



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Manuel Trindade e Silva Paraíba Garruço

**SISTEMA SOLAR TÉRMICO COM
ARMAZENAMENTO SAZONAL**

Dissertação no âmbito do Mestrado integrado em Engenharia Mecânica, na especialidade de Produção e Projeto, orientada pelo Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar e pelo Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

Setembro de 2022

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Sistema solar térmico com armazenamento sazonal

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Solar thermal system with seasonal storage

Autor

Manuel Trindade e Silva Paraíba Garruço

Orientadores

Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites

Júri

Presidente	Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar Professor Assistente da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor Marco Alexandre dos Santos Fernandes Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

Este trabalho tem o apoio do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) via COMPETE – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), no âmbito do projeto AdsorTech – Tecnologia de adsorção para armazenamento suplementar de energia térmica (POCI-01-0247-FEDER-047070).

Coimbra, setembro, 2022

Agradecimentos

A dissertação que aqui se apresenta e o percurso académico realizado só foram possíveis graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais presto agora o meu agradecimento.

Aos meus orientadores, professor doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar e professor doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites, pela cooperação ao longo do semestre, por me manterem interessado e me incentivarem a exigir o melhor deste estudo.

A toda a família, por acompanhar o meu trajeto e sempre me ajudar incondicionalmente.

Aos meus pais, agradeço o empenho na minha formação e o esforço colocado para poder concretizar os meus objetivos.

À minha avó, pela companhia dos longos dias de trabalho.

Resumo

Numa habitação, a maioria das necessidades energéticas para o aquecimento ambiente e para a preparação das águas quentes sanitárias podem ser satisfeitas através da energia solar. Todavia a intermitência e desfasamento entre a disponibilidade de energia solar e a utilização de energia térmica tornam numa tarefa desafiadora.

Nesta dissertação estuda-se o dimensionamento de um sistema solar térmico que satisfaça a maioria dessas necessidades para uma habitação com 120 m² e quatro ocupantes, situada em Coimbra. Este modelo de habitação foi desenhado utilizando o *software* SketchUP. Recorrendo ao software TRNSYS, construiu-se o sistema de armazenamento sazonal conclui-se que o sistema com um reservatório de armazenamento sazonal de 40 m³ e com uma área total de coletores solares de 25,1 m² é possível atingir uma fração solar anual total de 97 %. As necessidades energéticas anuais calculadas para o aquecimento dos compartimentos e para a preparação da água quente sanitária foram de 13,6 GJ e 8,4 MJ, respetivamente. Neste caso, a fração solar anual para água quente sanitária foi de 95 % e para o aquecimento da habitação foi de 98,3 %. Ao longo do estudo, selecionou-se um volume do reservatório das águas quentes sanitárias de 130 L, uma inclinação dos coletores solares de 45 °, uma espessura do isolamento térmico de 40 cm e uma relação entre altura e diâmetro do reservatório sazonal igual a um. Esta dissertação poderá servir de incentivo para a realização de novos estudos de implementação de sistemas de armazenamento térmico sazonal em Portugal, bem como a sua análise económica.

Palavras-chave: Armazenamento térmico sazonal, Aquecimento combinado do espaço e água quente sanitária, Sistema solar combinado, Armazenamento de energia térmica sensível, Fração solar elevada, Simulações anuais dinâmicas.

Abstract

In a home, most of the energy needs for heating and preparing domestic hot water can be met through solar energy. However, the intermittence and lag between the availability of solar radiation and the use of thermal energy make it a challenging task. In this dissertation, the design of a solar thermal system that satisfies most of the needs of thermal energy for a a 120 m² house with four occupants, located in Coimbra. Using the TRNSYS software, it can be concluded that the system with a 40 m³ seasonal storage tank and a total solar collector area of 25.1 m² can achieve a total annual solar fraction of 97%. The calculated annual energy requirements for heating the compartments and for preparing domestic hot water were 13.6 GJ and 8.4 MJ, respectively. In this case, the annual solar fraction for domestic hot water was 95% and for home heating it was 98.3%. Throughout the study, a sanitary hot water tank volume of 130 L was selected, a solar collectors inclination of 45°, a thermal insulation thickness of 40 cm and a ratio between height and diameter of the seasonal tank equal to one. This dissertation may serve as an incentive to carry out new studies on the implementation of seasonal thermal storage systems in Portugal, as well as its economic analysis.

Keywords: Seasonal thermal storage, Combined space and domestic hot water heating, Solar combisystem, Sensible thermal energy storage, High solar fraction, Dynamic annual simulations.

ÍNDICE

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiv
1. Introdução	15
1.1. Estrutura da dissertação	16
2. Estado de arte.....	17
3. Procedimentos de simulação	21
3.1. Modelo de edifício usado para caso de estudo.....	21
3.2. Sistema de produção e armazenamento de energia.....	25
3.2.1. Captação da energia solar	26
3.2.2. Piso Radiante	26
3.2.3. Reservatório de armazenamento sazonal.....	28
3.2.4. Reservatório de AQS	29
3.3. Software	30
3.3.1. Timestep	30
3.3.2. Tempo de simulação	31
3.4. Necessidades da habitação	32
3.4.1. Consumo de AQS	32
3.4.2. Energia necessária à preparação de AQS	33
3.4.3. Energia necessária ao aquecimento da habitação	33
3.5. Fração solar.....	34
3.6. Esquema do sistema no TRNSYS	35
4. Estudo paramétrico	37
4.1. Inclinação dos coletores solares.....	37
4.2. Volume do reservatório AQS	38
4.3. Espessura do isolamento do reservatório de ASET	40
4.4. Relação entre altura e diâmetro do ASET.....	42
4.5. Número de coletores solares e volume do reservatório ASET	43
5. Análise do caso selecionado	49
5.1. Coletores Solares	49
5.2. Reservatório de ASET	50
5.3. Reservatório de AQS	52
5.4. Aquecimento ambiente do modelo da habitação	54
6. Conclusão	57
Referências Bibliográficas.....	59
Anexo A.....	61
Apêndice A.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Disponibilidade Solar e Energia Necessária para o Aquecimento Ambiente.....	15
Figura 2 - Sistema de ASET coletivo	17
Figura 3 - Reservatório Sazonal utilizado na experimentação de Meister e Beausoleil-Morrison (2021)	19
Figura 4 - Representação 3D do Modelo da Habitação em Estudo.....	22
Figura 5 - Planta da Habitação	22
Figura 6 - Constituição das Paredes Exteriores e da Laje de Teto	23
Figura 7 - Composição do Piso Radiante	23
Figura 8 - Esquema do Sistema Solar Térmico	25
Figura 9 - Esquema do Sistema de Aquecimento da Habitação.....	27
Figura 10 - Reservatório Sazonal	29
Figura 11 - Reservatório AQS.....	30
Figura 12 - Evolução da Temperatura do Reservatório AQS e ASET	31
Figura 13 - Perfil de Consumo de AQS (2ª a 6ª).....	32
Figura 14 - Perfil de Consumo de AQS (Fim de Semana).....	32
Figura 15 - Energia Auxiliar em Função do Volume do Reservatório AQS.....	39
Figura 16 - Energia Auxiliar em Função da Espessura do Isolamento	40
Figura 17 - Percentagem de Diminuição do Qaux,total em Função da Espessura.....	41
Figura 18 - Energia Auxiliar em Função de H/D	43
Figura 19 - Fração Solar Anual para o Aquecimento Ambiente da Habitação	45
Figura 20 - Fração Anual Solar Total.....	46
Figura 21 - Eficiência Anual do Sistema.....	46
Figura 22 - Energia Coletada, da Radiação Solar e a Eficiência dos Coletores	49
Figura 23 - Temperatura Superior do Reservatório ASET	50
Figura 24 - Energia Solar para o Reservatório ASET, Fornecida e Auxiliar	51
Figura 25 - Temperatura Superior do Reservatório de AQS.....	52
Figura 26 - Energia Solar para o Reservatório de AQS, Fornecida e Auxiliar	53
Figura 27 - Temperatura do exterior, da Sala/Cozinha, do Pavimento e Energia Fornecida (1 ano).....	54
Figura 28 - Temperatura do exterior, da Sala/Cozinha, do Pavimento e Energia Fornecida (7 dias).....	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Condutibilidade Térmica do Material/Composto.....	24
Tabela 2 - Coeficientes de Transmissão Térmica da Envolvente.....	24
Tabela 3 – Caudal Máximo para cada Compartimento	28
Tabela 4 - Parâmetros Utilizados no Início do Estudo Paramétrico.....	37
Tabela 5 - Valores da Energia Auxiliar em Função da Inclinação.....	38
Tabela 6 - Parâmetros Utilizados na Secção 4.2	39
Tabela 7 - Parâmetros Utilizados na Secção 4.3	40
Tabela 8 - Parâmetros Utilizados na Secção 4.4	42
Tabela 9 - Parâmetros Utilizados na Secção 4.5	44
Tabela 10 - Gama de Parâmetros Utilizados no Estudo Paramétrico.....	44
Tabela 11 - Frações Anuais Solares Totais [%]	45
Tabela 12 - Ajuste no Volume de AQS.....	48
Tabela 13 - Especificações Técnicas do Modelo Vulcano FCC-2S.....	61
Tabela 14 - Necessidades da Habitação	63
Tabela 15 - Valores da Energia Auxiliar em Função do Volume AQS	64
Tabela 16 - Valores da Energia Auxiliar em Função da Espessura do Isolamento.....	64
Tabela 17 - Valores da Energia Auxiliar em Função de H/D.....	65

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A_u - área de abertura dos coletores solares

A_s - área superfície externa do reservatório sazonal

c_p - calor específico da água

$\dot{m}_{AQS}(t)$ - caudal de água quente sanitária no instante t

\dot{m}_i - caudal que passa pelo piso radiante do compartimento i no instante t

\dot{m}_t - caudal total do piso radiante

\dot{m}_1, \dot{m}_2 - consumo de água diária por pessoa

$\Delta T_1, \Delta T_2$ - diferença de temperatura da água a ser utilizada preparação das águas quentes sanitárias e a temperatura da água da rede

ΔT_i - diferença de temperatura do fluido à entrada e à saída do piso radiante

η_{AQS} - eficiência anual do reservatório AQS

η_{ASET} - eficiência anual do reservatório sazonal

η_c - eficiência dos coletores solares

$Q_{AQS,aux}$ - energia auxiliar anual necessária à preparação da água quente sanitária para que satisfaça as necessidades da habitação

$Q_{PRad,aux}$ - energia auxiliar anual necessária ao piso radiante para que satisfaça as necessidades da habitação

Q_{PRad} - energia fornecida anualmente para o aquecimento do ambiente do modelo de habitação

$Q_{AQS,s}$ - energia solar fornecida anualmente para a preparação de AQS

$Q_{AQS,in}$ - energia fornecida ao reservatório de AQS pelo sistema solar térmico

$Q_{ASET,in}$ - energia fornecida ao reservatório de ASET pelo sistema solar térmico

Q_c - energia fornecida pelo sistema de coletores solares

$Q_{ASET,out}$ - energia fornecida pelo reservatório de ASET ao sistema de piso radiante

$Q_{AQS,out}$ - energia fornecida pelo reservatório na preparação de água quente sanitária

Q_i - energia incidente nos coletores

$Q_{ASET,s}$ - energia solar fornecida anualmente para o aquecimento ambiente da habitação

f_{AQS} - fração solar anual para a preparação da água quente sanitária

$f_{espaço}$ - fração solar anual para o aquecimento ambiente da habitação

f_{total} - fração solar anual total

Q_{AQS} - necessidades totais de energia necessária para a preparação de AQS

Q_{PRad} - necessidades totais de energia necessária para o aquecimento ambiente

q_i - potência térmica libertada pelo piso radiante para o interior do compartimento “i”

E_i - radiação solar incidente na superfície dos coletores solares

H/D - razão entre altura e diâmetro

$Q_{aux,total}$ - soma das duas energias auxiliares

$T_{set,AQS}(t)$ - temperatura desejada para a AQS no instante t

$T_{rede}(t)$ - temperatura da água da rede no instante t

$T_{entrada,i}$ - temperatura do fluido à entrada do piso radiante

$T_{saída,i}(t)$ - temperatura do fluido à saída do piso radiante no instante t

Siglas

AQS – Águas Quentes Sanitárias

ASET – Armazenamento Sazonal de Energia Térmica

PRFV – Plástico Reforçado com Fibra de Vidro

1. INTRODUÇÃO

A preocupação pelo meio ambiente intensificou-se nos últimos anos. A emissão de gases para a atmosfera tem contribuído para o aumento do efeito de estufa, agravando o aquecimento global. Por este motivo, e por vivermos num período onde o preço dos combustíveis fósseis tem aumentado, é necessário o desenvolvimento de sistemas mais sustentáveis e mais económicos. Nos edifícios habitacionais, os sistemas solares térmicos para uso combinado que tanto fornecem energia para as águas quentes sanitárias (AQS) como para a climatização ambiente, são soluções promissoras. Os coletores solares são uma tecnologia cada vez mais utilizada nas residências em Portugal, mas habitualmente apenas para a função de AQS.

A maximização do aproveitamento da energia solar nos sistemas de aquecimento doméstico é desafiante, dada a intermitência e desfasamento entre a sua disponibilidade e utilização. A disponibilidade de energia solar é normalmente mais elevada durante os meses de verão e pelo meio do dia, no entanto, as necessidades de energia térmica são mais elevadas durante o inverno e em períodos do dia sem radiação solar (Figura 1). Para resolver esse desfasamento, vários trabalhos de investigação têm vindo a propor o uso de sistemas de armazenamento de energia térmica sazonal. Este tipo de sistemas armazenam a energia solar coletada no verão em reservatórios de grandes dimensões e para que possa ser utilizada nos meses mais frios para aquecimento ambiente.

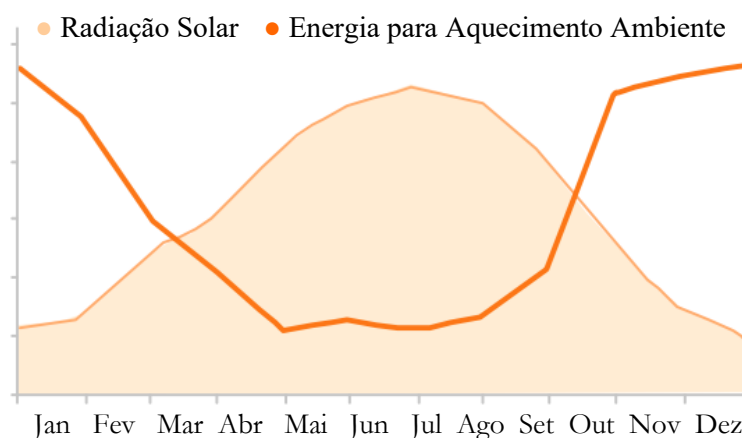


Figura 1 - Disponibilidade Solar e Energia Necessária para o Aquecimento Ambiente

Este tipo de sistema foi alvo de estudos semelhantes em várias partes do mundo, mas até à data, é escassa a investigação para o clima português. No entanto, as temperaturas amenas, com invernos não muito frios nem enevoados e verões quentes e ensolarados, fazem crer que o sistema solar combinado se adequa à realidade portuguesa.

Este projeto tem como objetivo principal o dimensionamento de um sistema solar térmico, acoplado a um reservatório de armazenamento sazonal, com o objetivo de tentar suprir todas as necessidades de energia para o aquecimento de uma moradia unifamiliar. Para a sua concretização, recorreu-se ao *software* SketchUp para construir o modelo geométrico da habitação em estudo e ao TRNSYS para modelar e simular o sistema de produção, armazenamento e utilização da energia solar térmica.

1.1. Estrutura da dissertação

Após este primeiro capítulo introdutório, esta dissertação organiza-se da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Discussão bibliográfica importante para a compreensão e desenvolvimento do tema da tese;
- Capítulo 3 – Descrição do modelo de habitação, bem como a composição e funcionamento do sistema térmico;
- Capítulo 4 – Simulação e discussão de parâmetros influenciadores no dimensionamento e rendimento do sistema;
- Capítulo 5 – Análise do caso selecionado;
- Capítulo 6 - Apresentação das conclusões do estudo e recomendações de trabalhos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

O sistema de armazenamento de energia solar combinado, para a preparação de AQS e também para o aquecimento da habitação é geralmente constituído por uma área significativa de coletores solares térmicos, e por dois reservatórios com a finalidade de armazenar essa energia. Um desses reservatórios destina-se ao armazenamento de AQS e o outro ao aquecimento ambiente da habitação. O primeiro tem uma função de carga e descarrega diária, logo possui dimensões relativamente pequenas. Já no segundo, o período de carga e descarga é sazonal, sendo carregado no verão e posteriormente descarregado no inverno. Por ser necessário armazenar energia térmica por grandes períodos de tempo, este reservatório terá de possuir grandes dimensões e uma grande espessura de isolamento térmico.

O armazenamento sazonal de energia térmica (ASET) para o aquecimento de edifícios habitacionais e preparação das águas quentes sanitárias começou a ser estudado a partir da década de 1940, segundo Pinel et al. (2011). A maioria eram sistemas coletivos, isto é, cada ASET destinava-se a fornecer energia térmica a mais do que uma habitação. De 1979 a 1988, a tarefa 7 do “Solar Heating and Cooling Program” focou-se nos projetos de ASET coletivos, resultando na implementação de mais de 30 instalações na Europa. Na Alemanha, foram implementados um grande número de projetos de ASET comunitários, tendo atingido frações solares entre os 50% e os 60% para o aquecimento das habitações e preparação de AQS.

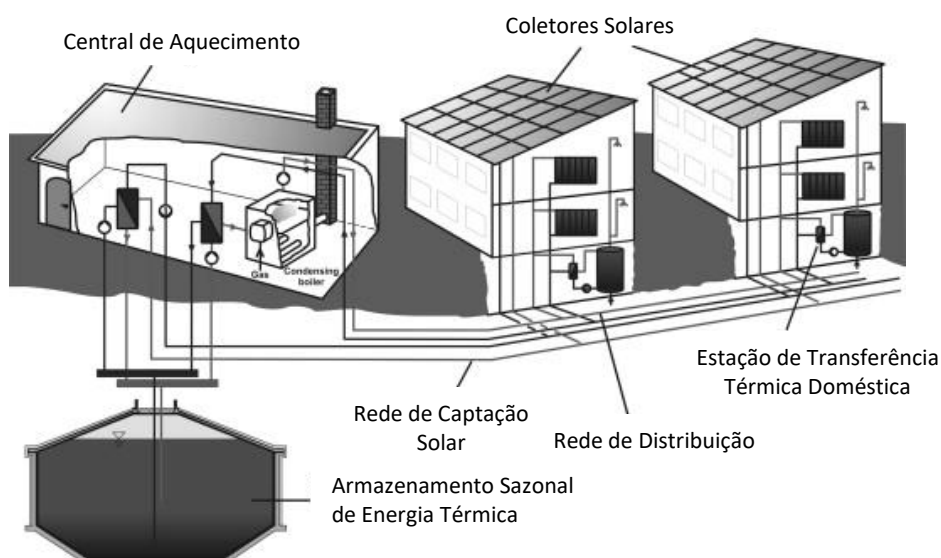


Figura 3 - Sistema ASET coletivo

Apesar do ASET coletivo ser preferido ao unitário, este último também mereceu o seu estudo. De facto, reservatórios de armazenamento menores têm uma razão de área de superfície e volume maior e, por conseguinte, maiores perdas de calor para o exterior por unidade de volume armazenado. No entanto, se forem consideradas as perdas na rede de distribuição, os sistemas de escala uni-habitacional podem atingir um desempenho térmico competitivo.

Hugo et al. (2010), Beausoleil-Morrison et al. (2019) e Pinamonti et al. (2020) simularam o sistema ASET de água quente numa casa unifamiliar em Montreal e Ottawa, no Canadá, atingindo elevadas frações solares. Na simulação de Hugo et al. (2010), contrariamente ao típico sistema de ASET, o reservatório destinado à preparação de AQS é o mesmo que o do aquecimento da habitação. Este reservatório único possuía um formato cilíndrico, com uma altura de 5,2 m e um diâmetro de 2,8 m, colocado verticalmente na cave do modelo da habitação. O isolamento térmico escolhido foi a lã de rocha com 20 cm de espessura, com uma condutibilidade térmica de 0,04 W/m.K. O modelo da habitação apresentava 210 m² e 12 coletores de tubos de vácuo equivalente uma área total de 54 m². A energia necessária para o aquecimento dos espaços e para a preparação de AQS foi de 22,8 GJ e 15,7 GJ respetivamente. A fração solar total atingida pelo sistema foi de 95,1 %. Neste mesmo estudo, concluiu-se que o uso de coletores planos, ao invés dos de tubos de vácuo, é aconselhado pelo seu custo inferior e pelo tempo de vida útil superior.

No estudo de Beausoleil-Morrison et al. (2019) para a universidade de Carleton, Canadá, o reservatório sazonal era cilíndrico, enterrado horizontalmente no exterior da habitação. Este possuía um volume de 36 m³ e um isolamento térmico de 30 cm de poliuretano de alta densidade com uma condutibilidade térmica de 0,027 W/m.K. A habitação simulada apresentava 150 m² de área útil, com uma área de envidraçado a sul de 20 m². Os coletores solares de tubos de vácuo escolhidos continham uma área total de 41,6 m². As necessidades energéticas anuais para a preparação de AQS e para o aquecimento da habitação somavam o valor de 38 GJ. Os resultados obtidos para este sistema foram uma fração solar total que podia variar entre os 87% e os 98%. A menor fração solar podia ser atingida caso a condutibilidade térmica do isolamento do reservatório sazonal fosse metade do previsto. Já a melhor fração solar podia ser atingida caso o sistema funcionasse com as condições ideais, estabelecidas na construção do modelo simulado. O rendimento do reservatório sazonal foi de 69%. Pinamonti et al. (2020) pegou no modelo estudado por

Beausoleil-Morrison et al. (2019) e conclui que a integração de uma bomba de calor no sistema de aquecimento da habitação podia aumentar a fração solar total até 2%. Esta bomba de calor substituiu o dispositivo auxiliar ao aquecimento ambiente da habitação. Meister e Beausoleil-Morrison (2021) apresentaram os valores obtidos numa experimentação em escala real do modelo simulado anteriormente. Tanto a fração solar relativa à preparação de AQS como ao aquecimento da habitação, obtiveram um valor de 64 % considerando 13 GJ e 15 GJ de energia térmica necessária para cada respetiva finalidade. A eficiência do reservatório sazonal obtida foi de 42%.



Figura 4 - Reservatório Sazonal utilizado na experimentação de Meister e Beausoleil-Morrison (2021)

Clarke et al. (2014) e Colchough e McGrath (2015) implementaram o sistema solar térmico numa casa passiva na Irlanda. Esta casa possuía uma área útil de 215 m² e 10,6 m² de coletores solares de tubos de vácuo. O reservatório sazonal de betão possuía um volume de 23 m³ e com dimensões de 3 m de largura, 4,5 m de comprimento e 2,5 m de altura. O isolamento térmico utilizado foi 20 cm de espuma de poliuretano, 40 cm e 20 cm de poliestireno expandido nas paredes e no topo do reservatório, respetivamente. Por baixo, possui 60 cm de polistireno expandido. As necessidades energéticas anuais para a preparação de AQS foram de 2,9 GJ e para o aquecimento da habitação de 5,7 GJ. Este sistema alcançou 56% de fração solar para o aquecimento do espaço e 93% para as águas quentes sanitárias.

Kramer (2014), constatou que em nove casas com este sistema na Alemanha, os sistemas atingiram uma fração solar total superior a 50%. Ma et al. (2018) identificou o tamanho do reservatório de ASET e o número de coletores para atingir uma fração solar próxima de 100% numa habitação em Inglaterra. O sistema foi simulado em modelos de habitação com áreas úteis compreendidas entre os 69,2 m² e os 158,7 m². As necessidades energéticas anuais destinadas à preparação de AQS e ao aquecimento da habitação variaram entre os 45 GJ e os 63 GJ. Assim, para o sistema obter uma fração solar total perto de 100% o reservatório sazonal teria de possuir um volume de 31,5 m³ a 44,3 m³ e uma área de coletores solares planos igual a 57,9 m². A eficiência anual do reservatório de ASET considerada foi de 75 %.

3. PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

3.1. Modelo de edifício usado para caso de estudo

Antes de iniciar o estudo do sistema de ASET determinou-se o modelo de edifício. Nesse sentido, definiu-se uma habitação de um só piso com 120 m², pois este tipo de sistema apresenta um menor número de coletores e um menor volume do reservatório sazonal para satisfazer as necessidades de edifícios de menor dimensão.

Definiu-se Coimbra para a localização da habitação, por ser a cidade onde está situada a instituição de ensino superior onde foi realizado este estudo (Universidade de Coimbra).

A organização espacial, demonstrada nas Figuras 4 e 5, foi definida de acordo com a tipologia da habitação e o posicionamento da habitação em relação à trajetória do sol. Segundo o Instituto Nacional de Estatística, 47,3% do número total de fogos concluídos em construções novas para habitação, pertencem à tipologia T3. De acordo com o Manual SCE aprovado pelo Dec. Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro, numa habitação T3 consideram-se quatro ocupantes. Definiu-se, por isso, uma habitação T3 com um agregado familiar de quatro pessoas. Considerando o disposto no Decreto Lei 650/75 de 18 de novembro, determinaram-se as áreas mínimas dos compartimentos da habitação. Como se pode observar na Figura 5, o modelo da habitação é composto por dois quartos com 16 m², um dos quais com casa de banho privativa de 9,5 m², por um quarto de menor dimensão com 12 m², por um escritório com 12 m², por uma casa de banho comum de 9,5 m² e ainda por um espaço destinado à sala e à cozinha com 49 m².

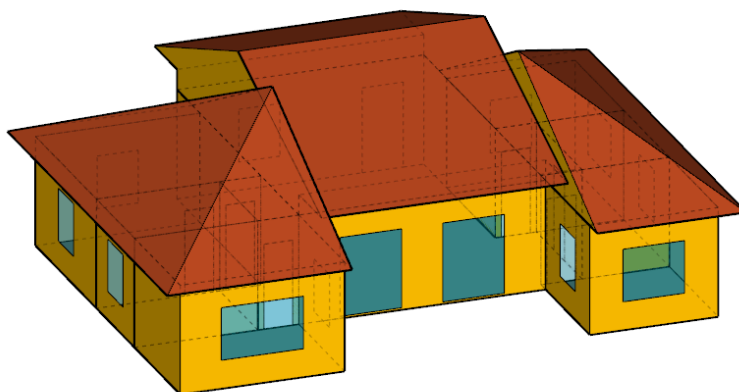


Figura 5 - Representação 3D do Modelo da Habitação em Estudo

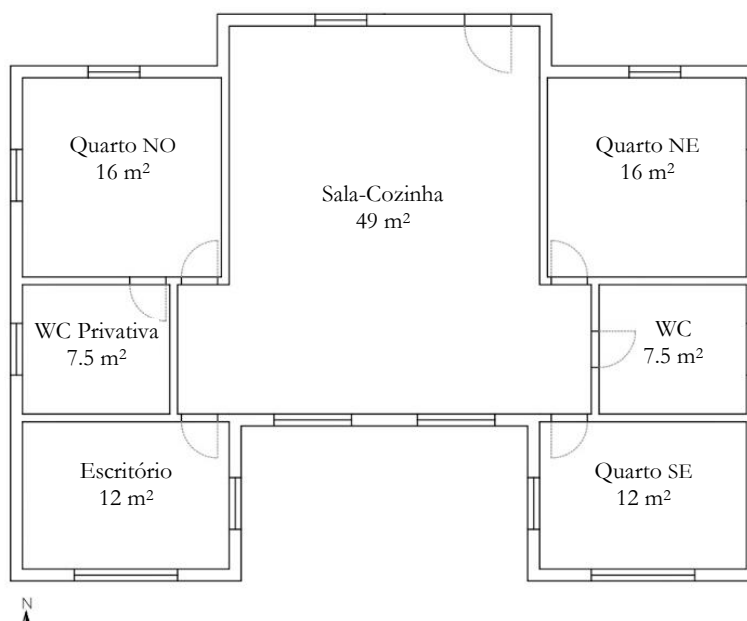


Figura 6 - Planta da Habitação

A composição das paredes externas e da laje de teto da habitação, representadas na Figura 6, foram definidas consoante o tipo de construção atual em Portugal. Desta forma, a paredes exteriores foram consideradas compostas por reboco, tijolo furado de 15 cm e isolamento exterior de poliestireno extrudido com 4 cm de espessura. Considerou-se que a laje de teto era aligeirada composta pelas camadas de reboco, elementos estruturais de vigas e tijoleiras com 33 cm de espessura e 10 cm de poliestireno extrudido. A condutibilidade térmica destes materiais está apresentada na Tabela 1.

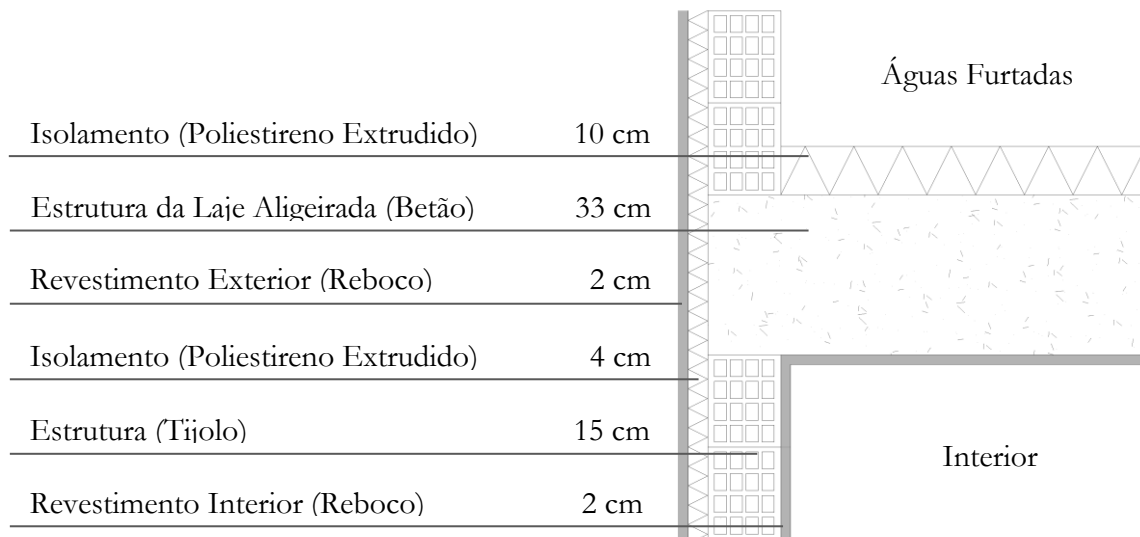


Figura 7 - Constituição das Paredes Exteriores e da Laje de Teto

A laje de pavimento é constituída por 10 cm de inertes de brita, 20 cm de betão armado com 1 % de armadura, 3 cm de poliestireno extrudido, 6 cm de argamassa betonilha, 1,5 cm de argamassa de assentamento tradicional e 1 cm de ladrilho. Na sua constituição, estão inseridos os tubos do piso radiante com diâmetro externo de 2 cm, espessura de 2 mm e distância de 20 cm entre tubos. A constituição do pavimento está apresentada na Figura 7. A condutibilidade térmica do pavimento é de destes materiais está apresentada na Tabela 1.

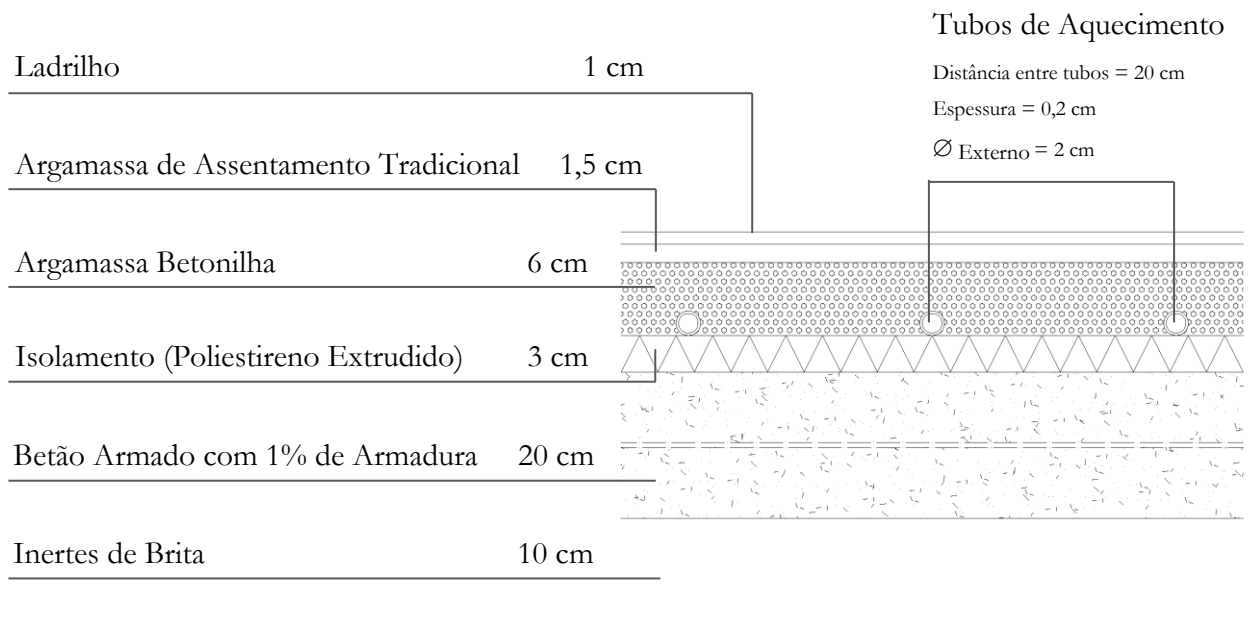


Tabela 1 - Condutibilidade Térmica do Material/Composto

Material/Composto	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]
Reboco Tradicional	1,3
Tijolo Furado [15 cm]	0,38
Poliestireno Extrudido	0,037
Laje Aligeirada	1,05
Inertes de Brita	2
Betão Armado com 1 % de armadura	2
Argamassa Betonilha	1,3
Argamassa de Assentamento Tradicional	1,3
Ladrilho	1,3

Assim, determinaram-se os coeficientes de transmissão térmica da envolvente, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de Transmissão Térmica da Envolvente

Envolvente	Coeficiente de Transmissão Térmica [W/m ² .°C]
Paredes Exteriores	0,596
Laje de Teto	0,312
Laje de Pavimento	0,805

A habitação possui uma área de envidraçado de 10,4 m² a sul, beneficiando da entrada da radiação solar durante os períodos de aquecimento. Estes envidraçados são de vidro duplo com caixilharia em alumínio e possuem um coeficiente de transmissão térmica e um fator solar de 3,21 W/m².K e 0,72, respetivamente.

3.2. Sistema de produção e armazenamento de energia

Na Figura 8 está ilustrado o esquema do sistema solar térmico com armazenamento sazonal utilizado neste estudo. Baseado nas recomendações do Sillman (1981), foi incluído no sistema um reservatório diurno para o armazenamento de energia solar térmica utilizada na preparação de AQS e um reservatório sazonal para o armazenamento de energia solar térmica utilizada no aquecimento da habitação, através de um sistema de piso radiante. Cada reservatório possui um circuito fechado independente e ambos dispõem de um sistema de aquecimento auxiliar que é acionado caso as temperaturas dos fluidos dos circuitos sejam inferiores às pretendidas.

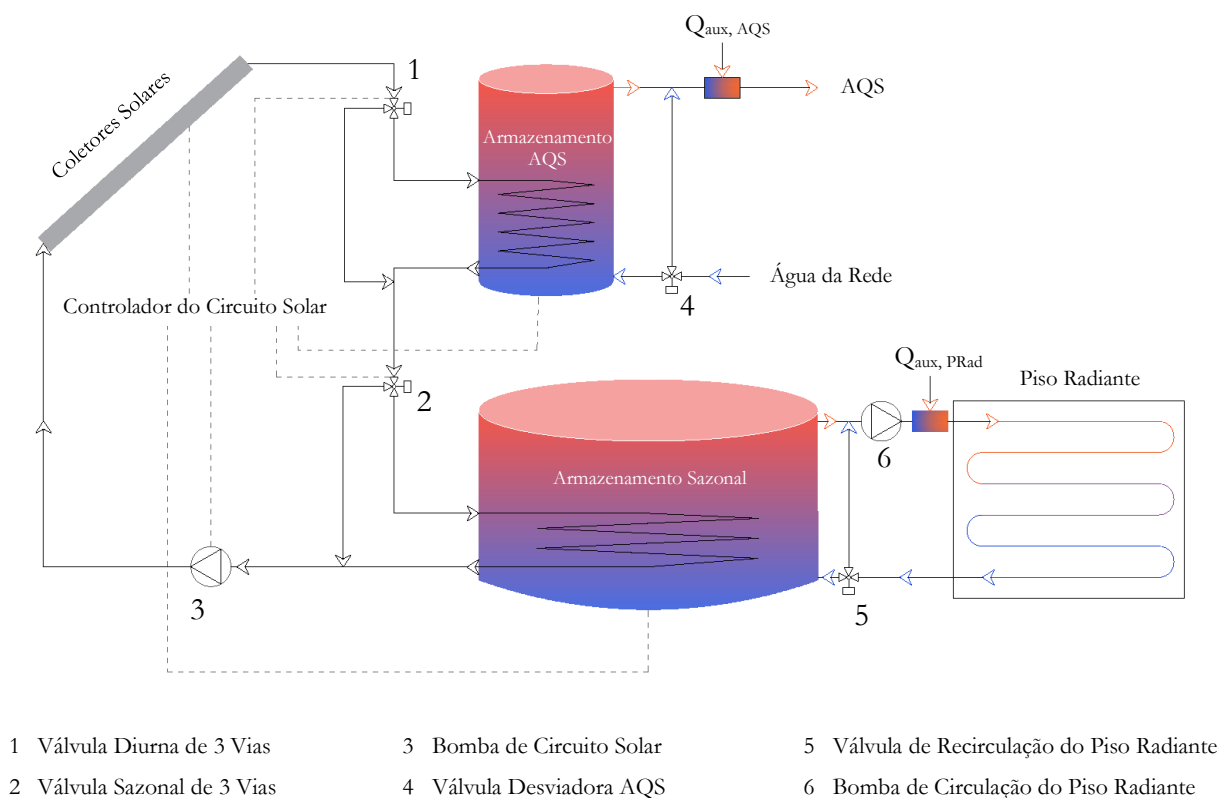


Figura 9 - Esquema do Sistema Solar Térmico

3.2.1. Captação da energia solar

Para a captação de energia solar consideraram-se coletores solares colocados no telhado da habitação. O modelo de coletor solar escolhido para este projeto foi o FCC-2S da Vulcano. A sua ficha, obtida segundo a certificação Solar Keymark, pode ser consultada no Anexo A.

A configuração e processo de controlo foi definido de modo a que o fluido do circuito primário do sistema solar térmico passe pelos reservatórios de AQS e de ASET, num circuito fechado, mas a distribuição da energia coletada privilegie o aquecimento do reservatório de AQS. Quando o termostato deste atinge os 65 °C, o caudal do fluido térmico proveniente dos coletores era redirecionado para o reservatório sazonal. Quando o termostato desce para os 60 °C, o fluido volta a ser direcionado para o reservatório de AQS. A temperatura máxima de saída do fluido nos coletores solares foi limitada a 100°C, por razões de segurança. A inclinação dos coletores foi estudada no subcapítulo 4.2.

3.2.2. Piso Radiante

O sistema de aquecimento dos compartimentos da habitação é do tipo piso radiante, visto que esta tecnologia não necessita de temperaturas de fluido de alimentação muito elevadas. Este sistema funciona com água quente que passa nos tubos incorporados no pavimento e aquece as divisões através da transferência de calor por convecção e radiação. A água quente utilizada neste procedimento é fornecida diretamente pelo reservatório sazonal carregado termicamente ao longo do ano, completado com um sistema de reaquecimento. Na Figura 9 é possível observar o esquema do sistema do piso radiante.

A temperatura do fluido à entrada do piso radiante foi definida a 30 °C, tendo em consideração os estudos feitos por Lu et al. (2019) e por Olesen (2002). Associado a este sistema está um dispositivo auxiliar para o aquecimento do fluido à entrada do piso radiante, caso este se encontre a uma temperatura inferior à temperatura definida de 30 °C. Cada compartimento da habitação é climatizado de forma independente, permitindo uma uniformização da temperatura das divisões. Durante a época de aquecimento da habitação (novembro a abril), 24 h/dia, a bomba de circulação é acionada quando a temperatura do compartimento atinge os 19,5 °C e desligada ao chegar aos 20 °C.

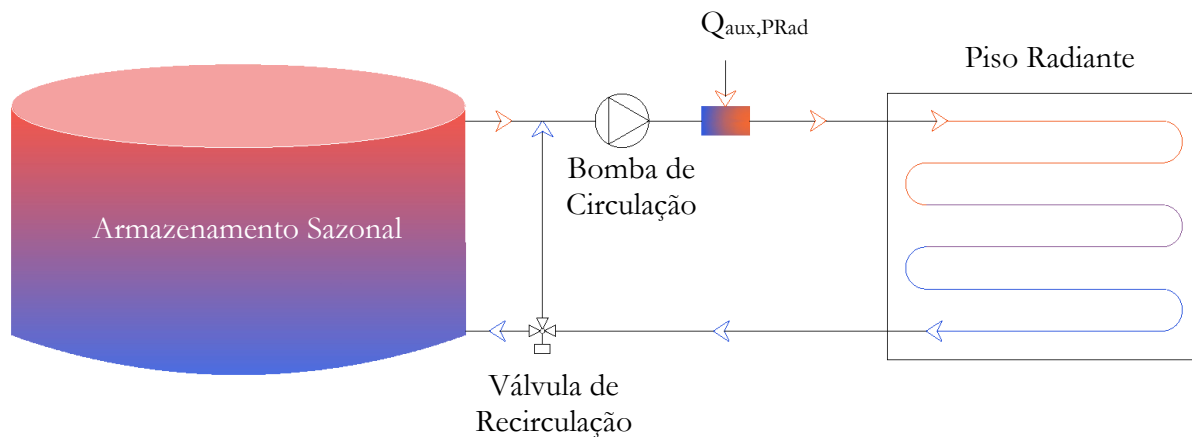


Figura 10 - Esquema do Sistema de Aquecimento da Habitação

O caudal máximo do piso radiante foi definido tendo em conta o jornal ASHRAE (By & Olesen, 2002). Considerou-se uma capacidade máxima de aquecimento de 100 W/m^2 numa zona ocupada em que o pavimento estivesse a $29 \text{ }^\circ\text{C}$ e o ar a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. O caudal foi estabelecido com base na diferença de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ entre a temperatura de entrada e a de saída do piso radiante. No entanto, para a zona com maior ocupação, neste caso na Sala/Cozinha, a diferença de temperatura recomendada é de $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Assim, o caudal para toda a habitação (\dot{m}_t) foi estabelecido através da Equação 1.

$$\dot{m}_t = \sum_{i=1}^5 \frac{q_i}{c_p \Delta T_i} \quad (1)$$

Em que q_i é a potência térmica libertada pelo piso radiante para o interior do compartimento “i” [kJ/s], c_p é o calor específico da água [kJ/kg.K] e ΔT_i é a diferença de temperatura do fluido à entrada e à saída do piso radiante [$^\circ\text{C}$]. Assim, o caudal máximo que a bomba deverá encaminhar para sistema de aquecimento é de 1326 kg/h . Na Tabela 3 pode observar-se a área de pavimento de cada compartimento, o caudal máximo e respetiva fração que pode ser dirigido para cada zona.

Tabela 3 – Caudal Máximo para cada Compartimento

Compartimentos da Habitação	Área [m ²]	Caudal Máximo [kg/h]	Fração Máxima do Caudal
Sala/Cozinha	49	848,6	0,64
Escritório	12	106,1	0,08
Quarto NO	16	132,6	0,10
Quarto NE	16	132,6	0,10
Quarto SE	12	106,1	0,08
Total	120	1326	1

Optou-se por não considerar piso radiante nas casas de banho, uma vez que o tempo de ocupação destas divisões é reduzido. A sua climatização poderá ser feita através do ar de transferência de uma divisão adjacente.

3.2.3. Reservatório de armazenamento sazonal

O ASET foi considerado isolado termicamente e enterrado no solo a 1 m de profundidade, de forma a reduzir as perdas térmicas. Segundo Pinel et al. (2011), o solo que rodeia o reservatório poderá eventualmente aquecer e secar, reduzindo a condutibilidade térmica do solo e, assim, contribuir para reduzir as perdas térmicas. Neste estudo não foram considerados problemas de humidade no solo, que poderiam causar alterações nas propriedades do isolamento térmico.

O material considerado para a constituição do reservatório foi o plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), uma solução fabricada de fácil aplicação quando comparado com outras soluções possíveis. O betão, por exemplo, tem uma construção mais complexa e demorada e elevada probabilidade de fissurar, resultando num vazamento do depósito. O PRFV possui uma condutibilidade térmica de 0,04 W/m.°C e características que permite armazenar fluido com temperaturas próximas dos 100 °C. Isso significa que o depósito pode ser usado sem cuidados particulares de controlo na gama de temperaturas esperada para a água aí armazenada.

O isolamento selecionado foi a espuma de poliuretano devido à baixa condutibilidade térmica, $0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, e pela facilidade de aplicação. Esta condutibilidade térmica foi selecionada de acordo com Nick Connor (2019). O reservatório é semelhante a um cilindro, posicionado verticalmente e a razão entre a sua altura e o seu diâmetro tem um papel importante nas perdas de calor para a envolvente. No subcapítulo 4.5, estudou-se a ligação entre estes dois parâmetros e a escolha da melhor relação.

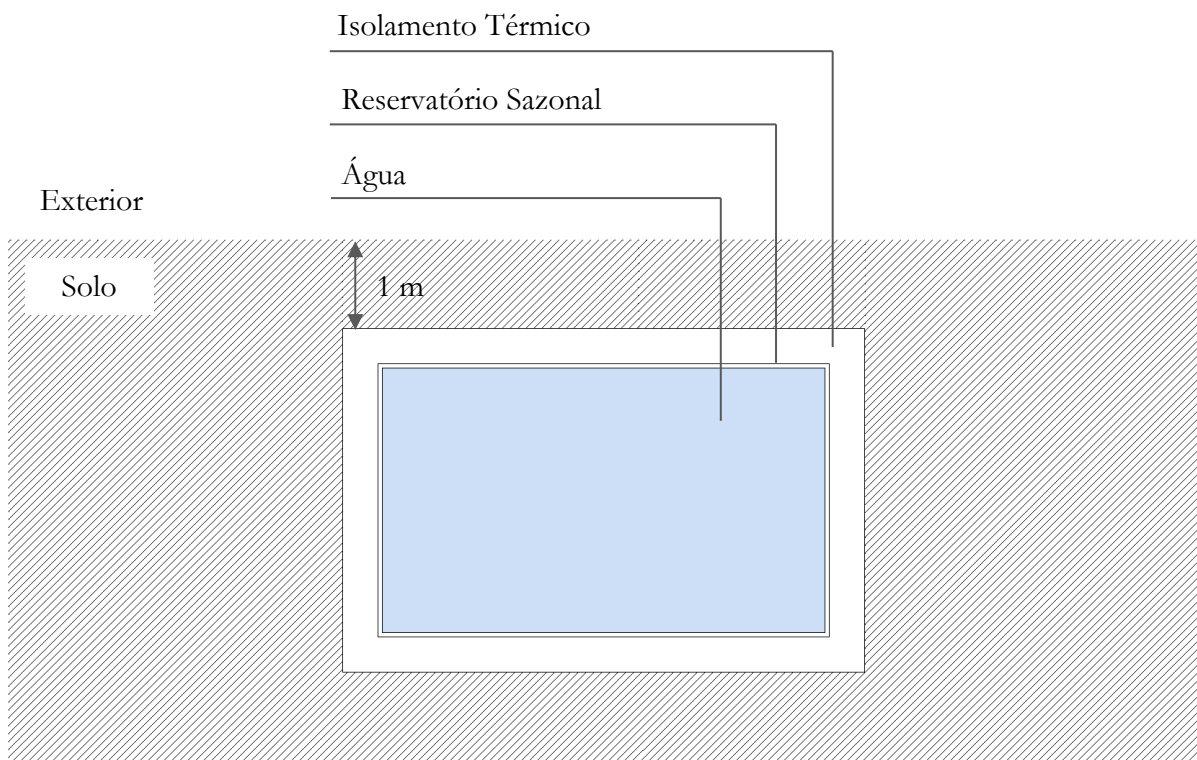


Figura 11 - Reservatório Sazonal

3.2.4. Reservatório de AQS

O reservatório de AQS escolhido apresenta um coeficiente de perda de $0,5 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, tendo sido o seu volume determinado mais à frente, no subcapítulo 4.3. Este coeficiente de perda foi retirado do catálogo de reservatórios de AQS da Vulcano. Este sistema possui uma válvula desviadora de caudal, regulada para uma temperatura de saída de 45°C . Associado a este reservatório, encontra-se um dispositivo auxiliar para o aquecimento da água quente sanitária, caso esta possua uma temperatura inferior a 45°C . Na Figura 11 é apresentado o esquema deste sistema.

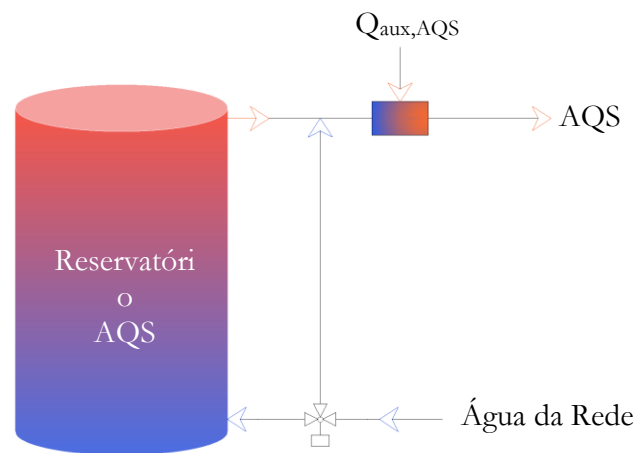


Figura 12 - Reservatório AQS

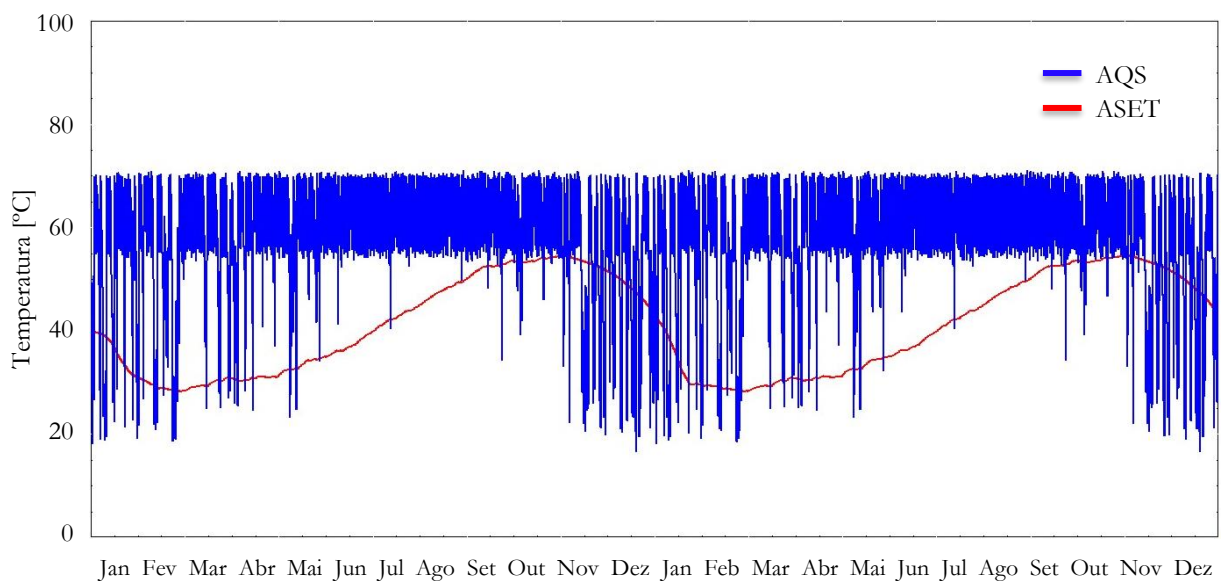
3.3. Software

3.3.1. Timestep

Para as simulações do sistema é necessário determinar o tempo que o programa demora entre cada cálculo (timestep). Este parâmetro é importante pois influencia a qualidade dos resultados obtidos. Barnaby e Crawley (2011) afirmaram que nas simulações de desempenho de construção é normalmente utilizado um *timestep* de uma hora devido ao intervalo dos dados presentes no ficheiro climático ser também de uma hora. Mas, um *timestep* de 6 minutos permite obter resultados mais reais segundo Adam (2013). Assim, utilizou-se um intervalo de 6 minutos para as simulações do sistema em estudo.

3.3.2. Tempo de simulação

Antes da iniciação do estudo ao sistema de armazenamento térmico sazonal era importante definir a duração das simulações. Como foi necessário definir as condições iniciais do sistema, nomeadamente as temperaturas iniciais dos reservatórios de AQS e ASET, simularam-se anos consecutivos de modo a se conseguirem valores de arranque estabilizados, e representativo de um sistema em funcionamento contínuo. Simulando sequencialmente dois anos (Figura 12), verificou-se ser um período suficiente.



Como é possível observar, as temperaturas do reservatório de AQS e de ASET tendem a estabilizar-se rapidamente. Verifica-se que os padrões de evolução das temperaturas nos dois depósitos após fevereiro são idênticos nos dois anos simulados. Além disso, as temperaturas do início do segundo ano são próximas das do fim desse ano, indicando que não são necessárias repetições adicionais de simulação temporal.

3.4. Necessidades da habitação

3.4.1. Consumo de AQS

Para definir o consumo diário de água quente sanitária, assumiu-se que a habitação se destina a alojar quatro pessoas. Segundo o Manual SCE aprovado pelo Dec. Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro, por dia são necessários 40 litros de água a 50 °C por pessoa. Para determinar o consumo de água a 45 °C utilizou-se a Equação 2.

$$\dot{m}_1 c_p \Delta T_1 = \dot{m}_2 c_p \Delta T_2 \quad (2)$$

Em que \dot{m}_1 e \dot{m}_2 são os consumos de água diária por pessoa em kg, c_p é o calor específico da água e ΔT_1 e ΔT_2 são as diferenças de temperatura da água a ser utilizada e à entrada do sistema de aquecimento, calculou-se um consumo diário de água a 45 °C por pessoa equivalente a 46,7 litros, admitindo uma temperatura da água da rede de 15 °C. Assim, obteve-se um consumo total diário para quatro pessoas de aproximadamente 190 litros de água a 45 °C.

Os perfis de consumo necessitaram de ser definidos para tornar a simulação mais realista. Desta forma, construiu-se os gráficos das Figuras 13 e 14. O gráfico da Figura 13 mostra o perfil de consumo de AQS durante a semana, enquanto que o gráfico da Figura 14 apresenta o perfil de consumo de AQS no fim de semana.

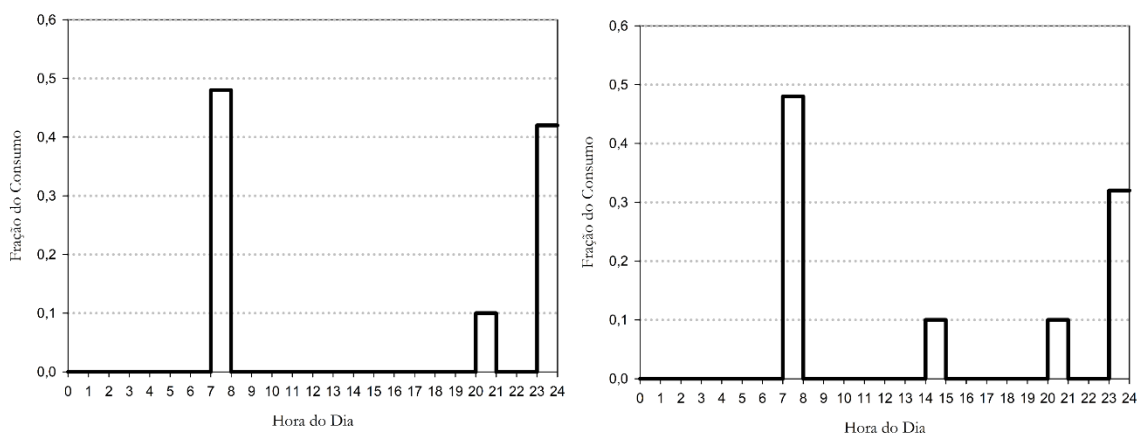


Figura 13 - Perfil de Consumo de AQS (2ª a 6ª) Figura 14 - Perfil de Consumo de AQS (Fim de Semana)

3.4.2. Energia necessária à preparação de AQS

Para o cálculo das frações solares dos sistemas de AQS e de aquecimento da habitação, foi necessário determinar as necessidades energéticas da habitação. O cálculo da energia fornecida anualmente para a AQS, Q_{AQS} , efetuou-se através da Equação 3.

$$Q_{AQS} = \int_{ano} \dot{m}_{AQS}(t) c_p [T_{set,AQS}(t) - T_{rede}(t)] dt \quad (3)$$

Em que $\dot{m}_{AQS}(t)$ é o caudal de água quente sanitária no instante t [kg/s], c_p é o calor específico da água [kJ/kg.K], $T_{set,AQS}(t)$ é a temperatura desejada para a AQS [°C] no instante t , que para este estudo foi considerada sempre a 45 °C, e $T_{rede}(t)$ é a temperatura da água da rede [°C] no instante t , que se considerou a 15 °C.

Para o aquecimento das águas sanitárias, foram necessários anualmente 8,44 GJ (2344,4 kWh/ano) de energia térmica.

3.4.3. Energia necessária ao aquecimento da habitação

O cálculo da energia para o aquecimento da habitação, Q_{PRad} , efetuou-se através da Equação 4.

$$Q_{PRad} = \int_{ano} \dot{m}_i(t) c_p [T_{entrada,i} - T_{saída,i}(t)] dt \quad (4)$$

Em que \dot{m}_i é o caudal que passa pelo piso radiante do compartimento i no instante t [kg/s], $T_{entrada,i}$ é a temperatura do fluido à entrada do piso radiante [°C] e $T_{saída,i}(t)$ é a temperatura do fluido à saída do piso radiante [°C], no instante t .

Os resultados da simulação do modelo da habitação mostraram que são necessários anualmente 13,57 GJ (3769.4 kWh/ano) de energia térmica.

3.5. Fração solar

Para além da energia auxiliar anual necessária à AQS e ao piso radiante para que satisfaçam as necessidades da habitação ($Q_{AQS,aux}$ e $Q_{PRad,aux}$ respetivamente), a fração solar anual é um fator importante na escolha dos parâmetros do sistema. Assim, a fração solar anual para a preparação da água quente sanitária (f_{AQS}), a fração solar anual para o aquecimento ambiente da habitação ($f_{espaço}$) e a fração solar anual total (f_{total}) são determinadas através das Equações 5, 6 e 7.

$$f_{AQS} = \frac{Q_{AQS,s}}{Q_{AQS}} = 1 - \frac{Q_{AQS,aux}}{Q_{AQS}} \quad (5)$$

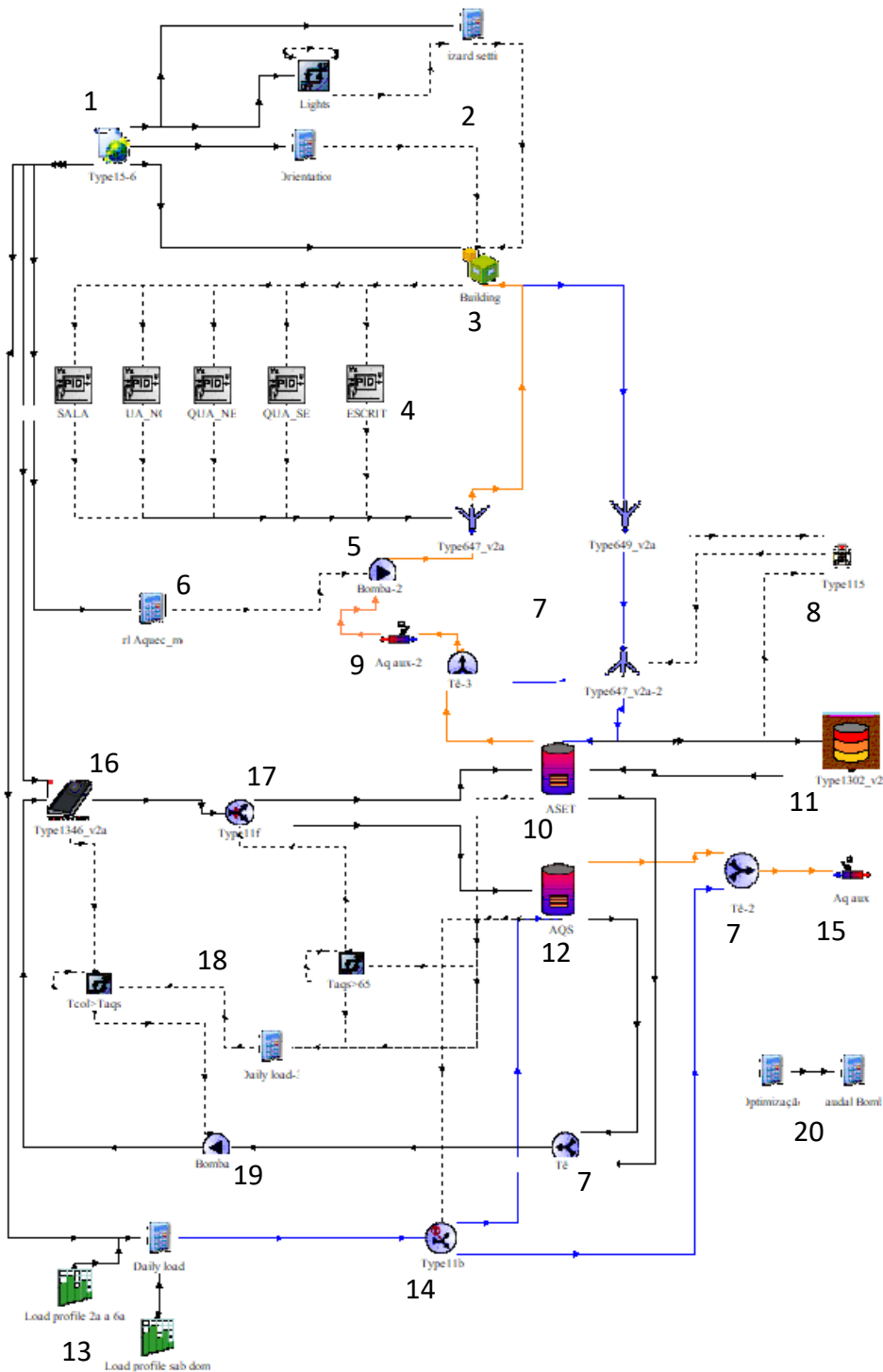
$$f_{espaço} = \frac{Q_{ASET,s}}{Q_{PRad}} = 1 - \frac{Q_{PRad,aux}}{Q_{PRad}} \quad (6)$$

$$f_{total} = 1 - \frac{Q_{AQS,aux} + Q_{PRad,aux}}{Q_{AQS} + Q_{PRad}} \quad (7)$$

Em que $Q_{AQS,s}$ e $Q_{ASET,s}$ são a energia solar fornecida anualmente para a AQS e para o aquecimento da habitação, respetivamente. Q_{AQS} e Q_{PRad} são as necessidades totais de energia necessária para a AQS e para o aquecimento ambiente.

A fração solar foi uma forma simples de avaliar o desempenho. Apesar de existirem componentes que necessitavam de energia elétrica para o funcionamento do sistema solar térmico, estas não foram contabilizados para a análise energética deste estudo.

3.6. Esquema do sistema no TRNSYS



Legenda:

- 1- Ficheiro Meteorológico
- 2- Controlo das Luzes, das Persianas e da Orientação da Habitação
- 3- Modelo da Habitação
- 4- Controlo do Caudal do Piso Radiante
- 5- Bomba do Piso Radiante
- 6- Controlo da Bomba do Piso Radiante
- 7- Válvulas de Desvio e de Mistura do Caudal
- 8- Controlo da Válvula de Recirculação
- 9- Dispositivo Auxiliar ao Piso Radiante
- 10- Reservatório de ASET
- 11- Reservatório de ASET Enterrado
- 12- Reservatório de AQS
- 13- Perfis de Consumo de AQS
- 14- Válvula Desviadora de AQS
- 15- Dispositivo Auxiliar à preparação de AQS
- 16- Coletores Solares
- 17- Válvula Desviadora do Sistema Solar Térmico
- 18- Controlo do Sistema Solar Térmico
- 19- Bomba do Sistema Solar Térmico
- 20- Parâmetros a Otimizar

4. ESTUDO PARAMÉTRICO

O estudo paramétrico passa pela análise da inclinação dos coletores solares, do volume do reservatório de AQS, da espessura do isolamento do reservatório de ASET, da relação entre Altura e Diâmetro do reservatório sazonal e por fim, à fração solar anual do sistema em função da variação do número de coletores e do volume do reservatório de ASET.

Os parâmetros iniciais estão apresentados na Tabela 4. À medida que se analisa os parâmetros a cima descritos, vai se alterando esses valores.

Tabela 4 - Parâmetros Utilizados no Início do Estudo Paramétrico

Número de Coletores	6
Inclinação dos Coletores [°]	45
Volume do ASET [m ³]	80
Relação H/D	0,25
Espessura do Isolamento do ASET [cm]	40
Volume do Reservatório AQS [L]	160

4.1. Inclinação dos coletores solares

Para a determinação da inclinação mais favorável dos coletores, utilizaram-se os parâmetros da Tabela 4. Daqui pôde comparar-se a energia auxiliar necessária à AQS e ao piso radiante para que satisfizessem as necessidades da habitação ($Q_{AQS,aux}$ e $Q_{PRad,aux}$, respetivamente). A Tabela 5 apresenta estes valores em função dos vários ângulos de inclinação, bem como a soma das duas energias auxiliares ($Q_{aux,total}$).

Tabela 5 - Valores da Energia Auxiliar em Função da Inclinação

Inclinação [°]	$Q_{AQS,aux}$ [MJ]	$Q_{PRad,aux}$ [MJ]	$Q_{aux,total}$ [MJ]
35	392,12	2576,84	2968,96
40	391,31	2564,39	2955,7
45	390,88	2560,28	2951,16
50	390,96	2561,65	2952,61
55	391,63	2566,95	2958,58
60	392,83	2579,18	2972,01
65	394,53	2598,6	2993,13

Concluiu-se que com os coletores a 45°, o sistema apresentou um $Q_{aux,total}$ de 2951,16 MJ, valor ligeiramente inferior aos das restantes alternativas. Assim sendo, esta foi a inclinação escolhida para prosseguir o estudo.

4.2. Volume do reservatório AQS

O volume do reservatório de AQS tem influência no $Q_{AQS,aux}$ e $Q_{PRad,aux}$. Como já foi referido, o excedente de energia necessária para o aquecimento das águas sanitárias era redirecionado para o depósito sazonal. Se o volume do reservatório de AQS for sobredimensionado haverá maiores perdas pelas paredes. Logo, o sistema fornecerá mais energia para o reservatório de AQS, diminuindo a energia enviada para o reservatório sazonal e, conseqüentemente, um aumento do $Q_{PRad,aux}$. Assim, estudou-se a variação da energia auxiliar do sistema com a variação do volume do AQS, tendo em consideração os perfis de consumo apresentados nas Figuras 13 e 14. Os resultados desta análise estão presentes no gráfico da Figura 15.

Tabela 6 - Parâmetros Utilizados na Secção 4.2

Número de Coletores	6
► Inclinação dos Coletores [°]	45
Volume do ASET [m ³]	80
Relação H/D	0,25
Espessura do Isolamento do ASET [cm]	40

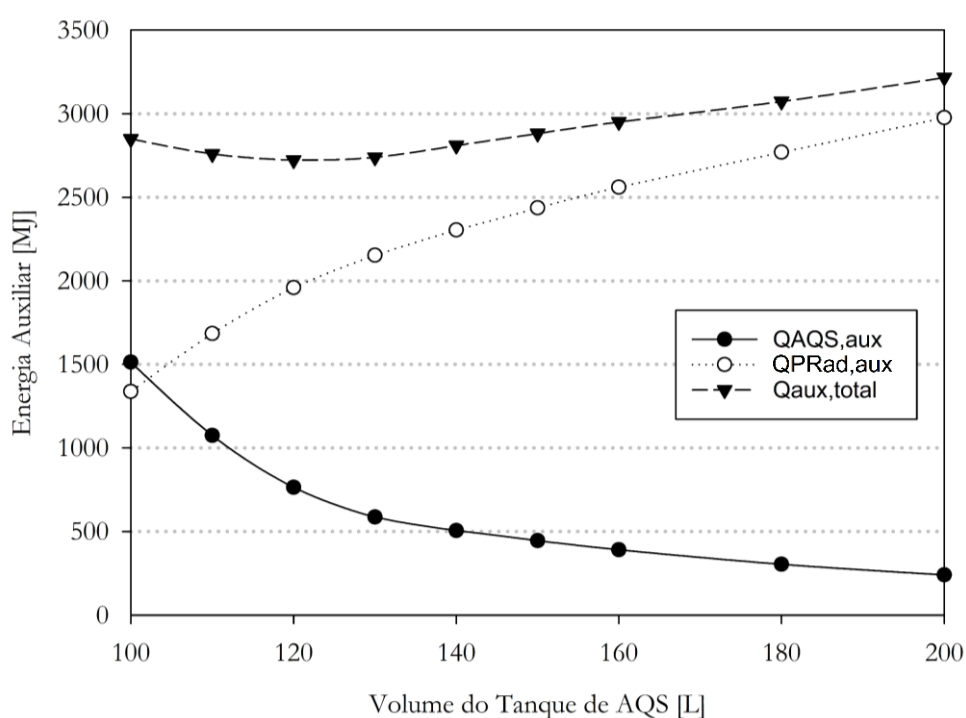


Figura 15 - Energia Auxiliar em Função do Volume do Reservatório AQS

No gráfico da Figura 15 é possível observar que o $Q_{AQS,aux}$ diminui com o aumento do volume do reservatório AQS. Esta diminuição da energia auxiliar deve-se ao aumento da energia armazenada com o aumento do volume. Assim, em períodos de radiação solar reduzida ou nula longos, existe maioritariamente água quente armazenada para a sua utilização. Já o $Q_{PRad,aux}$ aumenta com o aumento do volume do reservatório AQS, uma vez que, a energia fornecida ao reservatório ASET vai diminuindo.

Concluiu-se que com um volume de 120 L e 6 coletores solares obteve-se a menor quantidade de energia auxiliar total ($Q_{aux,total}$), com um valor de 2723,48 MJ. Assim, selecionou-se este volume como primeira aproximação para prosseguir o estudo do sistema.

4.3. Espessura do isolamento do reservatório de ASET

A espessura do isolamento é um parâmetro importante na viabilidade deste sistema de ASET, pois o desempenho é fortemente influenciado pelas perdas de energia pela sua envolvente. Com o objetivo de avaliar o efeito da espessura de isolamento e selecionar o valor a utilizar na restante análise paramétrica, fez-se o estudo com os parâmetros definidos na Tabela 7 e cujos resultados se encontram no gráfico da Figura 16.

Tabela 7 - Parâmetros Utilizados na Secção 4.3

Número de Coletores	6
► Inclinação dos Coletores [°]	45
Volume do ASET [m ³]	80
Relação H/D	0,25
► Volume do Reservatório AQS [L]	120

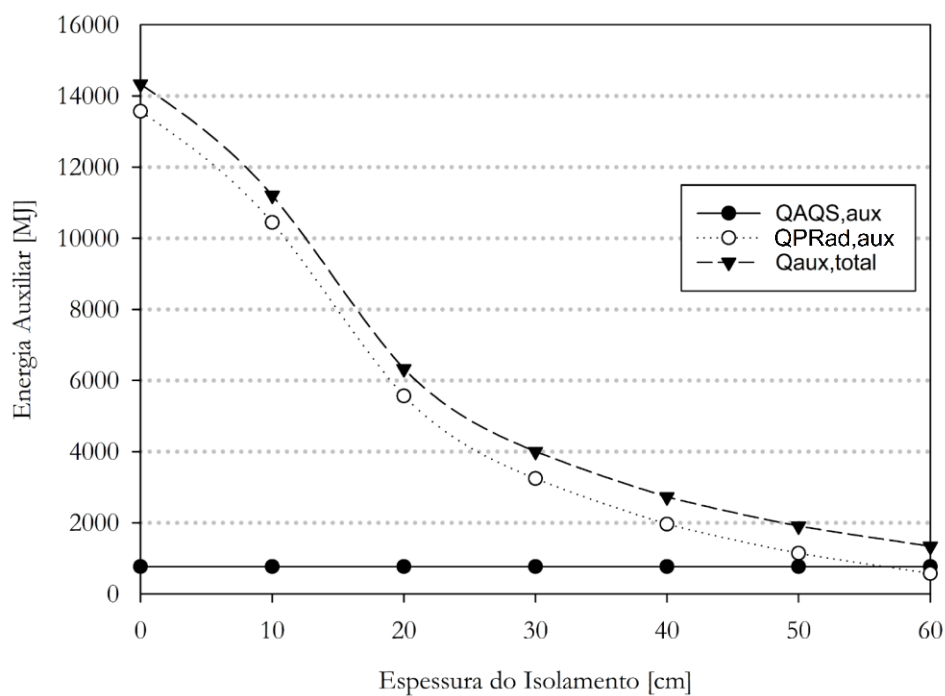


Figura 16 - Energia Auxiliar em Função da Espessura do Isolamento

Como está visível no gráfico da Figura 16, o aumento da espessura do isolamento do ASET não afetava o rendimento do reservatório AQS, visto que no sistema desenvolvido a energia coletada da radiação solar é encaminhada com prioridade para depósito de AQS e, depois, para o ASET. Constata-se também que o aumento da espessura criava a uma diminuição sucessiva da energia auxiliar total ($Q_{aux,total}$). Assim, para a seleção da espessura de isolamento do reservatório ASET definiu-se como critério a percentagem de diminuição do $Q_{aux,total}$ que resulta do aumento de 10 cm da espessura de isolamento em relação ao $Q_{aux,total}$ do reservatório sem isolamento térmico. O raciocínio descrito está apresentado na Equação 8.

$$\eta(i) = \frac{Q_{aux,total}(i - 10) - Q_{aux,tot}(i)}{Q_{aux,total}(0)} \quad (8)$$

Em que i é a espessura do isolamento térmico do ASET. Os resultados desta equação podem ser observados no gráfico da Figura 17.

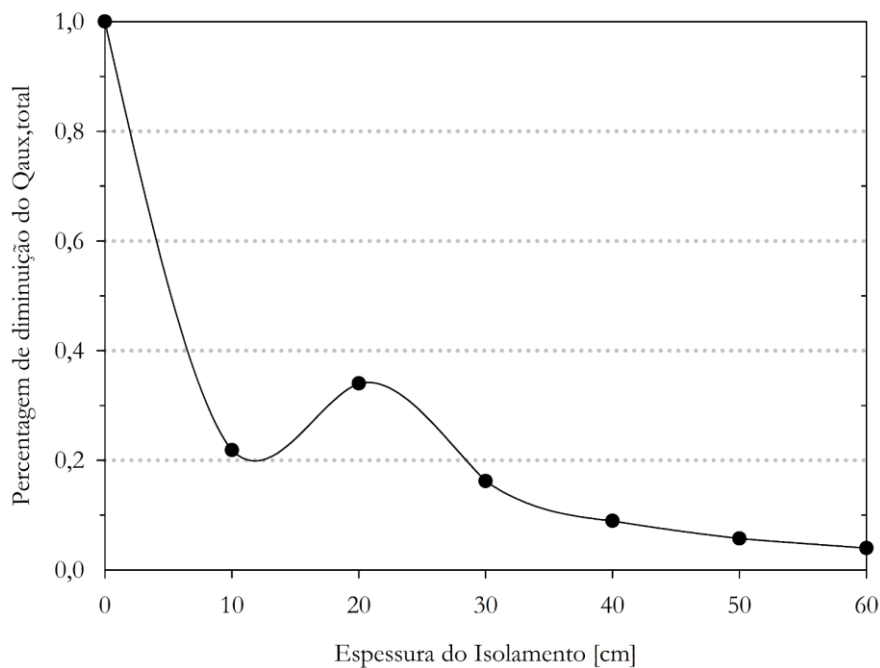


Figura 17 - Percentagem de Diminuição do $Q_{aux,total}$ em Função da Espessura

O gráfico da Figura 17 apresenta uma “bossa” nos 20 cm de espessura. Isto deve-se à condutibilidade térmica do solo ser um fator importante nas perdas de energia para a envolvente quando o reservatório de ASET apresenta espessuras de isolamento térmico reduzidas. Decidiu-se que a espessura a escolher teria de ter uma percentagem de melhoria de pelo menos 10 %. Como os 40 cm tinham uma percentagem próxima de 10% e à medida que se aumentava a espessura este valor ia diminuindo, foi esta a espessura de isolamento seleccionada.

4.4. Relação entre altura e diâmetro do ASET

A relação altura/diâmetro (H/D) também provocava alteração na quantidade de calor perdido do reservatório de ASET para a envolvente. Desta forma, fez-se um estudo à variação destas dimensões utilizando os parâmetros que estão na Tabela 8 e cujos resultados podem ser vistos no gráfico da Figura 18.

Tabela 8 - Parâmetros Utilizados na Secção 4.4

Número de Coletores	6
▶ Inclinação dos Coletores [°]	45
Volume do ASET [m ³]	80
▶ Espessura do Isolamento do ASET [cm]	40
▶ Volume do Reservatório AQS [L]	120

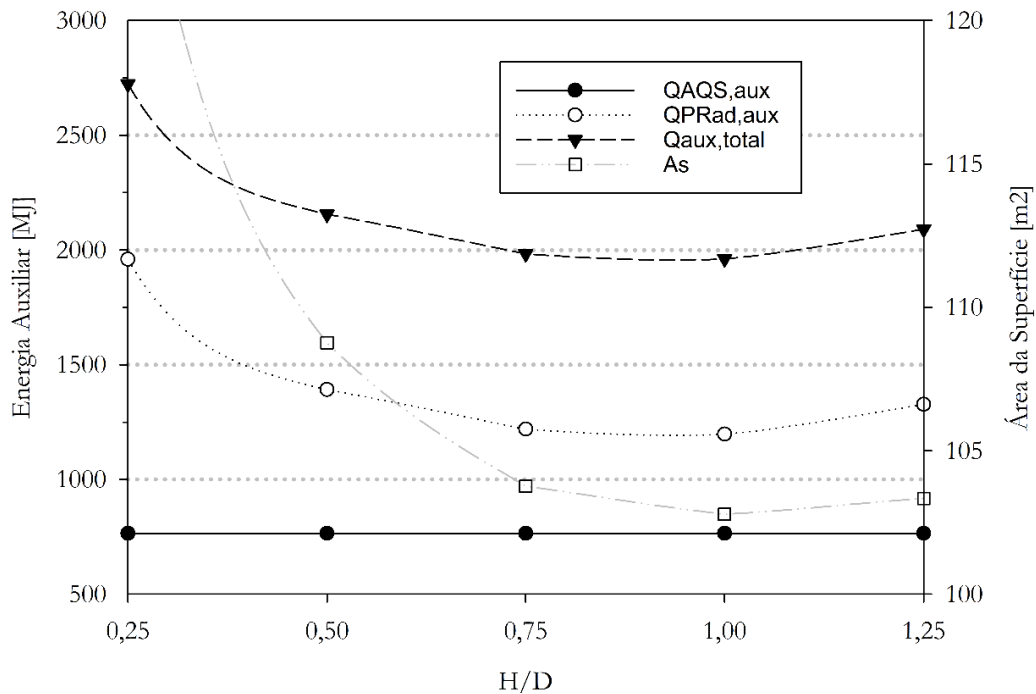


Figura 18 - Energia Auxiliar em Função de H/D

Conclui-se que tal como a variação da espessura do isolamento do reservatório de ASET, a razão entre a altura e o diâmetro do reservatório de ASET não afeta o $Q_{AQS,aux}$ pelo mesmo motivo. Observando a curva do gráfico, para a razão $H/D = 1$ resultou nos melhores valores da energia auxiliar total, pois para um determinado volume, a menor área superfície externa (A_s) significava menores perdas de calor para a envolvente.

4.5. Número de coletores solares e volume do reservatório ASET

Muitos aspetos do sistema de armazenamento térmico sazonal foram implementados segundo recomendações da literatura e dos estudos exploratórios realizados ao longo da elaboração deste sistema. Na perspetiva de otimizar a dimensão do sistema idealizado às necessidades de energia da habitação usada como caso de estudo, existem ainda dois parâmetros fundamentais que devem ser determinados: o volume do reservatório de ASET e o número de coletores solares. Para a sua escolha, o sistema foi submetido a um estudo

paramétrico, tendo em consideração a fração solar anual total do sistema (f_{total}). A partir dos parâmetros determinados anteriormente (Tabela 9), variou-se o número de coletores e o volume do reservatório de ASET na gama de valores apresentada na Tabela 10.

Tabela 9 - Parâmetros Utilizados na Secção 4.5

▶ Inclinação dos Coletores [°]	45
▶ Espessura do Isolamento do ASET [cm]	40
▶ Volume do Reservatório AQS [L]	120
▶ Relação H/D	1

Tabela 10 - Gama de Parâmetros Utilizados no Estudo Paramétrico

Número de Coletores (Área Total [m ²])	4 (8,36); 6 (12,54); 8 (16,72); 10 (20,9); 12 (25,08)
Volume do Reservatório ASET [m ³]	20; 40; 60; 80; 100; 120

Assim, através dos parâmetros descritos e do cálculo das frações anuais solares para a preparação de AQS (f_{AQS}), para o aquecimento ambiente da habitação ($f_{espaço}$) e total (f_{total}), utilizando as Equações 5, 6 e 7, construiu-se a Tabela 11 e os gráficos das Figuras 19 e 20.

No gráfico da Figura 21, está presente a eficiência do sistema em função do número de coletores e do volume do reservatório de ASET. A eficiência do sistema foi calculada tendo em consideração a radiação incidente nos coletores e a energia captada para o sistema.

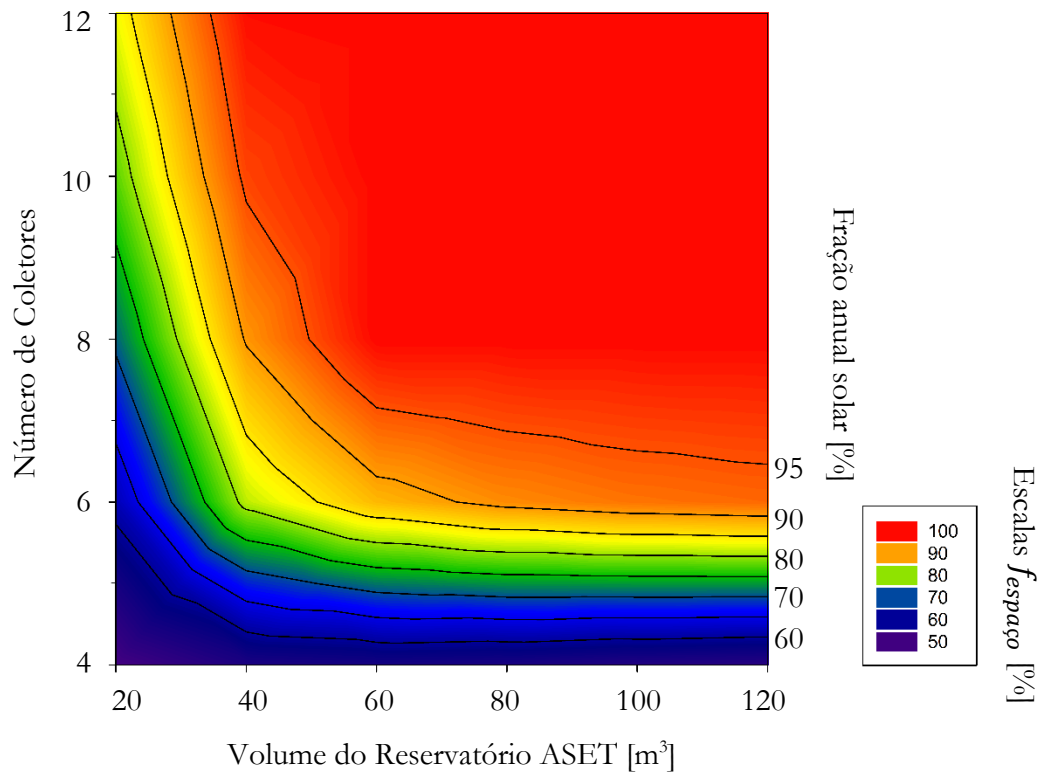


Figura 19 - Fração Solar Anual para o Aquecimento Ambiente da Habitação

Tabela 11 - Frações Anuais Solares Totais [%]

Volume do Reservatório Sazonal [m3]	Número de Coletores				
	4	6	8	10	12
20	64,51	72,90	78,94	83,47	86,79
40	67,74	84,97	90,96	94,56	96,95
60	68,29	89,23	96,87	97,10	97,23
80	67,92	91,09	96,88	97,11	97,23
100	67,26	92,04	96,88	97,10	97,24
120	66,84	92,52	96,88	97,10	97,24

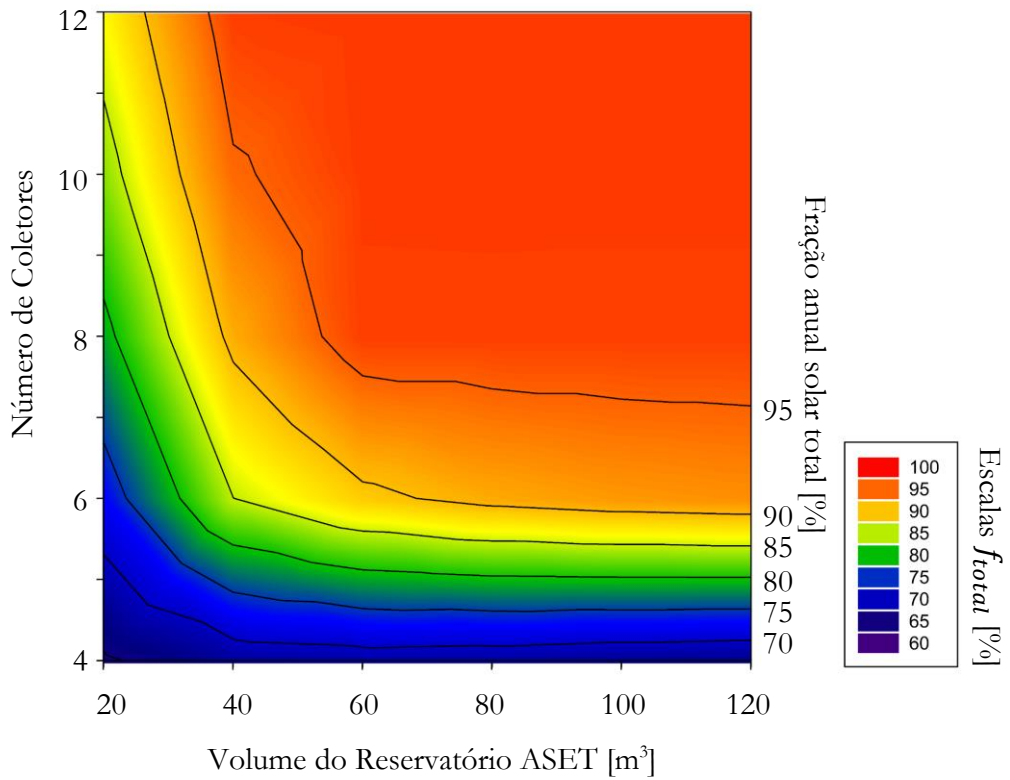


Figura 20 - Fração Anual Solar Total

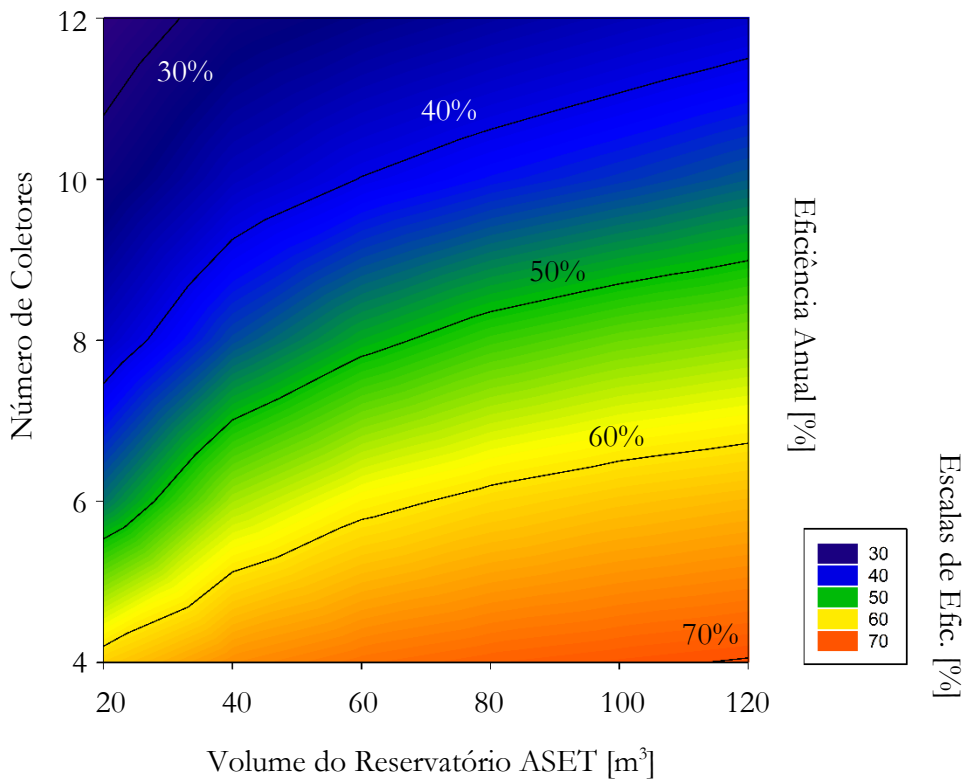


Figura 21 - Eficiência Anual do Sistema

Concluiu-se que, as frações anuais solares totais variaram entre os 64,5 % e os 97,2 %. Como era de esperar, para um determinado volume, o aumento do número de coletores originou uma fração anual solar total superior. Tal como nos estudos realizados por Braun et al. (1981) e Sillman (1981), os resultados obtidos demonstram que para o mesmo número de coletores, ao aumentar o volume do reservatório de ASET, $f_{\text{espaço}}$ e f_{total} aumentam e f_{AQS} mantém-se constante. Mas num determinado instante, manteve-se constante independentemente do aumento do volume do reservatório sazonal. O motivo desta estagnação deveu-se ao facto de o calor captado ser o mesmo, a partir do momento em que se evita o desperdício por o ASET ficar completamente carregado antes do fim do verão, a energia térmica disponível passa ser a mesma. No subcapítulo 4.2, fez-se o dimensionamento do reservatório de AQS para o caso em que a fração solar do aquecimento da habitação era inferior a 100%. Assim, ao escolher-se uma configuração com uma $f_{\text{espaço}}$ de 100%, tem que se redimensionar o reservatório de AQS.

De acordo com o gráfico da Figura 21, a eficiência do sistema tende a aumentar com o aumento do volume do reservatório sazonal e com a diminuição do número de coletores solares. Isto deve-se à diminuição da temperatura do fluido à entrada dos coletores solares, provocando uma variação de temperaturas do fluido à saída e à entrada dos coletores superior. Consequentemente, a eficiência dos coletores solares é superior.

Olhando para os valores da Tabela 11 e do gráfico da Figura 20, optou -se por seleccionar um volume de 40 m³ com 12 coletores solares. Esta escolha foi feita de forma a que o sistema atingisse uma fração anual solar do aquecimento da habitação de praticamente 100% com menor volume do ASET possível (99,5 %). Assim, a fração anual solar para o aquecimento das águas sanitárias foi de 92,8 % e uma fração anual solar total de 96,9 %.

Reestudou-se o efeito variação do volume do reservatório de AQS na f_{AQS} , $f_{\text{espaço}}$ e f_{total} . Os resultados obtidos estão na Tabela 12.

Tabela 12 - Ajuste no Volume de AQS

Volume do AQS [L]	f_{AQS}	$f_{espaço}$	f_{total}
100	83,67	99,98	93,73
110	89,04	99,98	95,78
120	92,79	99,54	96,95
130	94,95	98,34	97,04
140	95,80	97,75	97,00
150	96,36	96,69	96,56

Para um volume de AQS de 130 L, a fração anual solar total foi de 97,04 %. Valor ligeiramente superior face ao obtido com um volume de 120 L e 140 L. Qualquer um destes três volumes poderia ser escolhido já que resultaram em frações solar totais semelhantes. Optou-se por escolher um reservatório de AQS com 130 L por ter obtido o melhor resultado.

5. ANÁLISE DO CASO SELECIONADO

5.1. Coletores Solares

Após a determinação de todos os parâmetros do sistema, necessitou-se de fazer uma análise aprofundada do mesmo. Começou-se então pela análise da energia coletada e da eficiência dos coletores solares. Esta eficiência (η_c) é calculada através da Equação 9.

$$\eta_c = \frac{Q_c}{E_i \times A_u} = \frac{Q_c}{Q_i} \quad (9)$$

Em que Q_c é a energia fornecida pelo sistema de coletores solares [MJ], E_i é radiação incidente [MJ/m^2], A_u é a área útil dos coletores solares [m^2] e Q_i é a energia incidente nos coletores [MJ]. Assim, foi possível construir o gráfico da Figura 22.

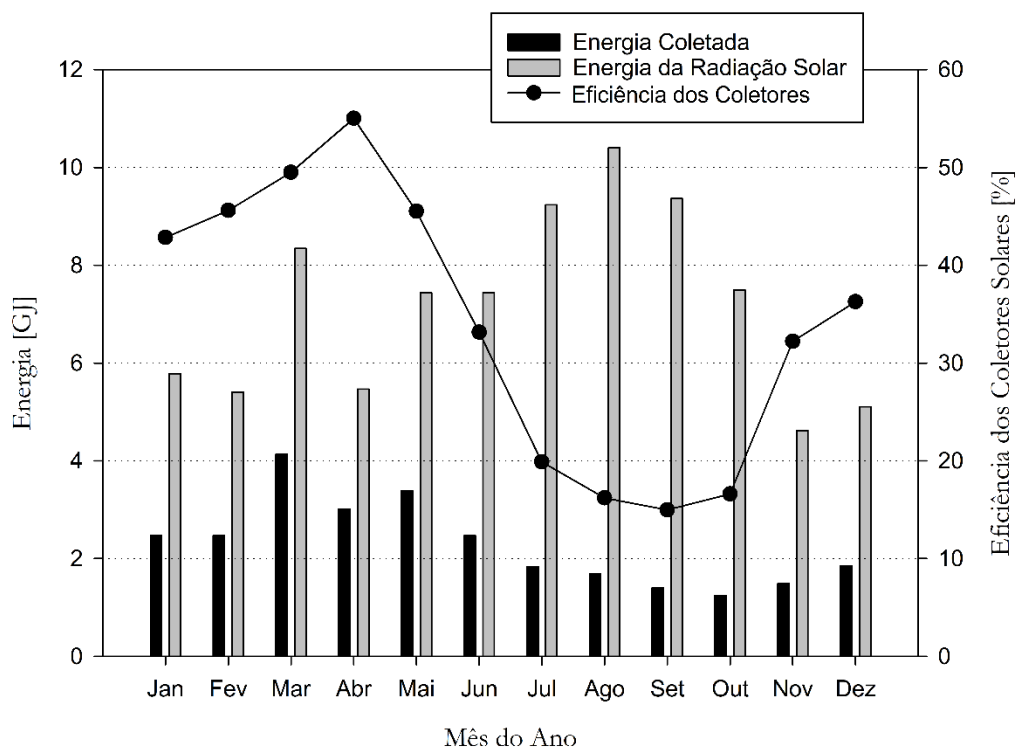


Figura 22 - Energia Coletada, da Radiação Solar e a Eficiência dos Coletores

Conclui-se que a energia total da radiação solar incidente nos coletores solares (Q_i) foi de 86,1 GJ e a energia anual coletada (Q_c) foi de 27,4 GJ. Ao longo de um ano, os coletores solares atingiram o menor valor de eficiência mensal em setembro (15 %) e o maior em abril (55 %). Isto deve-se, à variação de temperatura à entrada e à saída dos coletores solares. Em setembro, apesar de haver uma energia de radiação solar elevada, a temperatura do fluido à entrada dos coletores solares foi superior, devido ao reservatório sazonal estar praticamente todo carregado, diminuindo assim a variação de temperatura nos coletores. Já em abril, obteve-se um valor maior de eficiência pelo motivo oposto. A eficiência média anual dos coletores solares foi de 32 %.

5.2. Reservatório de ASET

Estudou-se também o reservatório de ASET durante o período de funcionamento. A temperatura da zona superior do reservatório sazonal ao longo do ano está apresentada no gráfico da Figura 23.

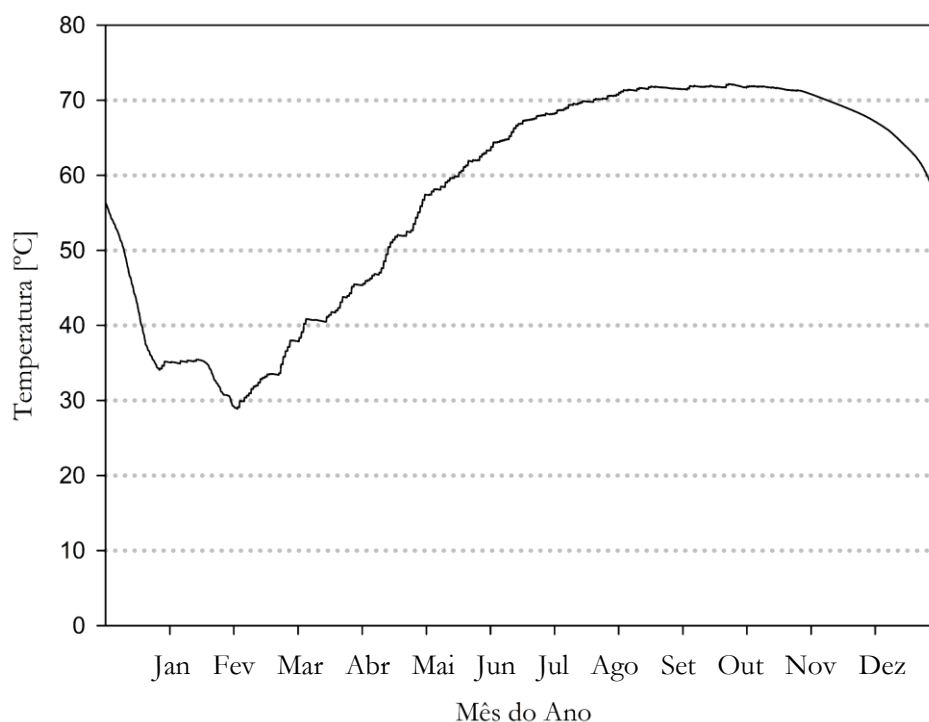


Figura 23 - Temperatura Superior do Reservatório ASET

Concluiu-se que a temperatura mínima ocorreu em fevereiro (29,5 °C) e a temperatura máxima em setembro (71,7 °C). De fevereiro a setembro o reservatório de ASET armazenou mais energia do que perdeu para a envolvente e para o piso radiante, atingindo a sua capacidade máxima em setembro.

Prosseguiu-se com a análise energética do reservatório sazonal e determinou-se a sua eficiência anual (η_{ASET}) através da Equação 10.

$$\eta_{ASET} = \frac{Q_{ASET,out}}{Q_{ASET,in}} \quad (10)$$

Em que $Q_{ASET,in}$ é a energia fornecida ao reservatório de ASET pelo sistema solar térmico [MJ] e $Q_{ASET,out}$ é a energia fornecida pelo reservatório de ASET ao sistema de piso radiante [MJ]. Assim, construiu-se o gráfico da Figura 24.

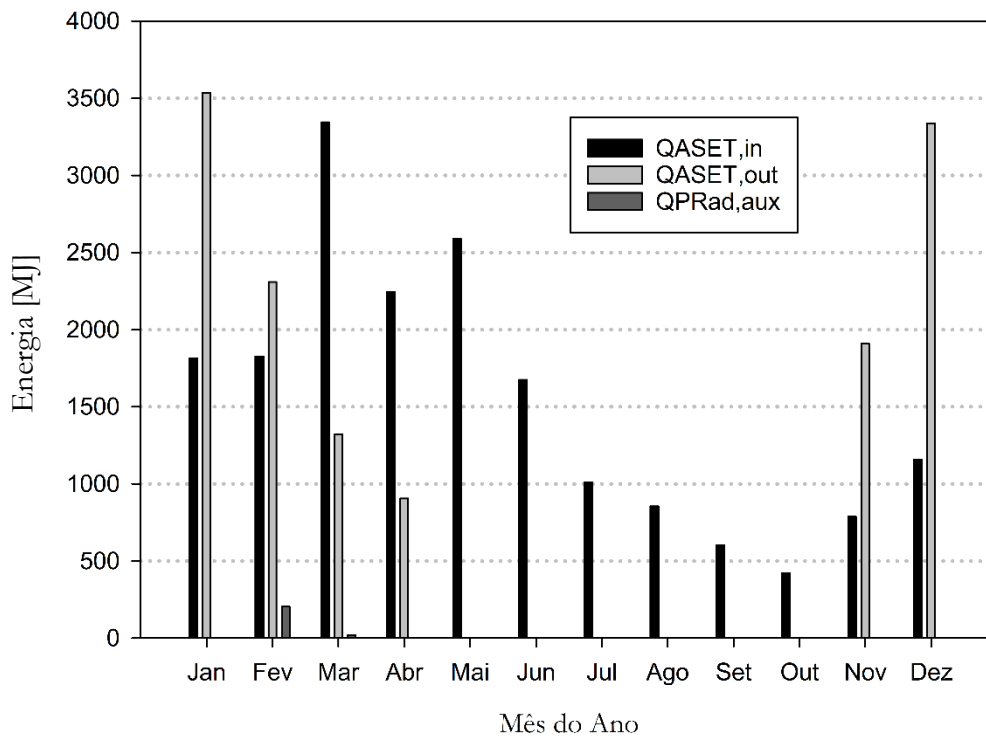


Figura 24 - Energia Solar para o Reservatório ASET, Fornecida e Auxiliar

Conclui-se que o período onde houve maior necessidade de fornecer energia auxiliar ao sistema de piso radiante foi em fevereiro. À medida que o reservatório aumenta de temperatura, menos energia é lhe fornecida. Anualmente, a quantidade de energia fornecida ao reservatório de ASET e fornecida pelo reservatório de ASET para o sistema de piso radiante foram de 18,3 GJ e 13,3 GJ, respetivamente. Assim, a eficiência anual do reservatório sazonal foi de 72,6 %.

5.3. Reservatório de AQS

O reservatório de AQS foi estudado durante o período de funcionamento. A temperatura da zona superior do reservatório de AQS ao longo do ano está apresentada no gráfico da Figura 25.

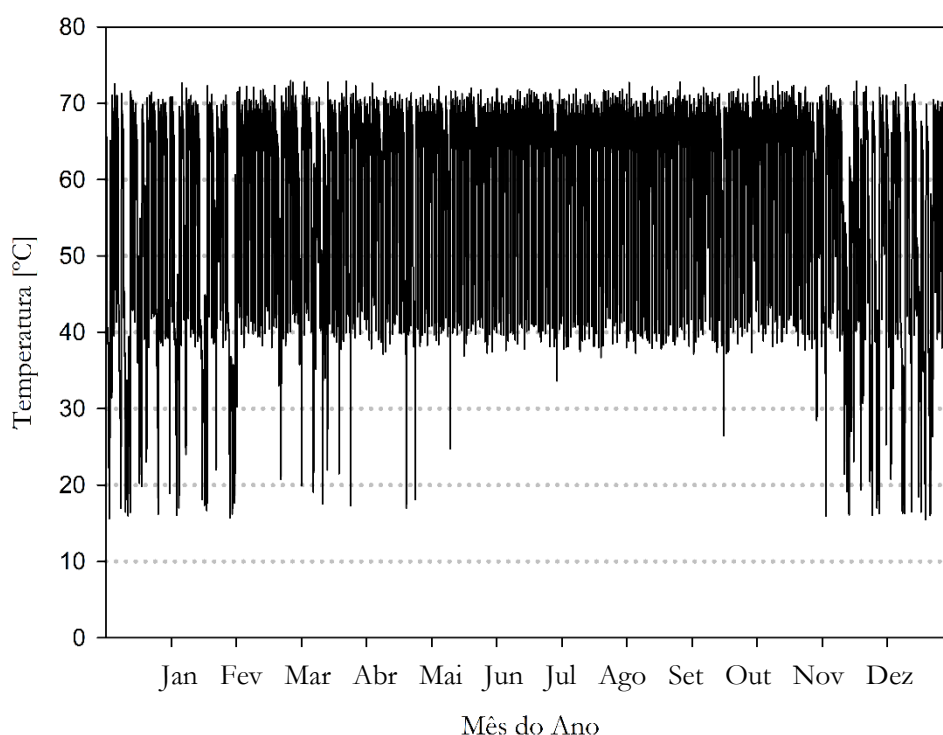


Figura 25 - Temperatura Superior do Reservatório de AQS

Concluiu-se que na maioria do tempo, o reservatório de AQS possui uma temperatura acima dos 45 °C, conseguindo satisfazer a generalidade das necessidades de preparação da água quente sanitária. As temperaturas variaram entre os 16,2 °C e os 74,6 °C.

Prosseguiu-se com a análise energética do reservatório de AQS e determinou-se a sua eficiência anual (η_{AQS}) através da Equação 11.

$$\eta_{AQS} = \frac{Q_{AQS,out}}{Q_{AQS,in}} \quad (11)$$

Em que $Q_{AQS,in}$ é a energia fornecida ao reservatório de AQS pelo sistema solar térmico [MJ] e $Q_{AQS,out}$ é a energia fornecida pelo reservatório na preparação de água quente sanitária [MJ]. Assim, construiu-se o gráfico da Figura 26.

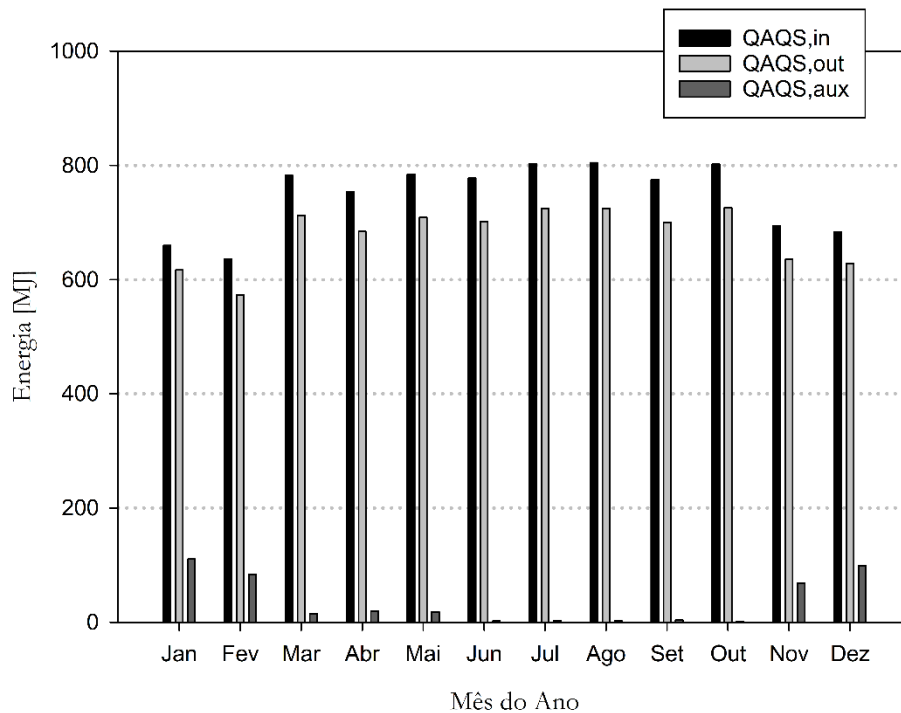


Figura 26 - Energia Solar para o Reservatório de AQS, Fornecida e Auxiliar

Conclui-se que nos períodos de inverno houve uma maior necessidade de fornecer energia auxiliar ao sistema de preparação de AQS. Como o reservatório de AQS possui um ciclo de carga e descarga diário, a eficiência anual é elevada (90,8 %). Anualmente, a quantidade de energia fornecida ao reservatório de AQS e fornecida pelo reservatório à preparação de AQS foram de 9,0 GJ e 8,1 GJ, respetivamente.

5.4. Aquecimento ambiente do modelo da habitação

Por fim, analisou-se o aquecimento ambiente do modelo da habitação. No gráfico da Figura 27, estuda-se a evolução da temperatura da Sala/Cozinha [°C], a temperatura do pavimento [°C], a temperatura exterior [°C] e a energia fornecida pelo piso radiante para o ambiente da Sala/Cozinha [MJ].

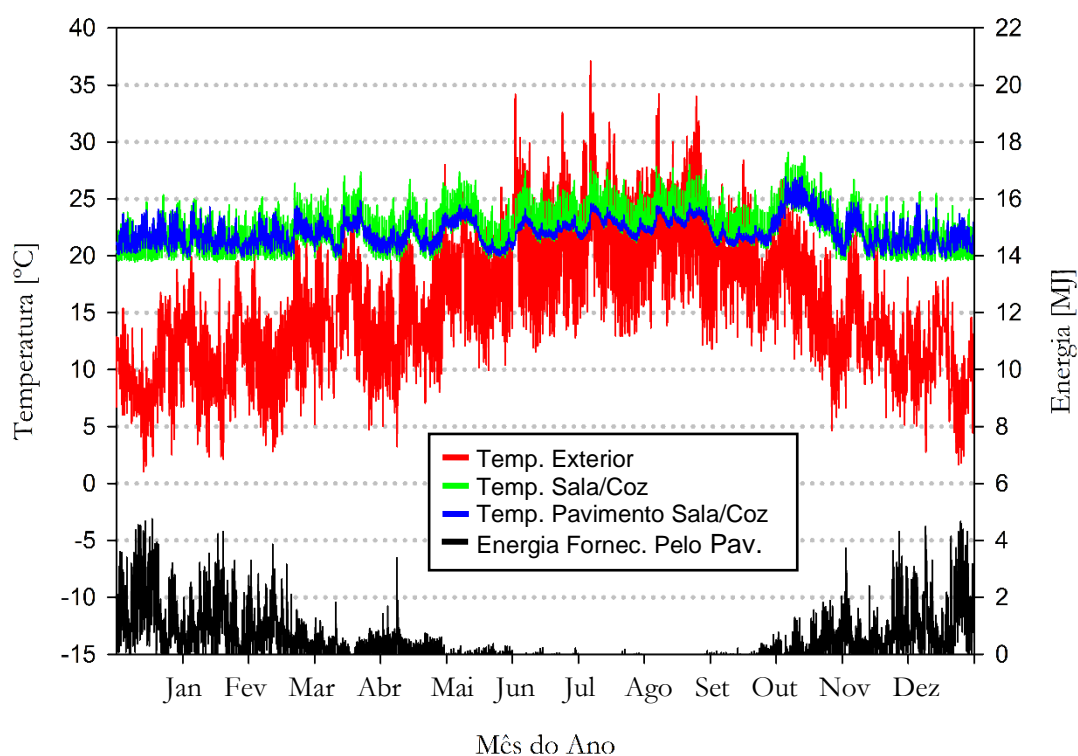


Figura 27 - Temperatura do exterior, da Sala/Cozinha, do Pavimento e Energia Fornecida (1 ano)

Conclui-se que ao longo do ano, a temperatura do ar ambiente da Sala/Cozinha nunca desceu abaixo dos 19,5 °C como pretendido. A energia fornecida pelo piso radiante foi superior nos meses de janeiro e dezembro, uma vez que possuem os dias com temperaturas mais baixas. A temperatura do pavimento no período de aquecimento variou entre os 20 °C e os 25 °C. Estas temperaturas estão dentro da gama de temperaturas da superfície do pavimento aconselhada no jornal ASHRAE (By & Olesen, 2002).

Fez-se uma análise dos dados fornecidos no gráfico anterior entre o dia 20 e 26 de janeiro. Estes valores estão apresentados no gráfico da Figura 28.

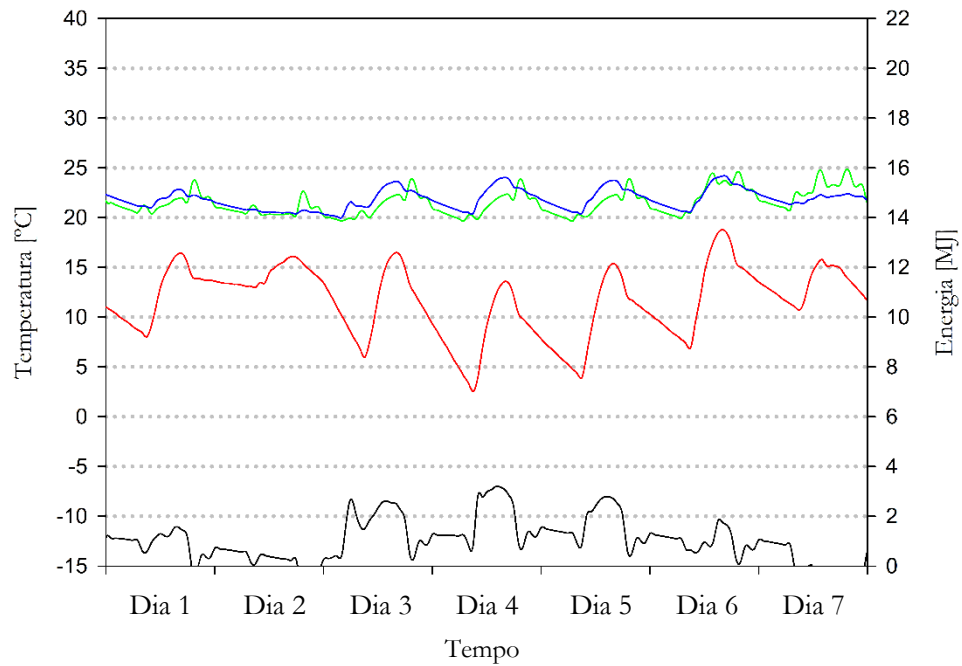


Figura 28 - Temperatura do exterior, da Sala/Cozinha, do Pavimento e Energia Fornecida (7 dias)

Tal como foi constatado na análise do gráfico da Figura 27, a temperatura do pavimento e do ar ambiente da Sala/Cozinha oscilaram entre os 20 °C e os 35 °C. No dia 23 de janeiro (Dia 4) foi quando se registou menor temperatura e consequentemente maior energia fornecida pelo pavimento para o ar do compartimento (3,6 MJ).

6. CONCLUSÃO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver e dimensionar um sistema de armazenamento térmico sazonal adequado ao clima português, recorrendo aos *softwares* SketchUp e TRNSYS. O interesse por este estudo deve-se às habitações neste clima não possuírem elevadas necessidades térmicas, possibilitando obter elevadas frações solares anuais com um volume do reservatório sazonal e um número de coletores, inferiores aos utilizados nos estudos realizados noutros países.

Com um volume do reservatório sazonal de 40 m³ e 12 coletores (25,1 m²), atingiu-se uma fração solar anual para a preparação de AQS de 95 %, para o aquecimento ambiente do modelo de habitação de 98,3 % e uma fração solar anual total de 97 %. Verificou-se para este caso que os coletores solares possuíram uma eficiência média anual de 34 %, o reservatório de ASET de 72,6% e o reservatório de AQS de 90,8 %.

Os resultados obtidos neste estudo em comparação com os referidos no estado da arte foram satisfatórios. Nas simulações de Hugo et al. (2010) e de Beausoleil-Morrison et al. (2019) as necessidades energéticas foram 75 % maiores que as do estudo apresentado neste trabalho. Isto deve-se à simulação ter-se realizado num clima diferente. Assim sendo, foi espectável que os resultados obtidos nesta dissertação fossem melhores. Com volumes do reservatório sazonal semelhantes ao estudado aqui, conseguiram atingir valores elevados de fração solar, mas com o quase o dobro da área de coletores solares. Outro aspeto favorecedor, é o tipo de coletores solares utilizados neste trabalho serem mais baratos, apesar de menos eficientes, do que os utilizados nas simulações de Hugo et al. (2010) e de Beausoleil-Morrison et al. (2019).

Em suma, o sistema de armazenamento térmico sazonal poderá ser uma solução viável para o clima português. Mas tal como foi constatado pelo Meister e Beausoleil-Morrison (2021), há alguma discrepância nos resultados obtidos na simulação e os obtidos experimentalmente. Por isso, recomenda-se que se faça uma experimentação deste sistema para a obtenção de valores mais reais.

Para que a pesquisa se tornasse mais completa, seria recomendável um estudo da viabilidade económica do sistema e a otimização das áreas dos envidraçados e da espessura do isolamento da envolvente de modo a minimizar as perdas para o exterior. Também o

sistema apresentado poderá ser otimizado para obter valores mais interessantes, como por exemplo, a implementação de um controlador que diminuísse a energia libertada pelo piso radiante em períodos de não ocupação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adam D. Wills, B.A.Sc. 2013. “Design and co-simulation of a seasonal solar thermal system for a Canadian single family detached house”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica e Aeroespacial – Universidade de Carleton, Ottawa.

Ribeiro, V. 2014. “Dimensionamento de instalações solares térmicas em edifícios - Projeto e análise de viabilidade económica”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - especialização em construções civis – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Barnaby, C. S. e Crawley, D. B., 2011. “Building Performance Simulation for Design and Operation”, cap. 3. Weather data for building performance simulation. Spon Press.

Braun, J., Klein, S., e Mitchell, J., 1981. “Seasonal storage of energy in solar heating,” *Solar Energy*, vol. 26, no. 5, 403–411.

Beausoleil-Morrison, I., Kemery, B., Wills, A.D., Meister, C., 2019. “Design and simulated performance of a solar-thermal system employing seasonal storage for providing the majority of space heating and domestic hot water heating needs to a single-family house in a cold climate.” *Solar Energy* 191. 57-69.

Clarke, J., Colclough, S., Griffiths, P., McLeskey Jr, J.T., 2014. “A passive house with seasonal solar energy store: in situ data and numerical modelling.” *International Journal of Ambient Energy* 35, 37–50.

Colclough, S., McGrath, T., 2015. “Net energy analysis of a solar combi system with seasonal thermal energy store.” *Applied Energy* 147, 611–616.

Direção Geral da Energia e Geologia. (s.d.). Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios (6476-H/2021).

Estatísticas da Construção e Habitação. 2011. Estatísticas Oficiais. Instituto Nacional de Estatística. Edição 2012.

Hugo, A., Zmeureanu, R., Rivard, H., 2010. “Solar combisystem with seasonal thermal storage.” *Journal of Building Performance Simulation* 3, 255–268.

International Energy Agency (IEA), “SHC: Task 7 – Central Solar Heating Plants With Seasonal Storage.” Accessible online at <http://archive.iea-shc.org/task07/>.

Kramer, W., Oliva, A., Stryi-Hipp, G., Kobelt, S., Bestenlehner, D., Drück, H., Bühl, J., Dasch, G., 2014. “Solar-active-houses–analysis of the building concept based on detailed measurements.” *Energy Procedia* 48, 895–903.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2006). Coeficientes de Transmissão de Elementos da Envolvente. (ITE 50). LNEC. . I.1 - I.15 e III.1 – III.7.

Lu, X., Liu, H., e Wu, Y. 2019. “Acceptable surface temperature of floor radiant heating system based on thermal comfort study in southern China.” E3S Web of Conferences 80, 03007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198003007>.

Ma, Z., Bao, H., Roskilly, A.P., 2018. “Feasibility study of seasonal solar thermal energy storage in domestic dwellings in the uk.” Solar Energy 162, 489–499. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.013>.

Meister, C. e Beausoleil-Morrison, I., 2021. “Experimental and modelled performance of a building-scale solar thermal system with seasonal storage water tank.” Solar Energy 222. 146-159

Nick Connor (2019, 22 de maio), “What is Thermal Conductivity of Polyurethane Foam - Definition”, Acedido em 17 de maio de 2022, em: <https://www.thermal-engineering.org/what-is-thermal-conductivity-of-polyurethane-foam-definition/>

Olesen, B. W., 2002. Radiant Floor Heating In Theory and Practice. ASHRAE Journal, 19–24.

Pinamonti, M., Beausoleil-Morrison, I., Prada, A., Baggio, P., 2020. “Water-to-water heat pump integration in a solar seasonal storage system for space heating and domestic hot water production of a single-family house in a cold climate.” Solar Energy 213, 300–311.

Pinel, P., Cruickshank, C. A., Beausoleil-Morrison, I., e Wills, A., 2011. “A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 7. 3341–3359.

Sillman, S., 1981. “Performance and economics of annual storage solar heating systems,” Solar Energy, vol. 27, no. 6, 513–528.

Standing Standard Project Committee. 2021. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016). ASHRAE.

ANEXO A**Tabela 13 - Especificações Técnicas do Modelo Vulcano FCC-2S**

Área Total [m ²]	2,09
Área de Abertura [m ²]	1,936
Eficiência Ótica	0,684
Coefficiente de perdas linear [W/m ² .K]	3,64
Coefficiente de perdas secundário [W/m ² .K ²]	0,012
Capacitância [J/m ² K]	6044
Caudal Nominal [kg/h.m ²]	50

APÊNDICE A

Tabela 14 - Necessidades da Habitação

Mês	Q_{AQS} [MJ]	Q_{PRad} [MJ]
Jan	716,4	3539,5
Fev	647,1	2515,7
Mar	716,4	1350,0
Abr	693,3	906,9
Mai	716,4	0,0
Jun	693,3	0,0
Jul	716,4	0,0
Ago	716,4	0,0
Set	693,3	0,0
Out	716,4	0,0
Nov	693,3	1915,6
Dez	716,4	3342,6
Total	8435,0	13570,2

Tabela 15 - Valores da Energia Auxiliar em Função do Volume AQS

Volume [L]	$Q_{AQS,aux}$ [MJ]	$Q_{PRad,aux}$ [MJ]	$Q_{aux,total}$ [MJ]
100	1512,74	1336,59	2849,33
110	1074,79	1684,6	2759,39
120	764,08	1959,4	2723,48
130	586,45	2153,17	2739,62
140	505,65	2304,14	2809,79
150	445,16	2436,6	2881,76
160	390,88	2560,28	2951,16
180	304,09	2769,61	3073,7
200	240,57	2976,11	3216,68

Tabela 16 - Valores da Energia Auxiliar em Função da Espessura do Isolamento

Espessura [cm]	$Q_{AQS,aux}$ [MJ]	$Q_{ASET,aux}$ [MJ]	$Q_{aux,total}$ [MJ]
0	764,1	13570,25	14334,35
10	764,1	10440,93	11205,03
20	764,11	5562,28	6326,39
30	764,09	3240,8	4004,89
40	764,08	1959,4	2723,48
50	764,08	1140,87	1904,95
60	764,07	571,62	1335,69

Tabela 17 - Valores da Energia Auxiliar em Função de H/D

H/D	$Q_{AQS,aux}$ [MJ]	$Q_{ASET,aux}$ [MJ]	$Q_{aux,total}$ [MJ]
0,25	764,08	1959,4	2723,48
0,50	764,09	1391,82	2155,91
0,75	764,09	1219,16	1983,25
1	764,09	1197,44	1961,53
1,1	764,09	1246,99	2011,08
1,25	764,09	1327,06	2091,15