadas, é possível conhecer em quais a ventilação natural é suficiente (Silva, 2006). Posto isto, a ventilação natural pode ser uma solução bastante eficiente, mas apenas quando é acompanhada de um estudo adequado de todas as condicionantes, como o clima, dimensão e orientação das aberturas, forma do edifício, etc.

A simulação da ventilação natural na habitação é possível através de um fluxo de ar, que pode ser resultante das aberturas de cada uma das diferentes zonas, e que é

impulsionado pelo vento e pelas diferenças de temperaturas. Os fluxos de ar considerados foram através das frinchas dos envidraçados e portas, quando estas se encontram abertas ou fechadas e encontram-se na Tabela 3.8. Estes são introduzidos na janela de inserção denominada, "AirflowNetwork:MultiZone:Component:DetailedOpening".

De um modo geral, os fluxos de ar de um edifício dependem do tipo e da dimensão das fissuras por onde o ar circula, mas também do seu coeficiente de pressão (CP). O programa *EnergyPlus* 8.7 permite calcular o CP em função da direção e da intensidade do vento que atinge o edifício, no período de tempo considerado, para cada uma das fachadas verticais e para o telhado, no entanto, é necessário que o edifício tenha uma forma retangular (DOE, 2014), sendo o caso do modelo criado.

Tabela 3.8. Características do fluxo de ar (adaptado de Henriques, 2015).

	Envidraçados	Portas
Fator de abertura	0,5	1
Coefficiente de infiltração de fluxo de massa de ar (kg/s)	0,00022	0,00455
Expoente de fluxo de massa	0,66	0,66

3.5 Configuração do sistema solar de armazenamento sazonal de energia térmica

A energia solar térmica desempenha um papel importante, uma vez que, é capaz de produzir calor diretamente da irradiância solar. Devido à maior parte desse calor ser produzido fora do período em que é necessário, procedemos ao seu armazenamento. A energia solar térmica, é principalmente utilizada para aquecimento de água para uso doméstico, no entanto, existem outras aplicações. A climatização de espaços é uma das aplicações dos coletores solares térmicos, para produção de calor destinado a aquecimento. Os sistemas solares para aquecimento, requerem armazenamento de calor durante longos períodos, de modo a rentabilizar o aproveitamento do recurso solar existente no verão, para posterior aquecimento de espaços no inverno.

Muito resumidamente, para o caso de estudo, a energia solar é absorvida pelos coletores solares e é posteriormente transferida para o depósito de armazenamento durante o verão. Apenas na estação de aquecimento a energia solar é transferida do depósito para os sistemas de distribuição de calor, o piso radiante hidráulico.

Adicionalmente, o sistema possui uma fonte auxiliar de calor, que pode ser ativada quando a temperatura da água no depósito é insuficiente para manter a habitação com uma temperatura adequada. Para o caso de estudo optou-se por deixar sempre a resistência desligada, visto que, nem fazia sentido se assim não fosse, porque o objetivo deste estudo é testar ao máximo a capacidade do sistema de armazenamento térmico sazonal.

Nas subseções seguintes serão detalhados todos os constituintes do sistema. Também na Figura 3.4 é possível observar a habitação quando são realizadas as simulações com o sistema, e também permite verificar a localização dos coletores solares térmicos utilizados.

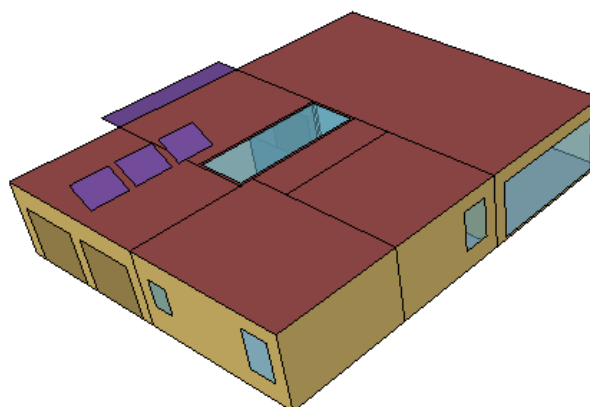


Figura 3.4 Imagem da habitação obtida a partir do *Google SketchUp 8*, quando inclui o sistema solar de armazenamento sazonal.

3.5.1. Fluido Térmico

O fluido utilizado para este sistema de armazenamento sazonal de energia térmica foi a água. A escolha deste fluido para realizar armazenamento através de calor sensível foi influenciada essencialmente pelo seu calor específico elevado, viscosidade reduzida e também o fato de este ser um recurso abundante e com baixo custo (Durão, 2013). Também o custo de os coletores solares térmicos para este fluido acabou por influenciar esta escolha. A utilização de outros fluidos, como por exemplo o óleo, permitiriam maiores

temperaturas, contudo, o seu preço mais elevado e a sua viscosidade representam algumas desvantagens comparativamente com a água.

3.5.2. Coletores solares térmicos

Para o caso de estudo, são utilizados coletores da marca Apricus, modelo AP-10, são coletores de tubos de vácuo do tipo heat-pipe. Estes possuem uma área de abertura de $1,342 \text{ m}^2$, o rendimento ótico tem o valor de 0,456, o coeficiente de perdas térmicas tem o valor de $-0,9656 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e o coeficiente de perda térmica quadrática o valor de $-0,00225 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$. O caudal de ensaio do fluido térmico é de $0.0000545 \text{ m}^3/\text{s}$ (Solar Rating & Certification Corporation 2016).

É importante referir que o *EnergyPlus* utiliza o modelo de eficiência de coletores segundo Normas ASHRAE, certificados pela *Solar Rating & Certification Corporation*, que são diferentes das normas europeias.

3.5.3. Reservatório

Por forma a promover a eficiência de armazenamento de energia térmica através do calor sensível é necessário promover a sua estratificação térmica. De acordo com (Cabeza, 2015), a geometria que mais favorece a estratificação térmica é a forma cilíndrica vertical, assente sobre uma das bases e com uma altura bem superior ao diâmetro da base. Este tipo de armazenamento também requer recipientes com elevadas temperaturas, o que implica obrigatoriamente isolamento térmico. Os sistemas mais comuns neste tipo de armazenamento utilizam água quente para armazenamento do calor, embora também existam sistemas que utilizam outros fluidos. O reservatório tem características sazonais, ou seja, elevado volume e consequentemente elevada resistência física por forma a suportar a massa da água.

Geometria do reservatório

A geometria do reservatório é um parâmetro que tem uma grande influência nas perdas térmicas para o exterior, pelo que consoante a sua geometria, varia a área de superfície que contacta com o exterior, e consequentemente a energia que se dissipa. As geometrias mais comuns para construção podem ser: esférica, cúbica e cilíndrica. (Durão,2013). A

escolha da geometria incidu sobre o depósito cúbico pois de todas as geometrias, é aquela que apresenta uma maior facilidade construtiva.

Volume e caudal

No caso dos sistemas de armazenamento sazonal, o seu volume aumenta significativamente, quando comparados aos sistemas para utilização doméstica, isto deve-se ao aumento do tempo de armazenamento. A circulação no interior do depósito vai variar ao longo do tempo, pois depende do caudal do circuito de climatização e do caudal dos coletores solares térmicos.

Isolamento térmico

O isolamento térmico é uma das características mais importantes num depósito de armazenamento de água quente, possibilitando assim reduzir substancialmente as perdas térmicas para o exterior. Existem diversos materiais para isolamento do reservatório e é importante que estes possuam certas características. Para o caso de estudo, considerou-se o reservatório construído em betão com uma espessura de 0,3 m, seguido de uma camada de poliuretano com 0,1 m, e por último uma superfície exterior em alvenaria de tijolo com 0,15 m de espessura (Durão, 2013). Na Figura 3.5, é possível observar a sua constituição.

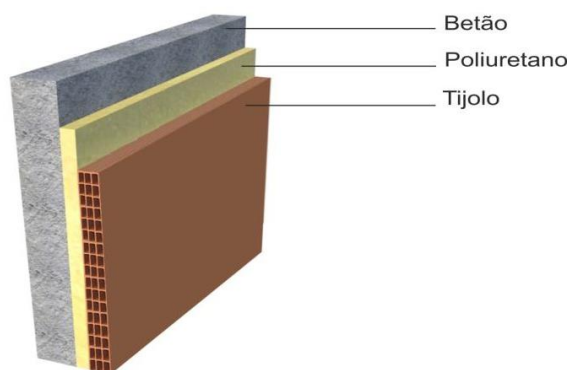


Figura 3.5 Constituição do reservatório em corte (adaptado de Durão, 2013)

Inicialmente, são calculadas as resistências térmicas dos materiais que constituem o reservatório, sendo determinadas a partir das Equação 3.1, 3.2 e 3.3, respetivamente.

$$R_{t\acute{e}rmica_bet\tilde{a}o} = \frac{L_{bet\tilde{a}o}}{k_{bet\tilde{a}o}} = \frac{0,3}{1,4} = 0,214 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (3.1)$$

$$R_{t\acute{e}rmica_poliuretano} = \frac{L_{poliuretano}}{k_{poliuretano}} = \frac{0,1}{0,029} = 3,449 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (3.1)$$

$$R_{t\acute{e}rmica_tijolo} = \frac{L_{tijolo}}{k_{tijolo}} = \frac{0,15}{0,7} = 0,214 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (3.3)$$

De seguida, é calculada a resistência total da parede, para a associação de resistências em série, Equação 3.4.

$$R_{parede_total} = \sum R_{t\acute{e}rmica_bet\tilde{a}o} + R_{t\acute{e}rmica_poliuretano} + R_{t\acute{e}rmica_tijolo} \quad (3.4)$$

$$R_{parede_total} = 3,877 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (3.4)$$

Por fim, é calculado o coeficiente global de transferência de calor do depósito obtido por unidade de área, Equação 3.5. No *EnergyPlus*, o valor é apresentado em W/K ,ou seja, o valor de U obtido é multiplicado pela área de superfície do depósito, para os diferentes volumes que serão utilizados. Este valor não inclui a resistência superficial interior (Rsi) nem a resistência superficial exterior (Rse).

$$U = \frac{1}{R_{parede_total}} = \frac{1}{3,877} = 0,214 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (3.5)$$

3.5.4. Sistema de distribuição de calor

Como já foi referido no capítulo 2, o sistema de distribuição utilizado no caso de estudo, trata-se do piso radiante hidráulico. Este apenas é instalado na cozinha, sala de jantar e sala de estar (correspondentes à zona 2), no quarto 1 e WC2 (correspondente à zona 4) e no quarto 2 e WC3 (correspondente à zona 5). Inicialmente são definidos os elementos construtivos, distância entre os tubos e em que camada é que se encontram os tubos. No *EnergyPlus*, a introdução dos materiais é feito no objeto *Construction: Internal Source*, sendo os materiais utilizados listados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9. Características dos materiais constituintes do **piso radiante** (adaptado de Gil, 2016).

Material	e (m)	λ (W/m ⁰ C)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/ kg ⁰ C)
Pinho Macio	0,015	0,15	470	1380
Argamassa_2	0,015	1,3	1800	1000
Cortiça	0,1	0,04	115	1800
Argamassa_1	0,09	1,3	1800	1000
Betão Armado	0,25	2,5	2450	840

É sobre a camada de cortiça, material utilizado como isolante, que serão colocados os tubos por onde circula a água. Depois de definidos todos materiais, é necessário definir o sistema de climatização radiante propriamente dito. No *EnergyPlus* existem dois objetos válidos para a modelação de sistemas radiantes hidráulicos de baixa temperatura. São eles o *ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:VariableFlow* (caudal variável) e o *ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:ConstantFlow* (caudal constante). Estes objetos diferem no tipo de caudal, temperatura da água e consequentemente e modo de controlo da temperatura interior.

3.5.5. Esquema do circuito do sistema

Na inserção dos circuitos de aquecimento no modelo da habitação, é necessário introduzir algumas variáveis e cumprir determinadas regras para que o circuito possa funcionar (Gil, 2017). Estes circuitos são divididos em dois subsistemas, o primário que é onde ocorre a produção de energia térmica e o secundário, onde ocorre o consumo da energia

térmica. O programa apenas permite criar circuitos fechados, o que para o caso de estudo significa que não há perdas de água. Para fazer as ligações nos circuitos é preciso saber algumas designações específicas, tais como:

Componentes

Correspondem ao conjunto de equipamentos utilizados no circuito, como por exemplo uma bomba hidráulica, um tanque de armazenamento ou um termostato.

Splitter

É um componente que permite fazer a ligação de um componente a vários componentes.

Mixer

É o inverso do *Splitter*, permite fazer a ligação de vários componentes para um só.

Branches

Conjunto de componentes que forma um ramo do circuito. Estes são uma informação básica necessária ao programa e definem a ordem dos componentes no modelo de simulação.

Nodes

São os pontos que fazem a ligação entre os componentes. A cada componente estão associados pelo menos dois nós, o nó de entrada e o nó de saída.

Loops

Correspondem a um conjunto de *Branches* que formam um circuito aberto com um ou mais equipamentos, e têm apenas uma entrada e uma saída. Por cada *Loop* só pode haver no máximo um *Splitter*, um *Mixer* e um *ByPass*.

O esquema do circuito do sistema e a respetiva legenda encontra-se apresentado, no Apêndice A, Figura A 2.1. Este fornece uma visão geral do modelo de configuração do circuito do sistema solar térmico com armazenamento sazonal, sendo possível identificar os principais componentes utilizados e os diversos elementos que a eles estão conectados.

Optou-se por apresentar apenas uma das configurações do esquema do circuito, constituído por dois coletores, uma vez que, nos outros circuitos apenas são acrescentados ou retirados coletores.

3.5.6. Outros constituintes

Para além dos constituintes referidos, neste circuito, também serão inseridas duas bombas hidráulicas e um termostato. A bomba entre os coletores solares e o tanque de armazenamento é de caudal constante, por sua vez a bomba entre o tanque de armazenamento e o piso radiante é de caudal variável. Quer o consumo de energia, quer o caudal das bombas são ajustados automaticamente pelo programa.

A bomba hidráulica é também auxiliada por um controlador que, quando a diferença de temperatura entre o tanque de armazenamento e os coletores solares for superior a 10°C, liga, e desliga quando a diferença de temperaturas for de 2°C.

Como sistema de apoio existe um depósito, que apresenta uma capacidade de 5.68l e é constituído por uma resistência elétrica de 2000W que liga quando os coletores solares não conseguem aquecer a água do depósito de armazenamento, no entanto, como já foi referido atrás, permanecerá sempre desligada.

Por último, mas não menos importante, existe uma válvula misturadora, que tem como função controlar a temperatura da água que vai para os pisos radiantes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Parâmetros de avaliação

Um sistema solar térmico com armazenamento sazonal inclui vários parâmetros capazes de influenciar o resultado final.

Para o caso de estudo iremos ter em conta sete situações possíveis utilizadas para o aquecimento da habitação, que irão obedecer a determinados critérios. Para todas elas o período de simulação é o mesmo: de 4 de abril a 3 de abril do ano seguinte.

Para a realização destas simulações foi gerado um ficheiro climático a partir de LNEG (2014), denominado por “Penacova 127m”.

As sete situações encontram-se detalhadas de seguida, Tabela 4.1, onde são especificados os volume do depósito de armazenamento e respetivas áreas dos coletores.

Tabela 4.1. Detalhes de cada situação.

Situação	Área coletor (m ²)	Volume depósito de armazenamento (m ³)
1	Sem sistema de aquecimento	
2	1,342 (1 coletor)	5,10,15,20,25
3	2,684 (2 coletores)	5,10,15,20,25
4	4,026 (3 coletores)	5,10,15,20,25
5	5,368 (4 coletores)	5,10,15,20,25
6	6,71 (5 coletores)	5,10,15,20,25
7	8,052 (6 coletores)	5,10,15,20,25

4.1.1. Necessidades de aquecimento

Para efetuar a análise deste parâmetro, apenas é utilizada a “Situação 1”, que não possui qualquer sistema de aquecimento. Considerado todo o período de simulação, foi possível obter os seguintes resultados apresentados na Figura 4.1.

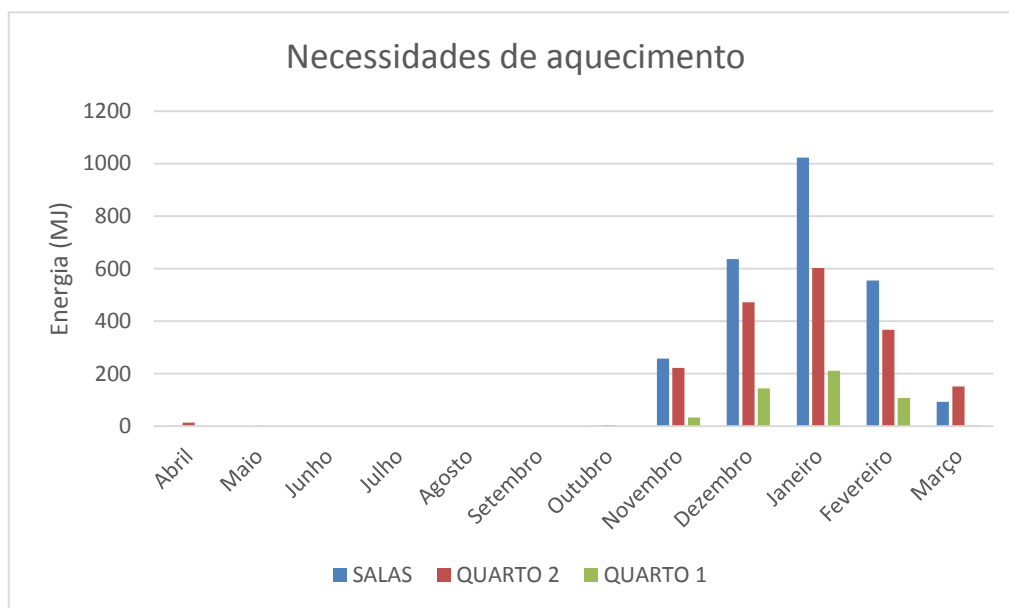


Figura 4.1. Necessidades de aquecimento da habitação.

Analisando os resultados do gráfico da Figura 4.1, é possível verificar qual a energia necessária para o aquecimento da habitação, em MJ. Considerando todo o período de simulação temos que, para o aquecimento das “Salas”, zona constituída pela cozinha, sala de estar e sala de jantar (zona 2) são necessários um total de 2565 MJ, para o aquecimento do “Quarto 2”, zona constituída pelo quarto 2 e WC3 (zona 5) são necessários 1834 MJ, por fim, para o aquecimento do “Quarto 1” zona constituída pelo quarto 1 e WC2 (zona 4) são necessários 500 MJ. Posto isto é possível verificar que a zona térmica que requer maiores necessidades de aquecimento é a Zona 2. No total são requeridos 4899 MJ.

4.1.2. Cargas internas da habitação

Ocupantes

A habitação é ocupada por três pessoas, que podem apresentar diferentes taxas metabólicas durante o dia e estar presentes ou não na habitação. Através do gráfico da Figura 4.2, pode-se observar que os ganhos térmicos relativos aos ocupantes se centram mais na zona das salas. Nos meses de agosto e dezembro ocorrem os máximos, uma vez que corresponde ao período em que os ocupantes passam mais tempo em casa.

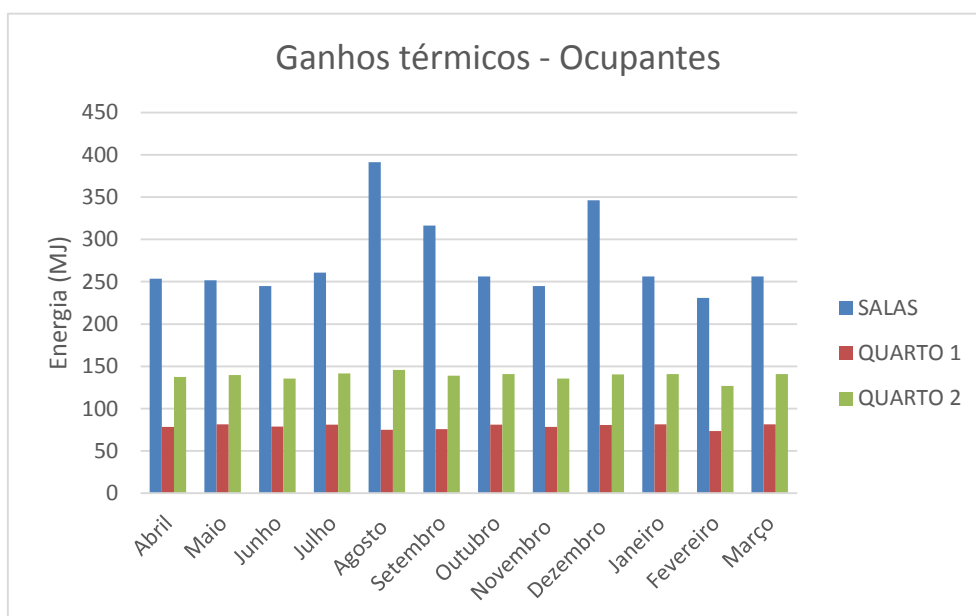


Figura 4.2. Ganhos térmicos relativos aos ocupantes.

Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

Quanto aos equipamentos elétricos e eletrônicos, estes apresentam um consumo bastante elevado, principalmente na zona das “Salas”, Figura 4.3. O mês de agosto é quando é registada a maior energia consumida, e ronda os 830 MJ.

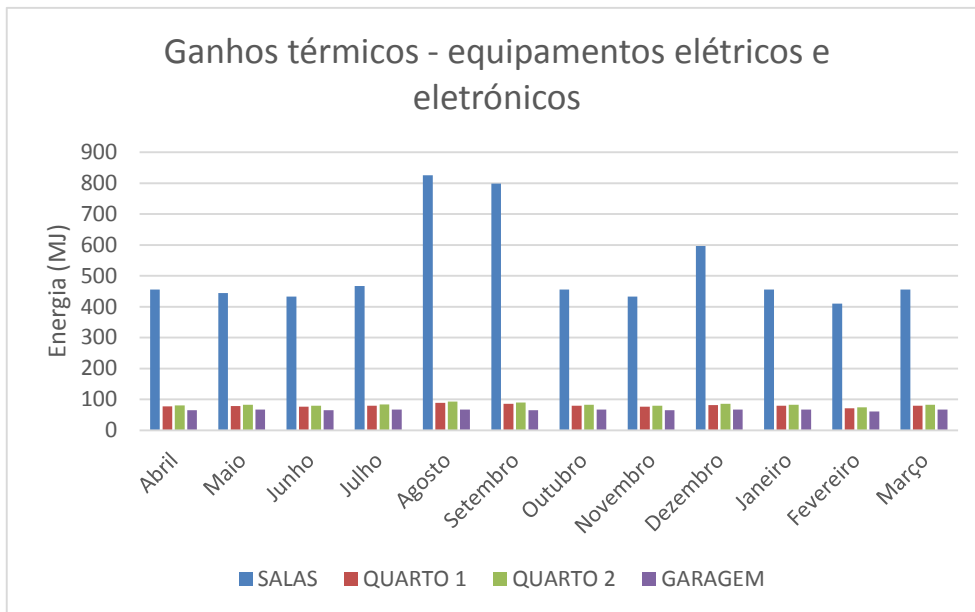


Figura 4.3. Ganhos térmicos relativos aos equipamentos elétricos e eletrônicos.

Iluminação Artificial

Verifica-se que a energia dissipada pela iluminação apresenta um valor bastante constante ao longo do período de simulação, Figura 4.4, sendo os máximos registados na zona das Salas.

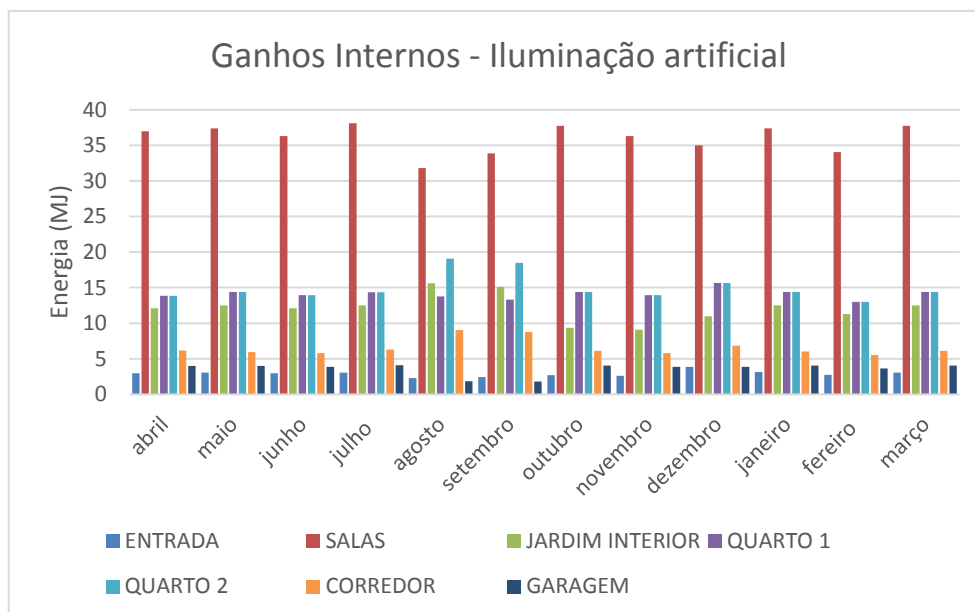


Figura 4.4. Ganhos térmicos relativos à iluminação artificial.

É importante referir que fazendo uma análise global à energia elétrica consumida pelos equipamentos elétricos e iluminação artificial que compõem a habitação, esta chega a atingir uma média de 405 kWh em dezembro. Assumindo que o preço da energia apresenta o valor de médio de 0,16 € por kWh, isso irá corresponder a cerca de 67 € de fatura elétrica. Agosto também apresenta em média valores próximos de 403 kWh. A explicação para estes resultados é simples, devendo-se ao fato dos ocupantes passaram mais tempo na habitação nestes meses, os restantes apresentam valores na ordem dos 390 kWh.

4.1.3. Temperatura do reservatório de armazenamento de água quente

Uma vez que a resistência de apoio está sempre desligada, a temperatura do reservatório é uma das variáveis mais cruciais, visto que, nos permite saber se o sistema solar térmico com armazenamento sazonal está a funcionar corretamente, ou seja, se a energia está a ser captada e se por outro lado se está a ser dissipada para o sistema de aquecimento, o piso radiante hidráulico. Nas Figura 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 é possível observar os gráficos de temperaturas dos reservatórios nas diferentes situações, obtidos para o período de simulação.

Para as simulações foi definido um limite máximo de temperatura para o depósito de 90°C. Também foi definido para a temperatura inicial o valor de 30°C.

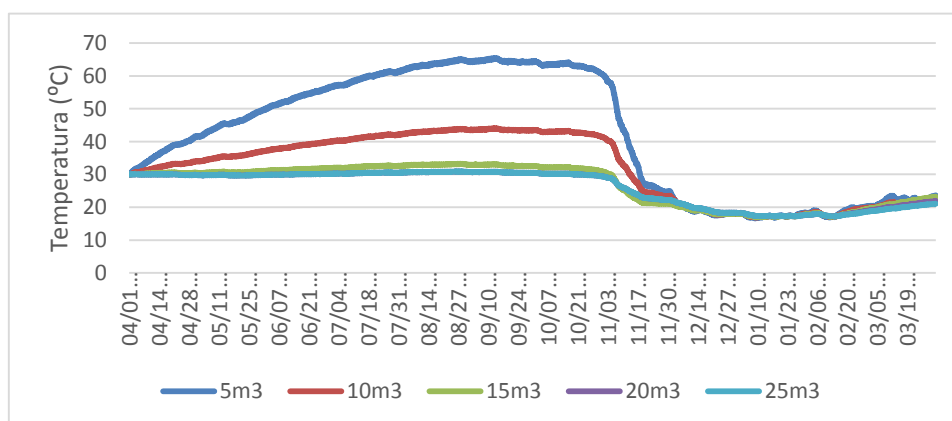


Figura 4.5. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 2.

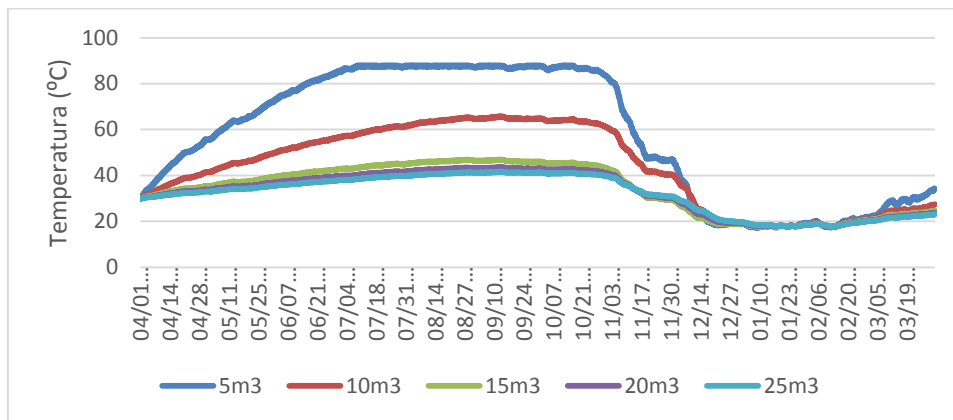


Figura 4.6. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 3.

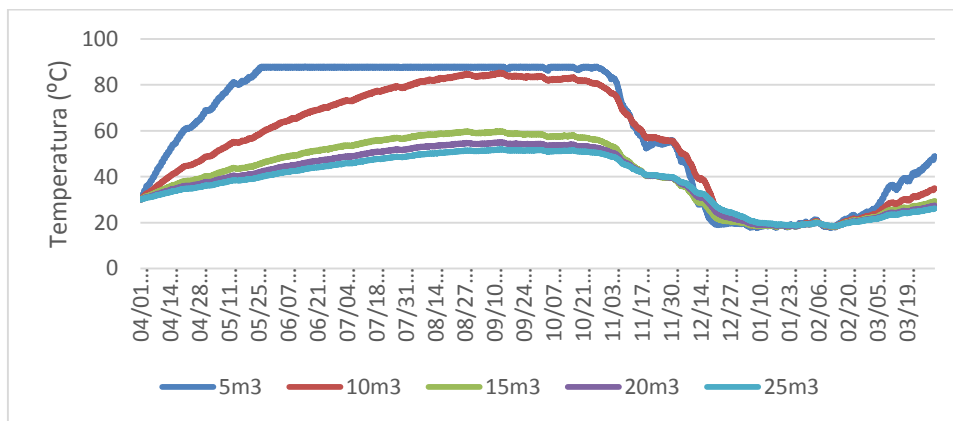


Figura 4.7. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 4.

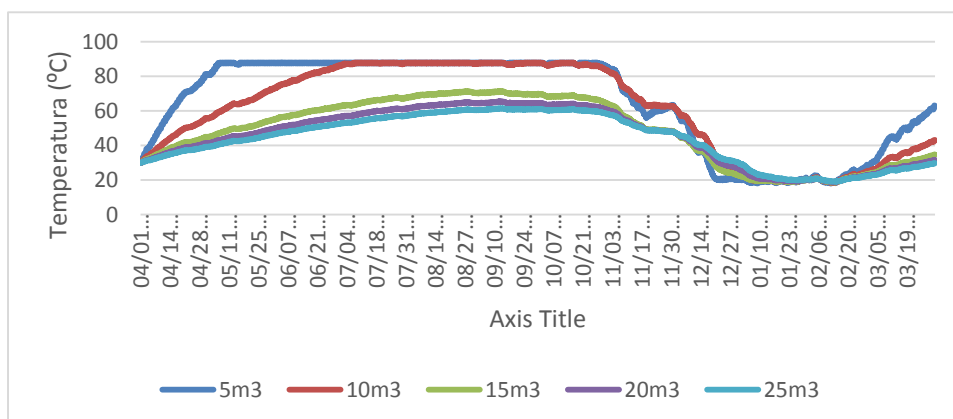


Figura 4.8. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 5.

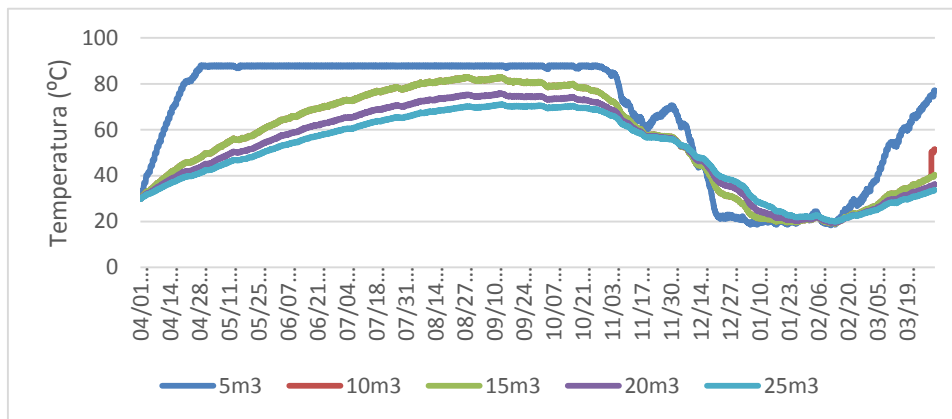


Figura 4.9. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 6.

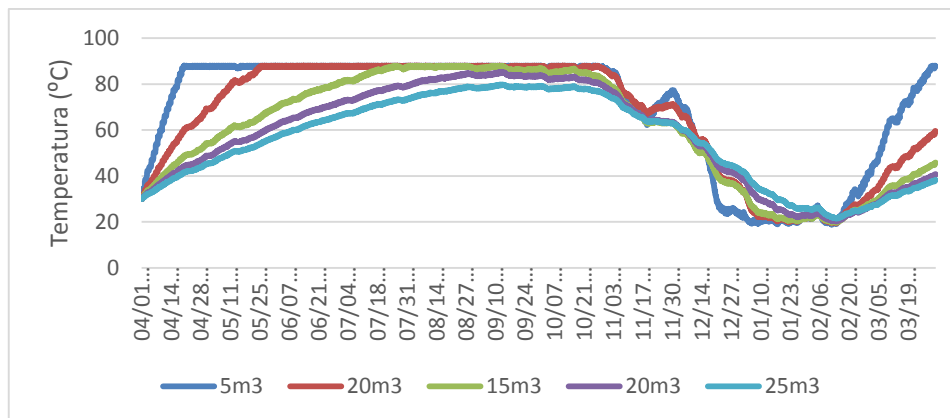


Figura 4.10. Temperatura do reservatório de armazenamento para a Situação 7.

Analisando os resultados relativamente ao gráfico da Figura 4.5, verifica-se que o aumento do volume de armazenamento resulta numa diminuição da temperatura de armazenamento. Apesar de se conseguirem maiores quantidades de calor, esse calor está a uma temperatura mais baixa e tem pouca qualidade, além disso o investimento para a construção de um reservatório com volume superior é maior e também ocupa o dobro do espaço. Sendo assim é possível concluir que o volume ótimo de armazenamento corresponde aos 5m³.

Para o caso da situação 3, Figura 4.6, não é tão perceptível, uma vez que, utilizando apenas 5m³, existe bastante desperdício de calor. Aumentando o volume de armazenamento leva a que a temperatura também não atinja valores elevados. Na subsecção seguinte, em que será apresentada o número de horas de desconforto, será mais fácil escolher qual o volume ótimo.

No caso da Figura 4.7, o resultado que aparenta ser o melhor é o de 10m³, no entanto, se considerarmos volumes superiores, a temperatura mantém-se mais alta quando o calor do reservatório começa a esgotar. Fica também ao critério da análise do número de horas em que o *setpoint* de temperatura não é cumprido, decidir qual o volume ótimo de armazenamento.

Para as Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, conclui-se que o volume ótimo de armazenamento é sem dúvida os 25 m³, apesar da temperatura de armazenamento ser inferior. Com volumes inferiores a temperatura é superior, mas há um maior desperdício de energia.

4.1.4. Setpoint da temperatura

No que diz respeito a este parâmetro é possível tirar conclusões quanto ao número de horas em que é cumprido o mínimo de temperatura estipulado no *schedule* de aquecimento. Para as situações 2, 3, 4, 5, 6 e 7 foi definido um valor mínimo de temperatura do ar para garantir o conforto térmico dos habitantes. Das 00:00h às 17:00h a temperatura tem de ser superior a 18°C e das 17:00h às 00:00h a temperatura tem de ser igual ou superior a 20°C. Este último período corresponde ao tempo em que os habitantes passam mais tempo na casa.

O período de análise corresponde ao período de aquecimento da habitação, o que correspondeu a 4200 horas. Ao analisar este parâmetro foi possível concluir que está a ser cumprido de um modo geral para todas as situações, exceto no mês de janeiro. Na Figura 4.14 é possível verificar o número de horas em que o *setpoint* de temperatura não é cumprido para cada situação, durante o período considerado.

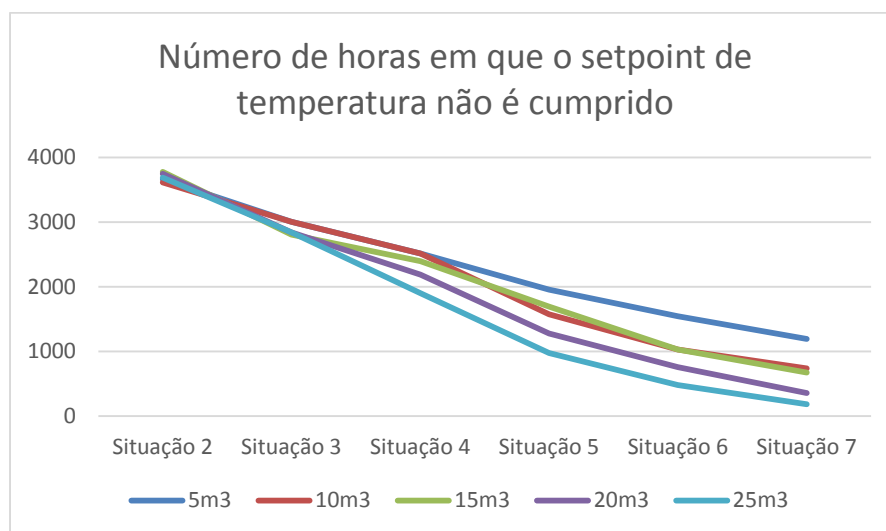


Figura 4.11. Número de horas em que o setpoint de temperatura não é cumprido.

Por forma a deixar claro qual o volume ótimo de armazenamento é apresentada a seguinte tabela, Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Volume ótimo de armazenamento para cada situação.

Situação	5m³	10m³	15m³	20m³	25m³
2	3661	3612	3776	3745	3687
3	3004	3004	2805	2839	2839
4	2513	2513	2395	2188	1899
5	1953	1572	1692	1276	975
6	1543	1029	1029	759	479
7	1194	739	673	355	183

Nas subseções seguintes apenas serão considerados os volumes ótimos para cada situação.

4.1.5. Perdas térmicas no reservatório

A Figura 4.12 permite verificar as perdas térmicas ocorridas no reservatório para cada situação. Realizando uma rápida análise é possível concluir que a que apresenta as

maiores perdas térmicas é a Situação 7, como era de esperar, uma vez que as perdas são proporcionais à diferença de temperatura e à área de superfície do reservatório (equação de condução de calor). A situação 2 é a que apresenta as menores perdas térmicas através do reservatório, uma vez que, é a que apresenta a menor área de superfície. As situações 4, 5 e 6 têm o mesmo volume, mas atingem temperaturas diferentes, daí as perdas serem diferentes.

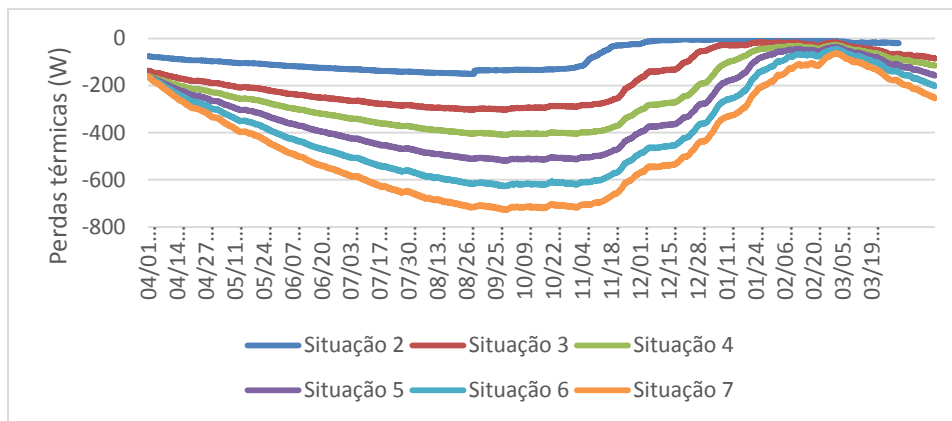


Figura 4.12. Perdas térmicas do reservatório de armazenamento para cada situação.

4.1.6. Temperatura Média do Ar vs Temperatura ar exterior

Para a análise deste parâmetro, foram considerados apenas os valores médios de temperatura horária numa semana do mês de janeiro, pois se tivesse sido considerada uma grande quantidade de valores, tornaria os gráficos imperceptíveis e complicados de analisar. Além disso, este parâmetro permite verificar se o sistema está a funcionar de forma correta, ou seja, se funciona para a semana mais fria, também funciona para o restante período de aquecimento. Como tal, foram consideradas as áreas em que é necessário o aquecimento, que compreendem a Zona 2 (salas de estar, jantar e cozinha), Zona 4 (quarto 1 e WC2) e a Zona 5 (quarto 2 e WC3).

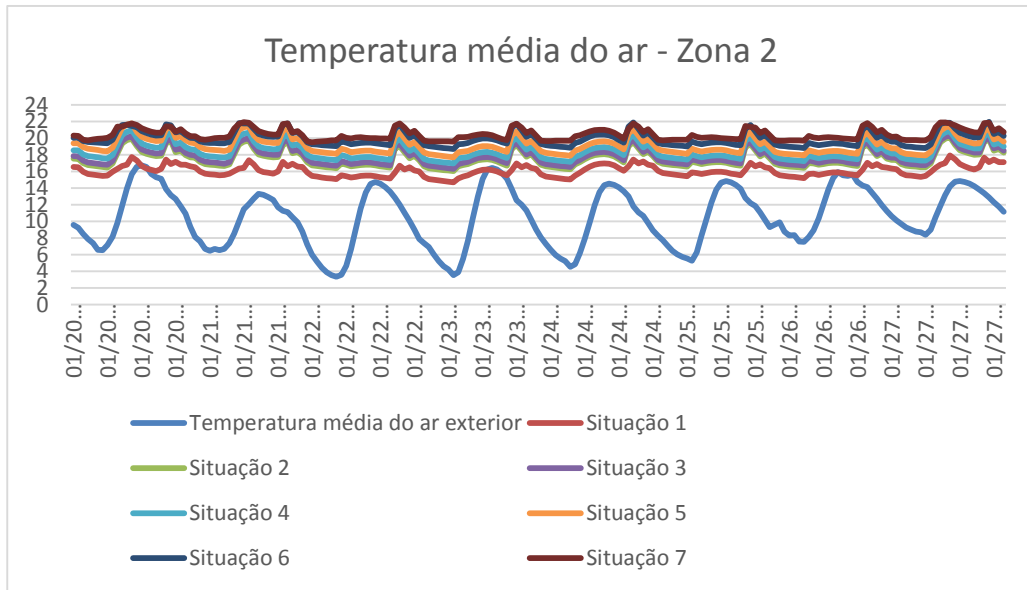


Figura 4.13 Temperatura média do ar na Zona 2.

Ao analisar o gráfico da Figura 4.13, percebe-se nesta zona térmica, até mesmo a situação sem aquecimento ambiente, situação 1, apresenta temperaturas superiores à temperatura média do ar exterior, devendo-se isso aos ganhos internos que se verificam neste compartimento. Para o caso das «Salas», apenas a Situação 7 e 6 cumprem o setpoint de temperatura definido.

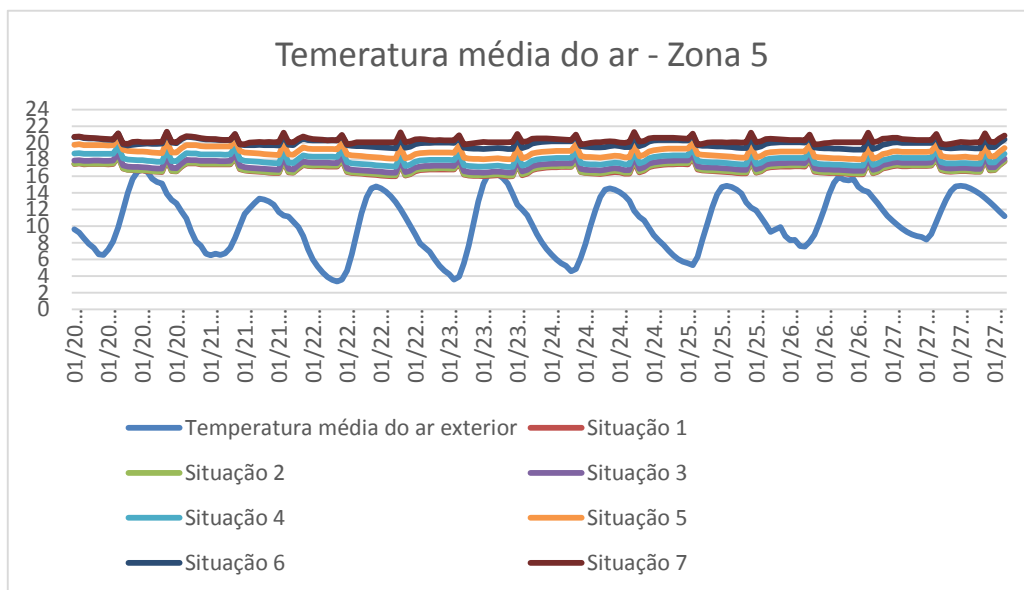


Figura 4.14 Temperatura média do ar na Zona 5.

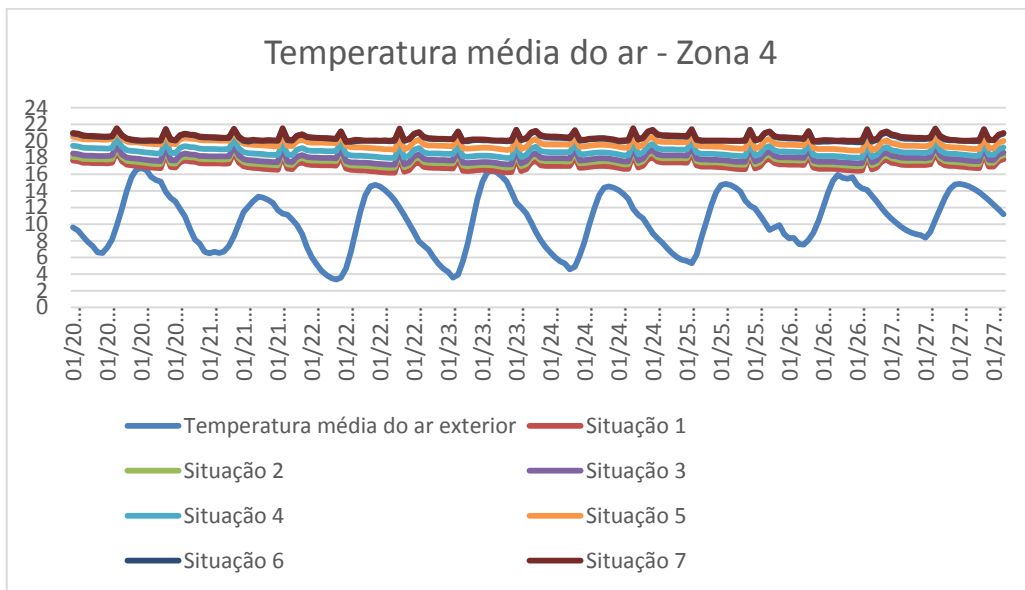


Figura 4.15 Temperatura média do ar na Zona 4.

Analisando os gráficos das Figuras 4.14 e 4.15, é possível concluir que de um modo geral são as duas bastante semelhantes. A partir das situações 6 e 7 são obtidas as temperaturas mais elevadas nestas zonas térmicas, permitindo assim o aquecimento quase total destas.

4.1.7. Energia Armazenada

Por forma a calcular a energia armazenada para cada situação e respetivo volume utilizou-se a Equação 4.1.

$$Q = m_{\text{água}} \times cp_{\text{água}} \times \Delta T \quad (4.1)$$

O ΔT corresponde à diferença entre a temperatura final de armazenamento e a temperatura útil, em que a temperatura útil corresponde a 20°C. Posto isto, obteve-se os resultados apresentados na Figura 4.16.

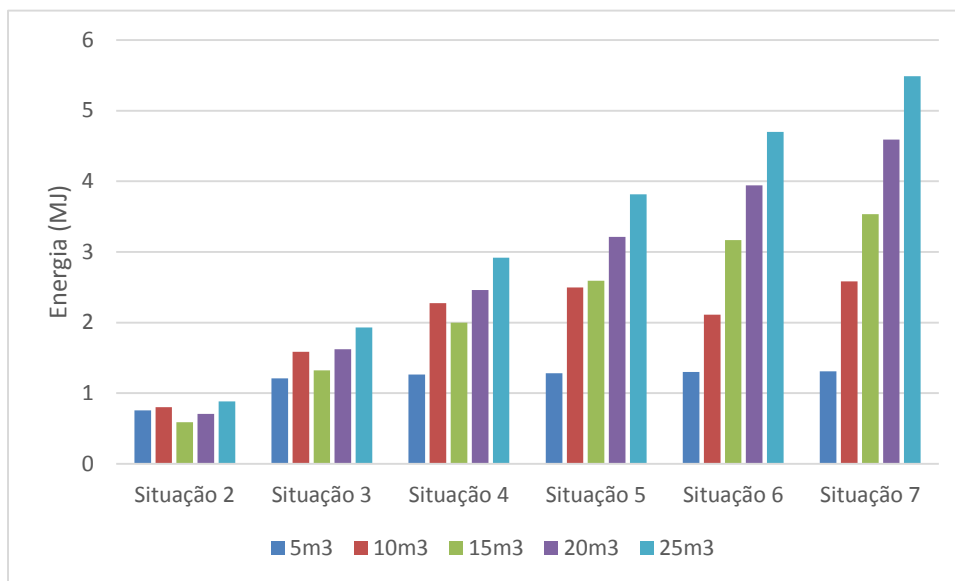


Figura 4.16. Energia armazenada para cada área de coletores e volumes.

Ao analisar a Figura 4.16 conclui-se que a energia armazenada aumenta com o aumento do volume, como era de esperar. É a partir da situação 7 que é armazenada uma maior quantidade de energia, pelo que são armazenados cerca de 5,5 MJ com o volume de 25 m³. Uma vez que no total são requeridos 4899 MJ para o aquecimento da habitação, quer dizer que há mais energia armazenada do que a necessária (em termos teóricos), obviamente que há perdas térmicas no reservatório, mas também há dias de sol em pleno inverno que permitem captar calor adicional.

4.2. Consumos energéticos e custos

Em todas as simulações, para o aquecimento ambiente da habitação é utilizada a energia solar, tendo como base o sistema solar térmico de armazenamento sazonal, que ao aquecer a água do depósito, utiliza esse calor, permitindo assim a climatização da habitação.

Os consumos de energia térmica nas diferentes partes do circuito de aquecimento do ar ambiente, passam pela energia térmica produzida pelos coletores, a energia térmica que é dissipada pelos pisos radiantes e a energia que entra e sai do depósito, esses valores apresentam-se na Tabela 4.1. Os resultados apresentados para cada situação, têm apenas em conta o volume ótimo encontrado em cada uma.

É importante referir que não foram consideradas perdas nas tubagens, sendo que as únicas perdas registam-se a nível do depósito e na fase de consumo.

. A energia total incidente no plano horizontal foi calculada diretamente através do ficheiro meteorológico denominado “Penacova 127m”. O valor obtido durante um ano corresponde a 6114 MJ/m².

Ao calcular a energia incidente nos coletores para as diferentes configurações, utilizando o programa de simulação, obtemos o valor de 6944 MJ/m².

Tabela 4.3. Consumos energéticos obtidos para cada situação.

	Situação 2	Situação 3	Situação 4	Situação 5	Situação 6	Situação 7
Energia incidente nos coletores (MJ)	6944	13888	20832	27776	34720	41664
Energia térmica produzida pelos coletores solares (MJ)	3940	8020	11850	15280	18750	21840
Energia que entra no reservatório (MJ)	3940	8020	11850	15280	18750	21840
Energia que sai do reservatório (MJ)	1800	2800	4400	5400	6300	6900
Perdas térmicas no reservatório (MJ)	2300	5600	7900	10000	12000	14000
Energia térmica dissipada pelo piso radiante (MJ)	1800	2800	4400	5400	6300	6900

Posto isto, conseguimos calcular a eficiência de armazenamento e a eficiência do sistema, Tabela 4.2. A primeira eficiência é calculada através do quociente entre a energia que sai do reservatório, pela energia que entra no reservatório. A segunda é calculada pelo

quociente da energia térmica transferida para o piso radiante, pela radiação total incidente no coletor

Tabela 4.4. Eficiências do sistema para cada situação.

	Situação 2	Situação 3	Situação 4	Situação 5	Situação 6	Situação 7
Eficiência do armazenamento (%)	45	34	37	35	34	32
Eficiência do sistema (%)	26	20	21	19	18	17

Por forma a determinar o custo aproximado de investimento e manutenção do sistema solar considerado em cada caso, foram discriminadas todas as parcelas dos custos considerados significativos, tentando-se assim obter um valor aproximado da realidade.

O valor do custo de manutenção corresponde a 0,5% sobre o investimento solar inicial (Durão, 2013).

Sendo que se considerou a resistência elétrica sempre desligada e os gastos em energia para o funcionamento das bombas foram desprezados, pode-se concluir que o custo de funcionamento é baixo, apesar do sistema de controlo consumir energia elétrica.

Um sistema solar térmico em Portugal que utilize coletores de tubos de vácuo tem um custo de cerca de 2100 €/coletor (Baxi, 2017). Note-se que os coletores solares aqui discriminados não correspondem aos utilizados nas simulações, uma vez que esses não se encontram à venda em Portugal.

O custo do depósito armazenamento de água quente tem em consideração as características e os materiais de isolamento utilizados que se encontram referidos na subsecção 3.5.3, sendo arbitrado um valor de 500 €/m³. Os valores encontram-se apresentados de seguida na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Custo aproximado para a instalação do sistema nas diferentes situações.

	Situação 2	Situação 3	Situação 4	Situação 5	Situação 6	Situação 7
Sistema solar térmico (€)	2100	4200	6300	8400	10500	12600
Custo do tanque de armazenamento (€)	2500	7500	12500	12500	12500	12500
Custo manutenção (€/ano)	23	58,5	94	104,5	115	125,5
Custo investimento (€)	4623	11758,5	18894	21004,5	23115	25225,5

Por forma a garantir o aquecimento total da habitação, considerou-se a utilização de um aquecedor elétrico (situação mais desfavorável), durante o período em que o sistema não é capaz de climatizar a casa. Os aquecedores elétricos podem ser comprados em qualquer superfície comercial, sendo que o seu preço base ronda os 40 € (Worten, 2017). Sabendo que são necessários 4899 MJ (1361 kWh) para o aquecimento da habitação e sabendo a energia que vai para o piso radiante, podemos assim determinar a energia requerida pelo aquecedor elétrico.

Para o caso da situação 2, o aquecedor elétrico tem um consumo total de 3099 MJ (861 kWh) de energia elétrica; já para o caso da situação 7, o aquecedor tem um consumo total 2001 MJ (555 kWh). Em termos de custos, se por exemplo a casa tiver uma potência contratada a EDP de 3.45kVA e uma tarifa simples vai pagar 0.1652 €/kWh, ou seja os ocupantes da casa vão ter de despende cerca de 142€/ano pela energia consumida pelos aquecedores elétricos, para a situação 2; no caso da situação 7 gastaria 92 €/ano. Ao considerar o período de retorno, por exemplo, se quisesse implementar a situação 5 com um custo superior a 20000€, seriam necessários 15 anos para fazer face ao investimento

utilizando os aquecedores elétricos. Se em vez da situação 5 quisesse instalar a situação 7 esse período era superior a 18 anos.

5. CONCLUSÕES

5.1. Considerações finais

Neste trabalho foram analisadas seis configurações possíveis para aquecimento ambiente de uma habitação, recorrendo para a isso a sistemas solares térmicos com armazenamento sazonal. O que distingue estas seis configurações é a área de coletores e o volume do depósito de armazenamento.

Inicialmente, é analisada a Situação 1, que não apresenta qualquer sistema de aquecimento, serve apenas de comparação às restantes situações e para determinar as necessidades de aquecimento da habitação.

O principal objetivo deste trabalho era encontrar para cada situação o volume ótimo de armazenamento, com vista no aquecimento da habitação. Sendo assim, através da análise das temperaturas do depósito de armazenamento e do número de horas em que o *setpoint* de temperatura não é cumprido, foi assim possível encontrar esse volume. No caso da situação 2 o volume ótimo foi de 5m³, para situação 3 de 15 m³, e para as restantes situações (4,5,6 e 7) um volume de 25 m³.

No que diz respeito às temperaturas médias do ar interior, estas foram analisadas apenas para a semana mais fria, no mês de janeiro, para verificar deste modo que os sistemas estão a funcionar de forma correta. Conclui-se que é a partir das situações 7 e 6 que são obtidas as temperaturas mais elevadas nas zonas térmicas que carecem de aquecimento (zona 2, 4 e 5), estas situações permitem o aquecimento quase total da habitação. É também possível verificar que mesmo sem o sistema de aquecimento, se obtêm temperaturas superiores à do ar exterior, sendo que isto se deve sobretudo aos ganhos internos que ocorrem na habitação.

Realizada a análise dos resultados para as configurações definidas, verifica-se que apesar destes sistemas não conseguirem atingir a climatização total do modelo da habitação, aquela que apresenta os melhores resultados é o sistema solar térmico constituído

por uma área de 8,052 m² (6 coletores) e com um volume de armazenamento de 25m³, situação 7.

Em termos económicos, verificou-se que estes sistemas apresentam um grande investimento inicial. Apesar disso, considerando que o seu custo de funcionamento e o custo manutenção são reduzidos, este investimento poderá tornar-se bastante atrativo, quando considerado um longo tempo de vida de utilização, ao contrário dos aquecedores elétricos, que apresentam um valor baixo de compra mas um valor elevado de utilização.

5.2. Sugestões de trabalho futuro

Por fim, gostaria ainda de deixar sugestões de trabalho futuro. Seria interessante comparar o sistema solar térmico com armazenamento sazonal com outros sistemas de aquecimento mais tradicionais, como a bomba de calor, caldeira a gás, etc.

Também seria interessante aprofundar o estudo sobre os materiais constituintes do depósito, tentando minimizar as perdas através deste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHARAE, A.H H., 2000. "Systems and equipment." American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- ADENE, acessado a março de 2017, no web site da Agência para a Energia: <http://www.adene.pt/>
- Baixi.pt, acessado em junho de 2017. <http://www.baxi.pt>
- Decreto Lei nº 28/2016, acessado a abril de 2017 no web site da Agência para a Energia: <https://dre.pt/application/conteudo/74774858>
- Department of Energy. *Energy.Gov.* 2015. <http://energy.gov/energysaver/radiant-heating>, (acessado em março de 2017)
- Department of Energy. (2017) "*Input Output Reference- the encyclopedic reference to EnergyPlus Input and Output.*" Department of Energy-United States: University of Illinois and the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory,
- Durão, Bruno Filipe Sousa. (2013) "Análise dinâmica de sistemas de armazenamento sazonal de energia térmica para condicionamento ambiental de estufas" Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Cabeza, L. F. 2015. "Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications". Woodhead Publications Series in Energy, Elsevier.
- Cabral, Cláudia Valéria Tavora. (2001) "Energia Fotovoltaica" Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa.
- Cabral, Joaquim Gonçalo Lobo da Costa Ferreira. (2015) "Estudo de acumulação sazonal de calor para incremento do aproveitamento de energia solar térmica em sistemas domésticos", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- Cerveira, Manuel. (2012) "Sistemas Térmicos de Energia Solar" Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Engenharia de Coimbra.
- Costa, Susana Pereira Lemos. (2014) "Armazenamento de Energia Térmica através de Materiais de Mudança de Fase" Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Craven, C. (2013) "Thermal Storage Technology Assessment".
- Cruikshank CA. 2009. "Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications" Queen's University, Canadá.

- Department of Energy. 2017 “Input Output Reference- the encyclopedic reference to EnergyPlus Input and Output.” Department of Energy-United States: University of Illinois and the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Dincer, I. e Rosen, M.A .2011. “Thermal Energy Storage Systems and Applications.” 2nd edition. Chichester, Reino Unido.
- DGEG, 2016 “Energia em Portugal”, acessado em março de 2017, no web site da Direção Geral de Energia e Geologia: <http://www.dgeg.pt/>
- EN 12975 - 1: (2006) Thermal solar systems and components – Solar collectors – Part 1: General Requirements
- Gil, Michael Oliveira. (2016) “Estudo de Aplicação de um Sistema Solar Térmico para Climatização de um Edifício Antigo” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- Google SketchUp. *Google SketchUp* 8, acessado em março de 2017, no web site: <http://www.google-sketchup.br.uptodown-com/window>
- Golovca, Dorin Anatólie. (2016) “Armazenamento Sazonal de Energia Solar Térmica de Baixa Temperatura para Climatização de Edifícios” Dissertação de Mestrado, Escola de Ciências e Tecnologias da Universidade de Évora.
- Hadorn J-C. (2008) “Advanced storage concepts for active solar energy”—IEA SHC Task32 2003–2007. In: Eurosun—1st international conference on solar heating, cooling and buildings.
- Henriques, Sara Patrícia Marques. (2015) “Soluções de Elevada Eficiência Energética na Reabilitação de um Edifício de Habitação.” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- ITE50 2006, “Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos de Envolvente dos Edifícios”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. ISBN:972-49-2065-8.
- LNEG 2014, “Anos Meteorológicos de Referência para simulação dinâmica”, versão 1.04.
- LusoSol.pt.. <http://www.lusosol.com/colectores.htm> (acessado em abril de 2017).
- Mascaranhas, Joana Filipa Colaço. (2015) “ Comparação Energética de Sistemas de Aquecimento a Energia Solar para o Conforto Térmico dos Ocupantes de um Edifício Residencial” Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve.
- Olesen, B. W (2002) “Radiant floor heating in theory and practice”, ASHARE, Journal , vol 44(7): 19-26.
- Pavlov, G. K. e Olesen, B. W. (2011) "Seasonal Ground Solar Thermal Energy Storage- Review of Systems and Applications". Comunicação apresentada em ISES Solar World Congress 2011.
- Pimenta, Francisco José Lourenço. (2015) “Modelação de Sistemas Radiantes em EnergyPlus”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

- Pilkington Solar International GmbH. (2000) “Survey of thermal storage for parabolic trough power plants.” Report prepared for National Renewable Energy Laboratory.
- Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-morrison, I., & Wills, A. (2011) “ A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), 3341–3359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.013>.
- Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. (RCCTE,2006).
- Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH, 2013).
- Roriz, L., http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/Solar_Term.pdf. (acedido em abril de 2017).
- Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C. e Buddhi, D. (2009) "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications." *Renewable and Sustainable energy reviews* no. 13 (2):318-345.
- Silva, Pedro Correia Pereira da. (2006) “Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE” Dissertação de Mestrado, Minho.
- Socaciu, L.G. (2011) “Seasonal Sensible Thermal Energy Storage Solutions”. *Leonard Electronic Journal of Practices &Technologies*”.
- Solar Rating & Certification Corporation. *secure.solar-rating..* <https://secure.solar-rating.org/Certification/Ratings/RatingsReport.aspx?device=100&units=METRICS>
- Sousa, J., & Silva, S. (2012). Enquadramento Energético do Sector Residencial Português, 2009 (DGGE 2011),49-56.
- Manual Steca Control, https://shop.solardirect.com/pdf/water-heaters/solar-hot-water/active-solar/controls-sensors/steca_control_manual.pdf (acedido em março de 2017).
- Warmup, <http://www.warmup.pt/produtos/piso-radiante-hidraulico/> (acedido em abril de 2017).
- Worten, <http://www.worten.pt/> (acedido em junho de 2017).

ANEXO A

Este anexo contempla as tabelas relativas aos equipamentos elétricos e eletrônicos existentes em cada zona térmica e a sua respectiva potência.

Tabela A 1.1. Equipamentos elétricos e eletrônicos e respectivas potências.

Zona	Compartimento	Equipamentos	Potência (W)	Total (W)
2	Cozinha	Máquina de lavar a loiça	1500	9480
		Máquina de café	600	
		Forno elétrico	1500	
		Placa elétrica	1500	
		Torradeira	800	
		Micro-ondas	900	
		Frigorífico	30	
		Aspirador	1500	
		Ferro de engomar	1000	
		Exaustor	150	
2	Sala de Estar	Sistema de ligação Internet, tv-cabo, telefone	90	245
		Impressora	45	
		Televisão	90	
		Computador	20	
4	Quarto 1	Despertador	10	127
		Televisão	90	
		Computador	27	
4	WC 2	Secador de cabelo	2000	2000
5	Quarto 2	Despertador	10	127
		Televisão	90	
		Computador	27	
5	WC 3	Secador de cabelo	2000	2000
7	Garagem	Máquina de lavar roupa	2300	3000
		Máquina de secar roupa	700	

Tabela A 1.2. Número de lâmpadas existentes em cada zona e sua respectiva potência.

	Compartimento	Iluminação	Potência (W)	Total (W)
1	Hall de entrada	1 lâmpada economizadora	14	23
	Casa de banho	1 lâmpada economizadora	9	
2	Cozinha	2 lâmpadas economizadoras	18	18
2	Sala de Jantar	2 lâmpadas economizadoras	18	18
2	Sala de Estar	2 lâmpadas economizadoras	18	39
		1 lâmpada economizadora	14	
		2 Candeeiros	7	
3	Jardim Interior	2 lâmpadas economizadoras	28	28
4	Quarto 1	2 lâmpadas economizadoras	18	32
		1 lâmpada economizadora	14	
4	WC 2	1 lâmpada economizadora	18	32
		1 lâmpada economizadora	14	
5	Quarto 2	2 lâmpadas economizadoras	18	32
		1 lâmpada economizadora	14	
5	WC 3	1 lâmpada economizadora	18	32
		1 lâmpada economizadora	14	
7	Corredor	2 lâmpadas economizadoras	18	18
6	Garagem	4 lâmpadas economizadoras	36	36

ANEXO B

Este anexo contém as tabelas com as taxas de ocupação dos ocupantes e as taxas de utilização dos equipamentos elétricos e iluminação artificial para o modelo da habitação em cada mês.

Tabela B 1.1. Frações de ocupação do modelo de habitação para cada mês.

	Ocupação Salas (Zona 2)	Ocupação Quarto 1 (Zona 4)	Ocupação Quarto 2 (Zona 5)
Janeiro	0,25	0,13	0,22
Fevereiro	0,25	0,13	0,22
Março	0,24	0,13	0,22
Abril	0,25	0,13	0,22
Maio	0,24	0,13	0,22
Junho	0,24	0,13	0,22
Julho	0,25	0,13	0,22
Agosto	0,38	0,12	0,23
Setembro	0,32	0,12	0,22
Outubro	0,25	0,13	0,22
Novembro	0,24	0,13	0,22
Dezembro	0,33	0,13	0,22

Tabela B 1.2. Frações da utilização dos equipamentos elétricos e eletrônicos no modelo da habitação para cada mês.

	Equipamentos Quarto 1 (Zona 4)	Equipamentos Quarto 2 (Zona 5)	Equipamentos Garagem (Zona 6)	Equipamentos Salas (Zona 2)
Janeiro	0,028	0,029	0,012	0,026
Fevereiro	0,042	0,028	0,029	0,026
Março	0,041	0,028	0,029	0,025
Abril	0,043	0,028	0,029	0,026
Mai	0,041	0,028	0,029	0,025
Junho	0,043	0,028	0,029	0,026
Julho	0,043	0,028	0,029	0,026
Agosto	0,415	0,031	0,032	0,025
Setembro	0,415	0,031	0,032	0,026
Outubro	0,042	0,028	0,029	0,026
Novembro	0,041	0,028	0,029	0,026
Dezembro	0,040	0,029	0,030	0,027

Tabela B 1.3. Frações da iluminação artificial utilizada no modelo da habitação para cada mês.

	Iluminação Entrada (Zona 1)	Iluminação Salas (Zona 2)	Iluminação Quarto 1 (Zona 4)	Iluminação Quarto 2 (Zona 5)	Iluminação Corredor (Zona 7)	Iluminação Garagem (Zona 6)
Janeiro	0,05	0,19	0,17	0,10	0,10	0,13
Fevereiro	0,05	0,19	0,17	0,10	0,10	0,13
Março	0,05	0,19	0,17	0,10	0,10	0,12
Abril	0,05	0,19	0,17	0,10	0,10	0,13
Mai	0,05	0,19	0,17	0,10	0,10	0,12
Junho	0,05	0,19	0,17	0,10	0,10	0,13
Julho	0,05	0,19	0,17	0,10	0,10	0,13
Agosto	0,04	0,16	0,15	0,09	0,13	0,19
Setembro	0,04	0,17	0,15	0,09	0,13	0,19
Outubro	0,04	0,19	0,13	0,10	0,10	0,13
Novembro	0,04	0,19	0,13	0,10	0,10	0,12
Dezembro	0,06	0,19	0,21	0,11	0,11	0,14

APÊNDICE A

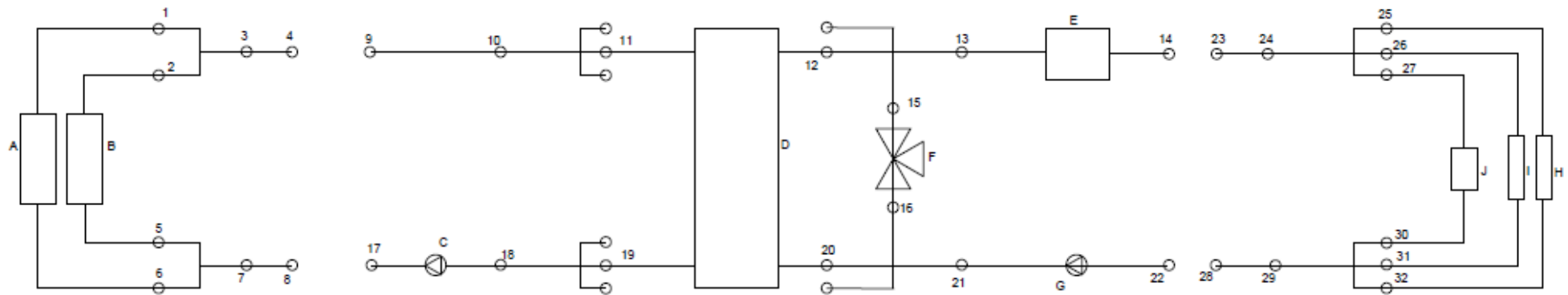


Figura A 1.1 Esquema do Circuito de Aquecimento

Legenda:

A - Coletor 1;
B- Coletor 2;
C- Bomba;
D- Tanque de armazenamento;
E- Tanque auxiliar;
F- Válvula;
G - Bomba;
H - Piso Radiante Quarto 1 (Zona 4);
I - Piso Radiante Quarto 2 (Zona 5);
J - Piso Radiante Salas (Zona 2)

Legenda:

1 – Nó de saída do Coletor 1; **2** – Nó de saída do Coletor 2 ; **3**- Nó Coletor ; **4**- Nó de saída Coletor Loop **5**- Nó de entrada do Coletor 2; **6**- Nó de entrada do Coletor 1; **7**- Nó do Coletor ; **8**- Nó de entrada Coletor Loop; **9**- Nó de saída Tanque Armazenamento Fonte Loop; **10**- Nó Tanque de Armazenamento Fonte AQ; **11**- Nó de saída Tanque Armazenamento Fonte; **12**- Nó de saída Tanque Armazenamento Utilização; **13**- Nó de entrada AQ Instantânea da Mistura; **14**- Nó de saída AQ Instantânea da Mistura; **15**- Nó de saída Válvula Controlo Temperatura AMQ; **16**- Nó de entrada Válvula Controlo Temperatura AMQ; **17**- Nó de entrada Tanque Armazenamento Fonte Loop; **18**- Nó Tanque Armazenamento Fonte Bomba AQ ; **19** - Nó de entrada Tanque Armazenamento Fonte; **20**- Nó de entrada Tanque Armazenamento Utilização; **21**- Saída AQ Utilização Bomba **22**- Nó de entrada Tanque Armazenamento Utilização Loop; **23**- Nó de entrada Procura; **24**- Procura AQ ; **25** – Nó de entrada Piso Radiante Quarto 1; **26**- Nó de entrada Piso Radiante Quarto 2; **27**- Nó de entrada Piso Radiante Salas; **28**- Nó de saída Procura; **29**- Nó Procura AQ **30**- Nó de saída Piso Radiante Quarto 1; **31**- Nó de saída Piso Radiante Quarto 2; **32**- Nó de saída Piso Radiante Salas

