



C •

FCTUC

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo de sustentabilidade energética e ambiental de um edifício residencial de arquitetura não convencional: *Earthship***

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**Francisco Gouveia Sinde Filipe**

**Orientadores**

**Professor Doutor José Joaquim da Costa**

**Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo  
Professor da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar  
Professor da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites  
Professor da Universidade de Coimbra

**Coimbra, setembro, 2016**



“You have to empty your mind. Be formless, shapeless, like water.  
When you put water in to a cup, it becomes the cup.  
If you put water in to a bottle, it becomes the bottle.  
You put water in a teapot, it becomes the teapot.  
Water can flow or it can crash.  
Be water my friend.”

(Bruce Lee, in the great interview 1970)





Ao meu Pai.

Onde quer que estejas, estarás sempre comigo.



## Agradecimentos

“Existem pessoas que tornam a nossa caminhada mais significativa, pela companhia, pelo apoio, pelo carinho e porque nos tornam melhores...”

Por tudo isto não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e agradecimento a alguns em particular.

A ti Mãe, um especial carinho por seres tão presente e dedicada na minha vida e porque sem ti não teria a oportunidade de lutar pelos meus sonhos e objetivos.

A ti Filipa, por todo o incentivo, carinho e companheirismo durante todo este percurso. Obrigado por sempre acreditares nas minhas capacidades e por todo o amor e dedicação.

Aos Professores José Costa e Adélio Gaspar pela disponibilidade, conselhos e orientação ao longo deste trabalho.

Ao Professor Francisco Lamas pela paciência, partilha de conhecimento e pelo seu precioso tempo.

Ao Engenheiro Miguel Almeida pelo incentivo, sugestões e ajuda.

À Arquiteta Rachel Prinz pela cedência de parte do trabalho da sua vida.

À Ana Pinto dos Santos pela ajuda, tempo e equipamento.

Ao João Beltrão pelas dicas no modelo de simulação.

Ao Pedro Geraldo pela força, sugestões e companhia.

Ao Rui Vasques pelos ensinamentos de *design* e ideias.

Ao Jorge Ribeiro pelos conselhos incentivos, pelas conversas e força.

Ao Aitor pela alegria, energia e boa disposição em momentos de desânimo.

Obrigado do coração a todos os que me acompanharam neste percurso!

Francisco Sinda Filipe



## Resumo

Este trabalho descreve a investigação e análise de desempenho energético de uma arquitetura não convencional, com origem e desenvolvida nos EUA há cerca de 40 anos, conhecida como *Earthship*, um conceito onde se reivindica que não é necessário recorrer a sistemas ativos de aquecimento e arrefecimento.

Com este estudo pretende verificar-se a viabilidade de sustentabilidade e eficiência energética e ambiental de um edifício residencial e apurar se, com este tipo de construção, é possível garantir o conforto térmico, respeitando, para o coeficiente de transmissão térmica,  $U$ , os requisitos da legislação em vigor em Portugal.

Nesta dissertação foi elaborado um modelo de cálculo de resistências térmicas e coeficiente de transmissão térmica de elementos construtivos não homogéneos para verificação perante a legislação. Recorreu-se a um software de simulação dinâmica de edifícios, o *Energy Plus*, de forma a ser realizada uma previsão do comportamento térmico da habitação para o clima de Arganil. Foi criado um modelo de estudo que segue os princípios e características desta tecnologia de construção, onde foram analisados os contributos para uma melhor eficiência energética, as características de *design*, os detalhes e os pormenores construtivos.

O modelo criado para o cálculo de resistências térmicas dos elementos não homogéneos mostra que uma parede com garrafas tem um coeficiente de transmissão térmica inferior a uma parede com latas e que ambas, com isolamento pelo exterior, respeitam os valores de referência, para o  $U$ , da legislação, para paredes exteriores.

As simulações energéticas apresentam algum sobreaquecimento no verão, apesar de durante o período de ocupação, nos quartos, se verificarem temperaturas de conforto térmico e no inverno haver necessidade de recorrer a um sistema de aquecimento. Em dias de meia estação, enquanto que em setembro as temperaturas estão dentro dos parâmetros de conforto, em março há necessidade de aquecimento nos quartos, nos períodos noturnos.

**Palavras-chave:** *Earthship*, Sustentabilidade, Desempenho térmico, Simulação energética, *Energy Plus*, Casas solares passivas.



## Abstract

This study illustrates the investigation and analysis of the energy performance of a radical and unconventional architecture, which was originally developed in the USA, 40 years ago, known as earthship: a concept which affirms that it is unnecessary to rely on current systems of heating and cooling.

This research attempts to verify the viability of sustainability, energy and environmental efficiency of a residential building and to prove that, with this type of construction, it is possible to guarantee thermal comfort while respecting the requirements for the heat transfer coefficient,  $U$ , of the legislation in force in Portugal.

In this dissertation, was developed a model, which calculates thermal resistance and heat transfer coefficient in non-homogeneous construction elements, to verify with the legislation. This work relies upon energy simulation software, Energy Plus, to simulate thermal residential behaviour under the climate of Arganil. A study model which adheres to the principles and characteristics of this construction technology was created, in which the contributions for better energy efficiency, design characteristics, and construction details will be analysed.

The developed model for thermal resistances shows that a bottle walls have a lower heat transfer coefficient than can walls and both types of walls with exterior insulation respect the reference  $U$  values of the legislation for exterior walls.

According to the Energy Plus thermal model, earthships cannot always provide a comfortable living environment solely through passive solar heating. The energy simulations present some overheating in summer despite during occupation periods in rooms thermal comfort temperatures are achieved and in winter a heating system will be needed. In mid-season days, while in September temperatures are within of thermal comfort parameters, in march heating in rooms will be needed for night periods.

**Keywords** Earthship, Sustainability, Thermal behaviour, Energy simulation, Energy Plus, Passive solar housing.





## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas.....	xv
Simbologia .....	xv
Siglas .....	xvi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Ferramentas .....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	2
2. ARQUITETURA SUSTENTÁVEL .....	1
2.1. Conceitos e princípios da arquitetura <i>Earthship</i> .....	1
2.1.1. Construção com materiais locais e naturais .....	2
2.1.2. Climatização passiva.....	2
2.1.3. Produção de Energia (microgeração).....	4
2.1.4. Aproveitamento de águas pluviais .....	5
2.1.5. Tratamento de Águas Residuais.....	7
2.1.6. Produção de Alimentos .....	7
2.2. Alguns exemplos de <i>Earthships</i> .....	8
2.3. Modelo Global, o projeto <i>Earthship Biotecture</i> .....	11
2.3.1. Tipologia, caracterização e orientação.....	11
2.3.2. Elementos construtivos .....	11
2.3.3. Climatização passiva.....	13
2.3.4. Sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP).....	16
2.4. Conforto térmico: estudos anteriores .....	18
2.5. Fragilidades gerais de <i>Earthships</i> .....	21
3. CASO DE ESTUDO – ANÁLISE ENERGÉTICA.....	25
3.1. Apresentação e descrição do projeto.....	25
3.1.1. Edifício e sua tipologia .....	25
3.1.2. Implantação e envolvente natural .....	26
3.2. Modelação de simulação.....	27
3.2.1. Modelo geométrico .....	28
3.2.1. Condições de fronteira .....	29
3.2.1. Soluções e elementos construtivos.....	29
3.2.2. Ganhos Internos .....	37
3.2.3. Climatização passiva.....	40
3.3. Aproveitamento de recursos naturais .....	43
3.3.1. Águas pluviais e águas residuais.....	44
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	47
4.1. Resistências térmicas de elementos não homogéneos .....	47

4.2.	Resultados da simulação .....	49
4.1.	Aproveitamento de águas pluviais .....	55
4.2.	Sugestões de melhoria/otimização .....	57
4.2.1.	Elementos Construtivos .....	57
4.2.2.	Climatização .....	59
4.2.3.	Equipamentos.....	61
4.2.4.	Medidas para uma utilização mais sustentável da água.....	61
5.	CONCLUSÕES .....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65
	ANEXO A.....	71
	ANEXO B.....	73
	ANEXO C.....	75
	APÊNDICE A.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. [a) Parede de latas [9]; b) Parede de garrafas [10].	2
Figura 2.2. Consumo de eletricidade no setor residencial nos Estados Unidos da América e Reino Unido [12].	4
Figura 2.3. Distribuição do consumo de eletricidade no setor residencial em Portugal [13].	4
Figura 2.4. Exposição dos painéis solares e fotovoltaicos de um <i>earthship Global Model</i> em Taos [15].	5
Figura 2.5. Exemplo do sistema de aproveitamento de água na cobertura [18].	6
Figura 2.6. Interior da estufa de um <i>Earthship</i> [23].	8
Figura 2.7. Modelos iniciais de teste de Michael Reynolds [24][25].	8
Figura 2.8. a) Nautilus <i>Earthship</i> , Abril 1997, por Eric Draper [26] (b) Planta <i>Nautilus Earthship</i> [27].	9
Figura 2.9. [a) <i>Package Earthship</i> (T1); b) Planta [28].	9
Figura 2.10. <i>Vaulted Global Model</i> [29] [30].	9
Figura 2.11. Simple Survival Model [23].	10
Figura 2.12. <i>Global Model</i> [23].	10
Figura 2.13. <i>Brighton Earthship</i> [23]; <i>Scotland Earthship</i> [23].	10
Figura 2.14. <i>The flower Earthship</i> , Serra Leoa [25].	10
Figura 2.15. <i>Earthship Global Model</i> em Taos [23].	11
Figura 2.16. (a) Parede de pneu de um <i>earthship</i> em construção [23]; (b) Parede interior [23].	12
Figura 2.17. Cobertura de um EGM [31].	12
Figura 2.18. Amortecimento da temperatura interior [34].	14
Figura 2.19. Corte representativo do efeito da radiação solar num dia de inverno (fonte: adaptada [17]).	14
Figura 2.20. Corte representativo do fluxo do ar num dia de verão (fonte: adaptada[38]).	16
Figura 2.21. (a) Esquema dos sistemas energéticos [23]; (b) Modulo de gestão de água [25].	18
Figura 2.22. Esquema de reutilização de águas cinzentas [25].	18
Figura 3.1. Alçado sul.	25
Figura 3.2. a) Alçado poente; b) Alçado nascente.	26
Figura 3.3. Planta do edifício.	26

Figura 3.4. Dados estação udométrica de Coja [52]. .....	27
Figura 3.5. Modelo tridimensional do <i>Google SketchUp</i> . .....	28
Figura 3.6. Planta com zoneamento. ....	28
Figura 3.7. Simplificação das paredes de pneus [45].....	29
Figura 3.8. Corte transversal dos elementos construtivos considerados no edifício. ....	30
Figura 3.9. Corte esquemático de uma porção de parede com latas. ....	31
Figura 3.10. Corte esquemático de uma porção de parede com garrafas. ....	31
Figura 3.11. Cortes representativos das densidades de módulos de uma porção de parede com 1m <sup>2</sup> de área.....	33
Figura 3.12. Corte da parede de latas com representação dos percursos térmicos a, b e c..	34
Figura 3.13. Corte da parede de garrafas com ilustração dos percursos térmicos a, b e c...	35
Figura 3.14. Perfil de ocupação semanal. ....	39
Figura 3.15. Perfil de utilização de iluminação. ....	39
Figura 3.16. Perfil de utilização de equipamentos. ....	40
Figura 3.17. Corte representativo do comportamento térmico num dia de inverno. ....	42
Figura 3.18. Corte representativo do comportamento térmico à noite. ....	42
Figura 3.19. Corte representativo do comportamento térmico num dia de verão.....	43
Figura 3.20. Esquema ilustrativo do SPRAC.....	45
Figura 4.1. Comparação da $R_{eq}$ e do $U_{eq}$ nas paredes com latas ou garrafas para diferentes densidades de módulos. ....	47
Figura 4.2. Variação da temperatura média horária, $T_{mh}$ , no dia mais quente do ano.....	50
Figura 4.3. Variação da $T_{mh}$ , no dia mais quente do ano, com renovação de ar.....	50
Figura 4.4. Variação da $T_{mh}$ , no dia mais quente do ano. ....	51
Figura 4.5. Variação da $T_{mh}$ , no dia mais frio do ano.....	52
Figura 4.6. Variação da $T_{mh}$ , no dia 20 de março, sem dispositivos de ventilação. ....	53
Figura 4.7. Variação da $T_{mh}$ , no dia 20 de março, com ventilação na sala.....	53
Figura 4.8. Variação da $T_{mh}$ , no dia 22 de setembro, sem ventilação.....	54
Figura 4.9. Variação da $T_{mh}$ , no dia 22 de setembro, com ventilação. ....	55
Figura 4.10. Exemplos de paredes com sacos de terra (superadobe) e <i>cordwood</i> [62][63].	59
Figura 0.1. Evolução da $T_{mh}$ , no dia 20 de junho, sem dispositivos de ventilação.....	77
Figura 0.2. Variação da temperatura média horária, $T_{mh}$ , no dia 20 de junho.....	78
Figura 0.3. Variação da temperatura média horária, $T_{mh}$ , no dia 21 de dezembro. ....	78

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação dos dispositivos de aquecimento e arrefecimento. ....	3
Tabela 3.1. Zoneamento e áreas dos espaços.....	29
Tabela 3.2. Propriedades dos materiais envolvidos.....	32
Tabela 3.3. Coeficiente de transferência de calor dos elementos envolventes. ....	36
Tabela 3.4. Coeficiente de transferência de calor das paredes exteriores da AC. ....	37
Tabela 3.5. Características dos envidraçados sem consideração das resistências térmicas superficiais.....	37
Tabela 3.6. Dados referentes à iluminação.....	39
Tabela 3.7. Levantamento dos equipamentos presentes no caso de estudo.....	40
Tabela 3.8. Distribuição dos equipamentos nos espaços.....	40
Tabela 3.9. Coeficiente de <i>runoff</i> [57].....	44
Tabela 4.1. Valores de $R_t$ e $U_t$ para as diferentes tipos e densidades de módulo.....	48
Tabela 4.2. Comparação do volume de captação e volume consumido.....	56
Tabela 4.3. Comparação do volume de captação e volume consumido.....	56
Tabela 4.4. Características da solução construtiva de melhoria para a cobertura.....	58
Tabela 4.5. Características das soluções de melhoria para o pavimento.....	58



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A$  – Área de secção transversal [m<sup>2</sup>]

$A_i$  – Área de secção transversal do elemento  $i$  [m<sup>2</sup>]

$A_{p_j}$  – Área de uma parede  $j$  [m<sup>2</sup>]

$A_p$  - Área interior útil de pavimento [m<sup>2</sup>]

$C_{p_{eq}}$  – Calor específico do material equivalente [J/kg.K]

$C_{p_i}$  – Calor específico do elemento  $i$  [J/(kg.K)]

$d_{extlata}$  – Diâmetro exterior da lata [m]

$d_{extgarrafa}$  – Diâmetro exterior da garrafa [m]

$d_{ext}$  – Diâmetro exterior de um módulo [m]

$e_i$  – Espessura do elemento  $i$  [m]

$h_{lata}$  – Altura de uma lata [m]

$h_{garrafa}$  – Altura da garrafa [°C]

$I_t$  – Inércia térmica de um edifício [kg/m<sup>2</sup>]

$k_i$  - Condutibilidade térmica do elemento  $i$  [W/(m.K)]

$M_{s_i}$  - Massa superficial útil do elemento  $i$  [kg/m<sup>2</sup>]

$N_{módulos_j}$  – Número de módulos de uma parede  $j$  [módulos]

$Q$  – Potência térmica [W]

$r$  - Fator de redução da massa superficial útil

$R_i$  - Resistência térmica do elemento  $i$  [(m<sup>2</sup>K)/ W]

$R_t$  – Resistência térmica total da parede [(m<sup>2</sup>K)/ W]

$S_i$  - Área da superfície interior do elemento  $i$  [m<sup>2</sup>]

$T_{mh}$  – Temperatura média horária [°C]

$U$  – Coeficiente global de transferência de calos [W/(m<sup>2</sup>K)]

$V_i$  – Volume do elemento  $i$  [m<sup>3</sup>]

$\Delta T$  – Diferença de temperatura [°C]

$\rho_i$  – Massa volúmica do elemento  $i$  [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{eq}$  – Massa volúmica da camada de material equivalente [kg/m<sup>3</sup>]

$\phi_i$  – Fator de ponderação volumétrico do material  $i$

## Siglas

AC – Corrente elétrica Alternada: 110~220V

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

ADENE – Agência para a Energia

AS – Arquitetura Sustentável

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CAD – *Computer Aided Design*

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

DB – *Design Builder*

DC – Corrente elétrica contínua: 12V

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DGE – Direção Geral de Energia

EB – *Earthship Biotechure*

EGM – *Earthship Global Model*

EP – *Energy Plus*

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

EUA – Estados Unidos da América



FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

GEE – Gases de Efeito de Estufa

GTC – Gestão Técnica Centralizada

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

IS – Instalações sanitárias

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

PDM – Plano Diretor Municipal

PET – Politereftalato de Etileno

PUR – Poliuretano

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

SAAP – Sistema de Aproveitamento das Águas das Chuvas

SPRAC – Sistema de Reutilização de Águas Residuais Cinzentas



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Devido ao crescimento populacional da humanidade, o Homem é confrontado com o dilema de como viver sustentável num planeta finito. Em consequência do aumento da população, há uma utilização excessiva de energia proveniente de fontes fósseis que produz elevadas emissões de gases de efeito de estufa (GEE), o que provoca alterações climáticas do planeta e reduz o seu tempo de vida. Para além disso, os preços da energia final têm vindo a aumentar nos últimos anos e as previsões indicam que o aumento continuará. Perante esses impactos, a sociedade atual em geral vê-se confrontada com dificuldades económicas. Este conjunto de problemas obriga a recorrer a soluções sustentáveis, com um menor impacto ambiental, menos dispendiosas e com base em energias renováveis de modo a atingir um estado de “desenvolvimento sustentável”. O termo “desenvolvimento sustentável” foi um oxímoro que resultou de inúmeras interpretações que justificaram a ligação de ambos, “desenvolvimento” e “sustentabilidade” [1].

Segundo a comissão *Brundtland* (1987), um desenvolvimento que garante as necessidades das gerações presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas, é um desenvolvimento sustentável [1].

Esta dissertação surge de um interesse pelo ambiente e pela procura futura de uma gestão sustentável de recursos, ou seja, um “desenvolvimento sustentável”.

Neste estudo é analisada uma arquitetura não convencional, já testada e utilizada, que teve início nos EUA (Estados Unidos da América) há cerca de 40 anos, denominada *earthship*. Esta tecnologia foi desenvolvida pelo arquiteto americano Michael Reynolds com base em 3 objetivos:

1. Criar uma arquitetura sustentável;
2. Dependere apenas de fontes de energia naturais;
3. Ter viabilidade económica, podendo ser construída por qualquer pessoa.

Um *earthship* é um edifício residencial autónomo, construído com recursos naturais, madeira e terra, e reciclando materiais desperdiçados, pneus, garrafas de vidro e latas,

tornando-se singular porque visa o fechar de ciclos, com reduzida produção de resíduos durante a vida do edifício (fase de uso). “O lixo de um é o ouro de outros.”

Estas habitações utilizam sistemas de ventilação passivos baseados em fenómenos naturais, como a convecção natural para aquecer e arrefecer os espaços interiores, incorporando um circuito de tratamento e limpeza das águas da chuva que fornece água potável. Fontes de energia renovável são utilizadas recorrendo à tecnologia moderna.

## **1.2. Ferramentas**

Dada a diversidade dos aspetos em estudo, durante a elaboração deste trabalho recorreu-se a diversas ferramentas já de domínio do autor.

Para a criação dos desenhos CAD (*Computer Aided Design*) e 3D foi utilizada a versão educativa do software *Graphisoft Archicad* [2]. A criação e edição de imagens ilustrativas e peças de arquitetura desenhadas foram desenvolvidas com o auxílio dos programas *Solid Works*, *Adobe Photoshop* e *Adobe Illustrator* [3][4][5].

Através do software *Google SketchUp* com o *plug-in Open Studio*, foi realizado um modelo tridimensional do edifício com vista ao estudo posterior do desempenho energético do edifício recorrendo ao programa de simulação energética *Energy Plus*. O EP (*Energy Plus*) é um software de simulação dinâmica energética de edifícios partilhado pelo governo americano (*United States Department of Energy*) [6]. Este programa permite fazer uma avaliação detalhada do comportamento energético de edifícios, com as mais variadas características. Os cálculos e tratamento de dados foram realizados com recurso ao *Microsoft Excel* [7].

## **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No segundo capítulo é apresentado o conceito em estudo (*earthship*) e são identificados os aspetos mais relevantes. No terceiro capítulo é descrito o caso de estudo e todas as características relacionadas com o desempenho energético do mesmo. No quarto capítulo são apresentados os resultados relativamente ao capítulo anterior, bem como a sua análise. Por fim, no quinto e último capítulo são expostas as conclusões finais deste estudo.

## 2. ARQUITETURA SUSTENTÁVEL

A arquitetura sustentável é considerada uma forma de arquitetura onde a prioridade máxima é a prevenção do impacto ambiental, utilizando recursos naturais e sistemas de construção de forma a minimizar esse impacto e otimizar os ganhos sociais.

Os princípios da AS (Arquitetura Sustentável) incluem as condições climáticas, a hidrografia, os ecossistemas da envolvente e seguem processos de construção melhorados, com o propósito de atingir o nível máximo de conforto térmico e qualidade do ar, usando energias renováveis disponíveis, sem recurso a sistemas mecânicos de ventilação, aquecimento ou arrefecimento, também visto como arquitetura solar passiva.

Neste tipo de arquitetura é dada particular relevância à gestão consciente da água, em que o aproveitamento das águas pluviais e o tratamento das águas residuais para reutilização são fundamentais.

Os materiais utilizados para a construção devem ser ecológicos ou que a sua produção provoque o menor impacto ambiental possível. Habitualmente são usados blocos de terra comprimida, adobe, tintas naturais, madeira, pneus usados, latas, garrafas de vidro e cartão.

Os resíduos da obra devem ser previamente separados, para facilitar a sua posterior reutilização ou reciclagem.

### 2.1. Conceitos e princípios da arquitetura *Earthship*

De acordo com a *Earthship Bioteecture*, seis princípios devem ser seguidos [8]:

1. Construção com materiais desperdiçados e naturais;
2. Climatização passiva;
3. Produção de energia;
4. Aproveitamento de águas pluviais;
5. Tratamento de águas residuais;
6. Produção de alimentos.

Estes princípios são descritos e analisados nas secções que se seguem.

### 2.1.1. Construção com materiais locais e naturais

Um *earthship* deve usar materiais indígenas, ou seja, da área local de construção, com o intuito de reduzir custos, não só dos materiais como do seu transporte. Neste tipo de habitação, as paredes envolventes são construídas com camadas de pneus preenchidos, com terra compactada, empilhados intercaladamente. Os pneus formam uma parede contínua de suporte de carga extremamente resistentes. A massa de um pneu cheio com terra compactada pode atingir cerca de 150 kg. O cartão é usado como base/tampa para manter a terra no interior do pneu, e as latas de alumínio e garrafas de vidro e/ou PET (Politereftalato de Etileno) são usadas na construção das paredes interiores ou paredes que não estejam sujeitas a carga. Estas paredes são feitas recorrendo a garrafas e latas, alternadas com uma argamassa de terra e cimento, com o objetivo de minimizar o uso de tijolos, cimento (ou betão) e conseguir um bom isolamento térmico e acústico.

No caso particular das garrafas de vidro, depois de previamente lavadas e cortadas, são unidas duas bases de forma a permitir a passagem da luz. As garrafas de vidro, podem ser vistas como isolamento térmico devido à geração de pequenas caixas de ar nas paredes e são usadas como elemento decorativo, semelhante ao tijolo de vidro, possibilitando a criação de variados *designs*, como ilustrado na Figura 2.1.

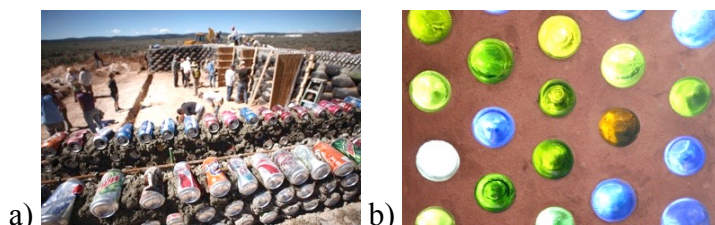


Figura 2.1. [a] Parede de latas [9]; b) Parede de garrafas [10].

### 2.1.2. Climatização passiva

No inverno, como a temperatura exterior apresenta sempre valores abaixo das condições de conforto, interessa limitar as infiltrações, no entanto, a renovação do ar interior é uma medida necessária à manutenção das condições de salubridade interior dos edifícios. Assim, deve ser sempre assegurado um mínimo recomendável através de sistemas de ventilação natural, mecânico ou híbrido, adequado [11].

Os sistemas de ventilação de edifícios têm o propósito de contribuir para o seu aquecimento e arrefecimento natural e são designados como sistemas passivos. Estes sistemas maximizam a captação de radiação solar na estação fria, através de vãos

envidraçados bem orientados e dimensionados, podendo associar elementos massivos, que proporcionarão o armazenamento e liberação de energia sob a forma de calor.

De acordo com o INETI e a ADENE [11], os dispositivos de aquecimento e arrefecimento passivo são classificados conforme se apresenta na Tabela 2.1:

**Tabela 2.1.** Classificação dos dispositivos de aquecimento e arrefecimento.

<b>Aquecimento</b>	<b>Arrefecimento</b>
Ganho direto	Ventilação natural
Ganho indireto	Arrefecimento pelo solo
Ganho isolado	Arrefecimento evaporativo
	Arrefecimento radiativo

No verão, interessa recorrer a fontes frias que permitam arrefecer o edifício, como o solo, que tem muitas vezes temperaturas inferiores à temperatura do ar exterior. Grandes amplitudes térmicas diárias são verificadas no nosso país e, em determinadas horas do dia, o ar exterior apresenta uma temperatura inferior à temperatura interior das habitações e do solo, o que faz com que a estratégia de ventilação nesses períodos, principalmente à noite e início da manhã, tenha bons resultados [11].

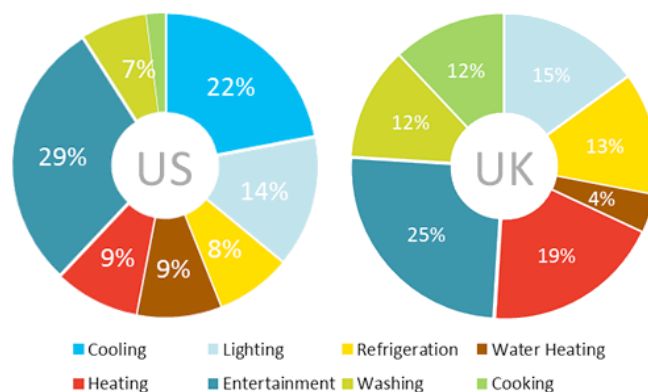
Pretende-se que um *earthship* mantenha a temperatura interior de conforto em vários tipos de clima, sendo o seu *design* estudado para haver uma maior área de incidência de luz solar, orientando a fachada principal a Sul. Esta fachada incorpora uma estufa envidraçada inclinada, que permite maior aproveitamento da radiação solar ao longo do ano, proporciona a climatização passiva e funciona como espaço de “amortecimento térmico”.

A ventilação dos espaços é de elevada relevância e é essencial para a saúde humana, conforto e bem-estar, pois estimula o arrefecimento e permite que o ar novo entre e circule pelos espaços, removendo odores, humidade e outros eventuais contaminantes do ar interior. Dependendo da ocupação e inerentes atividades no interior do edifício deve ser definida a taxa de renovação do ar. Uma habitação pode ser ventilada através do fenómeno natural de deslocamento do ar ou de forma mecânica.

Adiante, no subcapítulo 2.3.3 é explicado de forma mais pormenorizada o comportamento da climatização passiva no modelo de *earthship* em análise.

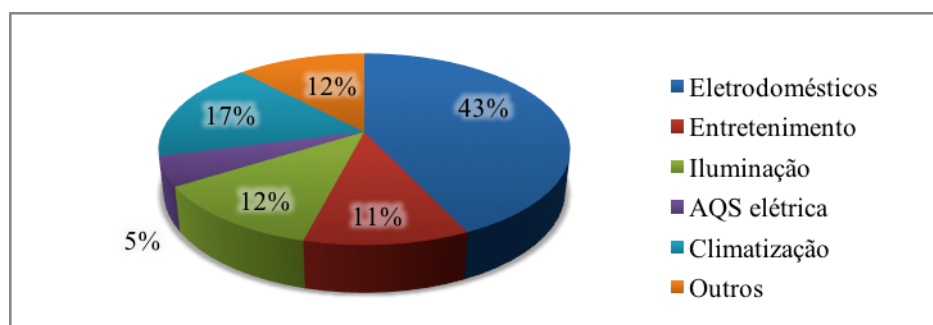
### 2.1.3. Produção de Energia (microgeração)

O consumo de energia no setor residencial varia bastante tendo em conta o país em análise e de acordo com os hábitos dos ocupantes dos edifícios. No entanto, no consumo de energia em habitações, todos tendemos a usar eletricidade para fins semelhantes. Segundo estatísticas que são apresentadas nos gráficos da Figura 2.2, nos EUA utilizam globalmente 29% da eletricidade consumida para entretenimento, 22% para ar condicionado, 15% para iluminação e o restante para climatização e refrigeração. No Reino Unido, o consumo é maioritariamente (25%) para entretenimento, 19% para aquecimento, 15% para iluminação e o restante para refrigeração, cozinhar e lavagens (incluindo secagem de têxteis) [12].



**Figura 2.2.** Consumo de eletricidade no setor residencial nos Estados Unidos da América e Reino Unido [12].

Em Portugal existe igualmente uma semelhança nos fins para o qual a energia elétrica é consumida. A maior parte do consumo elétrico é para eletrodomésticos (43%), de seguida para climatização (17%), iluminação e outros (ambos com 12%), entretenimento (11%) e por fim para AQS (Águas Quentes Sanitárias) apenas 5% (Figura 2.3) [13].



**Figura 2.3.** Distribuição do consumo de eletricidade no setor residencial em Portugal [13].

Atualmente em Portugal, as grandes fontes de energia renovável são a hídrica, solar e eólica, sendo a última a principal fonte para produção de energia elétrica.



Um *earthship* é o resultado de um *design* de energia consciente e, pela sua natureza, com o passar do tempo trará uma redução nos requisitos de energia elétrica para viver [8].

Este tipo de edifício está munido de sistemas para produzir a sua própria energia elétrica e solar térmica. A energia elétrica é produzida por painéis fotovoltaicos e/ou por pequenas torres eólicas sendo a energia eólica vista como complemento, essencialmente para dias de fraca radiação.

A produção de energia solar térmica é feita através de painéis solares térmicos para aquecimentos de águas para o sistema de AQS, sendo recomendado a instalação de um circuito de apoio para assegurar as necessidades energéticas. O circuito de apoio pode ser uma caldeira a biomassa que, apesar do investimento, permite o consumo de uma energia considerada renovável [14].

Na Figura 2.4 apresenta-se uma fotografia de um *earthship* em Taos, Novo México, EUA, na qual se pode verificar a exposição dos coletores solares e painéis fotovoltaicos.



**Figura 2.4.** Exposição dos painéis solares e fotovoltaicos de um *earthship Global Model* em Taos [15].

#### **2.1.4. Aproveitamento de águas pluviais**

O “desenvolvimento sustentável” da sociedade depende de uma boa gestão dos recursos naturais e particularmente da gestão dos recursos hídricos.

Foi projetado para 2030 que o aumento da procura de água irá exceder os 40% [16]. A água é a base da vida, assim como de todas as atividades produtivas das quais o homem depende para a sua sobrevivência. O consumo de água é de elevada importância a nível mundial, na sequência da constatação de que este recurso, que parecia inesgotável, começa a escassear, tanto em quantidade como em qualidade, devido ao aumento das necessidades. Da água existente no planeta Terra, apenas aproximadamente 3% é água doce,

encontrando-se 2,06% nas calotes polares e glaciares, resultando em 0,94% de água doce distribuída por lagos, rios, águas subterrâneas e na atmosfera [17].

A escassez dos recursos hídricos já afeta tanto os países subdesenvolvidos como os desenvolvidos e torna-se imperativo que haja esforços conscientes para uma gestão sustentável da água. Poucos são os telhados desenhados especificamente para recolher a maior quantidade de águas pluviais possível. Um grande número de edifícios contém sistemas de recolha dessas águas, mas são encaminhadas para esgotos, em vez de serem tratadas e filtradas em sistemas para consumo, evitando uma maior afluência de águas negras nas ETAR (Estações de Tratamento de Águas Residuais) e reduzindo os custos associados ao consumo de água da rede.

O sistema hídrico de um *earthship* é um bom exemplo. A habitação possui um sistema de recolha de água da chuva e neve, opcional e dependente do clima, para consumo doméstico. Este conceito promove uma utilização mais eficiente da água pelas pessoas e traduz-se em:

- Poupança no consumo de água;
- Aproveitamento de águas pluviais para rega e consumo;
- Reutilização de águas cinzentas para descargas de autoclismos.

A cobertura tem uma inclinação suave para direcionar a água para as caleiras a jusante, que a encaminham por elementos de filtragem de areias e folhas até às cisternas, específicas para armazenamento, enterradas no lado Norte do edifício.



**Figura 2.5.** Exemplo do sistema de aproveitamento de água na cobertura [18].

Um módulo de filtragem de água para consumo incorpora também este sistema hídrico e será analisado com mais detalhe no subcapítulo 2.3.4.

O consumo de água em edifícios residenciais é a reflexão das necessidades das famílias para suportar as suas necessidades inerentes à sua vida e bem-estar e resume-se a:

ingestão, cozinha/alimentação, higiene pessoal e limpeza interior. Algumas residências podem incorporar outras atividades como: limpeza de exteriores, regas, lavagens de veículos e enchimentos e/ou manutenção de piscinas e lagos.

Os consumos dos usos interiores têm pouca variação com as diferentes tipologias da habitação, da localização, do clima e da estação do ano. Pelo contrário, os consumos exteriores variam notoriamente, com um aumento dos consumos nos meses de verão [19].

Nas últimas décadas em Portugal, tem havido uma tendência para o aumento do consumo de água para higiene. A soma dos dois gastos principais (autoclismos e duches) representam 60% do consumo total [20].

### **2.1.5. Tratamento de Águas Residuais**

Todas as habitações têm dois tipos de águas residuais, as águas negras e as águas cinzentas. As águas negras são as provenientes de sanitas e requerem tratamento antes de serem devolvidas à terra. As águas cinzentas são as restantes, de lavatórios, banheiras, lavagens e usos similares. Se existir o cuidado de utilizar produtos de limpeza e higiene ecológicos, essa água pode ser, com um sistema adequado, SPRAC (Sistema Predial de Reciclagem ou Reutilização das Águas Cinzentas), devolvida para a terra.

Segundo a ANQIP (Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais), um SPRAC possibilita que, antes da descarga final, as águas cinzentas sejam reutilizadas no edifício, com ou sem tratamento, tendo em conta a qualidade requerida para os fins [21]. No subcapítulo 2.3.4 será feita uma descrição mais pormenorizada do sistema de aproveitamento de águas pluviais de um *earthship*.

### **2.1.6. Produção de Alimentos**

Um *earthship* deve conectar-se com a Terra de modo a proporcionar ambiente e espaço para cultivar legumes, fruta e outras plantas comestíveis durante todo o ano. As dietas poderão tender para o que mais facilmente se produz no ambiente que um *earthship* possibilita, enquanto as capacidades de produção de alimentos lentamente evoluem ao encontro dos desejos dos ocupantes [22]. A produção de alimentos neste tipo de edifício é mandatória se os habitantes pretenderem ser independentes. O conceito de independência é muito relativo na sociedade atual devido a hábitos demasiado definidos, consciência do ser humano e capacidade de se adaptar com uma perspetiva de melhoramento. Mas, apesar de

ser um tema que suscita algum interesse, iria direcionar este estudo para assuntos metafísicos que se desviam do âmbito desta dissertação.

A estufa envidraçada orientada para o azimute sul, para além de propiciar a climatização passiva do edifício, é o espaço designado para o cultivo de hortaliças, algumas árvores de fruto, entre outros. Como é do conhecimento geral, as plantas têm ciclos que variam consoante a espécie, perenes ou sazonais, o que tem uma consequência positiva na climatização passiva do espaço. No verão as plantas têm uma folhagem mais vigorosa bloqueando a passagem da radiação solar para a zona mais interior do edifício e no inverno, verifica-se o inverso, algumas plantas não têm folhas e outras apresentam uma menor densidade de folhagem o que facilita a incidência da radiação nos espaços internos do edifício (Figura 2.6).



Figura 2.6. Interior da estufa de um *Earthship* [23].

## 2.2. Alguns exemplos de *Earthships*

Durante as quatro décadas de experiência e aprendizagem, Reynolds desenvolveu diversos modelos de *earthships*, com *design*, finalidades e características diferentes. Alguns modelos um pouco mais excêntricos e outros com um intuito mais funcional.

### Primeira geração

Na Figura 2.7 são apresentados exemplos das primeiras experiências da EB.

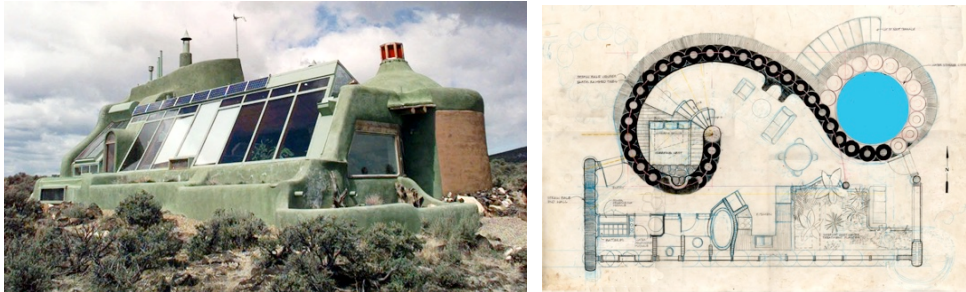


Figura 2.7. Modelos iniciais de teste de Michael Reynolds [24][25].



### *Nautilus earthship*

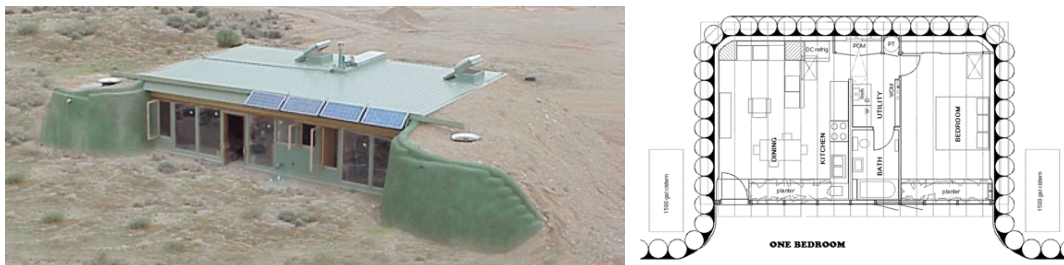
Na Figura 2.8 apresenta-se o primeiro modelo com aproveitamento de águas e construção com terra local.



**Figura 2.8.** a) Nautilus Earthship, Abril 1997, por Eric Draper [26] (b) Planta Nautilus Earthship [27].

### *Package earthship*

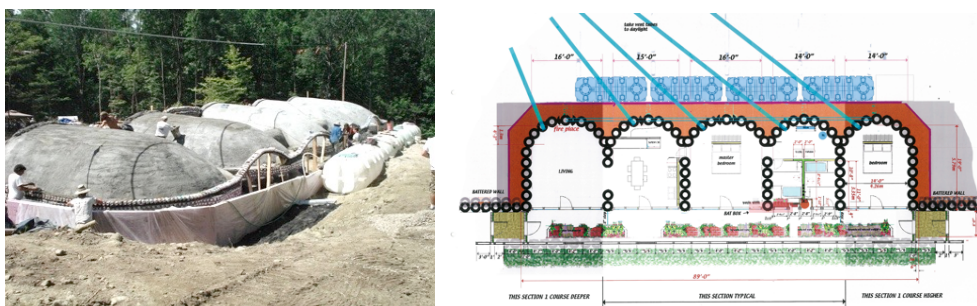
Na Figura 2.9 ilustra-se o primeiro modelo expansível com acostamento de terra.



**Figura 2.9.** [a] Package Earthship (T1); b) Planta [28].

### *Vaulted global model*

Na Figura 2.10 apresenta-se um modelo expansível com cobertura em cúpula e estufa.



**Figura 2.10.** Vaulted Global Model [29] [30].

### ***Simple Survival***

Na Figura 2.11 ilustra-se o modelo com estufa mais económico segundo a EB.



**Figura 2.11.** Simple Survival Model [23].

### ***Global model***

Na Figura 2.12 está representado o modelo mais eficiente e global, segundo a EB.



**Figura 2.12.** Global Model [23].

### ***Earthships na Europa***

Na Figura 2.13 apresentam-se alguns exemplos existentes na Europa.



**Figura 2.13.** Brighton Earthship [23]; Scotland Earthship [23].

### **Missões humanitárias**

Na Figura 2.14 ilustra-se um modelo construído para uma escola.



**Figura 2.14.** The flower Earthship, Serra Leoa [25].

### 2.3. Modelo Global, o projeto *Earthship Biotecture*

Este conceito apresenta vários modelos de construção. Para este estudo é selecionado o que é dito ter uma maior eficiência energética, conhecido como *Earthship Global Model*, que tem como característica possuir um único piso térreo independente da tipologia.



Figura 2.15. *Earthship Global Model* em Taos [23].

O EGM (*Earthship Global Model*) é um *design* recente (2007) que resulta de 40 anos de experiência e investigação de Michael Reynolds e da EB (*Earthship Biotecture*).

Este modelo, com pequenas adaptações, ajusta-se a uma vasta variedade de climas e é dito ser o modelo mais versátil e mais económico para o mundo desenvolvido [23].

#### 2.3.1. Tipologia, caracterização e orientação

O EGM tem como características uma planta estreita e longa, tipicamente de um a três quartos alinhada com o eixo este-oeste para maximizar a exposição à radiação solar, orientada a sul no hemisfério Norte, e é rodeada até à cobertura por um acostamento de terra, ou implantada num socalco, pelas outras três faces do edifício (Figura 2.15).

A fachada orientada a Sul incorpora uma estufa que funciona como corredor e alberga um jardim composto por células botânicas usadas para cultivar e tratar as águas cinzentas, que depois de passarem pelas células, são usadas para os autoclismos.

A estufa é envidraçada em praticamente toda a sua área, com vidro duplo, com uma inclinação de aproximadamente 70°, que deve variar de acordo com a latitude e o clima de modo a otimizar os ganhos por radiação solar no inverno.

#### 2.3.2. Elementos construtivos

De seguida, descrevem-se os elementos utilizados na construção de um EGM.



### 2.3.2.1. Paredes

Como referido previamente, o EGM é erguido assente numa parede estrutural, em “u”, feita com várias linhas horizontais alternadas de pneus cheios com terra compactada. No caso de tipologias maiores, são adicionados contrafortes para fortalecer a estrutura da parede e suportar eventuais esforços devido a grande massa de terra compactada na face exterior, Figura 2.16(a). A estufa é separada da zona de habitação por uma parede envidraçada com vidro duplo, e incorpora janelas basculantes por cima das portas que permitem a ventilação dos espaços, enquanto que em modelos anteriores, por exemplo o *Package Earthship* (2012), a estufa está em comunicação com o espaço habitacional. As paredes interiores são compostas por latas de bebidas empilhadas de forma alternada, como as paredes tradicionais de tijolo, mas em vez de só cimento, é utilizada uma argamassa de terra com cimento Figura 2.16 (b).



Figura 2.16. (a) Parede de pneu de um *earthship* em construção [23]; (b) Parede interior [23].

### 2.3.2.2. Pavimento e cobertura

O pavimento é a massa térmica não isolada, tipicamente lajes de pedra, tijoleira, cimento ou terra. Em alguns modelos é aplicada madeira em determinadas zonas.

A cobertura tem uma estrutura em madeira, fortemente isolada, com um acabamento em chapa nervurada lacada.



Figura 2.17. Cobertura de um EGM [31].



### **2.3.3. Climatização passiva**

O aumento dos custos de energia, aliado ao aumento da procura de energia e a uma maior consciência no conceito de eficiência energética dos edifícios incentivaram a sua construção com isolamento nas envolventes [32].

Em *designs* mais antigos usavam-se claraboias posicionadas na retaguarda de cada espaço para entrar luz e ar fresco, no entanto, modelos mais recentes usam tubos enterrados através do acostamento de terra para proporcionar ventilação e aquecimento ou arrefecimento passivos. A intensidade da ventilação pode ser controlada por operação manual das tampas, nas extremidades dos tubos de ventilação no interior dos espaços, e é proporcionada por convecção natural, gerada pela exaustão de ar quente pela cobertura da estufa através de claraboias de ventilação operáveis.

A massa térmica das paredes e pavimento armazenam o excesso de calor e comportam-se como um atenuador térmico, transferindo calor do solo, relativamente estável, para o interior do edifício no inverno, e para fora no verão [33]. Esta dinâmica não é restrita à operação sazonal e pode ocorrer, por exemplo, numa noite fria de verão.

#### **2.3.3.1. Aquecimento**

Antes de prosseguir com a descrição e análise do sistema de aquecimento passivo, debrucemo-nos no conceito de inércia térmica. A inércia térmica de um edifício é a sua capacidade de resistir às variações de temperatura no seu interior, devido à predisposição do edifício em armazenar calor nos elementos construtivos e é dependente da velocidade de acumulação e da quantidade de calor acumulado no edifício. Esta propriedade é tida em alguma consideração em virtude de contribuir para o comportamento térmico da habitação de inverno e de verão. No inverno, permite o aproveitamento dos ganhos solares e no verão absorve o excesso de calor.

Uma grande massa térmica possibilita que o edifício armazene a energia absorvida durante maiores períodos de tempo, ou seja, o edifício tem uma grande inércia térmica. Esta característica proporciona uma atenuação dos extremos de temperatura exteriores e por sua vez, condições interiores de conforto térmico mais estáveis, bem como uma redução nas necessidades de arrefecimento ou aquecimento do edifício. Este efeito está ilustrado na Figura 2.18.

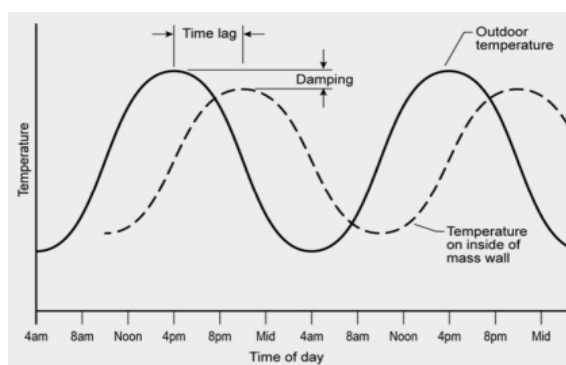


Figura 2.18. Amortecimento da temperatura interior [34].

Segundo o conceito do INETI [11], como sistemas de aquecimento passivo, um *earthship* incorpora um sistema de ganho direto, um sistema de ganho indireto e um sistema de ganho isolado.

No sistema de ganho direto de um *earthship*, os espaços a aquecer têm envidraçados dimensionados com o intuito de permitir a máxima incidência da radiação solar nos espaços e nas suas massas térmicas envolventes, como é ilustrado na Figura 2.19.

O sistema de ganho indireto funciona em conjunto com o sistema de ganho isolado que, neste tipo de construção, incorpora uma estufa que permite uma elevada captação de radiação solar e armazenamento de calor que é transferido por convecção natural através das portas e janelas basculantes dos espaços. Não com tanto impacto, mas com algum peso no aquecimento do edifício, é a utilização dos espaços e atividade metabólica dos ocupantes, bem como dos equipamentos elétricos. Todos estes aspetos geram ganhos internos que devem ser tomados em conta. Um bom isolamento exterior na cobertura e paredes envolventes impedem que o calor acumulado na massa térmica se perca para o exterior. Quando a temperatura exterior é inferior à temperatura interior, a energia armazenada durante o dia é libertada para o ambiente interior.

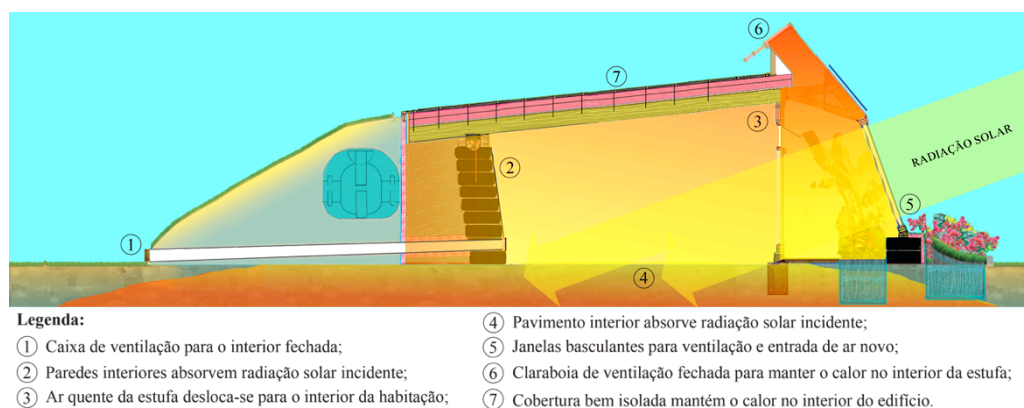


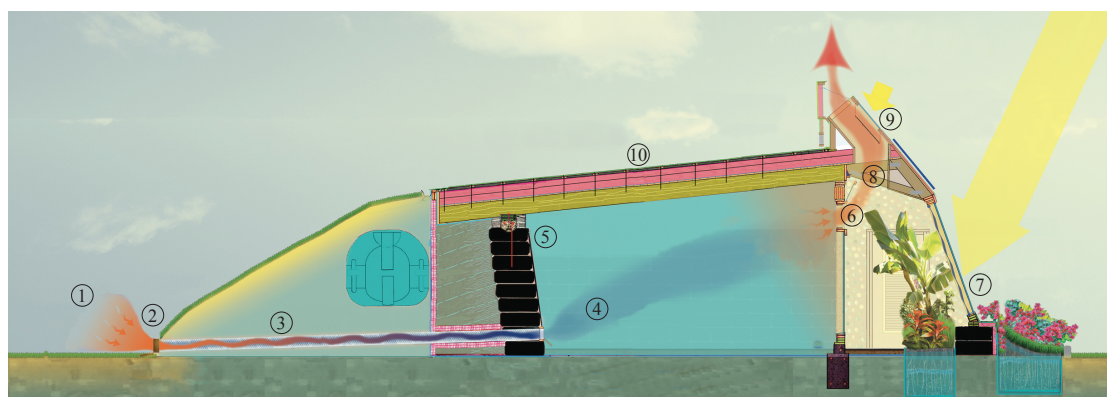
Figura 2.19. Corte representativo do efeito da radiação solar num dia de inverno (fonte: adaptada [17]).

### 2.3.3.2. Arrefecimento

Segundo o conceito EB (*Earthship Bioteecture*), o arrefecimento e admissão de ar novo é feito, sem ruído, a partir de tubos enterrados na fachada Norte (Figura 2.20). Esta técnica de ventilação funciona como Sistema de Ventilação Geotérmica (SVG) [35]. Este processo é impulsionado por claraboias de exaustão na cobertura da estufa, sem auxílio de elementos mecânicos. O painel lateral das claraboias virado ao sol é metálico e sem isolamento, para absorver e libertar calor, o que induz um aumento da temperatura do ar, estimulando o “efeito chaminé” originado pelo gradiente de temperatura e pressão entre o interior e exterior. Este efeito é suficiente para promover a entrada e circulação de ar novo na habitação. A ventilação natural, se bem dimensionada e aplicada, pode facilitar a salubridade do ar, bem como conforto térmico e bem-estar dos ocupantes, com um menor consumo de energia.

Relativamente ao conceito de inércia térmica, no verão, uma grande massa térmica favorece a absorção do excesso de calor, devido aos ganhos solares e ocupação do edifício, que, à noite, atendendo à diminuição da temperatura e através dos elementos de ventilação natural, é removido arrefecendo o ambiente interior. Em climas tropicais não é recomendado que os edifícios sejam construídos com elevada inércia térmica, pois impediria a remoção do calor [36]. A terra compactada ao redor dos tubos absorve, por condução, o calor transferido por convecção do ar para o tubo. As propriedades do solo proporcionam uma atenuação das variações da temperatura na superfície e, por isso, a profundidades maiores, a temperatura tende a manter-se constante [37].

O ar, à saída dos tubos e já arrefecido, é encaminhado para o interior da habitação e por sua vez para a estufa, por uma janela de ventilação basculante, de onde é impulsionado por convecção natural pela(s) claraboia(s) de ventilação da estufa envidraçada, gerando uma pequena corrente de ar. A circulação de ar contribui para a diminuição da temperatura interior, para a renovação do ar interior através da remoção de cargas de partículas, odores, humidade, compostos orgânicos voláteis (COV), e ainda do calor sensível armazenado na massa térmica. Contudo, pode ter implicações no conforto térmico ao incentivar perdas de calor por convecção e evaporação nos ocupantes.



**Legenda:**

- |  |   |
|--|---|
| ① Entrada de ar quente exterior para o interior do tubo;     | ⑥ Saída do ar interior (quente) por uma janela operável;                          |
| ② Caixa de ventilação aberta para permitir passagem do ar;   | ⑦ <i>Blackouts</i> bloqueiam a passagem da radiação solar;                        |
| ③ Troca de calor do ar para o tubo e massa envolvente;       | ⑧ Zona superior da estufa sobreaquecida intensifica a convecção natural;          |
| ④ Massa térmica da parede pneu absorve calor do ar interior; | ⑨ Claraboia de ventilação absorve a radiação solar e acelera a convecção natural; |
| ⑤ Entrada de ar novo e fresco para os espaços interiores;    | ⑩ Cobertura bem isolada previne penetração da radiação solar.                     |

**Figura 2.20.** Corte representativo do fluxo do ar num dia de verão (fonte: adaptada[38]).

### 2.3.4. Sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP)

A chuva provém da condensação do vapor de água existente na atmosfera que forma gotas que, devido a força gravítica, se precipitam até ao solo terrestre. Em determinadas áreas, a chuva atravessa poluentes presentes no ar e nas superfícies onde esta cai, arrastando-os consigo. Até haver uma análise química da água para determinar a sua potabilidade, esta deve ser considerada não potável e utilizada apenas para fins como descargas de autoclismos, lavagens, limpezas e regas. Para consumo a água deve ser filtrada, fervida ou devidamente tratada. Deve ser feito um armazenamento adequado, em reservatórios ventilados e fechados de maneira a impedir a entrada de insetos.

Usualmente, o consumo de água provém da utilização de chuveiros, autoclismos, torneiras, máquinas de lavar roupa ou louça e perdas. Um banho pode ser de imersão ou duche, sendo o primeiro menos recorrido e pouco sustentável. Num banho de imersão podem facilmente ser gastos 200 litros de água [39]. Perante as publicações encontradas, o caudal de um chuveiro convencional pode variar entre 12 a 20 litros por minuto [19] [40]. Para além do equipamento, o caudal depende de vários fatores como, a pressão da água (maior pressão, maior caudal) e do tempo de utilização. A título de exemplo, um duche de 5 minutos num chuveiro com um caudal elevado (20L/min), sem fechar a água para ensaboar, resulta num gasto total de 100 litros de água por duche.

Em média, um autoclismo gasta cerca de 10 a 15 litros de água por descarga, o que, associado a um número elevado de descargas pode fazer com que seja um dos usos mais gastadores do consumo doméstico.

Numa residência encontram-se pelo menos três a cinco torneiras divididas entre a cozinha e instalações sanitárias. O consumo de água nas torneiras varia com o caudal, a frequência e o tempo de utilização, sendo os dois últimos difíceis de quantificar, podendo variar entre alguns segundos até vários minutos. Existem no mercado torneiras com arejadores que inserem ar no fluido e permitem caudais entre 2,8 e 6 litros por minuto [41].

Atualmente, as máquinas de lavar roupa domésticas apresentam consumos de água mais baixos do que modelos anteriores, com consumos entre 35 e 200 litros por lavagem.

No caso da máquina de lavar louça doméstica têm consumos de água entre 12 a 36 litros por lavagem. Considera-se uma média de 22 litros por lavagem [41].

Para além dos aspetos acima mencionados, o consumo de água pode elevar-se devido a perdas, que resultam de danos, quer em tubagens da rede doméstica de abastecimento de água, quer a nível dos equipamentos. As perdas derivadas de equipamentos danificados representam a maioria das perdas no consumo doméstico. Torneiras a pingar, autoclismos a correr, sem vedantes, são os exemplos mais frequentes de elementos avariados que, ao longo de 24 horas por dia podem ser bastante significativos.

Num *earthship* o consumo da água deve ser moderado e controlado e implica um tratamento sequencial em diferentes processos (Figura 2.21):

1. À saída da cisterna e através de uma bomba, a água é direcionada para o módulo de gestão de água, onde é filtrada para ser usada para beber, banhos e limpezas;
2. A água cinzenta proveniente do ponto 1 é encaminhada para um filtro de gorduras e partículas e em seguida para uma célula botânica<sup>1</sup> interior;
3. A água cinzenta reciclada, ponto 2, segue por um filtro de turfa para um depósito, de onde partirá, passando por um filtro de carbono, para ser usada em autoclismos;
4. As águas negras são dirigidas para um sistema séptico próprio (solar), de onde sai para irrigar uma célula botânica exterior.

---

<sup>1</sup> célula botânica é um canteiro interior para o cultivo de plantas e purificação de água. É desenhado especificamente para ser atravessado por águas residuais que alimentarão as plantas, obtendo a jusante água oxigenada, filtrada, sem bactérias e odores.

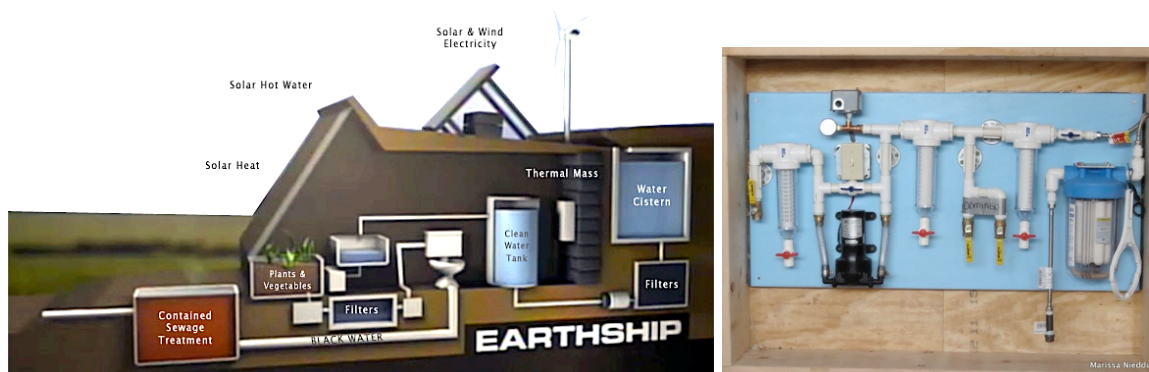


Figura 2.21. (a) Esquema dos sistemas energéticos [23]; (b) Modulo de gestão de água [25].

O sistema deve integrar válvulas de segurança de forma a direcionar as águas residuais diretamente para o reservatório séptico que em caso de *overflow* deverá está preparado para redirecionar a água residual para os esgotos do município [42].

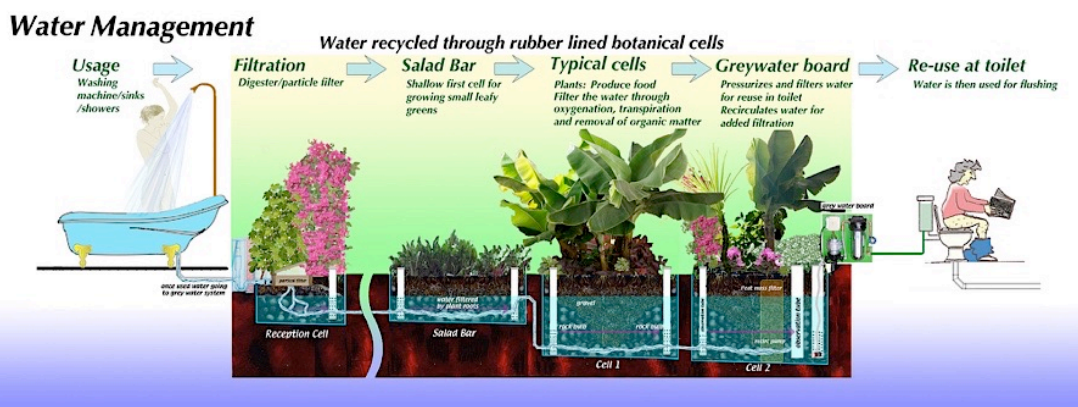


Figura 2.22. Esquema de reutilização de águas cinzentas [25].

## 2.4. Conforto térmico: estudos anteriores

Para verificar se Reynolds estava certo ao afirmar que o desempenho térmico de um *earthship*, em Taos, Novo México, é excelente, sem necessidade de recorrer a sistemas de apoio para aquecimento e arrefecimento, foram iniciados estudos para compreender melhor o que na realidade acontece num edifício com este tipo de arquitetura. Os habitantes dos *earthships* mais antigos alegam que, ao longo do tempo e condições de clima extremo, com grandes amplitudes térmicas, apenas têm necessidade de recorrer a um sistema de aquecimento ocasionalmente, e os proprietários dos modelos mais modernos dizem que não necessitam de sistemas de apoio para aquecimento ou arrefecimento. Existem alguns estudos sobre estes edifícios, no entanto, há poucos realizados com o fim de analisar cientificamente o desempenho térmico de um *earthship*.

Em 1996, Grindley e Hutchinson [43] monitorizaram um *earthship* em Taos e analisaram o seu comportamento térmico através de simulações para os climas de Taos e Reino Unido. Foi previsto pelas simulações que o *earthship* de Taos sobreaquecia no verão e que necessitaria de alguma energia de apoio para aquecimento nas noites de inverno, assim como para o clima no Reino Unido.

Em 2005, a universidade de Brighton ministrou um estudo e monitorização das temperaturas de um *earthship* em Brighton, no Reino Unido, apenas durante a fase final de construção do edifício, faltando ainda alguns elementos (portas, células botânicas, mobiliário e outros). Foi possível concluir que esse *earthship* aparentava moderar os extremos da temperatura exterior, embora na zona habitacional estivesse aquém das condições de conforto na maioria do tempo. Verificaram-se períodos de sobreaquecimento, no entanto não foram tidos em conta aspetos como ganhos internos, sombra permanente ou ventilação passiva, que poderiam contribuir para a alteração do ambiente interno após a conclusão do edifício [44].

Kruis e Heun [45] monitorizaram um *earthship* no Novo México e os resultados usados para calibrar um modelo de simulação que seria usado para verificar o desempenho térmico em vários climas nos Estados Unidos da América: húmido continental, continental, subártico, savana tropical e semiárido. Os autores concluíram que o consumo de energia para aquecimento e arrefecimento seria reduzido em todos os climas, no entanto, seriam necessários, pontualmente, sistemas de apoio para aquecimento e arrefecimento.

Em 2009, Ip e Miller [46] monitorizaram um centro de visita *Earthship*, em Brighton, Inglaterra, e descobriram que a temperatura interior estava, frequentemente, dentro do nível de conforto e relativamente estável, apesar do edifício estar ainda em fase de “carga”, período em que a temperatura do solo envolvente está a estabilizar, e não habitado.

Em 2012, Elena Kuil [47] comparou habitações convencionais, passivas e *earthships*, de acordo com a legislação holandesa, impacto ambiental e energia operativa, e concluiu que as habitações passivas são mais sustentáveis do que as convencionais e do que os *earthships* com isolamento no pavimento. A autora presumiu que um *earthship* tem melhor desempenho térmico do que as habitações convencionais se o armazenamento térmico (e inércia térmica) das paredes e do chão forem tidos em consideração.

Ainda em 2012, Martin Freney et al [48] realizaram monitorizações e simulações que implicaram a medição das condições interiores de um *earthship* no Novo México, para

aplicação dos dados obtidos na calibração de um modelo computacional para a simulação do desempenho térmico do edifício. Considerando para simulação o acostamento de terra, a estufa e isolamento das paredes de pneu, o estudo revelou que o EGM funciona bastante bem no clima extremo de Taos. Em 2013, foi revisto o estudo anterior e calibrado outro modelo de simulação para o clima mediterrâneo de Adelaide, Austrália, e para outras diferentes localizações como, Paris, Albacete, Sevilha, Valladolid e Londres dando mais ênfase ao acostamento de terra, à estufa e isolamento das paredes de pneu.

Conclui-se que os edifícios construídos segundo os princípios da arquitetura *earthship*, com acostamento de terra e isolados, possibilitam condições de conforto térmico com o mínimo gasto energético se existir uma radiação solar adequada. A estufa melhora a eficiência energética global de todos os tipos de construções, indicando uma forte solução de reabilitação de edifícios. No entanto a utilização de persianas controladas automaticamente (ou de operação manual pelos ocupantes) e altos níveis de ventilação natural são necessários para prevenir o sobreaquecimento no verão.

Os autores aconselharam melhoramentos relacionados com a otimização da modelação dos tubos de ventilação enterrados e da temperatura do solo. Perante as situações em que é necessário um sistema de apoio, para aquecimento em climas frios e nublados, e de ventilação no caso de sobreaquecimento, sugeriram a utilização de sistemas de energia renovável facilmente suportados por esse sistema [33].

Em 2014, Martin Freney realizou uma avaliação de ciclo de vida de um EGM, como suporte de uma avaliação de pós-ocupação e comportamento térmico para estudar o impacto ambiental geral de um EGM. Comparou este modelo com uma variedade de edifícios semelhantes caracterizados pelos materiais de construção e outras características de *design* e estimou o consumo energético para aquecimento e arrefecimento em vários climas. Com este estudo Freney pretendeu verificar se o EGM proporcionava conforto térmico passivo em qualquer clima e se era o edifício de construção verde (Eco) mais sustentável do mundo, como afirma Reynolds. Parte da avaliação é fundamentada através dos estudos anteriores realizados pelo autor. Os resultados revelaram, como em investigações anteriores, que para o clima de Taos o EGM é capaz de proporcionar conforto térmico sem recorrer a aquecimento e arrefecimento ativos e as pessoas estão, regra geral, muito satisfeitas com o nível de conforto e amenidade conseguidos com esta tecnologia. Para o clima e contexto de Adelaide, de todos os tipos de edifícios



considerados, o EGM apresenta menor impacto ambiental. O estudo proporcionou provas científicas acerca do desempenho térmico e das referências ambientais de um *earthship*, suportando algumas afirmações do arquiteto Michael Reynolds [49].

Em 2015, Berry e Urban elaboraram uma análise dos aspetos mais relevantes dos sistemas de aquecimento e arrefecimento passivos de habitações passivas e *earthships* e dos potenciais impactos na sua sustentabilidade. Os autores concluíram que, em climas quentes, se um *earthship* for construído a uma profundidade ligeiramente maior, a eficiência do *design* poderá ser maximizada, devido à terra ser bastante eficaz para arrefecer um espaço. Assim, a área de envidraçados será menor, o que também é benéfico em climas quentes e tirar-se-á melhor proveito do aquecimento e arrefecimento passivos. Mesmo com os desafios criados pelos climas variados, existem vários *designs* de *earthships* adequados a proporcionar temperaturas confortáveis nos seus respetivos climas. O isolamento do edifício pode ser melhorado se for usado uma cobertura verde com plantas, que proporciona sombra do sol na cobertura, de modo a aumentar efeitos de arrefecimento. A orientação do edifício relativamente ao sol tem também um impacto sobre as capacidades térmicas de um *earthship*, assim como o ângulo dos envidraçados. A longo prazo um *earthship* pode economizar mensalmente mais energia, ou seja, dinheiro, por levar a contas reduzidas ou inexistentes. No entanto, um modelo *standard* de um *Earthship* rondava os \$2400/m<sup>2</sup> enquanto uma habitação convencional custava cerca de \$860/m<sup>2</sup> em 2011 nos EUA. Os *earthships* podem proporcionar conforto térmico assim como poupança no consumo energético [50].

## **2.5. Fragilidades gerais de *Earthships***

As investigações e estudos descritos no subcapítulo anterior, sumarizam que, para uma variedade de climas, os *earthships* proporcionam um nível de conforto térmico aceitável apesar da necessidade de algumas adaptações no *design*.

Os estudos foram direcionados para o desempenho energético e questões regulamentais associadas aos métodos de construção pouco usais. Alguns dos casos de estudo, onde foram realizadas monitorizações e análise, são modelos de exposição para visitantes, não sendo, portanto, habitações, o que traz alguma incerteza aos resultados.

O sistema de climatização passiva demonstra algumas desvantagens, como a dificuldade de gestão do fluxo de ar, a dependência do vento e do diferencial térmico entre

o interior e o exterior do edifício, e a possibilidade de entrada de poluentes e ruído exteriores. Se estes aspetos tiverem impacto na qualidade do ar interior e no bem estar ou saúde dos habitantes deverá recorrer-se a sistemas de ventilação mecânica [35].

Verificou-se que estes edifícios sobreaquecem em cerca de 8 meses em um ano, com uma média de 3 meses anuais. A ventilação é inadequada, sendo necessário aquecimento e arrefecimento suplementares, bem como desumidificação.

Na maioria dos casos, a cobertura não recolhe água suficiente para a média de consumo dos habitantes e um furo ou ligação à rede pública é requerido. Os sistemas de energia solar PV (fotovoltaicos) são excessivamente caros em alguns climas de altitude, agravado pelo recurso a baterias. A climatização passiva não é efetiva em climas de altas latitudes com dias ou noites mais longos. O mesmo se aplica aos PV.

O facto do *earthship* ter um aspeto orgânico não quer dizer que seja natural. Na literatura da EB é referido que 45% de um *earthship* típico são materiais reciclados, ou seja:

- 1) 45% dos materiais usados são removidos da rede de reciclagem onde seriam usados até não poderem mais. Num *earthship* são usados apenas uma vez;
- 2) os restantes 55% da constituição de um *earthship* são materiais não naturais, processados, que necessitam de matéria prima para que estes sejam produzidos e/ou transportados para o local.

Somente a terra, as argamassas de terra, caixilharia e estruturas de madeira são naturais. A cobertura, isolamento, caleiras, quedas de água, telas anti humidade (EPDM), latas de alumínio, canalização, cablagem, garrafas de vidro, pneus, cisternas, condutas de ventilação, ferramentas, cimento, vidros para duas paredes envidraçadas, *black-outs* e sistemas de canalização não são naturais. Destes materiais, o cimento, canalizações e janelas são usados cerca de duas vezes mais do que numa habitação convencional.

De uma perspetiva naturista mais vincada, um *earthship* moderno conta com um grande uso de cimento, que está documentado como contribuir entre 5 a 10% do GEE do planeta. O cimento pode ainda criar problemas respiratórios e alergias.

De outro modo, *earthships* são mais poluentes do que outros tipos de construção. Estes introduzem toxinas em solos virgens, são geralmente lixeiras durante a fase de construção e removem materiais da rede de reciclagem.

*Earthships* requerem períodos de tempo extraordinários, paciência e trabalho físico para serem construídos. Por exemplo, para encher um pneu com terra são necessários cerca de três carros de mão de terra, ser bem comprimido com o auxílio de uma marreta, o que pode demorar em média 2 horas e exige um esforço físico intenso.

Alguns testemunhos de utilizadores dos *earthships* relatam problemas diversos:

- Humidade devido à utilização de terra húmida no enchimento dos pneus que, no início parecia facilitar a compactação, mas acabou por bloquear humidade dentro das paredes e gerou apodrecimento das madeiras da estrutura da cobertura.
- Sobreaquecimento no verão que foi resolvido através da colocação de dispositivos de sombreamento exteriores nas janelas da fachada sul e claraboias da cobertura.
- Cheiros indevidos provocados pelo excesso de gorduras provenientes da pia das cozinhas, em que a solução passou por remover este componente do sistema de águas cinzentas. Os *earthships* usam filtros de gorduras, mas os relatos de ocupantes sugerem a necessidade de limpeza frequente, optando pela sua remoção do sistema.
- Falta de isolamento no pavimento que contribuiu para a ocorrência de temperaturas baixas no interior durante o inverno e provocou infiltração de humidades que gerou o aparecimento de bolores e apodrecimento de elementos no interior do edifício.
- Problemas de humidade devido a pontes térmicas na estufa, fraca ventilação e controlo de humidade inexistente, essencialmente em dias húmidos e nublados [51].



## 3. CASO DE ESTUDO – ANÁLISE ENERGÉTICA

Para efetuar simulações energéticas computacionais, torna-se fundamental fazer o levantamento de todos os dados conhecidos referentes ao edifício, tais como geográficos, climáticos, pormenores construtivos, fatores de sombreamento, perfis de utilização, de ocupação, de equipamentos e climatização, para posterior introdução no EP.

### 3.1. Apresentação e descrição do projeto

Foi criado um edifício EGM segundo os princípios da arquitetura *earthship*, descritos no subcapítulo 2.3, com algumas adaptações de acordo com o clima por sugestão do autor.

#### 3.1.1. Edifício e sua tipologia

Para este estudo, foi criado um edifício de tipologia T3, para acomodar 4 ocupantes. A habitação tem apenas um piso térreo e uma planta estreita e longa segundo o eixo Nascente-Poente e com uma área total de 165 m<sup>2</sup>. A fachada envidraçada está orientada para Sul (azimute zero). A habitação terá uma utilização média de quatro ocupantes e é constituída por dez espaços: três quartos, uma zona ampla de cozinha e salas, duas instalações sanitárias, uma lavandaria e uma zona verde (estufa) que incorpora duas antecâmaras nas suas extremidades, como ilustrado na Figura 3.3. As restantes três faces do edifício estão rodeadas de terra até à cobertura.

De seguida, são apresentados os desenhos de arquitetura do edifício realizados com recurso ao programa *Graphisoft Archicad 19* (versão educacional).



Figura 3.1. Alçado sul.



Figura 3.2. a) Alçado poente; b) Alçado nascente.



Figura 3.3. Planta do edifício.

### 3.1.2. Implantação e envolvente natural

Para o máximo aproveitamento dos elementos da natureza, foram relevantes o posicionamento e orientação estratégicos do edifício.

Este caso de estudo situa-se nos arredores da vila de Coja, concelho de Arganil, distrito de Coimbra (40° 16' 28" norte; 7° 59' 25" oeste). O solo do terreno é maioritariamente argiloso, não tendo qualquer tipo de construção e está recheado de fauna autóctone, com árvores já bem desenvolvidas, como carvalhos (*quercus faginea*), sobreiros (*quercus suber*), pinheiros bravos (*pinus pinaster*), pinheiros mansos (*pinus pinea*), cedros pinheiros bravos (*cedros deodara*) e vegetação diversa. Será necessário o corte de algumas árvores para libertar espaço para a construção do edifício sendo a sua madeira utilizada na construção para a estrutura e outros elementos necessários.

O caso de estudo está localizado na zona climática I2, V2, segundo o REH.

Tendo em conta a inclinação do terreno, o edifício é inserido num gaveto previamente realizado, ficando rodeado de terra até à cobertura nas faces nascente, norte e poente.

Através do programa cedido pelo LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), foi possível criar um ficheiro climático para o concelho de Arganil. Para cálculos relacionados com a precipitação são utilizados os dados da estação udométrica de Coja que se podem consultar no PDM (Plano Diretor Municipal) de Arganil, assim como dados gerados pela ferramenta *climate-data*.

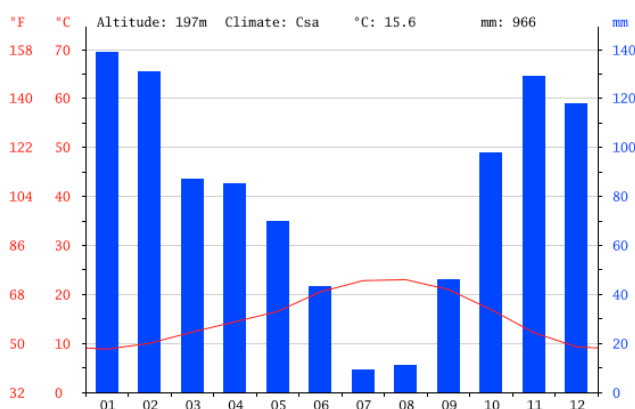


Figura 3.4. Dados estação udométrica de Coja [52].

O clima é quente e temperado e o verão com muito menos pluviosidade que o inverno. A temperatura média anual é 15,6°C e a pluviosidade média anual 966 mm. O mês de julho é mais seco e tem 9 mm de precipitação. O mês de Janeiro é o mês com maior precipitação, com um valor de 139 mm. A temperatura média do mês de agosto, o mês mais quente do ano é de 23,0°C e 8,8°C a temperatura média de janeiro, a temperatura média mais baixa de todo o ano. O mês mais seco tem uma diferença de precipitação de 130 mm em relação ao mês mais chuvoso. A variação das temperaturas médias durante o ano é 14,2°C [52]. Segundo o ficheiro climático gerado pelo programa do LNEG, o dia 27 de agosto é o dia mais quente do ano e o dia 31 de dezembro o dia mais frio.

### 3.2. Modelação de simulação

Para a realização de simulações energéticas é também necessário a construção de um modelo tridimensional num programa compatível. A primeira ideia foi a realização da exportação do 3D do edifício do *Archicad* para o DB (*Design Builder*), tendo em conta esta ser uma ferramenta de desenho e simulação dinâmica através do EP (*Energy Plus*).



### 3.2.1. Modelo geométrico

Foi realizado um modelo tridimensional no programa DB, mas devido a algumas dificuldades para definir as zonas térmicas da habitação no DB, a solução passou por criar o modelo tridimensional recorrendo ao programa *SketchUp* com o *plugin OpenStudio*. Após a correção de alguns erros de geometria, o modelo final corre simulações no EP, sem erro, com as características padrão do software.

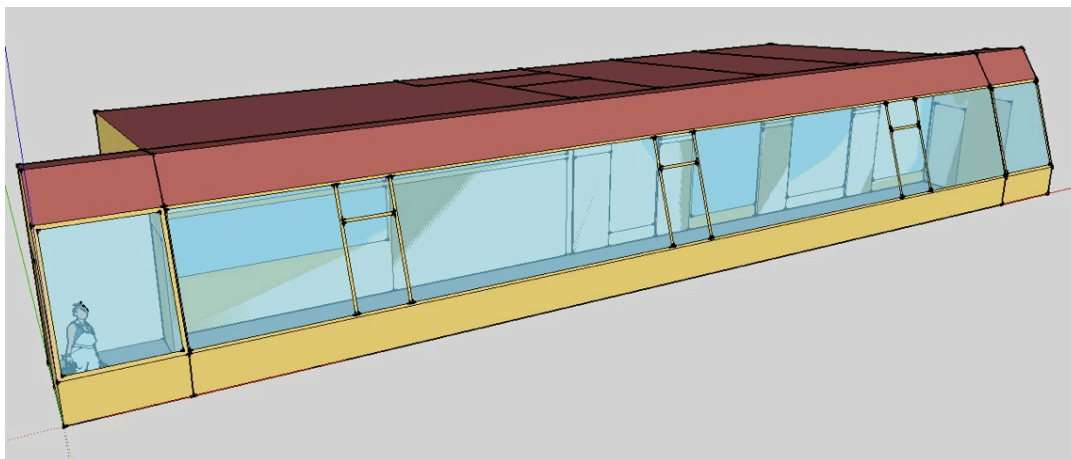


Figura 3.5. Modelo tridimensional do *Google SketchUp*.

O edifício é dividido em cinco zonas mediante a carga ocupacional e atividade do espaço, como apresentado na Figura 3.6 e na Tabela 3.1. As zonas 2, 4, 5 e 6 não têm ocupação permanente.

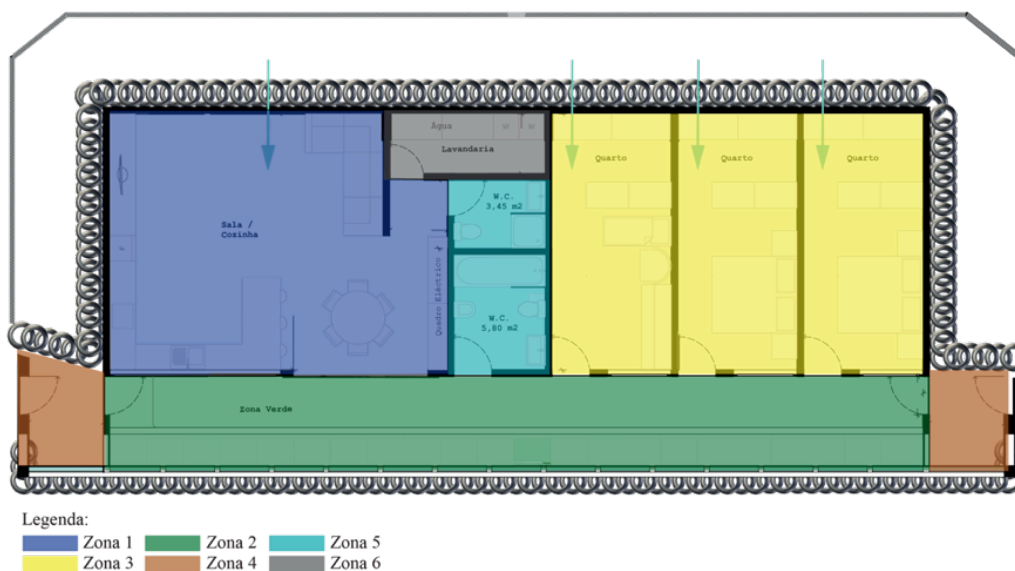


Figura 3.6. Planta com zoneamento.



Tabela 3.1. Zoneamento e áreas dos espaços.

Zona	Espaço	Sigla	Área pav. [m <sup>2</sup> ]	Pé Dto min [m]	Pé Dto máx [m]
1	Salas + Cozinha	SA+CO	29,0	2,7	3,17
5	WC	WC_P	3,5	2,8	2,92
	WC	WC_G	5,8	2,92	3,17
6	Lavandaria	LAV	5,1	2,7	2,80
3	Quarto nascente	Q1	17,0	2,7	3,17
	Quarto interior	Q2	17,0	2,7	3,17
	Quarto poente	Q3	17,0	2,7	3,17
2	Estufa	EST	41,0	3,18	3,25
4	Antecâmaras	AC	4,1	3,17	3,5

### 3.2.1. Condições de fronteira

Para a simulação energética, a fronteira de contacto com as paredes exteriores é considerada sem a influência da habitação (*undisturbed soil*), definida com o termo “ground” no programa, para superfícies que não estão expostas ao ar exterior. As condições do solo são predefinidas através do modelo integrado no programa de simulação (*CalcSoilTemp*).

### 3.2.1. Soluções e elementos construtivos

As soluções construtivas do edifício definiram-se em consonância com a EB e apresentam-se descritas e ilustradas na Figura 3.8.

No programa de simulação (*EnergyPlus*), as superfícies (paredes, coberturas e pavimentos) são modeladas como elementos compostos por várias camadas, com as respetivas propriedades térmicas (condutividade, calor específico, absorvidade e transmitância). Devido a num *earthship* as paredes de pneu não serem definidas por camadas de material, é necessário fazer algumas simplificações para os pneus, como proposto por Kruis e Heun [45], em que as paredes são modeladas como duas camadas de borracha e entre elas terra compactada, como ilustrado na Figura 3.7.

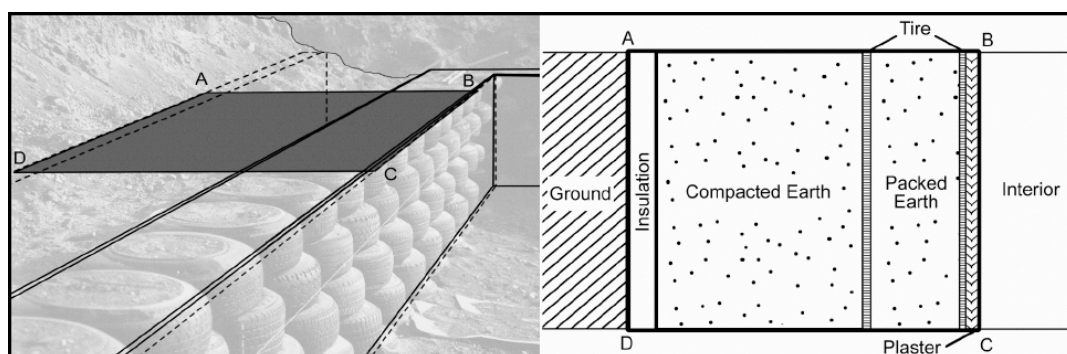


Figura 3.7. Simplificação das paredes de pneus [45].

Na Figura 3.8 é apresentado um resumo dos elementos construtivos considerados para modelação e o respetivo coeficiente de transmissão térmica,  $U$ .

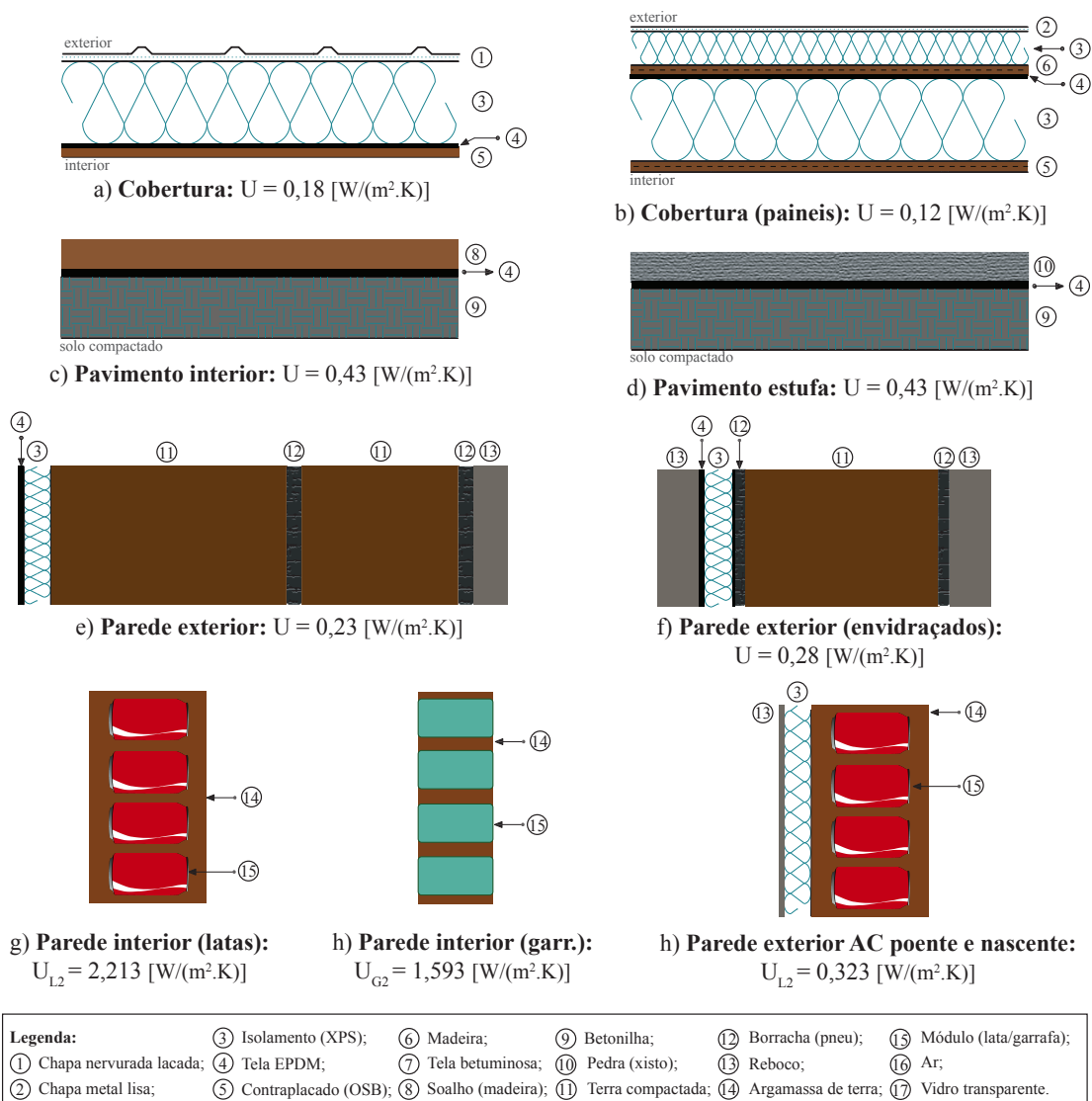


Figura 3.8. Corte transversal dos elementos construtivos considerados no edifício.

### 3.2.1.1. Resistência térmica de elementos não homogéneos

O efeito de camadas não homogéneas constituintes das paredes, assim como pontes térmicas, (quando há uma grande diferença entre as condutividades térmicas dos materiais) devem ser considerados no cálculo da resistência térmica total,  $R_t$ , e do coeficiente global de transmissão de calor,  $U$ , dos elementos. Nesta secção é apresentado um modelo simplificado para consideração dos efeitos acima referidos para simulação no *Energy Plus*.

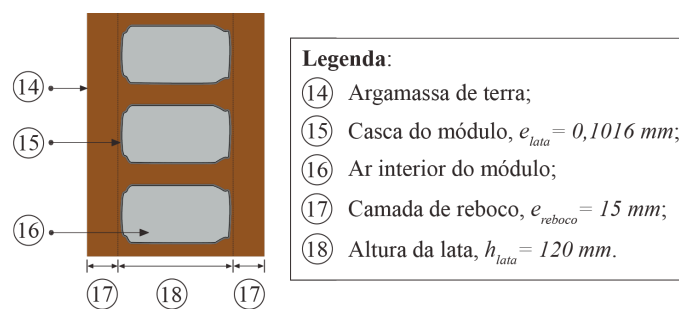
Os programas de modelação dos edificios apenas permitem a introdução dos elementos construtivos como camadas, com uma respetiva espessura,  $e_{camada_i}$  de um

determinado material  $i$  [m], com condutibilidade térmica,  $k_i$ , [W/(m.K)], calor específico,  $Cp_i$  [J/(kg.K)] e densidade,  $\rho_i$  [kg/m<sup>3</sup>]. Então, para introduzir no software de simulação os dados referentes à camada heterogênea composta por latas ou garrafas de vidro, é necessário definir um material fictício equivalente a essa camada.

A parede com latas tem um revestimento de argamassa de terra com espessura,  $e_{reboco}$ , igual a 15 milímetros, resultando numa espessura total,  $e_{parede}$ , de 150 milímetros.

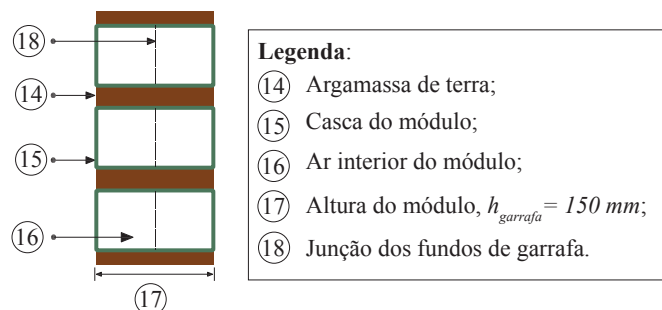
Tanto a lata, como o vidro são assumidos como um módulo cilíndrico, oco, com diâmetro exterior,  $d_{ext}$ , e espessura,  $e_{módulo}$ .

Nos EUA, as latas são maioritariamente feitas de alumínio (98% alumínio, 1% magnésio e 1 % manganês) [53], no entanto, em alguns países da Europa e Asia são feitas de uma liga com cerca de 55% de aço e 45% de alumínio [54]. Para este estudo considera-se que a lata é de alumínio, com altura,  $h_{lata}$ , de 120 milímetros, tem um diâmetro exterior,  $d_{ext\ lata}$ , de 65 milímetros e uma espessura,  $e_{lata}$ , de 0,1016 milímetros [55].



**Figura 3.9.** Corte esquemático de uma porção de parede com latas.

Para a garrafa, a altura total,  $h_{garrafa}$ , é igual a 150 milímetros, o diâmetro exterior,  $d_{ext\ garrafa}$ , a 60 milímetros e as espessuras da casca cilíndrica,  $e_{casca}$ , e fundos,  $e_{base}$ , são iguais a 3 e 5 milímetros, respetivamente.



**Figura 3.10.** Corte esquemático de uma porção de parede com garrafas.

A densidade, a condutibilidade térmica e o calor específico equivalentes são ajustadas para corresponder à capacidade térmica das paredes com latas ou garrafas segundo as equações (3.1), (3.2) e (3.3).

$$\rho_{eq} = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \phi_i \quad (3.1) \quad k_{eq} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \phi_i \quad (3.2)$$

$$C_{p_{eq}} = \frac{1}{\rho_{eq}} \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \phi_i \cdot C_{p_i} \quad (3.3)$$

Em que  $\rho_{eq}$  é a massa volúmica da camada de material equivalente ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_i$  é a densidade do material  $i$  ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\phi_i$  é o fator de ponderação volumétrico do material,  $k_{eq}$  é a condutibilidade térmica da camada de material equivalente ( $\text{W/m.K}$ ),  $k_i$  é a condutibilidade térmica do material  $i$  ( $\text{W/m.K}$ ),  $C_{p_{eq}}$  é o calor específico do material equivalente ( $\text{J/kg.K}$ ) e  $C_{p_i}$  o calor específico do material  $i$  ( $\text{J/kg.K}$ ). Na Tabela 3.2 estão compiladas as propriedades termofísicas dos materiais envolvidos.

**Tabela 3.2.** Propriedades dos materiais envolvidos.

<b>Material</b>	<b>Condutibilidade</b>	<b>Calor específico</b>	<b>Densidade</b>
<i>i</i>	$k_i$ [W/(m.K)]	$C_{p_i}$ [J/(kg.K)]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Alumínio</b>	230	900	2700
<b>Vidro</b>	0,7	835	2500
<b>Argamassa</b>	0,45	800	1450
<b>Ar</b>	0,025	1005	1,23

Este método simplificado é inspirado em modelos usados para o cálculo do valor do coeficiente de transferência de calor,  $U$  em construções com estruturas LSF (*Light Steel Frame*), mas adaptado para paredes “alveoladas” com latas ou garrafas de vidro [56]. O método envolve a análise dos três percursos térmicos, (a), (b) e (c) e a determinação das resistências térmicas associadas, bem como os valores de  $U$  [ $\text{W}/(\text{m.K})$ ], definido pela equação (3.4):

$$U \cdot A = \frac{1}{R_{total}} \quad (3.4)$$

As áreas de secção transversal dos módulos, lata,  $A_{lata}$  [ $\text{m}^2$ ] ou garrafa,  $A_{garrafa}$  [ $\text{m}^2$ ] e de ar no seu interior,  $A_{int}$  [ $\text{m}^2$ ], são fáceis de determinar, no entanto, a porção de terra associada à parte exterior dos elementos é difícil devido à geometria complexa.

Como hipótese simplificadora é considerada para análise o destaque de uma porção de parede com um metro quadrado de área ( $A_{p_j} = 1 \text{ m}^2$ ) e três hipóteses  $h$ , de diferentes densidades de elementos por metro quadrado de parede.

Com o auxílio do programa *Solid Works*, foram desenhadas as várias alternativas ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ) com vista a determinar o número de módulos por metro quadrado de cada situação (I e II). O arranjo dos elementos é feito de forma a que a distância entre estes seja sempre (ou quase sempre) igual, como representado na Figura 3.11.

**Situação I:** Parede com latas de alumínio,  $d_{ext\ lata} = 65 \text{ mm}$ :

$L_1$ : espaçamento = 50 mm ( $N_{módulos_1} \approx 74 \text{ módulos/m}^2$ );

$L_2$ : espaçamento = 30 mm ( $N_{módulos_2} \approx 110 \text{ módulos/m}^2$ );

$L_3$ : espaçamento = 20 mm ( $N_{módulos_3} \approx 137 \text{ módulos/m}^2$ ).

**Situação II:** Parede com garrafas de vidro,  $d_{ext\ garrafa} = 60 \text{ mm}$ :

$G_1$ : espaçamento = 60 mm ( $N_{módulos_4} \approx 79 \text{ módulos/m}^2$ );

$G_2$ : espaçamento = 40 mm ( $N_{módulos_5} \approx 115 \text{ módulos/m}^2$ );

$G_3$ : espaçamento = 30 mm ( $N_{módulos_6} \approx 142 \text{ módulos/m}^2$ ).

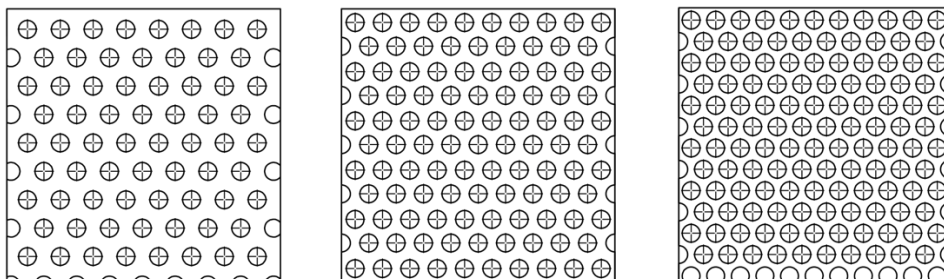
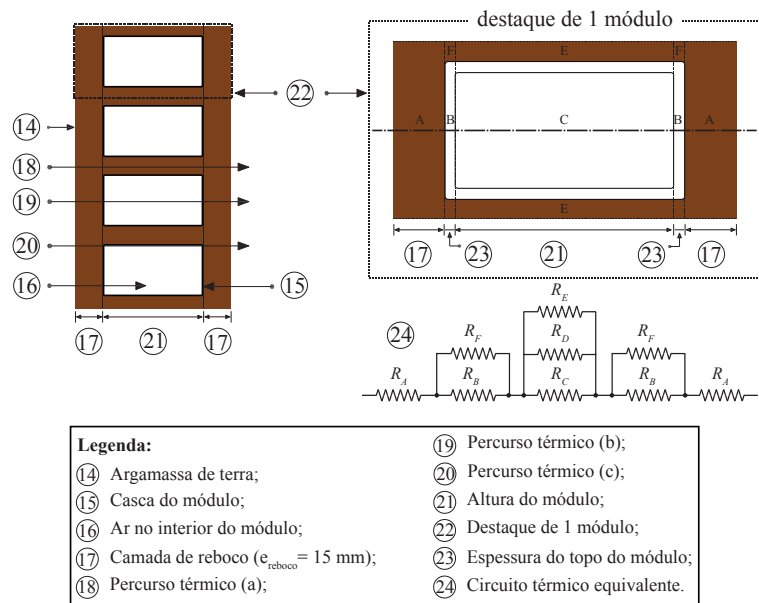


Figura 3.11. Cortes representativos das densidades de módulos de uma porção de parede com  $1 \text{ m}^2$  de área.

### Situação I: Parede com latas de alumínio

Na Figura 3.12 apresenta-se um corte da parede com latas onde se podem verificar os três diferentes percursos térmicos, (a), (b) e (c), caracterizados por diferentes resistências térmicas, um destaque pormenorizado de um módulo da parede e o desenho esquemático representativo do circuito térmico equivalente de um módulo.



**Figura 3.12.** Corte da parede de latas com representação dos percursos térmicos a, b e c.

Considera-se para análise um módulo destacado de uma porção de parede com um metro quadrado de área  $A_p = 1 \text{ m}^2$ .

A resistência térmica do módulo destacado,  $R_{\text{módulo}}$  é obtida pela associação em série das resistências térmicas referentes, à porção de reboco,  $R_A$ , às duas bases do módulo e argamassa circundante,  $R_{BF}$  e à casca, ar interior e argamassa exterior,  $R_{CDE}$  [(m<sup>2</sup>K)/ W].

$$R_{\text{módulo}_I} = 2 \cdot R_A + 2 \cdot R_{BF} + R_{CDE} \quad (3.5)$$

As resistências térmicas equivalentes relativas às base e argamassa circundante,  $R_{BF}$  e à casca, ar interior e argila exterior,  $R_{CDF}$  são determinadas da mesma forma,  $R_{BF}$  pela associação em paralelo das resistências da base e argamassa exterior e  $R_{CDE}$  pela associação em paralelo das resistências da casca, ar interior e argamassa exterior:

$$R_{BF} = \left( \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_F} \right)^{-1} \quad (3.6) \quad R_{CDE} = \left( \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_E} \right)^{-1} \quad (3.7)$$

A resistência térmica condutiva de cada material  $i$  define-se por  $R_i = \frac{L_i}{k_i \cdot A_i}$  [K/W],

sendo  $L_i$  a espessura [m],  $k_i$  a condutibilidade térmica do material  $i$  [W/(m.K)] e  $A_i$  a área de secção transversal da camada desse material  $i$  [m<sup>2</sup>].

Para cada metro quadrado de área de parede, as áreas [m<sup>2</sup>] de cada zona do destaque foram estimadas do seguinte modo:

$$A_A = \frac{1}{N_{módulos_j}} \quad (3.8)$$

$$A_B = \frac{\pi}{4} \times d_{ext}^2 \quad (3.9)$$

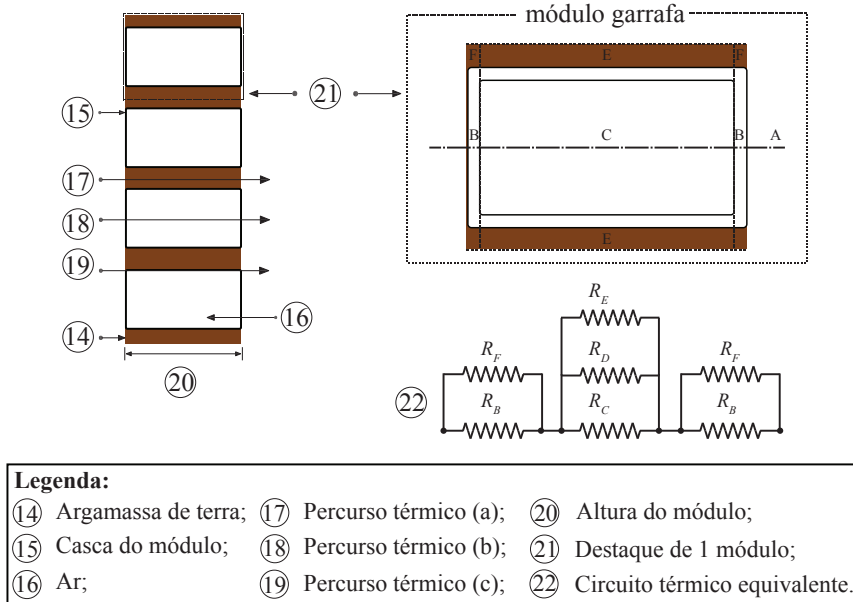
$$A_C = \frac{\pi}{4} \times d_{int}^2 \quad (3.10)$$

$$A_D = \frac{\pi}{4} (d_{ext}^2 - d_{int}^2) \quad (3.11)$$

$$A_E = A_F = A_A \cdot \left( \frac{\pi}{4} \times d_{ext}^2 \right) \quad (3.12)$$

**Situação II: Parede com garrafas de vidro**

O processo de cálculo para a hipótese das paredes com garrafas é igual ao anterior, sem a camada exterior de reboco, ou seja, com  $A_A = 0 \text{ m}^2$ , logo  $R_A = 0 \text{ [(m}^2\text{K)/W]}$  e  $d_{ext} = 62 \text{ mm}$  (Figura 3.13).



**Figura 3.13.** Corte da parede de garrafas com ilustração dos percursos térmicos a, b e c.

Desta forma a resistência térmica de um módulo destacado é obtida a partir da expressão (3.13):

$$R_{módulo_{II}} = 2 \cdot R_{BF} + R_{CDE} \quad (3.13)$$

A resistência térmica total equivalente de uma parede,  $R_{total_{eq}}$ , é obtida pela associação em paralelo das resistências térmicas do total de módulos, que determinada área de parede,  $A_{p_j}$  contém, tal que:

$$R_{total_{eq,1m^2}} = \left( N_{módulos_j} \times \frac{1}{R_{módulo}} \right)^{-1} \quad (3.14)$$

Em que:  $N_{módulos_j}$  é o número total de módulos que uma parede  $j$  [módulos],  $A_{p_j}$  é a área da parede  $j$  [m<sup>2</sup>] e  $R_{módulo}$  a resistência térmica de um módulo [m<sup>2</sup>K/W], de acordo com o destaque acima mencionado.

O valor do coeficiente de transmissão térmica,  $U$  [W/(mK)], é determinado a partir da expressão (3.15).

$$U = \frac{1}{R_{total} \cdot A_{p_j}} \quad (3.15)$$

Para a aplicação do modelo de cálculo das resistências térmicas dos elementos não homogêneos, como as paredes de latas ou garrafas, recorreu-se ao *Microsoft Excel*, onde foi criada uma folha de cálculo que permite obter a resistência térmica equivalente total da parede, a fração volúmica, a condutibilidade térmica, o calor específico e a densidade equivalentes da parede em estudo, dependente do tipo de módulo, da densidade de módulos e da área de parede. A folha de cálculo pode ser consultada no ANEXO B.

### 3.2.1.1. Características térmicas da envolvente

De seguida, apresentam-se os valores do coeficiente global de transferência de calor,  $U$ , e os respetivos valores de referência,  $U_{ref}$ , dos elementos da envolvente segundo o REH.

Na Tabela 3.3 apresentam-se os valores com a consideração dos elementos em contacto com o solo e das resistências superficiais internas e externas.

**Tabela 3.3.** Coeficiente de transferência de calor dos elementos envolventes.

Tipo de SC	R [m <sup>2</sup> .K/W]	U [W/m <sup>2</sup> .K]	Uref [W/m <sup>2</sup> .K]	Umax [W/m <sup>2</sup> .K]
Cobertura (EB)	5,67	0,18	0,3	1
Cobertura painéis (EB)	8,51	0,12	0,3	1
Pav. Interior (EB)	2,33	0,43	0,5	
Pav. Estufa (EB)	2,33	0,43	0,5	
Parede ext. (EB)	4,35	0,23	0,5	1,6
Parede ext. env. (EB)	3,57	0,28	0,5	1,6
Parede exterior AC (L2)	3,098	0,323	0,35	1,6

Para as paredes exteriores das AC (antecâmaras) o cálculo do  $U$  tem que ter em conta outras considerações. A partir do modelo de cálculo da resistência térmica de paredes não



homogêneas, o seu valor resulta em  $[K/W]$ , o que não permite a imediata comparação com os valores dos outros elementos ou com os valores de referência obtidos em  $[(m^2.K)/W]$ .

Para isso, o valor da resistência pode ser determinado em  $[(m^2.K)/W]$  através da multiplicação do valor obtido pela folha de cálculo pela área da parede em análise.

Na Tabela 3.4 estão reunidos os valores da resistência térmica e do  $U$  para as paredes exteriores das AC (latas com reboco, isolamento exterior e área de parede igual a  $3,575 m^2$ ), para as diferentes densidades de módulos.

**Tabela 3.4.** Coeficiente de transferência de calor das paredes exteriores da AC.

	$R_{eq}$ [ $m^2.K/W$ ]	$R_{isol} + R_{reb}$ [ $m^2.K/W$ ]	$R_{se} + R_{si}$ [ $m^2.K/W$ ]	$R_T$ [ $m^2.K/W$ ]	$U_T$ [ $W/m^2.K$ ]	$U_{ref}$ [ $W/m^2.K$ ]	$U_{max}$ [ $W/m^2.K$ ]
<b>L1</b>	0,24	2,718	0,17	3,13	0,320	0,35	1,6
<b>L2</b>	0,21	2,718	0,17	3,10	0,323	0,35	1,6
<b>L3</b>	0,20	2,718	0,17	3,09	0,324	0,35	1,6

Estes valores incluem as resistências térmicas superficiais interior e exterior. Tendo em conta a diferença entre os  $U$  ser quase nula, usa-se para simulação o valor de  $U$  para L<sub>2</sub>.

### 3.2.1.1. Envidraçados

Com caixilharia de madeira e dispositivo de oclusão noturna  $U=2,9 (W/m^2.K)$ .

**Tabela 3.5.** Características dos envidraçados sem consideração das resistências térmicas superficiais.

Envidraçados						
Tipo de SC	C	material/Elemento	e [m]	k [ $W/(mK)$ ]	R [ $(m^2.K)/W$ ]	U [ $W/m^2.K$ ]
Envidraçados (estufa e interior)	1	vidro transparente	0,006	0,900	0,007	2,20588
	2	ar	0,006	0,025	0,270	
	3	vidro transparente	0,006	0,900	0,007	

### 3.2.2. Ganhos Internos

Num edifício, para além dos ganhos térmicos devido à incidência de radiação solar, devem ser considerados os ganhos relativos à densidade ocupacional, de utilização de equipamentos elétricos, mecânicos e de iluminação. Para que a simulação seja rigorosa, devem especificar-se, por zona, os padrões de uso, iluminação, equipamentos e ventilação.

Com vista a uma representação real da utilização de uma habitação são criados os perfis de utilização e funcionamento. Alguns dos espaços têm características semelhantes, outros não, sendo necessário definir padrões para estes.

Nesta secção são apresentados os dados referentes a esses aspetos.

### **Ocupação:**

A representação dos níveis de utilização dos espaços do edifício é feita através de perfis de ocupação. A utilização da habitação é baseada no quotidiano de uma família normal média de um casal com dois filhos.

É assumido que a lavandaria é utilizada maioritariamente ao fim de semana e que a estufa é um espaço de circulação (corredor), também mais ocupado ao fim de semana para manutenção dos cultivos. Para os sanitários, considera-se que cada pessoa utiliza em média 70 minutos/dia (1,167 h/dia).

### **Iluminação:**

As características de iluminação são definidas com base nas soluções disponíveis no mercado. Atualmente, existem variadíssimas soluções para a instalação de iluminação de baixo consumo, nomeadamente lâmpadas LED, tanto para circuitos AC (Corrente Alternada: 210~220V), como para circuitos DC (Corrente Contínua). A iluminação elétrica pode dividir-se em dois circuitos: iluminação de funcionamento e iluminação secundária. No caso de estar disponível ligação à rede de distribuição, deve ser tido em conta e ligar ao circuito da habitação. Para este caso, consideram-se todas as lâmpadas LED. Na Figura 3.15 está ilustrado o perfil de utilização de iluminação. Na Tabela 3.6 apresentam-se compilados os componentes de iluminação utilizados, assim como a respetiva potência e densidade de iluminação dos espaços.

### **Equipamentos:**

Tabela 3.7 estão inventariados os equipamentos presentes no edifício em estudo e a respetiva potência e na Tabela 3.8 apresenta-se a distribuição dos equipamentos presentes em cada espaço, bem como a potência total por espaço e a sua densidade. Para a sala-cozinha foi assumida, no EP, uma *fraction lost* de 50%. Os espaços não mencionados, não possuem qualquer tipo de equipamento. Na Figura 3.16 é apresentado o perfil de funcionamento dos equipamentos.

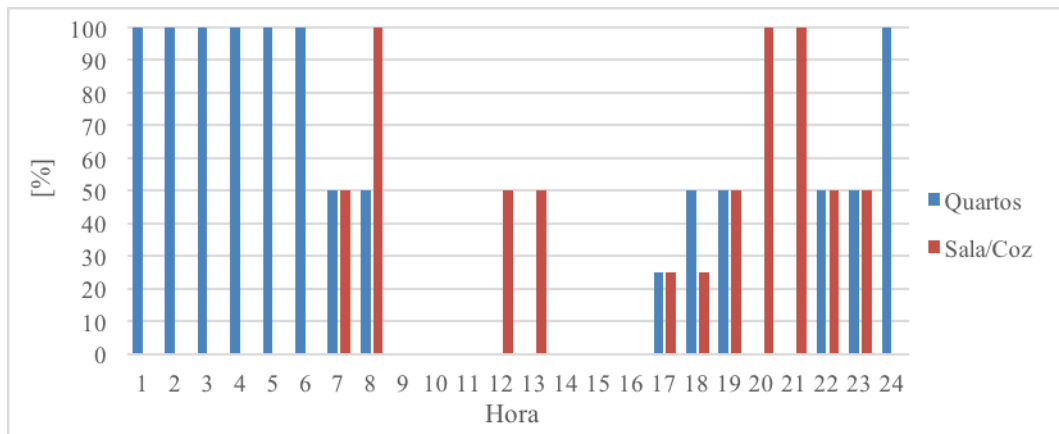


Figura 3.14. Perfil de ocupação semanal.

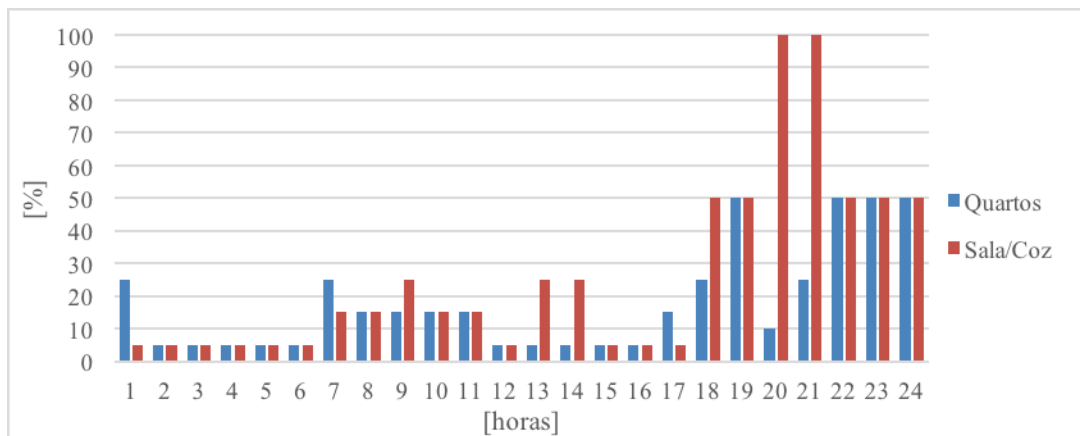


Figura 3.15. Perfil de utilização de iluminação.

Tabela 3.6. Dados referentes à iluminação.

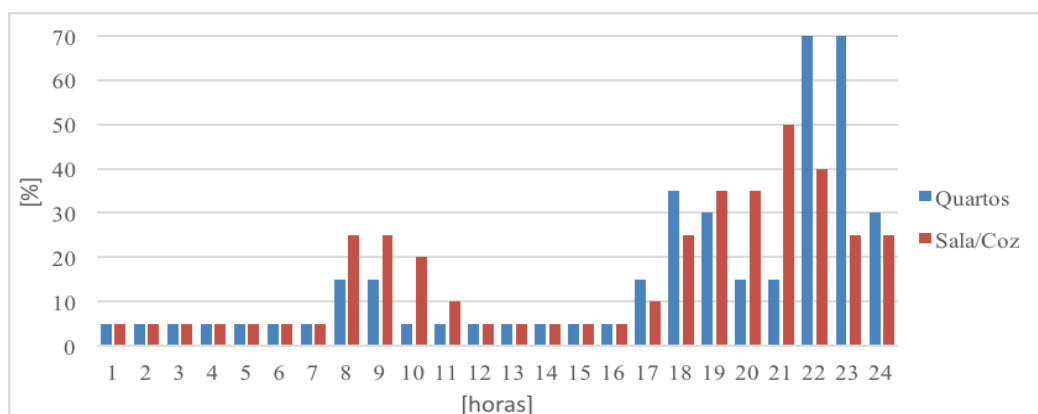
Espaço	Área pav. [m <sup>2</sup> ]	Componentes	Potência [W]	Densidade [W/m <sup>2</sup> ]
SA+CO	29,0	8 LED 5W + 4 LED 3,5W	54	1,86
WC_P	3,5	2 LED 3,5W	7	2,00
WC_G	5,8	2 LED 5W	10	1,72
LAV	5,1	2 LED 5W	10	1,96
QUA_1	17,0	5 LED 4W	20	1,18
QUA_2	17,0	5 LED 4W	20	1,18
QUA_3	17,0	5 LED 4W	20	1,18
EST	41,0	12 LED 3,5W	42	1,02
AC	4,1	1 LED 3,5W	3,5	0,85

**Tabela 3.7.** Levantamento dos equipamentos presentes no caso de estudo.

Componente	Potência [W]
Televisão LED (TV)	50
Máquina Lavar roupa (ML)	1500
Máquina Café (MC)	1000
Fogão (Fog)	3500
Micro-ondas (MO)	1000
Frigorífico (Frig)	300
PC	90
Exaustor	200
Secador	1000
Máquina Lavar roupa (MLR)	1000
Ferro de engomar	1000

**Tabela 3.8.** Distribuição dos equipamentos nos espaços.

Espaço	Área pav. [m2]	Componentes	Potência [W]	Densidade [W/m2]
SA+CO	29,0	TV; ML; MC; Fog; Frig; MO; PC; Exaustor.	7640	263,45
WC_G	5,8	Secador	1000	172,41
LAV	5,1	MLR; Ferro	2000	392,16
QUA_1	17,0	PC	90	5,29
QUA_2	17,0	PC	90	5,29
QUA_3	17,0	PC	90	5,29



**Figura 3.16.** Perfil de utilização de equipamentos.

### 3.2.3. Climatização passiva

Apesar de o edifício em estudo apresentar uma implantação no terreno diferente do modelo da *earthship Bioteecture*, apresentado no capítulo 2, a climatização é feita de uma forma muito semelhante.

Neste caso específico, as características de climatização passiva, nomeadamente, os tubos enterrados, aberturas de portas e janelas, bem como das claraboias da estufa têm um

peso bastante elevado no comportamento térmico da habitação. Deste modo, no EP, para definir os tubos de ventilação enterrados, foi usado o objeto “*ZoneEarthTube*”, para contabilizar o contributo da estufa e das claraboias superiores de ventilação por esta incorporada, recorreu-se ao objeto “*ZoneThermalChimney*” e por fim, para modelar a influência da abertura de portas e janelas foi usado o objeto “*AirflowNetwork*” associado aos objetos “*ZoneInfiltration*” e “*ZoneVentilation*” para definir a taxa mínima de infiltrações e de renovação de ar. Como não são utilizados quaisquer tipos de ventiladores mecânicos, é difícil de estimar os caudais de ar que circulam pelos espaços.

Todos os objetos funcionam de forma natural, dependendo das condições climatéricas, essencialmente da velocidade do vento e da temperatura exterior. Os elementos de ventilação são acionados pelos ocupantes consoante os seus desejos e, assim, renovar, aquecer ou arrefecer o ar interior.

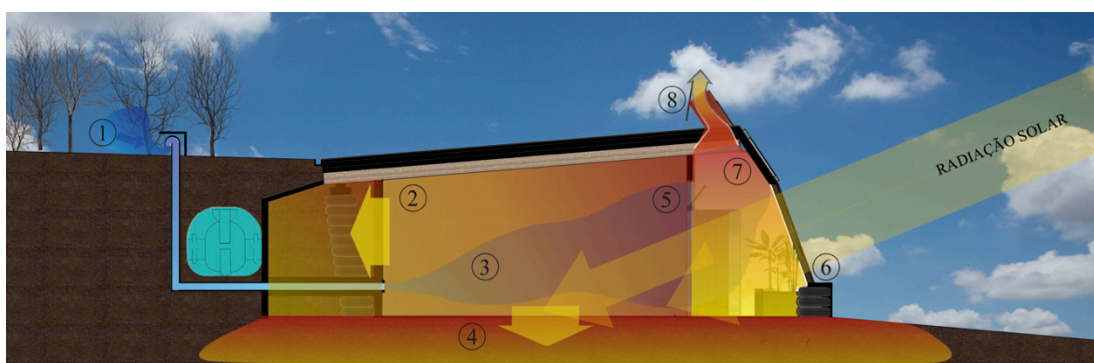
Nas secções seguintes são apresentados e descritos os sistemas de aquecimento e arrefecimento do modelo de estudo para situações diurnas e noturnas.

#### **3.2.3.1. Aquecimento (inverno)**

Como já foi referido anteriormente, é no inverno que os edifícios residenciais apresentam necessidades de aquecimento, por isso é mandatório maximizar os ganhos solares nessa estação. Neste caso de estudo procede-se de forma semelhante ao conceito apresentado no subcapítulo 2.1.2, apresentando apenas as diferenças.

Em vez de um acostamento de terra, que exige movimentação de um grande volume de terras, o edifício é inserido num gaveto, que permite que a terra se mantenha compactada e virgem, o que pode resultar numa menor infiltração de água no solo.

Na Figura 3.17 é apresentado um corte esquemático legendado do comportamento térmico do edifício num dia limpo de inverno.

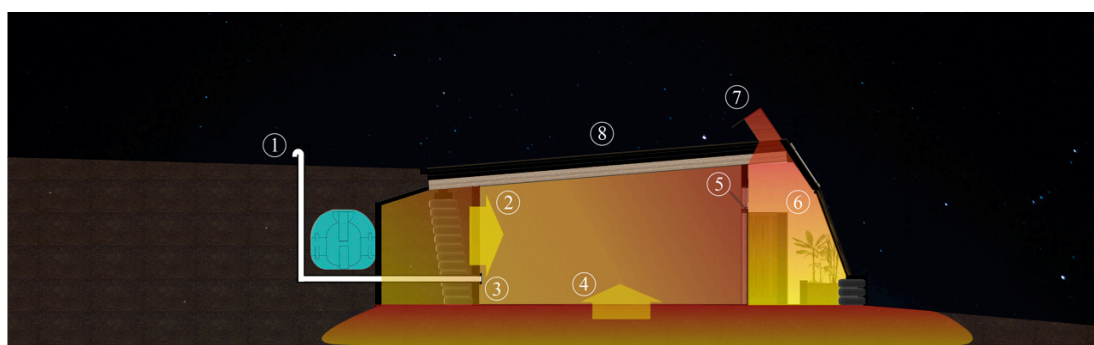


**Legenda:**

- |   |  |
|---|--|
| ① Entrada de ar exterior para o interior da conduta;    | ⑤ Saída de ar quente da zona habitacional para a estufa; |
| ② Paredes interiores absorvem radiação solar incidente; | ⑥ Janela basculante fechada;                             |
| ③ Ar novo circula pela habitação;                       | ⑦ Zona superior da estufa sobreaquecida;                 |
| ④ Pavimento interior absorve radiação solar incidente;  | ⑧ Saída de ar quente pela claraboia de ventilação.       |

**Figura 3.17.** Corte representativo do comportamento térmico num dia de inverno.

Durante a noite a massa térmica das paredes e pavimento libertam o calor acumulado durante o dia, como ilustrado na Figura 3.18.



**Legenda:**

- |   |   |
|---|---|
| ① Entrada de ar exterior para o tubo fechada;           | ⑤ Janela de ventilação entre estufa e zona habitacional;      |
| ② Massa térmica da parede pneu liberta calor absorvido; | ⑥ Blackouts reduzem perdas pelos envidraçados;                |
| ③ Entrada de ar novo para o interior fechada;           | ⑦ Claraboia superior (de exaustão) fechada;                   |
| ④ Pavimento liberta o calor absorvido durante o dia;    | ⑧ Cobertura bem isolada previne penetração da radiação solar. |

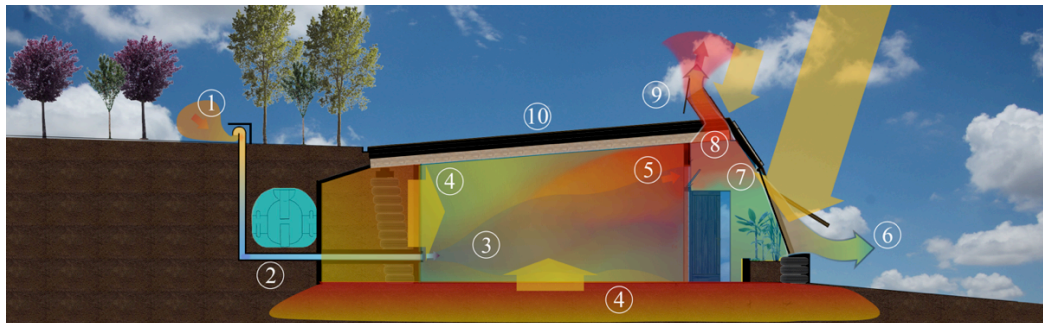
**Figura 3.18.** Corte representativo do comportamento térmico à noite.

### 3.2.3.2. Arrefecimento (verão)

O ar quente exterior é encaminhado para a conduta de ventilação protegida por uma caixa, construída em BTC (Blocos de Terra Compactada), blocos de tijolo ou cimento, que está coberta de vegetação, para funcionar como isolamento da conduta, impedindo que o ar seja aquecido. O ar circula pelos tubos que se comportam como permutadores de calor terra-ar, proporcionando a troca de calor do ar para o solo.

Apesar de no caso de estudo a conduta de ventilação ter uma configuração diferente devido ao edifício estar inserido num gaveto, tendo em conta o facto de que havendo uma

diminuição da temperatura do ar haverá um aumento da sua densidade e o ar circulará na mesma do exterior para o interior da habitação. Na Figura 3.19 está ilustrado um corte representativo do comportamento térmico do edifício para um dia de verão.



**Legenda:**

- |  |   |
|--|---|
| ① Entrada de ar exterior (quente) para a conduta;      | ⑥ Janela tipo velux para melhor ventilação da estufa; |
| ② Troca de calor do ar para o tubo e massa envolvente; | ⑦ Blackouts bloqueiam a radiação solar;               |
| ③ Ar novo e fresco circula pelos espaços interiores;   | ⑧ Zona superior da estufa sobreaquecida;              |
| ④ Paredes e pavimento perdem calor para o ar interior; | ⑨ Saída de ar quente interior pela claraboia de topo; |
| ⑤ Saída de ar quente da zona hab. por janela operável; | ⑩ Cobertura bem isolada.                              |

**Figura 3.19.** Corte representativo do comportamento térmico num dia de verão.

A potência transferida do ar, através do tubo para a terra, depende da resistência térmica convectiva interna (do ar), da resistência térmica condutiva do tubo e da resistência térmica exterior da terra compactada circundante.

### 3.3. Aproveitamento de recursos naturais

Os recursos naturais que podem ser aproveitados são a energia solar e água da chuva. A energia solar é utilizada para o aquecimento da água para o sistema de AQS e para a produção de energia elétrica. A água da chuva é recolhida na cobertura e armazenada em cisternas para o consumo dos utilizadores da habitação.

Para o aproveitamento da energia solar térmica são normalmente usados painéis planos ou de tubos de vácuo, sendo o segundo o mais eficiente e dispendioso. Com o recurso a sistemas deste tipo é possível diminuir os gastos em energia elétrica ou gás.

A água quente é utilizada para banhos, higiene dos ocupantes e lavar louça. Estima-se que por dia são gastos 200 litros de água, aproximadamente 80 litros de água quente e 120 de água fria. Nas torneiras das IS (Instalações Sanitárias) estima-se que se utilizam cerca de 5 litros por pessoa por dia, o que, para 2 IS resulta em 40 litros de água quente. Na cozinha, para a limpeza de alguma louça estima-se um gasto de 20 litros por dia.

Com o recurso a painéis PV (fotovoltaicos) é produzida energia elétrica DC, armazenada em várias baterias. A energia armazenada pode ser usada diretamente para iluminação e alguns aparelhos através de um circuito DC e/ou convertida através de um inversor de corrente para outro circuito AC. Hoje em dia já se encontram soluções disponíveis de corrente DC para as mais variadas aplicações, evitando o recurso a inversores e aparelhos AC.

### 3.3.1. Águas pluviais e águas residuais

Para este caso de estudo, o SAAP (Sistema de Aproveitamento de Águas Pluviais) é muito semelhante ao sistema proposto pela EB. De seguida são apresentados dados referentes à quantidade de água que é possível coletar *versus* consumos anuais e mensais deste edifício perante os respetivos dados climatéricos.

A captação de água requer especial atenção e alguns aspetos devem ser considerados, tais como: a filtragem da água para a remoção de sujidades, folhas e/ou outros resíduos através de separadores e/ou malhas de rede; separar e descartar a água da primeira chuva que, mesmo depois de filtrada ainda contém pequenos detritos, *first-flush*, que pode ser feito com recurso a um reservatório secundário de *by-pass*, com a capacidade necessária para o efeito; a área de captação de água, que permite determinar um correto volume de armazenamento, assim como diâmetros adequados para o encaminhamento da água para as cisternas e um coeficiente de escoamento superficial, *runoff*, que representa a relação entre o volume total captado e o volume total precipitado e varia consoante a superfície. Os valores mais utilizados apresentam-se na Tabela 3.9.

**Tabela 3.9.** Coeficiente de *runoff* [57].

<b>Coeficientes de <i>runoff</i></b>	
<b>Material da cobertura</b>	<b>Coeficiente de <i>runoff</i></b>
Telhas cerâmicas	0,8 a 0,9
Telhas esmaltadas	0,9 a 0,95
Telhas corrugadas de metal	0,8 a 0,9
Cimento amianto	0,8 a 0,9
Plástico (PVC)	0,9 a 0,95

Para a cobertura em questão neste estudo, telhas corrugadas de metal, opta-se, segundo a Tabela 2.1, por um coeficiente de *runoff* de 0,9. Para a precipitação são utilizados os valores médios mensais apresentados na secção 3.1.2. Normalmente, é recomendado



descartar o primeiro milímetro de coluna de água de chuva. No entanto, em grandes cidades há uma quantidade considerável de poluentes e poeiras no ar, nesses casos recomenda-se descartar 2 mm [58]. Um milímetro de coluna de água de chuva, num metro quadrado de telhado, apanha 1 litro de água. Ou seja, para uma área de captação, igual à área da cobertura de 162 m<sup>2</sup>, o *first-flush* deve ser de 162 litros de água da chuva.

Na Figura 3.20 é ilustrado o funcionamento do SAAP e do SPRAC (Sistema de Reutilização de Águas Residuais Cinzentas) do caso em estudo.



**Legenda:**

- |   |                             |                                    |
|---|-----------------------------|------------------------------------|
| ① Cobertura de captação de água;                      | ⑤ Reservatório de água;     | ⑩ Filtro de turfa;                 |
| ② Calceiro de recolha de água do telhado;             | ⑥ Módulo de gestão de água; | ⑪ Reservatório de águas cinzentas; |
| ③ Grelha de recolha de água do terreno;               | ⑦ Bomba;                    | ⑫ Filtro de carvão;                |
| ④ Filtro de gravilha sifonado para folhas e resíduos; | ⑧ Depósito de AQS.          | ⑬ Bomba;                           |
|   | ⑨ Filtro de gorduras;       | ⑭ Reservatório séptico.            |

**Figura 3.20.** Esquema ilustrativo do SPRAC.

O volume de captação de água pela,  $V_{cap}$ , obtém-se a partir da equação (3.16).

$$V_{cap} = pp \times A_{cap} \times c_{runoff} [m^3] \quad (3.16)$$

Em que:  $pppp$  é o valor da precipitação média [m],  $A_{cap}$  é a área de captação da cobertura [m<sup>2</sup>] e  $c_{runoff}$  o coeficiente de *runoff*.

É considerado um consumo diário dos 4 habitantes de 400 litros (100 litros/ocupante), ou seja, uma capitação de 0,1 m<sup>3</sup>/ocupante e um coeficiente de *runoff* de 0,9.



## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

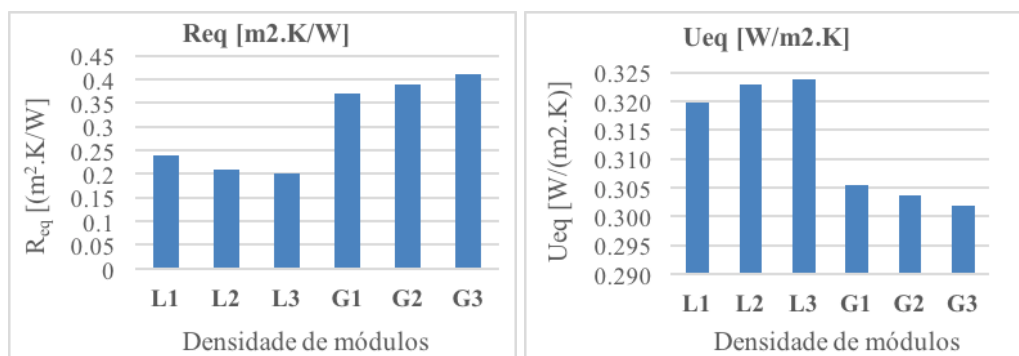
Em climas moderados e frios, as pessoas têm tendência a permanecer mais tempo em espaços fechados, sendo fundamental para o seu bem-estar a qualidade do ambiente interior. O conforto depende de diversos fatores, a temperatura, como humidade, radiação solar, objetos circundantes e o conteúdo de poluição do ar do espaço.

Apesar dos ocupantes se aperceberem facilmente se a temperatura de um espaço está muito elevada ou muito baixa, o impacto negativo de excesso ou défice de humidade não é um conhecimento usual, apesar dos efeitos nefastos para saúde. [59]

### 4.1. Resistências térmicas de elementos não homogêneos

Para a mesma parede, observa-se que a resistência térmica é maior com módulos em garrafa, do que em lata, como se pode verificar na Figura 4.1. Este facto deve-se à diferença entre os valores das condutibilidades térmicas dos materiais da casca dos módulos e à diferença das suas espessuras. A condutibilidade térmica do vidro [0,7 W/(m.K)] é significativamente inferior à condutibilidade do alumínio [230 W/(m.K)] e a espessura da casca do módulo garrafa, 3 mm, é maior do que a espessura da lata, 0,1016 mm. Analisando apenas parede com latas, verifica-se que a resistência térmica total equivalente da parede diminui se se aumentar a densidade de módulos, ou seja, quantos mais módulos (latas) incorporarem a parede, menor será a resistência térmica equivalente.

No caso de paredes com garrafas, a resistência térmica equivalente da parede aumenta ligeiramente com o aumento da densidade de módulos.



**Figura 4.1.** Comparação da  $R_{eq}$  e do  $U_{eq}$  nas paredes com latas ou garrafas para diferentes densidades de módulos.

No caso do coeficiente global de transferência de calor equivalente,  $U_{eq}$ , verifica-se o inverso, como seria expectável. O  $U_{eq}$  é menor para paredes com o módulo garrafa, como se pode verificar na Figura 4.1.

Em paredes com latas, o  $U_{eq}$  aumenta com o aumento do número de módulos por parede, ou seja, não tem interesse colocar mais latas na mesma parede.

Por sua vez, em paredes com garrafas, o  $U_{eq}$  apresenta valores inferiores se se aumentar a densidade de módulos, sendo mais benéfico a colocação de mais garrafas numa parede. Desta forma, é mais interessante o uso de garrafas em paredes deste género. De referir que, aumentando o número de módulos por metro quadrado, menor será o volume de argamassa, o que, fará com que a matriz estrutural parede seja mais fraca.

Das paredes não homogéneas, latas e garrafas, as paredes exteriores das antecâmaras são as que têm maior peso no comportamento térmico do edifício visto estarem em contacto com o exterior. As paredes interiores terão algum peso, mas mais relacionado com a capacidade de absorver e libertar calor, inércia térmica.

De forma a perceber se as paredes exteriores das AC têm ou não valores de  $R_t$  e adequados, é feita uma comparação com os valores de referência e máximos sugeridos pelo REH. Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores de  $U$  das paredes das AC, com as soluções em lata e garrafas e as diferentes densidades de módulos, comparados com os valores máximos e de referência.

**Tabela 4.1.** Valores de  $R_t$  e  $U_t$  para as diferentes tipos e densidades de módulo.

Parede	$R_{eq}$ [m <sup>2</sup> .K/W]	$R_{isol} + R_{reb}$ [m <sup>2</sup> .K/W]	$R_{se} + R_{si}$ [m <sup>2</sup> .K/W]	$R_{Total}$ [m <sup>2</sup> .K/W]	$U_{Total}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{ref}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{max}$ [W/m <sup>2</sup> .K]
<b>L1</b>	0,24	2,718	0,17	3,128	<b>0,320</b>	0,35	1,6
<b>L2</b>	0,21	2,718	0,17	3,098	<b>0,323</b>	0,35	1,6
<b>L3</b>	0,20	2,718	0,17	3,088	<b>0,324</b>	0,35	1,6
<b>G1</b>	0,37	2,733	0,17	3,273	<b>0,306</b>	0,35	1,6
<b>G2</b>	0,39	2,733	0,17	3,293	<b>0,304</b>	0,35	1,6
<b>G3</b>	0,41	2,733	0,17	3,313	<b>0,302</b>	0,35	1,6

Perante estes resultados, verifica-se que, em termos de  $U$ , as paredes de latas ou garrafas aplicadas numa parede exterior, com isolamento, respeitam os valores de referência da legislação portuguesa.

## 4.2. Resultados da simulação

Para uma análise mais detalhada foram escolhidos para a simulação dias “chave”, tais como, de acordo com o ficheiro climático, o dia mais quente e o dia mais frio do ano, os dias dos solstícios de verão e inverno, assim como os dias dos equinócios.

Segundo o ficheiro climático, o dia mais quente do ano é 27 de agosto e o dia mais frio 31 de dezembro. Para os equinócios e solstícios assume-se os do presente ano, ou seja, os equinócios nos dias 20 de março e 22 de setembro, o solstício de verão dia 20 de junho e o solstício de inverno dia 21 de dezembro [60].

De modo a simplificar a análise, é estudado o comportamento térmico apenas nas zonas com ocupação permanente, nomeadamente a sala-cozinha (S-C) e os quartos (Q1, Q2 e Q3), por serem os espaços onde os ocupantes se encontrarão a maior parte do tempo.

De seguida, são apresentados nos resultados da análise para os dias: mais quente, mais frio e equinócios. Os resultados referentes aos solstícios não são apresentados aqui por serem semelhantes aos acima mencionados e podem ser consultados no APÊNDICE A.

### **Situação mais desfavorável (superior), 27 de agosto:**

Para o dia mais quente do ano, 27 de agosto, com uma  $T_{mh}$  mínima de 15°C e máxima de 35°C, considera-se os dispositivos de sombreamento (*black-outs*) e de ventilação todos ativados, sem qualquer intervenção dos utilizadores, e uma taxa de renovação de ar mínima imposta pelo REH de 0,4 renovações por hora, através de portas e restantes janelas.

Na Figura 4.2 apresenta-se a variação da  $T_{mh}$  para essas características.

Na zona da sala-cozinha, o período com a  $T_{mh}$  mais baixa é entre as 5 e as 9 horas, com valores entre 18,4 e 21,2°C e o período com a  $T_{mh}$  mais elevada é entre as 12 e as 22 horas com valores entre 29,2 e 33,7°C.

Para os quartos, analisando o quarto interior (Q3) devido a ser o que apresenta a situação menos favorável, o intervalo de tempo com a  $T_{mh}$  mais baixa encontra-se entre as 3 e as 9 horas, com valores entre 16,6 e 19,7°C e o período com a  $T_{mh}$  mais elevada entre as 12 e as 22 horas, com valores entre 28 e 33,8°C. Desta forma, é de notar que as condições do ar no interior do edifício estão próximas das condições do ar no exterior.

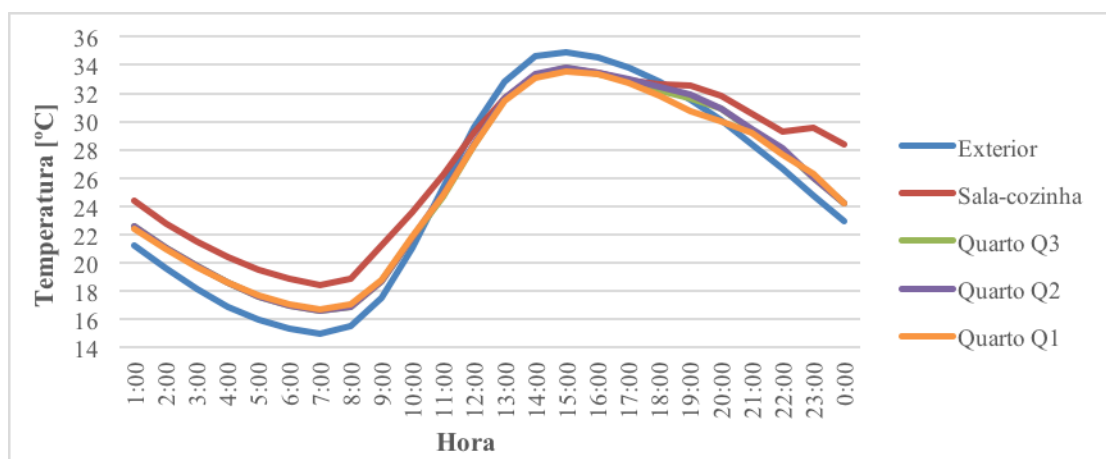


Figura 4.2. Variação da temperatura média horária,  $T_{mh}$ , no dia mais quente do ano.

No mesmo dia, assumindo que a ventilação dos tubos enterrados desativada, uma taxa de renovação do ar mínima de 0,4 renovações por hora e as claraboias da estufa abertas, a flutuação da temperatura no interior da habitação é menor. No entanto, a sala-cozinha apresenta temperaturas acima das condições de conforto, sendo a  $T_{mh}$  mínima 26,5°C às 7 horas e a máxima 34,5°C às 20 horas e é devido às cargas internas, consequência da ocupação e utilização dos equipamentos. Nos quartos verificam-se temperaturas relativamente aceitáveis embora haja um ligeiro sobreaquecimento durante a tarde. A  $T_{mh}$  mínima no Q3 é 23,4°C às 9 horas e a máxima 32,8°C às 16 horas e durante o período de ocupação dos quartos a  $T_{mh}$  está dentro dos parâmetros de conforto térmico.

A Figura 4.2 representa o gráfico com a evolução da  $T_{mh}$  durante o dia, para os diferentes espaços em estudo.

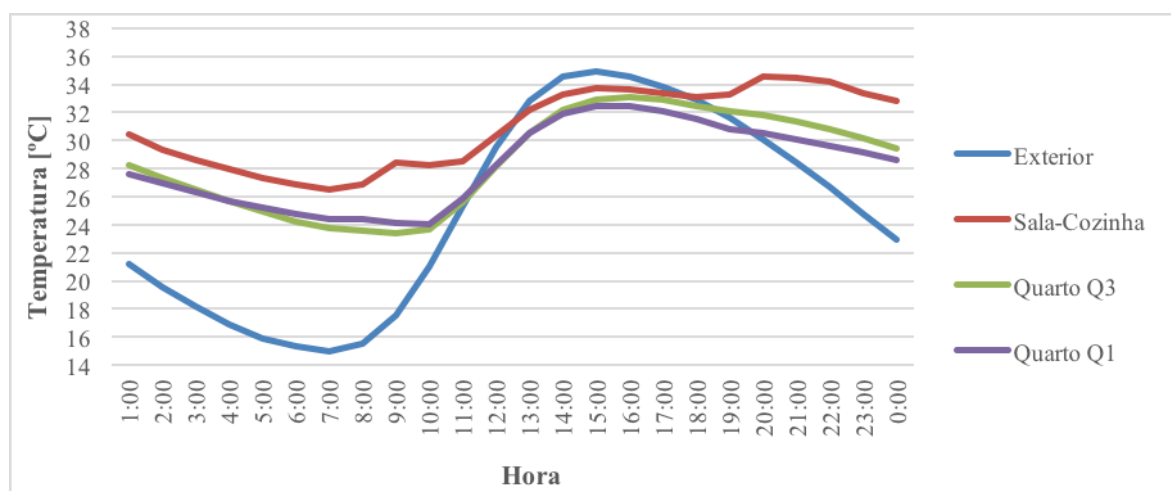
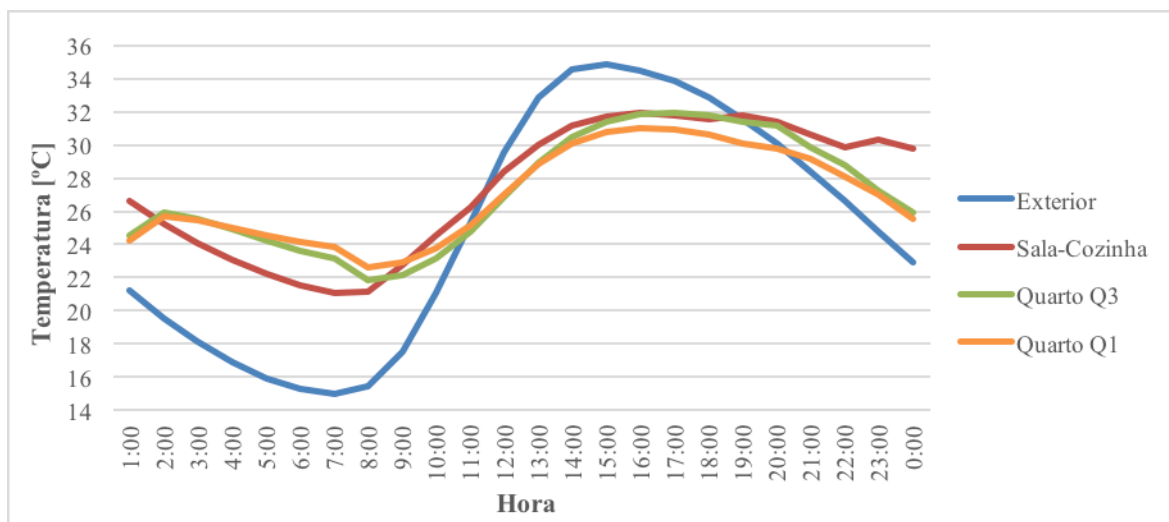


Figura 4.3. Variação da  $T_{mh}$ , no dia mais quente do ano, com renovação de ar.

Tomando em conta a intervenção dos ocupantes no acionamento dos dispositivos de sombreamento e de ventilação mediante *schedules*, é possível obter condições próximas do conforto térmico. Na Figura 4.4 apresenta-se a variação da  $T_{mh}$  durante o dia, para os diferentes espaços em estudo.



**Figura 4.4.** Variação da  $T_{mh}$ , no dia mais quente do ano.

Os tubos enterrados estão ativados nos quartos durante a noite, entre as 20 e as 2 horas, na sala-cozinha durante a noite e a manhã, das 19 até as 12 horas e desativados nos quartos entre as 2 e as 20 horas e na sala-cozinha à tarde, entre as 12 e as 19 horas. As claraboias da cobertura da estufa encontram-se sempre abertas. Assim sendo, na sala-cozinha, o período com a  $T_{mh}$  mais baixa encontra-se entre as 5 e 9 horas, com valores entre 21,1 e 22,8°C e o período com a  $T_{mh}$  mais elevada entre as 14 e 20 horas, com valores entre 31,1 e 31,9°C.

Na zona dos quartos, os três têm resultados muito semelhantes. No entanto, apesar de ser pouco significativa a diferença, o Q1 tem um comportamento mais favorável que o Q2 e este mais do que o Q3. No Q1, o período com a  $T_{mh}$  mais baixa é entre as 7 e as 10 horas, com valores de 22,6 a 23,8°C e o período com a  $T_{mh}$  mais alta é entre as 14 e 19 horas, com valores entre 30,1 e 31,0°C. No Q3, o período com a  $T_{mh}$  mais reduzida está entre as 7 e as 10 horas, com valores entre 21,9 e 23,2°C e o período com a  $T_{mh}$  mais elevada entre as 14 e as 20 horas com valores entre 30,5 e 32,0°C. Durante o período de ocupação, verificam-se temperaturas dentro dos parâmetros de conforto térmico.

### Situação mais desfavorável (inferior), 31 de dezembro:

No dia mais frio do ano, 31 de dezembro, em que a  $T_{mh}$  mínima é 2,7°C e a máxima 9,7°C, assumem-se que os dispositivos de ventilação (tubos enterrados, janelas e claraboias da estufa) estão desativados e apenas existe a taxa mínima de renovação de ar igual a 0,4 renovações horárias que é imposta pelo REH. A Figura 4.5 ilustra a evolução da  $T_{mh}$  durante o dia, para os diferentes espaços em estudo.

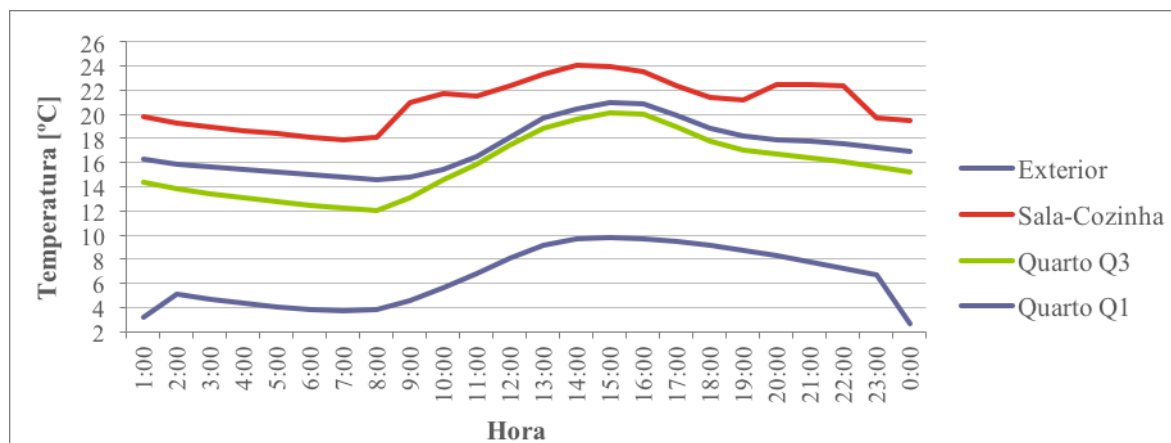


Figura 4.5. Variação da  $T_{mh}$ , no dia mais frio do ano.

Na zona da sala-cozinha, verifica-se a  $T_{mh}$  mínima de 17,9°C às 7 horas e a máxima de 24,1°C às 24 horas, sendo o período com a  $T_{mh}$  mais baixa entre as 2 e as 8 horas, com valores entre 17,9 °C e 19,8°C e o período com a  $T_{mh}$  mais elevada, entre as 13 e 16 horas, com valores de 23,4 °C e 24,1°C.

Relativamente aos quartos, no quarto nascente (Q1) verificam-se condições de conforto suavemente superiores ao quarto interior (Q3). No último, observa-se que o período com a  $T_{mh}$  mais baixa se encontra entre as 2 e as 10 horas com valores entre 12 e 14,5°C, valores algo abaixo das temperaturas de conforto. Entre as 13 e as 17 horas é o período com a  $T_{mh}$  mais elevada, com valores a variar de 18,8 a 20,1°C.

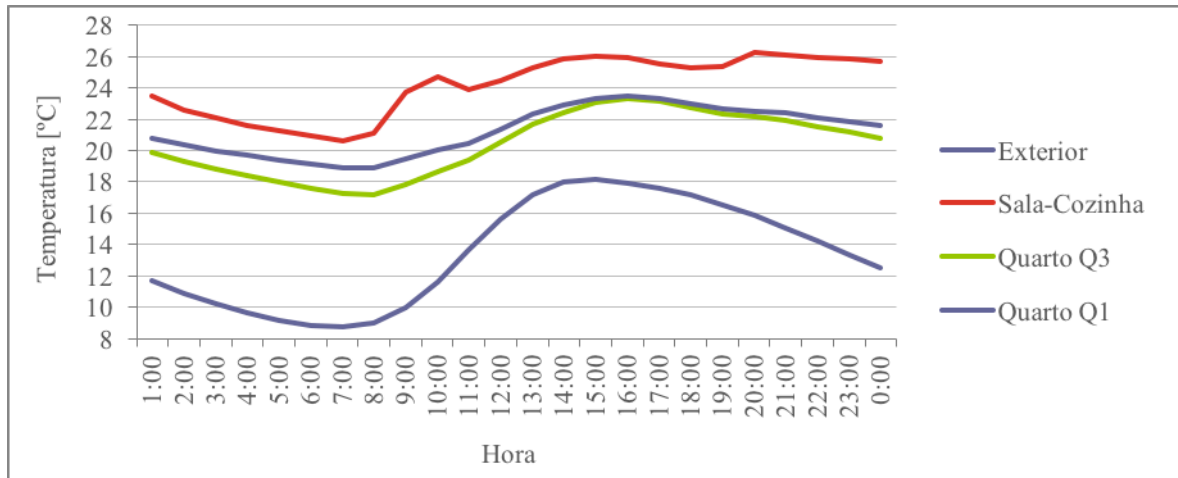
No espaço Q1 o período com temperaturas mais baixas entre as 6 e as 9 horas, com valores entre 14,6 e 15°C e o período com temperaturas mais elevadas das 12 às 18 horas, com valores de 18,8 a 21°C.

### Equinócios, dias 20 de março e 22 de setembro:

Para o dia 20 de março, com a  $T_{mh}$  exterior a variar entre 8,7 e 18,1°C, considera-se uma taxa de renovação de ar mínima de 0,4 renovações por hora e os dispositivos de ventilação (tubos enterrados e claraboias da estufa) desativados.



Na Figura 4.6 apresenta-se a evolução da  $T_{mh}$  para essas condições.

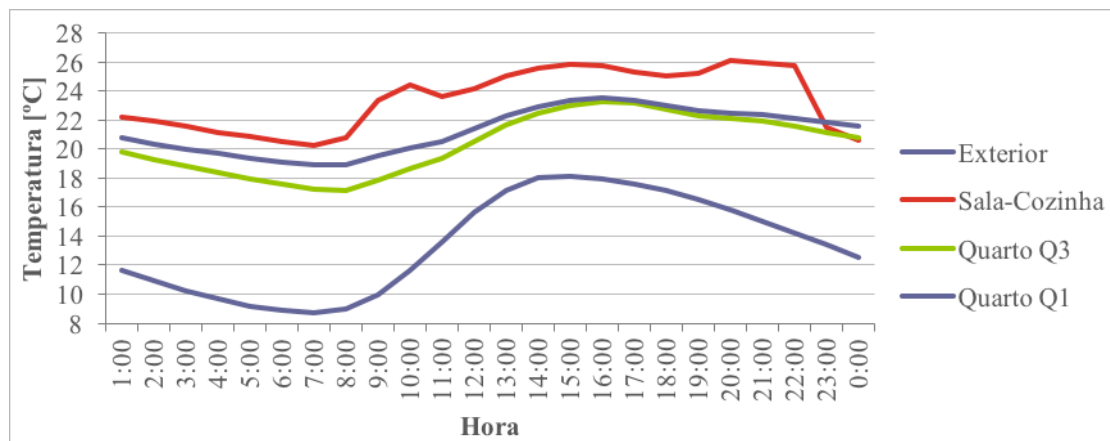


**Figura 4.6.** Variação da  $T_{mh}$ , no dia 20 de março, sem dispositivos de ventilação.

Observa-se que a temperatura dos quartos de mantém relativamente estável e ligeiramente abaixo das temperaturas de conforto térmico essencialmente durante o período de início da manhã, sendo o Q3 o que apresenta a  $T_{mh}$  mais baixa de 17,2°C às 8 horas e o Q1 a  $T_{mh}$  mais alta de 23,5, às 16 horas.

Na sala-cozinha verifica-se uma temperatura dentro dos parâmetros de conforto durante todo o dia, com a  $T_{mh}$  mais baixa de 20,6°C às 7 horas e a mais alta de 26,3, às 20 horas. O período com a  $T_{mh}$  mais elevada, devido à ocupação e a uma maior utilização de equipamentos, encontra-se entre as 14 e as 20 horas, com valores entre 25,3 e 26,3°C.

Considerando os tubos enterrados ativados apenas na sala-cozinha no período de sobreaquecimento, entre as 21 e as 24 horas, já é possível anular a influência das cargas internas. A Figura 4.7 representa o gráfico com a evolução da  $T_{mh}$  durante o dia, para os diferentes espaços em estudo, com as características referidas.



**Figura 4.7.** Variação da  $T_{mh}$ , no dia 20 de março, com ventilação na sala.

Na zona da sala-cozinha verifica-se a  $T_{mh}$  mínima de 20,3°C às 7 horas e a  $T_{mh}$  máxima de 26,1°C às 20 horas. O período com a  $T_{mh}$  mais baixa é entre as 4 e 8 horas, com valores entre 20,3 e 21,2°C e das 13 às 22 horas encontra-se o intervalo de tempo em que verifica a  $T_{mh}$  mais elevada, com valores entre 25 e 26,1°C.

Nos quartos, a  $T_{mh}$  não sofre muita alteração, mantendo-se, o intervalo com a  $T_{mh}$  mais baixa, no Q1, entre as 6 e as 9 horas, com valores de 18,9 a 19,5°C e no Q3 entre as 4 e as 9 horas, com valores entre 17,2 e 18,4°C. O período com a  $T_{mh}$  mais elevada no Q1 é entre as 14 e as 20 horas, com valores entre 22,6 e 24°C e no Q3, das 14 as 19 horas, observando-se os valores mais baixos dos três quartos, com valores entre 22,3 e 23,3°C.

No dia 22 de setembro, em que a  $T_{mh}$  mínima exterior é 15,5°C e a máxima 25,7°C, sem a consideração dos dispositivos de ventilação e considerando apenas a taxa de renovação do ar mínima (0,4 renovações por hora), há um sobreaquecimento durante a segunda metade do dia na sala-cozinha, com maior intensidade entre as 12 e as 18 horas e nos quartos apenas entre as 14 e as 18 horas, sendo que, nestes, durante o período de ocupação, a temperatura está dentro dos parâmetros de conforto.

Comparando com o outro equinócio, 20 de março, verifica-se que, em setembro a  $T_{mh}$  do ar no interior do edifício atinge temperaturas superiores, o que pode ser consequência da influência inércia térmica. A massa térmica das paredes absorve o calor durante a estação quente e liberta-o durante as restantes.

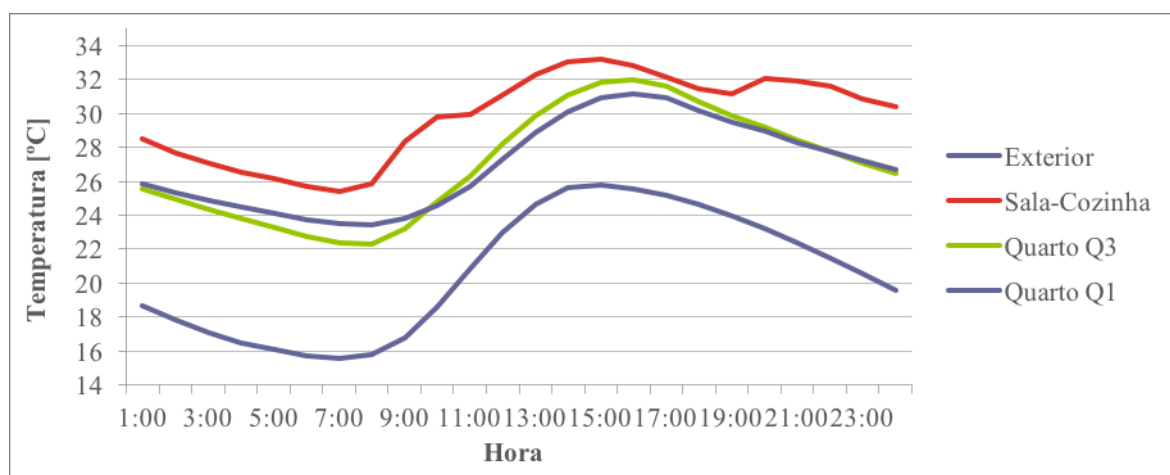


Figura 4.8. Variação da  $T_{mh}$ , no dia 22 de setembro, sem ventilação.

Para o mesmo dia, mas considerado o funcionamento parcial das condutas de ventilação, bem como as claraboias de ventilação da zona da estufa. Assume-se que, para a sala-cozinha, os condutas de ventilação estão fechadas entre as 0 e as 8 horas e 30 minutos

e abertas entre as 8:30 e as 24 horas. Para os quartos, estão fechadas entre as 23 e as 10 horas e abertas das 10 às 23 horas. A Figura 4.9 representa o gráfico com a evolução da  $T_{mh}$  durante o dia, para os diferentes espaços em estudo.

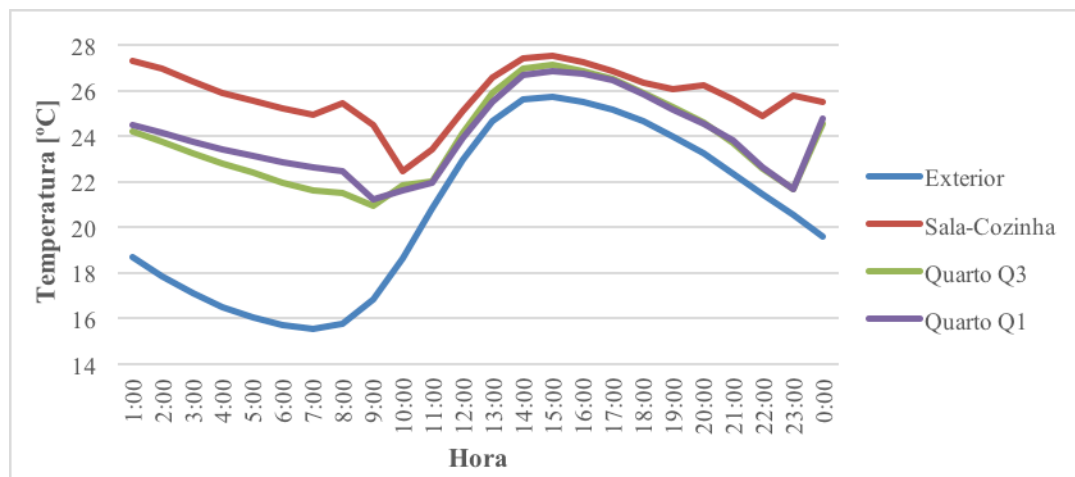


Figura 4.9. Variação da  $T_{mh}$ , no dia 22 de setembro, com ventilação.

Na zona sala-cozinha há dois períodos em que a  $T_{mh}$  é ligeiramente mais elevada, entre a 1 e 2 horas, com 27 e 27,3°C respetivamente e entre as 13 e 17 horas com valores a variar entre 26,6 e 27,5°C.

Nos quartos, o Q3 apresenta temperaturas ligeiramente superiores ao Q1. No Q3, o período com a  $T_{mh}$  mais elevada entre as 14 e as 18 horas, com valores entre 25,9 e 27,1°C e o período com a  $T_{mh}$  mais baixa entre as 6 e 11 horas com valores entre 20,9 e 22°C.

No Q1, o período com a  $T_{mh}$  mais elevada entre as 14 e as 17 horas, com valores entre 25,8 e 26,8°C.

No espaço sala-cozinha, os picos de temperatura que se observam para todas as situações resultam de serem os períodos de maior ocupação da zona.

#### 4.1. Aproveitamento de águas pluviais

Como já foi referido no subcapítulo 3.3.1, para um consumo diário dos quatro habitantes de 400 litros (100 litros/ocupante), ou seja, uma captação de 0,1 m<sup>3</sup>/ocupante e um coeficiente de *runoff* de 0,9, o volume consumido é superior ao volume coletado pela cobertura, sendo necessário recorrer a outra fonte para completar as necessidades.

Os resultados obtidos foram determinados Na Tabela 4.2 apresenta-se a comparação entre o volume de captação *versus* o volume consumido.

**Tabela 4.2.** Comparação do volume de captação e volume consumido.

Nº de dias	Mês	Pp média [mm]	Captação média [m <sup>3</sup> ]	Captação acumulada [m <sup>3</sup> ]	Consumo mensal [m <sup>3</sup> ]	Consumo acumulado [m <sup>3</sup> ]	Diferença [m <sup>3</sup> ]
31	JAN	137	20,0	20,0	12,4	12,4	7,6
28	FEV	133,2	19,4	39,4	11,2	23,6	15,8
31	MAR	114,6	16,7	56,1	12,4	36,0	20,1
30	ABR	77,4	11,3	67,4	12,0	48,0	19,4
31	MAI	71,7	10,5	77,8	12,4	60,4	17,4
30	JUN	45,2	6,6	84,4	12,0	72,4	12,0
31	JUL	13,7	2,0	86,4	12,4	84,8	1,6
31	AGO	16,5	2,4	88,8	12,4	97,2	-8,4
30	SET	46	6,7	95,5	12,0	109,2	-13,7
31	OUT	93,4	13,6	109,2	12,4	121,6	-12,4
30	NOV	115,9	16,9	126,1	12,0	133,6	-7,5
31	DEZ	118,9	17,3	143,4	12,4	146,0	-2,6

Se for reduzido o consumo diário por habitante para 85 litros, ou seja 0,085 m<sup>3</sup>/habitante/dia, o volume de água coletada pela cobertura será suficiente face ao consumo dos ocupantes, como se pode verificar através da Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Comparação do volume de captação e volume consumido.

Nº de dias	Mês	Precipitação média [mm]	Captação média [m <sup>3</sup> ]	Captação acumulada [m <sup>3</sup> ]	Consumo mensal [m <sup>3</sup> ]	Consumo acumulado [m <sup>3</sup> ]	Diferença [m <sup>3</sup> ]
31	JAN	137,0	20,0	20,0	10,5	10,5	9,4
28	FEV	133,2	19,4	39,4	9,5	20,1	19,3
31	MAR	114,6	16,7	56,1	10,5	30,6	25,5
30	ABR	77,4	11,3	67,4	10,2	40,8	26,6
31	MAI	71,7	10,5	77,8	10,5	51,3	26,5
30	JUN	45,2	6,6	84,4	10,2	61,5	22,9
31	JUL	13,7	2,0	86,4	10,5	72,1	14,4
31	AGO	16,5	2,4	88,8	10,5	82,6	6,2
30	SET	46,0	6,7	95,5	10,2	92,8	2,7
31	OUT	93,4	13,6	109,2	10,5	103,4	5,8
30	NOV	115,9	16,9	126,1	10,2	113,6	12,5
31	DEZ	118,9	17,3	143,4	10,5	124,1	19,3

Independentemente de o volume recolhido pela cobertura satisfazer ou não o consumo dos utilizadores da água, o recurso a estes sistemas possibilita uma redução ou mesmo a anulação da necessidade de recorrer a serviços municipais de distribuição de água.

## **4.2. Sugestões de melhoria/otimização**

Para melhorar e corrigir algumas das fragilidades deste modelo, podem ser adotadas várias soluções. Seguem-se algumas medidas de otimização do caso de estudo.

Para construir com terra não precisamos de ter gastos energéticos com o transporte, usando a terra do local. No entanto, se o solo do terreno não permitir ser utilizado, deve ser transportado no máximo a uma distância igual ou exatamente menor à distância que seria necessária para transportar tijolos. Ainda assim, é possível poupar energia e minimizar o impacto ecológico porque a terra exige menos esforço e tempo para carregar e descarregar, poupando combustível e consequentemente energia.

A análise da eficiência energética varia em função da perspetiva com que é feita. Na perspetiva do utilizador o objetivo é um menor custo de construção, assim como menores gastos energéticos, que se traduzem em menores custos de consumo e manutenção. Na perspetiva de avaliação de ciclo de vida, todos os fatores têm que ser considerados, desde a recolha à produção e transporte de materiais, até aos gastos de energia primária inerentes a cada um desses processos. A análise deste caso de estudo com uma perspetiva de ACV (Avaliação de Ciclo de Vida) seria uma abordagem interessante, ficando a sugestão para a sua realização em trabalhos futuros.

### **4.2.1. Elementos Construtivos**

A utilização de chapa como revestimento na cobertura proporciona imediatamente um aumento da sua temperatura pois esta, apesar de ter uma espessura reduzida, tem uma elevada condutibilidade térmica, o que facilita a transmissão do calor proveniente da incidência da radiação solar. Outro aspeto a ter em conta é o ruído. Num dia chuvoso, o barulho da chuva a bater na chapa vai ouvir-se no interior da habitação. Em Portugal existem vários produtores de telha para coberturas, não fazendo muito sentido usar chapa como revestimento na cobertura. A telha é feita de argila que é um material natural presente nos solos, ao contrário da chapa.

Na Tabela 4.4 apresenta-se uma solução para substituição daquela sugerida anteriormente e utilizada pela EB.

**Tabela 4.4.** Características da solução construtiva de melhoria para a cobertura.

Cobertura							
Tipo de SC	C	Material	e [m]	R [(m <sup>2</sup> .K)/W]	R <sub>se</sub> +R <sub>si</sub> [(m <sup>2</sup> .K)/W]	R <sub>Total</sub> [(m <sup>2</sup> .K)/W]	U [W/m <sup>2</sup> .K]
Cobertura	1	Telha cerâmica	0,025	0,600	0,14	5,922	0,169
	2	Caixa de ar	0,025	0,180			
	3	XPS ou PIR	0,200	5,882			
	4	Tela EPDM	0,006	0,046			
	5	Madeira OSB	0,015	0,100			

Em climas húmidos, como o caso de estudo, devem ser tidos em consideração aspetos como humidade ascensorial, um problema bastante comum na zona centro e norte de Portugal. Para evitar esta situação, recorre-se à construção de uma vala de dreno, junto às paredes em contacto com o solo, ao redor do edifício e deve optar-se por pavimentos com caixa de ar. Desta forma será possível diminuir eventuais aparecimentos de humidade no interior do edifício, assim como a caixa de ar funcionará como isolamento térmico do pavimento embora não seja por este que existe uma maior perda de calor.

Na Tabela 4.5 apresentam-se as soluções de melhoria mencionadas para o pavimento.

**Tabela 4.5.** Características das soluções de melhoria para o pavimento.

Pavimento							
Tipo de SC	C	Material	e [m]	R [(m <sup>2</sup> .K)/W]	R <sub>se</sub> +R <sub>si</sub> [(m <sup>2</sup> .K)/W]	R <sub>Total</sub> [(m <sup>2</sup> .K)/W]	U [W/m <sup>2</sup> .K]
Pavimento Interior c caixa de ar	1	Soalho (madeira)	0,050	0,217	0,21	0,775	1,291
	2	Caixa de Ar	0,080	0,216			
	3	Tela EPDM	0,006	0,024			
	4	Betonilha	0,150	0,107			
Pavimento Estufa com caixa de ar	1	Pedra/Tijoleira	0,050	0,023	0,21	0,580	1,725
	2	Caixa de Ar	0,100	0,216			
	3	Tela EPDM	0,006	0,024			
	4	Betonilha	0,150	0,107			

A utilização de pneus na construção de edifícios tem levantado algumas questões em determinados países pois estes possuem uma série de COV que são tóxicos e prejudiciais à saúde humana. Vários estudos indicam que os pneus se decompõem quando expostos a altas temperaturas, radiação solar ou agentes de oxidação e libertam esses gases que podem ser inalados por nós e absorvidos pelo solo.

Apesar de neste tipo de construção os pneus não estarem expostos à intempérie e encontrarem-se cobertos de terra e reboco, é dito que estes têm um risco mínimo para os habitantes deste tipo de edifício, devido a possuírem um potencial de decomposição reduzido. Reutilizar os pneus é melhor do que deitá-los fora, mas, tendo em conta que estes

são recicláveis, ao usá-los para construção, estão a ser retirados da rede de reciclagem. Em Portugal existe uma empresa específica para a recolha e reciclagem de pneus [61].

Para erguer uma parede de pneus é preciso muito tempo e esforço físico. O recurso fica, portanto, ao critério de cada um visto em Portugal não existir legislação sobre este assunto, mas existem soluções alternativas substituindo os pneus por pedra, no caso deste recurso existir perto do local de construção, que inclusivamente, contribui com uma inércia térmica superior devido á sua elevada densidade. Também podem ser usados sacos de terra, “superadobe”, ou até mesmo a taipa que é um método já usado há muito tempo, mas não recomendado para climas húmidos.

Outro tipo de solução é “*cordwood*”, uma técnica pouco conhecida, mas simples de construir que usa, em parte, materiais naturais (madeira). O “*cordwood*” consiste no empilhamento de rolos ou troncos de madeira de uma forma idêntica às paredes de garrafas e latas, alternado com cimento.

Na Figura 4.10 são ilustrados os dois últimos tipos de parede.



Figura 4.10. Exemplos de paredes com sacos de terra (superadobe) e *cordwood* [62][63].

#### 4.2.2. Climatização

No campo da climatização há vários problemas a resolver. Temperaturas elevadas no verão, temperaturas abaixo das condições de conforto térmico no inverno e elevada humidade relativa no geral, embora seja no inverno e primavera que se verificam as piores condições. Em dias nublados ou chuvosos são necessários mais cuidados dada a exigência de renovação do ar interior.

Para evitar o sobreaquecimento no verão e em dias mais quentes, deverão ser incorporados elementos de sombreamento exterior, tais como palas na fachada virada a sul, de forma a que não haja qualquer incidência de radiação solar. A colocação de árvores de folha caduca autóctones, como carvalhos (*quercus coccifera*), nogueiras (*juglans regia*), cerejeiras (*cerasus*), entre outras espécies. A instalação de claraboias na cobertura dos

espaços interiores pode igualmente favorecer a remoção de ar quente no interior. Um SVG (sistema de ventilação geotérmico) pode também facilitar o arrefecimento durante estes períodos. Em relação à estrutura do edifício, a fachada inclinada favorece o aquecimento no inverno, mas intensifica os ganhos no verão. Reduzir a área de envidraçados é uma medida que pode reduzir os ganhos de calor na estação de arrefecimento assim como reduzir as perdas na estação de aquecimento, pois é pelos envidraçados que existem frequentemente maiores ganhos e/ou perdas de calor. A modificação da inclinação desta mesma fachada deverá contribuir igualmente para esse efeito.

No inverno, o recurso a sistemas de aquecimento como caldeiras de pellets (biomassa) é uma solução simples e eficaz para aumentar a temperatura no interior. Hoje em dia existem soluções no mercado bastante acessíveis e com rendimentos interessantes. Este sistema pode e deve estar ligado ao sistema de AQS de modo a garantir o aquecimento da água em dias em que os coletores solares não permitem atingir a temperatura desejada, dias de fraca radiação solar e/ou de inverno. Sistemas mais arcaicos como salamandras poderão ser utilizados para o mesmo fim, conseguindo um maior aproveitamento do calor, se a conduta de saída de gases for colocada a passar por espaços que se pretendem aquecer, antes de a encaminhar para o exterior.

Os sistemas referidos nos dois parágrafos anteriores contribuirão para a redução da humidade relativa do ar, pois aumentando a temperatura, há normalmente um decréscimo dos níveis de humidade do ar. Em dias mais quentes e húmidos, o recurso aos sistemas de aquecimento não é pretendido e os sistemas de ventilação utilizados simplesmente proporcionam a entrada do ar húmido exterior para dentro da habitação, o que prejudica a qualidade do ar interior. Para solucionar o problema podem ser adicionados ao sistema de ventilação (tubos enterrados) filtros e desumidificadores, o que diminuirá o caudal de ar e implicará o acoplamento de pequenos ventiladores mecânicos. A entrada de ar húmido será inexistente se for adotado um SVG.

Atualmente, para um melhor controlo, evitando a ação dos utilizadores, existem sistemas de gestão técnica centralizada (GTC) que permitem a monitorização e controlo programáveis dos equipamentos de climatização. Claro que, esta solução implica o recurso a componentes mecânicos, mas aumentam a eficiência dos sistemas.



### **4.2.3. Equipamentos**

Para os equipamentos, estão a aparecer no mercado soluções interessantes que proporcionam uma utilização mais sustentável dos recursos. Por exemplo, no caso de fogões, existem soluções que induzem a redução de desperdício e produção de gás para cozinhar, nomeadamente um sistema de compostagem com produção de biogás conhecido como “*homebiogas*” que minimiza a emissão de GEE, tais como o metano. Este sistema foca-se na utilização do metano libertado pelo processo de fermentação da compostagem de detritos orgânicos, reduz a necessidade de depender de fontes externas de gás natural e facilita a poupança de tempo e energia. O “*homebiogas*” pode consumir cerca de 6 litros de desperdícios da cozinha e 15 litros de dejetos de animais e produz 600 litros de biogás constituído por aproximadamente 65% de metano e 35% de dióxido de carbono que permite cerca de 3 horas a cozinhar. A pressão nominal do circuito é de 15 milibar e tem uma produção mais eficiente com temperaturas acima de 17°C [64].

### **4.2.4. Medidas para uma utilização mais sustentável da água**

No tratamento de água para consumo, em vez se construir um sistema de filtros de carbono e cerâmica de certo modo artesanal, como aquele apresentado pela EB, existe uma solução criada por especialistas (engenheiros, químicos e biólogos), que garante a remoção de 100% dos possíveis poluentes, desde microbactérias a químicos nocivos para a saúde. Os equipamentos têm várias certificações das entidades reguladoras, incluindo TÜV [65].



## 5. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve o propósito de verificar os aspetos de sustentabilidade energética e ambiental de um edifício de arquitetura não convencional denominado por *earthship*, com análise do desempenho térmico através de simulações dinâmicas, de modo a apurar se este tipo de habitação se comporta como é dito pelos seus criadores.

Foram tidos em conta fatores não contabilizados em estudos anteriores, tais como os elementos construtivos não homogéneos, a modelação de tubos de ventilação enterrados e o efeito de chaminé gerado pela estufa que incorpora a fachada a sul.

Este conceito, *earthship*, embora não sendo perfeito, com algumas alterações pode vir a ser uma boa solução para o clima em Portugal. Em termos de soluções construtivas, estaria bem para climas quentes e secos do interior centro e sul, como Castelo Branco ou Beja, mas para climas mais húmidos e frios como Arganil ou ainda Guarda ou Bragança, mais a norte, poderão existir problemas com humidades e arrefecimento.

O modelo criado para o cálculo de resistências térmicas dos elementos não homogéneos mostra que uma parede com garrafas tem um coeficiente de transmissão térmica inferior a uma parede com latas e que ambas respeitam os valores de referência para o  $U$  da legislação portuguesa. No caso de paredes com latas, se se aumentar a densidade de módulos, o valor de  $U$  aumenta, ao contrário do que acontece com paredes com garrafas, verificando-se uma diminuição do  $U$  com o aumento do número de módulos por parede.

Em relação ao aproveitamento das águas pluviais, numa habitação com estas características, se existir consciencialização para um consumo controlado e sem desperdícios, é possível captar água suficiente para os gastos de uma família de quatro pessoas. O sistema de filtragem de água deverá ser reformulado e adaptado à tecnologia atual de modo a garantir que esta se encontrará livre de qualquer tipo de organismo e/ou composto, que possa ser prejudicial à saúde dos seus consumidores.

No campo da climatização e comportamento térmico, mesmo com a modelação de aspetos não considerados em estudos anteriores, a habitação apresenta algum

sobreaquecimento no verão, apesar de, durante o período de ocupação, nos quartos, apresentar temperaturas de conforto térmico. No inverno há necessidade de recorrer a um sistema de aquecimento para os quartos, enquanto que na zona da sala e cozinha se verificam temperaturas dentro do conforto térmico, durante o dia, devido à carga interna gerada pelos equipamentos. Em dias de meia estação, no caso dos equinócios, apesar das temperaturas interiores estarem próximas das condições de conforto térmico, e de em setembro estarem dentro dos parâmetros, em março há necessidade de aquecimento nos quartos, nos períodos noturnos.

De referir que, o quarto a nascente apresenta sempre melhores condições em relação aos restantes, devido à localização, e às paredes exteriores com grande espessura e em contacto com o solo, que promovem um melhor isolamento do espaço.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Redclift, (2007) «Sustainable development: An oxymoron comes of age», *Horizontes Antropológicos*, vol. 3, pp. 212–227.
- [2] Graphisoft, (2016) «Graphisoft Archicad». Disponível em: <http://www.graphisoft.com/archicad/>.
- [3] D. Systemes, (2016) «Solidworks». Disponível em: <https://store.solidworks.com/studentstore/default.php>.
- [4] Adobe, (2016) «Adobe Photoshop». Disponível em: <http://www.adobe.com/pt/products/photoshop.html>.
- [5] Adobe, (2016) «Adobe Illustrator». Disponível em: <http://www.adobe.com/pt/products/illustrator.html>.
- [6] United States Department of Energy (DOE), (2016) «Energy Plus». Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>.
- [7] Microsoft, (2016) «Microsoft Excel». Disponível em: <https://products.office.com/pt-pt/excel>.
- [8] M. Reynolds, (1991) «Earthship\_\_Vol.2\_Systems and components.pdf».
- [9] «Inspirational Village Files», (2015). Disponível em: <https://inspirationalvillage.me/tag/pop-can-wall/>.
- [10] Ecologist, «*Saving earthship Brighton*», (2015). Disponível em: [http://www.theecologist.org/green\\_green\\_living/2986550/saving\\_earthship\\_brighton\\_to\\_inspire\\_and\\_educate\\_for\\_decades\\_to\\_come.html](http://www.theecologist.org/green_green_living/2986550/saving_earthship_brighton_to_inspire_and_educate_for_decades_to_come.html). [Acedido: 01-Jan-2015].
- [11] H. Gonçalves e J. M. Graça, (2004), *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal*. Lisboa: INETI.
- [12] Energy Information Administration, (2012) «Annual Energy Outlook».
- [13] EcoArquitet, (2014) «Caracterização dos consumos no setor residencial (DGE)».
- [14] P. Preto (Associação dos Produtores de Energia e Biomassa), (2013), «Biomassa Florestal».
- [15] «7 one 8 design», (2015). Disponível em: <http://7one8design.com/what-i-did-this-summer-earthships-phuckyohouse/>.
- [16] World Wide Found, (2014), «Living Planet - Report 2014 (summary)»,.

- [17] «International Groundwater Resources Assessment Centre», (2015). Disponível em: <http://www.un-igrac.org/what-groundwater>.
- [18] A. Smith, (2011), «Scupper for earthship roof catchment».
- [19] J. M. Batista, M. C. Almeida, P. Viera, e A. C. M. Silva, (2001), «Programa nacional para o uso eficiente da água».
- [20] F. A. A. Ferreira, (2012), «Referenciais para os níveis de consumo de água sustentáveis em edifícios de habitação».
- [21] Associação Nacional Para a Qualidade, (2014), «Especificação Técnica 0905 Sistemas Prediais De Reutilização E Reciclagem De Águas Cinzentas (SPRAC)», pp. 2–5.
- [22] M. Reynolds, (1990), «Earthship\_\_Vol.1\_How to build your own.pdf».
- [23] «Earthship Biotecture», (2015). Disponível em: [www.earthship.com](http://www.earthship.com).
- [24] T. Knipe, (1991), «Earthship Homes: Affordable, Energy-Efficient Building», *Mother Earth News*. Disponível em: <http://www.motherearthnews.com/nature-and-environment/earthship-homes-zmaz91zhol.aspx>. [Acedido: 05-Jan-2016].
- [25] E. Biotecture, (2013), «Earthship Biotecture», *British Columbia Earthship for Sale*. Disponível em: <http://earthship.com/blogs/2013/01/british-columbia-earthship-for-sale/>.
- [26] L. Lazarski, (2015), «Keystone Crossroads», *In west Philadelphia, volunteers transform vacant lots into urban earthships*.
- [27] M. Reynolds, (2015), «Earthship Biotecture», *The Nautilus Earthship*. Disponível em: <http://earthship.com/blogs/2015/12/tbt-the-nautilus-earthship/>. [Acedido: 05-Jan-2016].
- [28] M. Reynolds, (1999), *The vertical face earthship plan option book*.
- [29] M. Alonso, (2014), «Arquitectura y diseño ecológico», *Earthship Biotecture: Nuevos paradigmas arquitectónicos*.
- [30] M. Reynolds, (2013), «Collingwood earthship», *Earthship Construction*. Disponível em: <https://collingwoodearthship.wordpress.com/earthship-construction/>.
- [31] «Fort Collins Sustainability», (2013). Disponível em: <http://focosustainability.blogspot.pt/2013/02/earthships.html>.
- [32] J. Matos, J. Brantes, e A. M. A. Cunha, (2010), «Qualidade do Ar em Espaços Interiores Um Guia Técnico».

- 
- [33] M. Freney, V. Soebarto, e T. Williamson, (2013), «Earthship monitoring and thermal simulation», *Archit. Sci. Rev.*, vol. 56, n. 3, pp. 208–219.
- [34] «Energy Performance Services», (2002-2016) *Thermal mass and title 24*. Disponível em: <http://www.title24express.com/what-is-title-24/title-24-thermal-mass/>.
- [35] M. M. Sousa, (2014), «Análise do desempenho energético de sistemas de ventilação geotérmica», Universidade de Coimbra.
- [36] Greenspec, (2015), «Thermal mass», *Green Building Design*. Disponível em: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/thermal-mass/>.
- [37] T. S. Bisoniya, A. Kumar, e P. Baredar, (2013), «Experimental and analytical studies of earth–air heat exchanger (EAHE) systems in India: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 238–246.
- [38] A. Smith, (2011), «Earthship Bioteecture». Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Earthship#/media/File:Convection\\_banner\\_1.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Earthship#/media/File:Convection_banner_1.jpg).
- [39] «EPAL», (2015). Disponível em: <http://www.epal.pt/EPAL/menu/%25C3%25A1gua/campanhas/uso-eficiente>. [Acedido: 01-Jan-2015].
- [40] «Águas do Algarve», (2015). Disponível em: <http://aguasdoalgarve.pt/gestaoagua/casadebanho.html>. [Acedido: 01-Jan-2015].
- [41] J. M. Baptista, M. do C. Almeida, P. Vieira, A. C. M. e Silva, R. Ribeiro, R. M. Fernando, A. Serafim, I. Alves, e M. do R. Cameira, (2001), «Programa nacional para o uso eficiente da água».
- [42] M. Reynolds, (2005), «Water from the sky», n. 1, pp. 1–5.
- [43] P. C. Grindley e M. Hutchinson, (1996), «The thermal behaviours of an earthship», *Renew. Energy*, vol. 8, n. 1–4, pp. 154–159.
- [44] A. Miller, K. Ip, K. Shaw, e M. Lam, (2005), «The Brighton Earthship: Evaluating the thermal performance».
- [45] N. J. Kruis e M. K. Heun, (2007), «Analysis of the Performance of Earthship Housing in various global climates», *Proc. ES2007*, pp. 1–10.
- [46] K. Ip e A. Miller, (2009), «Thermal behaviour of an earth-sheltered autonomous building - The Brighton Earthship», *Renew. Energy*, vol. 34, n. 9, pp. 2037–2043.
- [47] E. Kuil, (2012), «The sustainability of conventional houses , passive houses and earthships , based on legislation , environmental impact energy and operating

- energy».
- [48] M. Freney, V. Soebarto, e T. Williamson, (2012), «Earthship monitoring and thermal simulation», *Archit. Sci. Rev.*, vol. 56, n. 3, pp. 208–219.
- [49] M. Howard e P. Freney, (2014), «Earthship Architecture : Post occupancy evaluation , thermal performance & life cycle assessment», n. December.
- [50] D. Berry e A. Urban, (2015), «THE USE OF PASSIVE HEATING AND COOLING SYSTEMS IN EARTHSHIPS».
- [51] R. P. Prinz, (2015), *Hacking the earhship*.
- [52] «Climate data», (2016). Disponível em: <http://pt.climate-data.org/>.
- [53] K. A. AlSaffar e L. M. H. Bdeir, (2008), «Recycling of Aluminum Beverage Cans», vol. 12, n. 3, pp. 157–163.
- [54] «Beverage can», (2016). Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Beverage\\_can](https://en.wikipedia.org/wiki/Beverage_can).
- [55] «Packaging world aluminium», (2012). Disponível em: <http://packaging.world-aluminium.org/benefits/lightweight.html>.
- [56] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos, e J. J. Costa, (2014), «Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates», *Energy Build.*, vol. 70, pp. 411–421.
- [57] P. Tomaz, (2007), «Aproveitamento de água de chuva de telhados em áreas urbanas para fins não potáveis», *6º Simp. Bras. captação e manejo água da chuva*, n. 1, pp. 1–24.
- [58] L. Zanella, G. Mariotto, e M. Marchesi, (2015), «Manual para captação e uso doméstico de água de chuva». Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- [59] G. Minke, (2009), «Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture», p. 208.
- [60] Wikipédia, «Equinócios e solstícios», (2016). Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Equinócio>.
- [61] «Valorpneu», (2016). Disponível em: <http://www.valorpneu.pt/>.
- [62] «Super Adobe, Project Somos», (2011). Disponível em: <http://projectsomos.org/tag/eco-bricks>.
- [63] «Cordwood building, Neils brick and stone», (2014). Disponível em: <http://www.neilsbrickandstone.com/>.



- [64] «Homebiogas», (2016). Disponível em: <http://www.homebiogas.com/>.
- [65] «Life Filta - Drinking water solutions», (2016). Disponível em: <http://lifefilta.com/>.



## ANEXO A

### Soluções construtivas para modelação:

SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS - Earthship Portugal											
Cobertura											
Tipo de SC	C	Material	e [m]	k [W/(mK)]	R [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Rt [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Rse+Rsi [(m <sup>2</sup> .K)/W]	RTotal [(m <sup>2</sup> .K)/W]	U [W/m <sup>2</sup> .K]	Uref [W/m <sup>2</sup> .K]	Umax [W/m <sup>2</sup> .K]
Cobertura (EB)	1	Chapa nervurada lacada	0,019	110	1,73E-04	5,53	0,14	5,67	0,18	0,35	1
	2	XPS ou PIR	0,200	0,04	5,405						
	3	Tela EPDM	0,006	0,25	0,024						
	4	Madeira OSB	0,015	0,15	0,100						
Cobertura - painéis solares (EB)	1	Chapa metal	0,002	110	1,82E-05	8,37	0,14	8,51	0,12	0,35	1
	2	XPS ou PIR	0,100	0,04	2,703						
	3	Contraplacado	0,020	0,15	0,133						
	4	Roofing felt	0,006	0,19	0,032						
	5	XPS ou PIR	0,200	0,04	5,405						
	6	Madeira OSB	0,015	0,15	0,100						
Pavimento											
Tipo de SC	C	material/Elemento	e [m]	k [W/(mK)]	R [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Rt [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Rse+Rsi [(m <sup>2</sup> .K)/W]	RTotal [(m <sup>2</sup> .K)/W]	U [W/m <sup>2</sup> .K]	Uref [W/m <sup>2</sup> .K]	Umax [W/m <sup>2</sup> .K]
Pavimento Interior (solução EB)	1	Soalho (madeira)	0,050	0,23	0,217	0,35	0,21	0,56	1,79	0,5	1,3
	2	Tela EPDM	0,006	0,25	0,024						
	3	Betonilha	0,150	1,40	0,107						
Pavimento Estufa (solução EB)	1	Pedra/Tijoleira/Xisto	0,050	2,20	0,023	0,15	0,21	0,36	2,75	0,5	1,3
	2	Tela EPDM	0,006	0,25	0,024						
	3	Betonilha	0,150	1,40	0,107						
Paredes											
Tipo de SC	C	material/Elemento	e [m]	k [W/(mK)]	R [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Rt [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Rse+Rsi [(m <sup>2</sup> .K)/W]	RTotal [(m <sup>2</sup> .K)/W]	U [W/m <sup>2</sup> .K]	Uref [W/m <sup>2</sup> .K]	Umax [W/m <sup>2</sup> .K]
Parede Exterior (EB)	1	Tela EPDM	0,006	0,25	0,024	4,381			0,228	0,5	2
	2	XPS ou PIR	0,100	0,04	2,703						
	3	Terra compactada	1,200	1,20	1,000						
	4	Borracha (pneu)	0,010	0,17	0,059						
	5	Terra compactada	0,630	1,20	0,525						
	6	Borracha (pneu)	0,010	0,17	0,059						
	7	Reboco	0,015	1,30	0,012						
Parede Exterior base envidraçados (EB)	1	Reboco	0,015	1,30	0,012	3,392			0,281	0,5	2
	2	Tela EPDM	0,006	0,25	0,024						
	3	XPS ou PIR	0,100	0,04	2,703						
	4	Borracha (pneu)	0,010	0,17	0,059						
	5	Terra compactada	0,630	1,20	0,525						
	6	Borracha (pneu)	0,010	0,17	0,059						
	7	Reboco	0,015	1,30	0,012						
Parede Interior s módulos (s latas)	1	Reboco	0,100	2,000	0,050	4,196	0,26	4,456	0,224		
	2	Argamassa de terra	0,100	1,300	0,077						
	3	XPS ou PIR	0,150	0,04	4,054						
	4	Reboco	0,020	1,30	0,015						
Parede exterior lata (L2)	1	Reboco	0,020	1,30	0,015	2,928	0,17	3,098	0,323	0,35	1,6
	2	XPS ou PIR	0,100	0,04	2,703						
	3	Parede lata	0,150		0,210						
Parede exterior garrafa (G2)	1	Reboco	0,020	1,30	0,015	3,123	0,17	3,293	0,304	0,35	1,6
	2	XPS ou PIR	0,100	0,04	2,703						
	3	Parede garrafa	0,150		0,390						
	4	Reboco	0,020	1,30	0,015						

### Coefficiente de transmissão térmica de elementos em contacto com o solo:

Elementos em contacto com solo (pavimento interior)								
Espaço	Ap [m <sup>2</sup> ]	P [m]	B'	Rf [(m <sup>2</sup> .K)/W]	zmax [m]	zmin [m]	zméd [m]	Upav [W/m <sup>2</sup> .K]
Salas+Cozinha	29	27,92	2,077	0,349	2,8	0,7	1,75	0,429
WC_P	3,5	7,1	0,986	0,349	2,8	0,7	1,75	
WC_G	5,8	9,7	1,196	0,349	2,8	0,7	1,75	
Lav	5,1	9,8	1,041	0,349	2,8	0,7	1,75	
Quartos	17	17,6	1,932	0,349	2,8	0,7	1,75	
Elementos em contacto com solo (pavimento exterior)								
Espaço	Ap [m <sup>2</sup> ]	P [m]	B'	Rf [(m <sup>2</sup> .K)/W]	zmax [m]	zmin [m]	zméd [m]	Upav [W/m <sup>2</sup> .K]
Estufa	43,84	36,72	1,580	0,154	2,8	0,7	1,75	0,429
Segundo o REH, pavimentos com z > 0,5m e resistencia térmica < 0,5 m <sup>2</sup> .°C/W, U= 1,1*U(Rf=0,5); Tabela 03 DR número 234 página: 35088-(65)								
Ubf(Rf=0,5)	0,39	[W/(m <sup>2</sup> .°C)]						
Paredes em contacto com o terreno								
Tipo de SC	Rw [(m <sup>2</sup> .K)/W]	z [m]	Ubw [W/m <sup>2</sup> .K]					
Parede ext. (EB)	4,381	1,75	0,23					
Parede ext. env. (EB)	3,392	0,7	0,28					
REH: Tabela 06 DR número 234 página: 35088-(65)								

## ANEXO B

Resultados do cálculo da resistência térmica de elementos não homogêneos:

Lata L1	$k_{eq}$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Cp_{eq}$ [J/(kg.K)]	$R_{eq}$ [m <sup>2</sup> .K/W]
	0,725	1169,6	840,107	0,24
	Fração volúmica			$U_{eq}$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
	Casca	Ar	Argamassa	
0,16%	19,49%	80,36%	4,2	
Lata L2	$k_{eq}$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Cp_{eq}$ [J/(kg.K)]	$R_{eq}$ [m <sup>2</sup> .K/W]
	0,858	1033,189	859,619	0,21
	Fração volúmica			$U_{eq}$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
	Casca	Ar	Argamassa	
0,23%	28,97%	70,80%	4,7	
Lata L3	$k_{eq}$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Cp_{eq}$ [J/(kg.K)]	$R_{eq}$ [m <sup>2</sup> .K/W]
	0,958	930,881	874,253	0,2
	Fração volúmica			$U_{eq}$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
	Casca	Ar	Argamassa	
0,29%	36,08%	63,63%	5,04	
Garrafa G1	$k_{eq}$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Cp_{eq}$ [J/(kg.K)]	$R_{eq}$ [m <sup>2</sup> .K/W]
	0,408	1262,579	836,525	0,37
	Fração volúmica			$U_{eq}$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
	Casca	Ar	Argamassa	
5,45%	16,89%	77,66%	2,7	
Garrafa G2	$k_{eq}$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Cp_{eq}$ [J/(kg.K)]	$R_{eq}$ [m <sup>2</sup> .K/W]
	0,858	1033,189	859,619	0,39
	Fração volúmica			$U_{eq}$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
	Casca	Ar	Argamassa	
7,93%	24,58%	67,48%	2,55	
Garrafa G3	$k_{eq}$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$Cp_{eq}$ [J/(kg.K)]	$R_{eq}$ [m <sup>2</sup> .K/W]
	0,958	930,881	874,253	0,41
	Fração volúmica			$U_{eq}$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]
	Casca	Ar	Argamassa	
9,80%	30,35%	59,85%	2,43	

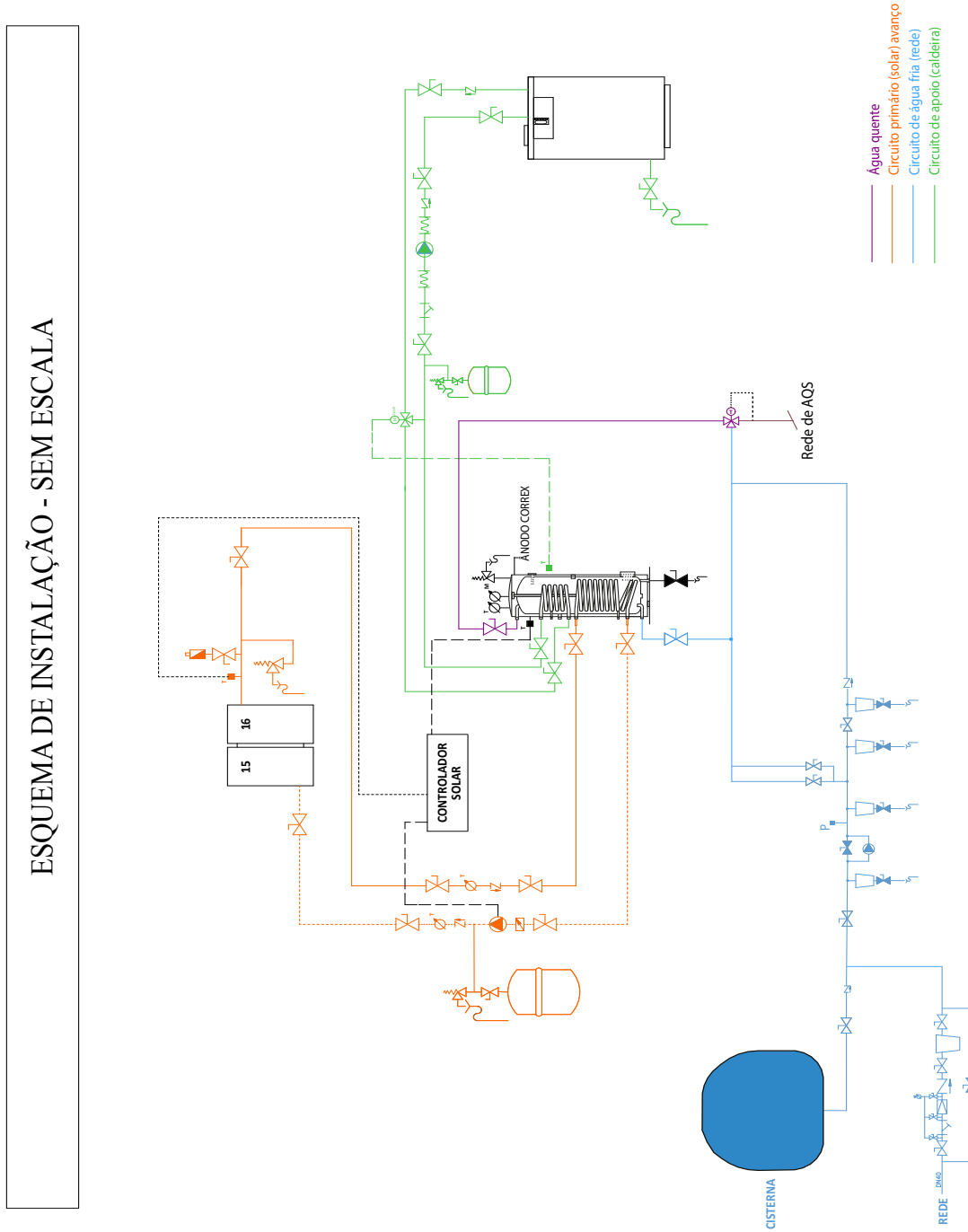
**Folha de cálculo da resistência térmica de elementos não homogêneos:**

Tipo de módulo	Tipo de parede	Área de parede	Unidades	Densidade de módulos	Número de módulos	Unidades	Número total de módulos da parede	Unidades
Lata	Int. Quartos	16,225	[m <sup>2</sup> ]	L2	110	[mod/m <sup>2</sup> ]	1785	módulos
<b>Volume total de parede</b>	<b>Unidades</b>	<b>Volume total de casca</b>	<b>Unidades</b>	<b>Volume total de ar</b>	<b>Unidades</b>	<b>Volume total de argamassa</b>	<b>Unidades</b>	
2,434	[m <sup>3</sup> ]	5,63E-03	[m <sup>3</sup> ]	0,705	[m <sup>3</sup> ]	1,723	[m <sup>3</sup> ]	
<b>Fração volúmica</b>								
Casca	Ar	Argamassa	<b>RESISTÊNCIA TÉRMICA TOTAL DA PAREDE</b>		unidades	<i>keq</i> [W/(m.K)]	<i>ρeq</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Cpeq</i> [J/(kg.K)]
0,23%	28,97%	70,80%	<b>0,0131</b>		[K/W]	0,858	1033,189	859,619

Tipo de módulo	Tipo de parede	Área de parede	Unidades	Densidade de módulos	Número de módulos	Unidades	Número total de módulos da parede	Unidades
Garrafa	Int. Quartos	16,225	[m <sup>2</sup> ]	G2	115	[mod/m <sup>2</sup> ]	1866	módulos
<b>Volume total de parede</b>	<b>Unidades</b>	<b>Volume total de casca</b>	<b>Unidades</b>	<b>Volume total de ar</b>	<b>Unidades</b>	<b>Volume total de argamassa</b>	<b>Unidades</b>	
2,434	[m <sup>3</sup> ]	1,93E-01	[m <sup>3</sup> ]	0,598	[m <sup>3</sup> ]	1,642	[m <sup>3</sup> ]	
<b>Fração volúmica</b>								
Casca	Ar	Argamassa	<b>RESISTÊNCIA TÉRMICA TOTAL DA PAREDE</b>		unidades	<i>keq</i> [W/(m.K)]	<i>ρeq</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Cpeq</i> [J/(kg.K)]
7,93%	24,58%	67,48%	<b>0,0242</b>		[K/W]	0,389	1177,173	853,169

# ANEXO C

## Esquema de princípio do circuito de AQS:







## APÊNDICE A

### Solstício de verão:

Para o solstício de verão, dia 20 de junho em que a  $T_{mh}$  mínima é 13,5°C e a máxima 24,1°C, foi considerado para uma primeira previsão que as condutas de ventilação e as claraboias da estufa estão fechadas e há apenas uma taxa de renovação do ar mínima de 0,4 renovações por hora. Na Figura 0.1 apresenta-se a variação da  $T_{mh}$  ao longo desse dia.

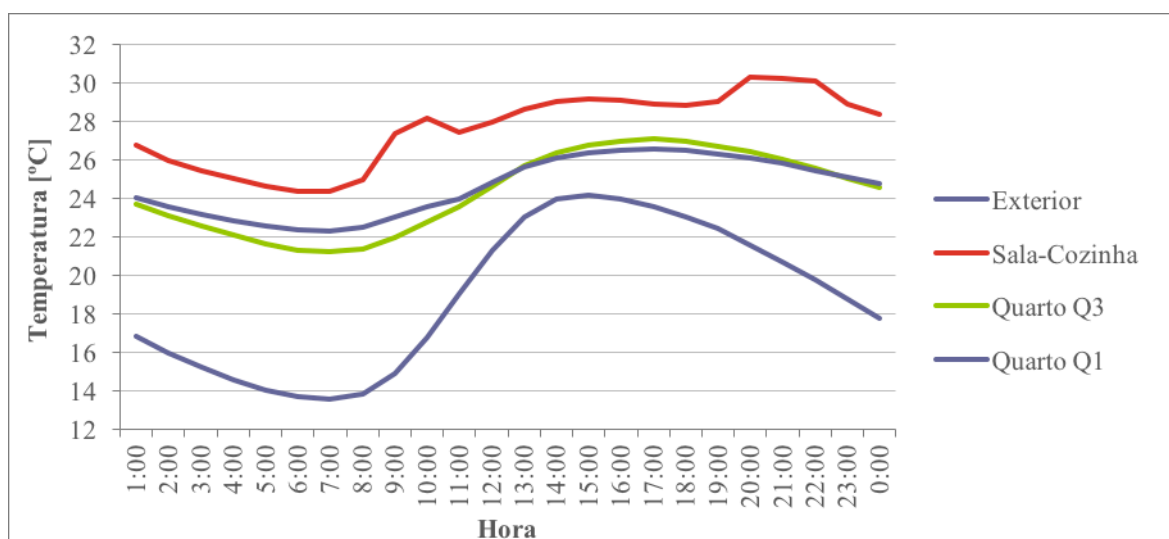


Figura 0.1. Evolução da  $T_{mh}$  no dia 20 de junho, sem dispositivos de ventilação.

Verifica-se que na sala-cozinha há uma tendência para sobreaquecimento durante a segunda metade do dia, atingindo uma  $T_{mh}$  máxima de 30,3°C às 20 horas, com os picos nos períodos de maior ocupação e, nos quartos, a temperatura encontra-se dentro dos parâmetros de conforto térmico, variando apenas entre 21,2 e 27,1°C.

Se forem considerados os dispositivos de sombreamentos e de ventilação ativados parcialmente, segundo *schedules* como se acionados pelos ocupantes, apenas na cozinha, e uma taxa mínima de renovação de ar de 0,4 renovações por hora para toda os espaços.

A Figura 0.2 representa o gráfico com a evolução da  $T_{mh}$  durante o dia, para os diferentes espaços em estudo.

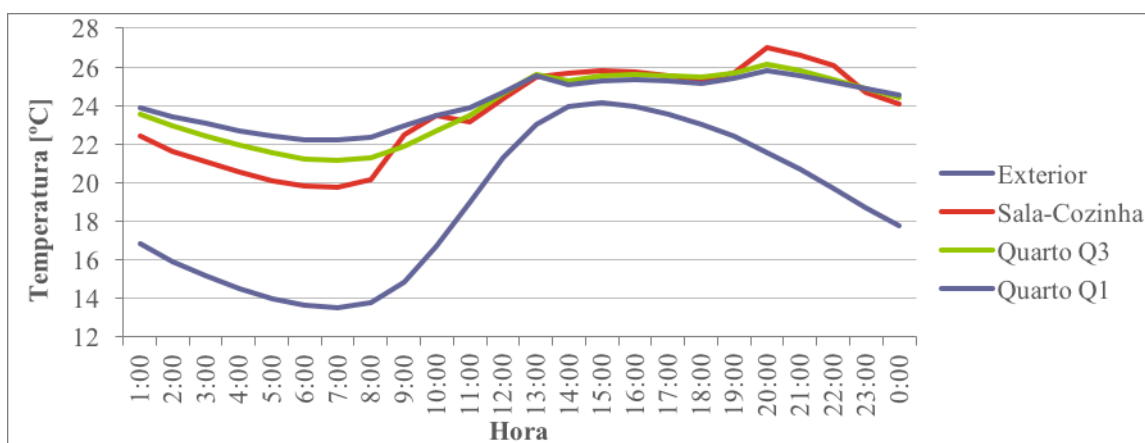


Figura 0.2. Variação da temperatura média horária,  $T_{mh}$ , no dia 20 de junho.

No espaço sala-cozinha, o período de temperatura mais baixa é das 4 às 8 horas com valores entre 19,7 e 20,6°C. Das 15 às 22 horas encontra-se o período em que se verifica a  $T_{mh}$  mais elevada, com valores entre 25,3 e 27°C.

Nos quartos, o espaço a nascente, Q1, apresenta sempre temperaturas mínimas ligeiramente superiores ao interior, (Q3).

No Q3, o período com temperatura mais baixa é entre as 5 e as 9 horas, com valores entre 21,2 e 21,9°C e o período com a  $T_{mh}$  mais elevada à tarde, com valores entre 24,6 e 26,1°C. No Q1, a  $T_{mh}$  mínima é 22,2°C e a máxima 25,8°C.

**Solstício de inverno:**

No solstício de inverno, dia 21 de dezembro, a  $T_{mh}$  mínima é 4,2°C e a máxima 12,5°C. Como aspetos de climatização, assume-se a taxa de renovação do ar mínima de 0,4 renovações por hora, imposta pelo REH e os dispositivos de oclusão noturna ativados.

A Figura 0.3 representa o gráfico com a evolução da  $T_{mh}$  durante o dia, para os diferentes espaços em estudo.

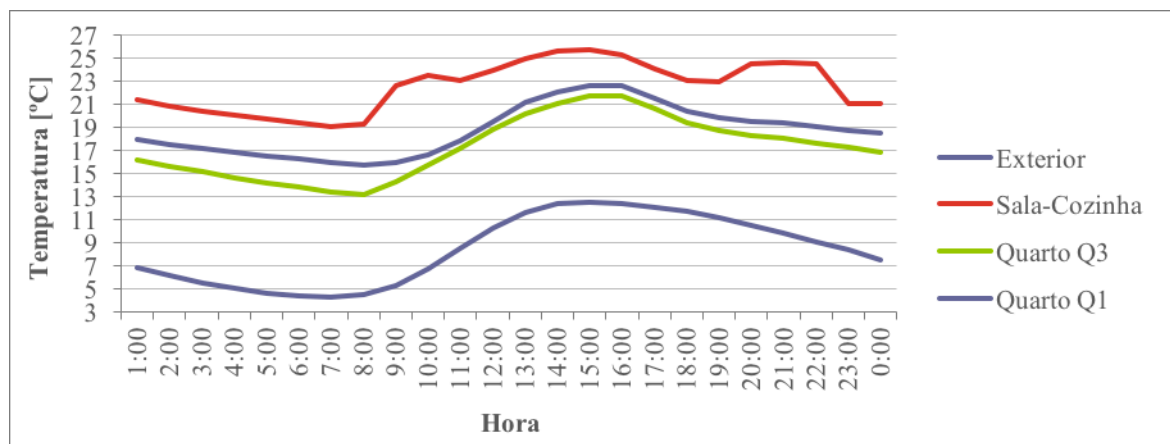


Figura 0.3. Variação da temperatura média horária,  $T_{mh}$ , no dia 21 de dezembro.

Na zona sala-cozinha verifica-se o período com a  $T_{mh}$  mais baixa entre as 3 e as 8 horas, com valores compreendidos entre 19,1 a 20,5°C e o período com a  $T_{mh}$  mais elevada das 12 às 17 horas, com valores de 24 a 25,8°C.

Nos quartos, como nos casos anteriores, o quarto nascente (Q1) apresenta condições de conforto ligeiramente superiores ao quarto interior (Q3), ainda assim, são valores de temperatura abaixo das que poderão proporcionar conforto térmico. No espaço Q3 verifica-se a  $T_{mh}$  mínima de 13,1°C às 8 horas e a máxima de 21,8°C às 16 horas, enquanto que no Q1 a  $T_{mh}$  mais baixa é 15,8°C à mesma hora e a mais alta de 22,7°C às 15 horas. O período com a  $T_{mh}$  mais baixa é mais longo no Q3, entre as 2 e as 10 horas, com valores entre 13,1 e 15,7°C e no Q1 encontra-se das 6 as 9 horas, com valores de 15,8 a 16,5°C.

