



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Avaliação do Comportamento Térmico de uma Moradia Residencial Experimental

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

Autor

Andreia Filipa Pina Morais

Orientadores

Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Apesar de todo o processo solitário e por vezes desesperante que uma dissertação possa ser, não posso deixar de agradecer a todas as pessoas que me ajudaram e apoiaram na concretização desta.

As minhas primeiras palavras de agradecimento são dirigidas aos meus orientadores, Professora Doutora Helena Gervásio e Professor Doutor Paulo Santos, por toda a disponibilidade, ajuda, opiniões e críticas construtivas ao longo de todo o trabalho. Obrigada pelas palavras de incentivo nos momentos mais desesperantes, *“Be patient. With time even an egg will walk.”*.

Agradeço ao Engenheiro Nuno Rosa toda a ajuda na compreensão de alguns dos conceitos necessários a esta dissertação e pela paciência que teve comigo em muitos dos momentos menos motivantes.

A todos os meus amigos, que estiveram sempre a meu lado ao longo desta fase, pelas palavras de incentivo, pelo companheirismo, por todo o apoio. Um agradecimento especial ao Zé Guilherme, pela paciência que teve ao longo de todos estes meses, pelas palavras, pela atenção, pelo carinho.

Por último, não podia deixar de agradecer às pessoas que sempre acreditaram em mim e que lutam dia após dia para me dar um futuro melhor, aos meus pais. Obrigada família por toda a paciência, por todo o apoio e amor incondicional, sem vocês nada disto seria possível.

RESUMO

Ao longo dos últimos anos a população mundial tem vindo a aumentar exponencialmente, aumentando consequentemente a procura global de energia. Representando os combustíveis fósseis - petróleo, gás natural e carvão - uma elevada percentagem das fontes primárias de energia, e sendo a combustão destes responsável pelo aquecimento global e chuvas ácidas, o problema não persiste somente no aumento da procura de energia mas sim no modo como esta é obtida.

Sendo os edifícios responsáveis por grande parte desse consumo de energia e consequentemente por emissões de CO₂ para a atmosfera, têm vindo a ser desenvolvidas soluções construtivas capazes de minimizar estes problemas, denominadas de sistemas passivos. No presente documento são apresentadas algumas dessas soluções bem como as suas vantagens e desvantagens. Para além da integração destes sistemas, na conceção de um edifício, há que ter em atenção alguns conceitos bioclimáticos de modo a alcançar mais facilmente as condições de conforto térmico, e consequentemente diminuir os consumos energéticos associados.

O objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação do comportamento térmico de uma moradia experimental construída em Coimbra. A referida moradia integra um sistema de domótica, o qual tem vindo a monitorizar ao longo dos últimos anos, parâmetros como a temperatura e concentração de CO₂ em cada divisão, bem como a controlar o funcionamento do sistema de ar-condicionado e sombreamentos.

Em primeira instância, foi feita uma análise dos dados (exteriores e interiores) recolhidos ao longo do ano de 2014, para posteriormente tornar possível a comparação destes com os dados obtidos de simulações numéricas concebidas através do *software DesignBuilder*, e assim validar o modelo.

Desta forma, este trabalho permitiu não só a validação do modelo numérico representativo do sistema instalado na moradia, mas também a eventual implementação de melhorias no sistema, relacionadas com os dispositivos de sombreamento.

ABSTRACT

For the past years, the global population has been rising exponentially, increasing global energy demand. Accounting for fossil fuels – oil, natural gas and coal – a high percentage of primary energy sources, and being the combustion of these responsible for global warming and acid rain, the problem not only persists in the increase of energy demand but also, on the process where this is obtained.

Since buildings are responsible for majority of the energy consumption and consequently for CO₂ emissions into the atmosphere, there have been developed design solutions capable of minimizing these problems, called: passive energy systems. Throughout this document presents some of these solutions as well as their advantages and disadvantages. In addition to the integration of these systems, when designing a building you need to be aware of certain bioclimatic concepts in order to more easily achieve thermal comfort conditions, and thus decrease the related energy consumption.

The main goal of our paperwork is the evaluation of the thermal behavior of an experimental dwelling built in Coimbra. Such dwelling includes a home automation system, which has been monitoring over the past years, parameters such as temperature and CO₂ concentration in each division, such as controlling the operation of air conditioning system and shading.

At first instance, an analysis of data was made (outdoor and indoor) gathered during the year 2014, later to make it possible to compare them with data obtained from numerical simulations devised by *DesignBuilder* software, and thus validate the model.

Therefore, this work has enabled not only to validate the numerical model representative of the system installed on the dwelling, but also the possible implementation of improvements in the system, concerning shading devices.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento Geral	1
1.2	Objetivos	5
1.3	Organização da Dissertação	5
2	CASAS PASSIVAS	7
2.1	Conceito	7
2.2	Passivhaus	7
2.3	Regulamentos e Normas Europeias	10
2.4	Casas Passivas em Portugal	11
3	ESTRATÉGIAS PASSIVAS	14
3.1	Introdução	14
3.2	Sistemas passivos de aquecimento	15
3.2.1	Ganho Direto	15
3.2.2	Ganho Indireto	16
3.2.3	Ganho Isolado	19
3.3	Sistemas passivos de arrefecimento	20
3.3.1	Ventilação Natural	20
3.3.2	Arrefecimento pelo Solo	21
3.3.3	Arrefecimento Evaporativo	21
3.3.4	Arrefecimento Radiativo	22
3.4	Ventilação natural e mecânica	22
3.4.1	Enquadramento	22
3.4.2	Sistemas de Ventilação Geotérmica	24
3.5	Iluminação/Sombreamento	25
3.5.1	A energia solar e os edifícios	25
3.5.2	Geometria solar	27
3.5.3	Orientação das fachadas	28
4	CASO DE ESTUDO	29
4.1	Descrição do edifício	29
4.2	Sistema de domótica	32
4.3	Parâmetros monitorizados	33
4.3.1	Interior do edifício	33
4.3.2	Exterior do edifício	38

4.4	Simulação dinâmica do comportamento térmico e eficiência energética (<i>DesignBuilder</i>)	39
4.5	Validação do modelo	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	ANEXOS	62
	ANEXO A – Parâmetros registados no exterior do edifício	A-1
	ANEXO B – Horário de funcionamento registado.....	B-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Moradia construída em “ <i>Lightweight Steel Framing</i> ” pela empresa Cool Haven.	4
Figura 2.1 - Princípios básicos aplicados na construção de <i>Passive Houses</i> (Passiv@, 2015).	8
Figura 2.2 – Desenho 3D da casa Passivhaus proposta para Portugal (Passive-On Project, 2007b).	9
Figura 2.3 - Estimativa das necessidades anuais de aquecimento (vermelho) e de arrefecimento (azul) para uma casa típica (construída de acordo com o RCCTE) e para uma casa <i>Passivhaus</i> em Lisboa (Passive-On Project, 2007b).	9
Figura 2.4 – Arcos de Valdevez, Gondoriz (Oliveira, 2003).	12
Figura 2.5 – Alentejo (Oliveira, 2003).	12
Figura 2.6 – Casas em Janas, Sintra (Rita, 2008).	13
Figura 2.7 – Edifício Solar XXI: a) Fachadas Poente-Sul; b) Fachadas Nascente-Norte (INETI, 2006).	13
Figura 2.8 – Primeira casa “Passivhaus” em Portugal (Homegrid@, 2015).	13
Figura 3.1 – Sistema de Ganho Direto (Gonçalves e Graça, 2004).	15
Figura 3.2 – Sistema de Ganho Indireto (Gonçalves e Graça, 2004).	17
Figura 3.3 – Parede de Trombe. Casa Shäffer, Porto Santo (Gonçalves e Graça, 2004).	17
Figura 3.4 - Colunas de água na Casa Solar no Porto (Gonçalves e Graça, 2004).	17
Figura 3.5 - Harold R. Hay, inventor do Roof Pond, ao lado do protótipo em 1967 (BDMDialog@, 2012).	18
Figura 3.6 – a) Moradia Unifamiliar com Estufa – Vale do Rosal; b) Esquema de funcionamento (Gonçalves e Graça, 2004).	19
Figura 3.7 – Esquema representativo de ventilação cruzada (Gonçalves e Graça, 2004).	20
Figura 3.8 – Esquema representativo de arrefecimento indireto pelo solo	21
Figura 3.9 – Esquema representativo de arrefecimento evaporativo	21
Figura 3.10 – Esquema representativo de radiação noturna (Gonçalves e Graça, 2004).	22
Figura 3.11 – Funcionamento do Sistema de Ventilação Geotérmica: a) Verão, b) Inverno (adaptado de Cvc Direct@, 2015).	24
Figura 3.12 – Radiação Global Anual de Portugal Continental (adaptado de ESTÉCONFORTO@, 2015).	26
Figura 3.13 - Trajetória do sol ao longo do ano, no hemisfério norte	27
Figura 4.1 – Casa modelo e pavilhão anexo da “Cool Haven”.	30

Figura 4.2 – Instalação das tubagens do SVG no solo	32
Figura 4.3 – Variação horária da temperatura interior (°C), no compartimento 3, nas semanas típicas de verão e inverno.	34
Figura 4.4 – Variação horária da concentração de CO ₂ (ppm), no compartimento 3, nas semanas típicas de verão e inverno.	34
Figura 4.5 – Caudal de ar insuflado (m ³ /h) pelo SVG, durante as semanas típicas.	35
Figura 4.6 – Variação horária do funcionamento do sistema de ar condicionado (%), no compartimento 3.	36
Figura 4.7 – Variação horária do funcionamento do sombreamento (%), no compartimento 3.	37
Figura 4.8 - Variação horária da temperatura de bolbo seco (°C), nas semanas típicas de verão e inverno.	38
Figura 4.9 - Variação horária da radiação solar global horizontal (Wh/m ²), nas semanas típicas.	39
Figura 4.10 – Edifício em estudo, modelado no <i>DesignBuilder</i> : a) alçados voltados a sul, ...	41
Figura 4.11 – Compartimentação interior do edifício modelado no <i>DesignBuilder</i> : a) rés do chão, b) 1º andar	41
Figura 4.12 – Temperatura do ar interior registada e prevista pelo <i>software DesignBuilder</i> , no compartimento 3, para os dois cenários estudados no parâmetro 1.....	43
Figura 4.13 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo <i>software DesignBuilder</i> , no compartimento 3, para os três cenários estudados no parâmetro 2.....	44
Figura 4.14 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo <i>software DesignBuilder</i> , no compartimento 3, para os dois cenários estudados no parâmetro 3.....	45
Figura 4.15 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo <i>software DesignBuilder</i> , no compartimento 3, com a introdução do novo dispositivo de sombreamento para os cenários <i>ON</i> e <i>OFF</i>	47
Figura 4.16 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo <i>software DesignBuilder</i> , no compartimento 3, com a introdução de uma pala horizontal, para os cenários <i>ON</i> e <i>OFF</i>	48
Figura 4.17 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo <i>software DesignBuilder</i> , no compartimento 3, para os três cenários estudados no parâmetro 4.....	49
Figura 4.18 - Temperatura do ar ambiente registada no compartimento 3, na semana de 2 a 8 de junho de 2014, e temperatura prevista pelo <i>software DesignBuilder</i> – Validação do modelo.	50
Figura 4.19 – Temperatura do ar no interior do compartimento 3, na semana típica de verão	51

Figura 4.20 – Temperatura do ar no interior do compartimento 3, na semana típica de inverno	52
Figura 4.21 - Temperatura do ar ambiente registada na sala de reuniões, na semana de 2 a 8 de junho de 2014, e temperatura prevista pelo <i>software DesignBuilder</i> – Validação do modelo.	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Comparação de valores limite de cumprimento de Normas Europeias para a construção de casas passivas (Passive-On Project, 2007c; Thomsen et al, 2008)	10
Quadro 3.1 – Vantagens e Desvantagens dos Sistemas de Ganho Direto	16
Quadro 3.2 - Vantagens e Desvantagens dos Sistemas de Ganho Indireto	18
Quadro 3.3 - Vantagens e Desvantagens dos Sistemas de Ganho Isolado	19
Quadro 4.1 - Coeficientes de transmissão térmica da envolvente opaca.....	30
Quadro 4.2 – Propriedades térmicas dos envidraçados	31
Quadro 4.3 – Propriedades dos dispositivos de sombreamento	31
Quadro 4.4 – Parâmetros de calibração do modelo	42
Quadro 4.5 – Propriedades do novo dispositivo de sombreamento.	46

ABREVIATURAS

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado;

EPS – Poliestireno Expandido;

ETICS – *External Thermal Insulation Composite Systems*;

LSF – *Lightweight Steel Framing*;

OSB – *Oriented Strand Board*;

PVC – Policloreto de Vinilo;

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios;

RMSE – *Root Mean Square Error*;

SVG – Sistemas de Ventilação Geotérmica.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

Os preços associados ao petróleo, a escassez e elevada dependência dos recursos fósseis, utilizados para satisfazer os elevados padrões de vida da população, constituem hoje grandes preocupações a nível mundial.

Segundo o relatório BP (2014), estima-se que até 2035 a procura global de energia aumente até aos 41%, face aos valores registados em 2012. Representando os combustíveis fósseis – petróleo, gás natural e carvão – cerca de 86% das fontes primárias de energia (BP@, 2014), e sendo a combustão destes responsável pela libertação de gases como o CO₂, e consequentemente pelo aquecimento global e chuvas ácidas, o grave problema não consiste na procura de energia, mas sim no modo como esta é obtida.

Atendendo a que os edifícios são responsáveis pelo consumo de aproximadamente 40% da energia final e por 36% das emissões de CO₂ para a atmosfera, na União Europeia, a sustentabilidade energética passa por melhorar o desempenho energético dos edifícios (Ascenso, 2011a).

No ano de 1994, realizou-se a 1ª Conferência Internacional sobre Construção Sustentável, em Tampa, Florida, onde foram propostas várias definições para o conceito de construção sustentável. Charles Kibert propôs a definição mais plausível deste conceito descrevendo-o como a "criação e gestão responsável de um ambiente construído saudável, tendo em consideração os princípios ecológicos (para evitar danos ambientais) e a utilização eficiente dos recursos". As principais preocupações tradicionalmente consideradas nesta indústria são a qualidade, o tempo e o custo. No entanto, a construção sustentável visa aliar estas temáticas às preocupações ambientais, tendo em conta todo o ciclo de vida. Tomando o solo, os materiais, a água, a energia e os ecossistemas como os recursos fulcrais para a construção, Charles Kibert estabeleceu os seguintes princípios (Kibert, 2013):

1. Reduzir o consumo de recursos;
2. Reutilizar recursos;
3. Usar recursos recicláveis;

4. Proteger os sistemas naturais;
5. Eliminar os materiais tóxicos e os subprodutos;
6. Realizar uma análise de ciclo de vida em termos económicos (custos);
7. Fomentar a qualidade na construção.

Mais recentemente, em 2010, a reformulação da Diretiva 2002/91/CE relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD), Diretiva 2010/31/EU, define que cada Estado-Membro terá que aumentar o nível de exigência da regulamentação, de modo a que em 2020 todos os novos edifícios ou renovados sejam altamente eficientes e possuam necessidades quase nulas de energia (*nearly zero energy buildings* – nZEB). O nZEB é um “edifício com um desempenho energético muito elevado (...). As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades” (Comissão Europeia, 2010).

Em Portugal, o setor residencial teve, no ano de 2009, um peso de aproximadamente 17,7% no consumo de energia final, tendo sido responsável, nesse mesmo ano, pela emissão de 2,5 milhões de toneladas de CO₂ (DGEG, 2011). Tal energia, consumida por este setor, reparte-se por: 8,8% em aquecimento/arrefecimento do ambiente, 31% em águas quentes sanitárias, 36,9% em cozinhas, 16,3% em equipamentos elétricos e 6,7% em iluminação (INE. I.P./DGEG, 2011).

A melhoria da eficiência energética de edifícios residenciais é algo muito complexo uma vez que envolve diversos fatores que devem ser tidos em consideração. O clima é o principal fator a ter em consideração, visto que a gama de condições climáticas a nível nacional é significativa. Outros fatores a ter em consideração são os horários de ocupação do edifício, os hábitos dos seus ocupantes e a orientação do edifício (Santos et al, 2010). A sustentabilidade de uma habitação depende ainda de várias fases e opções, nomeadamente da escolha dos materiais e método construtivo a utilizar. Na fase inicial do projeto é crucial ter em conta os diversos impactes negativos causados no ambiente, quer na conceção quer no transporte, não menosprezando a alteração do uso do solo, o consumo de matérias-primas, água e energia e alteração do ambiente envolvente. Consciencializados destes problemas, devemos dar prioridade a materiais com grande durabilidade, que apresentem menores custos energéticos, económicos, sociais e ambientais, não poluentes ou tóxicos, recicláveis e/ou reutilizáveis e que não afetem a saúde (Sousa, 2014).

A madeira foi um dos primeiros materiais utilizados pelo homem na construção, e que ainda hoje, devido às suas características, desempenha um papel importante neste ramo. Esta pode ter grande durabilidade, é facilmente trabalhável e retém o calor, irradiando-o uniformemente pela casa, o que proporciona melhores condições de conforto no interior do edifício. Como material

natural, a madeira é um depósito de dióxido de carbono, sendo assim um material muito ecológico. Contudo para que as construções de madeira tenham grande durabilidade e resistência, devem receber um tratamento adequado. Apresentando ainda outros inconvenientes como a vulnerabilidade a desastres naturais e o ruído típico deste tipo de material (Online24@, 2013). A utilização de madeira enquanto elemento estrutural tem vindo a ser esquecida desde meados do século XX, com o surgimento do betão e do aço.

Segundo Sustelo (2008), o aparecimento do betão armado possibilitou a construção em altura, o aumento dos vãos e a diminuição da espessura das paredes dos edifícios, substituindo a alvenaria em pedra de grande envergadura utilizada anteriormente. Este tipo de construção tem sido até aos dias de hoje o mais utilizado em Portugal pois apresenta alta resistência às tensões de compressão, é facilmente moldável e resiste às influências atmosféricas e a grandes períodos de carga com um baixo custo de manutenção. Ainda assim, apresenta algumas desvantagens como a baixa resistência à tração e o facto de o betão estar sujeito a fissuras. Para além do dispendioso processo de produção, que requer grandes consumos energéticos e grandes quantidades recursos naturais.

Nos dias de hoje a tendência é procurar construções mais sustentáveis e viáveis, o que faz o betão armado perder as valias perante outros sistemas construtivos mais eficientes. Substituir o betão armado por aço pode ser a solução mais acertada. Este pode ser utilizado como um sistema estrutural em aço laminado a quente, seguindo os princípios das vigas e pilares, ou como um sistema estrutural de aço leve, denominado por “*Lightweight Steel Framing*” (estruturas em aço leve), apresentado na Figura 1.1. Este novo sistema, que utiliza aço como elemento estrutural, é uma adaptação do sistema de construção “*Balloon Frame*”, onde a madeira era também utilizada como tal, facultando um método de construção rápido e modular (Luís, 2011). Tem diversas vantagens relativamente aos sistemas anteriormente mencionados, nomeadamente a facilidade na execução e no transporte. A presença de painéis de OSB (*Oriented Strand Board*) neste tipo de construção é ideal para contraventar a estrutura, oferecendo resistência às forças horizontais e de corte.



Figura 1.1 – Moradia construída em “*Lightweight Steel Framing*” pela empresa Cool Haven.

Apesar das diversas vantagens apresentadas, este novo método de construção amigo do ambiente apresenta alguns inconvenientes. O primeiro está relacionado com o reduzido número de pisos do edifício, habitualmente dois pisos mais sótão visitável e uma cave em betão armado (Futureng@, 2013). A segunda desvantagem está relacionada com a abertura excessiva de vãos, pois visto que a transmissão de cargas é contínua em todo edifício, quanto mais área for interrompida nos perfis, pior o desempenho da estrutura perante uma situação de risco (por exemplo um sismo).

A inércia térmica é outro fator negativo em edifícios em LSF. Segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) existem três classificações possíveis para a inércia térmica (fraca, média e forte), tendo sido este tipo de construção classificada como “fraca”, devido à reduzida massa dos materiais que constituem as paredes e consequentemente à sua dificuldade de reter o calor. Tal classificação significa que o edifício é influenciado pelas variações da temperatura exterior, tendo dificuldade em manter uma temperatura interior estável.

Um edifício de baixa inércia também apresenta vantagens, como por exemplo requerer menores necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, comparativamente a edifícios com paredes tradicionalmente em alvenaria ou betão de alta inércia térmica que despendem muito dinheiro e tempo para atingir uma temperatura de conforto. No entanto, durante a estação de arrefecimento (verão), também se pode tornar uma desvantagem pois há maior risco de sobreaquecimento (Futureng@, 2011).

Deste modo, torna-se necessário desenvolver estratégias de modo a compensar a baixa inércia térmica.

Uma das estratégias a utilizar são os “Sistemas de Ventilação Geotérmica” (SVG), que utilizam o solo como um acumulador de calor permitindo climatizar o edifício de forma mais ecológica. A energia geotérmica é uma energia limpa que permite poupar 75% na fatura energética e reduzir a emissão de CO₂ (Ecoforest@, 2015).

Outra das estratégias é o sombreamento dos envidraçados. Este torna-se indispensável na estação de arrefecimento para conseguir manter uma temperatura constante no interior do edifício. O uso de dispositivos de sombreamento é crucial para restringir a entrada dos raios solares, de modo a não só reduzir a intensidade luminosa mas também o excesso de ganhos solares no interior do edifício. No inverno a energia solar contribui para a redução das necessidades de aquecimento na habitação.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo validar um modelo de previsão do comportamento térmico de uma moradia através do *software DesignBuilder*, comparando os seus resultados com os valores obtidos através da monitorização *in situ* desta. Um outro objetivo é o estudo da influência de alguns parâmetros no comportamento térmico da referida moradia. Alguns dos parâmetros a estudar serão a ventilação, os dispositivos de sombreamento (horário de ativação e propriedades/tipo) e o horário de ocupação.

Para tal, é necessária a compreensão dos tipos de ventilação (natural e mecânica) e de alguns conceitos bioclimáticos mais relevantes para a conceção de um edifício sem gastos energéticos excessivos.

Numa segunda fase tenciona-se compreender alguns dos aspetos referentes ao edifício em estudo, tal como o seu sistema de domótica e os parâmetros monitorizados no seu interior e exterior.

Posteriormente, procura-se proceder a várias simulações onde serão comparados vários cenários de modo a determinar qual a previsão que mais se aproxima à realidade, tendo como parâmetro de análise a temperatura interior. Deste modo, será possível realizar uma análise comparativa dos vários cenários e proceder à validação do modelo.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, aos quais se acrescentam as referências bibliográficas.

No presente capítulo é apresentado um breve enquadramento do tema em estudo, abordando o conceito de construção sustentável, e feita uma descrição geral dos objetivos pretendidos.

No segundo capítulo, “Casas Passivas”, para além de ser feita a distinção entre casa passiva e *Passivhaus* são ainda apresentadas algumas normas europeias idênticas à norma *Passivhaus* e alguns exemplos de casas passivas em Portugal.

No terceiro capítulo, “Estratégias Passivas”, são expostos os sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento. Neste capítulo são abordados ainda a ventilação e o sombreamento/iluminação, visto serem elementos cruciais para a compreensão do estudo em causa.

No quarto capítulo, “Caso de Estudo”, é feita a descrição da moradia em estudo, e do sistema de domótica implementado nesta, bem como analisados os parâmetros registados no interior e exterior do edifício, através da monitorização. Neste capítulo é também apresentada a simulação dinâmica do comportamento térmico e eficiência energética conseguida através do *DesignBuilder* e feita a validação do modelo.

Por fim, no quinto e último capítulo, são expostas as principais conclusões do presente estudo e sugeridos possíveis trabalhos futuros relacionados.

2 CASAS PASSIVAS

2.1 Conceito

Casa passiva é um termo genérico utilizado para designar um edifício que incorpore técnicas passivas de modo a fornecer aquecimento, arrefecimento, luz e ventilação (Passive-On Project, 2007a). Técnicas passivas como paredes exteriores pintadas de branco e janelas, tiram partido das características climáticas e proporcionam, respetivamente, arrefecimento e luz natural, sendo utilizadas desde as construções mais básicas até às mais elaboradas construídas atualmente.

Quando a integração de sistemas passivos não é suficiente para dar resposta a todas as necessidades de energia, o desenho passivo, sendo projetado para melhorar o conforto em edifícios, integra ainda sistemas ativos de baixo consumo, como sistemas de ventilação mecânica e sistemas do tipo bomba de calor reversíveis (Passive-On Project, 2007a). Um sistema ativo de baixo consumo é um sistema em que a quantidade de energia consumida por este é significativamente inferior à quantidade de energia gerada, podendo ser facilmente conseguida através de energias renováveis.

2.2 *Passivhaus*

O conceito alemão “*Passivhaus*” não pode ser entendido como “casa passiva” no seu sentido comum.

Em 1988, os investigadores Wolfgang Feist e Bo Adamsson, desenvolveram o conceito de casa passiva. Tal conceito terá surgido a partir de casas de consumo reduzido já construídas na Suécia e na Dinamarca. Mais tarde, em 1996, foi fundado na Alemanha o *Passivhaus Institut* (PHI), e baseado em diversos projetos de investigação foi associada a norma *Passivhaus* a este tipo específico de desenho passivo (Churchfield Home Services@, 2015).

O *Passivhaus Institut* considera cinco elementos fundamentais na construção de uma *Passivhaus* (Passiv@, 2015), esquematicamente apresentados na Figura 2.1:

1. **Níveis de isolamento muito elevados**, isto é, todos os componentes da envolvente exterior da construção devem ser muito bem isolados. Para que tal aconteça, em climas temperados mais frios o coeficiente de transferência de calor (valor U) não deve ultrapassar o valor de $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, ou seja, que sejam perdidos no máximo 0,15 watts por cada grau de diferença de temperatura e por metro quadrado da superfície exterior.

2. **Caixilhos e vidros das janelas bem isolados** de modo a evitar transferências de calor, o que implica, para climas temperados mais frios, um coeficiente de transmissão térmica das janelas de $0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, ou menos, e um valor de g de cerca de 50%, representando g o fator solar, ou seja, a quantidade de radiação solar que chega ao interior.

3. **Ventilação de conforto com recuperação de calor altamente eficiente**, facultando uma boa qualidade interior e a poupança de energia. O sistema de ventilação de uma *Passivhaus* deve ter uma taxa de eficiência mínima de 75%.

4. **Envolvente do edifício estanque ao ar**, com vista a impedir as fugas indesejadas por aberturas. A taxa de renovação horária de ar deve ser inferior a 0,6 rph, durante teste de pressurização a 50 Pa feito de acordo com a norma EN 13829.

5. **Ausência de pontes térmicas**. As pontes térmicas surgem na transição entre materiais com diferentes condutibilidades térmicas, na alteração da espessura de um elemento ou nas ligações paredes/pavimentos e paredes/tetos. Deste modo, tornam-se inevitáveis numa construção, no entanto, devem ser minimizadas ao máximo.

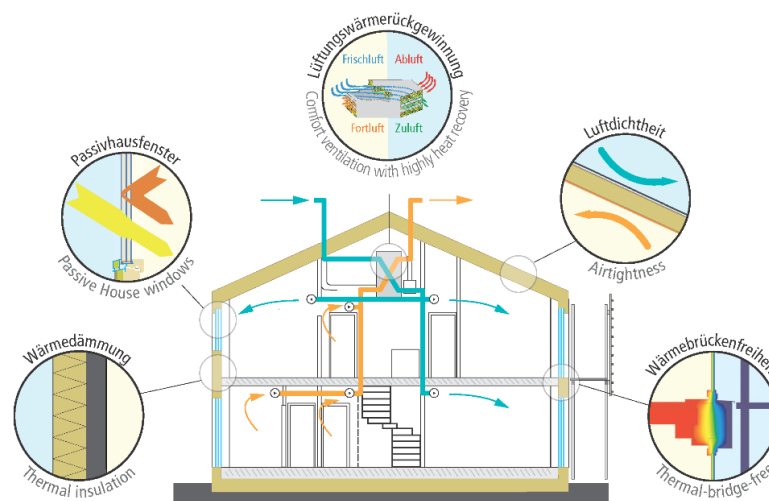


Figura 2.1 - Princípios básicos aplicados na construção de *Passive Houses* (Passiv@, 2015).

No ano de 2007, no âmbito do projeto “*Passive-On*”, foi elaborada uma proposta para a aplicação da norma “*Passivhaus*” em climas quentes da Europa. Em Portugal, a norma *Passivhaus* foi implementada numa casa com dois quartos distribuídos por um único piso (Figura 2.2), que cumpria a regulamentação energética em vigor nesse ano. De acordo com o regulamento, sendo a habitação construída em Lisboa, as necessidades de aquecimento e arrefecimento seriam no máximo 73,5 e 32 kWh/m².ano, respetivamente. No entanto, as necessidades anuais de aquecimento da casa *Passivhaus* proposta foram estimadas em 16,9 kWh/m², incluindo 11 kWh/m² que são fornecidos por um sistema de painéis solares. Desta forma as necessidades de aquecimento e de arrefecimento para uma *Passivhaus* em Portugal seriam respetivamente, 5,9 e 3,7 kWh/m² (Figura 2.3).

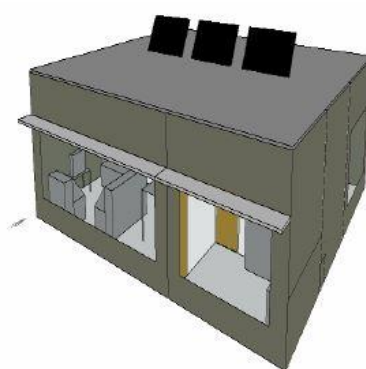


Figura 2.2 – Desenho 3D da casa Passivhaus proposta para Portugal (Passive-On Project, 2007b).

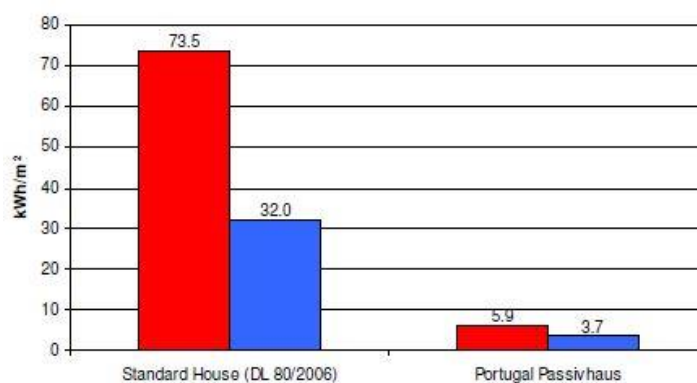


Figura 2.3 - Estimativa das necessidades anuais de aquecimento (vermelho) e de arrefecimento (azul) para uma casa típica (construída de acordo com o RCCTE) e para uma casa *Passivhaus* em Lisboa (Passive-On Project, 2007b).

2.3 Regulamentos e Normas Europeias

O termo “casa passiva” não é entendido da mesma forma por todos os países. No sul da Europa, a sua definição está associada a qualquer edificação que integre soluções passivas na sua construção, podendo ou não cumprir os requisitos da norma *Passivhaus*. Contudo, no centro da Europa o termo “casa passiva” é associado a casas que cumpram os requisitos da norma *Passivhaus* (Passive-On Project, 2007c). Para além da *Passivhaus*, norma alemã, existem outras normas associadas à construção de casas passivas, estabelecidas em diversos países, sendo exemplos destas a *Effinergie* na França, a *Minergie* na Suíça e a *DK Low energy Class 1* na Dinamarca (Thomsen et al, 2008).

No Quadro 2.1 são apresentados alguns dos valores limite, descritos nas normas anteriormente mencionadas, referentes à energia necessária para diversos parâmetros.

Quadro 2.1 – Comparação de valores limite de cumprimento de Normas Europeias para a construção de casas passivas (Passive-On Project, 2007c; Thomsen et al, 2008)

Valores máximos [kWh/m ² .ano]	<i>Passivhaus</i> no Sul da Europa	<i>Passivhaus</i> no Centro da Europa	<i>Effinergie</i> (França)	<i>Minergie</i> (Suíça)	<i>DK Low energy Class 1</i> (Dinamarca)
Energia necessária para aquecimento do espaço interior	15	15	-	-	-
Energia necessária para arrefecimento do espaço interior	15	-	-	-	-
Energia primária para aquecimento, arrefecimento, ventilação e água quente	120 ¹⁾	120 ¹⁾	50 ²⁾	42	35 + 1100 / Área a aquecer

¹⁾ O valor apresentado inclui também iluminação e eletrodomésticos.

²⁾ O valor apresentado inclui também iluminação.

No caso da regulamentação portuguesa, em 1990 foi publicado o “Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios” (RCCTE). Este constituiu a primeira base regulamentar com vista a melhorar a qualidade térmica dos edifícios, e consequentemente

o conforto térmico sem necessidades excessivas de energia (RCCTE, 1990). É ainda importante salientar que este regulamento não torna obrigatória a utilização de soluções passivas, no entanto contém valores limite que devem ser cumpridos. Em 2006, surge a reformulação do Decreto-Lei n.º 40/90, o Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril de 2006, com maiores exigências de qualidade térmica da envolvente dos edifícios relativamente ao anterior.

Mais tarde, em 1998, foi publicado o “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios” (RSECE) que veio estabelecer um conjunto de requisitos a ter em conta no dimensionamento e instalação de sistemas energéticos de climatização em edifícios, mantendo as exigências de conforto térmico e qualidade do ambiente interior (RSECE, 1998). Em 2006, é aprovado o Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril de 2006, revogando o Decreto-Lei n.º 118/98.

Recentemente no ano de 2013, surge o Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, que sintetiza num único diploma o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Este diploma transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios. Deste modo, tal documento revoga o Decreto-Lei n.º 78/2006 (SCE), o Decreto-Lei n.º 79/2006 (RSECE) e o Decreto-Lei n.º 80/2006 (RCCTE) (ADENE@, 2015).

2.4 Casas Passivas em Portugal

De acordo com Fathy (1980, citado por Monteiro, 2011) “a melhor definição de arquitetura é aquela que resulta da interação entre a inteligência humana e o seu ambiente natural, de forma a satisfazer as suas necessidades, tanto espirituais como físicas”.

Contrariamente ao que se possa pensar, a arquitetura em Portugal é desde há muitos anos uma arquitetura que se adapta ao clima e à região. No norte do país, onde predomina o clima húmido com pluviosidade elevada e temperaturas baixas, as habitações têm geralmente dois pisos: um térreo para arrumações e gado e outro para as pessoas e são construídas em granito ou xisto (Figura 2.4). Durante o inverno, o piso térreo quando ocupado por animais aquecia o piso superior. No sul do país, predomina um clima mais quente e seco, luminosidade mais intensa e fraca pluviosidade. Deste modo, as habitações são rebocadas e caiadas de branco para refletir os raios solares e as janelas são recuadas em relação à parede, criando sombreamento (Figura 2.5) (Expresso@, 2009).



Figura 2.4 – Arcos de Valdevez, Gondoriz (Oliveira, 2003).



Figura 2.5 – Alentejo (Oliveira, 2003).

De acordo com Hélder Gonçalves (2011), diretor do Laboratório de Engenharia do LNEG, a primeira casa passiva construída em Portugal foi construída nos anos 80, no Campus de Ramalde do INETI num Projeto liderado pela Faculdade de Engenharia do Porto e pelo Professor Oliveira Fernandes. Este projeto tratava-se de uma casa solar passiva onde foram inseridas soluções como paredes de Trombe e colunas de água para armazenamento, tendo sido aplicado pela primeira vez isolamento no exterior (Ascenso, 2011b).

Mais recentemente, foram desenvolvidos projetos como as Casas em Janas, Sintra (Figura 2.6), construídas em 2003 e o Edifício Solar XXI (Figura 2.7), construído em 2006, onde o aproveitamento da radiação solar foi o principal objetivo, permitindo não só iluminação interior como a minimização da utilização de luz artificial através dos grandes vãos envidraçados colocados a sul.



Figura 2.6 – Casas em Janas, Sintra (Rita, 2008).



a)



b)

Figura 2.7 – Edifício Solar XXI: a) Fachadas Poente-Sul; b) Fachadas Nascente-Norte (INETI, 2006).

Posteriormente, no ano de 2010, iniciaram-se as alterações a duas moradias já construídas e habitadas há ano e meio, em Ílhavo, com vista a certificá-las pela norma *Passivhaus* (Figura 2.8). Inicialmente o objetivo dos arquitetos envolvidos no projeto seria construir uma casa de raiz em vez de fazer alterações numa já existente, ainda assim foram obtidos melhores resultados do que os esperados, pois a habitação estava a consumir menos energia que o previsto.



Figura 2.8 – Primeira casa “Passivhaus” em Portugal (Homegrid@, 2015).

3 ESTRATÉGIAS PASSIVAS

3.1 Introdução

Designa-se por estratégias passivas, ou bioclimáticas, o conjunto de medidas utilizadas com o intuito de melhorar o comportamento e a eficiência energética dos edifícios. Estas devem ser implementadas num determinado edifício tendo em conta as características e variações climáticas do local, a função do edifício e conseqüentemente, o modo de ocupação e operação deste, de modo a promoverem um bom desempenho consoante o clima em questão. Quando são empregues as estratégias bioclimáticas mais acertadas, as condições de conforto térmico tornam-se mais fáceis de alcançar, e conseqüentemente diminuem-se os respetivos consumos energéticos associados (Gonçalves e Graça, 2004).

A arquitetura, na sua generalidade, deve oferecer condições térmicas que sejam compatíveis com o conforto térmico humano no interior dos edifícios, independentemente das condições climáticas externas. No caso específico da conceção de edifícios bioclimáticos, o objetivo passa por obter essas condições de conforto de modo natural. Variando essas condições em função do clima, do edifício em termos construtivos e do tipo de utilização deste, torna-se necessário ter em conta esses parâmetros na conceção da edificação.

Torna-se ainda importante salientar que o conforto térmico não é um conceito exato. Este está associado a vários fatores psicológicos e fisiológicos que variam de pessoa para pessoa, podendo conduzir a diferentes sensações de conforto térmico, perante as mesmas condições de ambiente térmico. Os principais fatores ambientais que influenciam diretamente são a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a velocidade do ar e a humidade relativa. As exigências humanas que influenciam o conforto térmico estão relacionadas com a atividade metabólica e o vestuário (Gonçalves e Graça, 2004). Afirma-se então que quando as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente ocorrem com facilidade, a sensação do indivíduo é de conforto térmico, aumentando conseqüentemente a sua produtividade.

Estratégias bioclimáticas, como o próprio nome indica, abordam o clima como uma variável importante na conceção de um projeto, tendo o sol e a sua interação com o edifício um papel fundamental. Desta forma, nos subcapítulos seguintes serão abordados sistemas passivos de

aquecimento e arrefecimento, vantajosos para alcançar o conforto interior, e ainda tópicos sobre ventilação e iluminação/sombreamento.

3.2 Sistemas passivos de aquecimento

Os sistemas passivos são definidos como soluções onde a energia flui por meios naturais, isto é, tiram proveito dos elementos estruturais do edifício de modo a permitirem o seu aquecimento/arrefecimento sem a intervenção de equipamentos mecânicos. Desta forma, têm em consideração fatores como o clima, as características do terreno e a orientação do edifício (The Worlds of David Darling@, 2015).

Os sistemas passivos de aquecimento pretendem captar a energia solar na estação de aquecimento (inverno). Para tal, são desenvolvidos tendo em conta a orientação solar, o tipo de atividade a desenvolver em cada compartimento da habitação e o correto dimensionamento dos vãos envidraçados, aos quais se podem ainda associar elementos massivos, que permitam o armazenamento da energia solar e sua posterior utilização (Gonçalves e Graça, 2004).

De acordo com Paul (1979, citado por Sacht, 2013) tendo em conta os diferentes tipos de aproveitamento de energia os sistemas passivos para aquecimento podem ser classificados como sistemas de ganho direto, sistemas de ganho indireto e sistemas de ganho isolado.

3.2.1 Ganho Direto

Constitui o sistema de aquecimento passivo mais habitual, por vezes de forma empírica e não intencional. Os sistemas de ganho direto baseiam-se na captação de radiação solar geralmente feita através de um envidraçado (Figura 3.1) preferencialmente orientado a sul, e no armazenamento do calor nas massas térmicas envolventes. Quanto maior a massa térmica de um edifício menor será a variação de temperatura no interior, consequentemente o edifício também será mais difícil de aquecer.

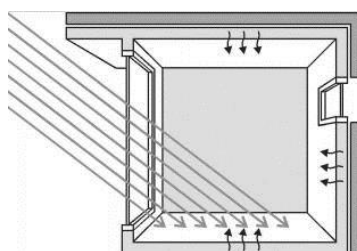


Figura 3.1 – Sistema de Ganho Direto (Gonçalves e Graça, 2004).

Dentro deste tipo de sistemas de aquecimento, existe ainda um sistema misto que combina ganhos diretos com um circuito de convecção, podendo este último ser natural ou ativado por ventilação mecânica. Diz-se que é um sistema de ganho direto com circuito de convecção através de enrocamento.

No Quadro 3.1 (adaptado de Mendonça, 2005) são apresentadas as vantagens e desvantagens dos sistemas de ganho direto, comparativamente aos outros sistemas.

Quadro 3.1 – Vantagens e Desvantagens dos Sistemas de Ganho Direto

Vantagens	Desvantagens
Tem um rendimento elevado, sendo que a energia de radiação por metro quadrado é máxima;	As grandes superfícies envidraçadas podem provocar falta de privacidade e iluminação excessiva;
É uma das soluções mais económicas e de simples funcionamento, uma vez que os materiais utilizados podem ser os comuns, mesmo sem necessidade de recorrer a massa térmica adicional;	A radiação direta pode provocar o sobreaquecimento durante as horas de maior incidência do Sol;
A superfície envidraçada permite iluminar os espaços interiores e a visibilidade para o exterior (em caso de vidro ou material translúcido);	As grandes superfícies de captação podem levar ao aumento do custo do sistema, pelos envidraçados em si, pela massa térmica adicional e pelos dispositivos de isolamento térmico necessários para proteger os envidraçados das perdas durante a noite;
O sistema permite flexibilidade na escolha da solução arquitetónica.	A radiação solar direta pode levar à degradação acelerada do mobiliário e revestimentos.

3.2.2 Ganho Indireto

Os sistemas de ganho indireto diferem dos anteriores na medida em que a radiação solar não atinge diretamente o compartimento que se pretende aquecer, mas sim um espaço intermédio (Figura 3.2). A radiação absorvida pela massa térmica do espaço intermédio é posteriormente transferida para o compartimento, podendo esta ser imediata ou desfasada, consoante a estratégia de circulação de ar que é adotada ou não.

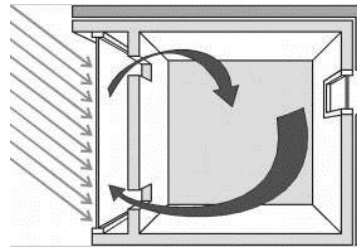


Figura 3.2 – Sistema de Ganho Indireto (Gonçalves e Graça, 2004).

Exemplos reais de sistemas de ganho indireto são: a parede de Trombe (Figura 3.3), onde durante o dia, a energia solar atravessa um vidro e incide numa parede maciça que absorve essa energia convertendo-a em calor, as paredes e colunas de água (Figura 3.4), que contrariamente ao sistema anterior utiliza água em contentores como material de armazenamento e as coberturas de água, ou Roof Pond (Figura 3.5), sistema que consiste na colocação de contentores de água sobre o telhado, por forma a recolher e armazenar a energia solar para posteriormente aquecer o compartimento sob o contentor.



Figura 3.3 – Parede de Trombe. Casa Shäffer, Porto Santo (Gonçalves e Graça, 2004).



Figura 3.4 - Colunas de água na Casa Solar no Porto (Gonçalves e Graça, 2004).

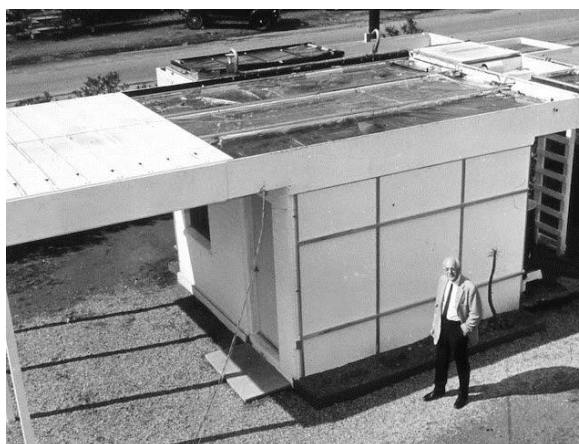


Figura 3.5 - Harold R. Hay, inventor do Roof Pond, ao lado do protótipo em 1967 (BDMDialog@, 2012).

No Quadro 3.2 (adaptado de Mendonça, 2005) são apresentadas algumas vantagens e desvantagens dos sistemas de ganho indireto.

Quadro 3.2 - Vantagens e Desvantagens dos Sistemas de Ganho Indireto

Vantagens	Desvantagens
Permitem um maior controlo da energia absorvida;	As perdas térmicas noturnas costumam ser elevadas;
Evitam problemas da degradação dos objetos expostos diretamente à radiação solar;	As paredes de armazenamento térmico (Parede de Trombe) obrigam à orientação sul;
Não apresenta a desvantagem de perda de privacidade;	As paredes de armazenamento impedem a visão para o exterior pelo que obrigam à abertura de envidraçados maiores ou orientados a outras direções (por exemplo norte);
Menores variações térmicas que nos sistemas de ganho direto.	Nas coberturas de água o sistema obriga a um pé direito baixo e a climatizar com este sistema apenas o piso adjacente à cobertura. A estrutura de suporte da cobertura é mais cara, pois tem que ser dimensionada de modo a suportar o peso adicional da água.

3.2.3 Ganho Isolado

Nos sistemas de ganho isolado a captação e armazenamento de radiação solar é feita num espaço inabitável do edifício.

As estufas são um dos exemplos deste tipo de sistemas e utilizam a combinação dos dois sistemas apresentados anteriormente: ganho direto e ganho indireto. Este sistema é constituído por duas zonas separadas por uma parede maciça, que armazena a energia e a transmite ao espaço adjacente por condução, podendo essa energia ser ainda transferida por convecção caso existam orifícios que permitam a circulação do ar (Figura 3.6).

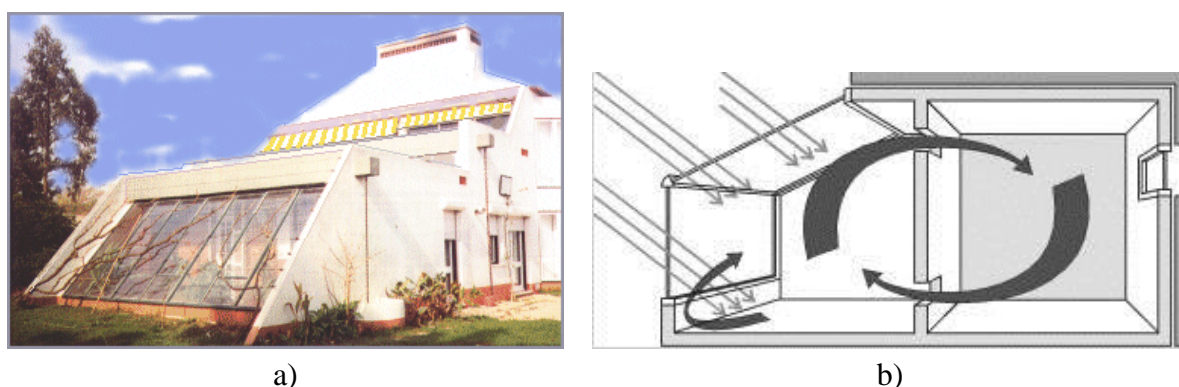


Figura 3.6 – a) Moradia Unifamiliar com Estufa – Vale do Rosal; b) Esquema de funcionamento (Gonçalves e Graça, 2004).

Outro exemplo deste tipo de sistemas de ganho isolado são os coletores de ar, que permitem ventilar espaços interiores adjacentes durante todo o ano. Estes são constituídos por um envidraçado e uma superfície absorvedora, sem capacidade de armazenamento (Gonçalves e Graça, 2004).

No Quadro 3.3 (adaptado de Mendonça, 2005) são apresentadas algumas vantagens e desvantagens dos sistemas de ganho isolado.

Quadro 3.3 - Vantagens e Desvantagens dos Sistemas de Ganho Isolado

Vantagens	Desvantagens
A variação térmica na zona ocupada é reduzida;	A conceção é mais complexa do que a dos sistemas anteriores;
É um sistema barato e utilizável durante todo o ano.	É necessário um controlo térmico para evitar sobreaquecimento no Verão.

3.3 Sistemas passivos de arrefecimento

Os sistemas passivos de arrefecimento visam diminuir a temperatura do ar interior na estação quente sem a necessidade de recorrer aos sistemas convencionais, evitando o abuso excessivo de eletricidade.

Existem uma série de fatores a ter em consideração quando temos por objetivo o arrefecimento passivo. O modo mais simples e eficaz de arrefecimento passivo consiste na prevenção de ganhos solares através de dispositivos de sombreamento exteriores como palas e estores, ou até mesmo através da plantação de vegetação. Outra forma de impedir a entrada de radiação no edifício é a utilização de cores claras nas fachadas do edifício, pois traduzem-se em menores valores de captação de radiação solar e a utilização de paredes exteriores com elevada massa térmica, preferencialmente com colocação de isolamento pelo exterior.

Segundo Gonçalves e Graça (2004) existem outros sistemas passivos de arrefecimento, os quais são apresentados nos subcapítulos seguintes.

3.3.1 Ventilação Natural

A ventilação natural é um processo apenas utilizável quando a temperatura do ar exterior é inferior à temperatura do ar interior. A renovação de ar no interior do edifício permite não só a entrada de ar exterior a uma temperatura mais baixa, como ainda a circulação de ar favorecendo a remoção do calor armazenado na massa térmica (Gonçalves e Graça, 2004). A colocação de vegetação junto à fachadas onde se faz a admissão de ar permite refrescar o ar antes de este entrar no edifício.

Dentro deste sistema de arrefecimento é ainda possível fazer distinção entre a ventilação cruzada ou transversal (Figura 3.7) e a ventilação simples ou unilateral.

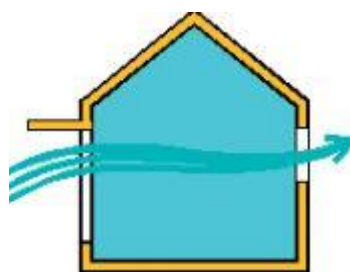


Figura 3.7 – Esquema representativo de ventilação cruzada (Gonçalves e Graça, 2004).

3.3.2 Arrefecimento pelo Solo

A temperatura do solo, a uma dada profundidade, mantém-se aproximadamente constante ao longo do ano. Desta forma, é possível beneficiar de condições de conforto com baixos custos associados. Existem duas formas de arrefecimento pelo solo, de contacto direto, em que os edifícios estão parcialmente enterrados e de contacto indireto, utilizando condutas enterradas (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Esquema representativo de arrefecimento indireto pelo solo
(Gonçalves e Graça, 2004).

3.3.3 Arrefecimento Evaporativo

O método mais comum de arrefecimento por evaporação pode ser conseguido passando uma corrente de ar sobre espelhos de água próximos do edifício (Figura 3.9). Num ambiente quente e seco, a água ao evaporar absorve energia calorífica sem aumentar a sua temperatura, provocando assim um efeito de arrefecimento e humedificação.

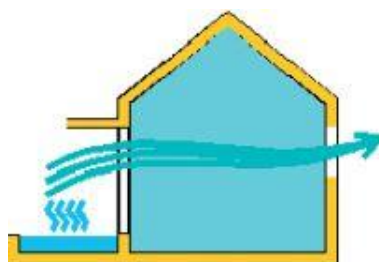


Figura 3.9 – Esquema representativo de arrefecimento evaporativo
(Gonçalves e Graça, 2004).

3.3.4 Arrefecimento Radiativo

A troca de energia, por radiação e convecção, entre todos os elementos da envolvente e o contorno que os rodeia ocorre durante períodos diurnos e noturnos. No entanto, é no período noturno que os seus efeitos são mais visíveis, podendo uma superfície ser arrefecida a temperaturas bastante mais baixas que a do ar ambiente, devido à ausência de radiação solar direta (Figura 3.10).

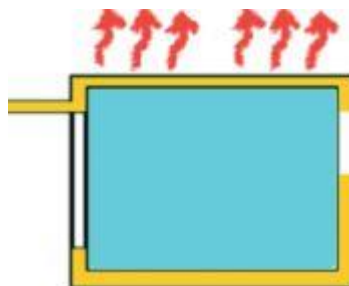


Figura 3.10 – Esquema representativo de radiação noturna (Gonçalves e Graça, 2004).

3.4 Ventilação natural e mecânica

3.4.1 Enquadramento

A população mundial tem vindo a ser alertada para o facto da poluição do ar provocar graves danos na saúde humana. Contudo, a exposição humana aos poluentes ocorre essencialmente através da inalação de ar em espaços fechados. Tal facto torna-se preocupante uma vez que a população, nomeadamente a residente em zonas urbanas, passa 80 a 90% do seu tempo em espaços interiores (Ginja et al, 2012). Tendo em conta todos os equipamentos e atividades executadas no interior de um edifício, bem como os materiais utilizados na sua construção, os níveis de poluentes no ar interior podem ser 2 a 5 vezes, ou em casos ocasionais 100 vezes, superiores aos níveis de poluentes presentes no ar exterior (Environmental Protection Agency@, 2015).

A crescente preocupação com a eficiência energética dos edifícios tem levado a uma constante evolução nas estratégias de construção, nomeadamente com a introdução de materiais sintéticos, e cada vez menos permeáveis, conduzindo à degradação da qualidade do ambiente interior (Matos, et al, 2010). Deste modo, a ventilação de espaços interiores é de extrema importância, permitindo que o ar exterior circule por todo o edifício, diluindo e removendo os poluentes atmosféricos presentes no interior deste, incluindo odores e microrganismos, salvaguardando a qualidade do ar interior (Sousa, 2014).

Para além de ajudar na remoção de poluentes, a ventilação é igualmente necessária no controlo da humidade presente no ar. Através da renovação do ar interior o vapor de água presente no edifício é extraído, prevenindo a ocorrência de condensações e a criação de fungos e bolores (Sousa, 2014). A taxa de renovação de ar é definida como o número de vezes que o volume de ar, num dado ambiente, é renovado por unidade de tempo.

A ventilação de um edifício pode ser conseguida através de meios naturais ou mecânicos. A ventilação natural decorre da diferença de pressões entre o interior e o exterior, que resultam da ação do vento e dos gradientes de temperatura. Este tipo de ventilação proporciona uma circulação de ar no interior do edifício sem recorrer a qualquer dispositivo mecânico (Instruel@, 2015). Desta forma, permite diminuir os consumos energéticos em sistemas de arrefecimento, daí ter sido considerado no subcapítulo anterior um sistema passivo de arrefecimento. Contudo, este sistema apresenta algumas desvantagens, como a dependência do vento e do gradiente térmico, a falta de controlo do fluxo de ar e a eventual entrada de poluentes vindos do exterior.

Quando as desvantagens apresentadas anteriormente se tornam inaceitáveis, é recomendada a utilização de sistemas de ventilação mecânica. Na ventilação mecânica a insuflação e a extração de ar, bem como o gradiente de pressões são induzidos por ventiladores, apresentando como desvantagem o custo adicional no consumo energético, quando comparados ao sistema de ventilação natural.

A ventilação mecânica em edifícios pode ser executada de duas formas: insuflação mecânica e extração mecânica. Na insuflação mecânica o ar é introduzido no edifício através de uma rede de condutas, provocando pressões positivas através das aberturas ou tubagens. Na extração mecânica, contrariamente à anterior, provocam-se pressões negativas no interior do edifício, dando origem à admissão de ar através das aberturas nas fachadas ou tubagens em contacto com o ar exterior (Ferreira, 2004). Os sistemas de ventilação mecânica apresentam como vantagens a possibilidade de incorporar filtros de modo a impedir a passagem de poluentes, o fluxo controlável, e ainda, atenuadores sonoros que reduzem o ruído provocado por estes sistemas. Uma vez que este tipo de sistema de ventilação exige um consumo de energia, por vezes é visto como um complemento à ventilação natural. Quando a ventilação natural é insuficiente para fazer a renovação de ar interior por ar exterior, a ventilação mecânica é utilizada de forma complementar, designando-se este sistema por ventilação híbrida (Ferreira, 2004).

Para além da ventilação existe ainda outro mecanismo que possibilita as trocas de ar entre o interior e o exterior do edifício. Este mecanismo é denominado por infiltração e, contrariamente à ventilação, a entrada de ar no edifício é feita através de fendas ou aberturas não intencionais.

Por vezes, quando a temperatura do ar exterior é muito distinta da temperatura ideal de conforto, as técnicas de ventilação anteriormente mencionadas tornam-se energeticamente inapropriadas.

Isto é, os ganhos ou perdas de calor provenientes da circulação do ar podem ser de tal forma significativos que obrigam a um aumento dos consumos de energia, por forma a retomar a temperatura de conforto (Sousa, 2014). Uma das formas de possibilitar a redução desse consumo é a implementação de sistemas de ventilação geotérmica (SVG).

3.4.2 Sistemas de Ventilação Geotérmica

Os Sistemas de Ventilação Geotérmica (SVG), também conhecidos como poço canadiano, poço provençal e permutador de calor ar-solo, são uma técnica feita através de tubos enterrados a baixa profundidade, entre 1,5 e 2 metros, que aproveita a grande inércia térmica do solo para climatizar e ventilar os edifícios (Cvc Direct@, 2015). Nesta técnica o ar é captado por uma “torre” que contém um sistema de pré-filtragem impedindo a entrada, e posterior deposição, de partículas suspensas no ar exterior no interior das tubagens enterradas. Ao longo do sistema de condutas ocorrem trocas de calor entre o solo e o ar que posteriormente é encaminhado até ao interior do edifício (Sousa, 2014).

Decorrente da grande inércia térmica do solo, durante o verão o ar ambiente encontra-se a uma temperatura superior à temperatura do solo, o que permitirá através do SVG arrefecer o edifício. No inverno ocorre o inverso (Figura 3.11) (Sousa, 2014).

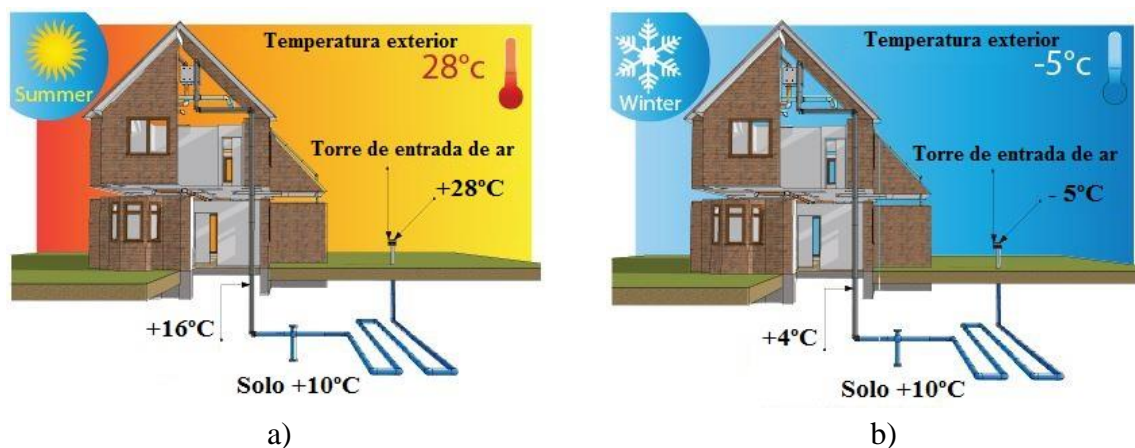


Figura 3.11 – Funcionamento do Sistema de Ventilação Geotérmica: a) Verão, b) Inverno (adaptado de Cvc Direct@, 2015).

Relativamente aos outros sistemas renováveis de climatização, o SVG não utiliza equipamentos termodinâmicos ou compressores e utiliza uma quantidade reduzida de energia elétrica para o funcionamento do ventilador. Este sistema apresenta ainda a vantagem de ter um baixo custo de manutenção e elevada durabilidade, permitindo ainda reduzir os custos de energia associada ao aquecimento e arrefecimento do edifício (Sousa, 2014).

A energia geotérmica é uma energia limpa e de produção contínua que se encontra armazenada sob a forma de calor no interior da superfície terrestre, nomeadamente nas zonas de intrusões magmáticas onde o potencial geotérmico é muito elevado.

3.5 Iluminação/Sombreamento

3.5.1 A energia solar e os edifícios

Atendendo a que as diferenças do clima terrestre são maioritariamente provenientes da energia solar, torna-se indispensável o conhecimento de alguns conceitos a ter em consideração na conceção de um edifício.

Variáveis climáticas como a temperatura do ar exterior e a radiação solar, são as que mais influenciam os edifícios, em termos de transferência de calor (Gonçalves e Graça, 2004).

Na estação fria, a temperatura do ar vai estabelecer fluxos energéticos do interior da habitação para o exterior, ou seja, perdas térmicas, levando a uma diminuição da temperatura interior. A adoção de medidas como a colocação de isolamento térmico ou a utilização de vidros duplos, podem reduzir significativamente essas perdas e consequentemente melhorar as condições de conforto térmico no interior do edifício. Na estação quente, o sentido de fluxo inverte, resultando em ganhos térmicos, devendo estes ser evitados sempre que contribuam negativamente para o conforto térmico ou provoquem um aumento da carga térmica do edifício, e consequentemente da temperatura no interior (Gonçalves e Graça, 2004).

As fachadas exteriores dos edifícios estão sujeitas a grandes amplitudes térmicas durante todo o ano, desta forma, a intensidade de radiação solar à qual estão sujeitas assume também um papel importante. No conforto térmico esta assume um papel determinante na medida em que, no inverno é uma fonte de calor e consequentemente contribui para o aquecimento do edifício, contudo há que evitá-la na estação quente.

Entenda-se por radiação solar a quantidade de energia, de intensidade variável, emitida pelo sol, da qual apenas uma pequena parte atinge a superfície terrestre. Desta forma, a radiação solar global é definida como o total de energia que atinge a superfície terrestre, podendo subdivide-se em dois tipos de radiação: radiação direta e radiação difusa. A radiação direta é a radiação solar que incide diretamente a superfície sem sofrer reflexões ou refrações intermédias e a radiação difusa é a radiação solar que atinge a superfície terrestre de modo indireto, ou seja, é difundida por moléculas presentes na atmosfera antes de alcançar a superfície.

Na Figura 3.12 são apresentadas as diversas zonas de Portugal Continental, definidas consoante os valores de incidência de radiação solar global. Nesta, é possível visualizar que a radiação solar em Portugal aumenta do litoral para o interior e de norte para sul.

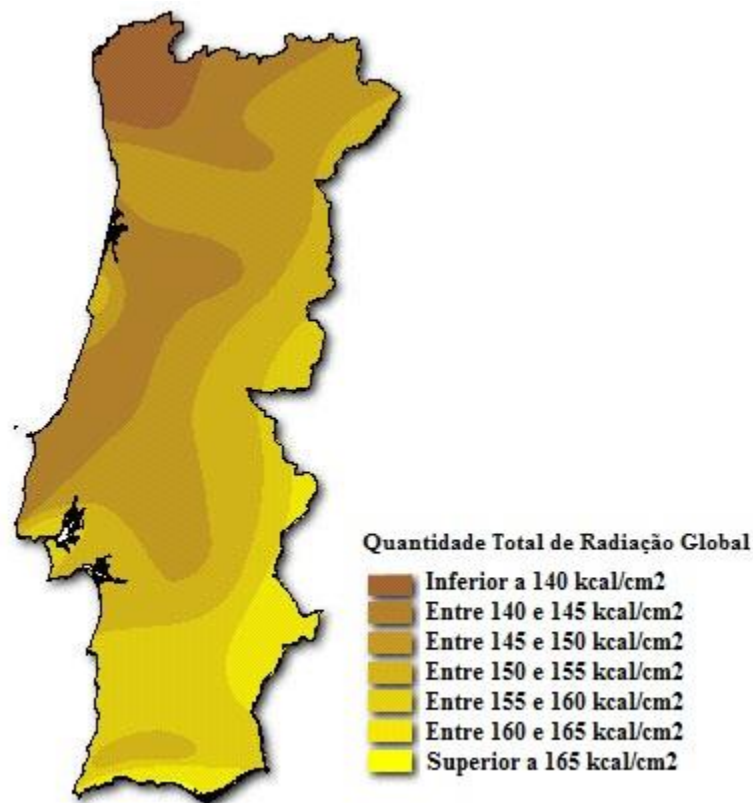


Figura 3.12 – Radiação Global Anual de Portugal Continental (adaptado de ESTÉCONFORTO@, 2015).

À incidência de radiação solar é também associada a iluminação dos edifícios, uma boa iluminação é crucial para garantir a qualidade ambiental no interior destes. Esta pode ser obtida de forma natural (luz solar), artificial (lâmpadas) ou através de uma conjugação de ambas. Atendendo a termos energéticos e visuais, a iluminação natural é o modo mais eficiente de iluminar um compartimento, deste modo, o seu aproveitamento deve ser maximizado. Para tal, é necessário maximizar a área do edifício com acesso à iluminação natural, priorizando os compartimentos onde sejam desempenhadas tarefas com maior exigência visual e onde exista uma constante permanência de pessoas, o que lhes facultará ainda a visão para o exterior (Silva, 2006). A iluminação natural é de extrema importância na conceção de um edifício não só por reduzir o uso de iluminação artificial, mas também pelo bem-estar que proporciona aos seus ocupantes.

3.5.2 Geometria solar

Para além dos valores de radiação solar que atingem os edifícios, é igualmente importante conhecer com exatidão a trajetória do sol ao longo de todo o ano, contribuindo assim para o bom desempenho energético de um edifício. Isto é, no sentido de tirar o proveito dos ganhos solares para o interior do edifício nas estações mais frias e restringir a sua entrada nas estações mais quentes (Gonçalves e Graça, 2004).

A Geometria Solar ou Geometria de Insolação estuda a forma do edifício e as obstruções à incidência de radiação neste, como palas e sombreamentos devido a edifícios vizinhos ou árvores. A Figura 3.13 representa a trajetória aparente do sol durante o dia e ao longo do ano, no hemisfério norte.

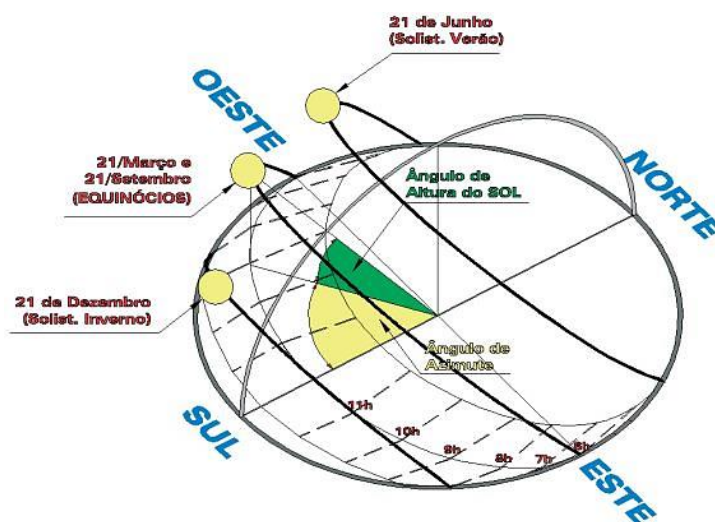


Figura 3.13 - Trajetória do sol ao longo do ano, no hemisfério norte (Gonçalves e Graça, 2004).

No hemisfério norte, no solstício de inverno, dia 21 de dezembro é quando o ângulo da altura do sol tem valores mais baixos. Neste dia ele nasce próximo da orientação sudeste e põe-se próximo de sudoeste. Nos equinócios, dias 21 de março e 21 de setembro, o sol nasce a este e põe-se a oeste. No solstício de verão, dia 21 de junho, nasce próximo de nordeste e põe-se a noroeste, apresentando neste dia os valores do ângulo de altura do sol mais elevados do ano.

No hemisfério sul o fenómeno é inverso, ou seja, o solstício de inverno ocorre dia 21 de junho, e o solstício de verão ocorre dia 21 de dezembro. Estes momentos dos solstícios marcam as mudanças de estação.

3.5.3 Orientação das fachadas

A orientação das fachadas constitui um dos aspetos arquitetónicos mais importantes.

Em Portugal, devido à posição geográfica, o quadrante sul é aquele que recebe mais radiação solar, ou seja, é na fachada a sul que deve ser colocada a maior área de envidraçados. Segundo Mendonça (2005) é possível poupar cerca de 30% de energia colocando as divisões com maiores necessidades energéticas voltadas a sul. Quanto à área de envidraçados na fachada a norte, esta deve ser reduzida uma vez que durante a estação de inverno, é onde ocorrem as maiores perdas térmicas através dos envidraçados.

4 CASO DE ESTUDO

O presente estudo teve por base uma moradia unifamiliar de tipologia T3, construída pela empresa “Cool Haven”, utilizada como modelo destinado a demonstrar as diversas potencialidades de um novo conceito de habitação, a habitação modular. A moradia localiza-se no parque tecnológico de Antanhol, criado pela Câmara Municipal de Coimbra com o intuito de desenvolver e modernizar o tecido empresarial da cidade e da sua região, facilitando a ligação entre empresas, centros de investigação e mercados e disponibilizando um conjunto de serviços especializados de apoio à criação, desenvolvimento e internacionalização de empresas. Atualmente, o edifício e um pavilhão anexo a este dão lugar a escritórios da empresa, destinados à sua gestão e a projetos de investigação.

A empresa “Cool Haven” tem vindo a desenvolver um projeto de investigação e de desenvolvimento tecnológico, com o objetivo de criar um novo conceito de habitação. Este novo conceito apresenta uma estrutura construída em LSF, modular, flexível, resistente e adaptável a cada agregado familiar. As habitações “Cool Haven” associam a modularidade à eco sustentabilidade, a novos sistemas de automação e à domótica, tirando ainda partido de energias renováveis locais, como a energia solar e a inércia térmica do solo, e da ventilação natural. Sendo o LSF um tipo de estrutura ainda pouco utilizada em Portugal, bem como as casas modulares, surge o interesse de compreender melhor o funcionamento deste novo conceito de habitação.

4.1 Descrição do edifício

A estrutura da moradia em estudo, ilustrada na Figura 4.1, é constituída por perfis enformados a frio (consultar Figura 1.1) e foi projetada para um período de vida útil de 50 anos. O edifício é constituído por dois pisos com uma área útil total de 150,91 m². O primeiro piso é composto por uma cozinha, uma instalação sanitária e uma sala ampla, que atualmente é dividida por uma parede de vidro, formando assim duas divisões. O segundo piso é composto por três compartimentos, um corredor, uma caixa de escadas e uma instalação sanitária.



Figura 4.1 – Casa modelo e pavilhão anexo da “Cool Haven”.

A envolvente opaca do edifício é composta por painéis de OSB e gesso cartonado, e constituída no seu interior por perfis metálicos. Entre os painéis de revestimento e a estrutura metálica foi introduzida lã de rocha para ajudar no isolamento térmico e acústico do edifício. No isolamento exterior foi usado um sistema ETICS com 50 mm de poliestireno expandido (EPS).

No Quadro 4.1 é apresentada uma descrição mais detalhada da envolvente opaca do edifício, com os correspondentes coeficientes de transmissão térmica (U).

Quadro 4.1 - Coeficientes de transmissão térmica da envolvente opaca.

Envolvente opaca	Material	Espessura (mm)	U (W/m ² .°C)*
Paredes Exteriores	ETICS em EPS	50	0,27
	OSB	11	
	Lã de rocha	40	
	Caixa-de-ar	114	
	Lã de rocha	40	
	OSB	11	
	Gesso cartonado	13	
Pavimento Exterior	Painel Sandwich – 75 mm	75	0,38
	lã de rocha	243	
	Caixa-de-ar	243	
	Painéis tipo Knauf Tecnosol	28	

Envolvente opaca	Material	Espessura (mm)	U (W/m².°C)*
Pavimento sobre Espaço Não Útil	Painel Sandwich – 75 mm	75	0,36
	lã de rocha		
	Caixa-de-ar	243	
	Painéis tipo Knauf Tecnosol	28	
Cobertura	Lajeta térmica (não considerada no cálculo de U)	-	0,29
	Lã de rocha	60	
	OSB	18	
	Caixa-de-ar	300	
	Lã de rocha	40	
	Gesso cartonado	13	

*os valores de U são valores corrigidos tendo em consideração as pontes térmicas

Os envidraçados são constituídos por uma caixilharia de alumínio com corte térmico e por vidro duplo incolor 8/16/6 mm (exterior/caixa-de-ar/interior) e a proteção solar exterior utilizada é uma lona de cor escura e opacidade reduzida.

No Quadro 4.2 são expostas as características térmicas dos envidraçados (U – coeficiente de transmissão térmica, g' – fator solar do vão envidraçado com proteção solar e vidro incolor, g_{100} – fator solar do vão envidraçado com proteção 100% ativa, g_{inv} – fator solar para a estação de aquecimento). No Quadro 4.3 são apresentadas as propriedades dos dispositivos de sombreamento implementados no edifício.

Quadro 4.2 – Propriedades térmicas dos envidraçados

Tipo de vidro	U (W/m².°C)	g'	$g_{100\%}$	g_{inv}
Vidro duplo com caixa-de-ar: 8/16/6 mm	2,5	0,62	0,33	0,63

Quadro 4.3 – Propriedades dos dispositivos de sombreamento

Tipo de dispositivo de sombreamento	Cor	Transmitância Solar Direta	Refletância Solar	Transmitância de Luz Visível	Refletância de Luz Visível
Lona	Escura	0,050	0,350	0,050	0,350

A referida moradia integra ainda dois coletores solares e um SVG, instalado no jardim, que permite a sua ventilação e climatização (Figura 4.2). O material constituinte dos tubos enterrados é o PVC, que apesar da sua condutividade térmica não ser muito elevada, apresenta um preço bastante acessível, e oferece garantias ao nível da resistência e estanquidade.



Figura 4.2 – Instalação das tubagens do SVG no solo

O sistema instalado pode funcionar de duas formas. Nos meses mais frios, o aquecimento proporcionado pelo sistema instalado torna-se insuficiente para atingir a temperatura de conforto no interior do edifício (20 °C), deste modo, este apenas é ativado quando é necessário ventilar o edifício por forma a garantir a qualidade do ar interior. Este controlo é feito através de sensores de CO₂, onde o SVG é ativado quando a concentração de dióxido de carbono excede os limites aconselhados. Durante os meses mais quentes, o SVG é ligado sempre que é necessário ventilar o edifício ou quando a temperatura interior atinge os 25 °C, considerada a temperatura de conforto máxima na estação de arrefecimento.

Uma vez que o benefício do sistema instalado, em termos térmicos, é superior ao consumo de energia elétrica, este pode ser considerado um sistema passivo, isto desde que o sistema seja bem controlado. Torna-se ainda importante referir que quer o sistema de ventilação, quer o edifício têm vindo a ser monitorizados através de um sistema de domótica.

4.2 Sistema de domótica

A monitorização e controlo dos sistemas térmicos da moradia e do sistema de ventilação mecânica geotérmica é executada através de um sistema de domótica, o protocolo KNX.

O Protocolo KNX é um Sistema de Gestão Integrada de Edifícios que permite que através de um painel táctil todas as aplicações instaladas sejam controladas. De um modo genérico, o sistema faz o controlo de informação, desde o aquecimento, ventilação e sombreamentos, permitindo alcançar novas formas de aumentar a segurança e o conforto e ainda a poupança de energia.

O Protocolo KNX em comunicação com o painel de controlo permite atuar consoante os sinais de entrada proveniente de diversos tipos de dispositivos. Os dispositivos podem ser do tipo: multisensores (sensores de CO₂, humidade relativa e temperatura), estação meteorológica, sensores de movimento, contadores de energia (monitorização do consumo de energia e potência) e sensores de janelas que realizam o corte do funcionamento dos sistemas A/C e ventilação mecânica evitando perdas desnecessárias de energia. Com base nas leituras provenientes destes dispositivos (set-points de temperatura ajustados em cada divisão), o sistema controla as unidades de A/C para três velocidades de funcionamento em que o valor de entrada varia entre 0 e 1, correspondendo estes às unidades de climatização desligadas e ligadas, respetivamente. O sistema permite também realizar o controlo da ventilação geotérmica através da leitura do sensor de CO₂ dependendo da concentração de CO₂ em cada divisão (800 ppm's), e também de um set-point de temperatura, como referido anteriormente no subcapítulo anterior. Permite ainda, realizar o registo do horário de ativação dos dispositivos de sombreamento.

4.3 Parâmetros monitorizados

4.3.1 Interior do edifício

Os parâmetros controlados através do Protocolo KNX são registados por um Datalogger Campbell Scientific, modelo Cr800, sendo este um equipamento capaz de armazenar informação proveniente de outros dispositivos. O Datalogger contém 6 canais de leitura, os dados provenientes do KNX são lidos por um destes canais, sendo os restantes responsáveis pela leitura da estação meteorológica e dos sensores de temperatura do sistema geotérmico. O equipamento regista médias horárias, 24 horas por dia, o que possibilitou a realização de uma análise mais pormenorizada de alguns dos parâmetros registados no interior do edifício.

Em seguida, são apresentadas representações gráficas dos parâmetros mais relevantes para o estudo em causa, sendo estes: a temperatura do ar interior (Figura 4.3), a concentração de CO₂ (Figura 4.4), horário de funcionamento do sistema de ar condicionado (Figura 4.6) e o horário de funcionamento dos dispositivos de sombreamento (Figura 4.7). Os presentes resultados são referentes ao compartimento 3, localizado no segundo piso (Figura 4.11), tendo sido controlados através do Protocolo KNX e registados pelo Datalogger.

Para uma análise mais precisa foram comparados os valores da semana típica de verão com os valores referentes à semana típica de inverno. Entenda-se por semana típica a semana representativa da estação do ano, em termos de temperatura média exterior.

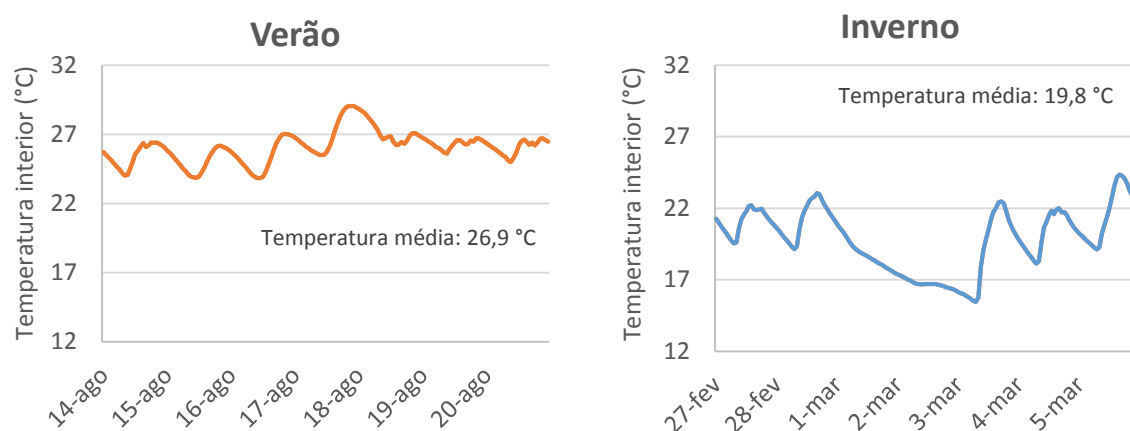


Figura 4.3 – Variação horária da temperatura interior (°C), no compartimento 3, nas semanas típicas de verão e inverno.

Como era esperado, na Figura 4.3 pode observar-se que a temperatura interior média, no compartimento em estudo, na estação de aquecimento é inferior à temperatura interior média na estação de arrefecimento. Nesta figura é ainda possível observar-se o comportamento passivo (sistema de ar condicionado desligado) e a redução dos ganhos internos durante o fim de semana na semana típica de inverno, dias 1 e 2 de março.

Na Figura 4.4 são apresentados graficamente os níveis de CO₂ nas duas semanas típicas, no compartimento em estudo.

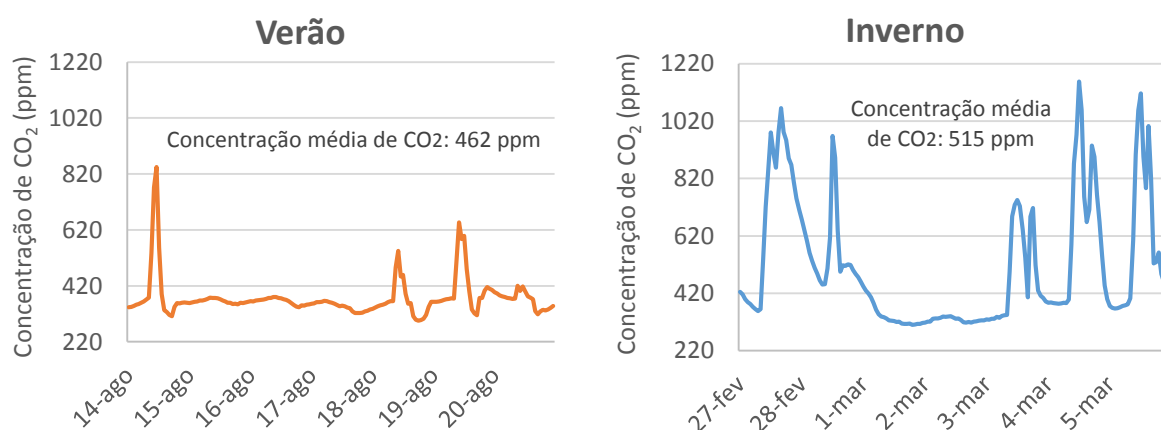


Figura 4.4 – Variação horária da concentração de CO₂ (ppm), no compartimento 3, nas semanas típicas de verão e inverno.

Pela análise destes resultados é possível concluir, para a semana típica de verão, que entre finais do dia 14 de agosto e princípio de dia 18 de agosto, não houve ocupação neste compartimento uma vez que os níveis de CO₂ são muito baixos. Da análise dos resultados referentes à semana típica de inverno, pode concluir-se que não houve ocupação no compartimento em estudo entre dia 1 de março e início do dia 3 de março. Comparando as duas estações do ano, tal como esperado a concentração de CO₂ é mais baixa no verão visto que é nesta época do ano que as plantas aumentam o processo de fotossíntese absorvendo o CO₂ da atmosfera, e consequentemente baixando o seu nível. No inverno com a diminuição da fotossíntese e a libertação de CO₂ pelo processo de respiração, os níveis de CO₂ aumentam comparativamente aos níveis de verão. Tais variações no exterior causam impacto nas medições feitas no interior do edifício. No entanto, o parâmetro mais relevante é a ventilação.

Na Figura 4.5 é possível observar os valores registados para o caudal de ar insuflado.

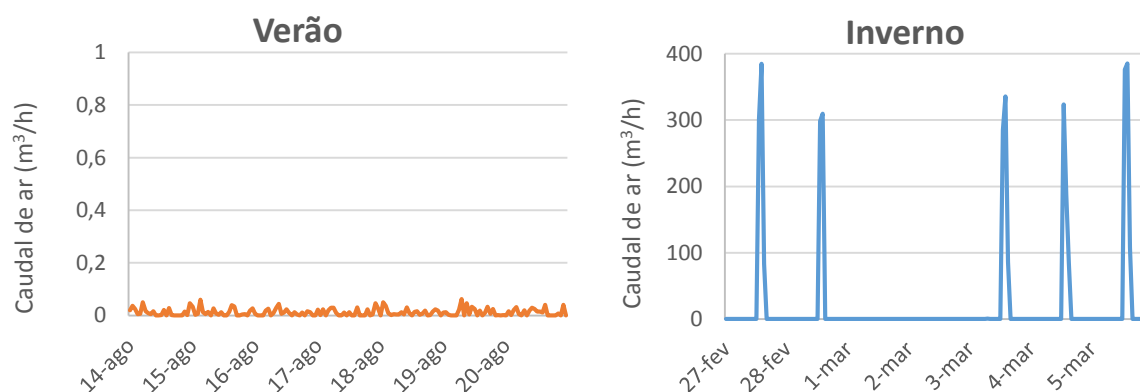
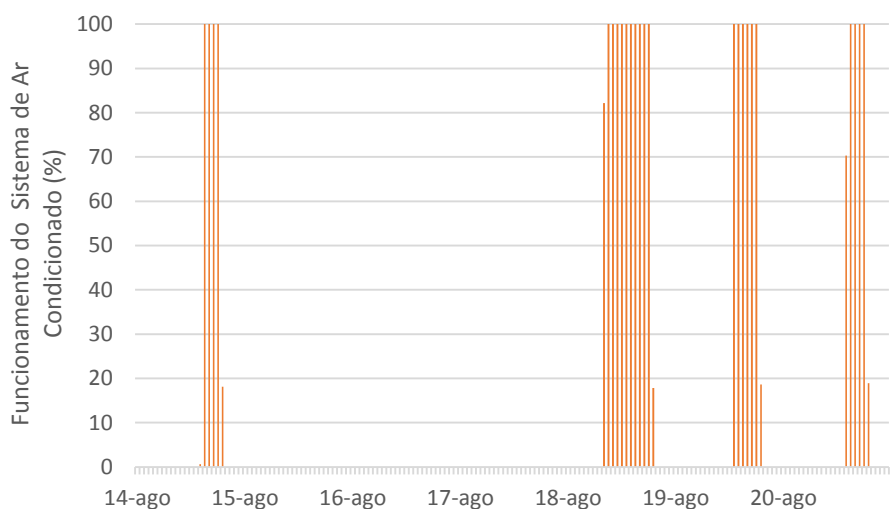


Figura 4.5 – Caudal de ar insuflado (m³/h) pelo SVG, durante as semanas típicas.

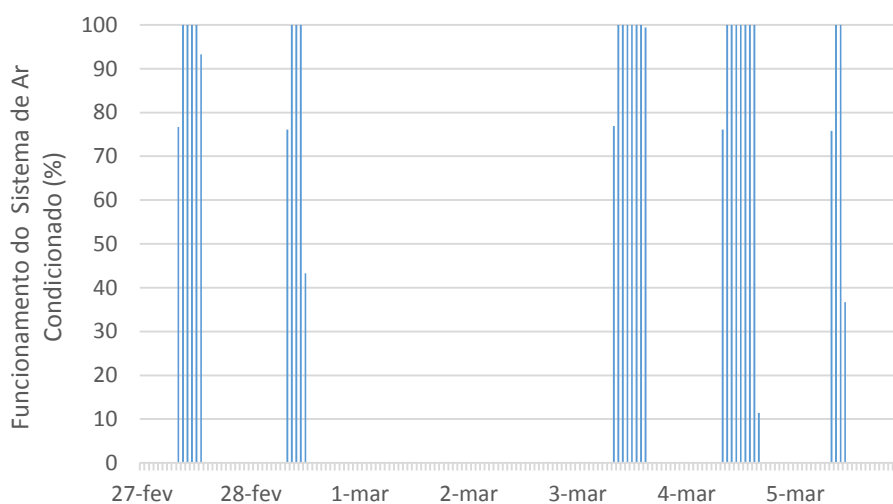
Durante a semana típica de verão, os valores registados foram inferiores a 0,1 m³/h, denominando-se assim por valores “parasitas”, sendo estes desprezáveis, ou seja, o sistema não esteve a funcionar. Contudo, durante a semana típica de inverno é possível observar que quando a concentração de CO₂ é muito elevada o SVG é ativado, diminuindo esses níveis de concentração, mantendo assim a qualidade do ar interior. Um dos exemplos ilustrativos disso ocorre no dia 4 de março, em que quando a concentração de CO₂ atinge o valor mais elevado (1158ppm) a ventilação é ativada, reduzindo consequentemente a concentração para 669ppm.

Em seguida, são apresentados graficamente os funcionamentos do sistema de ar condicionado e do sistema de sombreamento. Tais parâmetros foram cruciais para possibilitar a validação do modelo apresentado posteriormente no subcapítulo 4.5.

Na Figura 4.6, relativa ao funcionamento do sistema de ar condicionado, os valores apresentados referem-se à percentagem de tempo que o sistema esteve ligado durante uma hora. O valor 100 significa que o sistema está operacional durante toda essa hora, e o valor 0 significa que o sistema de ar condicionado está desligado. Se o valor for de 70% significa que a ventilação esteve ligada 70% do tempo de registo, ou seja, 42 minutos durante a hora de registo (60 minutos).



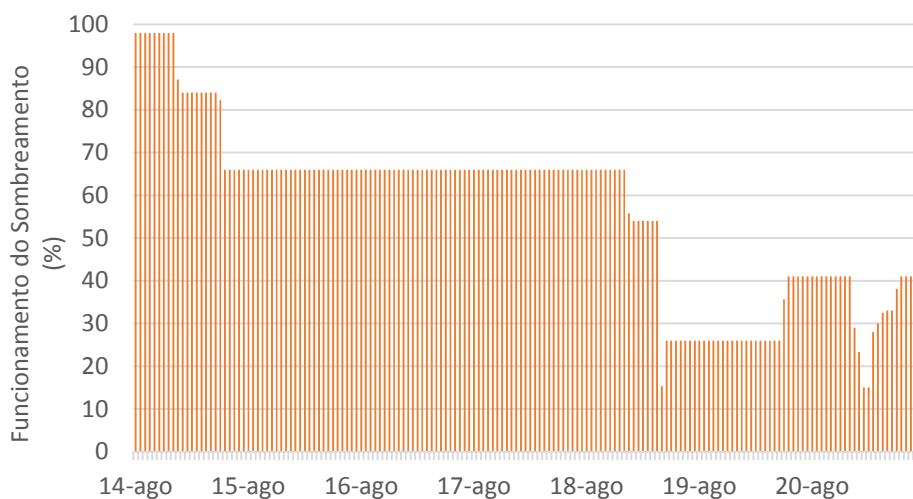
a) na semana típica de verão



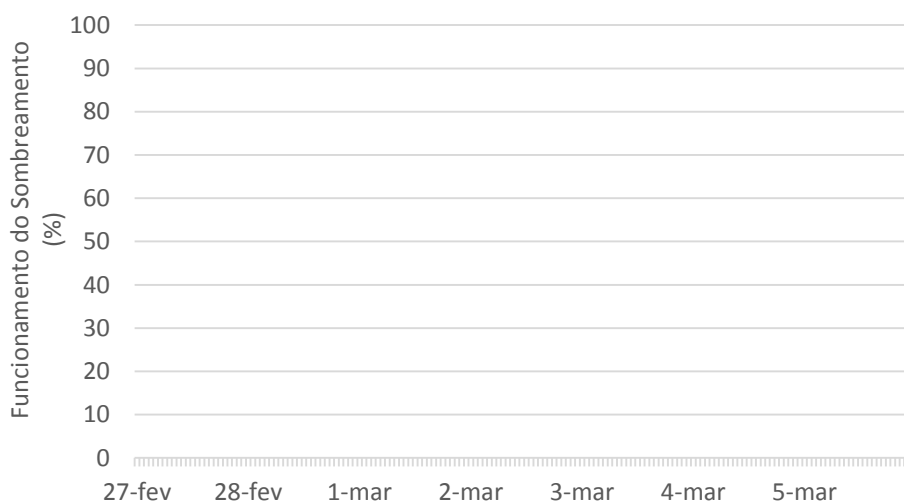
b) na semana típica de inverno

Figura 4.6 – Variação horária do funcionamento do sistema de ar condicionado (%), no compartimento 3.

Na Figura 4.7, relativa ao funcionamento do sombreamento, o valor 100% corresponde ao sistema de sombreamento ativo, ou seja, quando este está a impedir a incidência de radiação solar direta no interior do compartimento (lona fechada), o valor 0 corresponde ao sistema de sombreamento inativo, ou seja, quando este permite a incidência de radiação solar (lona aberta).



a) na semana típica de verão



b) na semana típica de inverno

Figura 4.7 – Variação horária do funcionamento do sombreamento (%), no compartimento 3.

4.3.2 Exterior do edifício

Na cobertura do pavilhão anexo à moradia foi instalada uma estação meteorológica onde são recolhidos dados como a temperatura do ar exterior e a radiação solar.

A temperatura do ar exterior, ou mais corretamente “temperatura do bulbo seco” é descrita como sendo a temperatura do ar ambiente. Na Figura 4.8 é exposta uma representação gráfica da temperatura do bulbo seco na semana típica de verão e na semana típica de inverno, onde se pode verificar que tal como o esperado a temperatura é mais elevada no verão e mais baixa no inverno, tomando a média destas os valores de 19,9 °C e 11,3 °C, respetivamente. Outra conclusão a retirar da análise dos gráficos é que as amplitudes térmicas no verão são muito maiores que no inverno.

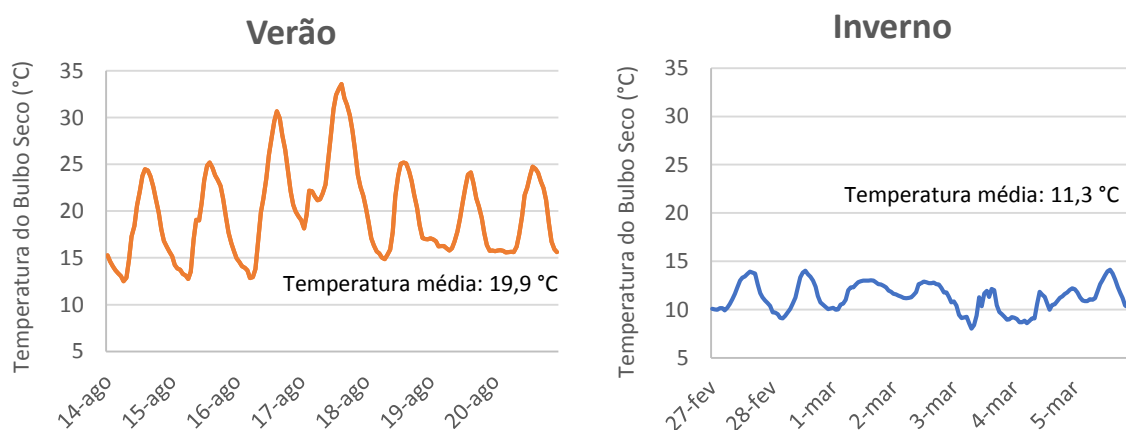


Figura 4.8 - Variação horária da temperatura de bulbo seco (°C), nas semanas típicas de verão e inverno.

Como referido anteriormente, a radiação solar é também um dos parâmetros recolhidos na estação meteorológica. Uma vez que a temperatura do ar interior varia em função da radiação solar, a análise deste parâmetro, bem como a compreensão dos seus diversos componentes torna-se essencial.

A radiação solar global (Figura 4.9) é a quantidade de energia radiante que é recebida num determinado intervalo de tempo por unidade de área de uma superfície horizontal. Esta divide-se em duas componentes a radiação difusa, registada pela estação meteorológica e apresentada no Anexo A, na Figura A.1 e a radiação direta, como foi visto no Capítulo 3. A radiação solar normal direta, descrita como a radiação que incide diretamente na perpendicular à superfície, é também um dos parâmetros registados (Anexo A, Figura A.2).

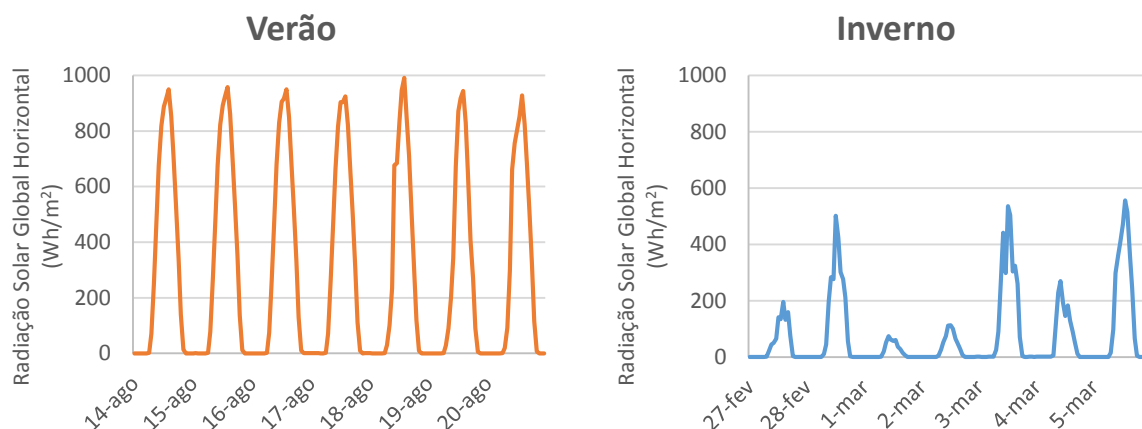


Figura 4.9 - Variação horária da radiação solar global horizontal (Wh/m^2), nas semanas típicas.

Para além da temperatura do bolbo seco e da radiação solar, a estação meteorológica regista ainda: a temperatura do ponto de orvalho, a humidade relativa e a pressão atmosférica. A temperatura do ponto de orvalho ou ponto de saturação, apresentada no Anexo A, Figura A.3, é descrita como a temperatura à qual o vapor de água presente no ar passa ao estado líquido. A humidade relativa é descrita como a proporção entre a quantidade de vapor de água presente no ar exterior e a quantidade máxima que poderia conter àquela temperatura e é apresentada na Figura A.4. A pressão atmosférica é também apresentada em Anexo, na Figura A.5. Regista também parâmetros referentes ao vento, como a sua velocidade e direção (Figura A.6), e ainda a precipitação (Figura A.7) e a radiação infravermelha (Figura A.8).

Torna-se importante referir que os parâmetros mencionados anteriormente foram utilizados na criação de um ficheiro de dados meteorológicos referentes ao ano de 2014. Ficheiro este que foi inserido no *software DesignBuilder* e utilizado na modelação do edifício estudado na presente dissertação.

4.4 Simulação dinâmica do comportamento térmico e eficiência energética (*DesignBuilder*)

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o *software DesignBuilder*, sendo este uma interface gráfica para o programa de simulação do desempenho térmico e energético de edifícios, *EnergyPlus*. O *software DesignBuilder* permite não só a modelação do edifício em estudo, como também que lhe sejam atribuídas características e dados referentes à sua

construção, a atividades e ocupação, a sistemas de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) e iluminação. Tais definições podem ser alteradas utilizando os modelos pré-definidos pelo programa, ou ainda, manualmente consoantes as necessidades de cada projeto. Tais informações estão organizadas de uma forma hierarquizada facilitando o manuseamento do programa ou a alteração das características do edifício, desde um nível geral (edifício) a um nível mais detalhado (paredes, pavimentos, envidraçados).

4.5 Validação do modelo

Um modelo é uma representação mais ou menos simplificada da situação real, deste modo a sua validação torna-se efetivamente importante. Esta é efetuada equiparando o comportamento do modelo com o comportamento do sistema real quando estes são submetidos às mesmas condições.

O modelo utilizado neste estudo já tinha sido previamente implementado numa versão inicial. Posteriormente, foi adaptado por forma a reproduzir os valores registados no sistema de monitorização do edifício real.

Na presente dissertação, a validação do modelo foi realizada comparando a temperatura interior prevista pelo modelo desenhado no *software DesignBuilder* (Figura 4.10 e Figura 4.11) com a temperatura real registada pelo Datalogger. É de realçar que no modelo foram introduzidas todas as características estruturais reais do edifício em estudo. De modo a facilitar a validação, foi inicialmente escolhida uma semana do ano de 2014, onde existissem menos variações nos dados registados (temperatura interior, concentração de CO₂, horários de funcionamento do sistema AVAC e de sombreamento). Desta forma optou-se pela semana de 2 a 8 de Junho.

No entanto, este tipo de validação/calibração não é fácil, existindo sempre um erro associando, entre o previsto e o que foi efetivamente medido, visto que existem muitos parâmetros com influência direta nos resultados (comportamento térmico). Outro fator que dificulta este tipo de análise é o facto de o edifício em estudo não estar a ser utilizado como uma habitação, onde os ocupantes possuem uma rotina diária, mas sim como um escritório, onde trabalham diariamente diversas pessoas, com diferentes rotinas, e ocorrem constantemente reuniões a diferentes horários, levando a várias alterações durante o dia.

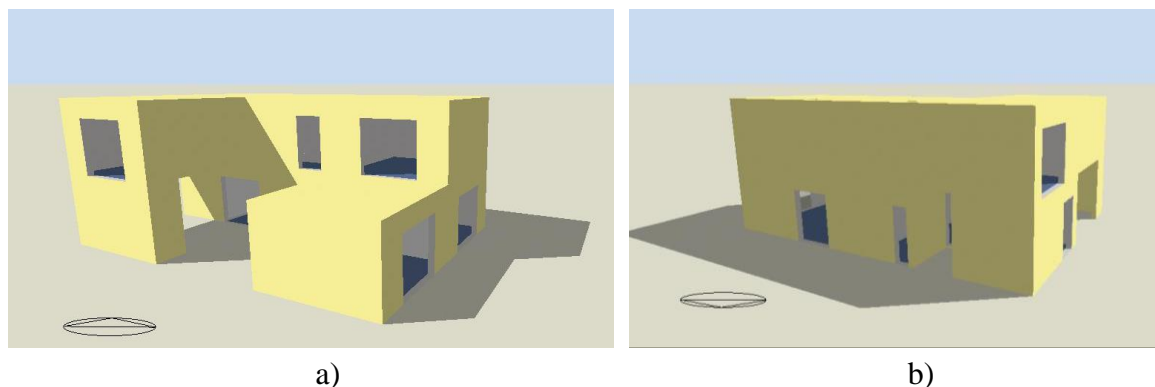


Figura 4.10 – Edifício em estudo, modelado no *DesignBuilder*: a) alçados voltados a sul, b) alçados voltados a norte.

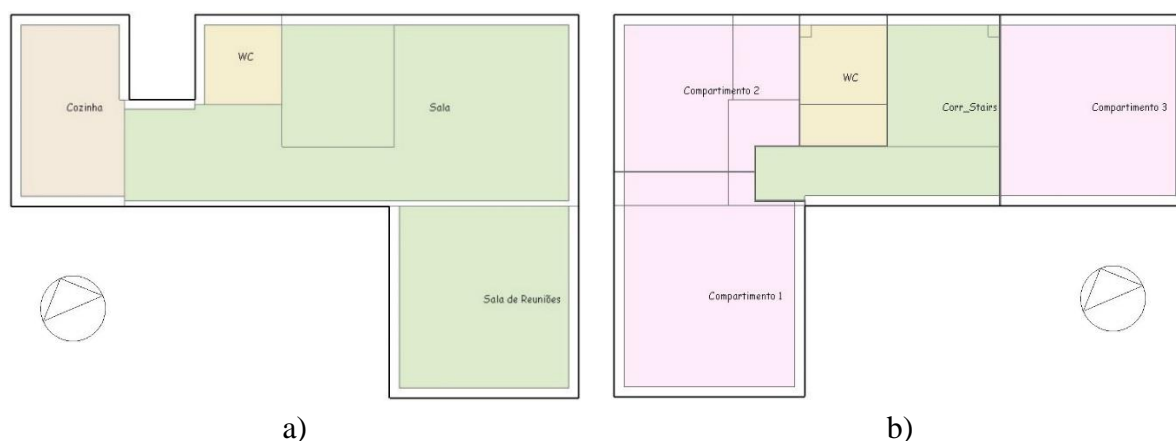


Figura 4.11 – Compartimentação interior do edifício modelado no *DesignBuilder*: a) rés do chão, b) 1º andar

Antes de iniciar a validação, foi necessário proceder à verificação do modelo, isto é, foram realizadas várias simulações assegurando que o modelo estaria a funcionar como esperado. Posteriormente, foram comparados vários cenários de modo a verificar qual a melhor aproximação à realidade tendo como referência a informação registada no Datalogger (temperatura interior no compartimento em análise). Tratando-se de um processo iterativo de calibração, no Quadro 4.4 são apresentados os vários parâmetros de calibração do modelo *DesignBuilder* da moradia. No parâmetro 1, foi estudada a influência da introdução dos horários de funcionamento reais dos dispositivos de sombreamento e do sistema AVAC. No parâmetro 2, foi estudada a influência da ventilação, utilizando como base o cenário do parâmetro anterior mais próximo do valor registado no Datalogger. No parâmetro 3, foi estudada a influência dos dispositivos de sombreamento, utilizando como base o melhor cenário do parâmetro 2. No

parâmetro 4, à semelhança do parâmetro 2, foi estudada a influência da ventilação mas, contrariamente a este último, foi utilizado como base o cenário do parâmetro 3 que mais se aproxima à realidade.

Quadro 4.4 – Parâmetros de calibração do modelo

Parâmetro 1: Influência do horário de funcionamento real		
Utilizando os horários de funcionamento dos dispositivos de sombreamento e sistema AVAC, definidos por defeito no template do <i>DesignBuilder</i>	Com introdução dos horários de funcionamento reais dos dispositivos de sombreamento e sistema AVAC	
Parâmetro 2: Influência da Ventilação¹⁾		
0,0 rph	0,3 rph	0,6 rph
Parâmetro 3: Influência do Sombreamento		
Sombreamento ON	Sombreamento OFF	
Parâmetro 4: Influência da Ventilação²⁾		
0,0 rph	0,3 rph	0,6 rph

¹⁾ Introdução do horário de funcionamento registado do sombreamento e sistema AVAC

²⁾ Sombreamento ON e introdução do horário de funcionamento registado do sistema AVAC

De modo a determinar a diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores efetivamente medidos, e consequentemente a melhor aproximação à curva real, foi calculada a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE – *root mean square error*) pela seguinte fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_{p,t} - x_{m,t})^2}{n}} \quad (4.1)$$

onde o parâmetro $x_{p,t}$ representa a temperatura prevista no intervalo t , o parâmetro $x_{m,t}$ representa a temperatura medida no intervalo t e o parâmetro n o número total de valores considerados, ou seja, 24 horas \times 7 dias da semana.

Por forma a facilitar a interpretação dos gráficos apresentados neste subcapítulo, a temperatura medida é sempre apresentada a vermelho tracejado e a melhor previsão, obtida do *software*, apresentada a verde claro.

Parâmetro 1:

Neste parâmetro foi comparada a temperatura do ar interior medida com a temperatura do ar interior prevista, sem e com a introdução dos horários de funcionamento registados. No primeiro cenário foram utilizados os horários de funcionamento definidos por defeito pelo *software* sendo estes para o sombreamento o *CH_Shad_100-0-100*, ou seja, operacional a 100% das 19h às 9h do dia seguinte e durante todo o fim de semana (dias 7 e 8 de junho) e inoperacional das 9h às 19h. Quanto aos sistemas AVAC, foi apenas considerado o sistema de arrefecimento, sendo este por defeito o modo *On*, ou seja, operacional a 100% durante toda a semana. Na segunda situação introduziram-se os horários reais de funcionamento, registados pelo Datalogger e apresentados no Anexo B, Figura B.1 e Figura B.2.

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados obtidos, onde podemos ver a vermelho tracejado a curva correspondente à temperatura medida, a laranja a temperatura prevista para o primeiro cenário (utilizando os horários de funcionamento definidos por defeito pelo *DesignBuilder*) e a verde a temperatura prevista para o segundo cenário (com introdução dos horários de funcionamento registados).

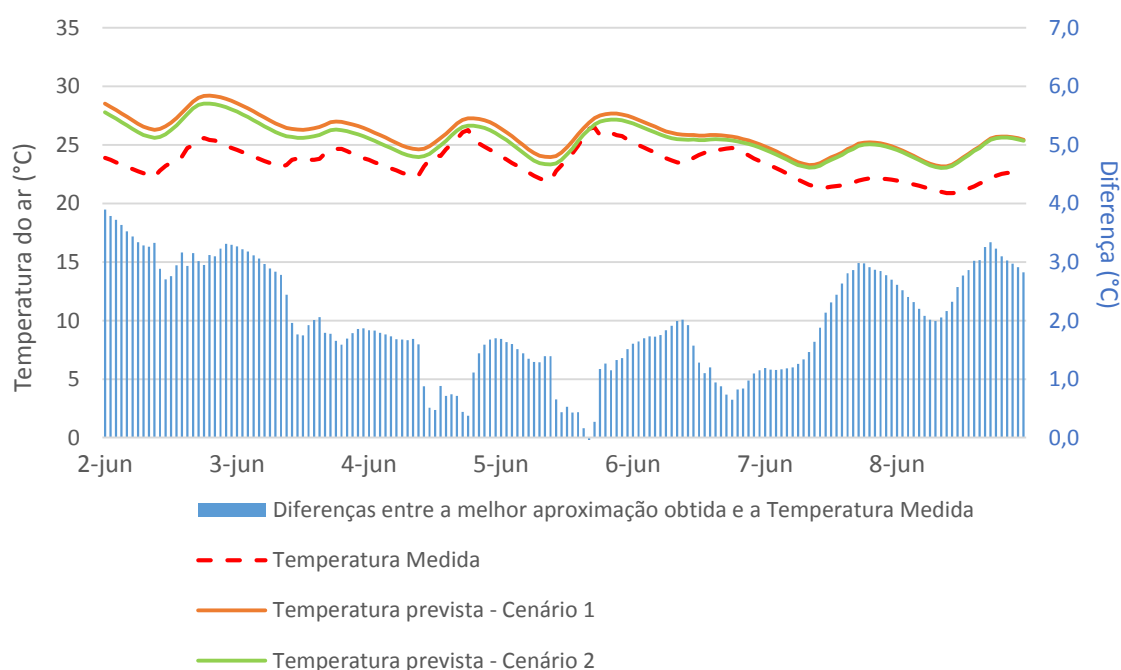


Figura 4.12 – Temperatura do ar interior registada e prevista pelo *software DesignBuilder*, no compartimento 3, para os dois cenários estudados no parâmetro 1.

Uma vez calculado o RMSE, para cada um dos cenários, tornou-se possível quantificar com mais exatidão qual destes estaria mais próximo da situação real medida. Tendo obtido um erro

de 2,64 °C para o cenário 1 e, tal como esperado, um erro inferior quando introduzidos os horários de funcionamento registados, sendo este de 2,19 °C. Deste modo, concluiu-se que o cenário 2, ou seja, com a introdução dos horários de funcionamento reais, representa uma melhor aproximação à realidade.

Na Figura 4.12 é ainda possível observar, a cor azul, as diferenças entre a situação que leva a uma melhor aproximação da modelação ao real (cenário 2) e a temperatura medida, verificando uma maior diferença (3,9 °C) na primeira hora do dia 2 de junho.

Parâmetro 2:

No presente parâmetro foi estudada a importância da ventilação. Para tal, foram mantidas as condições da situação que melhor retrata a realidade do parâmetro anterior (cenário 2) e alteradas as taxas de renovação horária de ar (rph). Uma vez que a temperatura prevista no parâmetro anterior se encontrava acima da temperatura medida, foram utilizados os valores 0,0rph, 0,3rph e 0,6rph, de modo a conseguir diminuí-la, aproximando-a assim da temperatura medida. Para esta taxa de renovação assumiu-se um horário de funcionamento *ScheduleON*, isto é, operacional 24 horas por dia, durante toda a semana. Na Figura 4.13 são comparadas as temperaturas para as três situações, diferentes taxas de renovação de ar, com a temperatura medida no compartimento em estudo.

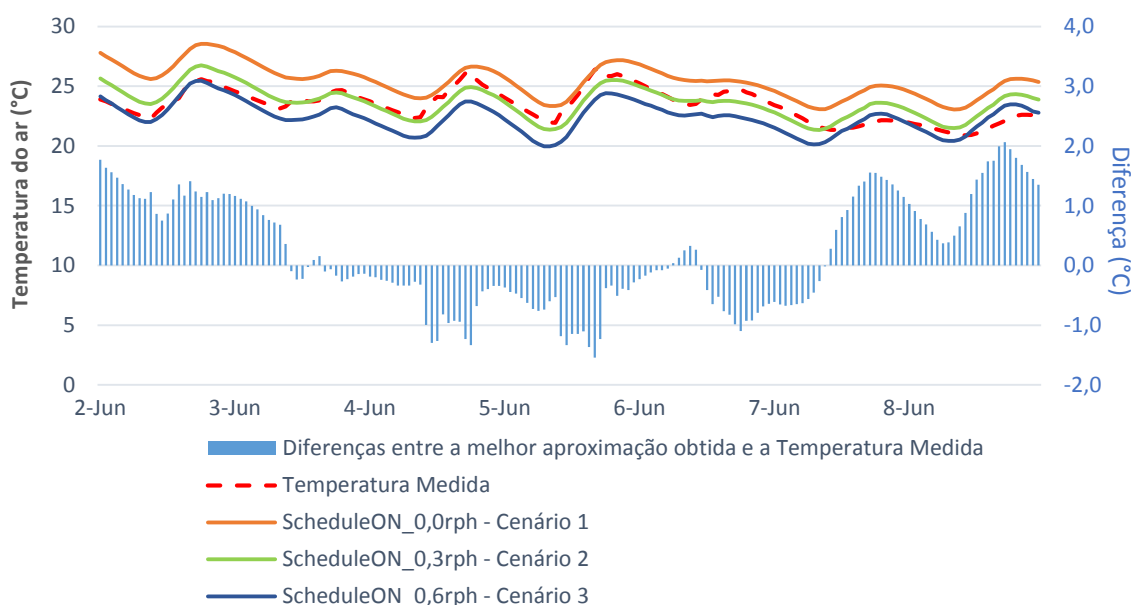


Figura 4.13 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo *software DesignBuilder*, no compartimento 3, para os três cenários estudados no parâmetro 2.

De acordo com o cálculo da RMSE, o cenário 2, com um erro de 0,94 °C, é a concordância mais aceitável entre as previsões do modelo para os diferentes cenários e as medições no edifício, e uma aproximação melhor quando comparada com o cenário 2 da Figura 4.12. No cenário 2 do presente parâmetro, a maior diferença entre a temperatura prevista pelo *software* e a temperatura medida é de 2,1 °C, no dia 8 de junho. O cenário 1 e o cenário 3 afastam-se dos valores medidos por 2,19 °C e 1,43 °C, respetivamente.

Da análise da Figura 4.13 é possível verificar que, tal como era previsto, a temperatura do compartimento diminui com o aumento da taxa de renovação de ar por hora.

Parâmetro 3:

Neste terceiro parâmetro foi verificada a influência dos dispositivos de sombreamento utilizados no edifício em estudo, lona de opacidade média, através da análise da temperatura interior no compartimento 3. Para tal, foram mantidas as características da melhor aproximação do parâmetro 2 (0,3 rph e os horários de funcionamento registados do sistema AVAC) e alterados os horários de funcionamento do sombreamento, criando dois cenários distintos. O primeiro onde o sombreamento estaria 24 horas ativo a 100% (sombreamento *ON*), durante toda a semana e o segundo onde o sombreamento estaria inativo (sombreamento *OFF*). Na Figura 4.14 é possível observar as diferenças entre a temperatura medida e a temperatura prevista na situação de sombreamento *ON* e sombreamento *OFF*, no compartimento 3.

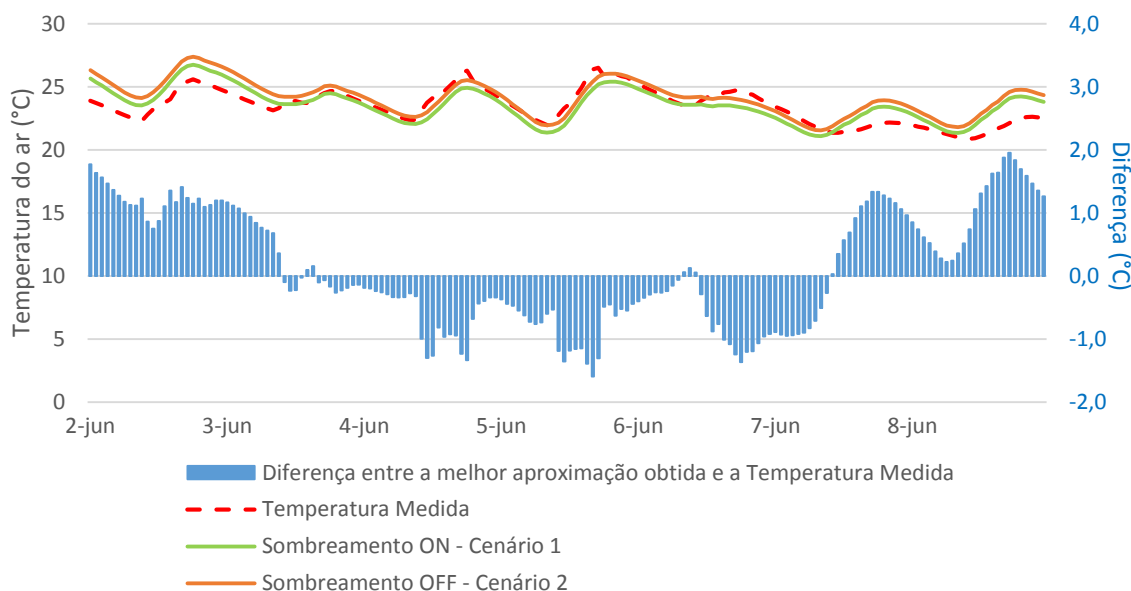


Figura 4.14 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo *software DesignBuilder*, no compartimento 3, para os dois cenários estudados no parâmetro 3.

Efetuada o cálculo da RMSE para os diferentes cenários, concluiu-se que a melhor aproximação à situação real seria sob as condições do cenário 1, onde se obteve um erro de 0,94 °C e uma diferença máxima entre a temperatura prevista e a temperatura real de 2 °C. Para o cenário 2 foi obtido um erro de 1,15 °C.

Através da análise da figura é possível observar que, contrariamente ao esperado, a ativação dos dispositivos de sombreamento não tem grande influência na temperatura interior. Tal acontecimento pode dever-se ao facto do dispositivo de sombreamento utilizado no edifício ser de opacidade reduzida.

Na tentativa de obter o resultado esperado, isto é, encontrar um dispositivo de sombreamento onde a sua ativação tenha maior influência na temperatura interior, foi implementado no *software* um novo tipo de sombreamento. Neste, foram alteradas algumas das propriedades como a transmitância e a refletância, apresentadas no Quadro 4.5, de modo a criar um dispositivo mais opaco e com melhores resultados que o anterior.

Quadro 4.5 – Propriedades do novo dispositivo de sombreamento.

Tipo de dispositivo de sombreamento	Cor	Transmitância Solar Direta	Refletância Solar	Transmitância de Luz Visível	Refletância de Luz Visível
Lona	Escura	0,025	0,450	0,025	0,450

Na Figura 4.15 são apresentados os novos resultados obtidos, quando implementado um dispositivo de sombreamento mais opaco. Nesta é possível observar o desfasamento entre a temperatura medida e a temperatura prevista na situação de sombreamento *ON* e sombreamento *OFF*, no compartimento 3.

Comparativamente ao sombreamento anteriormente utilizado, este possui uma menor transmitância e uma maior refletância. Deste modo, vai permitir que a temperatura do ar interior seja diminuída, em vários graus, com a ativação deste. Tal conclusão é comprovada pela análise da figura apresentada em seguida, onde se vê que quando o dispositivo está inativo (sombreamento *OFF*) a temperatura no compartimento é mais elevada e as amplitudes térmicas são muito maiores. Quando o dispositivo de sombreamento é ativado, a temperatura diminui, bem como as amplitudes térmicas, aproximando-se da temperatura medida.

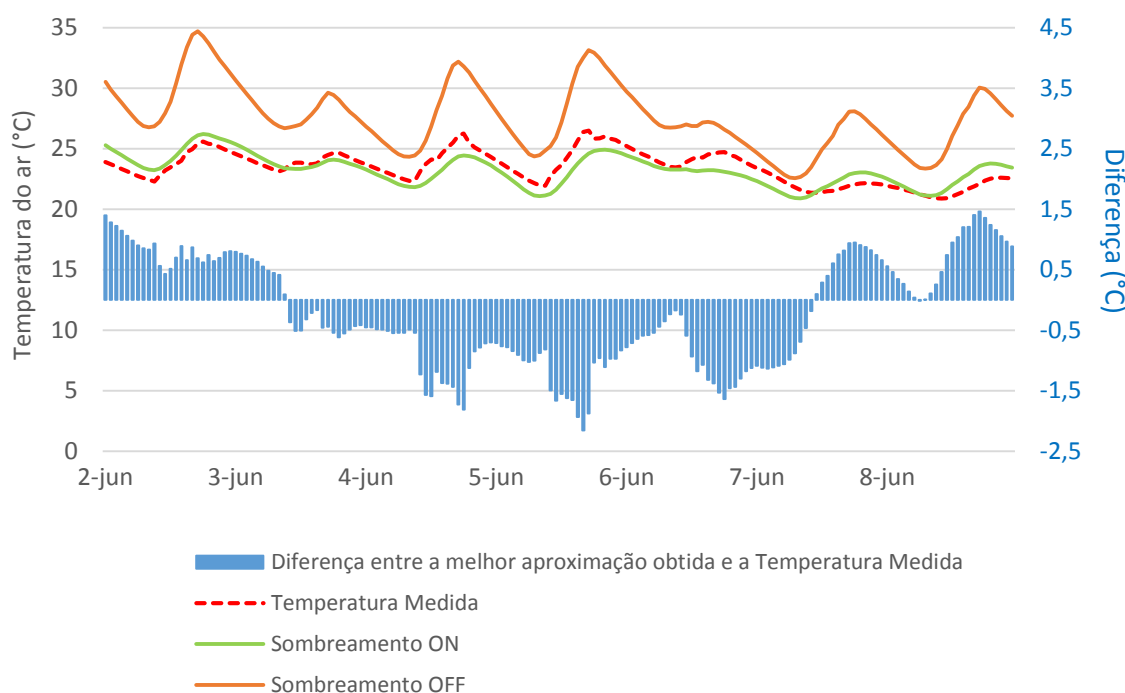


Figura 4.15 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo *software DesignBuilder*, no compartimento 3, com a introdução do novo dispositivo de sombreamento para os cenários *ON* e *OFF*.

Outra forma de melhorar o desempenho térmico de um edifício é a introdução de palas horizontais na fachada voltada a sul. Deste modo, foi feita uma simulação onde se introduziu uma pala horizontal, acima da janela do compartimento em estudo e se verificou a sua influência na temperatura interior, para os cenários sombreamento ON e sombreamento OFF. A pala introduzida tem o comprimento da janela, uma largura de 1m e uma espessura de 0,05m.

Na Figura 4.16 são apresentados os resultados desta nova simulação, onde é comparada a temperatura interior para os dois cenários do parâmetro 3 com e sem a introdução da pala horizontal.

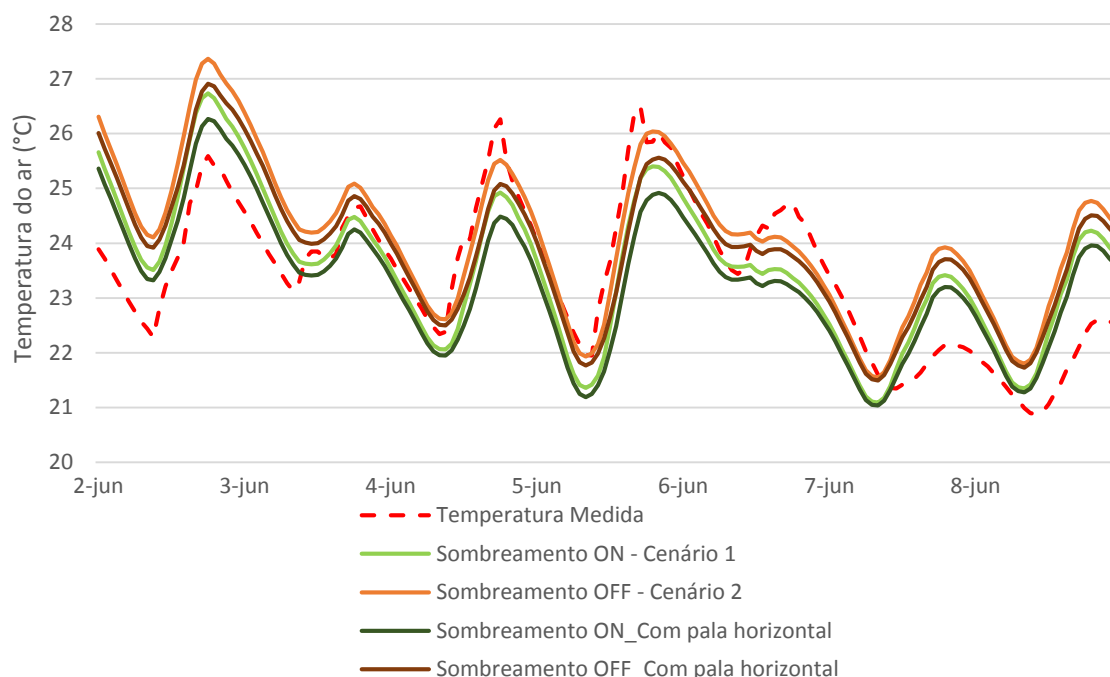


Figura 4.16 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo *software DesignBuilder*, no compartimento 3, com a introdução de uma pala horizontal, para os cenários *ON* e *OFF*.

Através da análise da figura é possível verificar que, tal como esperado, com a introdução de uma pala horizontal obter-se-ia uma temperatura mais baixa no compartimento em estudo. Deste modo, seria a forma mais eficaz de atingir a temperatura de conforto na semana em causa. Comparando o cenário 1 com a situação de sombreamento *OFF* com a introdução de pala horizontal, o cenário 1, ou seja, com os dispositivos de sombreamento ativos é mais favorável. Tal resultado deve-se ao facto dos dispositivos móveis serem mais eficientes que as palas, uma vez que causam sombreamento em toda a área de envidraçado. Como era previsto a situação menos favorável seria a correspondente ao cenário 2, dispositivos de sombreamento inativos.

Parâmetro 4:

No parâmetro 4, à semelhança do parâmetro 2, foi estudada a influência da ventilação. Contrariamente ao parâmetro 2, neste foram utilizadas como base as características do melhor cenário do parâmetro 3, ou seja, foi introduzido o horário de funcionamento real do sistema AVAC e utilizado o horário de funcionamento *On* para os dispositivos de sombreamento.

Na Figura 4.17 é feita uma representação gráfica dos três cenários em estudo neste parâmetro, da temperatura medida e ainda apresentadas as diferenças entre a temperatura prevista para o melhor cenário e a temperatura medida.

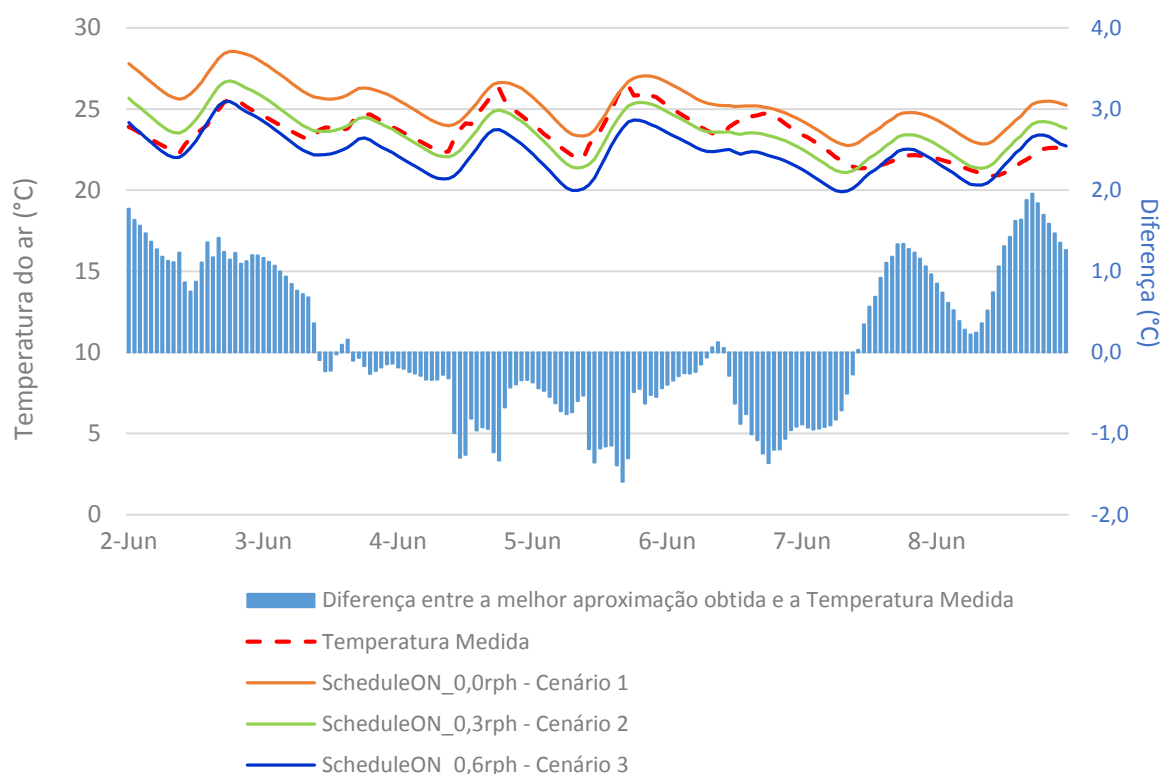


Figura 4.17 - Temperatura do ar interior registada e prevista pelo *software DesignBuilder*, no compartimento 3, para os três cenários estudados no parâmetro 4.

O cálculo da RMSE possibilitou concluir que as condições que permitem obter uma maior aproximação às medições reais são as consideradas no cenário 2, com um erro de 0,94 °C, e uma diferença máxima entre a temperatura prevista e a temperatura medida de 2 °C. Quanto aos cenários 1 e 3, estes afastam-se da temperatura medida por um erro de 2,10 °C e 1,49 °C, respetivamente.

Após feita a análise dos vários parâmetros de calibração, tornou-se possível determinar quais as condições, a utilizar no modelo realizado no *DesignBuilder*, que levariam a uma maior aproximação aos valores medidos no compartimento.

Na Figura 4.18 é apresentada a validação do modelo, onde estão representadas a temperatura exterior, a temperatura medida e a temperatura prevista, sendo que esta última foi obtida introduzindo no modelo as condições do cenário 2 do parâmetro 2. Isto é, os horários de funcionamento reais, quer dos dispositivos de sombreamento, quer do sistema AVAC e uma taxa de renovação horária de 0,3 rph.

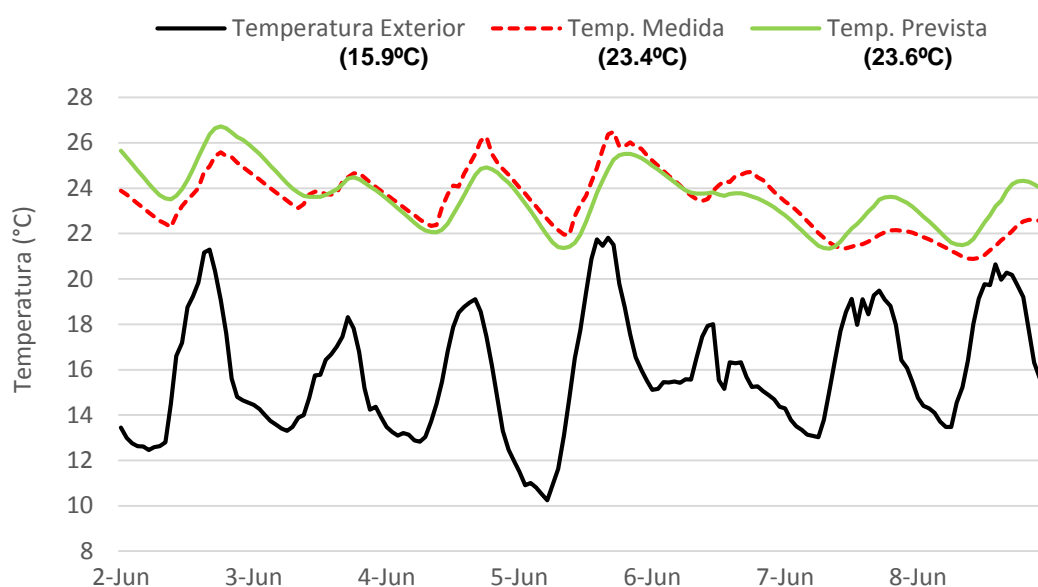


Figura 4.18 - Temperatura do ar ambiente registada no compartimento 3, na semana de 2 a 8 de junho de 2014, e temperatura prevista pelo *software DesignBuilder* – Validação do modelo.

Da análise da figura anteriormente apresentada é possível observar que a previsão realizada através do modelo segue a mesma tendência que os resultados obtidos das medições *in situ*, afastando-se destes por uma diferença de 0,2 °C, relativamente à temperatura média.

Apesar de existir um maior desfasamento entre as duas curvas entre os dias 2 e 3 de junho e 7 e 8 de junho, o modelo conseguiu traduzir de um modo geral previsões próximas das medições, com uma RMSE satisfatória de 0,94 °C, o que indica que o modelo está calibrado para este compartimento.

Tendo sido analisados os parâmetros registados no interior e no exterior do edifício para as semanas típicas de verão e de inverno no subcapítulo 4.3, tornou-se interessante fazer um estudo na mesma base que o anterior para as referidas semanas.

Deste novo estudo resultou que a solução mais próxima do real para a semana típica de verão, obteve-se quando feitas as seguintes considerações:

- ✓ introdução do horário de funcionamento real dos dispositivos de sombreamento;
- ✓ introdução do horário de funcionamento real do sistema AVAC;
- ✓ taxa de renovação de ar: 0,6rph,
- ✓ potência de refrigeração: 0,1kW.

Na Figura 4.19 é possível observar-se a representação da melhor solução obtida para a semana típica de verão, ou seja, de 14 a 20 de agosto, bem como a temperatura exterior nessa semana.

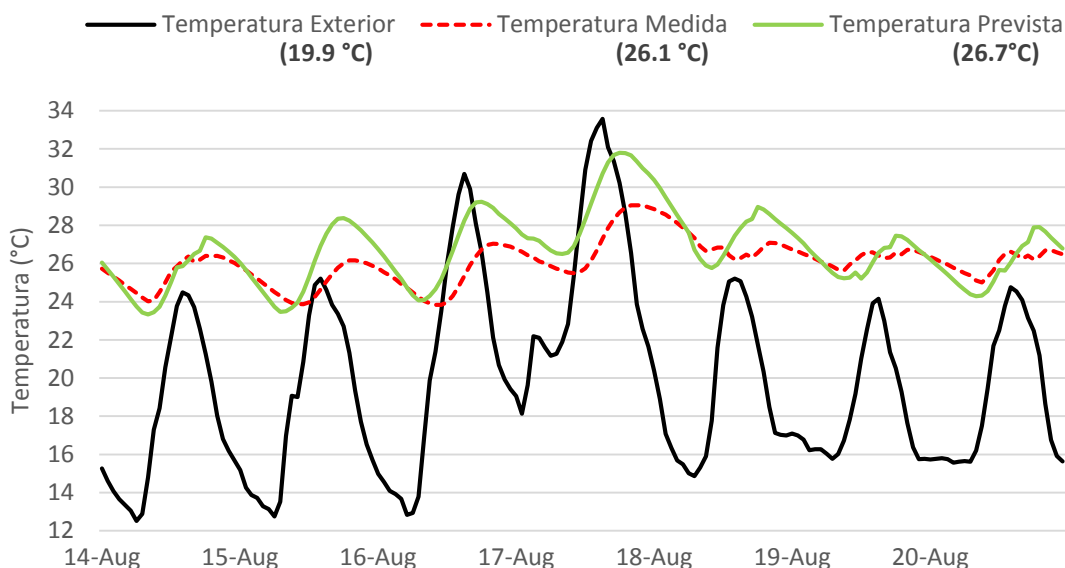


Figura 4.19 – Temperatura do ar no interior do compartimento 3, na semana típica de verão

Quanto à temperatura registada no interior do compartimento 3, esta está de acordo com o registo feito para a temperatura exterior, ou seja, quando a temperatura no exterior aumenta, a temperatura no interior do compartimento também aumenta, mas de uma forma menos acentuada. Quanto à temperatura prevista através do *software*, esta segue a mesma tendência da temperatura medida no compartimento em estudo, apresentando uma RMSE de 0,94 °C.

Relativamente ao estudo anterior, o valor referente à taxa de renovação de ar aumentou de 0,3 rph para 0,6rph. Tal resultado já era esperado pois para além da renovação de ar ser um parâmetro muito variável ao longo do tempo, foram comparadas duas semanas distintas. Sendo esta última a semana representativa do verão apresenta temperaturas mais elevadas que a semana de 2 a 8 de junho, o que justifica que para manter a temperatura de conforto no interior do edifício tenha havido uma maior ventilação.

Feita a mesma análise paramétrica para a semana típica de inverno, concluiu-se que a melhor aproximação aos dados reais obter-se-ia implementando as seguintes considerações no modelo:

- ✓ introdução do horário de funcionamento real dos dispositivos de sombreamento;
- ✓ introdução do horário de funcionamento real do sistema AVAC;
- ✓ taxa de renovação de ar 0,0rph.

Na Figura 4.20 é possível observar-se a representação da melhor solução obtida para a semana típica de inverno, bem como a temperatura exterior nessa semana.

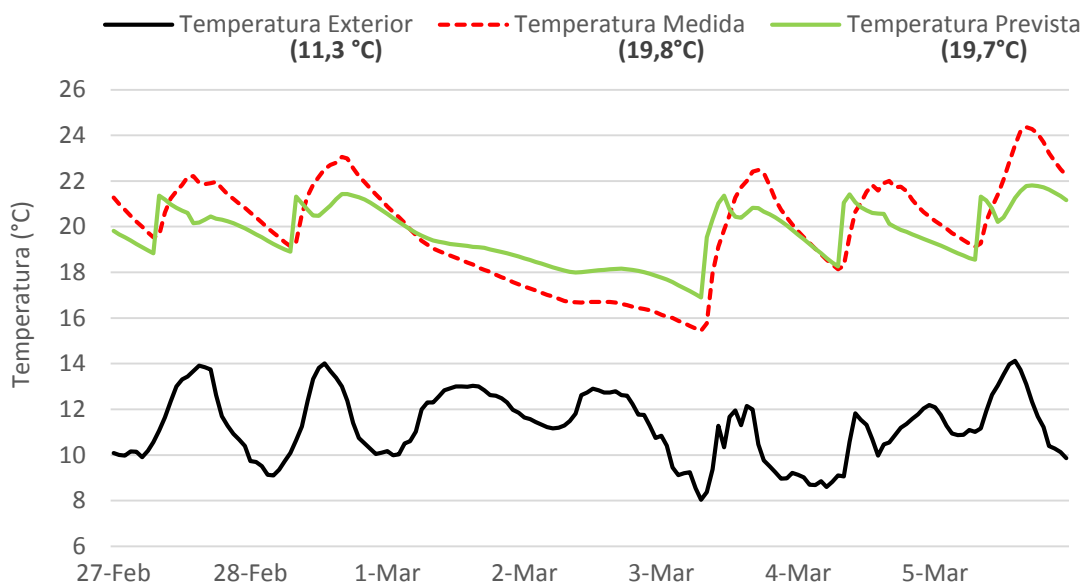


Figura 4.20 – Temperatura do ar no interior do compartimento 3, na semana típica de inverno

Fazendo uma análise à figura anterior pode concluir-se que tal como para a semana típica de verão, para a semana típica de inverno também foi possível obter uma boa aproximação entre a temperatura prevista e a temperatura medida no compartimento em estudo. O erro calculado para esta situação foi de 1,3 °C.

Como o esperado, a situação que melhor retrata a realidade ocorre quando são introduzidos no *DesignBuilder* o horário de funcionamento real, quer dos dispositivos de sombreamento quer do sistema AVAC. Nesta análise era também esperado que a taxa de renovação de ar fosse inferior à utilizada na semana típica de verão, pois quanto maior a ventilação menor a temperatura no interior, o que vai contra ao objetivo pretendido na estação de aquecimento, de um modo geral. Desta forma a taxa de renovação de ar utilizada de modo a aproximar a temperatura prevista pelo modelo à temperatura medida é de 0,0 rph, embora na realidade exista sempre alguma renovação de ar, nem que seja através de infiltrações.

Feitas as várias análises para o compartimento 3, chegou-se à conclusão que seria interessante fazer o mesmo estudo para outra divisão do edifício, neste caso uma do rés do chão uma vez que as temperaturas registadas são diferentes de um andar para o outro.

Deste modo, foi feita a calibração do modelo para a sala de reuniões, de forma análoga à feita para o compartimento 3. Desta, resultou que a melhor aproximação à realidade era conseguida inserindo as seguintes características no modelo:

- ✓ introdução do horário de funcionamento real dos dispositivos de sombreamento (Anexo B, Figura B.3);
- ✓ introdução do horário de funcionamento *CH Schedule 9h – 19h Mon – Fri* para sistema AVAC;
- ✓ taxa de renovação de ar 1,4rph.

Na Figura 4.21 é apresentada essa nova validação, onde se pode observar a temperatura exterior, a temperatura medida e a temperatura prevista pelo *software*.

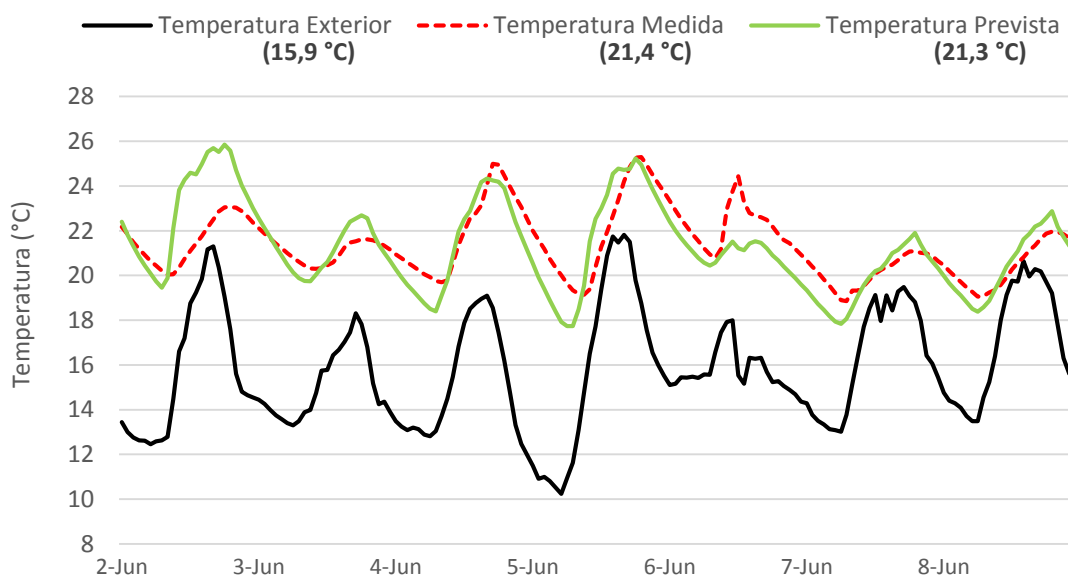


Figura 4.21 - Temperatura do ar ambiente registada na sala de reuniões, na semana de 2 a 8 de junho de 2014, e temperatura prevista pelo *software DesignBuilder* – Validação do modelo.

Analisando a figura é possível observar-se que tal como para o compartimento 3, também é possível obter uma boa aproximação para este novo compartimento em estudo. Comparativamente ao compartimento 3, nesta nova validação o erro foi maior sendo este de 1,2 °C.

Contrariamente ao esperado, o melhor resultado (menor erro) foi obtido apenas com a introdução do horário de funcionamento registado dos dispositivos de sombreamento. Quanto ao sistema AVAC, foi introduzido para este um horário de funcionamento das 9h às 19h durante

os dias da semana, estando inoperacional aos fins de semana. Tal resultado poderá dever-se ao facto de apesar do registo do horário de funcionamento do sistema AVAC mostrar que este esteve inoperacional durante a semana de 2 a 8 de junho (Anexo B, Figura B.4), este pode ter estado ligado mas não ter sido registado. Isto é, o registo apenas é feito quando o sistema AVAC é controlado pelo sistema de domótica, se alguém ligar ou desligar o ar condicionado manualmente não haverá registo dessa informação. Daí a possibilidade de os dados registados nessa semana estarem incorretos e o horário de funcionamento das 9h às 19h ser mais próximo do que realmente poderá ter sucedido nesta semana.

Quanto à taxa de renovação de ar, o valor para a sala de reuniões é superior ao valor utilizado para o compartimento 3. Sendo a sala de reuniões um compartimento do rés do chão, logo mais fresco que os compartimentos do 1º andar, e que contém dois grandes envidraçados para o exterior, está mais sujeita a infiltrações que os outros compartimentos, logo uma maior renovação de ar. Tal situação poderá estar na origem dos resultados obtidos, isto é, de ser necessária uma taxa de renovação de ar de 1,4rph para aproximar as previsões aos resultados medidos.

Comparativamente ao compartimento estudado anteriormente, a temperatura interior medida na sala de reuniões é inferior à temperatura medida nesse, tomando as suas médias os valores de 21,4 °C e 23,4 °C, respetivamente. Tais valores podem ser resultado de uma maior taxa de infiltrações na sala de reuniões e da maior proximidade ao solo, que leva a uma diminuição de temperatura, quando comparada com o compartimento 3.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente dissertação foi validado um modelo de previsão do comportamento térmico de uma moradia, desenvolvido no *software DesignBuilder*, que poderá ser posteriormente utilizado em diversos estudos relacionados com o edifício. A referida moradia é constituída por um sistema estrutural leve em aço, denominado por “*Lightweight Steel Framing - LSF*” e integra sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento. Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

A arquitetura portuguesa é desde há muitos anos uma arquitetura cuidada que se adapta ao clima e à região. Contudo, foi nos anos 80 que surgiu a primeira casa passiva em Portugal, tratando-se esta de uma habitação solar passiva onde foram inseridas soluções como paredes de Trombe e colunas de água para armazenamento. Interessa salientar que a construção do futuro deve acompanhar o crescimento da consciencialização ambiental e desenvolvimento sustentável, integrando também a qualidade, saúde e segurança. Deste modo, a tendência é para procurar construções cada vez mais sustentáveis e viáveis.

As estratégias passivas ou bioclimáticas têm vindo a ser introduzidas na construção com o intuito de melhorar o comportamento e eficiência energética dos edifícios. Estas, quando bem implementadas, facilitam o alcance das condições de conforto, diminuindo consequentemente os consumos energéticos associados. A ventilação e a iluminação/sombreamento são duas das técnicas passivas com maior importância, e com relevância para o presente estudo, daí terem sido abordadas com maior detalhe.

Quanto à ventilação, esta é de extrema importância pois permite que o ar exterior renove o ar no interior do edifício, diluindo e removendo os poluentes atmosféricos presentes, salvaguardando a qualidade do ar interior, evitando deste modo a inalação de poluentes em espaços fechados. Os Sistemas de Ventilação Geotérmica são uma técnica de ventilação que aproveitam a enorme inércia térmica do solo.

Quanto à radiação solar, esta assume um papel importante na estação de aquecimento na medida em que é uma fonte de calor e contribui para o aquecimento do edifício. Contudo, na estação de arrefecimento pode tornar-se indesejável. Deste modo, a utilização de dispositivos de sombreamento adequados é crucial. Associada à radiação solar está também a iluminação dos

edifícios, sendo a iluminação natural o modo mais eficiente, em termos energéticos e visuais, de iluminar um edifício. Em Portugal, por forma a ser maximizada a área do edifício com acesso a luz natural, e conseqüentemente diminuir a quantidade de energia gasta em luz artificial, e a maximizar os ganhos solares no inverno, a maior área de envidraçados deve ser colocada na fachada sul, visto ser o quadrante sul que recebe mais radiação solar.

Em relação ao caso de estudo, foram estudados os parâmetros monitorizados comparando a semana típica de verão com a semana típica de inverno. Numa segunda fase foi verificada a credibilidade do modelo, onde foram realizadas várias simulações de modo a assegurar que este estaria a obter resultados como o esperado. Posteriormente, foram comparados diferentes cenários com o intuito calibrar o modelo e obter a previsão que mais se aproxima dos valores medidos, tendo como parâmetro de comparação a temperatura interior no compartimento 3.

Primeiro foi estudada a influência da introdução do horário de funcionamento real dos dispositivos de sombreamento e do sistema AVAC, criando dois cenários distintos um com a introdução do horário de funcionamento real, e outro com um horário assumido por defeito. Desta primeira análise foi possível constatar que, tal como esperado, a previsão que mais se aproxima das medições *in situ* é conseguida com a introdução dos horários de funcionamento real.

O segundo parâmetro estudado foi a ventilação, neste foram mantidas as condições da situação que melhor retrata a realidade do parâmetro anterior, ou seja, com a introdução dos horários de funcionamento reais. Desta segunda análise foi possível confirmar que a temperatura interior diminui com o aumento da taxa de renovação horária de ar, e ainda que a concordância mais aceitável entre as previsões do modelo e as medições no edifício era obtida quando introduzida uma taxa de renovação de ar de 0,3rph.

No terceiro parâmetro foi verificada a influência dos dispositivos de sombreamento utilizados no edifício em estudo, criando um cenário onde os dispositivos estariam ativos a 100% e outro onde estariam inativos. Nesta terceira análise, contrariamente ao esperado, concluiu-se que a ativação dos dispositivos de sombreamento não tem grande contribuição na temperatura interior. Tal resultado pode dever-se ao facto do dispositivo utilizado no edifício ter reduzida opacidade. De modo a melhorar o desempenho térmico e o conforto do edifício em estudo, deveria optar-se por outros dispositivos de sombreamento de maior opacidade, mas no entanto a iluminação natural seria reduzida. Outro modo de melhorar o desempenho seria a introdução de palas horizontais no edifício.

No quarto parâmetro, à semelhança do segundo parâmetro, foi estudada a influência da ventilação. Contrariamente ao parâmetro 2, foi utilizado como base o modelo com a introdução

do horário de funcionamento real do sistema AVAC e um horário de funcionamento *On*, operacional a 100% durante 24 horas, para os dispositivos de sombreamento. Neste, concluiu-se que tal como no parâmetro 2, a taxa de renovação de ar de 0,3rph era a que levaria a uma melhor aproximação aos resultados medidos.

Feita a análise dos vários parâmetros de calibração, tornou-se possível constatar que as condições, a utilizar no modelo realizado no *DesignBuilder*, que levariam a uma maior aproximação aos dados registados no compartimento eram as implementadas no cenário 2, do parâmetro 2. Com a introdução do horário de funcionamento real do sistema AVAC e dos dispositivos de sombreamento, e uma taxa de renovação horária de ar de 0,3rph, foi possível validar o modelo com um erro de 0,94°C.

Posteriormente, o modelo foi também validado para um compartimento situado no rés do chão, a sala de reuniões, sendo este um andar com temperaturas inferiores comparativamente às registadas no 1º andar. Nesta nova validação foi feito um estudo idêntico ao anterior, onde se constatou que, contrariamente ao esperado, o cenário que mais aproximava a temperatura prevista à temperatura medida era quando introduzido um horário de funcionamento para o sistema AVAC das 9h às 19h. Tal resultado pode dever-se ao facto do registo apenas ser feito quando o sistema AVAC é controlado pelo sistema de domótica, ou seja, quando alguém liga ou desliga o sistema de ar condicionado manualmente não há registo dessa informação, daí o horário de funcionamento registado nessa semana para esse compartimento tomar o valor 0, ou seja, desligado. Concluiu-se também que a taxa de renovação de ar a introduzir no modelo que permitia uma maior aproximação entre a temperatura prevista e a medida era de 1,4rph. Tal resultado deve-se ao facto desta nova divisão em estudo conter dois grandes envidraçados, o que proporcionada maiores infiltrações/renovações de ar.

Em virtude dos resultados obtidos na presente dissertação, conclui-se que o modelo de previsão construído através do *DesignBuilder* é um modelo válido. Deste modo, pode ser utilizado em estudos futuros relacionados com o tema.

No seguimento desta dissertação, seria interessante elaborar um estudo paramétrico *in situ*, e posteriormente fazer a sua simulação no *DesignBuilder*. Deste modo, seria possível quantificar a relevância de alguns parâmetros como a ventilação natural e o sombreamento, ou até mesmo sugerir diversas alterações no edifício de modo a torná-lo energeticamente mais favorável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENE@ (2015). <http://www.adene.pt/legislacao/decreto-lei-no-1182013-0>. Decreto-Lei n.º 118/2013. (Acedido a junho de 2015)
- Ascenso, R. (2011a). “O futuro já chegou”. Climatização - Edifícios e Energia, Janeiro/ Fevereiro, pp. 6-13.
- Ascenso, R. (2011b). “Passivhaus - Este método está muito bem sistematizado”. Climatização – Edifícios e Energia, Setembro/ Outubro, pp. 26 – 32.
- Barreto Cachim, P. (2014). “Construções em madeira – a madeira como material de construção”. Porto, Portugal.
- BDMDialog@ (2012). <http://www.bdmdialog.com/?p=450>. Green building - The invention of the roofpond system. (Acedido a abril de 2015)
- BP @ (2014). http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/Energy-Outlook/Energy_Outlook_2035_booklet.pdf. British Petroleum, Portugal. (Acedido a março 2015)
- Churchfield Home Services@ (2015) <http://www.churchfieldhomeservices.ie/pdfs/CFCGE-PassiveHouse.pdf>. Grants & Incentives – Energy Efficiency Incentive. (Acedido a abril de 2015)
- Comissão Europeia (2010). “DIRECTIVA 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)”, Jornal Oficial das Comunidades Europeias.
- Cvc Direct (2015). <http://www.cvcdirect.co.uk/geothermal-heat-exchanger.html>. Geothermal Heat Exchange Ventilation. (Acedido a maio 2015)
- Ecoforest@ (2015). <http://ecoforest.es/portugues/productos/geotermia/descripcion-geotermia.php?cur=330>. Geotermia- Porquê pagar por algo que a natureza lhe dá? (Acedido a abril 2015)

-
- Environmental Protection Agency@ (2015). <http://www.epa.gov/region1/communities/indoorair.html>. Questions About Your Community: Indoor Air. (Acedido a maio 2015)
- ESTÉCONFORTO@ (2015). <http://www.esteconforto.com/energiasolar.htm>. Energia Solar. (Acedido a abril 2015)
- Expresso@ (2009). <http://expresso.sapo.pt/grafico-animado-casas-tradicionais-portuguesas=f501518>. Multimédia – Infografia (Acedido a abril de 2015)
- Ferreira, M. (2004). “Caudais de Ventilação Recomendados para Edifícios Residenciais”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Futureng@ (2011). <http://www.futureng.pt/2011-01-29-diario-de-noticias>. Actividades da Futureng - Divulgar o LSF. (Acedido a abril de 2015)
- Futureng@ (2013). <http://www.futureng.pt/construcao-em-altura>. Light Steel Framing – Engenharia e Projecto. (Acedido a março de 2015)
- Ginja, J. et al (2012). “Qualidade do ar interior nas habitações Portuguesas”. Congresso de Inovação na Construção Sustentável. Aveiro, Portugal.
- Gonçalves, H. e Graça, J. M. (2004). “Conceitos Bioclimáticos para edifícios em Portugal”. Departamento de energias renováveis – INETI. Lisboa, Portugal.
- Homegrid@ (2015). <http://homegrid.pt/>. Projetos. (Acedido a abril 2015)
- INE, I.P./DGEG (2011). “Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010”. Lisboa, Portugal.
- INETI (2006). “Edifício SOLAR XXI, Um edifício energeticamente eficiente em Portugal”. Lisboa, Portugal.
- Instruel@ (2015). <http://www.instruel.pt/index1.html>. Ventilação Mecânica. (Acedido a maio 2015)
- Isolani, P. (2008). “Eficiência energética nos edifícios residenciais”. Energy Efficiency. Lisboa, Portugal.
- Kibert, C. J. (2013). “Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery”. Hoboken, New Jersey.
- Luis, A. M. (2011). “Light Steel Framing – um percurso”. Nasce da prática e da teoria, Vol. 1, pp. 18-23.

- Matos, J. et al (2010). “Qualidade do Ar em Espaços Interiores – Um Guia Técnico”. Agência Portuguesa do Ambiente. Amadora, Portugal.
- Mendonça, P. (2005). “Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães.
- Monteiro, A. (2011). “A Arquitectura Bioclimática – Experiência e Aplicação em Portugal”. Tese de Mestrado, Departamento de Arquitectura da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Oliveira, E. V. e Galhano, F. (2003), “Arquitectura Tradicional Portuguesa”. Lisboa, Portugal.
- Online24@ (2013). <http://www.online24.pt/vantagens-e-desvantagens-das-casas-de-madeira/>. Vantagens e Desvantagens das Casas de Madeira. (Acedido a março 2015)
- Passiv@ (2015). http://www.passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm. Passive House requirements. (Acedido a abril 2015)
- Passive-On Project (2007a). “Na direcção de casas passivas – Mecanismos de apoio ao desenvolvimento do mercado de casas passivas”. European Commission under the Intelligent Energy – Europe Programme.
- Passive-On Project (2007b). “A norma Passivhaus em climas quentes da Europa: Directrizes de projecto para casas confortáveis de baixo consumo energético, Parte 1: Revisão de casas confortáveis de baixo consumo energético”. European Commision under the Intelligent Energy – Europe Programme.
- Passive-On Project (2007c). “A descrição longa do Passive-On”. European Commission under the Intelligent Energy – Europe Programme.
- RCCTE (1990). Decreto-Lei n.º 40/90, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Diário da República nº31 – I Série, 6 de Fevereiro de 1990.
- Rita, J. S. (2008). “Contribuição das Argamassas para a Eficiência Energética dos Edifícios”. Seminário: Eficiência energética e arquitectura solar passiva - exemplos de aplicação. Universidade do Minho, Guimarães
- RSECE (1998). Decreto-Lei n.º 118/98, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, Diária da República nº 105 – I Série – A, 7 de Maio de 1998).
-

- Sacht, H. M. (2013). “Módulos de Fachada para Reabilitação Eco-Eficiente de Edifícios”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães.
- Santos, P. et al (2011). “Parametric analysis of the thermal performance of light steel residential buildings in Csb climatic regions”. *Journal of Building Physics*, Vol. 35, Issue 1, pp. 7-53.
- Silva, P. C. P. (2006). “Análise do comportamento térmico de construções não convencionais através de simulação em VisualDOE”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães.
- Sousa, M. (2014). “Análise do desempenho energético de sistemas de ventilação geotérmica”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Sustelo, J. (2008). “Domótica e Edifícios Inteligentes”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- The Worlds of David Darling @ (2015).
http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/AE_passive_solar_design.html#.
Encyclopedia of Alternative Energy - passive solar design. (Acedido a abril 2015)
- Thomsen, K. E. et al (2008). “European national strategies to move towards very low energy buildings”. Danish Building Research Institute, Aalborg University.

ANEXOS

ANEXO A – Parâmetros registados no exterior do edifício

ANEXO B – Horário de funcionamento registado

ANEXO A – Parâmetros registados no exterior do edifício

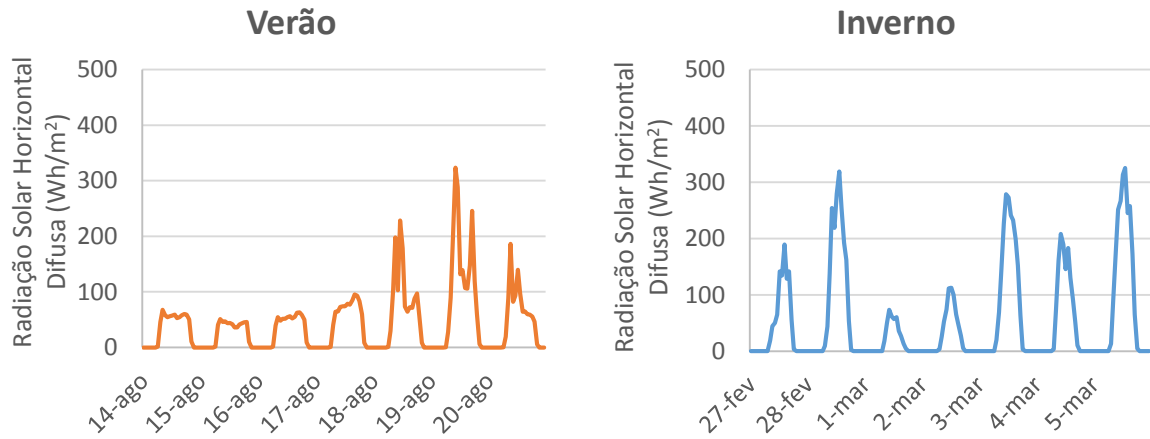


Figura A.1 - Variação horária da radiação solar horizontal difusa (Wh/m^2) na semana típica de verão (14 a 20 de agosto) e na semana típica de inverno (27 de fevereiro a 5 de março)

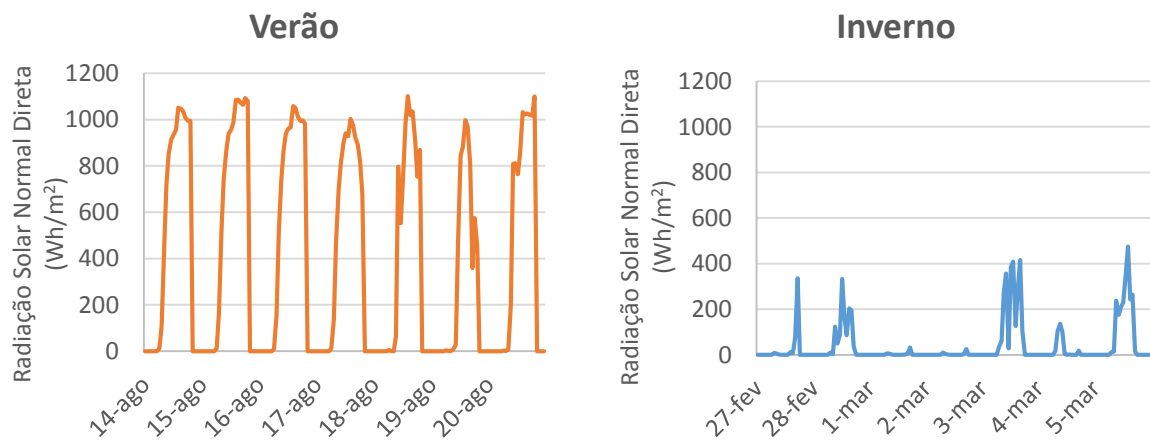


Figura A.2 - Variação horária da radiação solar normal direta (Wh/m^2), na semana típica de verão (14 a 20 de agosto) e na semana típica de inverno (27 de fevereiro a 5 de março)

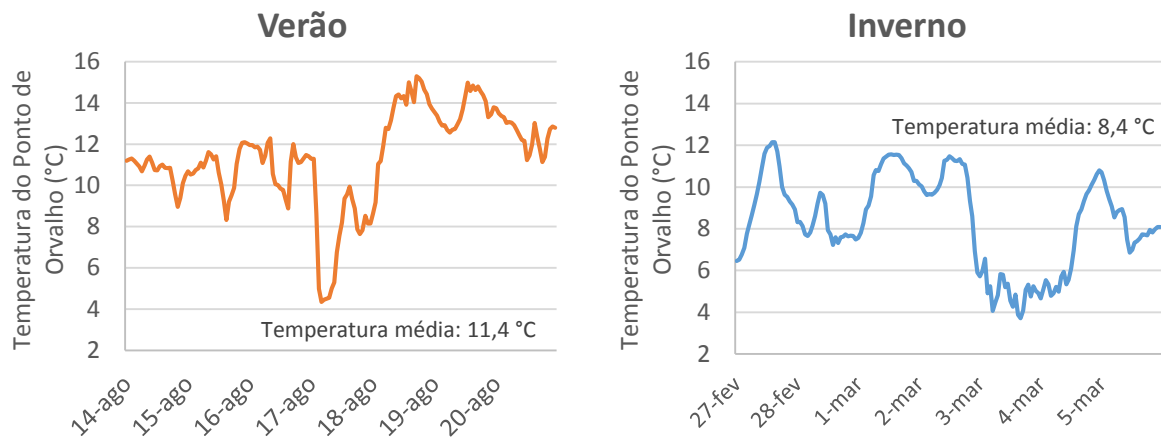


Figura A.3 - Variação horária da temperatura do ponto de orvalho (°C), na semana típica de verão (14 a 20 de agosto) e na semana típica de inverno (27 de fevereiro a 5 de março)

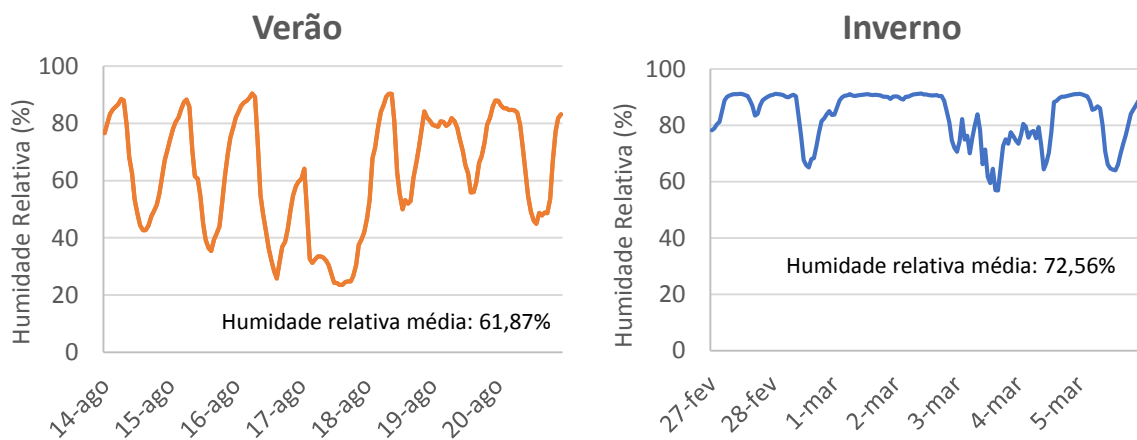


Figura A.4 - Variação horária da humidade relativa (%), na semana típica de verão (14 a 20 de agosto) e na semana típica de inverno (27 de fevereiro a 5 de março)

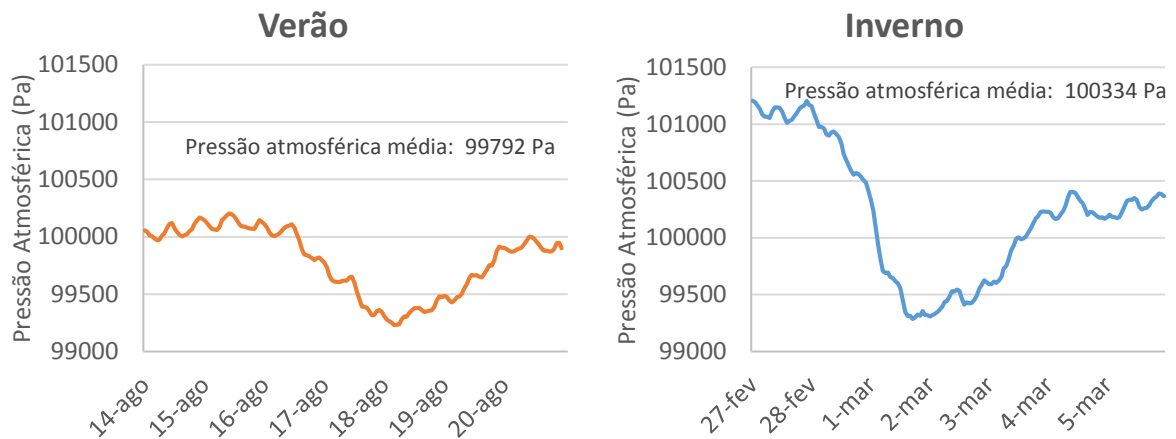
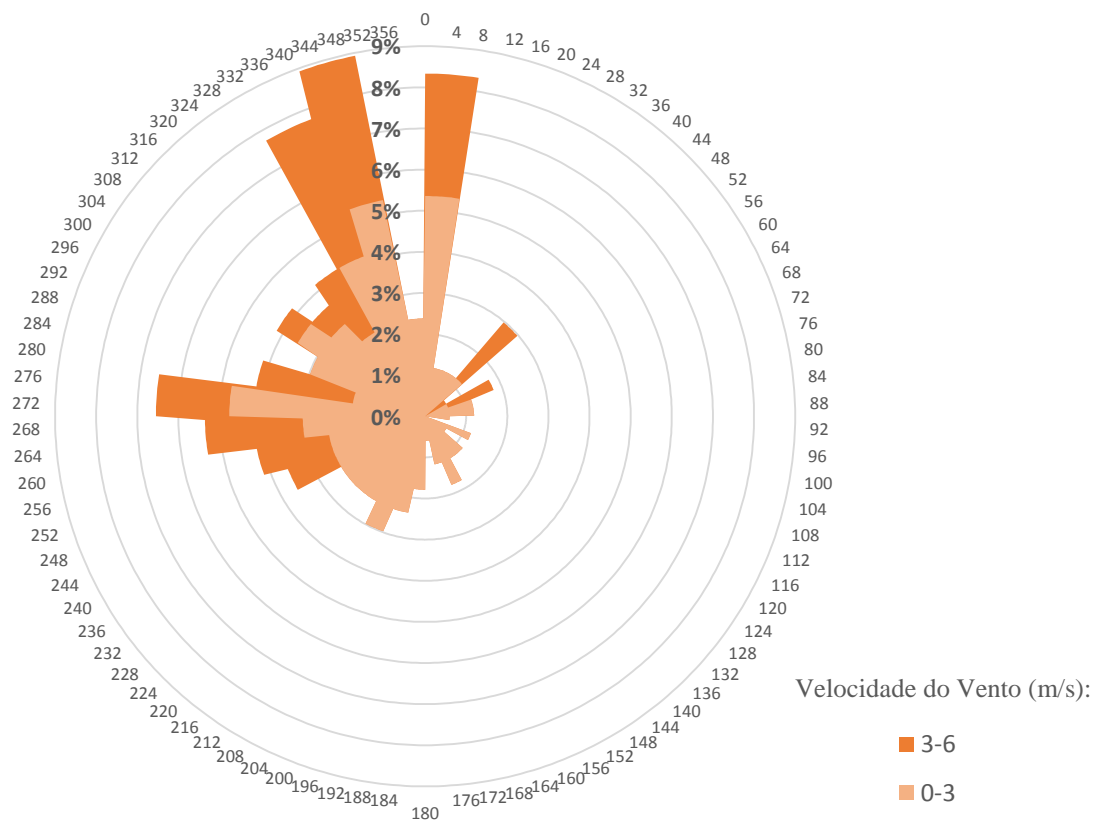
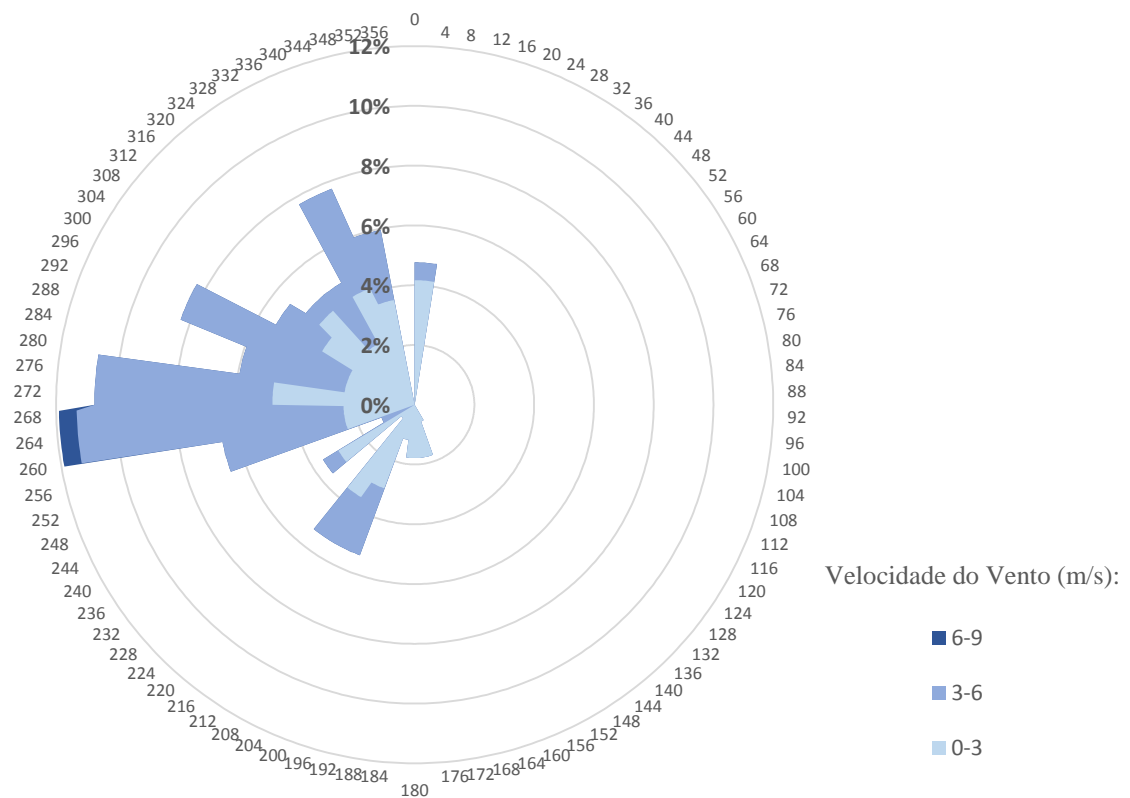


Figura A.5 - Variação horária da pressão atmosférica (Pa), na semana típica de verão (14 a 20 de agosto) e na semana típica de inverno (27 de fevereiro a 5 de março)

Na Figura A.6, referente à velocidade e direção do vento durante as semanas típicas, o eixo vertical indica a percentagem de tempo (em horas) com velocidade x e direção y . A direção é indicada, em graus, ao longo do perímetro do gráfico.



a)



b)

Figura A.6 - Variação horária da velocidade do vento (m/s) e da direção do vento (deg):
a) na semana típica de verão (14 a 20 de agosto);
b) na semana típica de inverno (27 de fevereiro a 5 de março).

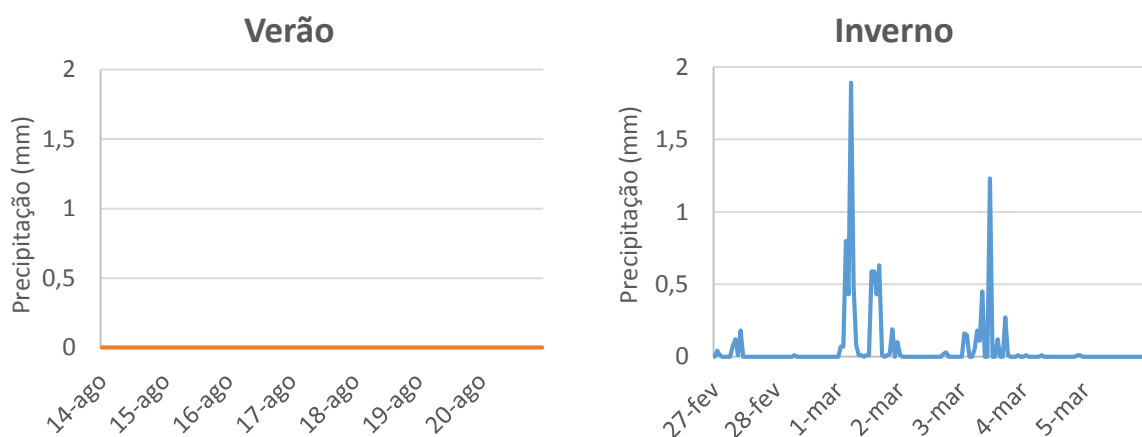


Figura A.7 - Variação horária da precipitação (mm), na semana típica de verão (14 a 20 de agosto) e na semana típica de inverno (27 de fevereiro a 5 de março)

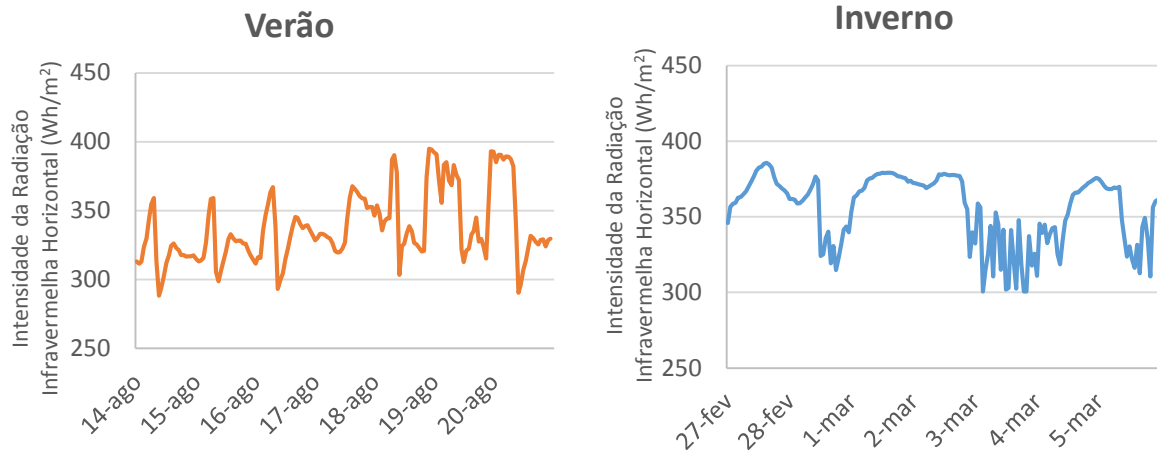


Figura A.8 - Variação horária da intensidade da radiação infravermelha horizontal (Wh/m^2), na semana típica de verão (14 a 20 de agosto) e na semana típica de inverno (27 de fevereiro a 5 de março)

ANEXO B – Horário de funcionamento registado

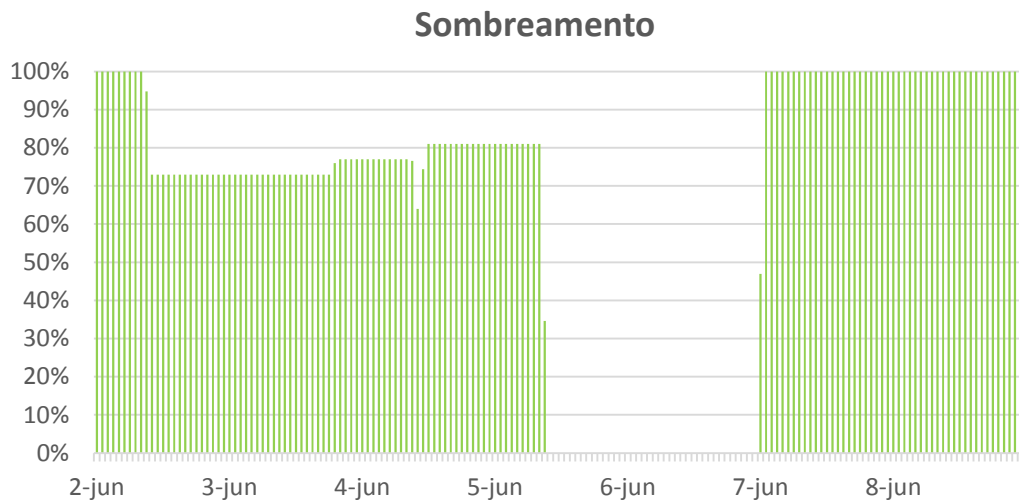


Figura B.1 – Horário de funcionamento registado dos dispositivos de sombreamento, no compartimento 3, na semana de 2 a 8 de junho.

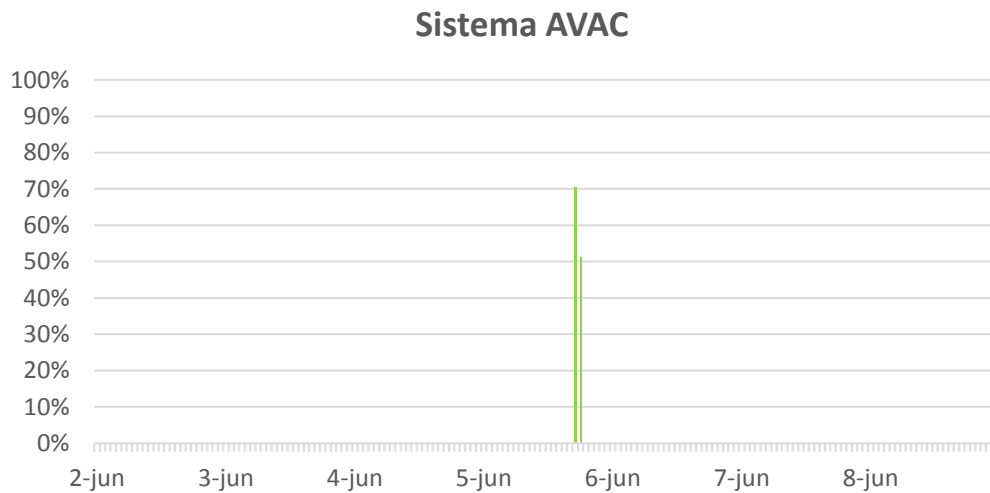


Figura B.2 – Horário de funcionamento registado do sistema AVAC, no compartimento 3, na semana de 2 a 8 de junho.

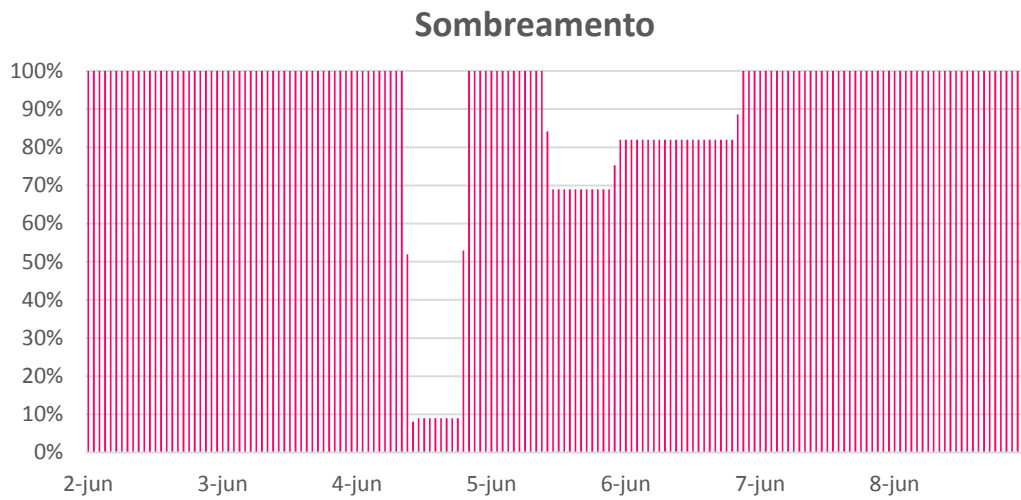


Figura B.3 - Horário de funcionamento registado dos dispositivos de sombreamento, na sala de reuniões, na semana de 2 a 8 de junho.

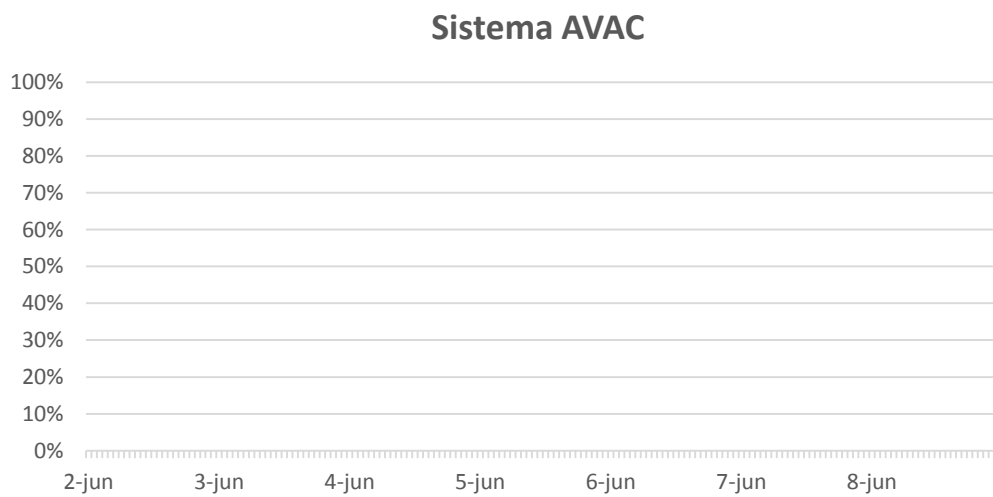


Figura B.4 - Horário de funcionamento registado do sistema AVAC, na sala de reuniões, na semana de 2 a 8 de junho.