



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

# **Sistemas Passivos de Aquecimento/Arrefecimento de Edifícios: Simulação do seu Desempenho em Função do Clima**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na  
Especialidade de Construções

Autor

**Mariana Costa Gama**

Orientador

**Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos  
(DEC-FCTUC)**

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, 2012**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Paulo Santos, orientador deste trabalho, pela disponibilidade e empenho que demonstrou e que foram fundamentais para a concretização desta dissertação.

## RESUMO

O âmbito desta dissertação de mestrado prende-se com os sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento, que podem ser aplicados em edifícios (residenciais, comerciais ou industriais) para aumentar o conforto térmico dos ocupantes, melhorando assim a eficiência energética dos mesmos. Os sistemas passivos permitem dar resposta às necessidades de aquecimento e arrefecimento de edifícios sem terem de recorrer à energia fóssil, que além de ser escassa, apresenta custos cada vez mais elevados, constituindo desta forma uma alternativa com vantagens de ordem ambiental e económica. Nesta dissertação pretende-se descrever o estado da arte relativamente a sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento de edifícios e proceder à simulação do desempenho de cada técnica passiva nos diferentes climas do continente europeu, bem como analisar a eficácia das mesmas ao longo das diferentes estações do ano. Os principais objetivos deste trabalho passam por determinar quais os sistemas passivos que potenciam maiores melhorias no conforto térmico dos edifícios em cada zona climática do continente em estudo, examinar quais as alturas do ano em que ocorrem aumentos mais elevados da percentagem de horas de conforto interno com a utilização de métodos passivos e apurar quais as zonas climáticas da Europa que podem beneficiar mais com a aplicação destes sistemas.

**Palavras-Chave:** Sistemas Passivos, Aquecimento/Arrefecimento, Conforto Térmico, Eficiência Energética em Edifícios, Simulação de Desempenho, Clima.

## **ABSTRACT**

The theme of this master thesis relates to heating and cooling passive systems, which can be applied to buildings (residential, commercial or industrial) to increase the thermal comfort of users, thereby improving the energy efficiency thereof. Passive systems allow the solution of the buildings heating and cooling needs, without resorting to fossil fuels, which apart from being scarce, has increasingly high costs, representing thus an alternative with environmental and economic advantages. This thesis aims to describe the state of the art of heating and cooling passive systems in buildings and simulate the performance of each passive technique in different climates of the European continent, as well as analyze their effectiveness throughout the different seasons of the year. The main objectives of this work are to determine which passive systems enhance greater improvements in thermal comfort of buildings in each climatic zone of the continent in study, examine in which time of the year occurs the higher increase of the percentage of hours of indoor comfort using passive methods and determine which climatic zones of Europe can benefit the most from the application of these systems.

**Keywords:** Passive Systems, Heating/Cooling, Thermal Comfort, Energy Efficiency in Buildings, Performance Simulation, Climate.

---

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento do Tema.....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.3	Organização da Dissertação.....	2
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE: SISTEMAS PASSIVOS DE AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO DE EDIFÍCIOS.....</b>	<b>3</b>
2.1	Estratégias Bioclimáticas.....	3
2.2	Sistemas Passivos de Arrefecimento.....	5
2.2.1	Arrefecimento pelo Solo.....	5
	Contacto Direto.....	6
	Contacto Indireto .....	7
2.2.2	Arrefecimento Evaporativo .....	9
	Arrefecimento Evaporativo Direto .....	10
	Arrefecimento Evaporativo Indireto.....	12
2.2.3	Arrefecimento Radiativo .....	13
2.2.4	Ventilação Natural para Arrefecimento.....	15
2.3	Sistemas Passivos de Aquecimento.....	16
	Aquecimento Solar Passivo .....	16
2.3.1	Ganhos Diretos .....	17
	Sombreamento .....	18
	Janelas de Tecnologias Avançadas .....	19
2.3.2	Ganhos Indiretos ou Desfasados.....	19
	Parede de Trombe.....	20
	Parede de Armazenamento .....	22
	Colunas de Água.....	22
	Armazenagem Térmica na Cobertura.....	23
2.3.3	Ganhos Separados ou Isolados .....	24
	Espaço Estufa .....	24
	Parede Solar.....	25
	Coletor a Ar .....	26
	Convecção por Termossifão .....	27
2.3.4	Painel Solar Térmico .....	29
2.4	Sistemas de Aquecimento/Arrefecimento Passivo .....	31
2.4.1	Utilização de PCM's.....	31

---

<b>3</b>	<b>SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS PASSIVOS EM FUNÇÃO DO CLIMA .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Classificação Climática Koppen-Geiger .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Zonas Climáticas em Estudo .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Caracterização Climática das Zonas em Estudo.....</b>	<b>38</b>
3.3.1	Temperatura Média.....	38
3.3.2	Graus-Dia de Aquecimento e de Arrefecimento .....	39
3.3.3	Radiação Solar Global .....	41
3.3.4	Humidade Relativa .....	41
<b>3.4</b>	<b>Autodesk Ecotect Analysis .....</b>	<b>42</b>
3.4.1	Weather Tool .....	42
<b>3.5</b>	<b>Simulação e Análise do Desempenho dos Sistemas Passivos .....</b>	<b>43</b>
3.5.1	Análise Anual .....	44
Aquecimento Solar Passivo .....		44
Ventilação Natural.....		45
Arrefecimento Evaporativo Direto .....		45
Arrefecimento Evaporativo Indireto.....		46
Efeito da Massa Térmica .....		47
Massa Exposta e Ventilação Noturna.....		47
Múltiplas Técnicas Passivas .....		48
3.5.2	Análise Mensal .....	51
Zona Csa.....		51
Zona Csb.....		52
Zona Cfb.....		54
Zona Dfb.....		55
Zona Dfc.....		56
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Trabalhos Futuros .....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXO A – ANÁLISE MENSAL DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS PASSIVOS.....</b>	<b>A-1</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Temperatura média mensal do ar e do solo a dois metros de profundidade, em Coimbra (Craveiro, 2011). .....	6
Figura 2.2 – Arrefecimento pelo solo: contacto direto: exemplo de habitação semienterrada (Pessoa, 2009). .....	7
Figura 2.3 - Arrefecimento pelo solo: contacto indireto (Effnergie@, 2012). .....	7
Figura 2.4 - Entradas de ar na Casa Solar: a) No exterior do edifício; b) No interior do edifício (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004). .....	8
Figura 2.5 – Arrefecimento evaporativo (Gonçalves e Graça, 2004). .....	9
Figura 2.6 – Pavilhão da Holanda na Expo 1992 de Sevilha: a) Vista exterior; b) Vista interior (Mendonça, 2005). .....	10
Figura 2.7 - Torre de ventilação de Badgeer (Pessoa, 2009). .....	11
Figura 2.8 - Combinação entre “Malkaf” e “ShukSheika” (Pessoa, 2009). .....	11
Figura 2.9 – “Roof spraying” (Piedade, 1983 apud Lobão, 2004). .....	12
Figura 2.10 – Arrefecimento radiativo (Gonçalves e Graça, 2004). .....	13
Figura 2.11 – Esquema do sistema Skytherm (Pessoa, 2009). .....	14
Figura 2.12 – Processo de arrefecimento radiativo com proteção da cobertura (LNEC, 1987). .....	14
Figura 2.13 – Ventilação natural (Gonçalves e Graça, 2004). .....	15
Figura 2.14 – Remoção do calor da massa térmica através da ventilação natural (adaptado de Projeto Casa Fresca@, 2012). .....	15
Figura 2.15 – Ganhos solares diretos (Gonçalves e Graça, 2004). .....	17
Figura 2.16 – Ganhos solares diretos em moradias (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004). .....	18
Figura 2.17 – Sombreamento de envidraçados com pala horizontal: a) Situação de inverno; b) Situação de verão (Proteste, 2008 apud Batista, 2008). .....	18
Figura 2.18 - Sombreamento através de árvore de folha caduca: a) Situação de inverno; b) Situação de verão (Lanham et al., 2004 apud Lobão, 2004). .....	19
Figura 2.19 – Esquema do funcionamento geral dos sistemas de ganhos solares indiretos (Gonçalves e Graça, 2004). .....	20
Figura 2.20 – Parede de Trombe na Casa Shaffer: a) Vista geral; b) Pormenor (Gonçalves e Graça, 2004). .....	20

---

Figura 2.21 – Esquema de funcionamento da parede de Trombe: a) No inverno; b) Na primavera e outono; c) No verão (Gonçalves e Graça, 2004).....	21
Figura 2.22 – Parede de armazenamento nas casas de Jade (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004).....	22
Figura 2.23 – Colunas de água na Casa Solar (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004). .....	23
Figura 2.24 – Processo de armazenagem térmica na cobertura (LNEC, 1987).....	24
Figura 2.25 - Esquema de funcionamento do espaço estufa (Gonçalves e Graça, 2004).....	25
Figura 2.26 – Moradia com estufa: a) Ativa no inverno; b) Desativada no verão (Pessoa, 2009).....	25
Figura 2.27 – Parede solar: a) Esquema de funcionamento (Solar Wall@, 2012); b) Aplicação em edifício comercial (Chicago Greenworks@, 2012).....	25
Figura 2.28 – Coletor a ar: a) Vista exterior; b) Vista interior (Gonçalves e Graça, 2004). ...	26
Figura 2.29 – Esquema de funcionamento do coletor a ar: a) No inverno; b) No verão (Gonçalves e Graça, 2004). .....	27
Figura 2.30 – Convecção por termossifão (FABUTE, 2003 apud Mendonça, 2005). .....	28
Figura 2.31 – Pannel solar térmico (adaptado de Roriz, 2009). .....	29
Figura 2.32 – Sistemas solares térmicos: a) Sistema direto; b) Sistema indireto (Roriz, 2009). .....	30
Figura 2.33 – Sistemas solares térmicos: a) Sistema passivo; b) Sistema ativo (Roriz, 2009).	30
Figura 2.34 - Exemplos de aplicação de PCM's: a) Em tetos falsos (DELTA-COOL 24@ apud Santos et al., 2012); b) Em lamelas interiores de janelas (Glauber-lamell AB@ apud Santos et al., 2012). .....	32
Figura 3.1 - Mapa mundial da classificação climática de Koppen-Geiger (adaptado de Kottek et al., 2006).....	36
Figura 3.2 - Classificação climática de Koppen-Geiger para a Europa (adaptado de Kottek et al., 2006).....	37
Figura 3.3 - Temperatura média mensal em cada região climática. ....	39
Figura 3.4 - Graus-dia de aquecimento anual para a temperatura de referência de 18°C em cada região climática. ....	40
Figura 3.5 - Graus-dia de arrefecimento anual para a temperatura de referência de 18°C em cada região climática. ....	40
Figura 3.6 - Radiação solar global média mensal em cada região climática. ....	41
Figura 3.7 - Humidade relativa média mensal em cada região climática. ....	42
Figura 3.8 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de técnicas de aquecimento solar passivo em cada região climática. ....	44

---

Figura 3.9 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de ventilação natural em cada região climática.....	45
Figura 3.10 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de técnicas de arrefecimento evaporativo direto em cada região climática. ....	46
Figura 3.11 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de técnicas de arrefecimento evaporativo indireto em cada região climática. ....	46
Figura 3.12 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de massa térmica em cada região climática. ....	47
Figura 3.13 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização da combinação entre massa exposta e ventilação noturna em cada região climática. ....	48
Figura 3.14 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização simultânea de múltiplas técnicas passivas em cada região climática. ....	49
Figura 3.15 – Acréscimo da percentagem de horas de conforto anual promovido pela utilização de técnicas passivas, em cada região climática.....	50
Figura 3.16 - Acréscimo da percentagem de horas de conforto mensal promovido pela utilização simultânea de múltiplas técnicas passivas em cada região climática.	58
Figura A.1 – Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Csa, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo .....	A-2
Figura A.2 – Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Csb, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo .....	A-3
Figura A.3 – Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Cfb, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo .....	A-4

Figura A.4 – Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Dfb, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo ..... A-5

Figura A.5 - Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Dfc, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo ..... A-6

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Estratégias bioclimáticas (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004). .....	4
Quadro 3.1 – Cidades consideradas na determinação dos dados climáticos de cada região climática. ....	38

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do Tema

O tema desta dissertação de mestrado foi escolhido não só com base na emergência global contemporânea de impor as questões da sustentabilidade ao mundo da construção, mas também por um interesse pessoal da autora neste mote. Este facto prende-se, além das preocupações ambientais e económicas inerentes ao tema da construção eco eficiente, com as ambições profissionais almeçadas após a carreira académica.

A necessidade do desenvolvimento científico e da implantação prática dos sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento, nos projetos e obras, surge da urgência em dar outro tipo de resposta à problemática do conforto higrotérmico no interior dos edifícios, melhorando a sua eficiência energética. De facto, temos vindo a assistir a uma crescente valorização do conforto térmico no interior dos espaços, que cada vez mais se devem adequar às suas funções e às diferentes atividades que nele decorrem. Por outro lado, enquanto civilização, não podemos continuar a explorar e consumir despreocupadamente as fontes de energia fósseis para garantir conforto, uma vez que este é um recurso finito. Além disto, os motivos económicos são também uma forte razão para optar pela aplicação dos sistemas passivos, uma vez que o preço dos recursos e energias fósseis é elevado e tende a aumentar.

Neste sentido, a pertinência dos sistemas passivos prende-se com três aspetos essenciais. O primeiro é que estes apenas utilizam fontes de energia renováveis, como o Sol e o vento. O segundo aspeto é que a sua utilização não polui e o terceiro é que a sua maioria não requer despesas elevadas de manutenção, sendo também por este motivo vantajosos do ponto de vista económico.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho baseiam-se numa primeira instância em abordar as várias técnicas passivas de aquecimento e arrefecimento existentes e aprofundar o conhecimento sobre cada uma delas. Numa segunda fase, procura-se averiguar a eficácia de cada sistema passivo em diferentes zonas climáticas do continente europeu, analisando também o modo como esta varia ao longo das diferentes estações do ano. Desta forma, pode determinar-se quais os

sistemas passivos mais adequados a cada tipo de clima europeu e quais as regiões climáticas mais propícias aos benefícios da sua utilização neste continente, tirando as devidas conclusões.

### **1.3 Organização da Dissertação**

Este trabalho é constituído por 4 capítulos.

No capítulo 1, explanam-se o enquadramento do tema, os objetivos e a organização da dissertação.

No capítulo 2, apresenta-se o estado da arte no domínio, fazendo-se uma revisão detalhada e ilustrada dos sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento existentes.

No capítulo 3, procede-se a uma simulação do desempenho de cada sistema passivo estudado, no continente europeu, utilizando a ferramenta Weather Tool do programa Autodesk Ecotect Analysis e à análise dos resultados obtidos. Para esse efeito, são selecionadas as cinco principais regiões climáticas do continente europeu definidas pela classificação de Köppen-Geiger, apresentando assim um leque variado e informado para cada contexto climático objeto de estudo.

No capítulo 4, apresentam-se as principais conclusões obtidas deste trabalho bem como os trabalhos futuros que daí possam surgir.

De seguida, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas na elaboração do presente trabalho.

Por fim, segue-se o anexo A com um conjunto de gráficos que melhor ilustram a análise efetuada no capítulo 3.

## **2 ESTADO DA ARTE: SISTEMAS PASSIVOS DE AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO DE EDIFÍCIOS**

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre as estratégias bioclimáticas e os sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento existentes. Nesse sentido, para cada sistema passivo, serão descritos a sua constituição, o modo de funcionamento, os requisitos relativos à sua localização, orientação e aplicação no edifício, bem como as vantagens e desvantagens associadas à sua utilização.

Os sistemas passivos são dispositivos construtivos integrados nos edifícios, cujo objetivo é o de contribuir para o seu aquecimento ou arrefecimento natural, melhorando o seu comportamento térmico e aumentando a sua eficiência energética (Eficiência Energética@, 2012). Para pôr em prática as estratégias bioclimáticas nos edifícios, é necessária a utilização de sistemas passivos de aquecimento e/ou de arrefecimento.

O presente capítulo será dividido em quatro secções, onde serão apresentadas, respetivamente, as estratégias bioclimáticas, os sistemas passivos de arrefecimento, os sistemas passivos de aquecimento e os sistemas passivos para aquecimento e arrefecimento.

### **2.1 Estratégias Bioclimáticas**

As Estratégias Bioclimáticas são estratégias de conceção e construção de edifícios cujo objetivo é aperfeiçoar o seu comportamento térmico e eficiência energética, considerando e tirando partido do local, das suas condições climáticas e da interação do edifício com o clima. Tratam-se pois de medidas de carácter geral que determinam o formato do edifício, os seus métodos e elementos construtivos, tendo em conta o microclima, a função do edifício e o seu modo de ocupação e operação, de modo a desenvolver um desempenho benéfico do mesmo em relação ao seu ajustamento ao clima (Eficiência Energética @, 2012).

As estratégias bioclimáticas incluem estratégias de aquecimento e de arrefecimento, que serão desenvolvidas mais à frente neste trabalho e devem ter em conta a incidência solar, as transferências térmicas e a ventilação natural.

No Quadro 2.1 apresenta-se uma síntese das estratégias bioclimáticas, com os respetivos objetivos, meios de transmissão térmica, fontes de calor e recetores de calor.

Quadro 2.1 – Estratégias bioclimáticas (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004).

		Meios de transmissão térmica			
		Condução	Convecção	Radiação	Evaporação
Inverno	Promover ganhos			Promover ganhos solares	
	Reduzir perdas	Minimizar perdas por transmissão	Minimizar infiltrações		
Verão	Evitar ganhos	Minimizar ganhos por transmissão	Minimizar infiltrações	Minimizar ganhos solares	
	Promover perdas	Promover perdas pelo solo	Promover ventilação	Promover arrefecimento por radiação	Promover arrefecimento por evaporação
	Fontes de calor		Atmosfera	Sol	
	Recetores de calor	Solo	Atmosfera	Atmosfera	Água

No inverno devem promover-se os ganhos e reduzir-se as perdas térmicas. Os ganhos térmicos só se obtêm através de ganhos solares em que a transferência de calor, cuja fonte é o sol, ocorre por radiação. Os sistemas de ganhos solares podem dividir-se entre sistemas de ganhos diretos, ganhos indiretos ou ganhos separados como será explicado na secção 2.3. Para reduzir as perdas térmicas devem minimizar-se as infiltrações e as perdas por transmissão através da envolvente. As infiltrações provocam perdas por convecção para a atmosfera exterior, podendo ser minimizadas com a utilização de janelas de tecnologias avançadas (descritas na subsecção 2.3.1). Por outro lado, as perdas por transmissão ocorrem por condução e podem ser minoradas tanto através da aplicação de massa térmica como de janelas de tecnologias avançadas.

No verão importa evitar ganhos e promover perdas térmicas. Para evitar ganhos térmicos, devem minimizar-se as infiltrações, os ganhos por transmissão através da envolvente e os ganhos solares. A massa térmica minimiza os ganhos por transmissão enquanto as janelas de tecnologias avançadas minimizam não só os ganhos por transmissão como também as

infiltrações. A diminuição de ganhos solares é conseguida através de técnicas de sombreamento, que serão descritas na subsecção 2.3.1. As perdas térmicas, podem ser conseguidas promovendo perdas pelo solo, ventilação natural, arrefecimento por radiação ou arrefecimento por evaporação. No primeiro caso, o calor é transferido ao solo por condução, através do arrefecimento pelo solo por contacto direto ou indireto, como será explicado na subsecção 2.2.1. No caso da ventilação natural, o calor é transmitido à atmosfera exterior por convecção, durante os períodos noturnos e matinais (subsecção 2.2.4). Como o nome indica, o arrefecimento por radiação transfere as cargas térmicas do edifício para a atmosfera exterior através de radiação. Este processo será explicado na subsecção 2.2.3. Através da evaporação de água obtém-se o arrefecimento evaporativo, que pode ser direto ou indireto, como será desenvolvido na subsecção 2.2.2.

## **2.2 Sistemas Passivos de Arrefecimento**

### **2.2.1 Arrefecimento pelo Solo**

No verão o solo apresenta temperaturas inferiores à temperatura exterior, constituindo uma importante fonte fria e de dissipação de calor. À profundidade de 7,5 metros a variação anual de temperatura é de apenas 0,5°C e a temperatura média é superior à temperatura média do ar em apenas 2 ou 3°C (Pessoa, 2009). A profundidades superiores a temperatura tende a manter-se constante durante todo o ano. É importante referir que além da profundidade, a temperatura do solo depende da exposição ao Sol e ao vento, das condições da superfície e cobertura vegetal, da formação morfológica, compacidade e teor de humidade (Eficiência Energética@, 2012 e Pessoa, 2009). A título de exemplo, apresenta-se a Figura 2.1 que expõe a diferença mensal entre as temperaturas do ar e do solo à profundidade de dois metros, na cidade de Coimbra. Como se pode ver, a temperatura do solo a esta profundidade é inferior à do ar no verão e superior no inverno, possibilitando o arrefecimento do ar no verão mas também o pré-aquecimento do mesmo no inverno. Além disso, a diferença entre as temperaturas do ar e do solo é maior nos meses de temperaturas mais extremas, destacando-se a diferença de 7°C em julho e de 7,8°C em Dezembro, o que é favorável dado estes meses terem maiores necessidades de arrefecimento/aquecimento.

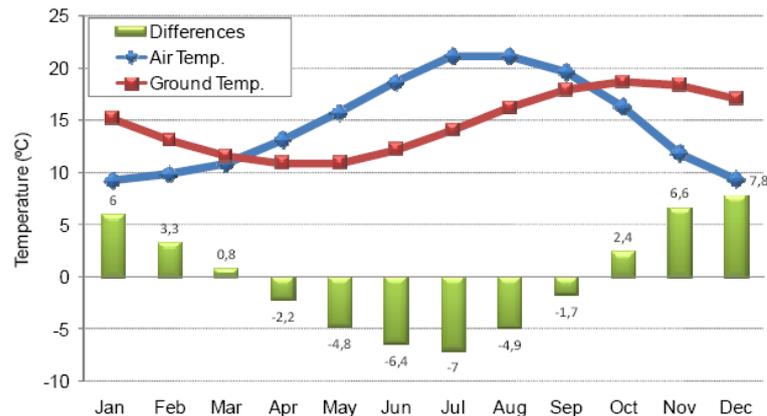


Figura 2.1 - Temperatura média mensal do ar e do solo a dois metros de profundidade, em Coimbra (Craveiro, 2011).

Existem duas formas de usufruir do arrefecimento pelo solo: o contacto direto e o contacto indireto.

### Contacto Direto

Neste caso, o edifício está total ou parcialmente enterrado, conseguindo-se uma inserção natural da edificação no local e o incremento de vegetação local. Outros benefícios deste sistema são a melhoria do comportamento acústico do edifício, o aumento da privacidade visual e a redução de envolvente externa a conservar. Por outro lado, os principais inconvenientes são os custos adicionais a nível estrutural e o sistema de impermeabilização dispendioso e de difícil reparação, mas também os isolamentos forçosamente hidrófugos e resistentes a insetos, a necessidade de controlar a humidade de modo a evitar condensações e infiltrações e a obrigatoriedade de estabelecer cortes térmicos nas paredes e coberturas em contacto com o solo. Em Seward, nos Estados Unidos da América, foram construídas várias casas segundo este método. Na Figura 2.2 apresenta-se o corte transversal do projeto de uma delas (Pessoa, 2009).



Figura 2.2 – Arrefecimento pelo solo: contacto direto: exemplo de habitação semienterrada (Pessoa, 2009).

Para executar esta solução é essencial proceder ao estudo do terreno, principalmente das suas características morfológicas e de estabilidade, sendo favorável edificar em solos secos, estáveis, de simples escavação e entivação. Trata-se pois de uma solução delicada dada a pouca experiência construtiva e a insuficiente literatura.

### Contacto Indireto

No caso do contacto indireto, o arrefecimento pelo solo consiste em captar o ar exterior, de preferência a norte (menos quente) e conduzi-lo por condutas embebidas no solo para o interior do edifício, conforme expressa a Figura 2.3. O ar transfere uma porção do seu calor para a terra que envolve as condutas, entrando no edifício arrefecido. Em alguns casos, o utilizador pode controlar as entradas de ar em cada divisão (CAD@, 2012 e Construlink@, 2007 apud Fonseca, 2007).

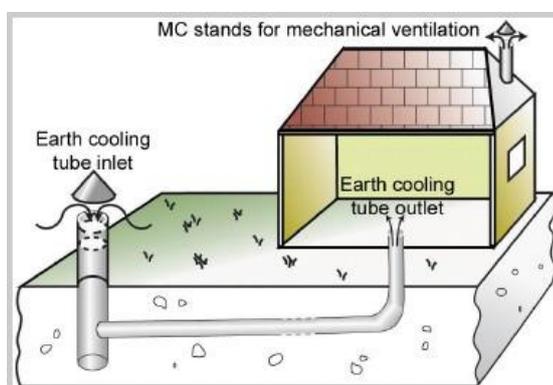


Figura 2.3 - Arrefecimento pelo solo: contacto indireto (Effnergie@, 2012).

A Casa Solar (Figura 2.4), situada em Porto Santo e projetada pelo Arquitecto Gunther Ludewig usufrui desta técnica de arrefecimento passivo.

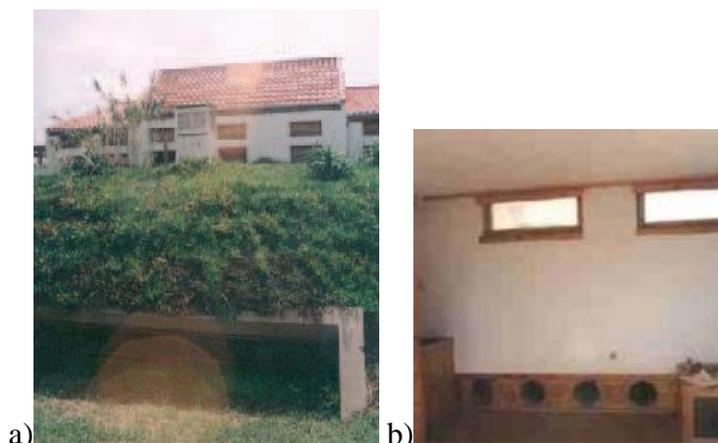


Figura 2.4 - Entradas de ar na Casa Solar: a) No exterior do edifício; b) No interior do edifício (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004).

Num sistema aberto (mais utilizado), o ar externo é captado e introduzido diretamente no interior da habitação, facultando além de arrefecimento, ventilação. Por outro lado, num circuito fechado o ar cedido no interior entra novamente no sistema de condutas enterradas para re-arrefecer, reduzindo a carga de arrefecimento do ar condicionado (CAD@, 2012).

O desempenho do processo depende das dimensões dos tubos, do material constituinte e da profundidade a que estes se encontram. A profundidade varia habitualmente entre 1 e 3 metros (CAD@, 2012), dependendo do solo e é aconselhável que o comprimento seja superior a 10 metros (Pessoa, 2009). Tanto o diâmetro como o comprimento das condutas podem apresentar valores muito distintos, dependendo um do outro. Por exemplo, para um diâmetro de 180 milímetros, o comprimento pode variar de 30 a 35 metros (CAD@, 2012). No entanto, ambos dependem do caudal de ar necessário para arrefecer as divisões, da velocidade do ar nas condutas, da profundidade, da exposição, humidade e nível freático do solo.

O material dos tubos pode ser metal, plástico ou betão. A escolha deve ser feita com base na condutibilidade térmica do material, espessura, resistência à corrosão, durabilidade, facilidade de instalação e custo. O PVC ou o propileno são fáceis de instalar mas menos sustentáveis uma vez que derivam do petróleo enquanto que o betão é mais ecológico e muito usado. As condutas devem estar embebidas em terrenos pouco soalheiros e a captação do ar deve ser feita num lugar sombreado, devendo estar orientada pela direção dos ventos predominantes.

Por outro lado, este sistema possibilita também o pré-aquecimento do ar exterior no inverno, permitindo assim a ventilação do espaço interior nessa altura do ano. Da mesma forma, o ar

exterior é captado pelas tubagens enterradas, onde recebe calor transmitido pelo solo envolvente, sendo por fim libertado no interior do edifício.

As desvantagens deste sistema são a grande possibilidade de aparecimento de fungos e odores, uma vez que estes se desenvolvem preferencialmente em ambientes escuros e húmidos e o débil desempenho em regiões húmidas e quentes. As soluções para estes problemas passam por uma construção de qualidade, execução de um sistema de drenagem e limpeza metódica das condutas anteriormente à época de utilização. As vantagens são a diminuição de utilização de energia elétrica e o aumento de conforto associado à ventilação ao longo de todo o ano e à diminuição de cargas térmicas na estação quente.

O utilizador não pode esperar deste sistema o desempenho e as temperaturas que seriam atingidas por um aparelho de ar condicionado. No entanto, se forem respeitados os princípios referidos anteriormente, este constitui uma solução eficaz para determinadas condições e locais (climas não muito húmidos e quentes). É de notar que uma incorreta realização em obra põe em causa o bom funcionamento de todo o sistema, dado este constituir uma solução bastante especializada.

### 2.2.2 Arrefecimento Evaporativo

O arrefecimento evaporativo, ilustrado na Figura 2.5, baseia-se no arrefecimento do ar ou de uma superfície através de evaporação de água, devido à diminuição do calor sensível do ar ou da superfície, associada à mudança de fase da água do estado líquido ao estado de vapor. (Mendonça, 2005 e Pessoa, 2009).

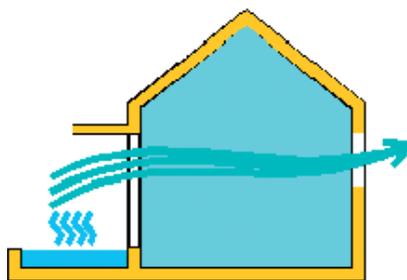


Figura 2.5 – Arrefecimento evaporativo (Gonçalves e Graça, 2004).

As técnicas de arrefecimento evaporativo dividem-se entre o arrefecimento evaporativo direto e o arrefecimento evaporativo indireto.

## Arrefecimento Evaporativo Direto

O arrefecimento evaporativo direto possibilita o arrefecimento do ar ambiente diretamente, não necessitando de arrefecer qualquer elemento estrutural do edifício como acontece no arrefecimento evaporativo indireto. Este tipo de sistema é eficiente para temperaturas exteriores até 40°C (Mendonça, 2005 e Pessoa, 2009).

Fazer o vento incidir sobre vegetação molhada é a forma de arrefecimento evaporativo direto mais simples. Apresentam-se de seguida outras soluções. No Pavilhão da Holanda da Expo 92 de Sevilha (ver Figura 2.6) criou-se uma fachada em que a água escoa sobre uma rede que permite que a corrente de ar atravessasse favorecendo a evaporação. Análises de sensibilidade garantem que é possível manter uma temperatura na cobertura entre 4 e 7°C abaixo da temperatura do ar exterior, em pleno verão mediterrâneo, por meio de aspersão controlada e com reduzidos gastos de água (Mendonça, 2005).

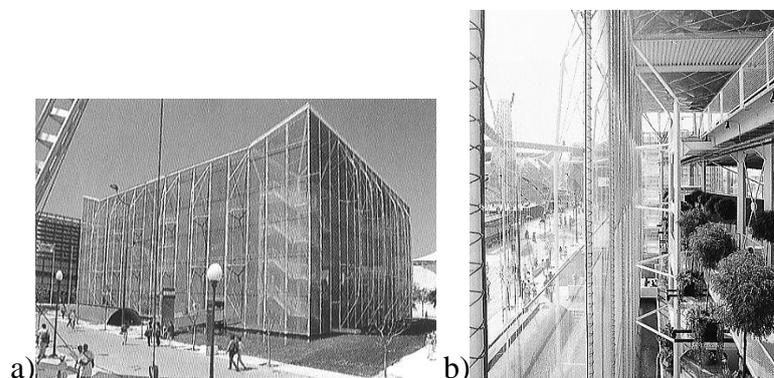


Figura 2.6 – Pavilhão da Holanda na Expo 1992 de Sevilha: a) Vista exterior; b) Vista interior (Mendonça, 2005).

O arrefecimento evaporativo direto conjugado com ventilação transversal, proteção solar e inércia térmica permite alcançar um bem-estar interior excecional em climas quentes e secos. Existem bons exemplos deste sistema em toda a arquitetura do médio oriente (Arquitecologia@, 2012 e Pessoa, 2009).

A Torre de ventilação de Badgeer (ver Figura 2.7), muito usada no Irão, encaminha o vento quente incidente para uma câmara onde uma ânfora porosa verte água para uma grade impregnada de carvão. Ao atravessá-la, o ar arrefece desenvolvendo uma atmosfera cómoda no interior.

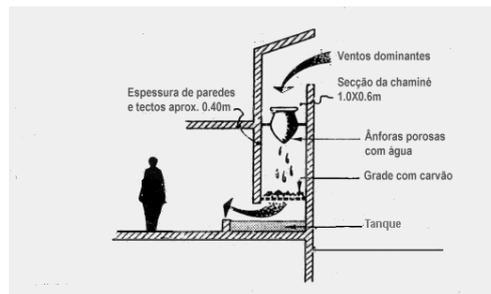


Figura 2.7 - Torre de ventilação de Badgeer (Pessoa, 2009).

No Egito e no Iraque é comum utilizar a conjugação entre “Malkaf” e “ShukSheika” (designações locais), conforme ilustrado na Figura 2.8. Malkaf capta o ar exterior e encaminha-o para uma cave onde este arrefece por inércia térmica. Posteriormente orienta-o para o centro da sala onde se encontra um pátio com água, fazendo-o passar por um novo processo de arrefecimento devido à evaporação. Um conjunto de lanternins elevado e aquecido pelo Sol (“ShukSheika”) situado sobre a sala força a extração do ar interior quando este é reaquecido.

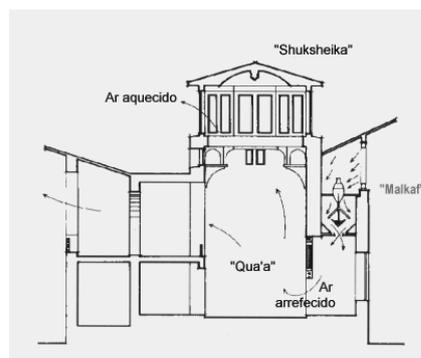


Figura 2.8 - Combinação entre “Malkaf” e “ShukSheika” (Pessoa, 2009).

O arrefecimento evaporativo direto é também uma solução barata, simples e eficaz para grandes espaços como edifícios industriais, mercados ou discotecas. A passagem do ar exterior por filtros humedecidos permite que este refresque e mantenha níveis de humidade saudáveis (ao contrário de aparelhos de ar condicionado que secam o ar), além de que ao renovar o ar interior, contribui para uma atmosfera higiénica, livre de fumos e odores (Centrola@, 2012).

## Arrefecimento Evaporativo Indireto

O arrefecimento evaporativo indireto permite obter um arrefecimento de conforto, arrefecendo o ar ambiente bem como um arrefecimento estrutural, arrefecendo a estrutura do edifício (Mendonça, 2005 e Pessoa, 2009).

Para arrefecer o ar ambiente, os sistemas de arrefecimento evaporativo indireto fornecem água fria de forma a arrefecer a temperatura do ar através de uma transferência de calor, sem que haja necessariamente um aumento de vapor de água no ar interior. Dá-se como exemplo o “roof spraying” (ver Figura 2.9) que se resume a um dispersor para pulverizar água no telhado que provoca uma corrente de ar frio na fachada do edifício, fomentando o arrefecimento. A dissipação do calor da radiação solar pode reduzir a temperatura de 40 para 20°C. No entanto, este tipo de sistema apenas é eficiente em climas secos (Mendonça, 2005).

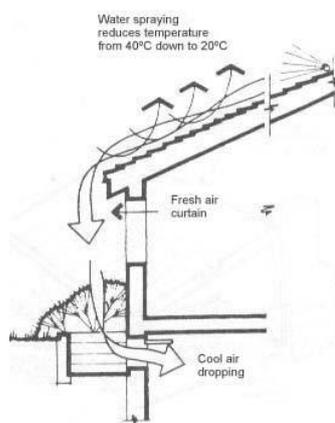


Figura 2.9 – “Roof spraying” (Piedade, 1983 apud Lobão, 2004).

No caso do arrefecimento estrutural, as paredes são arrefecidas por aspersão e as coberturas podem ser arrefecidas por aspersão, rega ou lâmina de água sobre terraço. A evaporação de água na cobertura arrefece a superfície do teto, beneficiando a absorção do calor oriundo do interior do edifício. No entanto, o arrefecimento estrutural não é adequado em coberturas sobre desvão ventilado e isolamento térmico na laje de esteira, nem em paredes com caixa-de-ar ventilada (Mendonça, 2005 e Pessoa, 2009).

Em geral, são índices de potencialização do arrefecimento evaporativo (direto e indireto) a superfície de contacto entre ar e água e o estado de agitação desta. Daí, se recorrer em climas muito quentes a fontes com correntes de água dentro do edifício, aumentando a turbulência e a superfície de evaporação. A incidência do vento é também um fator importante pois incrementa a evaporação e substitui o ar saturado, acelerando o processo. A diferença entre a

temperatura do ar seco e a temperatura húmida é determinante. No entanto, se o ar estiver em contacto com uma superfície exposta ao sol, deve-se substituir a temperatura do ar seco pela temperatura ar-Sol (superior em dezenas de graus). Neste caso, aconselha-se o arrefecimento evaporativo de coberturas e de paredes poentes, se houver água disponível (Mendonça, 2005).

### 2.2.3 Arrefecimento Radiativo

O arrefecimento radiativo, esboçado na Figura 2.10, consiste na emissão de calor por radiação pelos elementos da envolvente exterior do edifício levando ao arrefecimento do mesmo. As perdas por radiação são um processo contínuo pois ocorrem durante todo o dia. Contudo, os efeitos fazem-se sentir mais no período noturno devido à ausência de radiação solar (Eficiência Energética@, 2012).

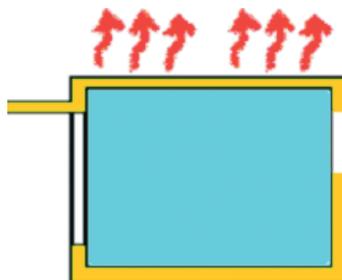


Figura 2.10 – Arrefecimento radiativo (Gonçalves e Graça, 2004).

O arrefecimento por radiação divide-se entre o arrefecimento estrutural que atua sobre o edifício e o arrefecimento de conforto que atua diretamente no corpo humano. Dado que apenas o primeiro afeta o âmbito desta dissertação, apenas este será abordado (Pessoa, 2009).

As transferências por radiação entre o edifício e a atmosfera são tanto maiores quanto menos dióxido de carbono, vapor de água e aerossóis existirem no meio ambiente, sendo que a situação ideal para se dar este processo é de céu limpo, baixo teor de humidade e ausência de vento uma vez que as trocas convectivas com o ar reduzem significativamente o efeito radiativo, apesar de estas também serem favoráveis ao arrefecimento.

Estas permutas variam proporcionalmente com a área de superfície emissiva, sua emissividade e diferença de temperatura entre a superfície e o céu e inversamente com a nebulosidade. O que aqui se refere como temperatura do céu é, na verdade, uma temperatura fictícia que aumenta com o aumento da temperatura da atmosfera seca e da emissividade da atmosfera.

De forma a melhorar a eficácia deste processo, é possível aplicar à cobertura do edifício um sistema de proteção amovível (representado na Figura 2.11) que limita a incidência de radiação solar na massa térmica da cobertura durante o período diurno e a consequente absorção de energia térmica. Durante a noite estas proteções devem ser removidas para que a carga térmica acumulada na laje de cobertura seja retirada por radiação, como demonstra a Figura 2.12. Dá-se assim o arrefecimento da estrutura, que contribui para o arrefecimento do ambiente interior do edifício. Este sistema voltará a ser referido na subsecção 2.3.2 Ganhos Indiretos ou Desfasados, uma vez que por inversão do processo, este permite contribuir para o aquecimento passivo na estação fria.

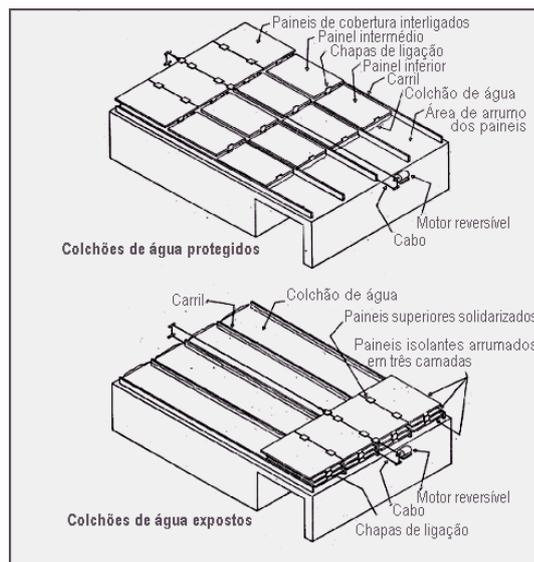


Figura 2.11 – Esquema do sistema Skytherm (Pessoa, 2009).

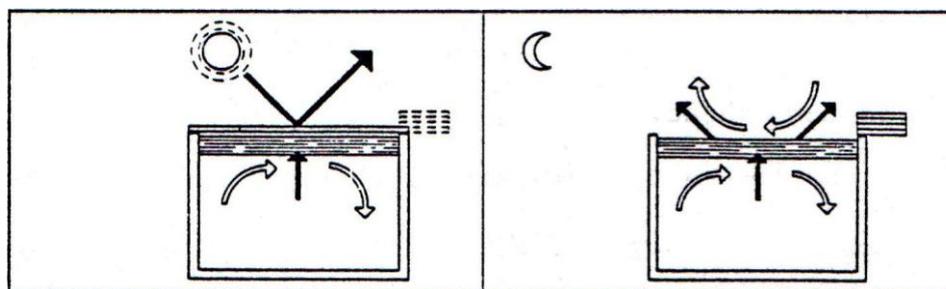


Figura 2.12 – Processo de arrefecimento radiativo com proteção da cobertura (LNEC, 1987).

## 2.2.4 Ventilação Natural para Arrefecimento

A ventilação natural, esquematizada na Figura 2.13, é promovida pela variação de pressão entre os lados exterior e interior das aberturas da edificação, atuando a partir da ação do vento e da diferença de temperatura interior-exterior do edifício. É conveniente recorrer a este método nas horas em que a temperatura exterior é mais baixa que a interior, ou seja, durante a noite e o início da manhã (Craveiro, 2011).

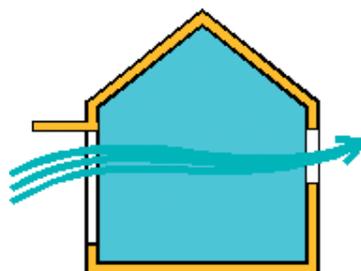


Figura 2.13 – Ventilação natural (Gonçalves e Graça, 2004).

Além de extrair o calor do interior do edifício diminuindo a sua temperatura interior, a circulação do ar facilita a remoção do calor sensível armazenado na massa térmica, como esquematiza a Figura 2.14. Tirando partido da baixa temperatura externa, a ventilação noturna promove o arrefecimento da estrutura do edifício, reduzindo assim a temperatura radiante média do espaço, o que aumenta o conforto térmico durante o dia seguinte (Seppänen e Fisk, 2004 e CIBSE, 2005 apud Craveiro, 2011). Além disso, a movimentação do ar acelera as perdas de calor nos próprios ocupantes por convecção e evaporação.

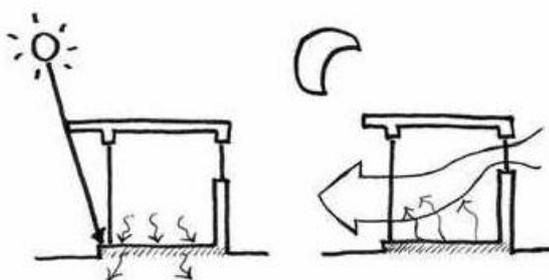


Figura 2.14 – Remoção do calor da massa térmica através da ventilação natural (adaptado de Projeto Casa Fresca@, 2012).

A inércia térmica da construção está diretamente relacionada com a eficiência da ventilação noturna. Durante o período diurno, a estrutura e outros elementos construtivos do edifício

armazenam as cargas de calor, amortecendo o acréscimo de temperatura no interior, contribuindo para manter o conforto térmico.

Para o bom funcionamento deste sistema, é importante posicionar e dimensionar as aberturas corretamente, podendo recorrer-se à ventilação transversal e à ventilação unilateral. A ventilação transversal é a mais eficiente. No entanto, quando esta não é possível, recorre-se à ventilação unilateral inserindo aberturas em apenas um lado do edifício. Neste caso, a ventilação é difícil e uma única abertura não é suficiente, devendo por isso colocar-se duas aberturas afastadas, preferencialmente a cotas distintas, para melhorar o escoamento do ar (Allard, 1998 apud Gonçalves e Graça, 2004).

As desvantagens deste processo incluem a insegurança dos ocupantes dada a necessidade de manter janelas ou outros dispositivos abertos durante a noite e o facto da dimensão das aberturas ter de permitir entrada de ar suficiente para arrefecer a construção mas não provocar desconforto aos seus utilizadores, sendo necessário controlar a abertura das mesmas (Craveiro, 2011).

Este método é adequado a climas quentes e amenos e especialmente eficaz em países com grandes amplitudes térmicas diárias na estação quente, como é o caso de Portugal que chega a atingir amplitudes de 20°C (dia-noite) nesta altura do ano (Allard, 1998 apud Gonçalves e Graça, 2004).

### **2.3 Sistemas Passivos de Aquecimento**

O aquecimento passivo é conseguido através de sistemas solares, que se dividem em três grupos: os sistemas de ganhos diretos, ganhos indiretos e ganhos separados.

#### **Aquecimento Solar Passivo**

Os sistemas de aquecimento solar passivo podem fornecer cerca de 20 a 50% das exigências para aquecimento ambiental (Retscreen, 2006), sendo que este valor varia com o clima, o sistema passivo utilizado, as suas dimensões, a orientação e o tipo de utilização do edifício. Estes permitem obter mais conforto e luminosidade no interior, diminuem a condensação nas janelas, e reduzem os custos com aquecimento, além de requererem menores equipamentos. Podem também reduzir os custos de arrefecimento, devido ao emprego de massa térmica, janelas com tecnologias avançadas que reduzem a transmissão térmica e técnicas de sombreamento. Estas técnicas podem ser incorporadas em edifícios convencionais. Além de benefícios financeiros, proporcionam vantagens associadas ao conforto térmico, à redução de

ruído dado não utilizarem aparelhos elétricos, à valorização do edifício e benefícios associados à qualidade do ar interior e ao meio ambiente (Retscreen, 2006).

“O aquecimento solar passivo envolve orientação do edifício, janelas energeticamente eficientes, sombreamento e massa térmica para reduzir o aquecimento ambiental” (Retscreen, 2006). As características e orientação das janelas devem ser conjugadas com as restantes estratégias implementadas.

O benefício destes sistemas é maior em construções novas, uma vez que há liberdade para orientar as janelas da melhor forma e o dimensionamento de outros processos de aquecimento pode ser reduzido. Consegue-se ainda maior benefício onde as necessidades de aquecimento são maiores que as de arrefecimento, isto é, em climas moderados e frios, e em edifícios de baixa altura, principalmente habitações, embora também se tenham mostrado vantajosos em edifícios comerciais e industriais.

### 2.3.1 Ganhos Diretos

Como é ilustrado na Figura 2.15, a abertura de vãos envidraçados orientados para o quadrante sul promove a incidência da radiação solar nos espaços a aquecer e nas massas térmicas envolventes (paredes e pavimentos). Note-se que na construção corrente em Portugal, existe massa térmica suficiente nos elementos construtivos para que este sistema seja utilizado sem complexidade (Eficiência Energética@, 2012). A massa térmica dos edifícios absorve e armazena calor, minimizando a variação de temperatura no interior. Convém por isso utilizar paredes duplas, lajes maciças, revestimentos de piso cerâmicos, etc. (Retscreen, 2006).

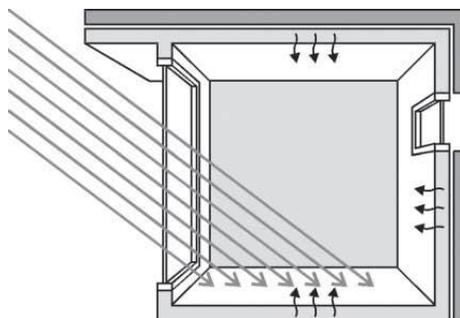


Figura 2.15 – Ganhos solares diretos (Gonçalves e Graça, 2004).

Projetadas pelos Arquitetos Filipa Mourão e João Santa Rita, as moradias apresentadas na Figura 2.16, localizadas em Sintra promovem ganhos diretos solares (Gonçalves e Graça, 2004).



Figura 2.16 – Ganhos solares diretos em moradias (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004).

### Sombreamento

Para evitar o sobreaquecimento na estação quente e de forma a não restringir o aquecimento na estação fria, interessa recorrer ao sombreamento principalmente na fachada exposta ao equador (lado sul no hemisfério norte). Para o conseguir, devem proteger-se os vãos envidraçados no lado sul do edifício com pequenas palas horizontais (uma em cada envidraçado), que intersejam a radiação quando o Sol está alto, ou seja, no verão, mas não no inverno, quando este se encontra mais baixo (ver Figura 2.17). Também as árvores de folha caduca podem ser utilizadas para este efeito quando plantadas próximas dos edifícios. A densa folhagem no verão impede grande parte da radiação solar de atingir o edifício enquanto que no inverno a sua inexistência permite que a radiação solar o atinja na sua totalidade (observar Figura 2.18). Porém, esta estratégia só é eficaz em edifícios de pequena altura. Em todo o caso, a utilização de telas, persianas, cortinas e venezianas não deve ser excluída (Retscreen, 2006).

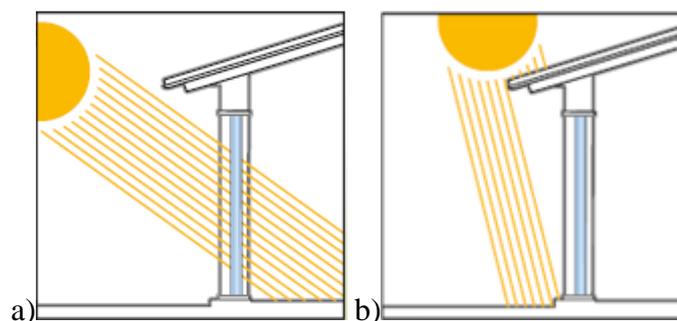


Figura 2.17 – Sombreamento de envidraçados com pala horizontal: a) Situação de inverno; b) Situação de verão (Proteste, 2008 apud Batista, 2008).

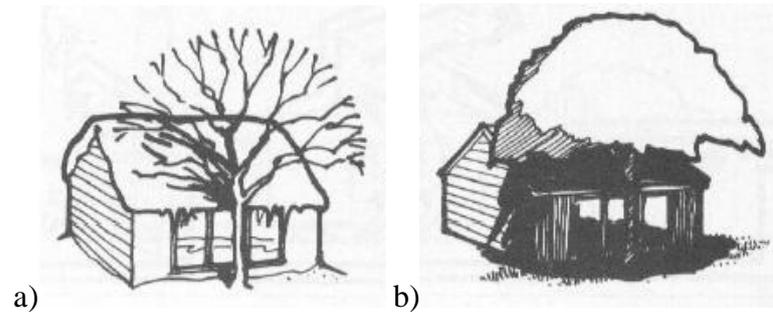


Figura 2.18 - Sombreamento através de árvore de folha caduca: a) Situação de inverno; b) Situação de verão (Lanham et al., 2004 apud Lobão, 2004).

### Janelas de Tecnologias Avançadas

As tecnologias avançadas de janelas compreendem a aplicação de janelas com lâminas duplas ou triplas, espaçadores isolantes, bordas isoladas, corte térmico, de baixa emissividade e preenchidas com gás inerte. Garantem maior isolamento por parte do vidro e diminuem a transmissão térmica pelas janelas. Possibilitam ganhos de calor por radiação difusa e maior flexibilidade na sua localização (Retscreen, 2006).

O custo adicional de uma janela de tecnologias avançadas oscila entre 5 e 35% do custo de uma janela convencional, podendo ser amortizado em cerca de 3 anos (Retscreen, 2006). Estes valores estão contextualizados para o Canadá mas dependem do clima, das características e dimensões da janela, da orientação e do tipo de utilização do edifício.

#### 2.3.2 Ganhos Indiretos ou Desfasados

Existem vários sistemas de ganhos indiretos solares, que serão descritos posteriormente nesta subsecção. De um modo geral, o funcionamento destes sistemas baseia-se no seguinte aspeto: a massa térmica, interposta entre a superfície de ganho e o espaço a aquecer, absorve a energia solar nela incidente transferindo-a posteriormente para o espaço, de forma imediata ou desfasada, conforme a estratégia de circulação do ar que for adotada (Figura 2.19).

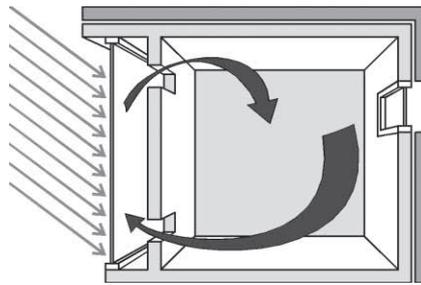


Figura 2.19 – Esquema do funcionamento geral dos sistemas de ganhos solares indiretos (Gonçalves e Graça, 2004).

Os elementos de armazenagem térmica podem encontrar-se nas paredes, como é o caso da parede de trombe, parede de armazenamento e colunas de água, ou nas coberturas. Nas coberturas, a correta utilização destes dispositivos não só contribui para o aquecimento na estação fria como também para o arrefecimento na estação quente, através de radiação, como será explicado nesta subsecção, no ponto Armazenagem Térmica na Cobertura. Segue-se a apresentação de cada um destes sistemas.

### Parede de Trombe

A parede de Trombe consiste numa parede maciça com elevada massa térmica coberta por uma vidraça exterior e com um canal de ar entre os dois materiais. A parede maciça pode ser constituída por pedra e a sua espessura varia entre 10 e 30 centímetros (Gonçalves e Graça, 2004). A coluna de ar tem entre 5 a 10 centímetros (Awbi, 2005 apud Craveiro, 2011) e tanto a parede maciça como o vidro dispõem de aberturas aos níveis inferior e superior. A Figura 2.20 apresenta a Casa Shaffer em Porto Santo, projetada pelo Arquiteto alemão Gunther Ludewig, que emprega a técnica da parede de Trombe (Craveiro, 2011 e Gonçalves e Graça, 2004).

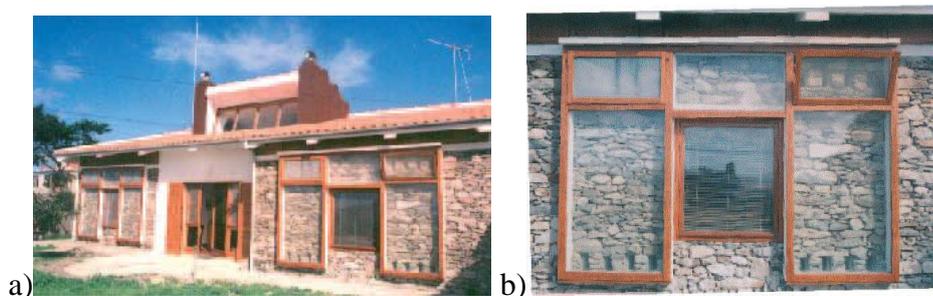


Figura 2.20 – Parede de Trombe na Casa Shaffer: a) Vista geral; b) Pormenor (Gonçalves e Graça, 2004).

A parede de Trombe deve ser integrada na fachada sul ou sudoeste do edifício (se este se encontrar no hemisfério norte), de modo a maximizar a sua eficácia e a superfície exterior da parede deve ser pintada de cor escura, aumentando assim a captação da radiação solar incidente.

Na estação fria, de forma a aquecer o espaço interior da edificação, os orifícios superiores e inferiores da parede maciça devem manter-se abertos e os do vidro fechados (Figura 2.21 a). Durante o dia, a radiação solar ao incidir no vidro aquece o ar existente no espaço entre o vidro e a parede de armazenamento, fazendo-o atingir temperaturas muito elevadas (30-60°C) (Gonçalves e Graça, 2004). Ao aquecer, este torna-se menos denso e tende a subir, criando uma circulação natural do ar. Assim, o aquecimento do espaço interior é conseguido por correntes de convecção entre as aberturas que separam o espaço estufa do espaço interior e por condução através da parede. Além disso, durante o dia a parede maciça absorve e armazena calor que continua a ser libertado para o espaço interior durante a noite.

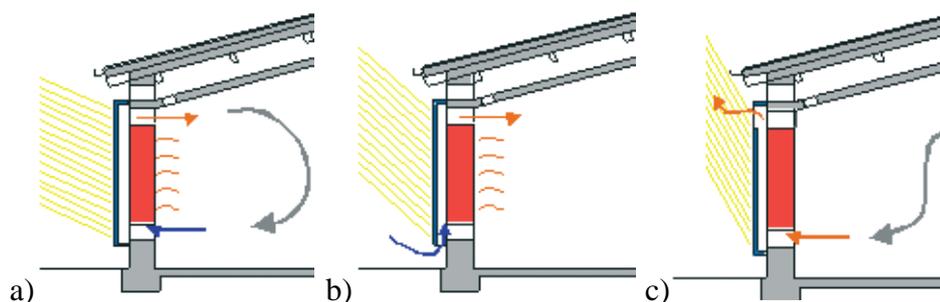


Figura 2.21 – Esquema de funcionamento da parede de Trombe: a) No inverno; b) Na primavera e outono; c) No verão (Gonçalves e Graça, 2004).

Na primavera e no outono, é possível pré-aquecer o ar exterior antes de este entrar na edificação (Figura 2.21 b). Para isso, abrem-se os orifícios inferiores da vidraça em vez dos orifícios inferiores da parede, promovendo a ventilação e evitando o sobreaquecimento (Craveiro, 2011).

Este dispositivo também pode contribuir para o arrefecimento na estação quente. Para tal, o mecanismo de operação pressupõe a abertura do orifício superior da vidraça e do orifício inferior da parede, sendo que os restantes orifícios se devem encontrar fechados (Figura 2.21 c). A abertura de uma janela na fachada norte (oposta à parede de Trombe) facilita o processo de refrigeração, facultando a entrada de ar fresco no interior do edifício. O ar entra no canal de ar entre o vidro e a parede através da abertura inferior da parede. Aí, o ar é aquecido e depois elevado naturalmente para a abertura superior da superfície de vidro por onde sai.

O bom desempenho de uma parede de Trombe é função do controle das aberturas para entrada e saída de ar, sendo por isso essencial a compreensão do seu correto funcionamento por parte dos utilizadores. O isolamento térmico da envolvente do edifício é um aspeto importante para a eficácia deste sistema, bem como as dimensões do canal de ar.

### **Parede de Armazenamento**

O sistema da parede de armazenamento é semelhante ao da parede de Trombe com a exceção de que não possui quaisquer orifícios e com a limitação de ter apenas função de aquecimento de espaços, não possuindo funções de arrefecimento. Além de pedra, o material de armazenamento da parede pode ser betão ou argamassa. Este método é adotado em alguns edifícios do nosso país, como é o caso das casas de Jade, em Sintra, projetadas pela arquiteta Lúcia Tirone e presentes na Figura 2.22 (Gonçalves e Graça, 2004).



Figura 2.22 – Parede de armazenamento nas casas de Jade (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004).

A radiação solar incidente no vidro aquece o ar e a parede maciça. Posteriormente, esta transmite calor ao espaço interno por condução. Este processo demora algum tempo a iniciar-se, tempo esse que é tanto maior quanto mais espessa for a parede, o que constitui uma desvantagem em relação à parede de Trombe. Durante a noite, a parede liberta a energia que armazenou durante o dia continuando a aquecer o espaço.

Este sistema deve ser desativado na estação quente, devendo por isso possuir dispositivos móveis de sombreamento.

### **Colunas de Água**

As colunas de água funcionam da mesma forma que a parede de armazenamento. A única diferença é que o material de armazenamento, neste caso é água, em contentores. É possível empregar outro líquido com maior capacidade de armazenagem térmica, como o glicol

(líquido com anticongelante) e vários géneros de recipientes. Em vez de colunas, este sistema pode também ser constituído por paredes de água (Gonçalves e Graça, 2004).

A Casa Solar no Campus do ex-INETI (atual LNEG), no Porto, projetada pelos Arquitetos Carlos Araújo e Santiago Boissel, utiliza este sistema de ganhos indiretos solares. Em frente aos vãos da casa, existem colunas de fibra de vidro, de cor escura e cheias de água, como se pode observar na Figura 2.23. A radiação solar que incide nos vãos aquece o ar interior ao mesmo tempo que aquece a massa de água existente nas colunas. A água absorve e armazena este calor, transferindo-o depois por radiação e convecção para o espaço a aquecer.



Figura 2.23 – Colunas de água na Casa Solar (adaptado de Gonçalves e Graça, 2004).

Em semelhança à parede de armazenamento, este método apenas contribui para o aquecimento de espaços, apresentando porém a vantagem de o aquecimento do espaço interior ter início de imediato quando a radiação solar incide nos vãos, ao contrário do sistema descrito anteriormente.

### **Armazenagem Térmica na Cobertura**

Este método requer que o edifício possua uma cobertura plana com elevada massa térmica, como uma laje de betão ou um colchão de água, sendo que esta deve estar protegida por um conjunto de painéis amovíveis, que podem ser metálicos (Pessoa, 2009).

A correta utilização deste sistema, demonstrada na Figura 2.24, pressupõe que no período diurno, os painéis sejam removidos e a massa térmica esteja exposta à radiação solar de modo a absorver o máximo de energia térmica possível. No período noturno, a proteção deve ser repostada sobre a cobertura, de forma a minimizar as perdas térmicas para o exterior e a transferir o calor armazenado pela laje durante o dia ao espaço interior, aquecendo-o.

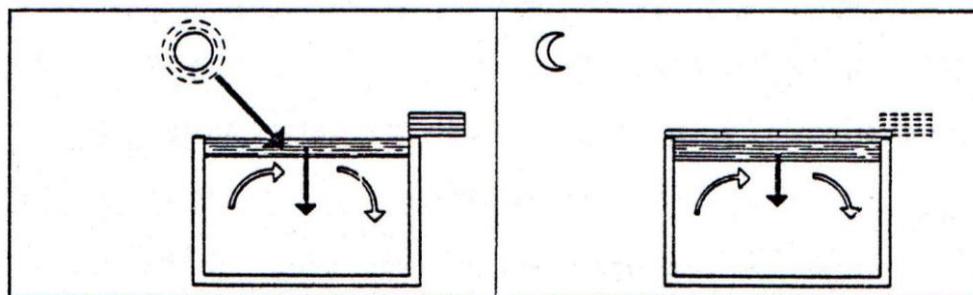


Figura 2.24 – Processo de armazenagem térmica na cobertura (LNEC, 1987).

O procedimento inverso pode ser utilizado para arrefecimento passivo na estação quente, como já foi descrito na subsecção 2.2.3 Arrefecimento Radiativo.

As vantagens deste sistema são o aumento do conforto térmico no interior durante o verão e o inverno, a redução de energia despendida no arrefecimento e aquecimento da edificação e a consequente diminuição dos seus custos. Por outro lado, as desvantagens incluem o elevado custo deste sistema e os cuidados específicos a que a seu uso e conservação obrigam. Por estes motivos, a utilização deste processo é ainda muito limitada.

### 2.3.3 Ganhos Separados ou Isolados

Em geral, nos sistemas de ganhos separados, a captação de ganhos solares, a absorção e o armazenamento da energia captada não se encontram nas áreas ocupadas dos edifícios, mas em compartimentos adjacentes, pelo que operam independentemente do mesmo (Eficiência Energética@, 2012).

São exemplos de sistemas de ganhos solares separados o espaço estufa, a parede solar, os coletores a ar e a convecção por termosifão, que se apresentam de seguida.

#### Espaço Estufa

No caso do espaço estufa utiliza-se a combinação dos efeitos de ganhos diretos e indiretos. Como se demonstra na Figura 2.25, a energia solar captada e armazenada na estufa é transmitida ao espaço adjacente por condução através da parede de armazenamento que os separa e por convecção no caso de existirem orifícios na parede que permitam a circulação do ar (Eficiência Energética@, 2012). A Figura 2.26 apresenta a aplicação deste sistema na casa solar passiva de Vale Rosal.

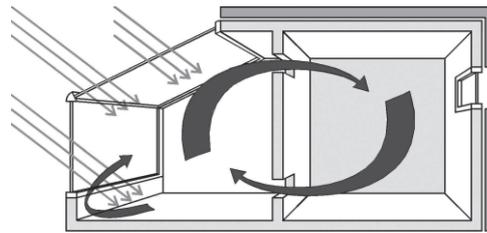


Figura 2.25 - Esquema de funcionamento do espaço estufa (Gonçalves e Graça, 2004).

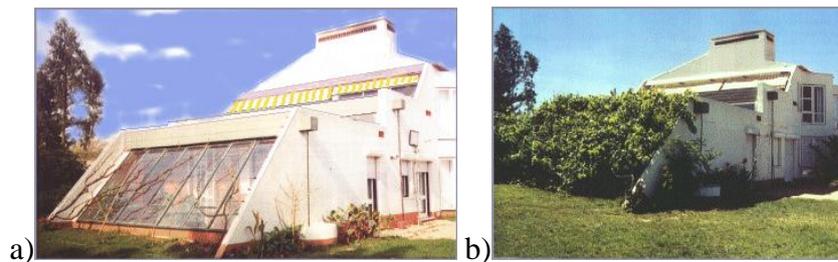


Figura 2.26 – Moradia com estufa: a) Ativa no inverno; b) Desativada no verão (Pessoa, 2009).

### Parede Solar

A parede solar consiste num dispositivo para aquecimento solar passivo constituído por uma chapa de metal perfurada acoplada a uma fachada de um edifício. Como é possível observar na Figura 2.27 a, o ar exterior entra no coletor através dos orifícios e neste é aquecido pela radiação solar. Devido ao efeito chaminé, o ar mais quente sobe até ao topo do coletor. Aí existe uma ligação ao interior do edifício e um ventilador que força o ar quente a entrar no espaço que se pretende aquecer (Craveiro, 2011). Na Figura 2.27 b, apresenta-se um exemplo deste sistema aplicado a um edifício comercial em Chicago, nos Estados Unidos da América.

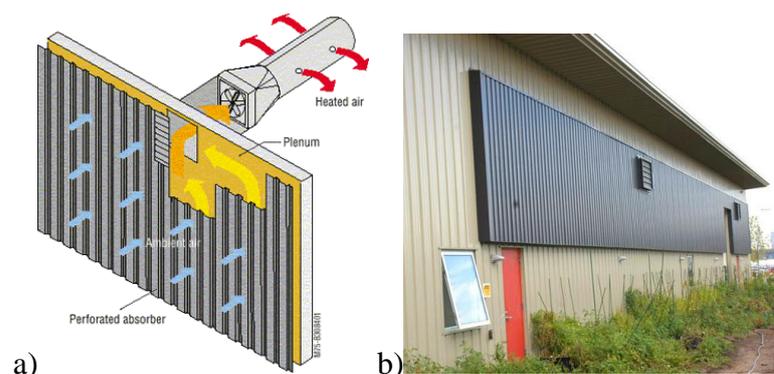


Figura 2.27 – Parede solar: a) Esquema de funcionamento (Solar Wall@, 2012); b) Aplicação em edifício comercial (Chicago Greenworks@, 2012).

Trata-se de um equipamento de baixo custo e com rápido retorno do investimento inicial, uma vez que não necessita de manutenção durante aproximadamente 30 anos e permite reduzir consideravelmente o consumo de energia e os custos de aquecimento. A sua eficiência é superior a 80%, sendo que num dia de Sol este possibilita um aumento da temperatura do ar de 16 a 38°C, tendo sido por isso mundialmente reconhecido como uma solução para edifícios sustentáveis (Solar Wall, 2011 apud Craveiro, 2011).

Adicionalmente, trata-se de um sistema de simples instalação e incorporação nas edificações que permite diminuir as emissões de dióxido de carbono resultantes do uso de equipamentos ativos para aquecimento. Uma outra vantagem deste mecanismo é que utiliza ar exterior para aquecer os espaços, renovando desta forma o ar interior e melhorando a sua qualidade.

### Coletor a Ar

Uma superfície de vidro e uma superfície absorvedora separadas por uma coluna de ar e posicionadas na fachada de um edifício constituem um coletor a ar. Este sistema é idêntico à parede de Trombe, com a diferença de que a superfície absorvedora neste caso não tem capacidade de armazenamento térmico, impossibilitando assim o aquecimento noturno do espaço. Analogamente à parede de Trombe, um coletor de ar também possui aberturas inferiores e superiores em ambas as superfícies. Este sistema foi aplicado na Escola Secundária do Crato, pelos Arquitetos Luís Vergílio Cunha e Rosabela Costa e pelo Engenheiro Canha da Piedade, sendo este exemplo exibido na Figura 2.28 (Gonçalves e Graça, 2004).



Figura 2.28 – Coletor a ar: a) Vista exterior; b) Vista interior (Gonçalves e Graça, 2004).

Durante a estação fria, como expressa a Figura 2.29 a, devem manter-se abertos os orifícios inferior externo e superior interno. Desta forma, o ar exterior entra no coletor pelo orifício inferior, onde é aquecido pela radiação solar e de seguida dirigido por efeito de termossifão para o interior do edifício através do orifício superior, proporcionando o aquecimento e a ventilação do espaço. Durante a noite, este processo deve ser desativado, mantendo os

orifícios fechados. Outra possibilidade para aquecimento durante a estação fria consiste em abrir os dois orifícios internos mantendo os externos fechados. Desta forma, o ar existente no coletor é aquecido pela radiação solar, tornando-se menos denso e por isso tende a subir, criando uma circulação natural do ar interior. Este processo, semelhante ao processo de aquecimento da parede de Trombe (ver Figura 2.21 a), é mais eficiente em relação ao aquecimento mas não permite a ventilação do espaço.

Por outro lado, na estação quente (ver Figura 2.29 b), as aberturas devem ser a inferior interna e a superior externa, sempre que a temperatura interior seja superior ao desejável. Com o objetivo de extrair o calor do interior do edifício, o ar interior entra no coletor pela abertura inferior. Aqui, é aquecido através da radiação solar incidente na superfície de vidro. Ao aquecer, torna-se menos denso e sobe até à abertura superior, por onde sai para o exterior.

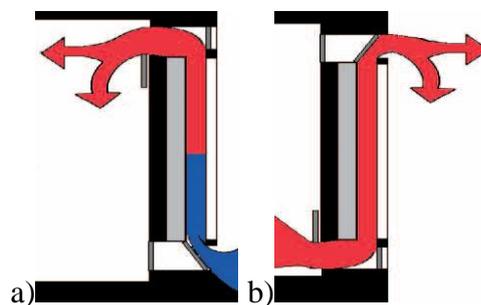


Figura 2.29 – Esquema de funcionamento do coletor a ar: a) No inverno; b) No verão  
(Gonçalves e Graça, 2004).

Além de contribuir para o aquecimento e para o arrefecimento dos espaços, este processo possibilita também a ventilação dos mesmos quer no inverno quer no verão.

### Convecção por Termossifão

Um sistema de convecção por termossifão confere uma enorme capacidade de armazenamento térmico a um edifício, quando complementado por uma unidade acumuladora de calor. É composto por um dispositivo captador, um elemento de armazenamento térmico e duas condutas para carga e descarga térmica do elemento de armazenamento para o espaço interior. Neste processo, a primeira componente capta calor a partir da radiação solar nela incidente, aquecendo o ar no seu interior. Por efeito de termossifão o ar aquecido, sendo menos denso, sobe e é conduzido para a unidade acumuladora, onde é armazenado e para o espaço que se pretende aquecer, criando, desta forma, uma circulação natural do ar entre o espaço interior e o dispositivo captador, conforme ilustra a Figura 2.30 (Mitjá et al., 1986 apud Mendonça, 2005).

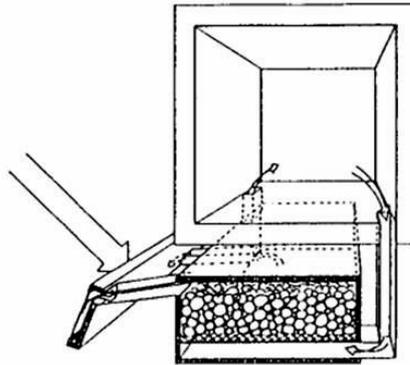


Figura 2.30 – Convecção por termosifão (FABUTE, 2003 apud Mendonça, 2005).

O elemento de armazenamento térmico pode ser formado por placas ocas de betão ou, preferencialmente, por leitos de godo. Na segunda hipótese, os agregados são depositados num contentor de betão estanque ao ar e têm uma dimensão regular de 20 a 50 milímetros. O volume do leito de godo deve ser equivalente a 60 por cento da área dos elementos transparentes. O seu comprimento, por outro lado, deve ser inferior a 2 metros na direção da circulação do ar, para limitar a transferência térmica entre o ar e o material acumulador, pois a diminuição da diferença de temperatura entre o ar e o godo não beneficia a transmissão de calor (FABUTE, 2003 apud Mendonça, 2005).

É preferível constituir várias unidades armazenadoras de calor de pequena dimensão e isoladas umas das outras do que apenas uma de grandes dimensões, uma vez que, com uma pequena quantidade de energia, a primeira solução funciona mais eficazmente. De facto, no caso de a temperatura não ser suficientemente elevada, a utilização de uma unidade maior leva a que a sua grande massa de armazenamento impeça o aquecimento do espaço interno do edifício.

Na estação quente, é possível descarregar o elemento de armazenamento térmico durante o período noturno com ar fresco exterior, promovendo o arrefecimento do espaço interior. O quociente entre a área de superfície e o volume do leito de godo é bastante elevado, beneficiando a carga e descarga térmica do mesmo (Mitjá et al., 1986 apud Mendonça, 2005).

Este mecanismo apenas é apropriado para pisos térreos, pois no caso de edificações em altura, como habitação multifamiliar ou serviços, este processo fica inviabilizado pelas dimensões necessárias para o sistema de ganhos separados e circuitos para os andares mais elevados. No entanto, trata-se de um sistema vantajoso quando se pretende aumentar a capacidade de armazenar calor de uma construção, como é o caso da reabilitação térmica de edifícios leves. Também se torna útil no aquecimento noturno de divisões cuja orientação não é a mais favorável.

### 2.3.4 Painel Solar Térmico

Os painéis solares térmicos são utilizados para o aquecimento de fluidos, que por sua vez, podem ser aproveitados para aquecer o ambiente interior através de sistemas de aquecimento central.

O coletor solar térmico utiliza o princípio de que a absorção de radiação solar provoca um aumento de temperatura e aproveita o calor resultante para aquecer fluidos. Através do vidro (simples ou duplo) permite a entrada da luz solar e de calor, provocando assim o denominado efeito de estufa no seu interior. Aí, um absorvedor de calor, feito de alumínio ou cobre e geralmente de cor negra, que está diretamente exposto à radiação possibilita uma maior absorção da energia térmica. No seu interior circula um fluido num tubo serpentina em cobre, que capta o calor transferido pelo absorvedor (consultar Figura 2.31) (Casalinho, 2008).

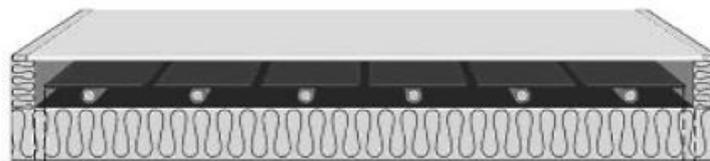


Figura 2.31 – Painel solar térmico (adaptado de Roriz, 2009).

O fluido circulante pode ser água ou outro líquido com maior capacidade de armazenar calor, como é o caso do glicol (líquido anticongelante).

Um sistema solar térmico pode catalogar-se por direto ou indireto, em função do número de circuitos existentes e por passivo ou ativo, em função da movimentação do fluido.

Num sistema direto (Figura 2.32 a), a própria água que será utilizada na habitação percorre o painel solar, sendo aí aquecida. Neste caso, a água não pode ser tratada com nenhum produto contaminante, uma vez que pode vir a ser consumida.

Pelo contrário, num sistema indireto (Figura 2.32 b), a água está armazenada num depósito que é alimentado por água fria da rede. Um outro fluido percorre o painel solar por um circuito independente e, de seguida, transmite a sua energia à água existente no depósito através de um permutador de calor (serpentina). Desta forma, é possível adicionar ao fluido que circula no painel um anticongelante para aumentar a eficácia do sistema.

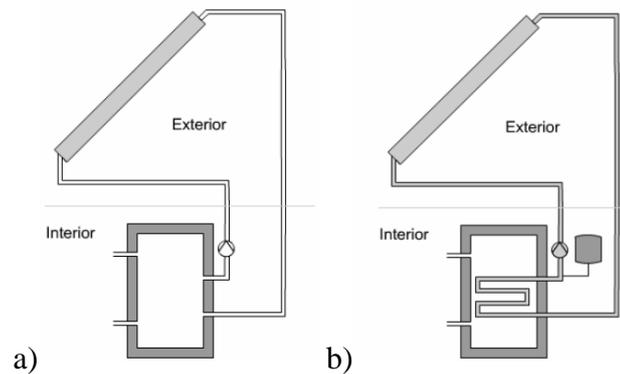


Figura 2.32 – Sistemas solares térmicos: a) Sistema direto; b) Sistema indireto (Roriz, 2009).

O coletor solar térmico do tipo passivo (Figura 2.33 a) é caracterizado pela circulação do fluido se dar por efeito de termossifão, dispensando bomba elétrica. O fluido aquecido, sendo menos denso que o frio, sobe criando assim uma circulação natural causada pela diferença de densidade criada pelas diferenças de temperatura. Neste caso, o depósito para a água aquecida encontra-se junto ao painel solar e por isso, se este for aplicado na cobertura do edifício não pode ter dimensões muito elevadas, devido à sobrecarga que exerce na estrutura. Por este motivo, a capacidade do depósito não é suficiente para garantir o aquecimento ambiental interior, sendo que este tipo de painel não é aconselhável para tal fim.

O coletor solar do tipo ativo (Figura 2.33 b), por outro lado, caracteriza-se pela circulação do fluido ser efetuada através de bombagem. Neste caso, o reservatório de água pode estar afastado do coletor solar e assim, ter maior dimensão e capacidade para alimentar o aquecimento do edifício. A bomba elétrica "inteligente" funciona a partir de energia solar e é acionada a diferentes velocidades consoante a luz do dia.

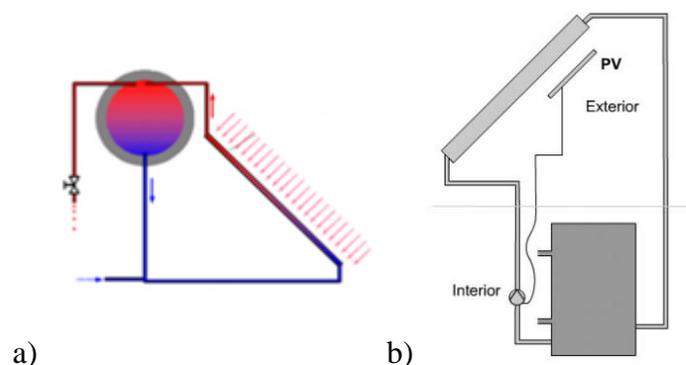


Figura 2.33 – Sistemas solares térmicos: a) Sistema passivo; b) Sistema ativo (Roriz, 2009).

O sistema ativo ou forçado é mais eficiente, mais estético e apresenta mais escolhas no equipamento mas também é mais caro, mais difícil de instalar, mais sujeito a avarias e ocupa mais espaço do que o sistema passivo ou de termossifão.

O reservatório de água é constituído por um termoacumulador em cobre, resistente à corrosão, com interior revestido a estanho, que está isolado termicamente por uma espuma rígida de poliuretano.

As vantagens da adoção do sistema solar térmico prendem-se com motivos de sustentabilidade, eficácia, segurança e economia. De facto, a energia solar não polui durante o seu uso, os fluidos de transferência de calor utilizados têm uma grande capacidade de aquecimento e a bombagem de velocidade variável tem maior precisão do que a bombagem do tipo "ligar-desligar". Além disso, são evitadas altas tensões (máximo de 21 Volts), altas pressões e altas temperaturas (habitualmente não há estagnação pois a área do painel é calculada de acordo com a percentagem do consumo) e estes sistemas exigem pouca manutenção.

As desvantagens incluem o elevado investimento inicial, a necessidade de um reservatório de água, o baixo rendimento do painel solar (25%), a variação das quantidades produzidas de acordo com a situação climática (chuva, neve), a anulação de produção durante o período noturno e a queda brusca durante o inverno em locais de latitudes médias ou altas (Finlândia, Islândia, Chile).

## **2.4 Sistemas de Aquecimento/Arrefecimento Passivo**

### **2.4.1 Utilização de PCM's**

“Phase Change Materials” (PCM's) são materiais que mudam da fase sólida para a fase líquida quando a sua temperatura atinge um certo valor que corresponde à sua temperatura de fusão, usando para isso uma enorme quantidade de energia térmica (calor latente), sem no entanto aumentar significativamente a sua temperatura (calor sensível). Inversamente, quando a temperatura ambiente desce, atingindo um determinado valor, o PCM solidifica, libertando energia em forma de calor. Assim, a sua aplicação incrementa consideravelmente a inércia térmica dos edifícios, devido à sua elevada capacidade de armazenar calor (Santos et al., 2012).

De modo a melhor se compreender o fenómeno associado à utilização de PCM's, apresentam-se de seguida as definições de calor latente e de calor sensível. À energia associada a uma

transformação isotérmica do estado físico de uma substância dá-se o nome de calor latente (Infopédia@, 2012). Pelo contrário, o calor sensível é aquele que se manifesta pela alteração da temperatura do material.

Para preservar o conforto térmico dentro do edifício, a temperatura de fusão dos PCM's deve estar entre os 21 e os 26°C (Schmidt, 2011 apud Santos et al., 2012). Por este motivo, não é viável a utilização de água como PCM, pois a sua temperatura de fusão (0°C) está muito a baixo daquela que é considerada a temperatura de conforto no interior de um edifício. Neste sentido, são utilizadas soluções salinas aquosas, materiais à base de cera, misturas de hidratos e hidratos de sal (DELTA-COOL 24@, 2011 apud Santos et al., 2012).

Os PCM's podem ser colocados no interior de telas duplas interligadas, flexíveis ou endurecidas com resinas, sob a forma de painéis. As telas podem ser reforçadas com chapas metálicas. No entanto, deverão ser suficientemente flexíveis para suportar as dilatações, causadas pelas variações de densidade durante as alterações de estado físico. Os painéis podem ser aplicados em paredes, pavimentos, tetos falsos ou lamelas interiores de janelas. Na Figura 2.34 mostram-se alguns exemplos de aplicação deste sistema (Pause, 1997 apud Mendonça, 2005).



Figura 2.34 - Exemplos de aplicação de PCM's: a) Em tetos falsos (DELTA-COOL 24@, 2011 apud Santos et al., 2012); b) Em lamelas interiores de janelas (Glauber-lamell AB@, 2011 apud Santos et al., 2012).

Os PCM's amortecem as variações de temperatura no interior, aumentando a inércia térmica do edifício. Devem ser projetados de acordo com as dimensões e a utilização do edifício. As suas características mais importantes são a temperatura que provoca a mudança de estado físico, a quantidade de energia que é absorvida ou libertada durante esse processo e a capacidade de captação e transmissão de calor sensível, mas também a não corrosão, a não toxicidade e a reação ao fogo.

Desta forma, é possível conferir inércia térmica a um edifício com elementos leves e que ocupam pouco espaço, o que se torna especialmente vantajoso em edificações leves como os edifícios de estrutura em aço. Inclusivamente, com um determinado PCM com 2 centímetros de espessura, consegue obter-se uma inércia térmica equivalente a 226 centímetros de construção metálica (leve) ou a 36 centímetros de alvenaria de tijolo (DELTA-COOL 24@, 2011 apud Santos et al., 2012).

A aplicação de técnicas que envolvem a utilização de PCM's apresenta ainda custos bastante elevados, obrigando assim a um investimento inicial muito alto para usufruir desta solução.

É importante referir que a maioria dos sistemas passivos de aquecimento e/ou arrefecimento consistem em soluções bastante especializadas cujo conhecimento é ainda restrito a uma pequena percentagem da população. Estes factos levam a que o investimento inicial necessário para usufruir destes sistemas e das suas vantagens seja ainda bastante elevado, constituindo um grande impasse para a sua implementação. No entanto, há cada vez mais divulgação sobre este assunto e um crescente interesse quer da parte dos profissionais de construção quer da parte dos clientes, o que abre uma perspectiva de que num futuro próximo estas técnicas poderão vir a ser mais acessíveis. Entretanto, existem já algumas técnicas de baixo custo e altamente eficientes, como é o caso da parede solar para aquecimento e da ventilação natural para arrefecimento, sendo esta última gratuita.

Relativamente a alguns sistemas passivos, como a parede de Trombe e o coletor a ar, devem realçar-se três aspetos importantes:

O primeiro é que estes sistemas apresentam a vantagem adicional de permitir a ventilação dos espaços. De facto, estes sistemas possibilitam a renovação do ar interior ao mesmo tempo que executam a função de aquecer ou de arrefecer o interior dos edifícios, o que também contribui para aumentar o conforto interno uma vez que melhora a qualidade do ar, além de que favorece a conservação dos materiais de construção. O arrefecimento pelo solo (no caso de contacto indireto), a ventilação natural, alguns métodos de arrefecimento evaporativo e o aquecimento através da parede solar são outros exemplos de sistemas que apresentam esta característica.

Outra vantagem presente nestes sistemas passivos é a de possuírem dupla função, possibilitando com apenas um sistema a solução de dois problemas: o aquecimento no inverno e o arrefecimento no verão. Esta característica é particularmente benéfica em climas que apresentam necessidades equivalentes de aquecimento e de arrefecimento. Apesar de possuírem uma função principal para a qual são mais eficientes, a convecção por termossifão, o arrefecimento pelo solo (contacto indireto) e a armazenagem térmica na cobertura também

permitem usufruir desta vantagem, além do emprego de massa térmica, aplicação de janelas de tecnologias avançadas e utilização de “Phase Change Materials” (PCM’s).

No entanto, a dupla função dos sistemas passivos pode trazer um inconveniente: alguns deles requerem o controlo do seu funcionamento por parte dos utilizadores, de acordo com as exigências climáticas de cada estação, de forma a serem utilizados corretamente e a maximizarem a sua eficiência. Deste modo, se o utilizador não compreender o modo de operação do sistema, pode comprometer a sua eficiência e o conforto térmico interior por este proporcionado. Em alternativa, o controlo pode ser automático, recorrendo-se para isso à domótica em edifícios, o que requer no entanto um investimento superior.

É de notar que a eficiência de quase todos os sistemas passivos depende em grande parte da inércia térmica do edifício onde está aplicado, o que comprova a importância da massa térmica no conforto interior, quer por si só, quer para a eficiência de outras técnicas.

## **3 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS PASSIVOS EM FUNÇÃO DO CLIMA**

Neste capítulo pretende determinar-se as melhorias que os sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento podem proporcionar a nível de conforto térmico no interior dos edifícios, em diferentes climas e face às diferenças sazonais de cada clima, a partir das análises psicrométrica e bioclimática da região onde se inserem. Para isso serão estudadas cinco regiões definidas pela classificação climática de Koppen-Geiger e será utilizada a ferramenta computacional Weather Tool do programa Autodesk Ecotect Analysis. O estudo será focado no continente europeu, embora as conclusões tiradas para cada região climática se apliquem mundialmente, uma vez que estas têm características idênticas por todo o planeta.

### **3.1 Classificação Climática Koppen-Geiger**

É a classificação climática mundial mais utilizada atualmente e foi criada por Wladimir Koppen (climatólogo alemão) em 1900. Foi posteriormente melhorada pelo seu autor em 1918, 1927 e 1936 e por Rudolf Geiger em 1954 e 1961, tendo sido repetidamente atualizada até aos dias de hoje (Kottek et al., 2006). Na Figura 3.1 apresenta-se a versão de 2006.

Para efetuar esta classificação, Koppen centrou-se na ideia de que a vegetação natural de cada região é uma manifestação do seu clima, uma vez que se apercebeu que as plantas são reveladoras de vários parâmetros climáticos. De seguida, considerou a precipitação e a temperatura do ar. Cada região foi denominada por um código de 2 ou 3 letras, cada uma com o seu significado.

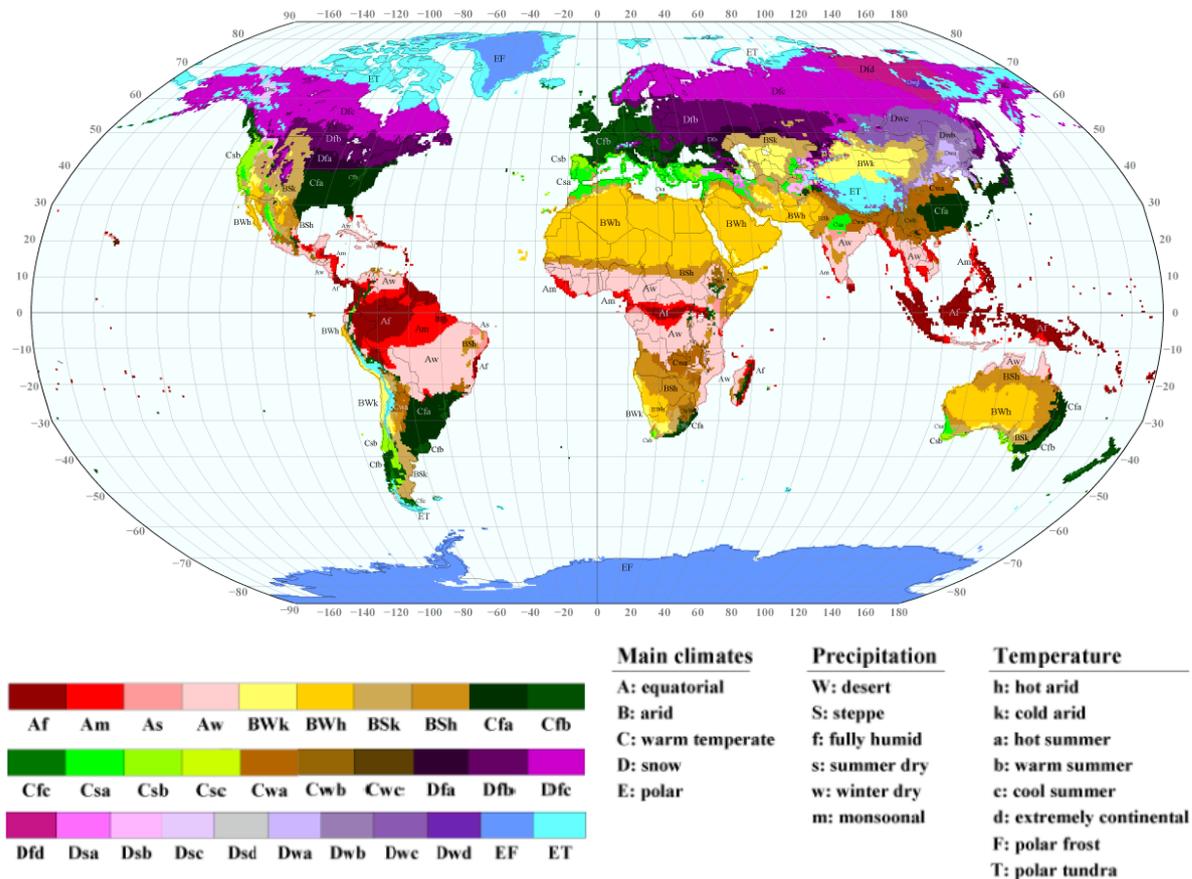


Figura 3.1 - Mapa mundial da classificação climática de Koppen-Geiger (adaptado de Kottek et al., 2006).

Baseando-se na relação entre a vegetação e o clima, Koppen dividiu o mundo em cinco grupos de vegetação: zona equatorial (A), zona árida (B), zona temperada (C) zona de neve (D) e zona polar (E). Estes grupos foram novamente decompostos em tipos e subtipos climáticos de acordo com a precipitação ocorrida e a temperatura do ar registada em cada local. Assim, relativamente à precipitação, consideram-se o clima desértico (W), clima das estepes (S), clima húmido (f), clima seco no verão (s), clima seco no inverno (w) e clima de monção (m). Em relação à temperatura do ar, adota-se a nomenclatura de clima árido quente (h), clima árido frio (k), verão quente (a), verão ameno (b), verão fresco (c), clima extremamente continental com inverno muito frio (d), clima gelado polar (F) e clima de tundra polar (T).

### 3.2 Zonas Climáticas em Estudo

Uma vez que o enfoque deste estudo é a Europa, serão estudadas as zonas climáticas que ocupam maioritariamente este continente. São estas as regiões Csa, Csb, Cfb, Dfb e Dfc, como se ilustra na Figura 3.2.

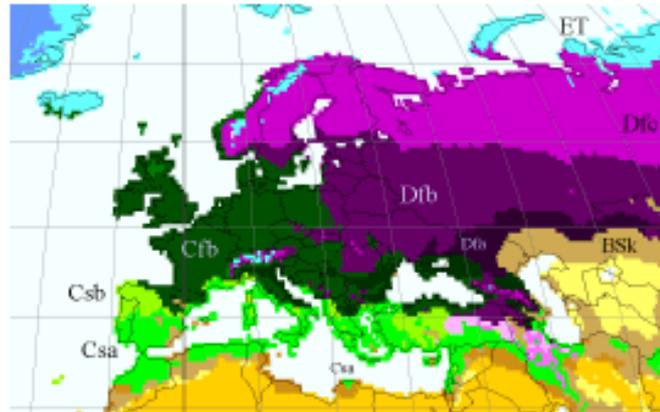


Figura 3.2 - Classificação climática de Koppen-Geiger para a Europa (adaptado de Kottek et al., 2006).

Segundo a classificação climática de Koppen-Geiger, a região Csa desfruta de um clima temperado com um verão quente e seco, ao passo que a região Csb possui um clima semelhante mas com verão ameno. A zona Cfb detém um clima temperado mas bastante húmido com um verão ameno. As zonas Dfb e Dfc contêm climas de neve e bastante húmidos, a primeira com um verão ameno e a segunda com um verão curto e fresco.

Neste trabalho, os dados climáticos de cada região climática foram obtidos através da média dos dados climáticos registados durante 30 anos em cinco cidades europeias pertencentes a cada região climática, exceto na zona Dfc, onde foram utilizados parâmetros climáticos de quatro cidades europeias e uma cidade canadiana, dada a dificuldade em obter parâmetros de cidades nesta região da Europa, visto se tratar de uma zona pouco povoada (ver Quadro 3.1).

Os parâmetros climáticos de Lisboa foram obtidos através da base de dados do INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, os da Corunha através do SWEC - Spanish Weather for Energy Calculations, os de São Remo através do IGDG - Italian climatic data collection “Gianni De Giorgio”, os de Val-d’Or através do CWEC - Canadian Weather for Energy Calculations e os das restantes cidades através do IWEC - International Weather for Energy Calculations.

Quadro 3.1 – Cidades consideradas na determinação dos dados climáticos de cada região climática.

Regiões climáticas	Cidades consideradas				
Csa	Lisboa (PT)	Madrid (SP)	Marselha (FR)	Roma (IT)	Atenas (GR)
Csb	Coimbra (PT)	Corunha (SP)	Nice (FR)	São Remo (IT)	Génova (IT)
Cfb	Berlim (DE)	Bruxelas (BE)	Viena (AT)	Londres (GB)	Praga (CZ)
Dfb	Kiev (UKR)	Helsínquia (FI)	Minsk (BY)	Moscovo (RU)	Estocolmo (SE)
Dfc	Arcangel (RU)	Kiruna (SE)	Ostersund (SE)	Tampere (FI)	Val-d'Or (CA)

### 3.3 Caracterização Climática das Zonas em Estudo

Nesta secção serão analisados os principais parâmetros climáticos das cinco regiões em estudo. Irão ser examinados dados como a temperatura média, os graus-dia de aquecimento e de arrefecimento, a radiação solar global e a humidade relativa.

#### 3.3.1 Temperatura Média

A temperatura média mensal de cada uma das cinco regiões climáticas em estudo está expressa no gráfico da Figura 3.3. Como se esperava, as temperaturas médias mais elevadas em cada mês ocorrem nas regiões climáticas que ocupam o sul da Europa: Csa e Csb. Seguem-se as zonas climáticas Cfb e Dfb, situadas no centro da Europa. Por último e como esperado, as temperaturas médias mais baixas ocorrem em Dfc, que se encontra no norte do continente europeu.

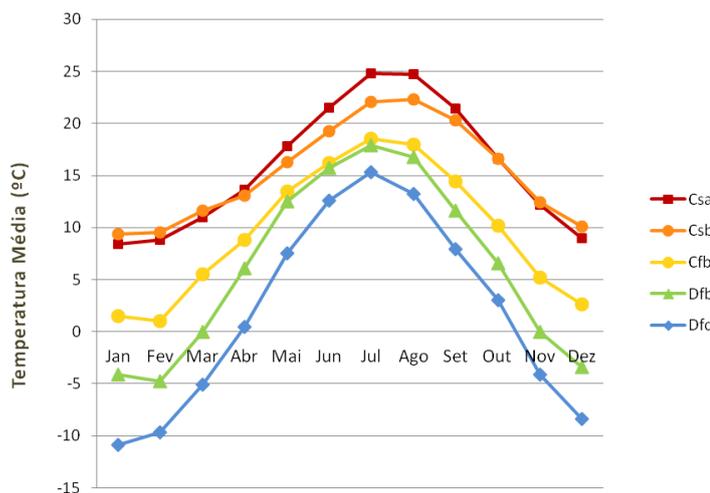


Figura 3.3 - Temperatura média mensal em cada região climática.

### 3.3.2 Graus-Dia de Aquecimento e de Arrefecimento

A Figura 3.4 e a Figura 3.5 exibem os graus-dia de aquecimento e de arrefecimento anual de cada região climática, calculados a partir de uma temperatura de referência de 18°C. Em Portugal, na determinação destes parâmetros costuma utilizar-se a temperatura de referência de 20°C. No entanto, internacionalmente é comum que a temperatura de referência tome o valor de 18°C, sendo por isso este o valor adotado neste estudo.

Como é possível observar na Figura 3.4, o valor de graus-dia de aquecimento anual assume o valor mínimo em Csb (sul europeu) e o máximo em Dfc (norte europeu). Estes valores apontam que, das cinco regiões climáticas, Dfc é a que possui maiores necessidades de aquecimento e Csb é a que possui menores, como se antevia, dado que Dfc é a região climática que apresenta temperaturas médias mais baixas e Csb é uma das regiões climáticas com temperaturas médias mais elevadas.

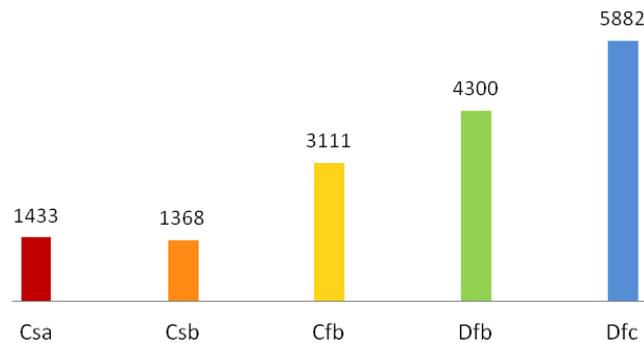


Figura 3.4 - Graus-dia de aquecimento anual para a temperatura de referência de 18°C em cada região climática.

Os graus-dia de arrefecimento anual estão representados na Figura 3.5, que demonstra uma tendência inversa: o máximo dá-se em Csa e o mínimo em Dfc, onde este parâmetro atinge o valor 0. Estes factos indicam que, em termos anuais, Csa é a zona climática que detém maiores necessidades de arrefecimento e Dfc é a que detém menores, o que já se esperava, uma vez que, Csa (situada no sul da Europa) é uma das regiões climáticas com temperaturas médias mais altas e Dfc (no norte europeu) é a região climática com temperaturas médias mais baixas. Pode ainda concluir-se que esta última região climática não apresenta quaisquer necessidades de arrefecimento.

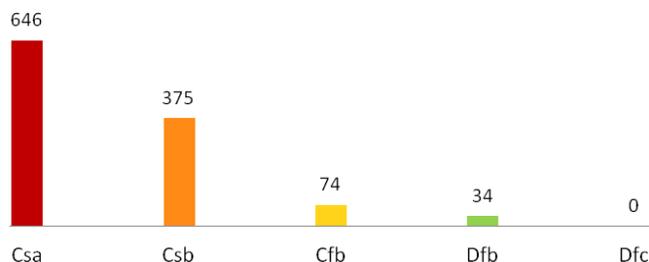


Figura 3.5 - Graus-dia de arrefecimento anual para a temperatura de referência de 18°C em cada região climática.

Em geral, os valores de graus-dia de arrefecimento anual são bastante mais baixos que os de graus-dia de aquecimento anual, o que significa que para a temperatura de referência de 18°C, todas estas regiões climáticas têm maiores necessidades de aquecimento do que de arrefecimento. Note-se porém, que para outros valores de temperatura de referência, estes resultados seriam diferentes.

### 3.3.3 Radiação Solar Global

O gráfico da Figura 3.6 apresenta a radiação solar global média em cada mês das cinco regiões climáticas. Como se esperava, a radiação solar é superior na zona climática Csa, seguida pela zona climática Csb, ambas situadas no sul europeu. As três regiões climáticas do centro e norte da Europa (Cfb, Dfb e Dfc) são as que apresentam menores valores de radiação solar, sendo estes muito baixos, comparativamente com os do sul.

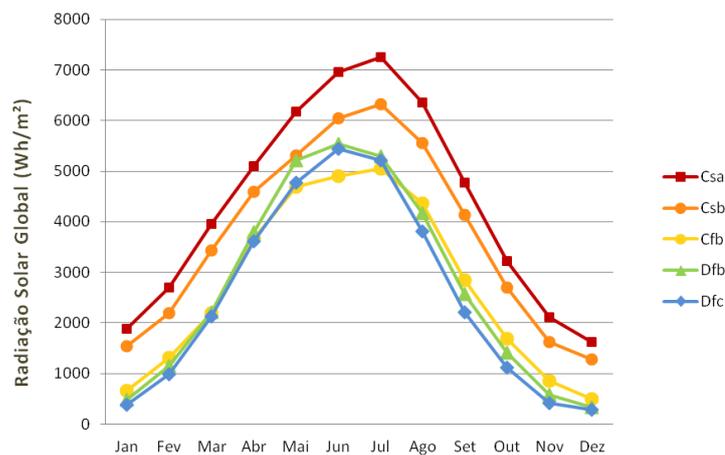


Figura 3.6 - Radiação solar global média mensal em cada região climática.

### 3.3.4 Humidade Relativa

A humidade relativa média mensal de cada região climática está expressa no gráfico da Figura 3.7. Dada a sua localização na Europa, esperava-se que Csa e Csb (sul europeu) fossem as regiões climáticas mais secas e Cfb, Dfb e Dfc (centro e norte europeu) fossem as mais húmidas. Além disso, a classificação climática de Koppen-Geiger atribui um verão seco (s) a Csa e Csb e um clima bastante húmido (f) a Cfb, Dfb e Dfc. Como se antevia, os valores de humidade relativa são elevados nas regiões climáticas Cfb, Dfb e Dfc e baixos em Csa. No entanto, a região climática Csb apresenta valores elevados de humidade relativa nos meses quentes, o que é surpreendente.

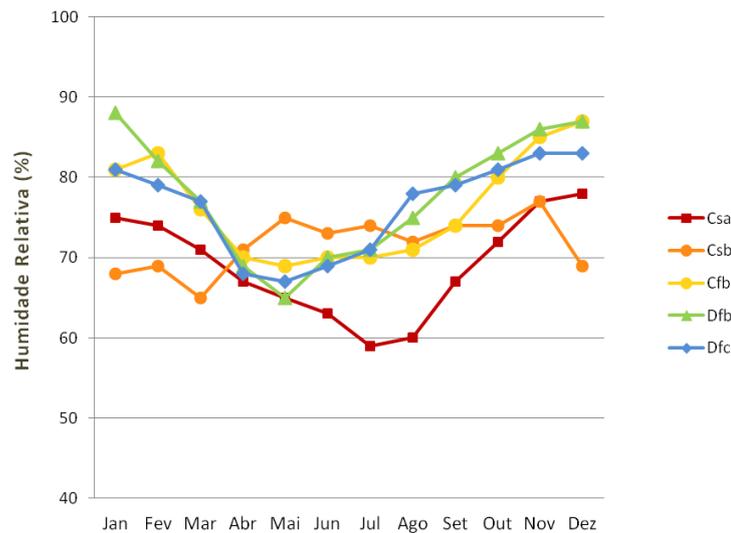


Figura 3.7 - Humidade relativa média mensal em cada região climática.

### 3.4 Autodesk Ecotect Analysis

O Ecotect Analysis é um programa da Autodesk para construção sustentável que usufrui de conceitos abrangentes e detalhados, usado para analisar o desempenho energético das edificações existentes e de novas edificações. Dispõe, para isso, de ferramentas e funcionalidades que possibilitam modelar edifícios e simular e analisar o comportamento energético dos mesmos no seu ambiente, de acordo com a sua arquitetura, os materiais que o constituem e as características climáticas da sua localização (Ecotect Analysis®, 2012). Neste trabalho, não serão modelados edifícios, mas sim testada a potencial eficácia dos vários sistemas passivos, ao longo do ano e em diferentes ambientes climáticos, através de uma das suas ferramentas.

#### 3.4.1 Weather Tool

A Weather Tool é a ferramenta do programa Autodesk Ecotect Analysis que será utilizada neste estudo para simular o desempenho de sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento, em cada uma das cinco regiões climáticas escolhidas.

Trata-se de um amplo mecanismo de análise climática direcionada para arquitetos, engenheiros e projetistas, que permite a total visualização dos parâmetros climáticos, através de gráficos a duas e três dimensões, rosas de vento e diagramas de trajeto solar. Efetua

também o estudo da radiação solar de modo a estabelecer a melhor orientação para as edificações respeitando as condicionantes do projeto (Weather Tool®, 2012).

Em relação à introdução de informação climática, tem a vantagem de identificar diversos formatos de arquivos meteorológicos internacionais, assim como a de aceitar que os utilizadores empreguem formatos personalizados de importação de dados.

Contudo, a função mais relevante desta ferramenta, para o presente trabalho, é a de avaliar o potencial relativo de vários sistemas de aquecimento e arrefecimento passivo a partir das análises psicrométrica e bioclimática da região onde se inserem. As técnicas passivas analisadas pela Weather Tool são o aquecimento solar passivo (onde se incluem sistemas de ganhos diretos e indiretos), a ventilação natural, o arrefecimento evaporativo direto, o arrefecimento evaporativo indireto, o efeito da massa térmica e a combinação entre massa exposta e ventilação noturna.

### **3.5 Simulação e Análise do Desempenho dos Sistemas Passivos**

Com a intenção de estudar o comportamento das várias técnicas passivas e avaliar a sua eficácia nas diferentes zonas climáticas foi efetuado o seguinte procedimento. Os parâmetros climáticos de cada zona climática foram introduzidos na Weather Tool, que os analisa e a partir destes determina as melhorias que cada sistema passivo pode proporcionar a cada clima, a nível de conforto térmico no interior dos edifícios. Mais detalhadamente, para cada região climática, a ferramenta calcula a percentagem de horas de conforto em cada mês, no interior de um edifício genérico, sem utilizar qualquer sistema passivo, ao utilizar cada um dos sistemas individualmente e ao utilizar todos esses sistemas em conjunto.

Além dos parâmetros climáticos, a percentagem de horas de conforto no interior dos edifícios depende de outros fatores, como é o caso da percentagem de envidraçados na fachada, da sua eficiência e da insolação que afetam o desempenho das técnicas de aquecimento solar passivo, da velocidade do ar que afeta a eficácia da ventilação natural e da atividade no interior dos edifícios que afeta a eficácia de todos os sistemas analisados. Foi definido que a percentagem de envidraçados na fachada é de 20%, a sua eficiência é média e a insolação é alta, a velocidade do ar é perceptível e a atividade no interior dos edifícios é sedentária. Note-se que se se aumentasse a percentagem de envidraçados, a sua eficácia ou a insolação, a percentagem de horas de conforto promovida pelas técnicas de aquecimento solar passivo seria maior e se a velocidade do ar aumentar, o acréscimo de conforto proporcionado pela ventilação natural seria superior, ao passo que se a atividade dentro do edifício aumentar, as melhorias no conforto higrotérmico poderiam diminuir no verão e aumentar no inverno.

De seguida, expõem-se os resultados obtidos segundo uma análise anual e mensal.

### 3.5.1 Análise Anual

Os gráficos apresentados nesta secção expõem a percentagem de horas de conforto anual no interior dos edifícios, antes e depois da utilização de sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento, nas cinco regiões climáticas em estudo.

Em termos anuais, a percentagem de horas de conforto no interior de edifícios antes da aplicação de sistemas passivos é superior no sul da Europa, diminuindo à medida que se caminha para norte, tomando valores de 14%, 10%, 8,5%, 9% e 6% nas regiões climáticas Csa, Csb, Cfb, Dfb e Dfc, respetivamente. Assim, o conforto higrotérmico é tanto maior quanto mais quentes forem as regiões climáticas, o que se antevia dado que em todas elas as necessidades de aquecimento são maiores que as de arrefecimento (para a temperatura de referência de 18°C).

#### Aquecimento Solar Passivo

Com o emprego de sistemas de aquecimento solar passivo, a percentagem anual de horas de conforto aumenta significativamente nas regiões climáticas Csa e Csb (sul da Europa) em 10% e 8%, respetivamente, mantendo-se, no entanto, praticamente inalterada nas restantes regiões climáticas (do centro e norte europeu), como pode ser observado na Figura 3.8. Este facto pode ser explicado pela radiação solar ser elevada no sul da Europa e bastante reduzida no centro e norte, o que faz com que estas técnicas de aquecimento sejam bastante mais eficazes nas regiões climáticas do sul da Europa.

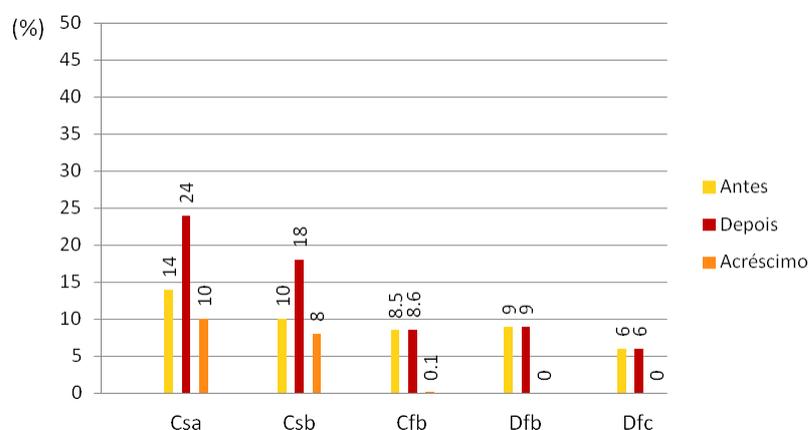


Figura 3.8 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de técnicas de aquecimento solar passivo em cada região climática.

## Ventilação Natural

A ventilação natural como técnica de arrefecimento é mais eficaz nas zonas climáticas Csa e Csb (sul europeu) onde o acréscimo de horas de conforto no interior dos edifícios atinge os 12% e 13%, como se pode ver na Figura 3.9. Nas restantes regiões climáticas, situadas no centro e norte da Europa, este acréscimo é muito reduzido, uma vez que as necessidades de arrefecimento destas são baixas e que este método é adequado a climas quentes e moderados, como se indica na subsecção 2.2.4 Ventilação Natural para Arrefecimento, sendo que estas características se encontram preferencialmente nas regiões climáticas que ocupam o sul da Europa.

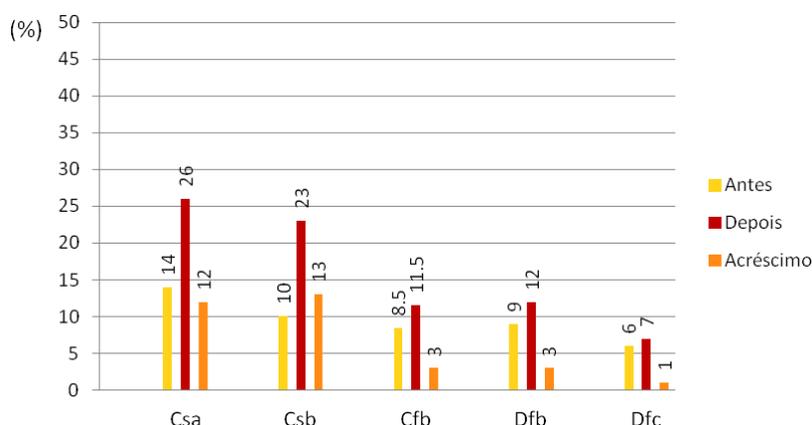


Figura 3.9 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de ventilação natural em cada região climática.

## Arrefecimento Evaporativo Direto

A Figura 3.10 mostra que as melhorias provocadas pelo arrefecimento evaporativo direto no conforto interior dos edifícios são pouco significativas em todas as regiões climáticas estudadas, evidenciando que este processo de arrefecimento é pouco eficaz nos climas europeus. Possivelmente, este facto deve-se a este método ser mais eficaz em climas mais quentes e mais secos do que os climas da Europa, visto que é bastante utilizado no médio oriente e adequado a climas com temperaturas exteriores até 40°C, como foi referido na subsecção 2.2.2 Arrefecimento Evaporativo. Este é, de todos os sistemas analisados pela ferramenta, o que potencia menores melhorias ao conforto térmico no interior dos edifícios.

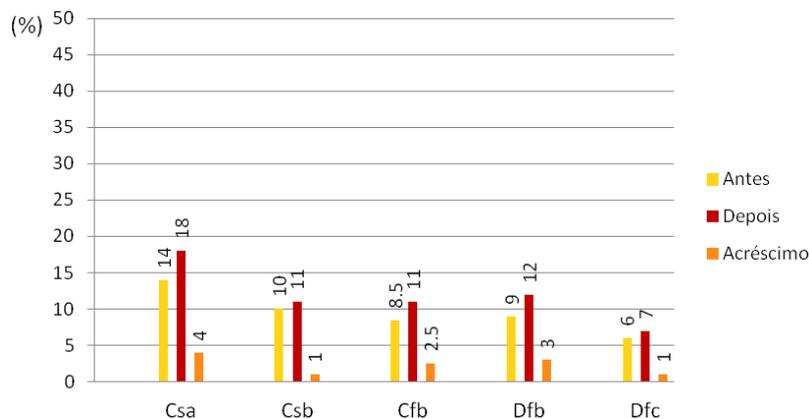


Figura 3.10 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de técnicas de arrefecimento evaporativo direto em cada região climática.

### Arrefecimento Evaporativo Indireto

As principais melhorias no conforto higrotérmico alcançadas pelo arrefecimento evaporativo indireto dão-se nas regiões climáticas Csa e Csb, do sul europeu, promovendo aumentos de 14,5% e 12% nas horas de conforto anual, como é possível observar na Figura 3.11. Nas restantes regiões climáticas, que ocupam o centro e norte europeu, não se fazem sentir melhorias consideráveis. Este resultado seria de esperar, uma vez que o processo de arrefecimento evaporativo indireto apenas é eficiente em climas secos, como é referido na subsecção 2.2.2 Arrefecimento Evaporativo, e segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, Csa e Csb apresentam verões secos (s) enquanto Cfb, Dfb e Dfc possuem climas bastante húmidos (f).

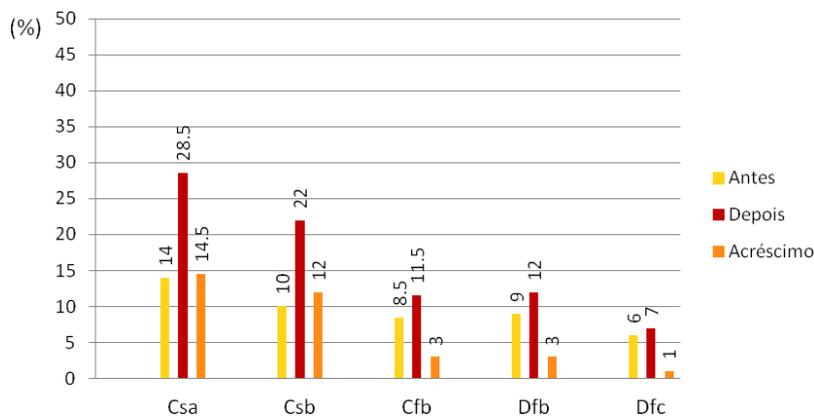


Figura 3.11 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de técnicas de arrefecimento evaporativo indireto em cada região climática.

### Efeito da Massa Térmica

A Figura 3.12 demonstra que o efeito da massa térmica dos edifícios consegue alcançar melhorias consideráveis no seu conforto interior em todas as regiões climáticas analisadas, evidenciando assim a sua importância para o conforto térmico. O aumento da percentagem de horas de conforto anual é maior nas regiões climáticas Csa e Csb, onde atinge valores de 26% e 23%, respetivamente.

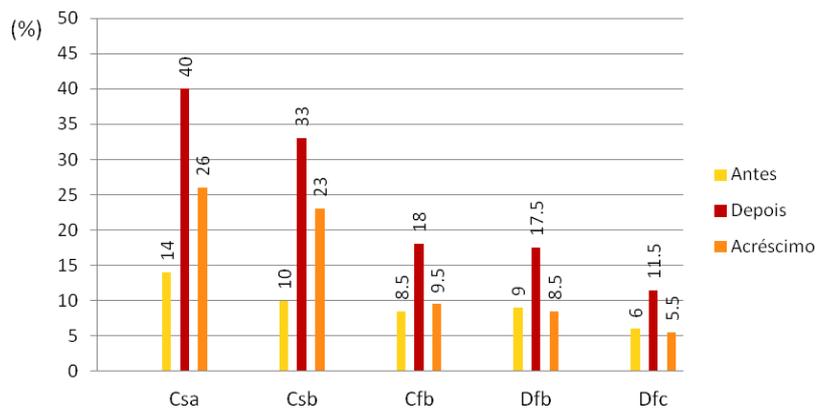


Figura 3.12 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização de massa térmica em cada região climática.

### Massa Exposta e Ventilação Noturna

As melhorias mais significativas no conforto interno são promovidas pela combinação entre massa exposta e ventilação noturna. Verifica-se neste caso um aumento significativo das horas de conforto em todas as regiões climáticas estudadas. Os aumentos mais relevantes são de 28% na zona Csa e 24% na zona Csb, ambas localizadas no sul (Figura 3.13). O facto de esta combinação trazer mais melhorias de conforto às regiões climáticas do sul europeu pode relacionar-se com o facto de tanto o efeito da massa térmica como a eficácia da ventilação natural serem maiores nestas regiões climáticas, dado o seu clima quente e moderado.

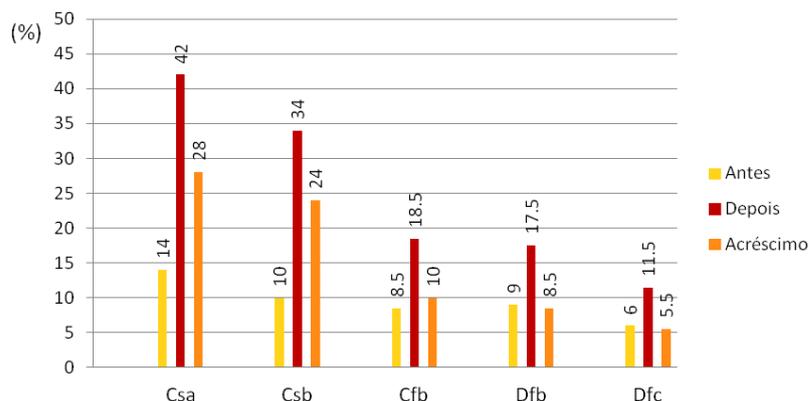


Figura 3.13 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização da combinação entre massa exposta e ventilação noturna em cada região climática.

### Múltiplas Técnicas Passivas

A utilização de múltiplas técnicas passivas em simultâneo foi também abordada, nomeadamente a conjugação de sistemas de aquecimento solar passivo, ventilação natural, arrefecimento evaporativo direto, arrefecimento evaporativo indireto, efeito da massa térmica e combinação entre massa exposta e ventilação noturna. Sistemas estes que foram anteriormente referidos e estudados individualmente. Os resultados obtidos através da análise efetuada pela ferramenta computacional são exibidos na Figura 3.14 e demonstram um aumento considerável da percentagem de horas de conforto anual em todas as regiões climáticas estudadas. Este acréscimo é claramente superior nas regiões climáticas do sul europeu (Csa e Csb), o que se podia antever, dada a análise anterior em que o mesmo acontecia para cada sistema analisado individualmente, apesar de este aumento não corresponder à soma das contribuições individuais de cada técnica. O acréscimo é pois de 32% na região Csa e de 27% na região Csb.

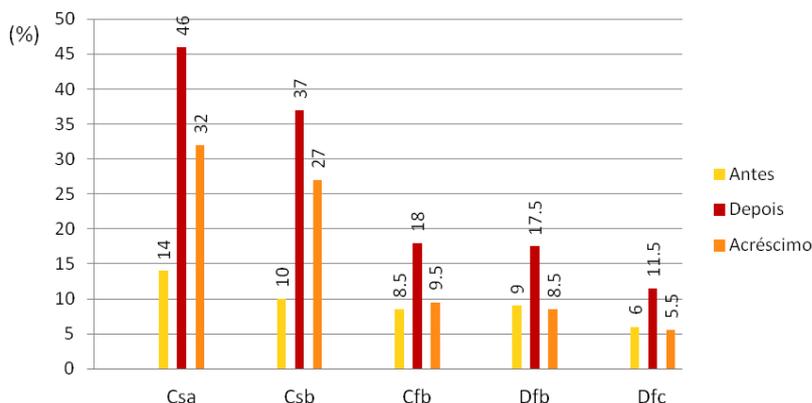


Figura 3.14 - Percentagem de horas de conforto anual, antes e depois da utilização simultânea de múltiplas técnicas passivas em cada região climática.

Como foi observado, o desempenho de cada sistema passivo é bastante diferente em cada região climática do continente europeu, conforme ilustrado na Figura 3.15. Em suma, as regiões climáticas que potencialmente mais beneficiam da utilização destes sistemas são as do sul da Europa, Csa e Csb, sendo estes benefícios maiores na região climática mais a sul: Csa. Nas regiões climáticas Cfb, Dfb e Dfc, do centro e norte europeu, as melhorias são pouco expressivas ou inexistentes com a maioria dos sistemas passivos, principalmente em Dfc que ocupa o norte europeu. Desta forma, conclui-se que dentro do continente europeu, a aplicação de sistemas passivos deve ser privilegiada nas regiões climáticas do sul, onde é possível obter um retorno satisfatório da sua utilização. Nas regiões climáticas que ocupam o centro e norte europeu, não se justifica a aplicação da maioria destes sistemas, pois o retorno resultante da sua utilização é muito reduzido.

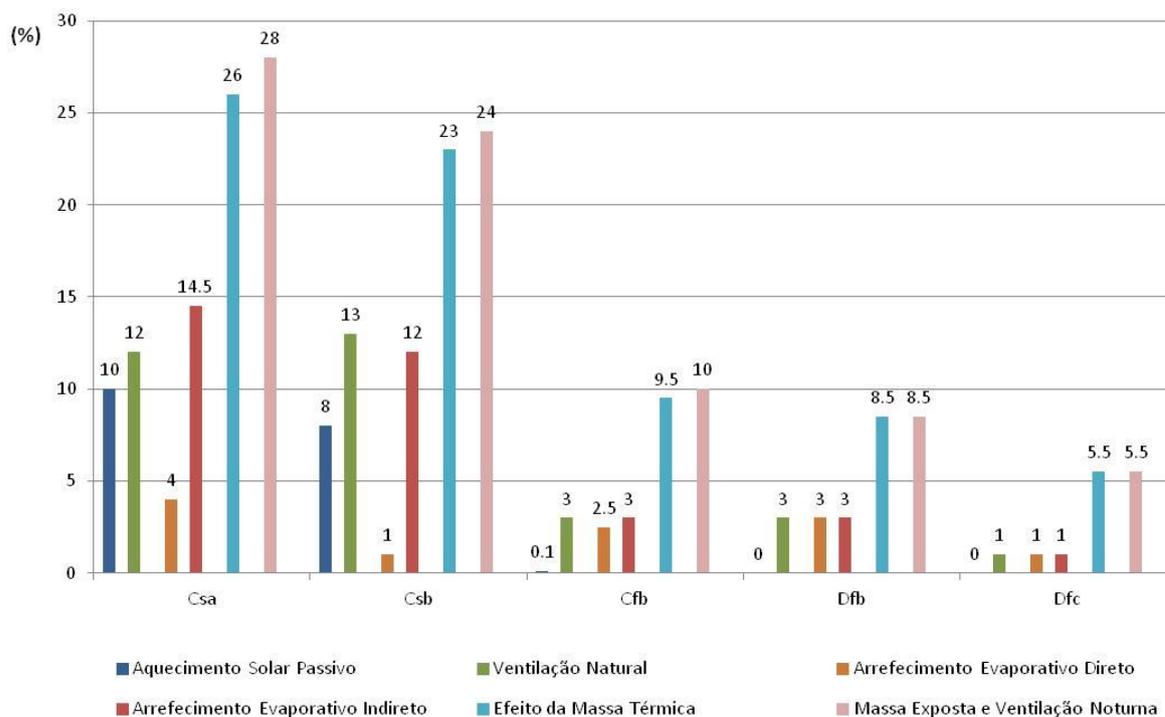


Figura 3.15 – Acréscimo da percentagem de horas de conforto anual promovido pela utilização de técnicas passivas, em cada região climática.

Pode concluir-se da Figura 3.15, que em todas as regiões climáticas da Europa, as melhorias mais significativas no conforto anual são promovidas pelo efeito da massa térmica e pela combinação entre massa exposta e ventilação noturna, sendo estas claramente superiores às melhorias promovidos pelos outros sistemas passivos, demonstrando assim a sua importância e eficácia no conforto térmico interior.

Por outro lado, o arrefecimento evaporativo direto não traz praticamente melhorias ao conforto térmico em nenhuma região climática analisada, não sendo pois apropriado aos climas europeus, como foi referido anteriormente.

Dos restantes sistemas, em todas as regiões climáticas europeias, o arrefecimento evaporativo indireto e a ventilação natural revelam-se os mais eficazes, seguidos das técnicas de aquecimento solar passivo. Note-se que estes dois sistemas de arrefecimento passivo são mais eficientes nas regiões climáticas onde as necessidades de arrefecimento são maiores, ao passo que as técnicas de aquecimento solar passivo são mais eficientes onde as necessidades de aquecimento são menores. Nesse sentido, o rendimento dos sistemas de arrefecimento dá uma melhor resposta à problemática necessidade/solução, face ao dos sistemas de aquecimento.

### 3.5.2 Análise Mensal

A exposição seguinte analisa a percentagem de horas de conforto mensal no interior dos edifícios, antes e depois da utilização de técnicas passivas de aquecimento e arrefecimento, nas cinco zonas climáticas em estudo. Esta abordagem sazonal permite assim visualizar a variação da adequabilidade de cada técnica passiva ao longo do ano.

#### Zona Csa

Sem usufruir de qualquer sistema passivo de aquecimento ou arrefecimento, a zona climática Csa apresenta maior percentagem de horas de conforto interno nos meses de primavera e verão, sendo esta de 28%, 33%, 29%, 28% e 35% em maio, junho, julho, agosto e setembro, respetivamente. Esta percentagem assume valores baixos de 4% em abril e 15% em outubro, sendo nula nos restantes meses do ano (ver Figura A.1 no Anexo A), de acordo com o espectável dado que nesta região climática as necessidades de arrefecimento anual são inferiores às de aquecimento, para a temperatura de referência de 18°C.

A aplicação de sistemas de aquecimento solar passivo traz a esta zona climática melhorias consideráveis nos meses de abril, maio e outubro, permitindo acréscimos na percentagem de horas de conforto de 26,5%, 20,5%, e 30,5% (Figura A.1 a). As principais melhorias acontecem pois nos meses em que existe necessidade de aquecimento e ao mesmo tempo radiação solar suficientemente elevada para que o aquecimento solar passivo seja eficaz.

A ventilação natural traz melhorias consideráveis a esta região climática. Os principais acréscimos na percentagem de horas de conforto são de 28%, 40%, 42,5% e 25%, em junho, julho, agosto e setembro (Figura A.1 b), pois é nestes meses que a necessidade de arrefecimento é maior, podendo ser promovido por este método devido às baixas temperaturas noturnas.

Esta zona climática beneficia relativamente pouco dos métodos de arrefecimento evaporativo direto, pois como se concluiu na subsecção 3.5.1 Análise Anual, este não é adequado aos climas europeus. Apenas os meses de junho e de setembro registam aumentos na percentagem de horas de conforto, no valor de 17% (Figura A.1 c), dado estes serem meses quentes e secos o que aumenta a eficácia deste processo.

O arrefecimento evaporativo indireto promove elevadas melhorias no conforto interno, principalmente em junho, julho, agosto e setembro, que atingem acréscimos de 31%, 57%, 59% e 25% na percentagem de horas de conforto (Figura A.1 d). Esperava-se este resultado,

dado que estes meses têm altas necessidades de arrefecimento e são quentes e secos o que promove a eficácia desta técnica.

Com os efeitos da massa térmica, as horas de conforto interno aumentam significativamente, em 54%, 56%, 59% e 52% em junho, julho, agosto e setembro. São também importantes os aumentos de 33% e 30% registados em maio e outubro (Figura A.1 e). As melhorias no conforto são tanto maiores quanto mais quentes são os meses.

Os resultados da combinação entre massa exposta e ventilação noturna distinguem-se dos efeitos da massa térmica pelo acréscimo da percentagem de horas de conforto em julho e agosto ser de 68% e 70%, sendo portanto muito elevado (Figura A.1 f). Note-se que, com esta técnica, em julho e em agosto, a percentagem de horas de conforto atinge quase os 100%.

Assim, é possível concluir que o sistema mais vantajoso para esta região climática é sem dúvida a combinação entre massa exposta e ventilação noturna, seguida pelo efeito da massa térmica, ambos trazendo benefícios entre maio e outubro. Seguem-se o arrefecimento evaporativo indireto e a ventilação natural, cujos benefícios ocorrem entre junho e setembro. Tal como esperado, as melhorias alcançadas no conforto higrotérmico através destas quatro técnicas de arrefecimento passivo são consideravelmente superiores nos meses mais quentes do ano, ou seja em julho e agosto.

Até aqui cada sistema foi analisado individualmente. Analisa-se agora a aplicação de todos estes sistemas conjugados em simultâneo. Neste contexto são atingidas 98% e 99% de horas de conforto interno em julho e em agosto, ou seja, o conforto higrotérmico é alcançado quase na totalidade nestes meses (ver Figura A.1 g). Os acréscimos mais altos ocorrem de abril a outubro e assumem valores de 28%, 34%, 55%, 69%, 71%, 53% e 37%, o que se podia antever dado que é nestes meses que são promovidos os maiores aumentos de horas de conforto interior pelos sistemas passivos quando aplicados individualmente.

## **Zona Csb**

Antes da aplicação de sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento, a zona climática Csb conta com 5,5%, 29%, 17%, 26,5%, 32% e 8% de horas de conforto em maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro, respetivamente, sendo esta percentagem nula no resto do ano (ver Figura A.2 no Anexo A). Confirma-se desta forma, a existência de maior necessidade de aquecimento do que de arrefecimento nesta zona climática, para a temperatura de referência de 18°C.

As técnicas de aquecimento solar passivo trazem melhorias ao conforto interior nos meses em que se conjuga a necessidade de aquecimento com a radiação solar necessária para que este sistema seja eficaz. Assim, os maiores acréscimos na percentagem de horas de conforto dão-se em maio, junho e outubro, assumindo valores de 37,5%, 14% e 30%, respetivamente (Figura A.2 a).

A ventilação natural aumenta consideravelmente o conforto higrotérmico em junho, julho, agosto e setembro, pois são estes os meses com maior necessidade de arrefecimento que pode ser promovido por ventilação natural, tirando partido das baixas temperaturas noturnas e matinais. Deste modo conseguem-se aumentos de 17%, 64%, 57,5% e 20% para a percentagem de horas em cada um destes meses (Figura A.2 b).

Não se verificam melhorias significativas com a utilização de processos de arrefecimento evaporativo direto (Figura A.2 c). A sua ineficácia nesta zona climática deve-se a este processo ser adequado a climas mais quentes e mais secos, sendo Csb a zona climática analisada com maiores valores de humidade relativa em maio, junho e julho.

O mesmo não se pode dizer do arrefecimento evaporativo indireto que promove aumentos de 17%, 55%, 51,5% e 20% na percentagem de horas de conforto em junho, julho, agosto e setembro, respetivamente (Figura A.2 d). A sua eficácia é bastante elevada e incide nos meses mais quentes e secos do ano, como seria de esperar, pois estes têm as necessidades de arrefecimento mais altas e as características climáticas que promovem o bom desempenho desta técnica.

O efeito da massa térmica nos edifícios permite que a percentagem de horas de conforto aumente significativamente. Os aumentos mais relevantes ocorrem nos meses de estação quente, entre maio e outubro e são de 34,5%, 42%, 62%, 62,5%, 51% e 27% (Figura A.2 e).

Os resultados da combinação entre massa exposta e ventilação noturna são análogos aos efeitos da massa térmica (Figura A.2 f). Como se esperava, as principais melhorias dão-se nos meses quentes, pois é nesses meses que o efeito da massa térmica e a ventilação natural são mais eficazes.

Desta forma, conclui-se que os efeitos da massa térmica e a combinação entre massa exposta e ventilação noturna são as técnicas que, em geral, trazem mais benefícios a esta região climática, ocorrendo estes entre maio e outubro, seguidos da ventilação natural e do arrefecimento evaporativo indireto, cujos benefícios se dão entre junho e setembro. As melhorias mais relevantes no conforto higrotérmico promovidas por estes quatro sistemas passivos ocorrem em julho e agosto.

No entanto, no caso particular dos meses de maio e outubro, verifica-se que os maiores benefícios são conseguidos pelos processos de aquecimento solar passivo.

As múltiplas técnicas combinadas proporcionam melhorias no conforto higrotérmico bastante consideráveis. Constata-se que em agosto a percentagem de horas de conforto atinge quase os 100% (ver Figura A.2 g). As principais melhorias no conforto interior ocorrem entre maio e outubro, em que se observam aumentos da percentagem de horas de conforto de 40,5%, 43%, 74%, 70,5%, 54% e 34% em cada mês. Antevia-se este resultado, dado que os sistemas passivos utilizados individualmente proporcionam melhorias mais relevantes nestes meses da estação quente.

### **Zona Cfb**

Sem qualquer sistema de aquecimento ou arrefecimento passivo em funcionamento, a zona climática Cfb disfruta de 12% de horas de conforto térmico no interior dos edifícios em maio, 25% em junho, 32% em julho, 29% em agosto e 6% em setembro (ver Figura A.3 no Anexo A), evidenciando a superioridade das necessidades de aquecimento em relação às de arrefecimento, para a temperatura de referência de 18°C.

Com a utilização de processos de aquecimento solar passivo, não são observadas melhorias no conforto térmico, o que pode ser explicado pela radiação solar nesta região climática não ser suficiente para que este sistema seja eficaz (Figura A.3 a).

A ventilação natural possibilita um incremento do conforto interior, sobretudo em julho e agosto, onde se registam acréscimos de 16% na percentagem de horas de conforto (Figura A.3 b), o que seria espectável, dada a necessidade de arrefecimento existente nestes que são os meses mais quentes do ano e a ocorrência de baixas temperaturas noturnas que permitem arrefecer o interior do edifício e a sua estrutura através da ventilação natural.

Dos métodos de arrefecimento evaporativo direto resulta um aumento não muito alto da percentagem de horas de conforto, no valor de 13% em julho e em agosto (Figura A.3 c). Este método é eficiente em climas muito quentes e secos, o que explica que o acréscimo se dê nestes meses mas também que o acréscimo seja baixo, pois o clima desta região climática não é suficientemente quente e seco.

O arrefecimento evaporativo indireto tem resultados idênticos aos da ventilação natural (Figura A.3 d), o que se esperava, uma vez que este é um processo eficaz em ambientes quentes e secos, condições essas que ocorrem em julho e agosto.

O efeito da massa térmica aumenta consideravelmente a percentagem de horas de conforto higrotérmico nos meses mais quentes do ano. Os acréscimos mais elevados dão-se em julho e agosto com valores de 32%. No entanto, também ocorrem acréscimos importantes em maio, junho e setembro de 13%, 19% e 14% (Figura A.3 e).

Os resultados da combinação entre massa exposta e ventilação noturna são semelhantes aos do efeito da massa térmica, com aumentos da percentagem de horas de conforto um pouco maiores em julho e agosto (Figura A.3 f). As melhorias mais significativas ocorrem nos meses quentes, tal como se esperava.

Os efeitos da massa térmica e a combinação entre massa exposta e ventilação noturna causam os progressos mais significativos, a nível de conforto térmico, nesta zona climática. Estes progressos ocorrem nos meses quentes, isto é, entre maio e setembro, sendo mais elevados em julho e agosto. Além disso, o arrefecimento evaporativo indireto e a ventilação natural trazem também algumas melhorias, principalmente em julho e em agosto.

Com todas estas técnicas conjugadas em simultâneo, a percentagem de horas de conforto aumenta 34% em julho e 32% em agosto. Em maio, junho e setembro este acréscimo é de 13%, 19% e 14% (ver Figura A.3 g). As melhorias no conforto higrotérmico registam-se nos meses quentes e devem-se substancialmente ao efeito da massa térmica e à combinação entre massa exposta e ventilação noturna, que apresentam resultados bastante mais elevados que os outros sistemas passivos.

### **Zona Dfb**

Sem o emprego de sistemas passivos de aquecimento ou arrefecimento nos edifícios, a zona climática Dfb dispõe de 8%, 32%, 45%, 23% e 3% de horas de conforto interno nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro, respetivamente, sendo este valor nulo nos restantes meses do ano (ver Figura A.4 no Anexo A), comprovando que as necessidades de arrefecimento são inferiores às de aquecimento, para a temperatura de referência de 18°C.

O aquecimento solar passivo não provoca alterações à percentagem de horas de conforto, dado a radiação solar ser bastante baixa nesta região climática (Figura A.4 a).

Dos métodos de ventilação natural, arrefecimento evaporativo direto e arrefecimento evaporativo indireto resulta um aumento baixo da percentagem de horas de conforto, que oscila entre 13 e 14% em julho e agosto (Figura A.4 b; c; d), dado que as necessidades de arrefecimento são muito baixas nesta região climática.

A massa térmica possibilita o incremento significativo das horas de conforto térmico nos meses mais quentes, atingindo acréscimos na percentagem de horas de conforto de 20%, 28% e 30%, em junho, julho e agosto, respetivamente (Figura A.4 e).

A combinação entre massa exposta e ventilação noturna apresenta resultados semelhantes aos da massa térmica. O aumento da percentagem de horas de conforto dá-se nos meses quentes (Figura A.4 f), como se antevia, visto que é nesses meses que o efeito da massa térmica e a ventilação natural são mais eficazes.

Potencialmente, esta região climática tira mais partido dos efeitos da massa térmica e da combinação entre massa exposta e ventilação noturna do que de qualquer outro sistema passivo analisado. Estes promovem aumentos da percentagem de horas de conforto interno nos meses quentes, principalmente em junho, julho e agosto. Além disso, permitem também pequenas melhorias no conforto interior em maio e setembro, o que não acontece com nenhuma outra técnica analisada.

A aplicação de múltiplas técnicas passivas permite que o conforto higrotérmico aumente significativamente nos meses mais quentes do ano, fazendo com que a percentagem de horas de conforto interior aumente 20%, 28% e 31%, em junho, julho e agosto, respetivamente (ver Figura A.4 g). Este resultado deve-se principalmente ao efeito da massa térmica e à combinação entre massa exposta e ventilação noturna, pois estas técnicas proporcionam melhorias ao conforto consideravelmente superiores às dos restantes sistemas analisados.

### **Zona Dfc**

A zona climática Dfc é a que apresenta menor percentagem de horas de conforto em cada mês, antes da utilização de processos de aquecimento e arrefecimento passivo, desfrutando de apenas 2% em maio, 15% em junho, 42% em julho e 14% em agosto (ver Figura A.5 no Anexo A), pois é a zona climática com temperaturas médias mais baixas, sendo as suas necessidades de aquecimento muito mais elevadas que as das restantes regiões climáticas e as suas necessidades de arrefecimento nulas, para a temperatura de referência de 18°C.

Os métodos de aquecimento solar passivo quase não trazem melhorias ao conforto térmico, o que se deve à radiação solar ser muito reduzida nesta região climática (Figura A.5 a).

Tanto a ventilação natural como o arrefecimento evaporativo direto e o arrefecimento evaporativo indireto proporcionam acréscimos insignificantes à percentagem de horas de conforto interno, uma vez que praticamente não há necessidades de arrefecimento nesta região climática (Figura A.5 b; c; d).

O efeito da massa térmica nos edifícios aumenta consideravelmente o conforto higrotérmico no verão, promovendo aumentos na percentagem de horas de conforto de 20% em junho, julho e agosto (Figura A.5 e).

A combinação entre massa exposta e ventilação noturna apresenta os mesmos resultados que o efeito da massa térmica (Figura A.5 f). Nos meses de verão ocorrem os acréscimos mais relevantes da percentagem de horas de conforto, uma vez que a utilização da massa térmica é mais eficaz nesses meses.

Torna-se claro que, para esta região climática, as únicas soluções vantajosas são a utilização de massa térmica e a combinação entre massa exposta e ventilação noturna. O aumento da percentagem de horas de conforto higrotérmico, utilizando estas técnicas, dá-se sobretudo em junho, julho e agosto.

Na Figura A.5 g, pode ver-se que a utilização de todas estas técnicas em simultâneo provoca um aumento significativo na percentagem de horas de conforto nos meses mais quentes. Assim, os maiores acréscimos dão-se em junho, julho e agosto e rondam os 20%. Esta melhoria do conforto interno deve-se à utilização de massa térmica e à combinação entre massa exposta e ventilação noturna, já que apenas estes sistemas promovem melhorias no conforto higrotérmico desta região climática.

Como se observa na Figura 3.16, em todas as regiões climáticas da Europa, os benefícios promovidos pela utilização de sistemas passivos ocorrem nos meses mais quentes e são tanto maiores quanto mais quentes forem os meses.

O aquecimento solar passivo apenas é promovido nas regiões climáticas Csa e Csb nos meses de meia estação (março, abril, maio, outubro e novembro), pois nos meses mais frios e nas regiões climáticas com maior necessidade de aquecimento, a radiação solar não é suficiente para que os sistemas de aquecimento solar passivo sejam eficazes. Pode também concluir-se que a percentagem de envidraçados terá de ser superior ao valor utilizado nestas simulações (20%), para se poder tirar partido do aquecimento solar passivo, em particular nos climas mais frios (regiões climáticas Cfb, Dfb e Dfc). Por exemplo para a região Dfc, se se considerar 50% de envidraçados na fachada, o acréscimo da percentagem de horas de conforto aumenta 24% em junho, 10% em julho e 21% em agosto, relativamente à simulação anterior. Já se os envidraçados ocuparem 100% da fachada, o acréscimo de conforto nesta região climática aumenta 31%, 42%, 12%, 39% e 27% em maio, junho, julho, agosto e setembro, respetivamente.

Os meses mais frios do ano: janeiro, fevereiro e dezembro não beneficiam da utilização de sistemas passivos em nenhuma das regiões climáticas estudadas. Assim, conclui-se que as técnicas passivas de arrefecimento são mais eficientes que as de aquecimento. Também por este motivo, as melhorias no conforto higrotérmico, promovidas pela utilização de sistemas passivos, são consideravelmente maiores, em todos os meses, nas regiões climáticas do sul europeu (Csa e Csb), que são mais quentes e têm maiores necessidades de arrefecimento que as restantes.

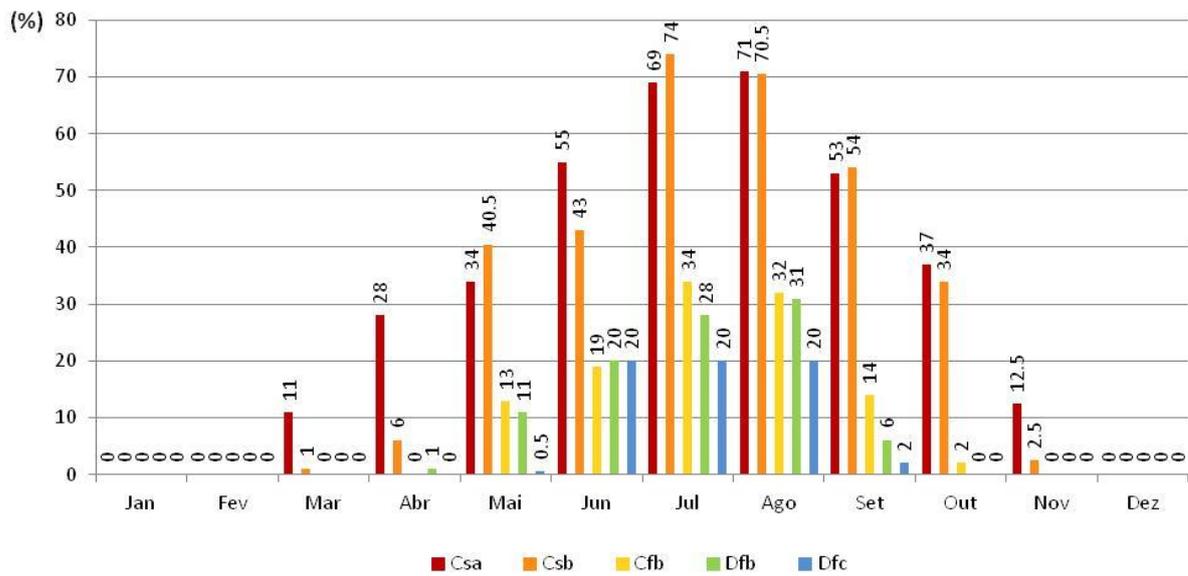


Figura 3.16 - Acréscimo da percentagem de horas de conforto mensal promovido pela utilização simultânea de múltiplas técnicas passivas em cada região climática.

## 4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 Conclusões

Nesta dissertação estudaram-se as características de vários sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento e o seu desempenho em diferentes regiões climáticas europeias, averiguando a sua adequabilidade a cada tipo de clima. Apresentam-se, de seguida, as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho.

Segundo a simulação do desempenho de sistemas passivos efetuada, em todas as zonas climáticas da Europa, são o efeito da massa térmica e a combinação entre massa exposta e ventilação noturna que promovem as melhorias mais significativas no conforto interior, sendo estas claramente superiores às melhorias promovidas pelos outros sistemas passivos, demonstrando mais uma vez a sua importância e eficiência no conforto térmico interior.

Pelo contrário, o arrefecimento evaporativo direto não traz praticamente benefícios ao conforto higrotérmico em nenhuma zona climática estudada, concluindo-se que esta não é uma solução adequada aos climas europeus.

Das restantes técnicas passivas, em todas as zonas climáticas da Europa, o arrefecimento evaporativo indireto e a ventilação natural revelam-se as mais eficazes, seguidas das técnicas de aquecimento solar passivo. Note-se que estes dois métodos de arrefecimento passivo são mais eficientes nas regiões climáticas onde as necessidades de arrefecimento são maiores, ao passo que as técnicas de aquecimento solar passivo são mais eficientes onde as necessidades de aquecimento são menores (sul da Europa). Nesse sentido, o desempenho dos sistemas de arrefecimento dá uma melhor resposta à problemática necessidade/solução, face ao dos sistemas de aquecimento.

Observou-se também que, em todas as zonas climáticas europeias, é nos meses mais quentes que ocorrem as melhorias provocadas pela utilização de sistemas passivos e que estas são tanto maiores quanto mais quentes forem os meses, concluindo-se novamente que é maior a tendência para satisfazer as necessidades de arrefecimento do que as de aquecimento, nos climas europeus. De facto, considerando 20% de envidraçados na fachada, o aquecimento

apenas é promovido nas zonas climáticas mais quentes (Csa e Csb) e nos meses de meia estação (março, abril, maio, outubro e novembro), pois nos meses mais frios e nas zonas climáticas com maior necessidade de aquecimento, a radiação solar não é suficiente para que as técnicas de aquecimento solar passivo sejam eficazes.

A simulação efetuada demonstra que o desempenho de cada sistema passivo é bastante diferente em cada região climática do continente europeu. Em geral, considerando os valores definidos inicialmente para a percentagem de envidraçados na fachada (20%), a sua eficiência (média), a insolação (alta), a velocidade do ar (perceptível) e a atividade no interior dos edifícios (sedentária), as regiões climáticas que potencialmente mais beneficiam da utilização destes sistemas são as do sul, Csa e Csb. Em todos os meses, as melhorias no conforto higrotérmico, promovidas pela utilização de sistemas passivos, são consideravelmente maiores, nestas regiões, que são mais quentes e têm maiores necessidades de arrefecimento. Por outro lado, anualmente, as melhorias nas regiões do centro e norte europeu são pouco significativas. Assim, conclui-se que o investimento na aplicação destes sistemas deve ser feito nas regiões climáticas do sul europeu, onde é possível obter um retorno satisfatório da sua utilização, não esquecendo, no entanto, que considerando outros valores para os parâmetros definidos inicialmente, obter-se-iam resultados diferentes, podendo as conclusões retiradas desta simulação ser distintas.

## 4.2 Trabalhos Futuros

Futuramente seria interessante o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- Averiguar as diferenças nos resultados desta simulação, em cada região climática estudada, ao considerar outros valores para os parâmetros considerados, e desta forma determinar o valor ótimo para a percentagem de envidraçados na fachada e para a sua eficiência em cada zona climática, de acordo com a atividade no interior dos edifícios, a insolação e a velocidade do ar exterior.
- Proceder ao estudo das restantes regiões climáticas definidas pela classificação de Köppen-Geiger e à mesma simulação de desempenho de sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento para cada uma delas, com o intuito de determinar a nível mundial quais as zonas que mais beneficiariam da implementação de sistemas passivos e quais as técnicas passivas mais eficientes em cada zona climática.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arquitecologia @ (2012). <http://arquitecologia.org/Descs/Clifautl0.htm>. Arquitecologia (página internet oficial).

Batista, Ana Catarina Carvalho (2008). “Edifício auto-sustentável a nível energético e de águas”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, Aveiro.

CAD@ (2012). [http://www.ikaza.com.pt/presentationlayer/Artigo\\_01.aspx?id=13&canal\\_ordem=0402](http://www.ikaza.com.pt/presentationlayer/Artigo_01.aspx?id=13&canal_ordem=0402). Companhia de Arquitetura e Design (página internet oficial), Lisboa.

Casalinho, Joel Ribeiro (2008). “Rendimento de painéis solar térmicos poliméricos unglazed e glazed”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Aveiro.

Centrola@ (2012). <http://www.centrola.pt/Ventilacao.php>. Centrola - Arrefecimento Evaporativo (página internet oficial), Viseu.

Chicago Greenworks@ (2012). <http://www.chicagogreenworks.com/qlpages/qlsolwal.html>. Chicago Greenworks (página internet oficial), Chicago.

Craveiro, Ana Isabel Fernandes (2011). “Ventilation and Thermal Behaviour of Light-Steel Buildings”. Projeto de Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Ecotect Analysis@ (2012). <http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>. Ecotect Analysis - Sustainable Building Design Software – Autodesk (página internet oficial).

Effinergie@ (2012). <http://www.effinergie.org/site/Effinergie/SummerComfort>. Effinergie - Summer Comfort (página internet oficial), Montpellier.

Eficiência Energética@ (2012). [http://www.eficiencia-energetica.com/html/eee/eee\\_estrategias.htm](http://www.eficiencia-energetica.com/html/eee/eee_estrategias.htm). Eficiência Energética (página internet oficial).

Fonseca, Daniel António da Silva da (2007). “A casa de emissões nulas – Estudo conceptual”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, Aveiro.

Gonçalves, Helder e Graça, João Mariz (2004). “Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal”. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação. Lisboa.

Infopédia@ (2012). <http://www.infopedia.pt/>. Infopédia – Dicionários e Enciclopédia em Língua Portuguesa (página internet oficial).

Kottek, Markus; Grieser, Jurgen; Beck, Christoph; Rudolf, Bruno e Rubel, Franz (2006). “World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated”. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15, No. 3, pp. 259-263.

LNEC (1987). “Técnicas Solares Passivas: Materiais e Soluções Disponíveis em Portugal”. Lisboa, Portugal.

Lobão, Ricardo (2004). “Modelo simplificado de previsão do comportamento térmico de edifícios”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães.

Manual de RETScreen - Curso de Análise de Projeto de Energia Limpa. ”Análise de Projetos de Aquecimento Solar Passivo” (2006). RETScreen International, Canada.

Mendonça, Paulo Jorge Figueira de Almeida Urbano de (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 da Universidade do Minho, Guimarães.

Pessoa, Carlos Eduardo Regadas (2009). “Relação dos consumos energéticos dos edifícios de habitação com as emissões do ciclo de produção das soluções construtivas”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães.

Projeto Casa Fresca@ (2012). <http://liselongoblog.tumblr.com/post/492508046/projeto-casa-fresca-parte-i>. Lise Longo Blog | Projeto Casa Fresca [Parte I] (página internet oficial), Florianópolis.

Roriz, Luís (2009). “Solar Térmico: Uso de painéis solares térmicos”. Climatização de Edifícios, Portugal.

---

Santos, P., Simões da Silva, L., Ungureanu, V. (2012). “Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings”. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Technical Committee 14 - Sustainability & Eco-Efficiency of Steel Construction, ISBN 978-92-9147-105-8, N. 129, 1<sup>st</sup> edition, 2012, Mem Martins.

Silva, Pedro Correia Pereira da (2006). “Análise do comportamento térmico de construções não convencionais através de simulação em VisualDOE”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães.

Solar Wall@ (2012). [http://www.solar-designs-inc.com/solar\\_wall.htm](http://www.solar-designs-inc.com/solar_wall.htm). Solar Wall (página internet oficial), Louisville.

Weather Tool@ (2012). [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/toolsdirectory/software.cfm/ID=375/pagename\\_submenu=/pagename\\_menu=/pagename=alpha\\_list](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/toolsdirectory/software.cfm/ID=375/pagename_submenu=/pagename_menu=/pagename=alpha_list). Building Energy Software Tools Directory: Weather Tool (página internet oficial).

## **ANEXOS**

## **ANEXO A - ANÁLISE MENSAL DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS PASSIVOS**

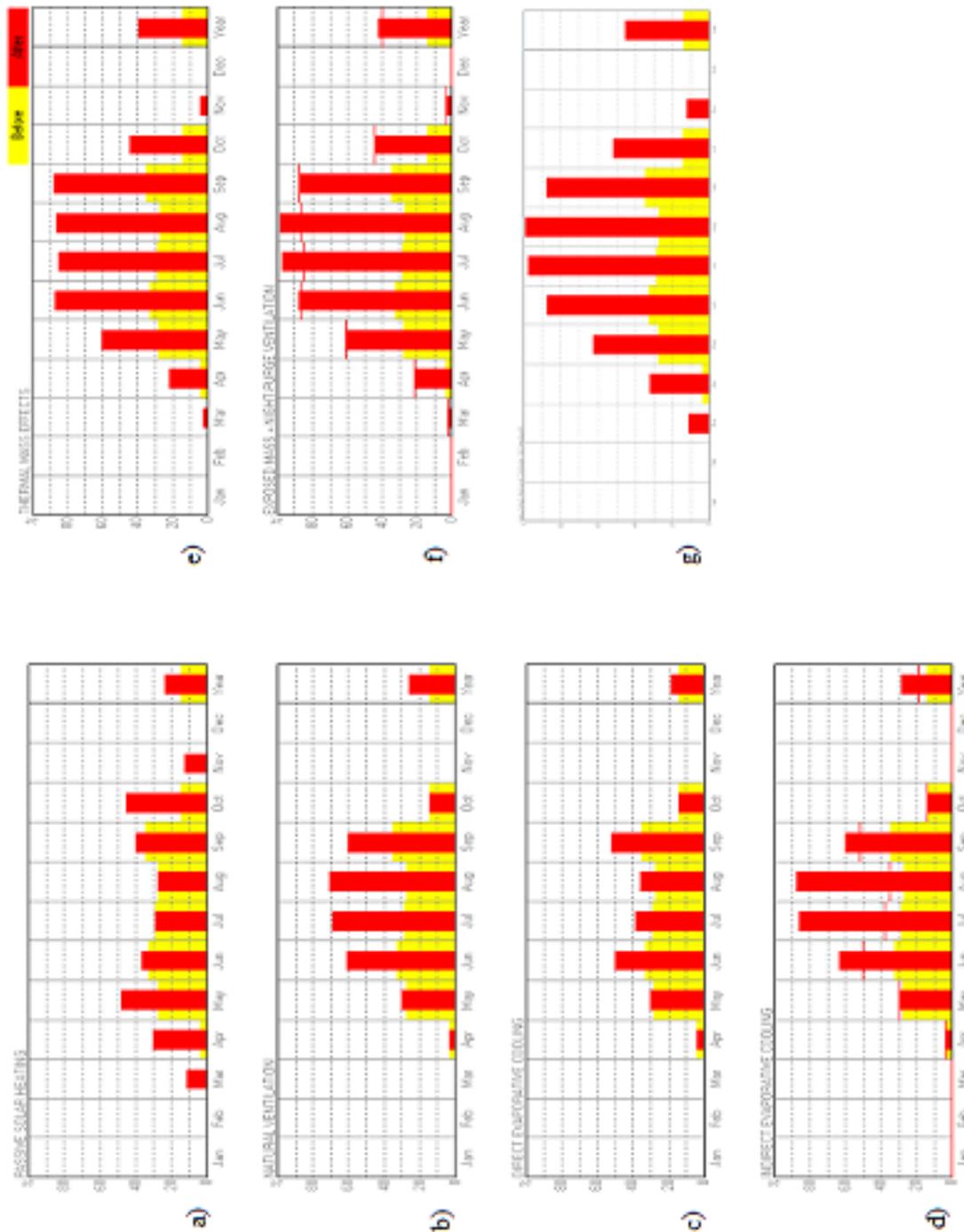


Figura A.1 – Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Csa, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo.

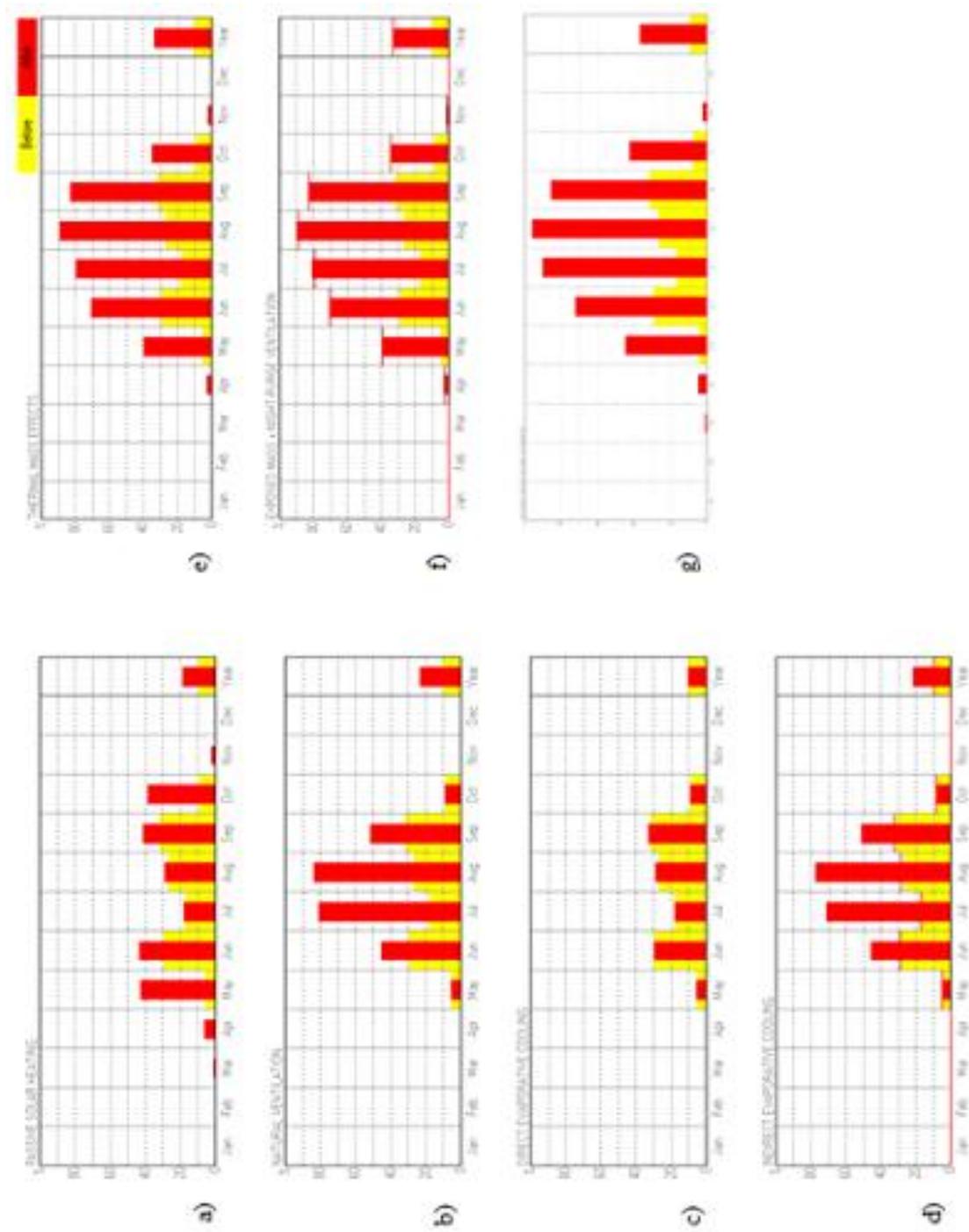


Figura A.2 – Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Csb, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo.

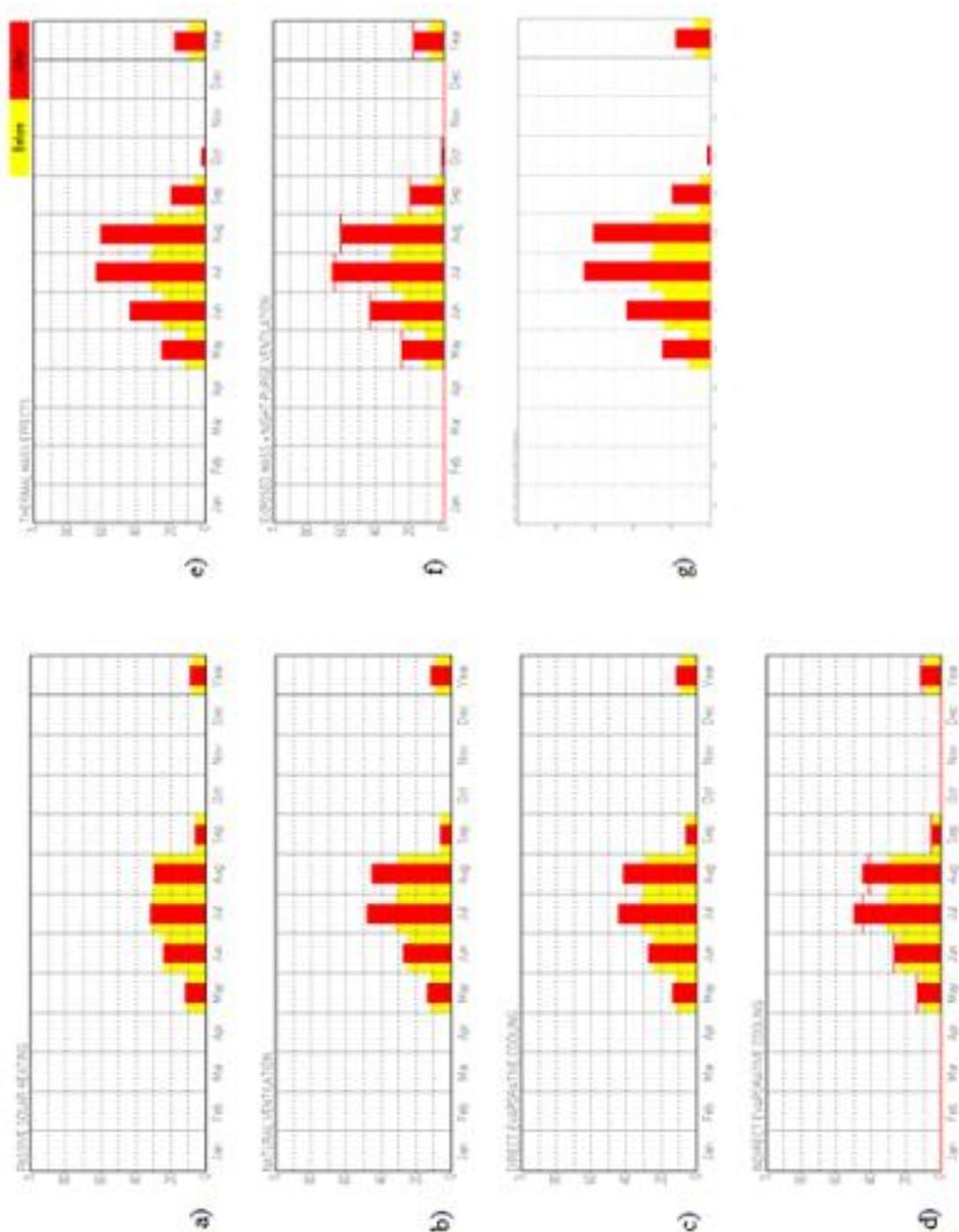


Figura A.3 – Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Cfb, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo.

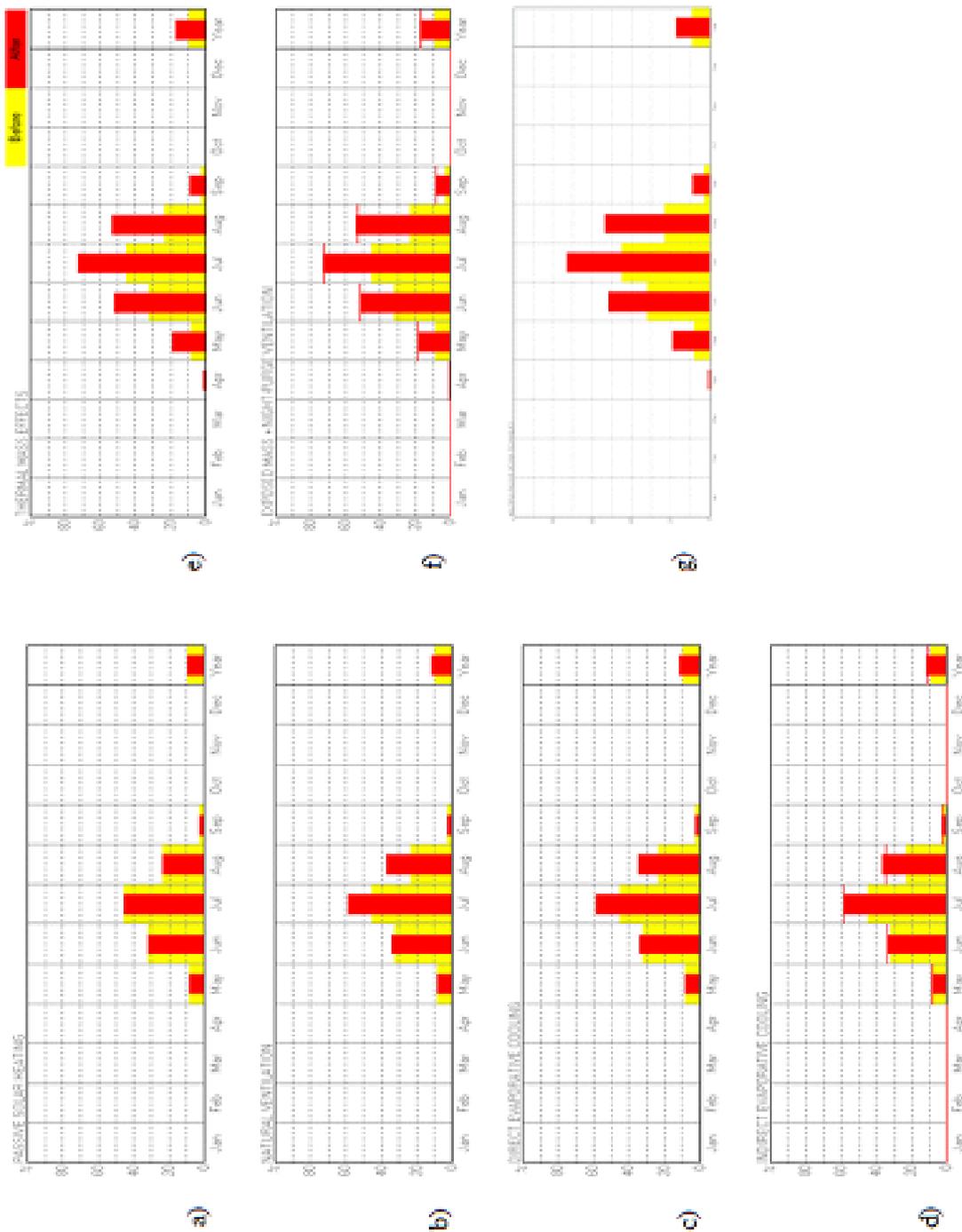


Figura A.4 – Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Dfb, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo.

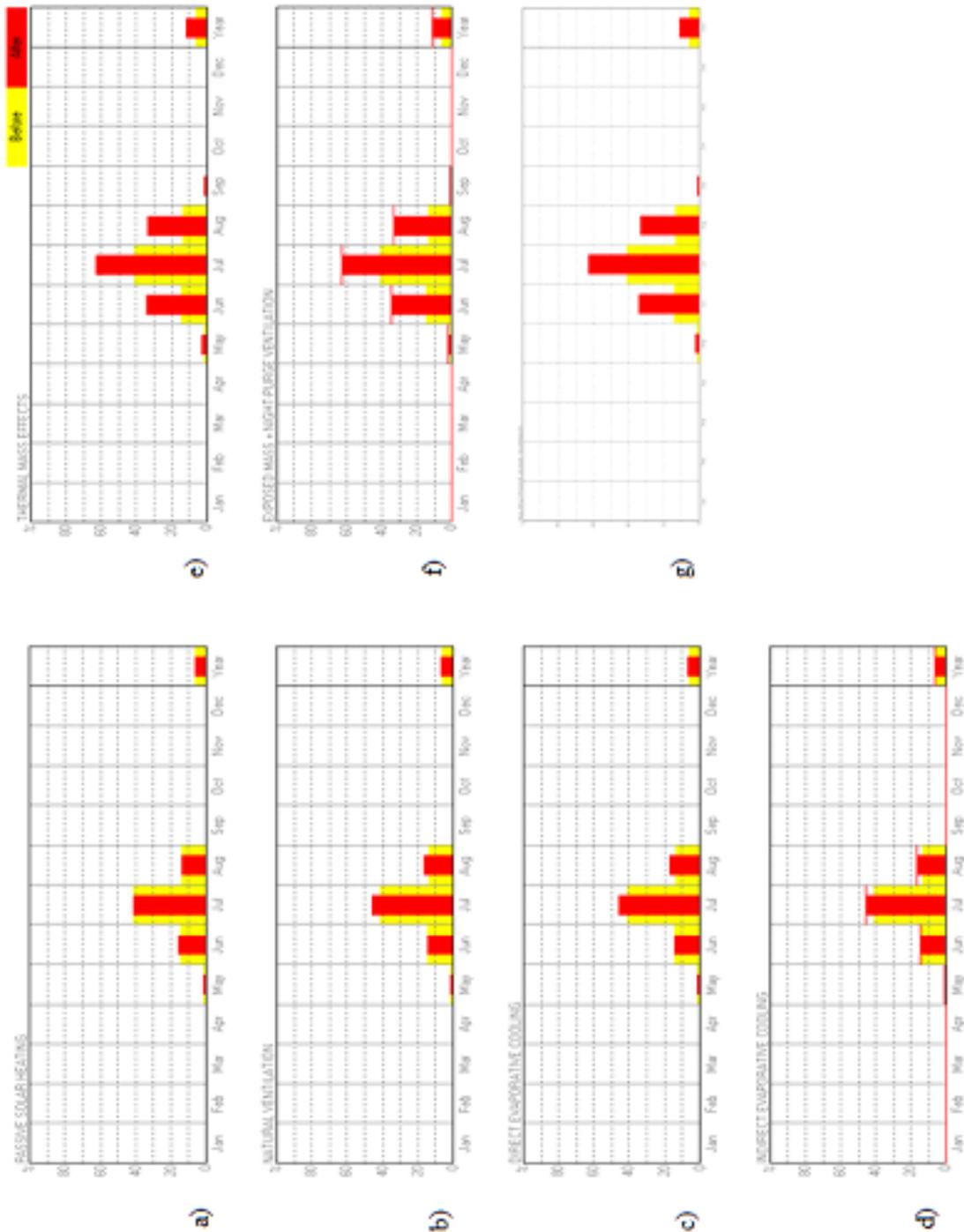


Figura A.5 - Percentagem de horas de conforto mensal da região climática Dfc, antes (a amarelo) e depois (a vermelho) da utilização de técnicas passivas: a) aquecimento solar passivo; b) ventilação natural; c) arrefecimento evaporativo direto; d) arrefecimento evaporativo indireto; e) efeito da massa térmica; f) combinação entre massa exposta e ventilação noturna; g) múltiplas técnicas em simultâneo.