

# **ESTUDO DE SISTEMAS SOLARES PASSIVOS DE FACHADA. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO SEU COMPORTAMENTO TÉRMICO**

**MIGUEL PEREIRA PINTO SOARES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS**

---

Orientador: Professora Maria Helena Póvoas Corvacho

JUNHO DE 2013

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família e meus amigos

*A vida não é medida pelo número  
de vezes que respiraste, mas pelas  
vezes que ficaste sem fôlego.*

*Bob Marley*



## **AGRADECIMENTOS**

O autor deseja expressar os seus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, não podendo deixar de dirigir com especial ênfase este agradecimento:

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto por me proporcionar a realização deste trabalho.

À Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho, orientadora científica desta dissertação, pelo seu empenho, dedicação, disponibilidade e partilha de conhecimentos.

À sua família que sempre o apoiou e encorajou.

Aos seus amigos e à Catarina pelo apoio e paciência.



## **RESUMO**

A sociedade tem investido cada vez mais em energia limpa e renovável, devido ao constante aumento da demanda energética e da poluição ambiental. Em Portugal, os edifícios são responsáveis por uma parcela muito significativa dos consumos de energia primária, bem como, por uma parcela maioritária nos consumos de eletricidade. Os sistemas passivos podem diminuir os gastos energéticos em aquecimento, arrefecimento ou ambos.

Neste trabalho foi efetuada uma síntese dos sistemas passivos existentes, tendo sido escolhido um sistema solar passivo de fachada, a ser instalado numa residência, a parede de trombe. Este sistema foi simulado numericamente por um programa de simulação térmica de edifícios designado por DesignBuilder. Foram escolhidas simulações com o intuito de avaliar a adequação da parede de trombe ao clima português, tendo sido analisada a informação resultante.

Após a análise, foi verificado o benefício de uma parede de trombe em três localizações de Portugal, concluindo-se que traz grandes benefícios de poupança em aquecimento, podendo ter ganhos térmicos indesejáveis em verões muito quentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** sistemas passivos, simulação numérica, parede de trombe, adequação ao clima, fachadas.



## **ABSTRACT**

Society has been increasingly investing in clean and renewable energy, due to the constant raise in energetic demand and environmental pollution. In Portugal, buildings are responsible for a significant portion of the consumption of primary energy and for a large portion of the consumption of electricity. Passive systems can diminish the energetic costs in heating, cooling or both.

In the present study, a synthesis of the existent passive systems was performed, with the use of a facade passive solar system, to be installed in a residency, the Trombe wall. This system was numerically simulated by a thermal simulation program for buildings designated DesignBuilder. Simulations were selected with the aim of assessing the adequacy of the Trombe wall to the Portuguese climate, having the remaining information been analysed.

Following the analysis, the benefits of a Trombe wall in three locations in Portugal were evidenced. It can be concluded that it brings major benefits into the saving of heating, with the possibility of having unwanted thermal gains in extremely hot summers.

**KEYWORDS:** passive systems, numerical simulation, trombe wall, adequacy to climate, facade.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
1.3. TIPOLOGIAS .....	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	2
<b>2. SISTEMAS SOLARES PASSIVOS DE FACHADA</b> .....	3
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
<b>2.2. SISTEMAS SOLARES PASSIVOS</b> .....	3
2.2.1. NOTA INTRODUTÓRIA .....	3
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DA ABERTURA COLETORA .....	4
2.2.3. TIPO DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO .....	4
2.2.4. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA AO ESPAÇO AQUECIDO.....	5
2.2.4.1. Ganho direto.....	5
2.2.4.2. Ganho indireto.....	5
2.2.4.3. Ganho separado.....	10
2.2.4.4. Sistemas Mistos .....	11
<b>2.3. OUTROS TIPOS DE SISTEMAS SOLARES PASSIVOS</b> .....	19
2.3.1. LANTERNIM.....	19
2.3.2. CLARABOIA.....	20
2.3.3. COBERTURAS DE ÁGUA.....	20
2.3.4. SISTEMAS DE GANHO INDIRETO PELO PAVIMENTO .....	21
<b>2.4. SISTEMAS PASSIVOS DE ARREFECIMENTO</b> .....	22
2.4.1. ARREFECIMENTO DIRETO .....	23
2.4.1.1. Proteção Solar.....	23
2.4.1.2. Ventilação Natural .....	24
2.4.1.3. Construções enterradas .....	28

2.4.1.4. Arrefecimento por evaporação de água .....	28
2.4.1.5. Arrefecimento por desumidificação .....	28
2.4.3. ARREFECIMENTO INDIRETO.....	28
2.4.3. ARREFECIMENTO SEPARADO .....	29
<b>2.5. ESCOLHA PARA A SIMULAÇÃO.....</b>	<b>29</b>

### **3. SIMULAÇÃO TÉRMICA..... 31**

<b>3.1. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO TÉRMICA .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2. CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3. SIMULAÇÕES E RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
<b>3.4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
3.4.1. LISBOA .....	52
3.4.2. BEJA .....	54
3.4.3. BRAGANÇA .....	54
3.4.4. NOVA SIMULAÇÃO DA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO.....	55

### **4. CONCLUSÕES ..... 59**

<b>4.1. SIMULAÇÕES .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2. CONCLUSÕES FINAIS .....</b>	<b>59</b>
<b>4.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>60</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Características de definição dos sistemas solares passivos.....	4
Figura 2.2 – Representação esquemática do funcionamento de uma parede de trombe .....	6
Figura 2.3 – Representação esquemática do funcionamento de uma estufa contígua [5] .....	7
Figura 2.4 - Esquemas da janela de fluxo de ar com vidro simples (1) e duplo (2) no pano envidraçado interior .....	8
Figura 2.5 – Janela de fluxo de calor [8].....	9
Figura 2.6 – Termossifão colocado em parede exterior [5].....	10
Figura 2.7 – Termossifão colocado abaixo do pavimento [5] .....	11
Figura 2.8 – Imagem de um sistema por tubos em vácuo .....	12
Figura 2.9- Esquemas representativos do desempenho de sistemas fotovoltaicos híbridos de fachada .....	13
Figura 2.10 – Orifícios de ventilação .....	14
Figura 2.11 – Edifício com fachada híbrida de concentração linear simulado por computador [14] ....	15
Figura 2.12 – Sistema híbrido de concentração linear [14].....	15
Figura 2.13 - Classificação segundo o tipo de ventilação.....	16
Figura 2.14 - Tipos de compartimentação da fachada .....	17
Figura 2.15 - Modos de ventilação .....	18
Figura 2.16 – Lanternim [4].....	19
Figura 2.17 – Lanternim rotativo [4] .....	19
Figura 2.18 – Claraboia [16].....	20
Figura 2.19 – Esquema de uma cobertura de água [4] .....	21
Figura 2.20 – Esquema de um pavimento de armazenamento térmico [4] .....	21
Figura 2.21 – Esquema com os tipos de arrefecimento passivo .....	23
Figura 2.22 – Exemplos de sistemas de proteção solar exteriores de janelas [4] .....	24
Figura 2.23 – Exemplo de ventilação cruzada [4] .....	25
Figura 2.24 – Chaminé solar [4] .....	25
Figura 2.25 – Câmara solar [4].....	26
Figura 2.26 – Sistema de ventilação com aspirador estático [4].....	27
Figura 2.27 – Torre de vento [4] .....	27
Fig.3.1 – Vista exterior .....	32
Fig.3.2 – Planta do edifício .....	33
Fig.3.3 – Funcionamento da Parede de trombe simulada .....	36

Fig.3.4 – Corte da parede de trombe simulada.....	37
Fig.3.5 – Desempenho da pala ao meio dia do dia 21 de junho.....	37
Fig.3.6 – Desempenho da pala ao meio dia do dia 21 de dezembro .....	38
Fig.3.7 – Gastos e poupança no aquecimento.....	40
Fig.3.8 – Resultados simulação 1.0 (Lisboa, 200mm, anual).....	42
Fig.3.9 – Resultados simulação 1.1 (Lisboa, 300mm, anual)-.....	42
Fig.3.10 – Resultados simulação 1.2 (Lisboa, 200mm, aquecimento) .....	43
Fig.3.11 – Resultados simulação 1.3 (Lisboa, 200mm, arrefecimento) .....	43
Fig.3.12 – Resultados simulação 1.4 (Lisboa, sem parede de trombe, anual) .....	44
Fig.3.13 – Resultados simulação 1.4 (Lisboa, sem parede de trombe, aquecimento).....	44
Fig.3.14 – Resultados simulação 1.4 (Lisboa, sem parede de trombe, arrefecimento).....	45
Fig.3.15 – Resultados simulação 2.0 (Beja, 200mm, anual).....	45
Fig.3.16 – Resultados simulação 2.1 (Beja, 300mm, anual).....	46
Fig.3.17 – Resultados simulação 2.2 (Beja, 200mm, aquecimento) .....	46
Fig.3.18 – Resultados simulação 2.3 (Beja, 200mm, arrefecimento .....	47
Fig.3.19 – Resultados simulação 2.4 (Beja, sem parede de trombe, anual) .....	47
Fig.3.20 – Resultados simulação 2.4 (Beja, sem parede de trombe, aquecimento).....	48
Fig.3.21 – Resultados simulação 2.4 (Beja, sem parede de trombe, arrefecimento).....	48
Fig.3.22 – Resultados simulação 3.0 (Bragança, 200mm, anual).....	49
Fig.3.23 – Resultados simulação 3.1 (Bragança, 300mm, anual).....	49
Fig.3.24 – Resultados simulação 3.2 (Bragança, 200mm, aquecimento) .....	50
Fig.3.25 – Resultados simulação 3.3 (Bragança, 200mm, arrefecimento).....	50
Fig.3.26 – Resultados simulação 3.4 (Bragança, sem parede de trombe, anual) .....	51
Fig.3.27 – Resultados simulação 3.4 (Bragança, sem parede de trombe, aquecimento).....	51
Fig.3.28 – Resultados simulação 3.4 (Bragança, sem parede de trombe, arrefecimento) .....	52
Fig.3.29 – Comparação das temperaturas de verão nas três localidades com parede de trombe de 200mm.....	53
Fig.3.30 – Comparação dos picos de temperatura em Lisboa no verão.....	53
Fig.3.31 – Comparação dos picos de temperatura em Beja no verão.....	54
Fig.3.32 – Comparação de temperaturas de inverno nas três localidades.....	55
Fig.3.33 – Comparação de temperaturas em Lisboa com diferentes controlos da proteção solar .....	56
Fig.3.34 – Comparação de temperaturas em Beja com diferentes controlos da proteção solar.....	57
Fig.3.35 – Comparação de temperaturas em Bragança com diferentes controlos da proteção solar .	57

## **ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 2.1 – Tipologias de fachadas transparentes .....	18
Quadro 3.1 – Programas de simulação térmica de edifícios.....	31
Quadro 3.2 – Dados arquitetónicos.....	34
Quadro 3.3 – Dados de atividade .....	34
Quadro 3.4 – Dados construtivos .....	35
Quadro 3.5 – Aberturas.....	38
Quadro 3.6 – Iluminação .....	38
Quadro 3.7 – Aquecimento, ventilação e ar condicionado.....	38
Quadro 3.8 – Resumo das simulações.....	39
Quadro 3.9 – Traduções dos termos presentes nos gráficos.....	41



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

Um dos problemas mais desafiantes que a sociedade enfrenta nos dias de hoje é a falta de sustentabilidade do meio ambiente. A consciência ecológica tem vindo a ganhar força mas a demanda energética continua a aumentar, sendo previsto que duplique de 2005 a 2030 [1]. A União Europeia tem vindo a lutar contra a este problema, reafirmando a vontade de mudança com o “Pacote Clima-Energia: “três vintes até 2020” aprovado a 17 de Dezembro 2008 [2]. Este pacote de medidas europeias obriga os 27 países membros a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa face aos volumes emitidos em 1990 em 20%, aumentar para 20% as energias renováveis no consumo de energia (em 2005 a quota renovável era de 8.5%), e reduzir em 20% o consumo energético. Todas estas medidas possuem como prazo 2020.

Sendo os edifícios em Portugal responsáveis pelo consumo de 30% da energia primária e 62% dos consumos de eletricidade [3], a procura de uma construção mais sustentável é de grande interesse para todos, podendo os sistemas passivos de fachada contribuir de forma substancial na redução dos gastos energéticos. Este tipo de sistemas consistem em tecnologias construtivas onde as trocas de energia térmica se fazem por meios naturais, não havendo gastos energéticos para a condução da energia calorífica [4]. Os sistemas passivos podem ser de aquecimento (solares ou não) ou de arrefecimento.

Muitos dos sistemas solares passivos não são recentes, foram inventados há já muitos anos existindo em edifícios de diversas épocas, demonstrando que a preocupação com o conforto térmico dos edifícios não é um tema novo. Não ganharam no entanto muita adesão, e foram caindo em desuso, voltando nos últimos anos a ganhar relevo devido ao aumento das preocupações com a eficiência energética e a produção de CO<sub>2</sub>.

### 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos a recolha de informações sobre os sistemas solares passivos de fachada existentes, tais como o tipo de mecanismo de transferência de energia, controlos, tipo de armazenamento térmico, vantagens e desvantagens. De seguida irá ser escolhido um dos sistemas para simular numericamente, com um programa de simulação térmica de edifícios que permita avaliar o seu contributo para o conforto térmico e a sua influência no consumo energético em cidades Portuguesas. A informação recolhida das simulações irá ser analisada, para depois se tirarem conclusões e recomendações sobre o sistema escolhido.

### **1.3. METODOLOGIA**

O presente trabalho foi realizado segundo as seguintes fases:

- Levantamento dos diversos tipos de sistemas solares passivos de fachada;
- Escolha de um programa de simulação térmica de edifícios e de um dos sistemas solares passivos de fachada para simular;
- Simulação numérica de um caso de estudo para análise da influência do sistema escolhido em Portugal;
- Realizar a análise dos resultados obtidos das simulações e as respetivas conclusões;
- Redação do trabalho;

### **1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O presente capítulo é o primeiro capítulo de quatro que constituem o trabalho, estando resumidos na seguinte lista:

- Capítulo 1 – Introdução;
- Capítulo 2 – Sistemas solares passivos de fachada: apresentam-se os tipos de sistemas solares passivos de fachada existentes, suas características, vantagens e desvantagens. Estão também presentes neste capítulo, sistemas passivos que podem ser instalados para se complementarem aos solares de fachada. É escolhido um sistema para posterior simulação, a parede de trombe;
- Capítulo 3 – Simulação térmica: são expostas as razões de escolha do programa de simulação térmica de edifícios utilizado, as condições das simulações efetuadas e seus resultados. Posteriormente é feita uma análise às informações obtidas pelas simulações.
- Capítulo 4 – Conclusão - apresentam-se as conclusões finais do trabalho desenvolvido e propostas de trabalho futuro.

# 2

## **SISTEMAS SOLARES PASSIVOS DE FACHADA**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

Os sistemas solares passivos de fachada são tecnologias construtivas integradas no edifício que não utilizam dispositivos eletromecânicos para reencaminhar os ganhos solares, usando apenas os princípios físicos como radiação, condução ou convecção natural [5]. A título de exemplo, temos a parede de trombe, estufas, janelas de fluxo de ar e sistemas de termossifão.

### **2.2. SISTEMAS SOLARES PASSIVOS**

#### **2.2.1. NOTA INTRODUTÓRIA**

Os sistemas solares passivos são genericamente definidos pelas características da abertura coletora, tipo de armazenamento térmico e pelos mecanismos de transferência de energia ao espaço aquecido [6].

No fluxograma da Figura 2.1 estão representadas estas características, que serão explicadas ao longo deste capítulo.

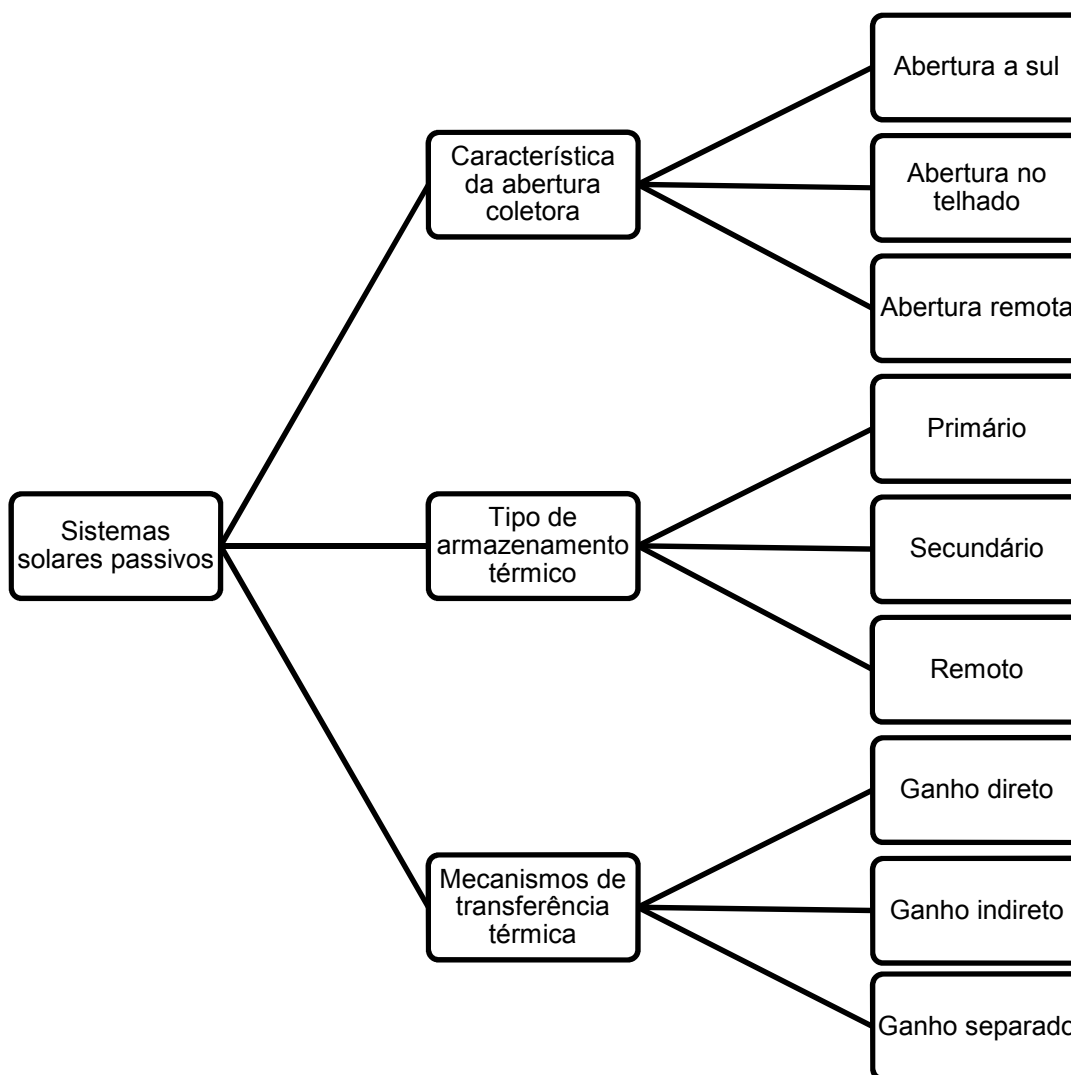


Figura 2.1 – Características de definição dos sistemas solares passivos

### 2.2.2. CARACTERÍSTICAS DA ABERTURA COLETORA

As características da abertura coletora são as indicadas de seguida:

- Abertura a sul: elemento envidraçado vertical na parede sul;
- Abertura no telhado: superfície envidraçada horizontal ou inclinada localizada no telhado;
- Abertura remota: abertura separada da estrutura do edifício que recebe energia solar. Sua inclinação e orientação ótimas dependem da latitude e estação do ano;

### 2.2.3. TIPO DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO

O armazenamento térmico pode ter as seguintes características:

- Primário: definido como a área de armazenamento atingida diretamente por radiação solar (área insolada);
- Secundário: área de armazenamento localizada fora da área insolada que se encontra em contacto radiativo com a mesma;

- Remoto: o calor é transferido por convecção natural (sistemas passivos) ou forçada por ventiladores (sistemas ativos);

## 2.2.4. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA AO ESPAÇO AQUECIDO

### 2.2.4.1. Ganho direto

Os sistemas de ganho direto baseiam-se na captação da radiação solar no interior dos edifícios, o armazenamento térmico primário encontra-se no espaço habitável. A absorção, armazenamento e libertação de energia é feita diretamente no compartimento [5]. São dos sistemas solares passivos de aquecimento mais simples e comuns, podendo-se efetivar através de vãos envidraçados nas fachadas, lanternins ou claraboias. Para uma maior eficiência deste tipo de sistemas, o envidraçado deve estar orientado a sul, devidamente dimensionado e protegido com dispositivos de sombreamento para o verão. Como o ar não consegue reter calor, o edifício necessita de uma massa térmica significativa para absorver a energia solar durante o dia. O calor absorvido é depois libertado para o espaço a aquecer por radiação para zonas de menor temperatura, o ar é aquecido por convecção natural pelo contacto com as superfícies aquecidas, e por radiação para zonas mais frias da envolvente. Os elementos da envolvente do espaço têm de estar isolados pelo exterior e ser constituídos por materiais compactos, para uma boa capacidade de armazenamento e elevado poder de absorção da radiação solar (cor escura) [4],[6],[7].

Este tipo de sistemas apresentam as seguintes vantagens [4],[5]:

- Rendimento elevado já que a energia utilizada por metro quadrado de captador é máxima;
- Baixo acréscimo de custos comparando com edifícios sem características solares;
- Redução do uso de energia para aquecimento;
- Aproveitamento da iluminação natural com luz direta, permite vistas para o exterior;
- Simples e fácil de construir usando tecnologias e materiais correntes, mesmo para os sombreadores solares;
- Fácil integração arquitetónica, janelas laterais próximas das paredes minimizam problemas de excesso de luminosidade;

Apresenta também as seguintes desvantagens [4],[5]:

- Falta de privacidade e iluminação excessiva no espaço interior;
- Não possui características de arrefecimento;
- Armazenamento térmico de curto período com flutuações térmicas;
- Perdas térmicas elevadas pelos envidraçados;
- Possível degradação dos materiais devido à radiação solar direta;
- Desconforto local devido a assimetrias na temperatura interior;
- Dispositivos manuais de isolamento, tais como proteções móveis das aberturas, requerem a devida e cuidada atenção para serem eficazes;

### 2.2.4.2 Ganho indireto

Os sistemas de ganho indireto captam a energia solar para elementos de armazenamento térmico situados entre o espaço que se pretende aquecer e a proteção exterior. Desta forma a captação da energia solar ocorre fora do espaço habitável, assim como o seu armazenamento e controlo.

Oferecem maiores possibilidades de controlo das oscilações de temperatura, sendo bastante vantajoso para a não ocorrência de sobreaquecimentos. Os coletores são geralmente fachadas de vidro ou plástico, orientadas a sul, colocadas em frente a uma parede que vai armazenar o calor durante o

período de exposição solar. Esta energia vai ser conduzida para o lado interior da parede, propagando-se para o compartimento por convecção e radiação.

Os sistemas de paredes de armazenamento térmico são principalmente concebidos para aquecimento, mas em zonas com grande amplitude térmica podem contribuir para o arrefecimento [4],[6].

#### 2.2.4.2.1 Parede de armazenamento térmico

A parede de armazenamento térmico foi inicialmente patenteada por E. L. Morse em 1881. É uma parede orientada a sul, maciça e de cor escura, com uma superfície exterior envidraçada para reduzir as perdas para o exterior [5].

Em 1964, este sistema torna-se popular com as alterações do engenheiro francês Félix Trombe e o arquiteto Jacques Michel, ficando com a designação de “Parede de Trombe”. A parede de Trombe é essencialmente uma parede de armazenamento térmico com aberturas reguláveis no topo e no fundo da parede. O ar entre o vidro e a parede aquece, sobe por convecção e circula para o interior pelos orifícios da parede, contribuindo para o aquecimento. Ao mesmo tempo também há contributos por radiação, sendo os únicos contributos da parede de armazenamento térmico.

No verão o orifício superior da parede de Trombe deve ser encerrado de forma a evitar a entrada de ar quente não desejado, podendo também abrir-se um orifício na parte superior no envidraçado para facilitar o escoamento do ar para fora e promover a ventilação [7],[10].

A Figura 2.2 apresenta um esquema de funcionamento de uma parede de trombe.

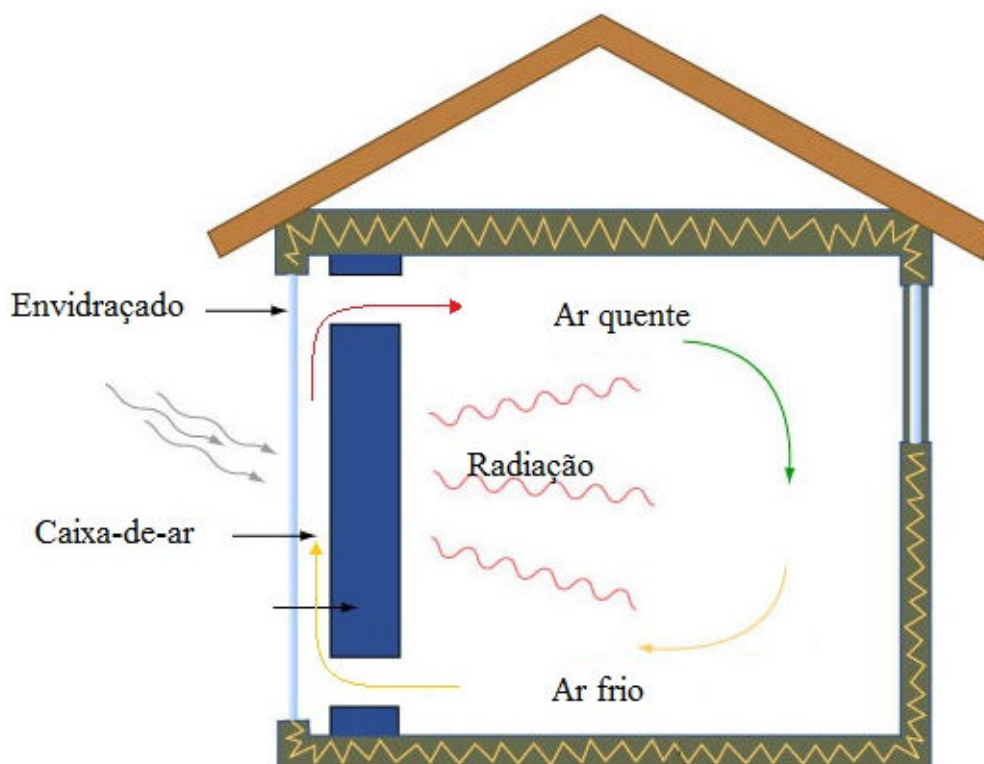


Figura 2.2 – Representação esquemática do funcionamento de uma parede de trombe

A parede de água é uma variante da parede de trombe, onde a água é o elemento de armazenamento térmico. A água é contida em recipientes estanques de cor escura para absorver o máximo de radiação solar possível. A capacidade de armazenamento de calor é muito grande devido ao elevado calor específico e elevada condutibilidade da água, havendo uma grande diferença de funcionamento quando comparada com a parede de trombe convencional.

Ao contrário da parede de trombe onde existe um grande desfasamento temporal entre a absorção da energia e a sua libertação para o ambiente, na parede de água a transferência de calor é muito rápida. Esta situação requer um controlo adicional da distribuição de calor no interior do espaço a aquecer, que pode ser resolvido isolando a armazenagem de calor durante o dia para o retirar à noite quando se quiser aquecer o espaço. Este efeito também pode ser realizado pelas características dos contentores utilizados: contentores com maior espessura ou diminuindo a sua superfície de troca com o espaço interior [7].

#### 2.2.4.2.2 Estufas contíguas

Estes sistemas consistem num espaço fechado, coberto de vidro, que expõem uma massa acumuladora térmica, constituída pelo pavimento e a parede contígua ao compartimento que se pretende aquecer. As estufas para além de proporcionarem ganhos de energia da radiação solar direta, também possibilitam ganhos por radiação difusa, principalmente em dias de céu encoberto. Exerce também uma função de zona intermediária (zona tampão) ao compartimento a aquecer, reduzindo as suas perdas energéticas. Os ganhos diretos da estufa são transmitidos diretamente por convecção ao interior do compartimento e retidos pela massa acumuladora para aquecimento por radiação.

As estufas devem localizar-se na fachada sul dos edifícios, devendo ser dimensionadas equilibrando a área de captação solar e a massa térmica para evitar excessos de temperatura. Mecanismos móveis de isolamento noturno devem ser instalados para minimizar as perdas para o exterior, e prever sombreamento eficaz ou uma forma de ser desativada na estação quente. O seu custo de construção é baixo e podem originar uma redução no consumo global de energia para aquecimento de 15% a 30% [5],[10].

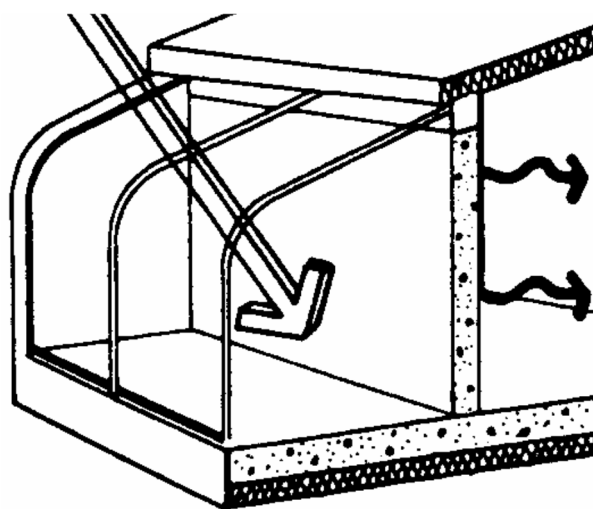


Figura 2.3 – Representação esquemática do funcionamento de uma estufa contígua [5]

### 2.2.4.2.3 Janelas de fluxo de ar

Janelas de fluxo de ar: são um tipo de sistema passivo que consiste na sobreposição de duas janelas com um espaço de ar no seu interior. É também provido de uma abertura inferior na janela exterior e uma abertura superior na janela interior, possibilitando a passagem de ar pela cavidade interior por convecção.

Ao passar pela cavidade o ar é aquecido por meios passivos, permitindo uma renovação de ar pré-aquecido ao ambiente interior. Desta forma minimiza os efeitos térmicos negativos da renovação do ar interior, sem a utilização de energia auxiliar [8], [9]. Este sistema é de ganho indireto e direto visto também possuir ganhos diretos pelo envidraçado, mas são os indiretos que o distinguem dos envidraçados correntes. Um esquema de funcionamento da janela de fluxo de ar está apresentado na Figura 2.4

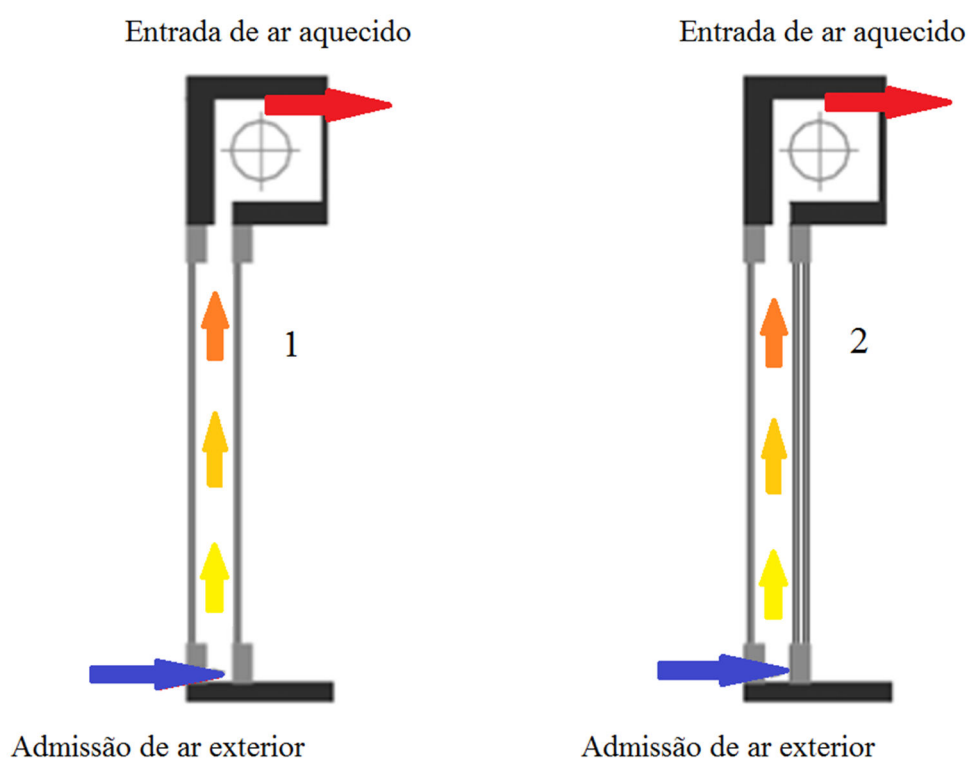


Figura 2.4 - Esquemas da janela de fluxo de ar com vidro simples (1) e duplo (2) no pano envidraçado interior



Figura 2.5 – Janela de fluxo de calor [8]

#### 2.2.4.2.4 Janelas coletoras

Funcionando do mesmo modo que a janela de fluxo de ar na admissão de ar pré-aquecido na habitação, é provida de proteção solar intermédia que funciona como um dispositivo coletor que absorve a energia solar que nele incide (ganho indireto). A cavidade vai estar a uma temperatura superior, e o ar tem mais área de contacto para aquecer. A proteção solar contribui ainda para a redução das perdas de calor durante o período noturno [8]. Este sistema também possui ganhos diretos pela radiação solar transmitida diretamente através do vidro.

Vantagens dos sistemas de ganho indireto:

- Ganhos de calor durante o dia por convecção de ar quente, e também durante a noite (mais desejado) por radiação da energia armazenada na massa térmica;
- Permitem maior controlo das quantidades de calor cedidas ao compartimento do que nos ganhos diretos;
- Não possuem problemas da degradação de objetos expostos a radiação solar direta e excessos de luminosidade;
- Podem contribuir para o arrefecimento no verão;
- Flutuações térmicas menores;
- Dispositivos fáceis de instalar numa construção nova com custos baixos adicionais;
- Podem dar um contributo estético às habitações;

Desvantagens dos sistemas de ganho indireto:

- As paredes de armazenamento térmico e estufas obrigam orientação a sul;
- Perdas térmicas noturnas podem ser elevadas e requerer manutenção;
- As massas de armazenamento térmico podem ocupar espaço habitável e aumentam o peso do edifício;
- Necessidade de isolamento noturno, normalmente móvel, que requer ação manual;
- Paredes de armazenamento térmico reduzem a luz direta, e podem criar dificuldades na ventilação natural;

- As estufas não permitem arrefecimento ativo no verão e possuem grandes flutuações térmicas no seu interior, não sendo aconselhadas para o nosso verão;
- Custo elevado das estufas com vidro de alto desempenho;
- Estufa de plantas podem criar odores, excessos de humidade, e insetos;

#### 2.2.4.3 Ganho separado

Os sistemas de ganho separado captam a energia solar num elemento ou espaço que se encontra termicamente isolado dos espaços habitáveis do edifício. O calor é transferido para o interior por processos de convecção natural e radiação. As estufas com isolamento da parede separadora são sistemas de ganho separado, assim como o sistema de convecção por termossifão [6]. Nas imagens seguintes estão representados os desenhos esquemáticos de um termossifão colocado numa parede exterior (Figura 2.6) e abaixo do pavimento (Figura 2.7).

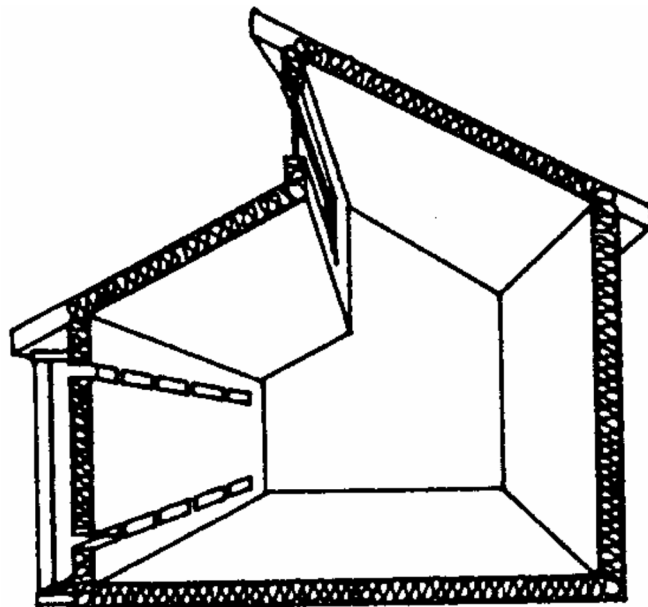


Figura 2.6 – Termossifão colocado em parede exterior [5]

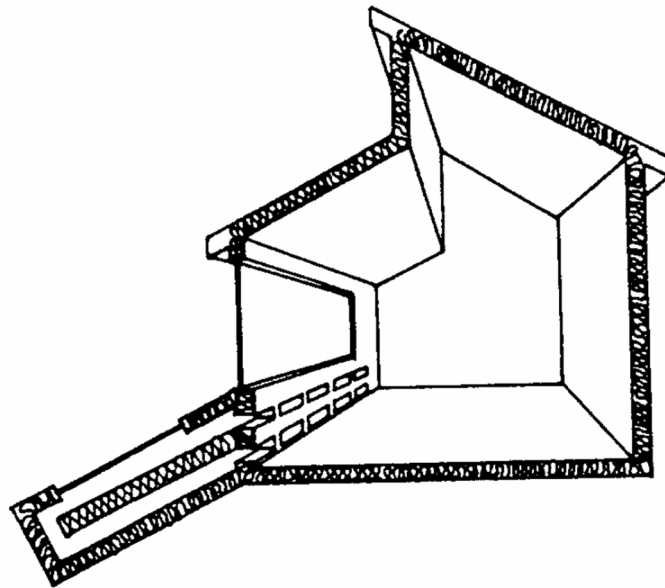


Figura 2.7 – Termostifão colocado abaixo do pavimento [5]

#### 2.2.4.3.1 Sistemas de termostifão

O sistema de termostifão baseia-se na convecção térmica, sendo o painel de coletor solar o elemento principal na sua conceção. Os painéis de ar de termostifão são semelhantes aos painéis coletores solares ativos, mas são montados na vertical nas paredes exteriores, ou abaixo do pavimento numa posição inclinada.

A maior vantagem deste tipo de sistema consiste na redução ou eliminação de componentes de controlo, visto que está termicamente isolado e separado dos espaços habitáveis. Isolando os ganhos solares as perdas de calor são reduzidas, mas há a necessidade de instalar componentes de distribuição e armazenamento cuidadosamente concebidos, pormenorizados e construídos. A sua utilização é eficaz em zonas com requisitos substanciais de aquecimento e climas moderados [4].

#### 2.2.4.3.2 Estufas com isolamento da parede separadora

As estufas com isolamento da parede separadora consiste num tipo de sistema já abordado nos ganhos indiretos. Contudo, este sistema é um caso dos ganhos separados por ser um espaço distinto e termicamente isolado do espaço habitável. Não sendo uma extensão da habitação, a sua temperatura pode ultrapassar os parâmetros de conforto. Há uma redução dos ganhos através da parede, principalmente se receber radiação solar direta, mas um maior fornecimento de ar quente por aberturas para o interior [5].

#### 2.2.4.4 SISTEMAS MISTOS

##### 2.2.4.4.1 Sistema por tubos em vácuo

Um novo sistema de aproveitamento solar térmico de fachada por tubos em vácuo está a ser desenvolvido para ser usado em conjunto com sistemas solares de aquecimento e arrefecimento. A

transferência do calor é efetuada por ar não tendo problemas de gelo ou fugas, sendo mais eficiente e económico. Na figura 2.8 está um coletor de ar quente por tubo em vácuo [11].



Figura 2.8 – Imagem de um sistema por tubos em vácuo

#### 2.2.4.4.2 Sistemas fotovoltaicos

A integração de sistemas fotovoltaicos na fachada de um edifício pode ser combinada com a arquitetura de uma forma harmoniosa, permitindo um desenho moderno, económico e sustentável. Existe uma grande variedade de formatos, cores, estruturas das células fotovoltaicas, com ou sem aproveitamento do calor gerados nos módulos. Estes podem ser criados à medida, com transparência, controlo de luz e sombreamento desejados. Os sistemas integrados permitem uma redução no custo de montagem e dos materiais que serão substituídos pelos painéis, diminuindo o custo inicial em relação a um sistema não integrado. A célula de silício cristalina é a mais comum, atualmente perto de 95% das células solares existentes são de silício. A sua extração da areia de sílica resulta num gasto considerável de energia e desperdício de material, mas apresenta uma disponibilidade quase ilimitada [12].

Os sistemas fotovoltaicos são sistemas ativos, mas com técnicas construtivas relativamente simples podem passar a fazer parte de um sistema solar passivo. De seguida apresenta-se um exemplo de um painel fotovoltaico integrado na fachada com aproveitamento solar passivo por ganhos indiretos, aliando-se dois tipos de sistemas diferentes.

O edifício Solar XXI no campus do LNEG em Lisboa é um exemplo de relevo no nosso país de um sistema fotovoltaico integrado na fachada. É um edifício de demonstração com vários conceitos de tecnologias renováveis integradas na fase de conceção.

Foi projetado neste edifício um sistema fotovoltaico integrado na fachada a sul do edifício, com cerca de 100m<sup>2</sup>. Os módulos são de silício multicristalino totalizando perto de 12 kWp para fornecimento de energia elétrica ao edifício, sendo também providos de aproveitamento térmico do calor gerado pelos

módulos no inverno. Este calor aquece o ar presente na cavidade, que vai subir por convecção natural e entrar no espaço interior. Desta forma, o espaço interior comunica diretamente com o espaço posterior dos painéis, recuperando o calor produzido através de dois orifícios, um perto do pavimento e um no topo, controlados pelos utilizadores. Os orifícios de ventilação estão representados na Figura 2.10 [13].

Durante um dia de inverno o utilizador pode aquecer o espaço interior abrindo os dois orifícios, permitindo a circulação contínua do ar entre a sala e o espaço posterior dos painéis. Esta situação está representada na Figura 9 parte A.

No verão pode ocorrer a situação B da Figura 2.9 onde o calor produzido nos painéis é evacuado diretamente para o exterior, ou a situação C onde é aproveitado o efeito de chaminé para evacuação do calor interno da sala para o exterior, abrindo o orifício inferior mantendo o superior fechado.

O sistema pode ainda funcionar na meia estação como um sistema de pré-aquecimento do ar de ventilação, representado na situação D da Figura 2.9.

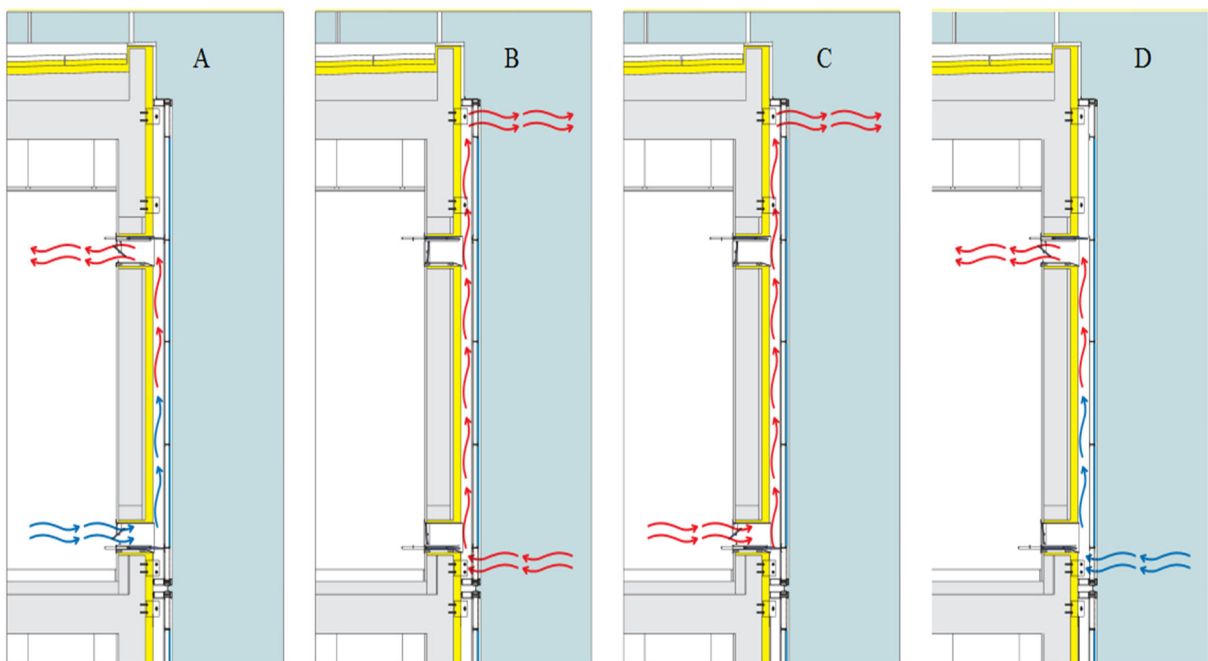


Figura 2.9- Esquemas representativos do desempenho de sistemas fotovoltaicos híbridos de fachada [13]

Para além das vantagens já apontadas, todas estas situações contribuem para o arrefecimento dos painéis pela parte posterior, não deixando que as altas temperaturas reduzam o rendimento do painel fotovoltaico [13].



Figura 2.10 – Orifícios de ventilação [13]

#### 2.2.4.4.3 Fachada híbrida de concentração linear

A fachada híbrida de concentração linear é um sistema que possui finas lentes plásticas que concentram os raios solares para um coletor linear que possui células fotovoltaicas para produção de energia elétrica. A produção elétrica possui um rendimento de 25%, muito superior aos tradicionais, havendo aproveitamento térmico do calor gerado para aquecimento de água ou do ambiente interior.

A grande vantagem deste sistema consiste no maior aproveitamento térmico principalmente em dias de inverno. Ao canalizar os raios para uma pequena área consegue superar o arrefecimento criado pelo ambiente, que é o principal problema dos sistemas correntes. A sua alta eficiência na captação de energia solar que converte em elétrica, possibilidade de integração com a fachada e o aspeto moderno e diferente são mais-valias deste inovador sistema [14].

A Figura 2.11 é uma imagem simulada, de um edifício com este tipo de sistema implementado, estando mais pormenorizado na Figura 2.12.



Figura 2.11 – Edifício com fachada híbrida de concentração linear simulado por computador [14]

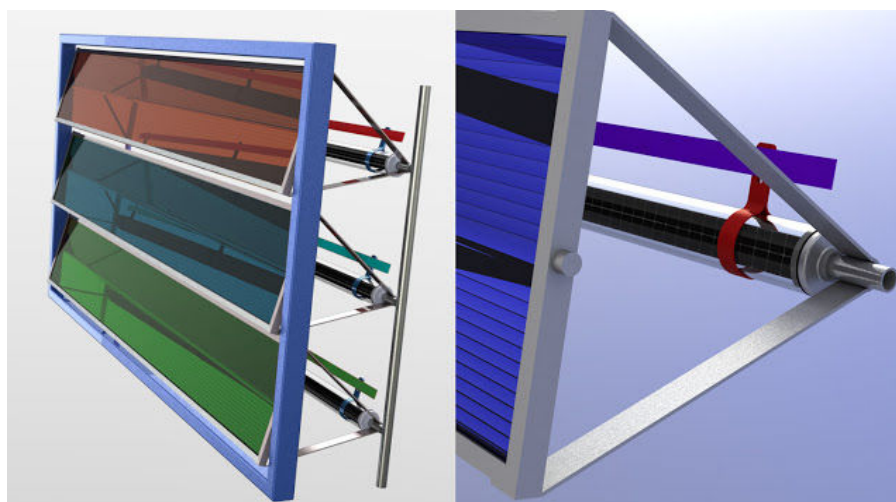


Figura 2.12 – Sistema híbrido de concentração linear [14]

#### 2.2.4.4.4 Fachadas duplas transparentes ventiladas

As fachadas duplas transparentes ventiladas (“double-skin”) consistem essencialmente na duplicação da fachada envidraçada dando assim origem a um sistema composto por duas superfícies de vidro separadas por uma câmara central ventilada. [15] Esta é destinada a ações de ventilação podendo incorporar aparelhos de controlo solar e aberturas. Usualmente as superfícies envidraçadas são designadas por “Pele” incorporando vidros simples ou duplos.

As principais desvantagens associadas ao uso das fachadas duplas transparentes ventiladas incidem sobre o acréscimo de custo associado à sua materialização e sobre o possível sobreaquecimento dentro da câmara central ventilada, verificando-se o agravamento deste fator em edifícios associados a fortes ganhos térmicos internos produzidos pelos equipamentos

elétricos e informáticos, característicos do sector terciário e em locais cujo clima possui grande amplitude térmica, verões quentes e com grande percentagem de insolação.

No seguimento da problemática do sobreaquecimento, surge a importância da ventilação na câmara central ventilada, podendo esta ser realizada naturalmente ou mecanicamente. A solução mecânica não é aconselhável já que reduz a eficiência energética devido à dependência de mecanismos, não reduzindo deste modo os gastos energéticos esperados.

O correto desempenho da ventilação é assegurado pelo devido dimensionamento e escolha da posição das partes abertas das fachadas duplas ventiladas, pela identificação dos pontos que eventualmente necessitam de ajuda mecânica tendo em consideração os aspetos de canalização das massas de ar.

No caso de a ventilação se efetuar por modos naturais, o principal entrave à eficiência do sistema é o vento, na medida em que pode gerar perturbações nos naturais fluxos ascendentes de ar entre os planos de fachada, podendo dar origem ao aparecimento de remoinhos ou correntes de ar contraditórias.

As fachadas duplas transparentes ventiladas podem ser caracterizadas segundo o tipo de ventilação, o tipo de compartimentação da fachada, e pelos modos de funcionamento da ventilação da cavidade intermédia. É um sistema de aplicação discutível no nosso clima devido a ganhos térmicos excessivos no verão.

#### 2.2.4.4.1 Tipos de ventilação

A ventilação indica a forma como se realiza a ventilação da cavidade compreendida entre as duas paredes de vidro, cujos tipos e respetivas categorias de fachadas estão indicados na Figura 2.13 e desenvolvidos nos pontos seguintes.

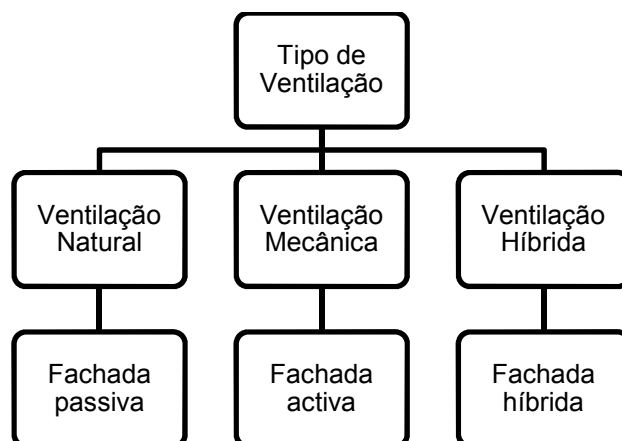


Figura 2.13 - Classificação segundo o tipo de ventilação

A ventilação natural baseia-se nos movimentos das massas de ar resultantes de diferenças de pressão do ar, criadas pelo efeito chaminé e pela ação do vento sem utilização de qualquer meio mecânico de apoio dando assim às fachadas duplas transparentes ventiladas a designação de Fachadas Passivas.

Se por um lado este sistema é o mais amigo do ambiente já que dispensa a instalação de dispositivos de arrefecimento, é o mais difícil de conceber já que o seu comportamento depende das condições de exposição solar e da ação do vento.

A problemática do sobreaquecimento na câmara central ventilada verifica-se com frequência neste tipo de ventilação aconselhando-se desse modo a incorporação deste sistema em climas frios onde o efeito de tiragem térmica será mais importante.

A ventilação mecânica recorre à aplicação de equipamentos de extração de ar para controlo dos movimentos das massas ocorridas dentro da CCV, sendo característico das fachadas ativas.

Como o supracitado, este género de ventilação tem a questão de incorporar mecanismos gastadores de energia, possibilitando no entanto a exata contabilização dos consumos que irão ocorrer quando o edifício estiver em funcionamento.

De modo a conseguir contrapor os pontos negativos apresentados pelos dois tipos de ventilação, surge a ventilação híbrida que os agrega e procura dilatar ao máximo o período de tempo em que a ventilação da cavidade se fará por meios naturais, sendo apenas necessário o recurso a mecanismos nos casos em que se desenvolvam picos térmicos no interior.

A viabilidade económica deste sistema é a principal desvantagem já que obriga a um maior investimento inicial, na medida em que o sistema de controlo informático necessário para tirar o maior partido do sistema é sofisticado e dispendioso.

#### 2.2.4.4.2 Tipos de compartimentação da fachada

A compartimentação de uma fachada dupla transparente ventilada diz respeito ao modo como a fachada é fisicamente construída, tendo em conta a forma da mesma, a local escolhido para as entradas e saídas de ar e o tipo de estrutura a adotar. Na Figura 2.14 são apresentados os vários tipos de compartimentação da fachada.

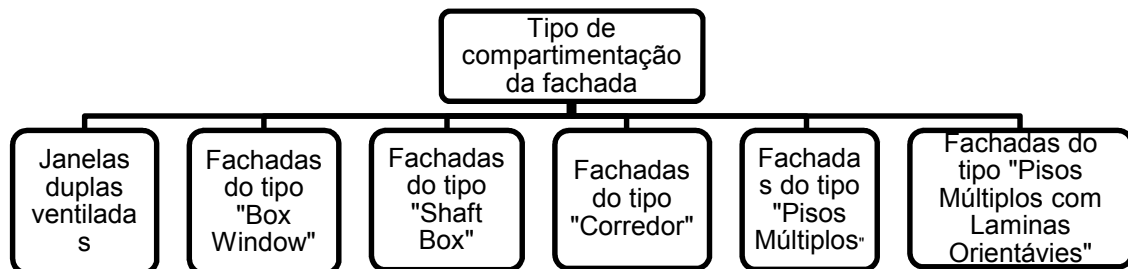


Figura 2.14 - Tipos de compartimentação da fachada [15]

#### 2.2.4.4.3 Modos de ventilação

A movimentação das massas de ar dentro da câmara central de ventilação é independente do tipo de ventilação adotado podendo assumir diferentes modos que podem ser conjugados entre si caso não haja incompatibilidades. A Figura 2.15 resume os modos de ventilação.

Os modos de ventilação em cortina de ar interior e em espaço estante não serão objeto de explicação já que incorporam elementos de cariz mecânico, não interessando desse modo para a realização do presente documento.

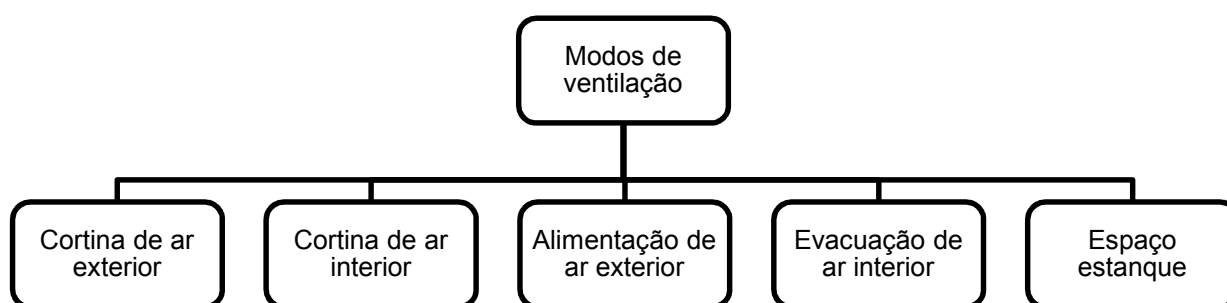


Figura 2.15 - Modos de ventilação

Na cortina de ar exterior, o ar (exterior) entra na câmara central ventilada a uma cota mais baixa, ascendendo verticalmente por tiragem térmica e voltando assim para o exterior a uma cota mais elevada.

O objetivo da alimentação de ar exterior é a promoção de ar fresco ao edifício, aproveitando-se para tal da capacidade de pré-aquecimento possibilitada pela circulação do ar na câmara central ventilada antes da sua entrada no edifício. De forma oposta, a evacuação de ar interior visa a evacuação do ar viciado e sobreaquecido para o exterior de edifício.

#### 2.2.4.4.4 Principais tipologias

No Quadro 2.1 apresentam-se as principais tipologias de fachadas transparentes conjugadas com os modos e tipos de ventilação.

Quadro 2.2 Tipologias de fachadas transparentes

Tipologias de fachadas duplas transparentes ventiladas	Tipo de ventilação	Modo de ventilação
Janelas duplas ventiladas	Natural	Cortina de Ar Exterior Alimentação de ar exterior
	Mecânica	Cortina de Ar Interior
Fachadas do tipo "Box Window"	Natural	Cortina de Ar Exterior
	Mecânica	Cortina de Ar Interior
Fachadas do tipo "Shaft Box"	Natural	Cortina de Ar Exterior
Fachadas do tipo "Corredor"	Natural	Cortina de Ar Exterior Alimentação de ar exterior
		Evacuação de ar interior
Fachadas do tipo "Pisos Múltiplos"	Natural	Cortina de Ar Exterior Espaço estanque
Fachadas do tipo "Pisos Múltiplos com lâmina orientáveis"	Natural	Cortina de Ar Exterior

## 2.3. OUTROS TIPOS DE SISTEMAS SOLARES PASSIVOS

### 2.3.1 LANTERNIM

O lanternim, tal como os próximos sistemas, é um dos sistemas solares passivos que não se encontra na fachada, podendo complementar os sistemas de fachada adicionando mais ganhos térmicos solares passivos ao edifício. É uma abertura vertical ou muito inclinada localizada no telhado que permite ganhos solares diretos. Como estas aberturas não se localizam na fachada sul, permitem a penetração da radiação solar para zonas mais a norte do edifício.

A desvantagem deste sistema é a baixa eficácia em edifícios com muitos pisos já que as aberturas se localizam no telhado e irradiam apenas os últimos pisos de edifícios. Em armazéns ou fábricas é bastante usual o uso de lanternim nas coberturas em dente de serra, que reparte a radiação em grandes áreas cobertas de uma forma mais homogénea. Na Figura 2.16 pode-se observar um lanternim num edifício industrial [4].



Figura 2.16 – Lanternim [4]

Para otimizar os ganhos solares são utilizados lanternins em planos inclinados, perpendiculares aos raios solares no inverno. O exemplo apresentado da Figura 2.17 é uma solução mais complexa, que roda sobre o seu eixo vertical, permitindo orientar o lanternim para a obtenção de radiação solar quando necessário. Desta forma, no verão a área transparente é orientada para norte, sendo a radiação direta refletida pela cobertura [4].

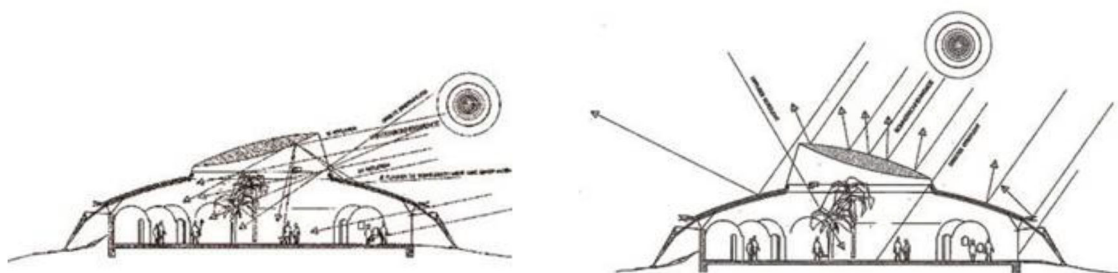


Figura 2.17 – Lanternim rotativo [4]

### 2.3.2 CLARABOIA

Abertura horizontal localizada em coberturas planas ou pouco inclinadas, pode ser de vidro ou em plástico (policarbonato ou acrílico), e de várias formas (cônica, poliédrica ou semiesférica). Este tipo de sistema é mais vocacionado para a iluminação natural, muito utilizado nos edifícios do Porto no século XIX para iluminar a caixa de escadas. Se for utilizado em conjunto com um elemento refletor é mais eficiente no aproveitamento dos ganhos solares no inverno, podendo também ser protegido no verão para evitar ganhos solares excessivos. Sem refletor e sombreador incorporados pode ser prejudicial, especificamente no clima português, onde ocasiona ganhos indesejados no verão e não aquecendo no inverno. Na Figura 2.18 está representado um exemplo de uma claraboia.



Figura 2.18 – Claraboia [16]

### 2.3.3 COBERTURAS DE ÁGUA

Neste sistema é colocada água sobre a laje da cobertura para funcionar como massa de armazenamento térmico, sendo um sistema de ganhos indiretos. Exposta à radiação solar a água absorve e armazena calor. A água está contida em reservatórios transparentes, fechados, para evitar a sua evaporação. A parte interior da cobertura é normalmente de um material com elevada condutividade (metálico), com tratamento anti humidade, para favorecer a transmissão de calor por radiação para o interior.

Para um fornecimento uniforme de calor, os recipientes com água devem cobrir todos os espaços habitáveis. É usual o sistema ser provido de um isolamento móvel para reduzir as perdas de calor não desejadas no inverno, e os ganhos solares excessivos durante o dia no verão.

Em dias de inverno com céu limpo, a energia solar absorvida é em parte cedida para o ambiente interior, e a restante armazenada. Durante a noite, a cobertura de água com isolamento móvel irradia o calor armazenado para o interior. Em dias quente de verão, com o isolamento ativo, a água está mais fria que o ambiente interior, produzindo-se refrigeração deste por transferência de calor para a massa de água. Quando a temperatura arrefecer ao fim de tarde ou à noite, retira-se o isolamento móvel para a água arrefecer, irradiando o calor armazenado para o exterior [4], [5].

Um esquema de uma cobertura de água está apresentado na Figura 2.19.

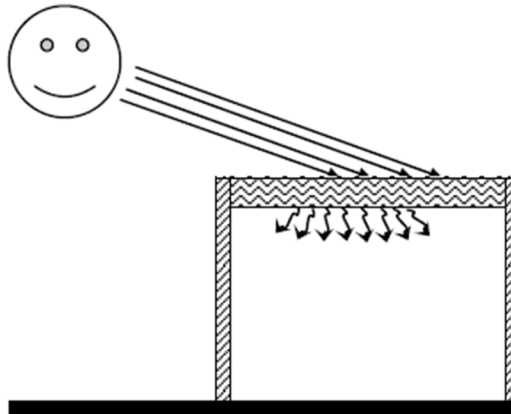


Figura 2.19 – Esquema de uma cobertura de água [4]

#### 2.3.4 SISTEMAS DE GANHO INDIRETO PELO PAVIMENTO

Este sistema é composto por um elemento acumulador, que pode ser água ou um depósito de pedras, que é colocado por baixo do pavimento do compartimento a climatizar. É provido de um sistema de captação orientado a sul, com um vidro exterior que proporciona um efeito de estufa. A transmissão de energia solar passa desde a superfície de captação até ao interior do depósito por convecção natural do ar ou da água. Para o ambiente interior, o calor faz-se desde o solo, por condução e radiação de onda longa, produzindo-se um certo atraso e amortecimento da oscilação da temperatura [4],[5].

Pode-se aumentar o rendimento e controlo do sistema mediante um circuito de convecção forçada. O ar ao passar pelo interior do depósito de pedras aquece, e cede ao ambiente energia térmica mediante aberturas reguláveis [4]. A Figura 2.20 apresenta um esquema de um pavimento de armazenamento térmico.

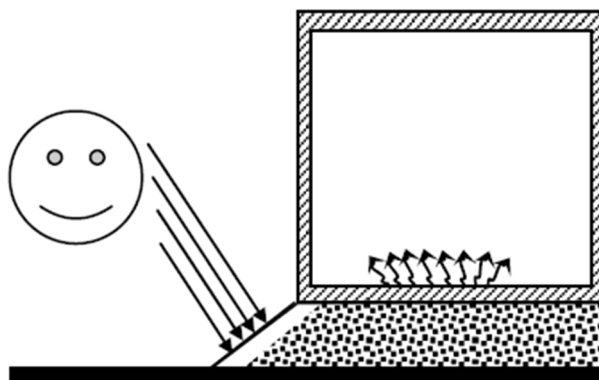


Figura 2.20 – Esquema de um pavimento de armazenamento térmico [4]

## **2.4. SISTEMAS PASSIVOS DE ARREFECIMENTO**

As temperaturas de verão em países como Portugal podem causar desconforto, podendo ainda haver ganhos no verão devido a sistemas solares passivos de aquecimento com proteção solar ou controlo insuficiente. Os mecanismos de passivos de refrigeração podem ajudar a alcançar condições ambientais de conforto nas épocas de arrefecimento, reduzindo nos gastos energéticos nos edifícios que disponham de sistemas mecânicos de refrigeração.

A eficácia deste tipo de sistemas pode ser incrementada se forem previstos na fase de conceção do edifício, sendo alguns critérios específicos para a refrigeração, outros são comuns com as necessidades de aquecimento: orientação do edifício, a utilização de isolamento térmico e uma inércia térmica adequada.

Critérios gerais que favorecem a refrigeração natural de um edifício diferem segundo a estação quente seja seca ou húmida. Em ambos os casos a orientação com as fachadas principais a sul e norte favorecem a ventilação natural por aumento do gradiente térmico provocado pelo sol que aquece mais a fachada sul. O isolamento da cobertura do edifício é também comum para ambas as estações quentes.

Em climas secos é preferível uma arquitetura com habitações compactas e serradas, com uma superfície exterior mínima. Espaços interiores enterrados parcial ou totalmente e paredes espessas com grande inércia e cor clara para refletir a radiação solar. A utilização de fontes ou lagos que humidifiquem o ar é frequente neste tipo de climas.

Em climas quentes e húmidos, é preferível uma construção dispersa com grande superfície exterior e paredes ligeiras. Aberturas amplas favorecem a ventilação natural e mecanismos para proteção solar e da chuva são necessários.

Da mesma forma que os sistemas passivos de aquecimento, os sistemas de arrefecimento dividem-se em três grupos, arrefecimento direto, indireto e separado. Na figura 2.21 está apresentado um esquema que resume os tipos de sistemas por tipo de arrefecimento [4],[7].

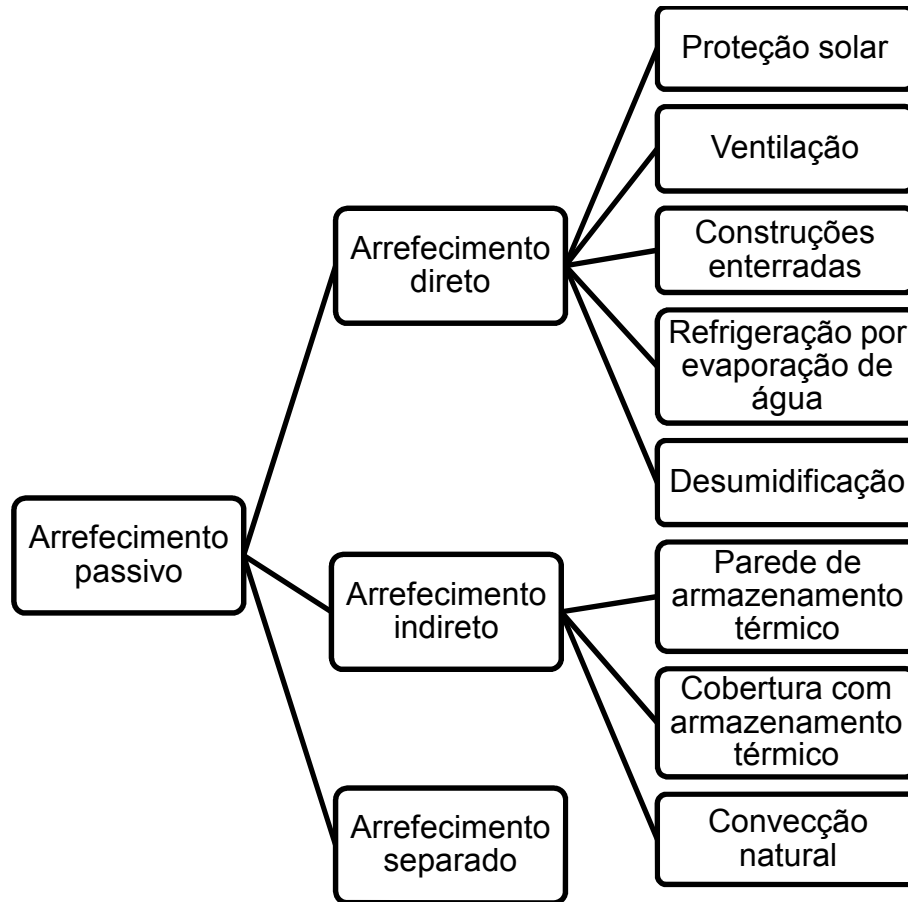


Figura 2.21 – Esquema com os tipos de arrefecimento passivo

## 2.4.1 ARREFECIMENTO DIRETO

### 2.4.1.1 Proteção solar

O arrefecimento direto inclui a proteção solar e os sistemas de arrefecimento que coloquem o ambiente em contacto direto com uma fonte fria, o céu durante a noite, ar fresco noturno, a terra ou água. A proteção solar é um fator essencial para um bom comportamento térmico em praticamente todos os climas com exceção dos muito frios. As suas dimensões e características devem ter em conta as diferentes alturas e azimutes do sol durante o ano por análise das respetivas cartas solares.

É possível o aproveitamento de sombreamento de elementos naturais, como vegetação de folha caduca que permite a passagem dos raios solares no inverno, ou relevos geográficos que sombreiem o edifício. O sombreamento pode se efetuar por conceção arquitetónica com a diferente orientação dos vãos, posição relativa a construções existentes, pela volumetria e forma da construção.

A proteção solar pode também se efetuar por palas, estores manobráveis que apresentam baixo peso e custo com regulação do fluxo solar, e com isolamento noturno [4]. Algumas variáveis destes sistemas estão apresentados na Figura 2.22.

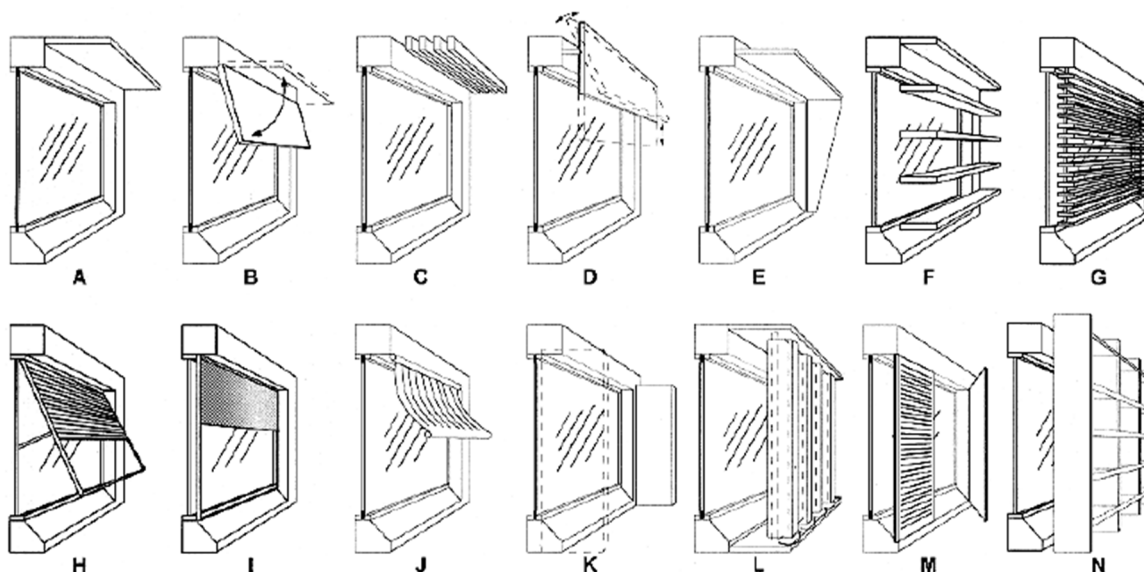


Figura 2.22 – Exemplos de sistemas de proteção solar exteriores de janelas [4]

#### 2.4.1.2 Ventilação natural

A ventilação natural dissipa o calor quando a temperatura exterior é mais baixa do que a interior, o que acontece com mais frequência nas primeiras e últimas horas do dia.

A diferença de temperatura provoca variações na densidade do ar, havendo ventilação por convecção natural. Há também ventilação natural criada por ação do vento sobre o edifício, sendo necessário um correto posicionamento e dimensionamento dos vãos envidraçados [7].

Para otimizar a ventilação natural de um edifício este deverá apresentar a superfície de fachada maior e áreas de aberturas maiores na zona que recebe geralmente o vento na estação quente. A instalação de grelhas autorreguláveis em portas e janelas otimizam a ventilação natural do edifício [4].

A ventilação natural pode ser efetuada pelos seguintes sistemas [4]:

- Ventilação cruzada;
- Ventilação induzida por estratificação (chaminé e câmara solar);
- Aspirador estático;
- Torre de vento;

##### 2.4.1.2.1 Ventilação cruzada

A ventilação cruzada consiste em favorecer o movimento do ar de um espaço ou de espaços associados, pela colocação de aberturas em fachadas opostas, como se pode ver na Figura 2.23. Este tipo de ventilação é aconselhável em climas secos e temperados, para arrefecimento noturno durante o verão. As aberturas devem ser efetuadas nas fachadas em comunicação com o exterior, que possuam condições de radiação ou de exposição ao vento diferentes.

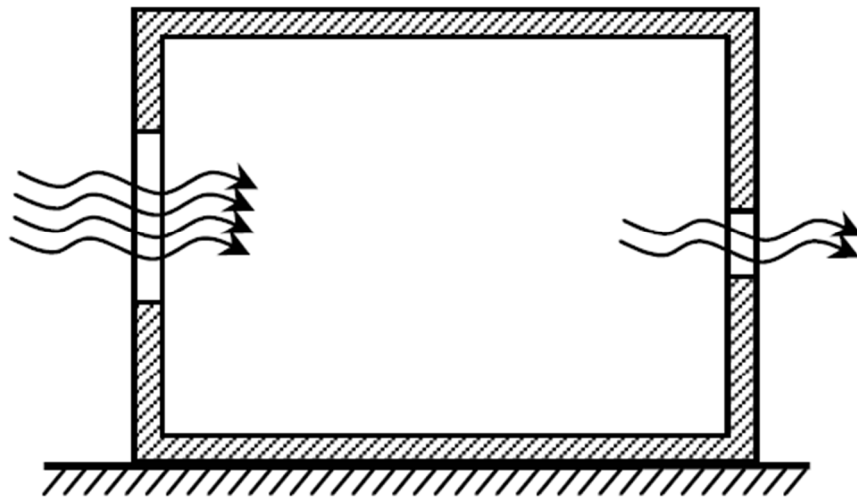


Figura 2.23 – Exemplo de ventilação cruzada [4]

#### 2.4.1.2.2 Ventilação induzida por estratificação

A estratificação do ar nos edifícios pode produzir ventilação quando não existe deslocação do ar exterior. Ao colocar uma abertura na parte superior do espaço, o ar quente vai ser expelido e substituído por ar fresco que entra por aberturas junto ao pavimento. O ar deve ser introduzido pela zona mais fresca do edifício, geralmente a fachada norte.

Caso a temperatura exterior não esteja a uma temperatura mais quente que a parte mais alta do edifício, a troca de ar não se irá efetuar. Um dos exemplos é a chaminé solar, exemplificada na Figura 2.24.

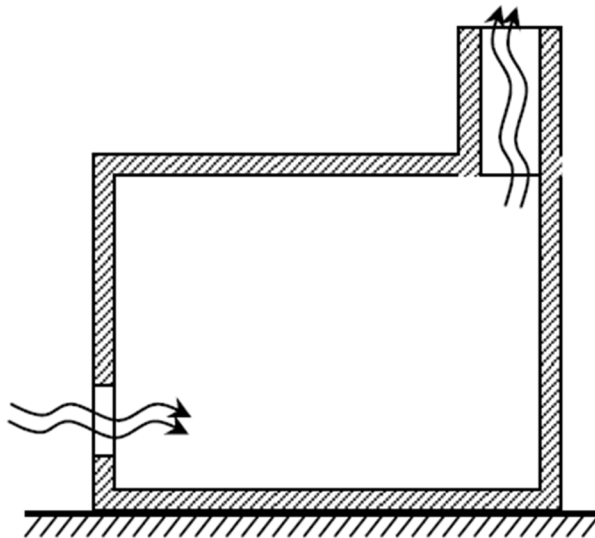


Figura 2.24 – Chaminé solar [4]

Uma solução para este problema consiste em instalar uma câmara com um captador de cor escura protegido por um vidro, aquecendo o ar na parte superior, produzindo um efeito de sucção maior. As

câmaras solares são orientadas a sul, este ou oeste, conforme o horário de utilização requerido. Este sistema é também vantajoso por obter um maior rendimento nas alturas de maior radiação solar, quando a ventilação é mais necessária. Na Figura 2.25 está exemplificado um sistema de câmara solar.

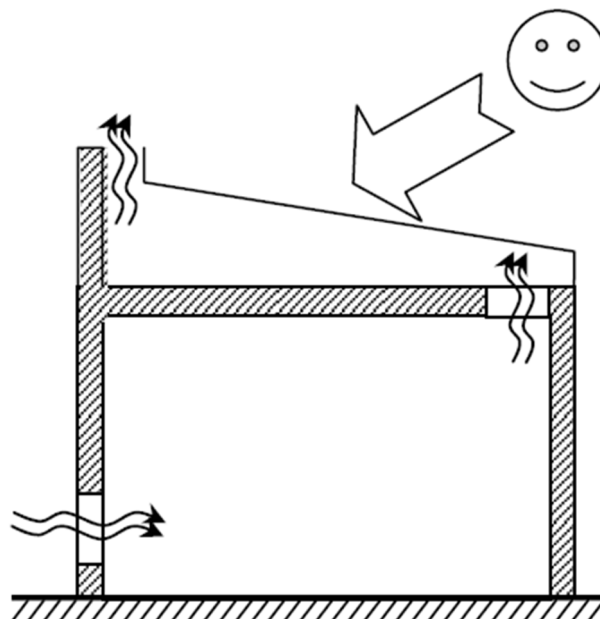


Figura 2.25 – Câmara solar [4]

#### 2.4.1.2.3 Aspirador estático

O aspirador estático é mais um sistema com extração de ar pela cobertura e entrada de ar pela parte inferior. Este sistema cria uma depressão no ar interior devido à sucção induzida por um dispositivo estático, situado na cobertura.

O dispositivo cria um efeito de Venturi ao vento que o atravessa (acelera o vento ao diminuir a secção por onde ele passa), causando a aspiração do ar interior. É aplicável a climas temperados e quentes mas devem ser utilizados em zonas com ventos constantes, para se obter uma utilidade efetiva. Na figura 2.26 está representado um exemplo ilustrativo do funcionamento de um aspirador estático.

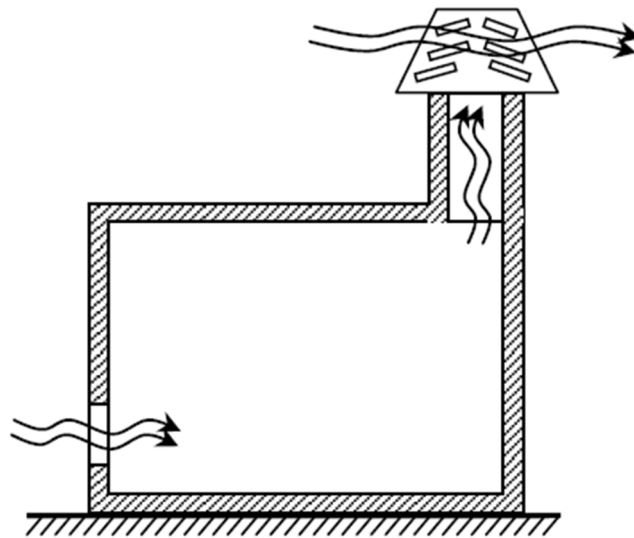


Figura 2.26 – Sistema de ventilação com aspirador estático [4]

#### 2.4.1.2.4 Torre de vento

Ao contrário dos três sistemas anteriores, a torre de vento circula o ar da parte superior para a inferior. O ar exterior entra no ambiente interior por através de uma torre que recolhe o vento a uma altura superior, onde este é mais intenso, sendo conduzido por condutas para a parte mais baixa do edifício. O sistema é válido em zonas com ventos frequentes e intensos, podendo-se combinar diversas entradas de ar na parte superior para introduzir vento de várias direções. Caso o vento seja constante existe apenas uma abertura na direção mais favorável, podendo ainda ser combinados com sistemas de extração mecânica. Um exemplo de extração por torre de vento está exemplificado na Figura 2.27.

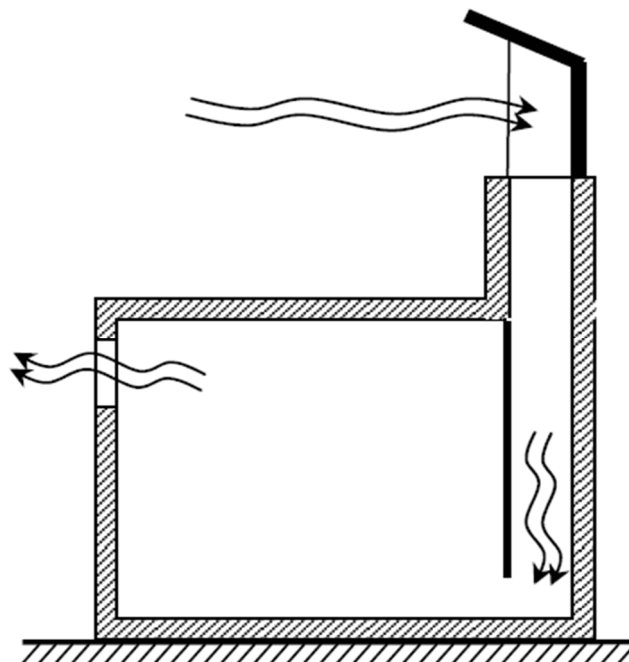


Figura 2.27 – Torre de vento [4]

#### 2.4.1.3 Construções enterradas

A temperatura do solo varia praticamente apenas pela latitude e profundidade do ponto considerado, mantendo-se quase constante o ano inteiro. O solo encontra-se no verão mais frio que a temperatura exterior, havendo trocas de calor com as partes do edifício que se encontram enterradas.

No inverno acontece o oposto, podendo o solo contribuir para um aumento da temperatura no interior. O aproveitamento de desníveis do terreno contribui para uma maior facilidade em enterrar o edifício, aumentando o contacto com o solo [4].

#### 2.4.1.4 Arrefecimento por evaporação de água

Num ambiente quente e seco, se houver água a correr de preferência com alguma agitação, esta evapora-se, aumentando a humidade do ar. Durante este processo, a água absorve energia calorífica sem aumentar a sua temperatura, produzindo-se um efeito de arrefecimento e humedificação ao mesmo tempo.

A eficiência destes sistemas é maior quanto mais superfície de contacto entre a água e o ar houver, e o estado de agitação da água, por isso o uso de fontes e correntes que incrementam a turbulência e a superfície de evaporação. A incidência de vento favorece também a evaporação. As coberturas de água presentes no ponto 2.3.3 podem ajudar a manter o edifício fresco usando a evaporação, refrescando a superfície do teto absorvendo o calor do interior. Outra forma de arrefecimento por evaporação de água, é a de uma fachada em que a água escorre sobre uma rede que deixa passar o ar, propiciando a evaporação [4].

#### 2.4.1.5 Arrefecimento por desumidificação

O excesso de humidade cria um efeito de desconforto no corpo humano, não deixando que o suor se evapore. Desta forma o corpo humano não expele energia por evaporação, encontrando-se em desconforto por excesso de calor. Os desumidificadores são materiais porosos que captam a humidade do ar, deixando-o seco.

Este processo liberta energia sendo preciso uma superfície de baixa temperatura para a absorver, mantendo o conforto. O material desumidificador pode ficar saturado de água, mas fazendo-se passar uma corrente de ar quente sobre o material este seca, podendo voltar a retirar humidade do ar. Os materiais mais utilizados como desumidificadores são o gel de sílica e a alumina [4].

#### 2.4.2 ARREFECIMENTO INDIRETO

O arrefecimento indireto utiliza elementos que absorvem o calor do edifício, radiando a energia para o exterior ou refrigerando com um fluxo de ar fresco. A radiação noturna e a ventilação noturna são dois tipos de sistemas de arrefecimento indireto.

A radiação noturna consiste nas trocas de calor por radiação, havendo trocas de elementos mais quentes para elementos mais frios. A cobertura de água aproveita-se deste fenómeno, no verão é isolada durante o dia para absorver o calor do ambiente interior e não da radiação solar. À noite é retirado o isolante térmico para a água irradiar o calor para o exterior. Este tipo de sistemas funciona quando as noites são de céu limpo e possuem temperaturas pelo menos 10°C inferiores às diurnas. A

superfície radiante também pode ser localizada nas fachadas, mas possui uma eficiência inferior quando comparadas com as localizadas na cobertura [4].

A refrigeração por ventilação noturna consiste em ventilar o edifício com ar fresco durante a noite ou nas primeiras horas do dia. O ar vai refrescar os elementos de armazenamento térmico do edifício, que durante o dia captam o calor do ambiente interior. Uma variante da ventilação noturna consiste quando o elemento de armazenamento térmico é um leito de pedras localizado sob o espaço a climatizar. O ar fresco exterior arrefece as pedras durante a noite, para durante o dia o ar mais quente do exterior atravessar as pedras perdendo parte do seu calor, arrefecendo o interior [4].

#### **2.4.3 ARREFECIMENTO SEPARADO**

O arrefecimento separado faz as trocas de calor numa zona separada do ambiente a refrigerar. A fonte fria pode ser água, um leito de pedras ou a terra. Fazendo circular o ar exterior por uma tubagem enterrada ou que passe num leito de água, arrefece o ar que depois entra no ambiente interior, arrefecendo-o. O sistema é aberto se arrefece ar exterior que posteriormente vai entrar no edifício, ou fechado se refrigera ar recolhido do interior do edifício.

### **2.5. ESCOLHA PARA SIMULAÇÃO**

Chegando ao fim do capítulo onde foram expostos os sistemas solares, escolheu-se a parede de trombe para ser simulada numericamente. A sua rara existência em edifícios portugueses e a pouca bibliografia a quantificar os ganhos térmicos de uma parede de trombe em localidades do nosso país são razões da escolha efetuada. O território português possui localidades com necessidades anuais de aquecimento elevadas, com temperaturas exteriores baixas mas com uma radiação solar razoável, o que poderá ser um ambiente propício para a parede de trombe apresentar bons resultados.



## 3

## SIMULAÇÃO TÉRMICA

## 3.1. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO TÉRMICA

Para o desenvolvimento da simulação térmica de uma parede de trombe a um caso concreto, procedeu-se à escolha de um programa de simulação térmica de edifícios com as capacidades necessárias. Foi efetuada uma pesquisa na internet de onde se destaca a base de dados de programas de simulação térmica de edifícios do Departamento de Energia dos EUA [17]. Desta base de dados, foram retiradas informações sobre os programas existentes, tendo sido posteriormente instalados e experimentados os programas presentes no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Programas de simulação térmica de edifícios

Programas	Parede Trombe	Observação
DesignBuilder®	Sim	Interface do EnergyPlus, fácil introdução de dados 3d, clima português, inputs e outputs muito detalhados e completos
EnergyPlus®	Sim	Completo como o DesignBuilder® mas mais difícil de trabalhar e compreender
ESP-r®	Sim	Versão Windows® com erros, apesar de completo o modo de introdução de dados é confuso e foi preciso um programa de emulação de um ambiente Linux® (Cygwin®)
HEED®	Não	
Homer®	Não	
HOT2000®	Não	
Solar-5®	Não	
SolArch®	Não	
SolarShoeBox®	Não	
TopEnergy®	Não	
TRNSYS®	Sim	Difícil de trabalhar, pouco intuitivo, várias interfaces

O programa escolhido foi o DesignBuilder®. É um programa muito completo, com múltiplas variáveis, com base de dados extensas de materiais, sistemas e dados climáticos. A sua interface é mais simples do que em programas semelhantes, sendo menos complicado de introduzir os dados e de correr as simulações.

O programa escolhido possui os algoritmos de cálculo necessários para o cálculo das transferências de calor de uma parede de trombe [18], seguindo a norma ISO 15099:2003: “Performance térmica de janelas, portas e elementos de sombra – Cálculos detalhados” [19]. O DesignBuilder® é um interface gráfico do programa de simulação térmica dinâmica EnergyPlus®, um dos programas acreditados pela norma ASHRAE 140-2004: “Método de teste para avaliação da análise energética dos edifícios” [20], obrigatória pelo Regulamentos dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) para grandes edifícios de serviços [21], o que não é o nosso caso.

### 3.2. CASO DE ESTUDO

O edifício unifamiliar modelado é de tipologia T2 de um piso, com uma área útil de 201,5m<sup>2</sup> e pé direito de 3m com uma parede de trombe ao longo de toda a fachada sul, protegida por uma pala horizontal. A parede de trombe comunica com a sala e um quarto, para onde é trocado o calor da caixa-de-ar por grelhas de ventilação. A Figura 3.1 mostra uma vista exterior das fachadas sul (parede de trombe) e nascente.



Fig.3.1 – Vista exterior do edifício simulado

A planta do edifício está representada na Figura 3.2, com a legenda na seguinte lista:

- 1 – Sala;
- 2 – Quarto 1;
- 3 – WC do Quarto 1;
- 4 – WC de serviço;
- 5 – Cozinha;
- 6 – Comunicações horizontais comuns;
- 7 – Quarto 2;
- 8 – WC do Quarto 2;
- 9 – Pala de proteção solar;

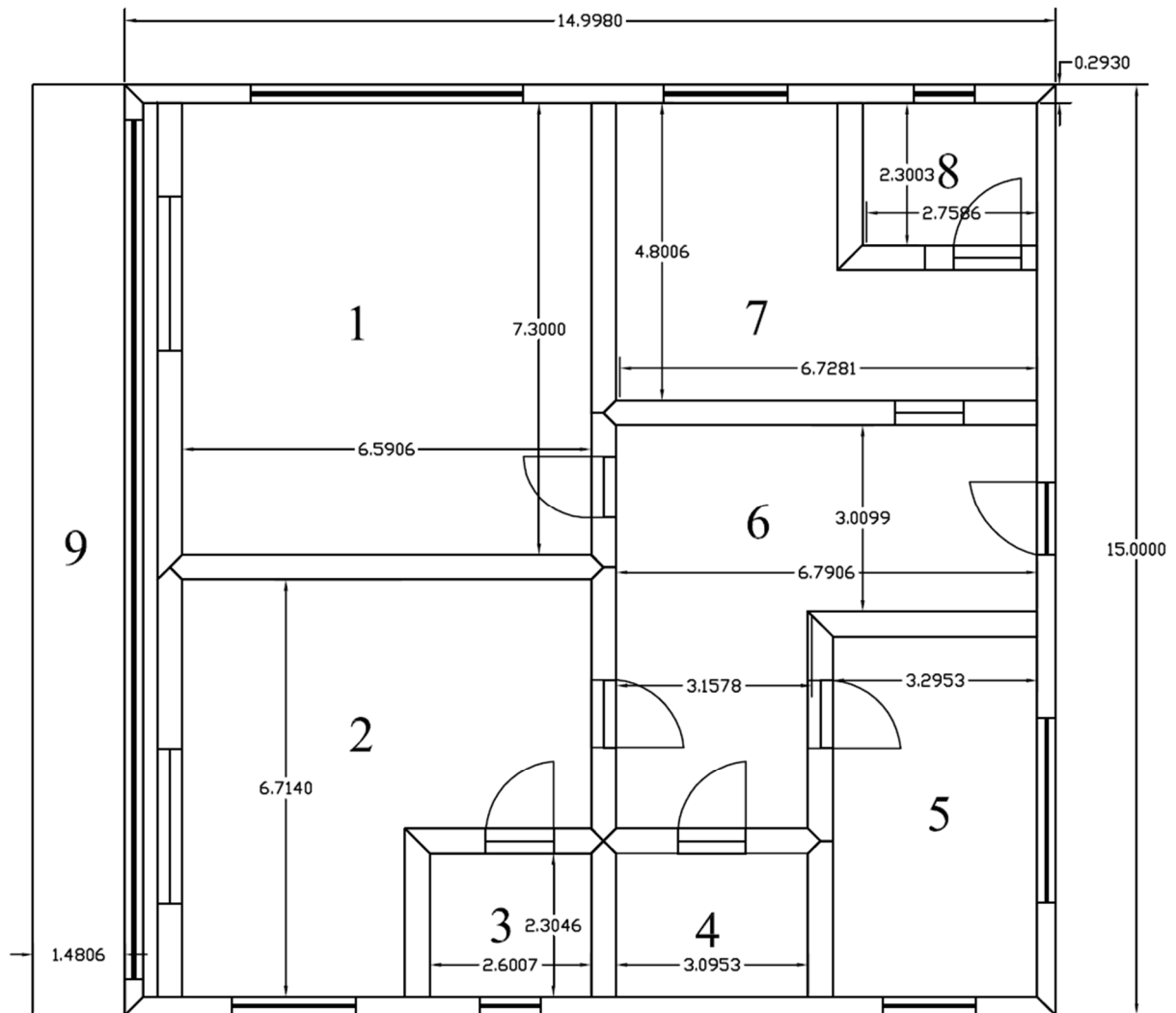


Fig.3.2 – Planta do edifício

Os primeiros dados introduzidos no DesignBuilder® são relativos à localização. As simulações decorrem em três localizações diferentes, Lisboa, Beja e Bragança. Ao escolher a localização o programa automaticamente adiciona as coordenadas, elevação, distância ao mar, vento, fuso horário e os dados climáticos horários de um ano da base de dados do INETI, agora o Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Os dados climáticos importados pelo programa são anuais e apresentam os valores horários da temperatura exterior, temperatura de ponto de orvalho, velocidade e direção do vento, altitude solar, azimute solar, pressão atmosférica, radiação solar direta e difusa. Os restantes dados introduzidos no DesignBuilder® estão aglomeradas em 6 partes:

- Layout (esboço) – dados arquitetónicos;
- Atividade – dados da atividade no edifício;
- Tipo de Construção – dados construtivos;
- Aberturas – dados relativos às aberturas;
- Iluminação – dados sobre a iluminação artificial;
- AVAC – dados sobre aquecimento, ventilação e ar condicionado;

Cada uma destas partes está detalhada nos quadros seguintes.

Quadro 3.2 – Dados arquitetónicos

Divisão	Área (m <sup>2</sup> )	Área envidraçados (m <sup>2</sup> )			
		N	S	E	O
1	48.1	-	-	-	6.6
2	36.1	-	-	3	-
3	5.8	-	-	0.9	-
4	7.0	-	-	1	-
5	19.1	4.5	-	2.3	-
6	31.3	-	-	-	-
7	23.9	-	-	-	3
8	6.49	-	-	-	0.9

Quadro 3.3 – Dados de atividade

Input	Valor	Observação
Número pessoas	4	Em cada divisão foi colocada a atividade das pessoas correspondente, com o número de horas para cada diferente atividade.
Água quente por pessoa (litros)	40	Presente no RCCTE
Temperaturas alvo de funcionamento do aquecimento (°C)	17-20	O aquecimento trabalha até o interior chegar aos 20°C (RCCTE), voltando a ligar quando a temperatura descer para os 17°C
Temperaturas alvo de funcionamento do arrefecimento (°C)	0	Não foi adicionado qualquer sistema de arrefecimento.

Quadro 3.4 – Dados construtivos

Input	Tipologia	Dimensões (m)	Material	U (W/m <sup>2</sup> °C)
Paredes exteriores	Parede dupla com caixa-de-ar parcialmente ocupada por isolante térmico	Reboco exterior – 0.015	Argamassa de reboco com base de cimento	0.516
		Pano exterior – 0.150	Bloco de cimento	
		Caixa-de-ar – 0.040	Ar	
		Isolante térmico – 0.040	Poliestireno extrudido em placas	
		Pano interior – 0.110	Bloco de cimento	
		Reboco interior – 0.015	Argamassa de reboco com base de cimento	
Cobertura plana	Camada de proteção pesada de brita, feltro geotêxtil, isolante térmico, camada impermeabilizante, camada de forma e suporte de betão	Proteção pesada - 0.070	Godo	0.450
		Isolante térmico – 0.060	Poliestireno extrudido em placas	
		Impermeabilizante – 0.002	Tela em PVC	
		Camada de forma – 0.050	Betonilha	
		Laje – 0.250	Betão armado	
Paredes interiores	Paredes de gesso cartonado com caixa-de-ar	Gesso cartonado – 0.025	Gesso cartonado	1.64
		Espaço de ar – 0.100	Ar	
Laje térrea	Laje de betão armado com isolante térmico, argamassa de regularização e revestimento	Laje – 0.170	Betão armado	0.588
		Isolante térmico – 0.040	Poliestireno extrudido em placas	
		Argamassa – 0.040	Betonilha	
		Revestimento – 0.020	Madeira	
Portas	Porta exterior de madeira maciça, portas interiores de madeira	Exterior – 0.042	Carvalho	2.079
		Interiores – 0.030	Contraplacado de madeira	2.251

Parede de Trombe	Parede escura de betão provida de um envidraçado de vidro duplo na superfície exterior	Parede de betão – 0.200 a 0.300	Betão	1.19
		Caixa-de-ar – 0.200	Ar	
		Vidro duplo – 0.003 Caixa-de-ar – 0.013	Verde temperado Ar	
Componentes de sombreamento	Pala horizontal no topo da fachada sul	Longitudinal – 15.000		
		Horizontal – 1.480	Betão armado	-
		Espessura – 0.050		

A parede de trombe presente no edifício foi construída seguindo os conceitos mencionados anteriormente, no subcapítulo referente a ganho indireto. Foi definida no Designbuilder® como uma parede de cor preta, de betão com densidade igual a 2100 kg/m<sup>3</sup>, com um envidraçado na superfície exterior, orientada a sul. A parede maciça foi provida de grelhas de ventilação reguláveis, uma no topo e uma no fundo da parede, em cada uma das divisões adjacentes (Quarto 1 e sala, Figura 3.2). A sua operação está regulada para estarem abertas de 30 de Setembro a 31 de Março e fechadas nos restantes meses. Foi definida uma estação de aquecimento de 1 novembro a 20 de março, e de arrefecimento de 1 Maio a 20 setembro, com o intuito de uma melhor visualização dos valores apresentados.

A Figura 3.3 mostra como o ar interior entra na grelha junto ao fundo da parede, é aquecido na caixa-de-ar da parede de trombe, subindo por convecção para voltar a entrar na grelha superior. Os envidraçados estão protegidos por uma pala horizontal com 1,48m de largura ao longo de toda a parede. Na Figura 3.4 está representado um corte esquemático da parede trombe, cuja legenda é a seguinte: 1- Parede maciça de betão; 2 – Caixa-de-ar; 3 – Envidraçado;

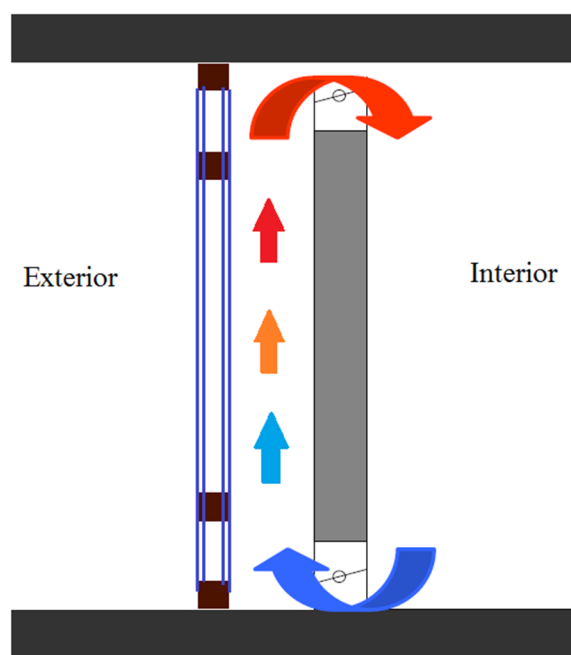


Fig.3.3 – Funcionamento da Parede de trombe simulada

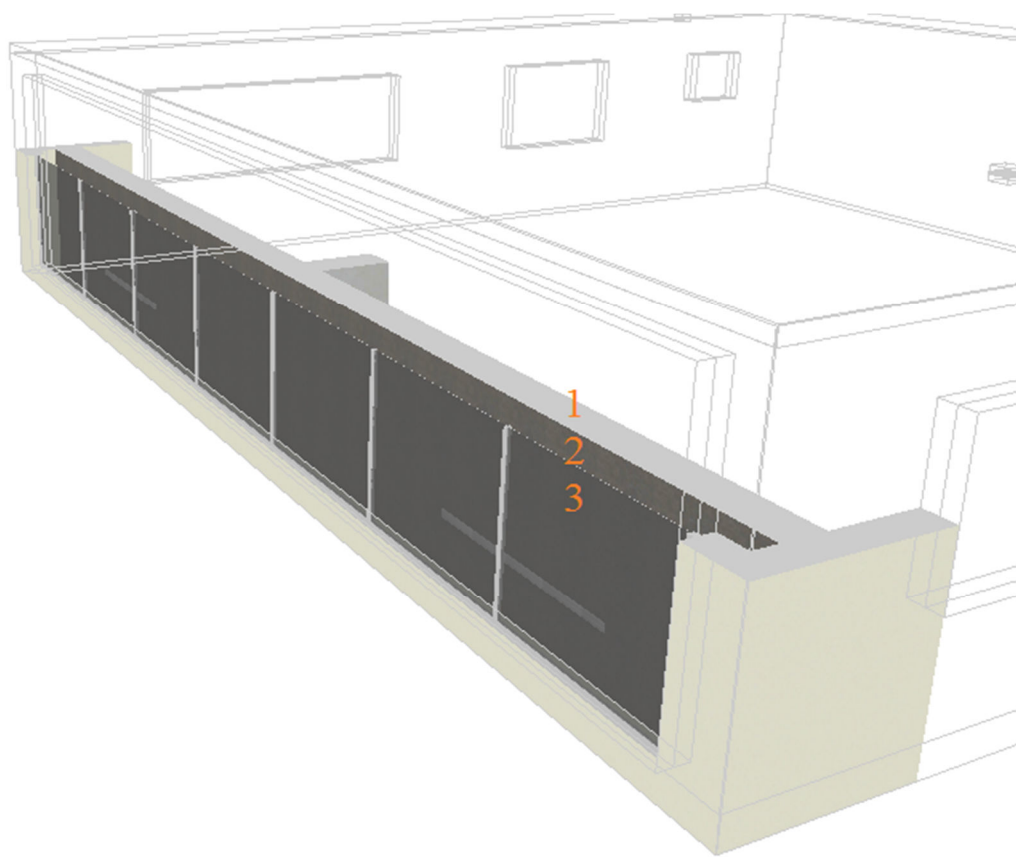


Fig.3.4 – Corte da parede de trombe simulada

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram a eficácia da pala através da sombra provocada na parede de trombe, nos dias 21 de junho e 21 de dezembro respetivamente, ao meio dia.

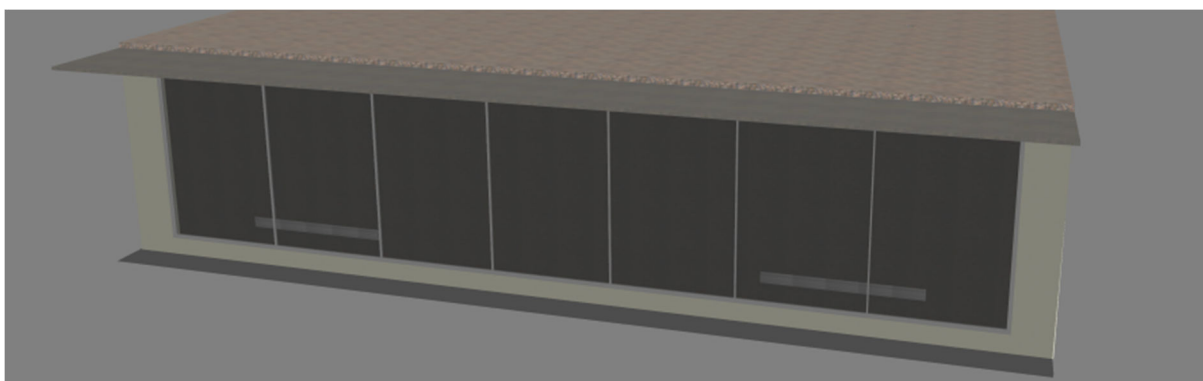


Fig.3.5 – Desempenho da pala ao meio dia do dia 21 de junho

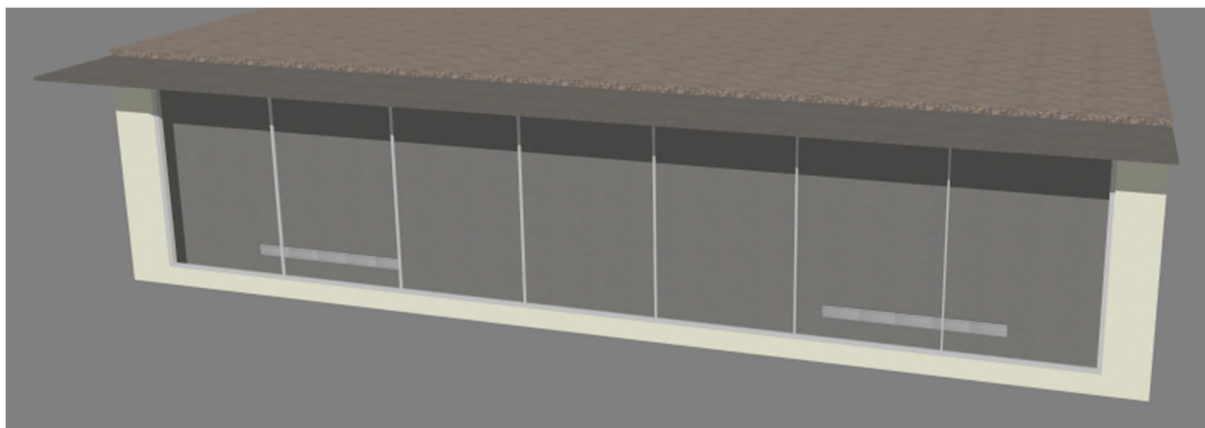


Fig.3.6 – Desempenho da pala ao meio dia do dia 21 de dezembro

Quadro 3.5 – Aberturas

Input	Tipologia	Dimensões (m)	Material	U (W/m <sup>2</sup> °C)
Janelas	Vidro duplo com caixa-de-ar provido de divisórias suspensas	Caixilho – 0.055	PVC	2.716
		Vidros – 0.003	Vidro temperado verde	
		Caixa-de-ar – 0.013	Ar	
		Divisórias – 0.010	PVC	
Proteção solar das janelas	Estores exteriores de alta refletividade	Largura – 0.010	PVC	0.900 Fator solar: 0.100

O controlo sobre a proteção solar das janelas é também introduzido nesta fase. Os dados introduzidos ativam os estores quando a temperatura dos compartimentos ultrapassar os 24°C.

Quadro 3.6 – Iluminação

Input	Tipologia	Potência (w/m <sup>2</sup> )	Controlo
Energia de iluminação	Embutidas no teto.	Casas de banho – 12 Restantes divisões – 3	A ativação das luzes está programada segundo esquemas horários próprios para cada divisão, importados do DesignBuilder® para espaços residenciais

Quadro 3.7 – Aquecimento, ventilação e ar condicionado

Input	Tipologia
Sistema de aquecimento	Aquecimento central provido de radiadores alimentado por caldeira a gás
Sistema de arrefecimento	Não instalado

Águas quentes sanitárias	Para aquecimento das águas sanitárias é usada a mesma caldeira do aquecimento central, sem armazenamento, com uma temperatura de entrega de 55°C.
Ventilação natural	Ventilação natural de duas renovações horárias nas casas de banhos, providas de grelhas. Uma renovação horária nos restantes compartimentos

### 3.3. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

As simulações realizadas possuem como variáveis a localização, largura da parede de trombe e a troca da parede de trombe por uma parede exterior igual às restantes do edifício, com uma janela na sala e uma no quarto 1, orientadas a sul com 3m<sup>2</sup> cada de área. As localizações escolhidas são Lisboa, Beja e Bragança, que possuem zonas climáticas de inverno (I) e de verão (V) respetivamente iguais a I1 V2, I1 V3 e I3 V2. Para cada localização foi simulada uma parede de trombe com 200mm e 300mm de parede acumuladora e com uma parede igual às restantes exteriores. Para cada simulação foram calculados os gastos com o aquecimento a gás e os ganhos por ventilação da parede de trombe, e exportados gráficos horários com as temperaturas interiores, perdas e ganhos de calor por vários elementos construtivos, e o número de renovações horárias do ar interior. No quadro 8 encontram-se as simulações resumidas, com os valores anuais dos gastos de aquecimento, e o contributo da parede de trombe nos ganhos térmicos pela ventilação da caixa-de-ar. Como foi dito anteriormente, foi definida uma estação de aquecimento de 1 novembro a 20 de março, e de arrefecimento de 1 Maio a 20 setembro, para as quais se simularam com a parede de 200mm e sem parede de trombe, com o intuito de uma melhor visualização dos valores apresentados.

Quadro 3.8 – Resumo das simulações

Simulação	Localização	Largura Parede (mm)	Estação	Gastos aquecimento kWh	Ganhos ventilação parede trombe (kWh)
1.0	Lisboa	200	Anual	5297	1256
1.1	Lisboa	300	Anual	5268	1433
1.2	Lisboa	200	Aquecimento	4524	806
1.3	Lisboa	200	Arrefecimento	-	-
1.4	Lisboa	Sem	Anual	6381	-
2.0	Beja	200	Anual	6420	1098
2.1	Beja	300	Anual	6437	1322
2.2	Beja	200	Aquecimento	5541	767
2.3	Beja	200	Arrefecimento	-	-
2.4	Beja	Sem	Anual	8384	-

3.0	Bragança	200	Anual	9136	882
3.1	Bragança	300	Anual	9087	1066
3.2	Bragança	200	Aquecimento	6950	513
3.3	Bragança	200	Arrefecimento	-	-
3.4	Bragança	Sem	Anual	11983	

O gráfico da Figura 3.7, apresentado em baixo, apresenta a poupança no aquecimento da habitação em kWh e em percentagem, obtida com as diferentes paredes de trombe em relação à simulação com parede normal. A poupança em kWh é feita pela subtração do valor dos gastos com aquecimento da simulação sem parede de trombe pelos gastos com aquecimento das simulações com parede de trombe, e a percentagem da poupança é obtida dividindo este valor pelos gastos com aquecimento da simulação sem parede de trombe. Representa também os valores com os gastos do aquecimento em kWh.

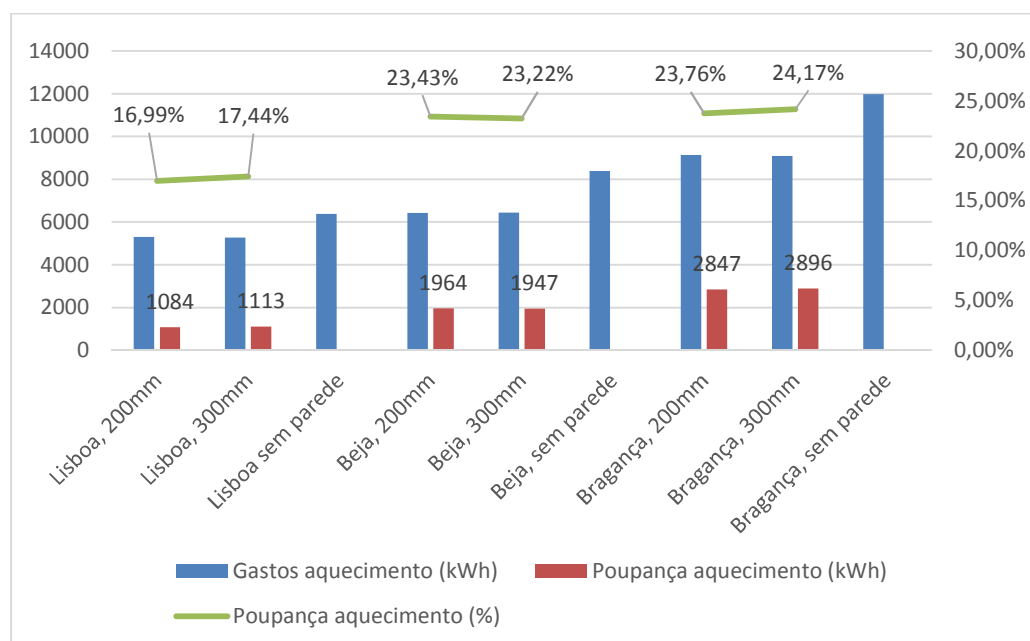


Fig.3.7 – Gastos e poupança no aquecimento

A informação escolhida para ser exportada em gráficos, fornece três grupos de dados: temperaturas, balanço energético e quantidade de ar fresco (Figuras 3.8 a 3.28).

As temperaturas apresentadas são as médias interiores de todo o edifício, logo, temperaturas médias, relativas à temperatura do ar, radiante e operativa. A temperatura média radiante é a temperatura média à superfície dos elementos que envolvem o espaço, e a operativa é a média entre a temperatura média do ar e a temperatura média radiante. As temperaturas estão escalonadas à hora, obtendo-se um intervalo de temperaturas nos gráficos, já que apresentam grandes intervalos de tempo. Desta forma permite-nos saber com melhor precisão os valores máximos e mínimos obtidos, não escondendo valores de desconforto. Numa temperatura diária média de 20°C podemos eventualmente ter temperaturas em valores desconfortáveis como 10°C ou 30°C, que ficam escondidas em intervalos de 24 horas, mas não em intervalos horários. O gráfico do balanço energético (heat balance) apresenta em kW, a transferência horária média de calor por diferentes elementos do edifício. Os valores positivos

representam ganhos térmicos, e os valores negativos perdas térmicas por parte dos elementos. A tradução dos elementos do edifício presentes no gráfico estão representadas no Quadro 3.9. De notar que o dado “Partitions” se refere às paredes interiores, tendo sido apenas escolhida a parede maciça de betão da parede de trombe para exportar os dados referentes ao balanço energético. Esta parede é considerada interior por estar atrás do envidraçado, considerado a parede exterior.

Quadro 3.9 – Traduções dos termos presentes nos gráficos

Termo inglês	Tradução	Termo inglês	Tradução
Glazing	Envidraçados	Internal Natural Vent.	Ventilação natural
Walls	Paredes	External air	Ar exterior
Ground Floors	Piso térreo	General lighting	Luzes da habitação
Partitions	Parede de trombe (neste caso)	Occupancy	Utilizadores
Roofs	Cobertura	Solair gains exterior windows	Ganhos solares das janelas exteriores

O último gráfico (Total fresh air) apresenta os valores das renovações horárias do edifício, resultante de infiltrações e ventilação natural. As unidades ac/h significam “air changes per hour”, que são as renovações do ar interior por hora.

De seguida encontram-se as Figuras 3.8 a 3.28 com os resultados gráficos das simulações. A legenda indica qual a simulação correspondente, dizendo entre parêntesis, pela mesma ordem, localização, largura da parede ou sem parede e estação representada.

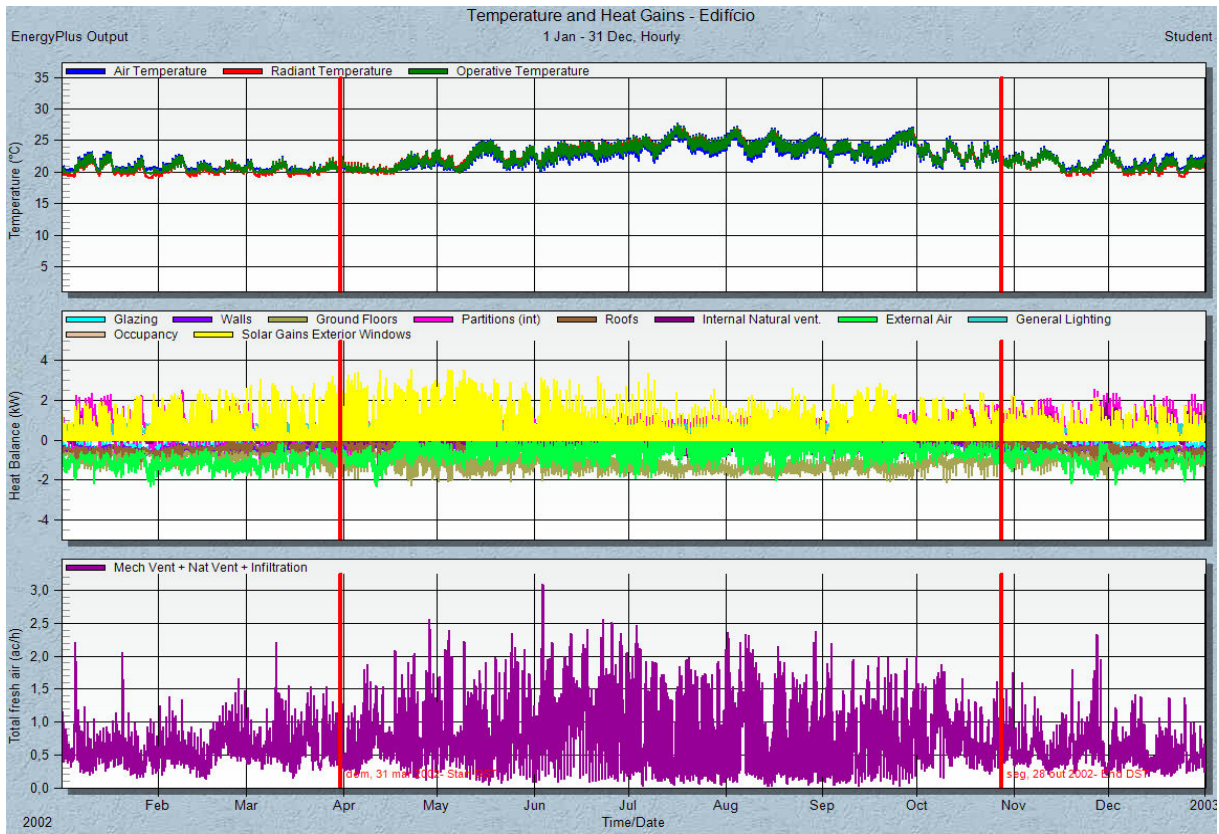


Fig.3.8 – Resultados simulação 1.0 (Lisboa, 200mm, anual)

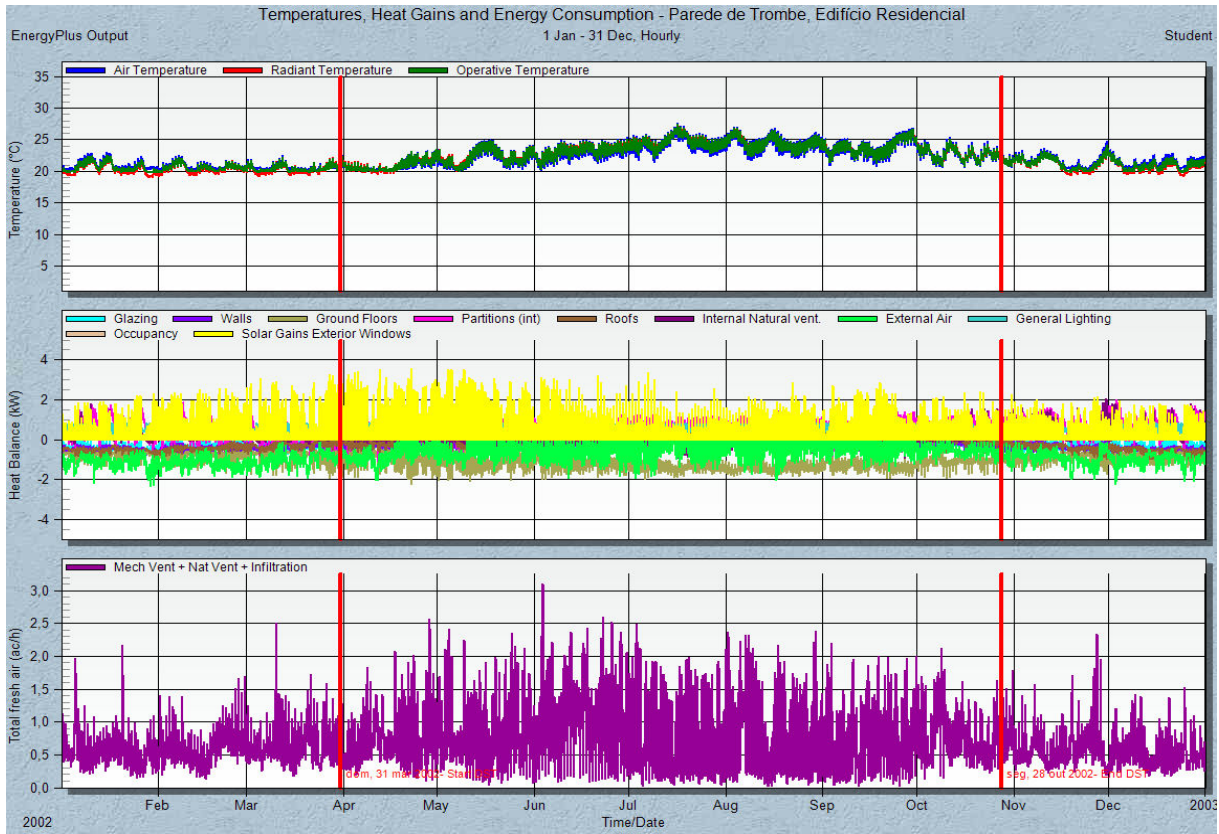


Fig.3.9 – Resultados simulação 1.1 (Lisboa, 300mm, anual)



Fig.3.10 – Resultados simulação 1.2 (Lisboa, 200mm, aquecimento)

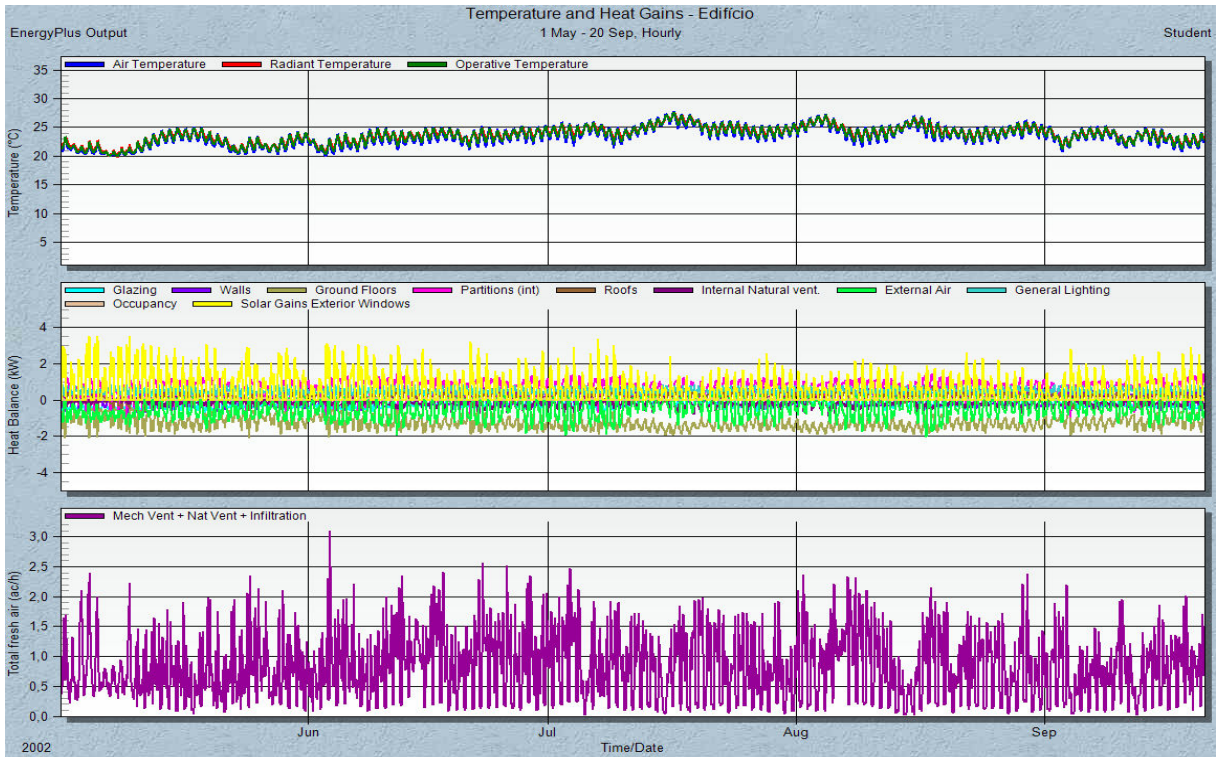


Fig.3.11 – Resultados simulação 1.3 (Lisboa, 200mm, arrefecimento)

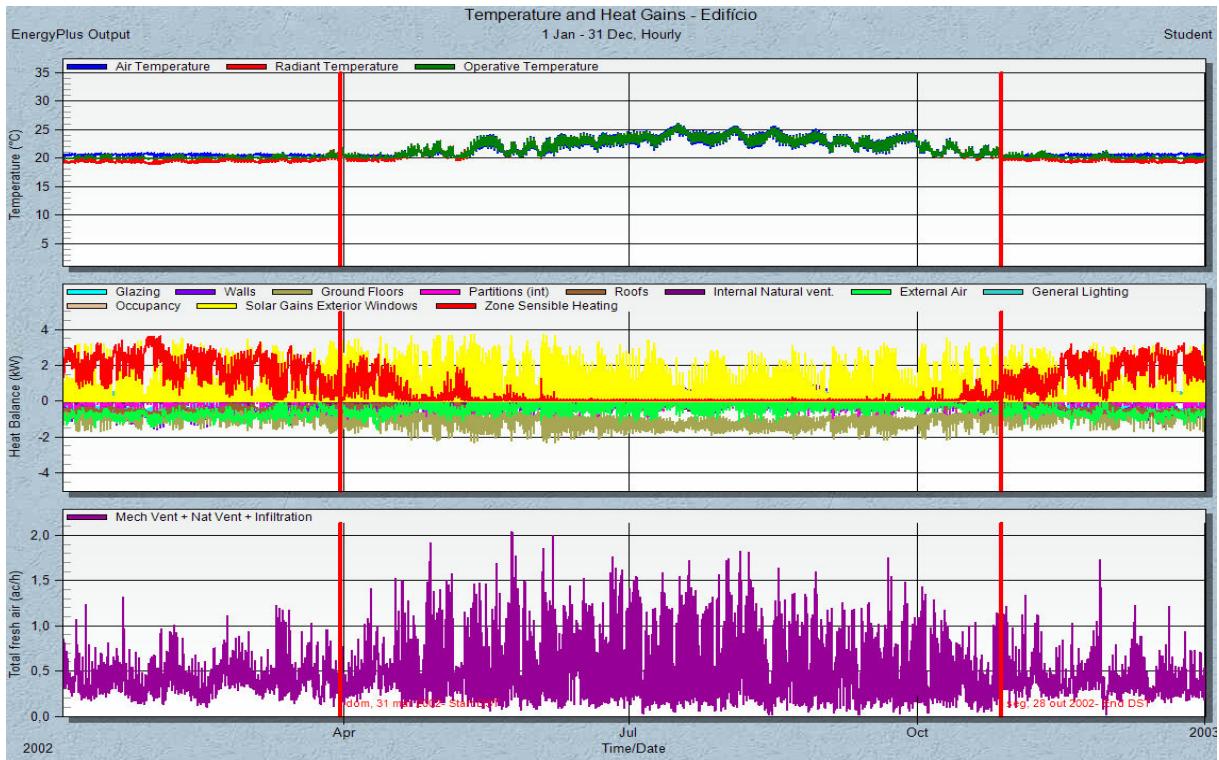


Fig.3.12 – Resultados simulação 1.4 (Lisboa, sem parede de trombe, anual)

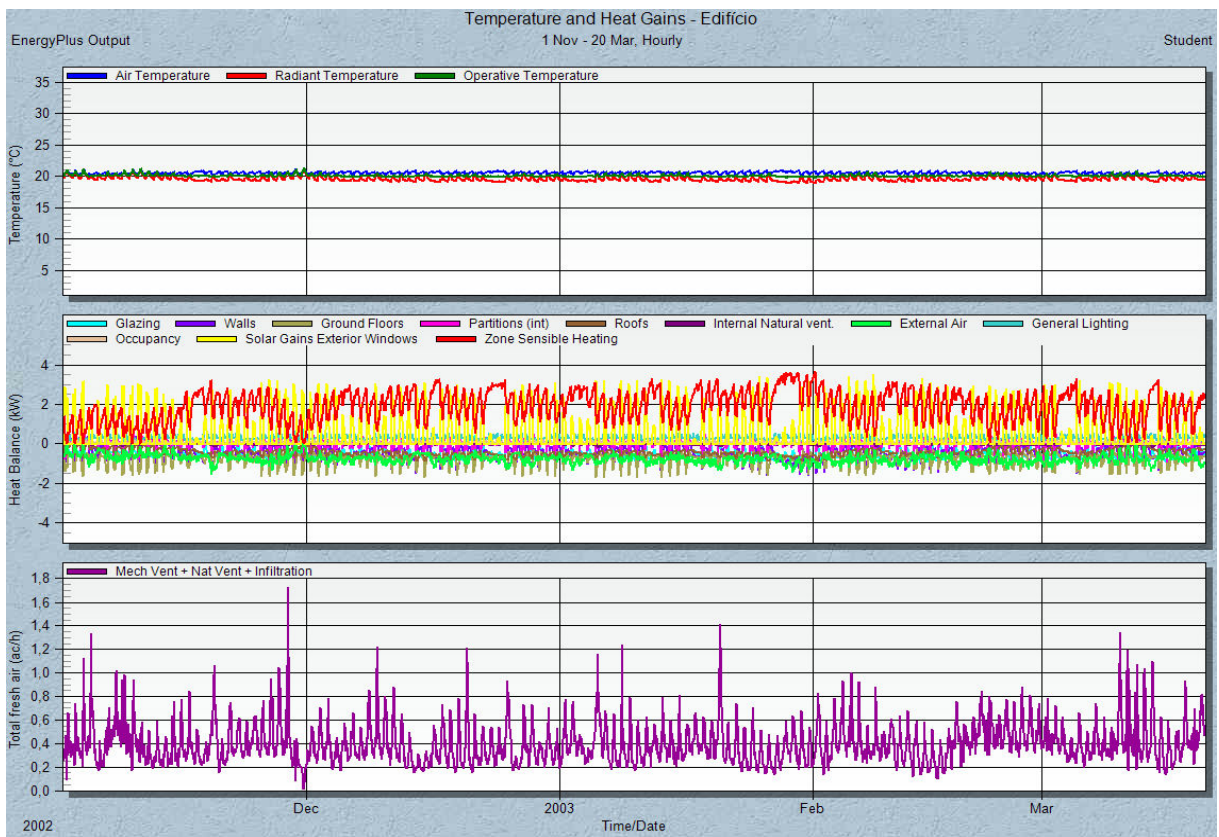


Fig.3.13 – Resultados simulação 1.4 (Lisboa, sem parede de trombe, aquecimento)

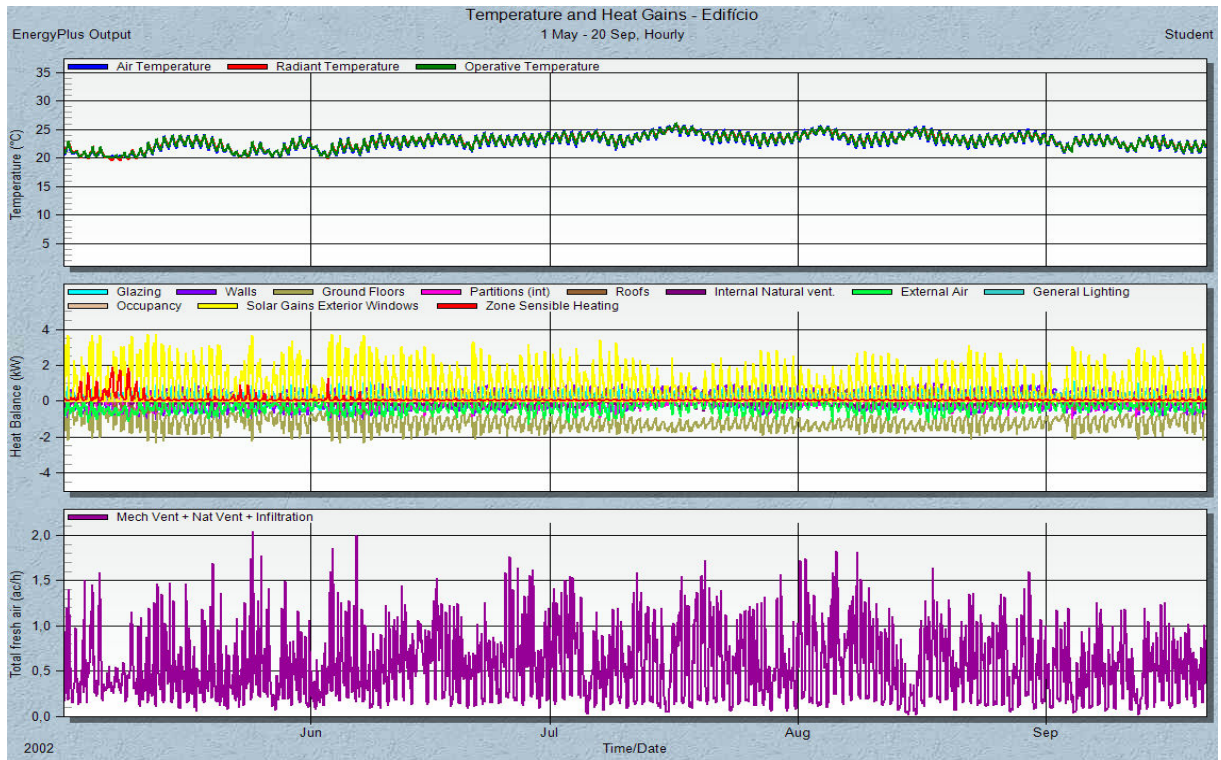


Fig.3.14 – Resultados simulação 1.4 (Lisboa, sem parede de trombe, arrefecimento)

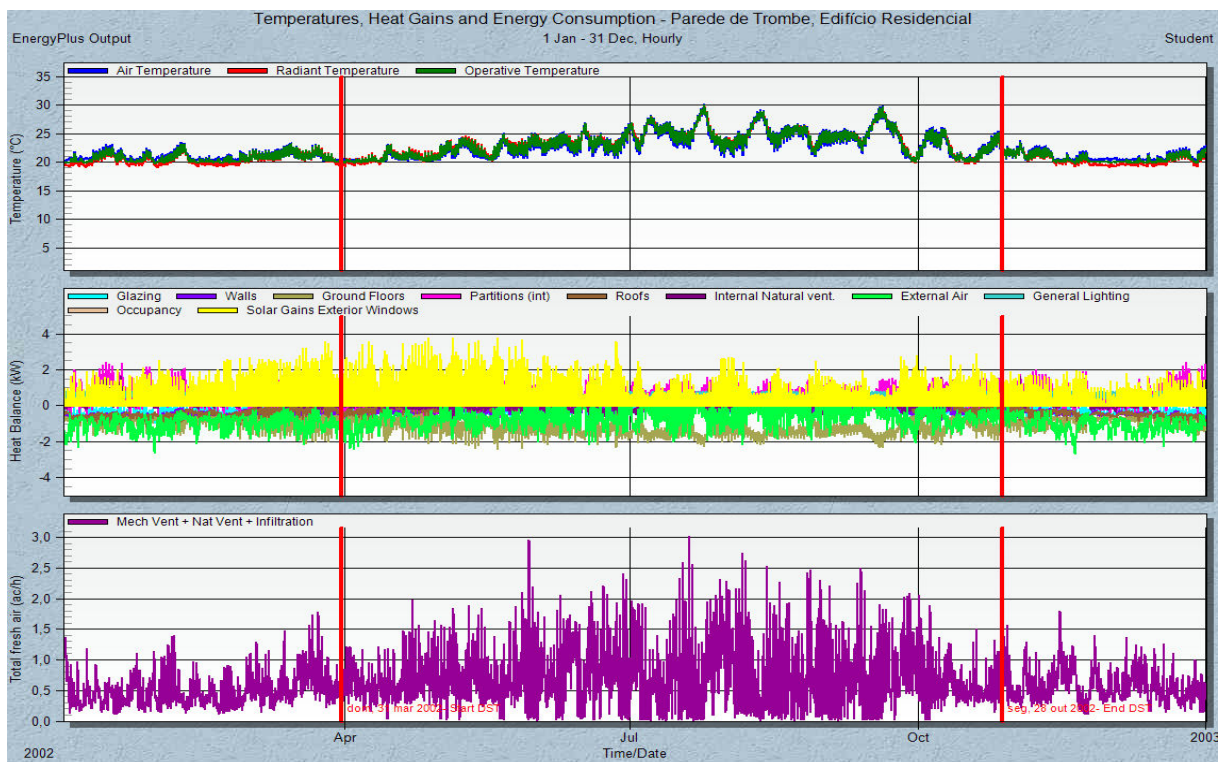


Fig.3.15 – Resultados simulação 2.0 (Beja, 200mm, anual)

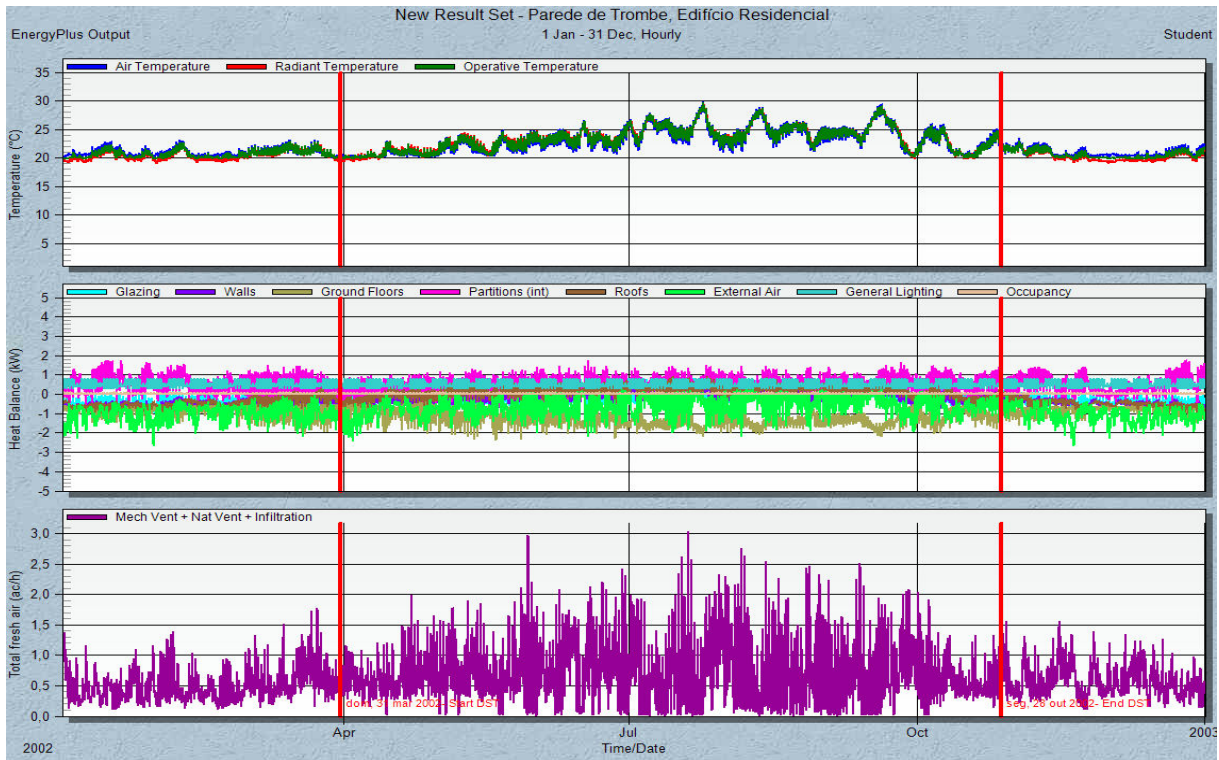


Fig.3.16 – Resultados simulação 2.1 (Beja, 300mm, anual)

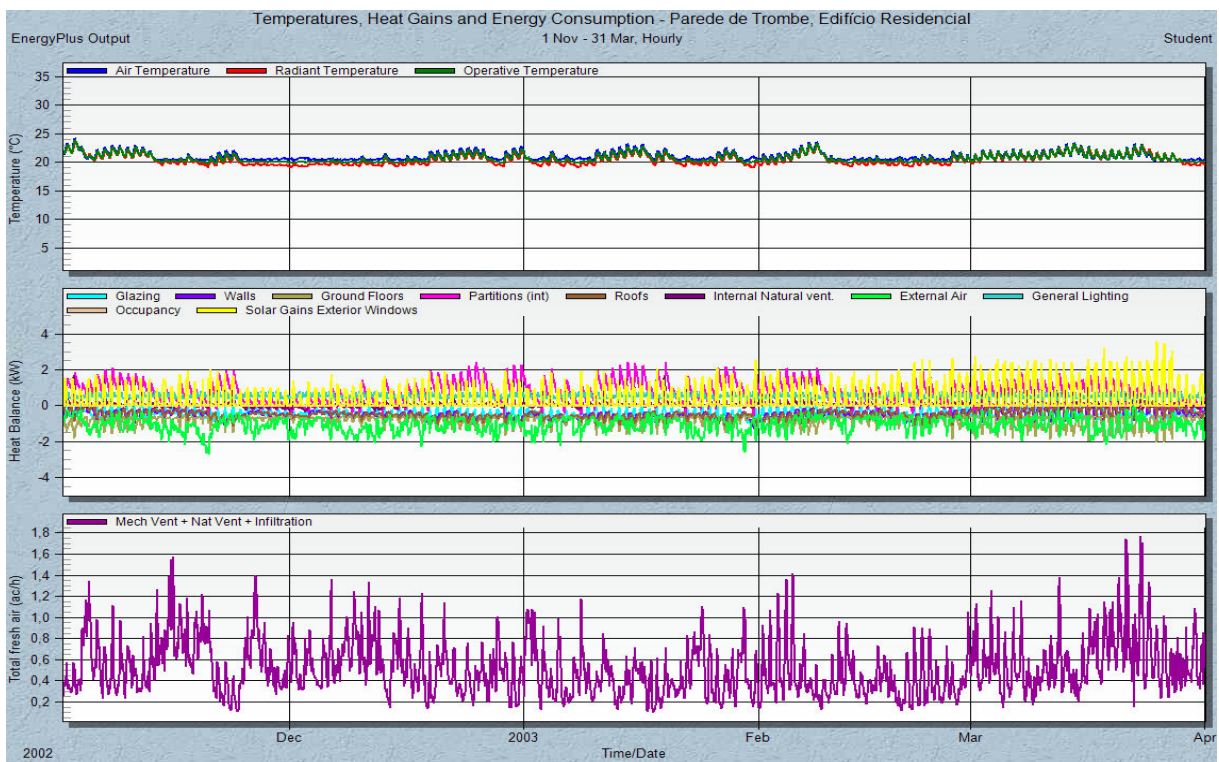


Fig.3.17 – Resultados simulação 2.2 (Beja, 200mm, aquecimento)

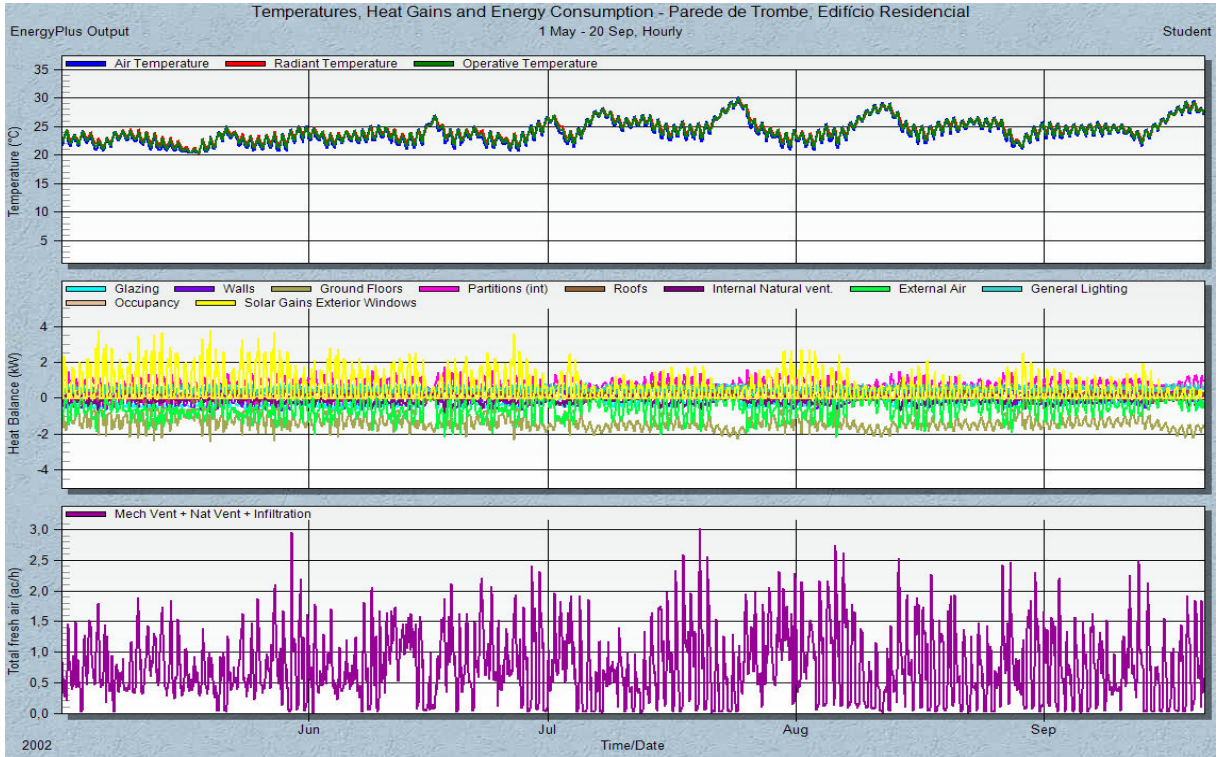


Fig.3.18 – Resultados simulação 2.3 (Beja, 200mm, arrefecimento)

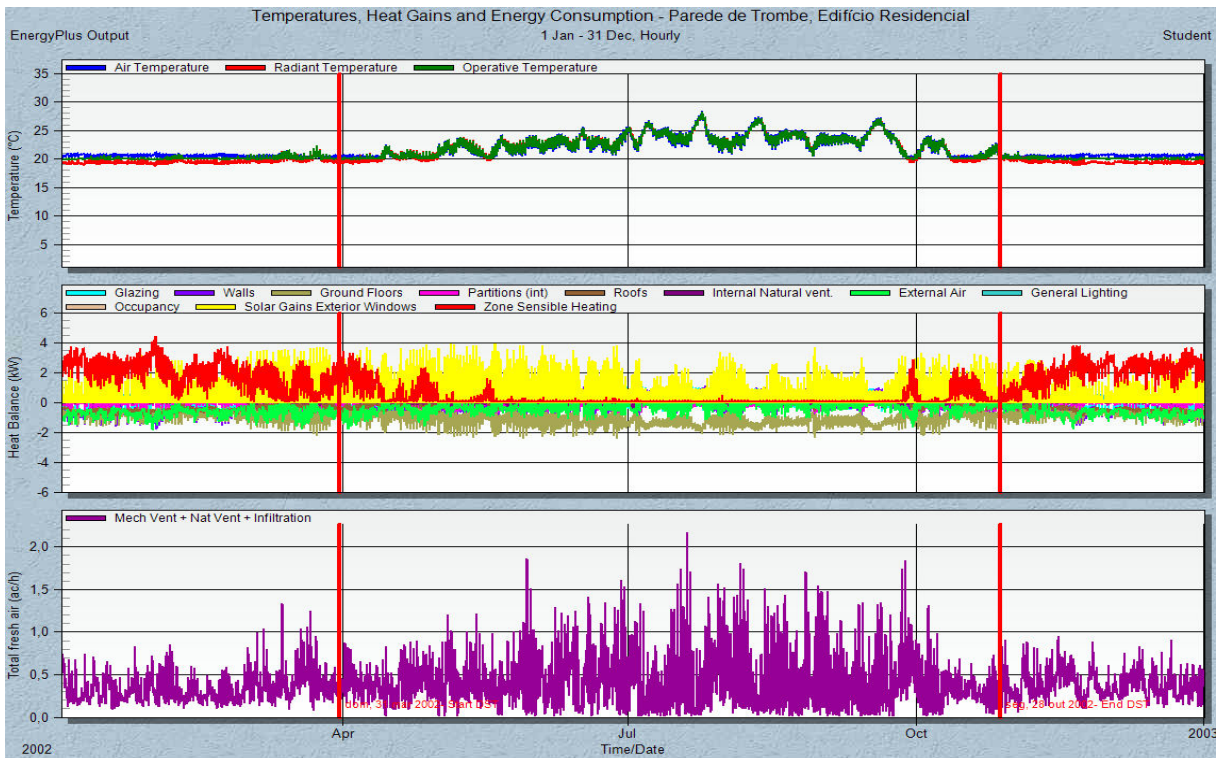


Fig.3.19 – Resultados simulação 2.4 (Beja, sem parede de trombe, anual)

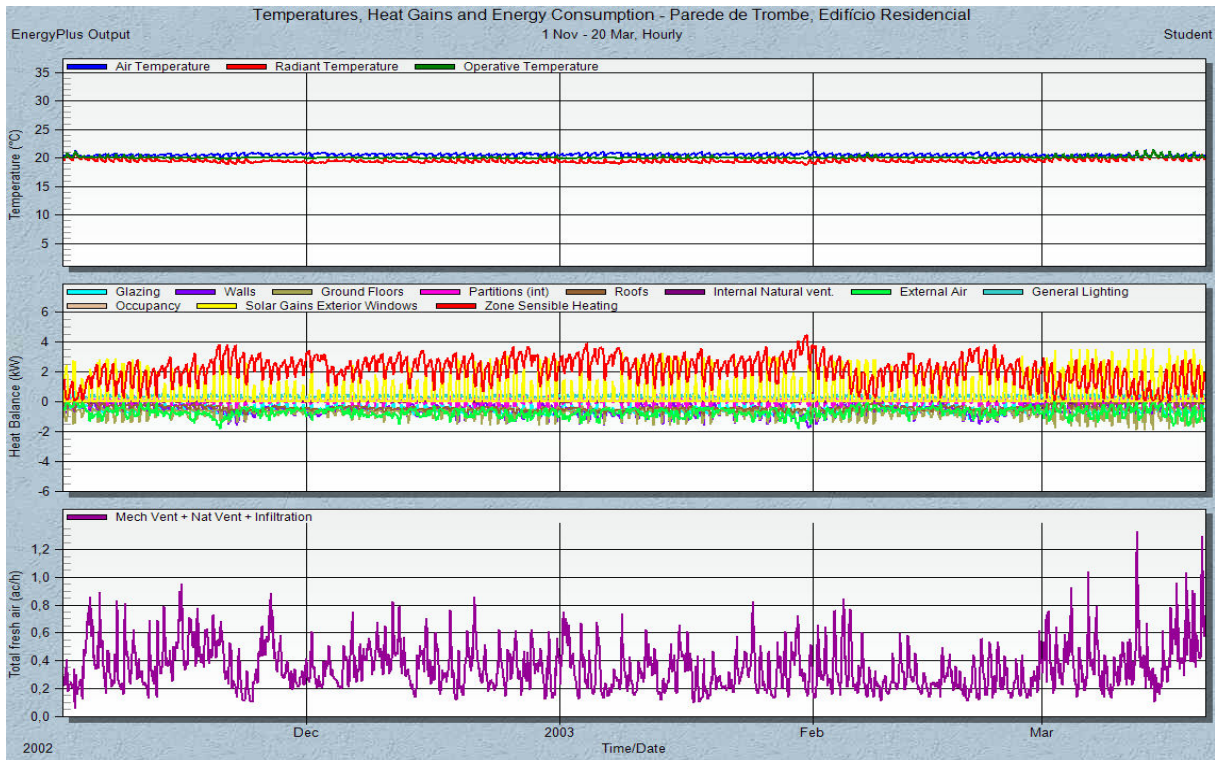


Fig.3.20 – Resultados simulação 2.4 (Beja, sem parede de trombe, aquecimento)

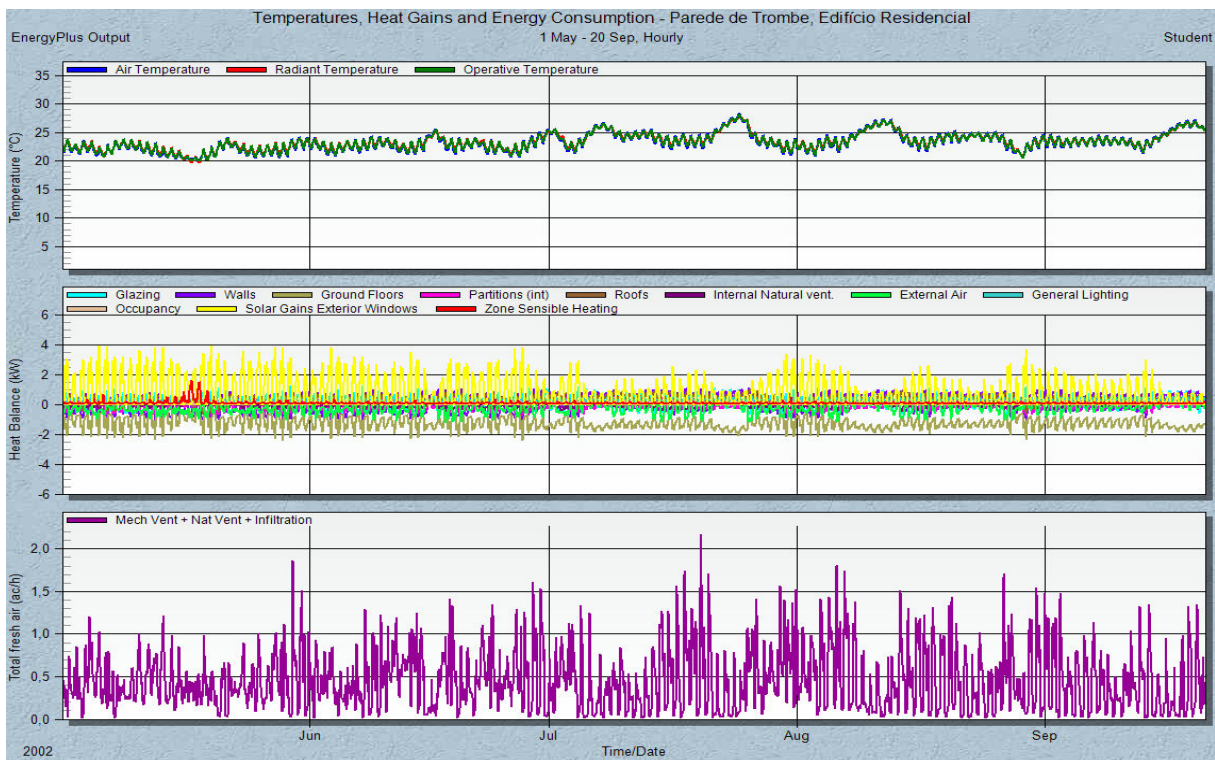


Fig.3.21 – Resultados simulação 2.4 (Beja, sem parede de trombe, arrefecimento)

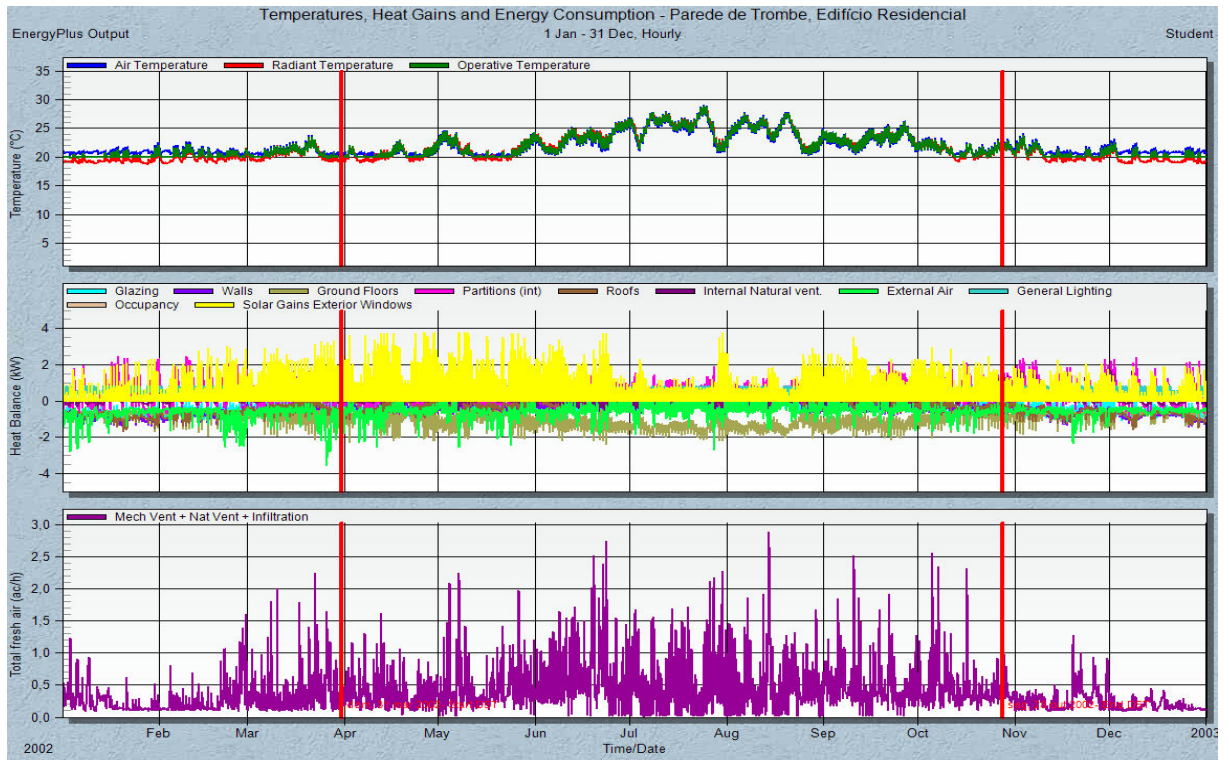


Fig.3.22 – Resultados simulação 3.0 (Bragança, 200mm, anual)

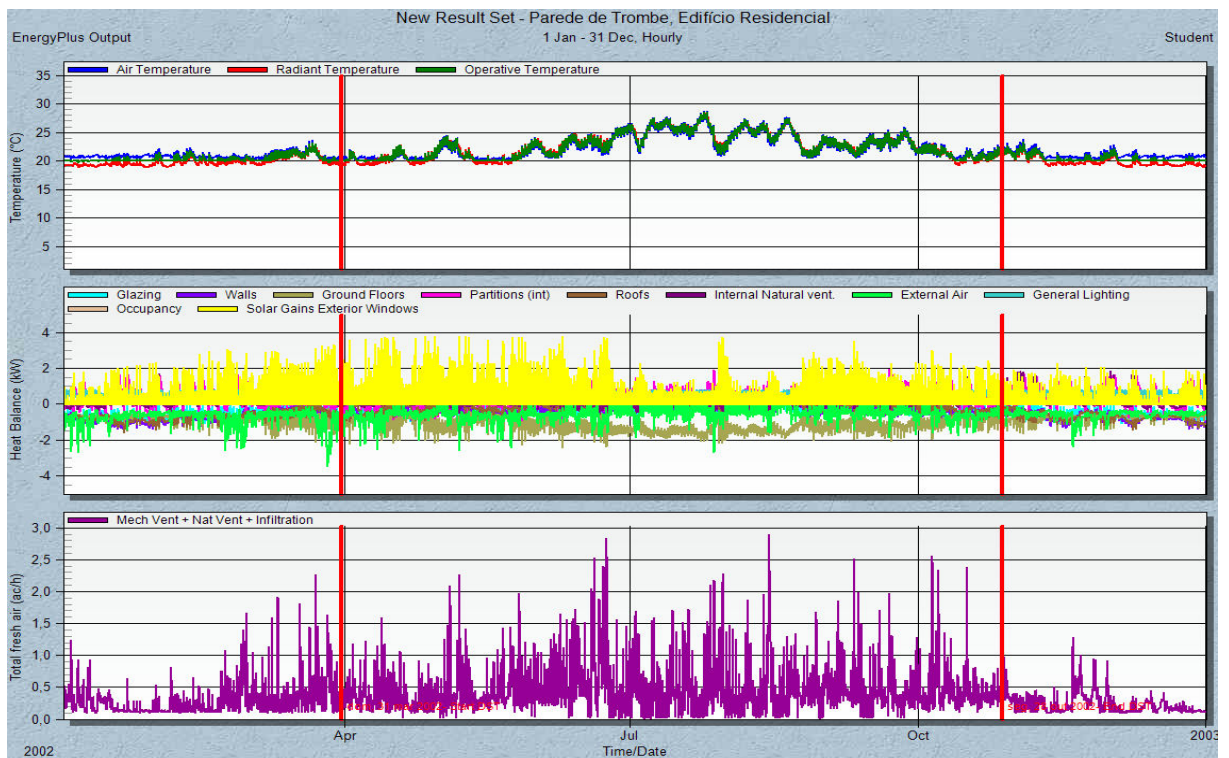


Fig.3.23 – Resultados simulação 3.1 (Bragança, 300mm, anual)

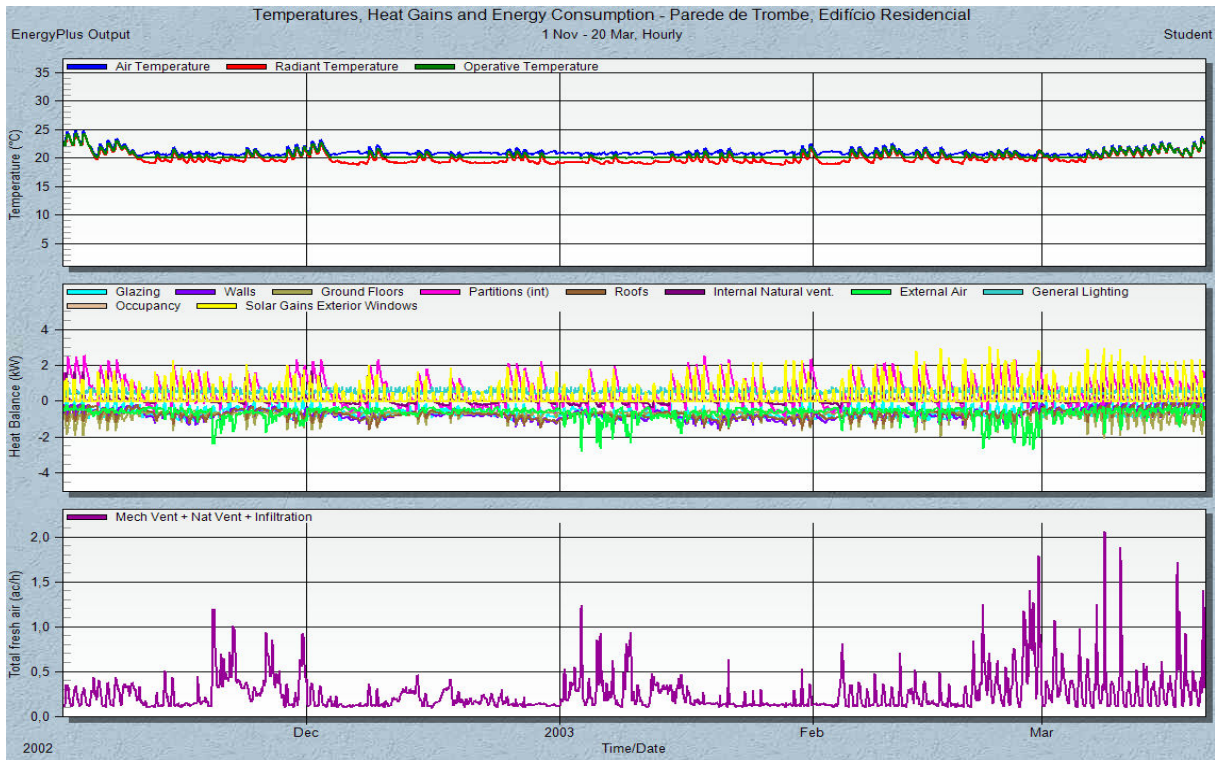


Fig.3.24 – Resultados simulação 3.2 (Bragança, 200mm, aquecimento)

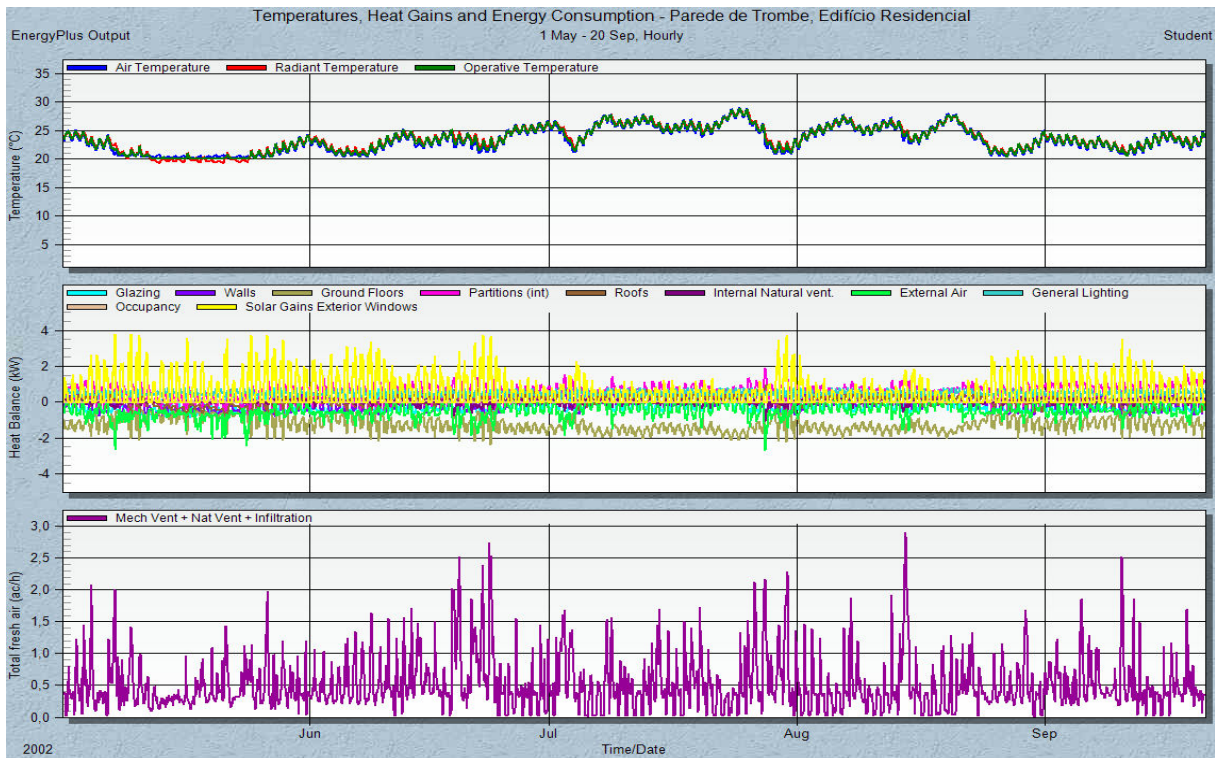


Fig.3.25 – Resultados simulação 3.3 (Bragança, 200mm, arrefecimento)

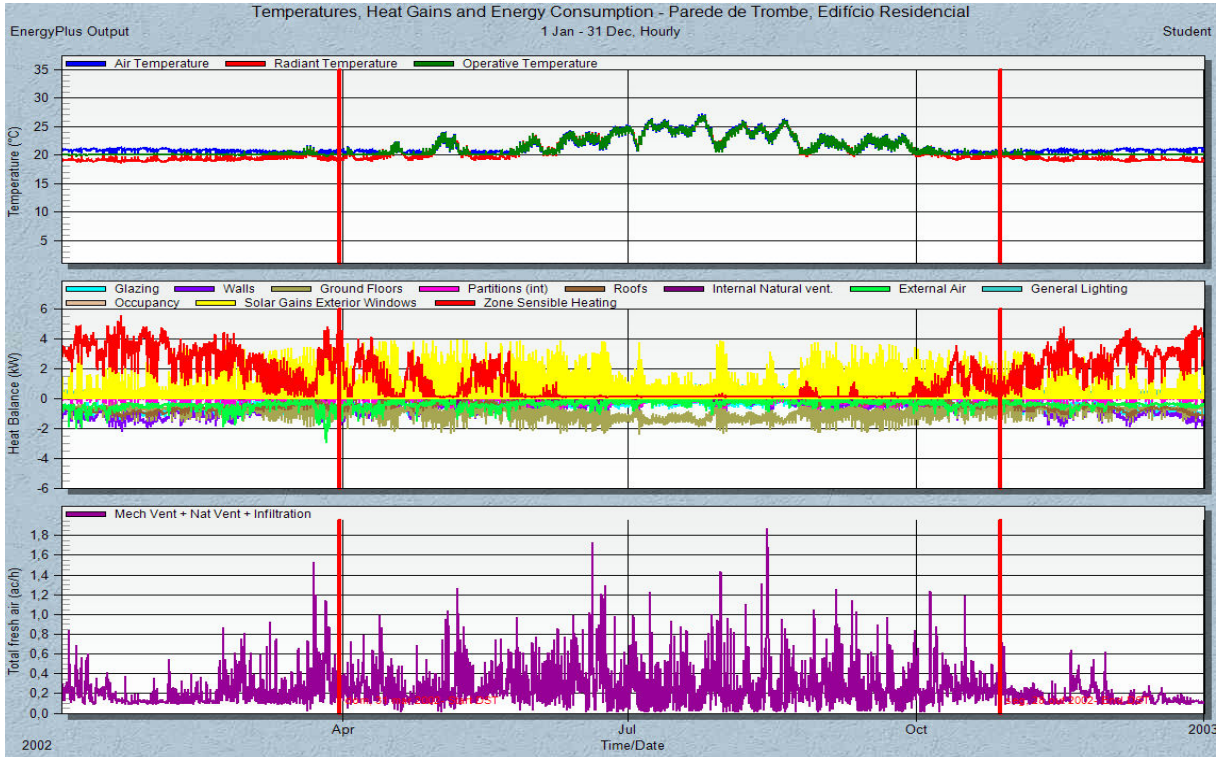


Fig.3.26 – Resultados simulação 3.4 (Bragança, sem parede de trombe, anual)

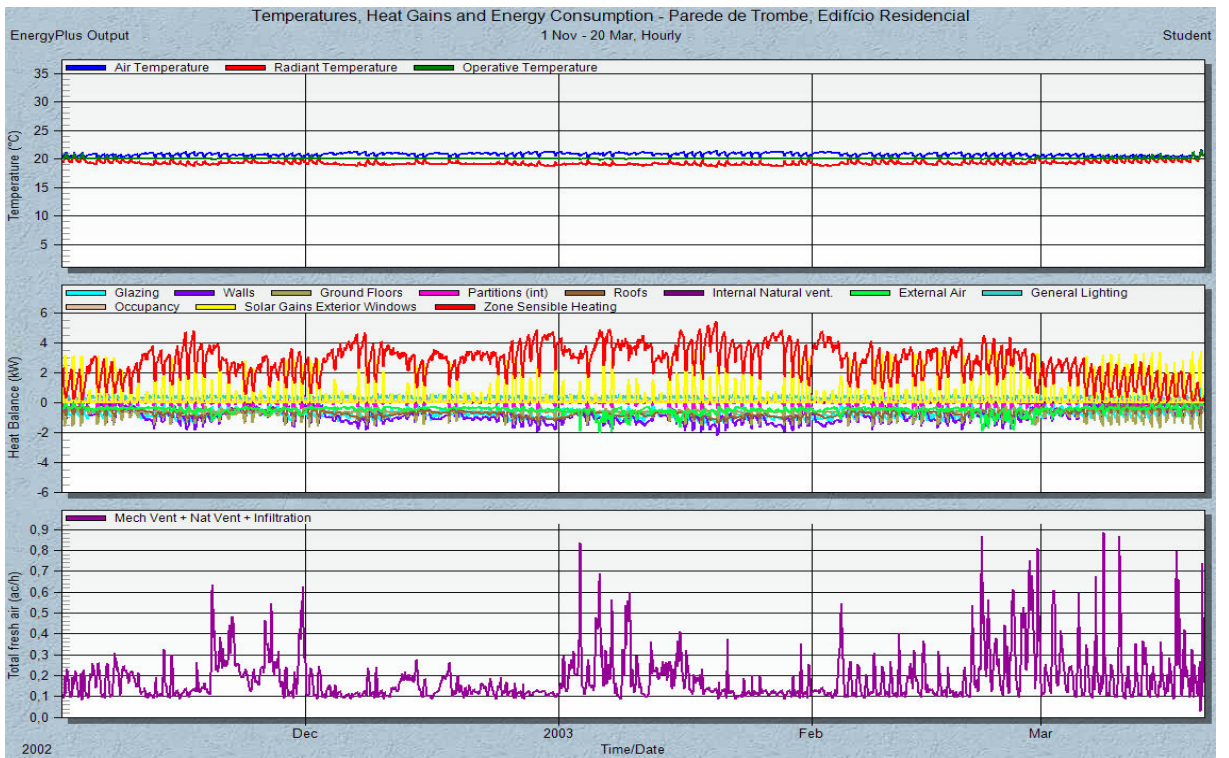


Fig.3.27 – Resultados simulação 3.4 (Bragança, sem parede de trombe, aquecimento)

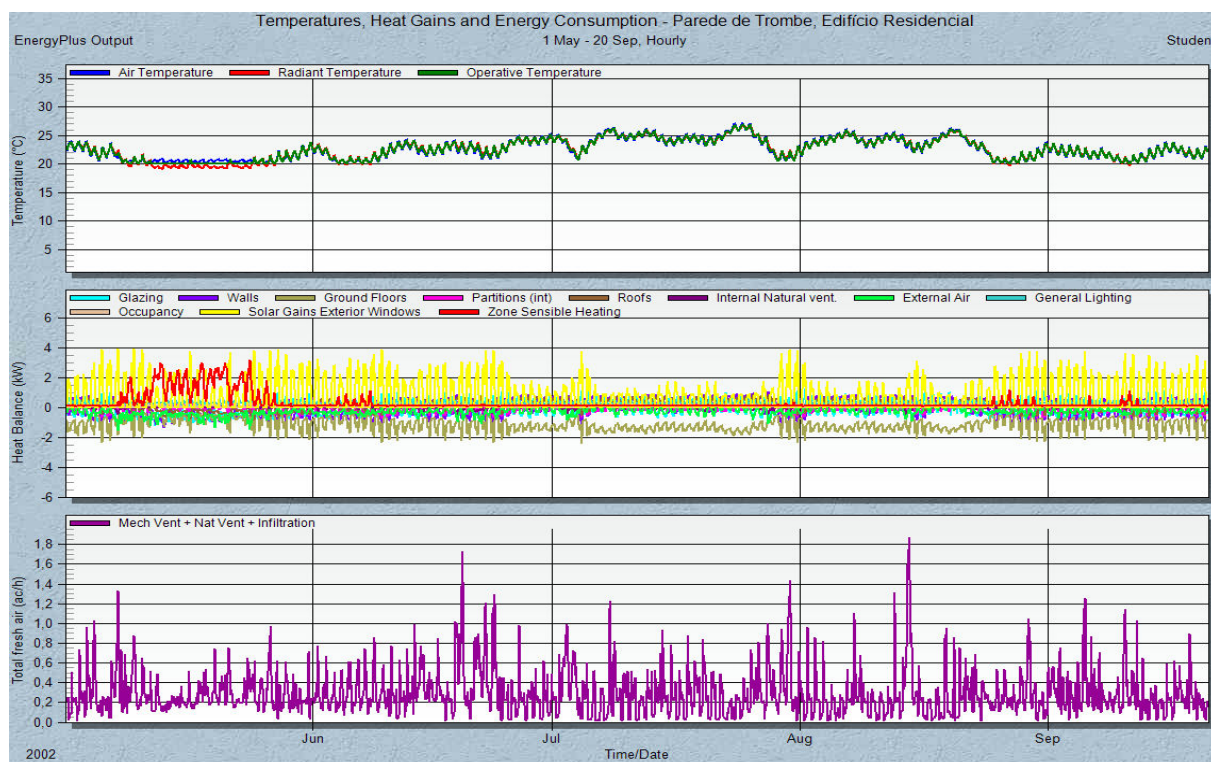


Fig.3.28 – Resultados simulação 3.4 (Bragança, sem parede de trombe, arrefecimento)

### 3.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.4.1. LISBOA

A informação recolhida da simulação em Lisboa com parede de trombe de 200mm (1.0) no inverno, apresenta temperaturas superiores à temperatura referência do aquecimento a gás, o que nos indica um menor gasto com aquecimento nesses períodos. Consta-se que nestes períodos os valores de ganhos térmicos por parte da parede de trombe (“Partitions” no gráfico de balanço térmico) aumentam, indicando um aquecimento do interior por parte deste elemento, o que resulta numa redução dos gastos com aquecimento em 16.99% (1084kWh) com a parede de trombe de 200mm.

O comportamento de verão não é desconfortável visto possuir poucos dias com temperaturas superiores a 25°C, a temperatura de referência do RCCTE para a estação de arrefecimento, apresentando o melhor comportamento na estação de aquecimento. Em todo o caso são temperaturas superiores aos valores da simulação 1.4 que não possui parede de trombe. Na Figura 3.29 comparam-se as temperaturas máximas atingidas no verão (julho, agosto e setembro), nas três localizações com parede de trombe de 200mm.

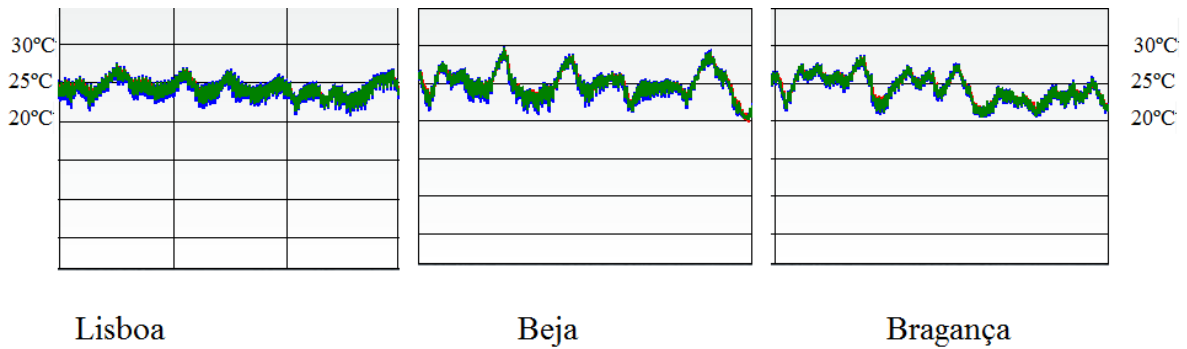


Fig.3.29 – Comparação das temperaturas de verão nas três localidades com parede de trombe de 200mm

A simulação 1.1 que conta com um aumento da parede maciça de betão de 200mm para 300mm, apresenta um pequeno aumento nos ganhos da parede de trombe, com temperaturas máximas inferiores mas valores mais constantes. Esta situação reflete-se em picos de temperatura interiores no verão mais baixos, como se pode verificar na Figura 3.30 que apresenta as temperaturas para os meses de julho, agosto e setembro para as três localizações. O consumo de gás para aquecimento diminuiu muito pouco comparando com a simulação de 200mm (31kWh), mas o conforto interior aumenta pois possui menos oscilações e um verão com temperaturas um pouco mais baixas.

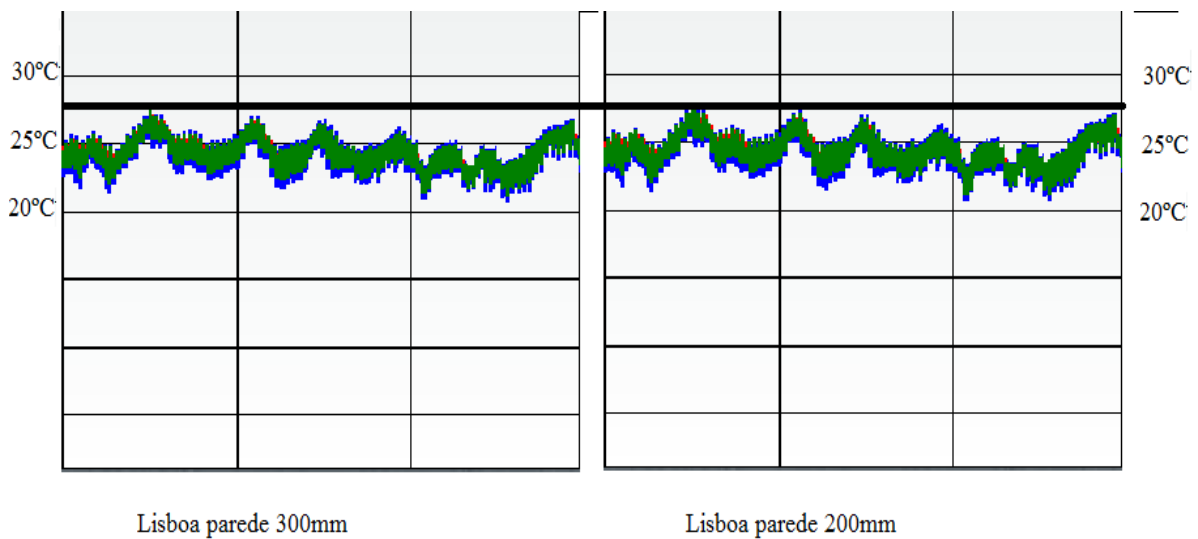


Fig.3.30 – Comparação dos picos de temperatura em Lisboa no verão

A simulação sem parede de trombe possui temperaturas de inverno sempre muito próximas dos 20°C, mostrando que a temperatura interior está a ser controlada pelo aquecimento que possui uma temperatura alvo de 20°C, nunca ultrapassando este valor. O seu comportamento de verão é muito bom, com temperaturas interiores médias que não passam os 26°C, resultantes de um menor coeficiente de transmissão térmica por parte da parede exterior de pano duplo quando comparada com a parede de trombe, e de menores ganhos solares pois a parede de trombe não está protegida quando a temperatura interior é menor que 24°C. Situação que vamos analisar melhor no subcapítulo 3.4.4.

De salientar que na Figura 3.12, simulação sem parede de trombe, estão representados a vermelho os ganhos do aquecimento, designados “Zone sensible heating”. Estes valores são inferiores aos apresentados pelas simulações sem parede de trombe de Beja (Fig. 3.19) e de Bragança (Fig. 3.26), resultantes de um inverno menos rigoroso com menores necessidades de aquecimento.

### 3.4.2. BEJA

Os dados analisados das simulações para a cidade de Beja apresentam para a parede de trombe de 200mm (2.0) uma temperatura de inverno com valores superiores a 20°C nas alturas onde os ganhos por ventilação da parede de trombe aumentam, demonstrando uma redução nos gastos para aquecimento em 23.43% (1964kWh). As temperaturas interiores de verão são elevadas, chegando aos 30°C, mesmo com a proteção dos envidraçados ativada como se pode verificar no gráfico da simulação 2.3, onde os ganhos solares pelas janelas exteriores reduzem quando a temperatura interior passa os 25°C.

A simulação 2.1, com a parede de trombe de 300mm, demonstra mais uma vez temperaturas em intervalos menores, e todo o ano um pouco inferiores à simulação com a parede de trombe de 200mm. Os gastos com aquecimento aumentam de forma pouco significativa (17kWh), as temperaturas interiores no verão são mais baixas, mas ainda assim com picos desconfortáveis em julho e agosto.

A simulação sem parede de trombe mostra que tal como em Lisboa, a temperatura interior na estação de aquecimento está sempre muito próxima dos 20°C, estando controlado pelo sistema de aquecimento. O comportamento de verão é substancialmente melhor, mas com um verão muito quente como o de Beja é normal apresentar uns picos que chegam a uma temperatura média a rondar os 28°C. Uma comparação entre os picos de temperatura máxima atingida nos meses de julho, agosto e setembro em beja, com as três diferentes simulações (parede de trombe de 200 e 300mm e sem parede de trombe), é apresentada na Figura 3.31.

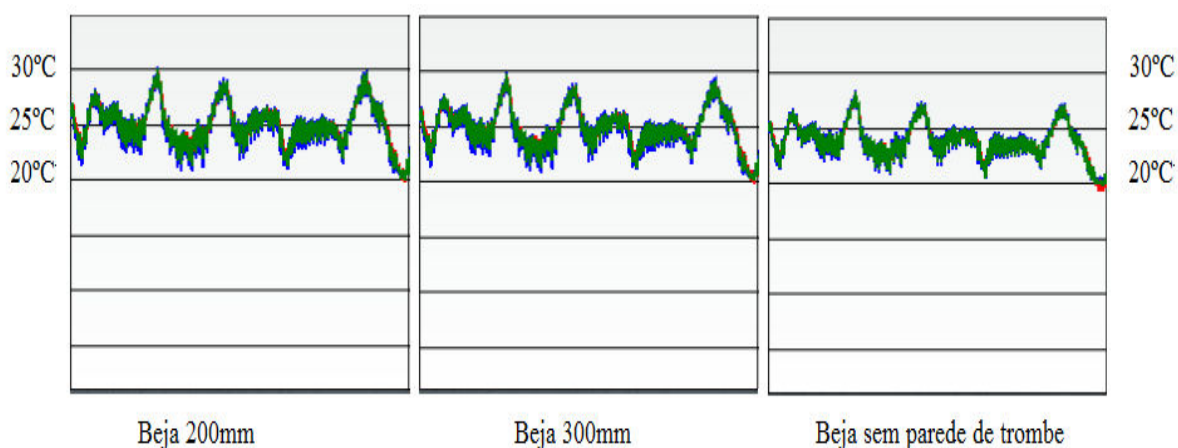


Fig.3.31 – Comparação dos picos de temperatura em Beja no verão

### 3.4.3. BRAGANÇA

A cidade de Bragança apresenta resultados de inverno para a simulação com a parede de trombe de 200mm com menos valores de temperatura interior superiores a 20°C do que nas outras localizações,

demonstrando maiores gastos com aquecimento do que em Lisboa ou Beja. Esta situação pode-se verificar com mais detalhe na Figura 3.32, onde se comparam as temperaturas de janeiro, fevereiro e março, das três localidades com parede trombe de 200mm.

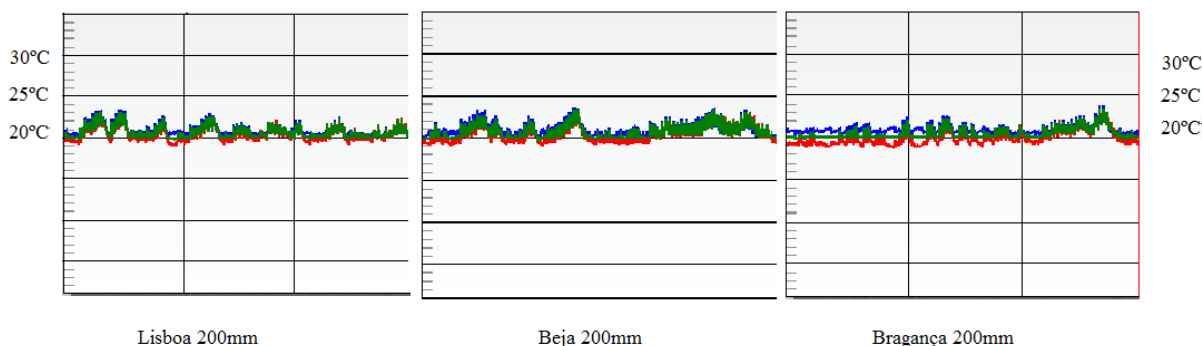


Fig.3.32 – Comparação de temperaturas de inverno nas três localidades

Os ganhos por ventilação apresentam resultados inferiores aos das restantes localizações, mas a maior poupança nos gastos para aquecimento das três localizações, tanto em percentagem como em valor absoluto (2847kWh, 23.76%). Este resultado indica um maior ganho térmico por radiação por parte da parede de trombe em climas que possuam um inverno mais severo. De verão apresenta resultados satisfatórios, com apenas um ponto de desconforto com temperaturas médias interiores a rondar os 28°C, um comportamento de verão melhor do que em Beja, mas pior do que em Lisboa.

A parede de trombe de 300mm da simulação 3.1 mostra resultados de temperatura interior média menos díspares da parede de trombe de 200mm do que nas restantes simulações, com uma diferença dos intervalos das temperaturas praticamente iguais. Os gastos com aquecimento são um pouco inferiores mostrando uma redução de apenas 49kWh resultando em poupanças de 2896kWh (24,17%) quando comparada com a simulação sem parede. Os resultados de verão são também praticamente os mesmos quando comparados com a simulação da parede de trombe de 200mm.

A simulação sem parede de trombe em Bragança apresenta valores de temperatura média interior de inverno mantidos constantes pelo aquecimento tal como em Lisboa e Beja, e temperaturas de verão sempre confortáveis com poucos valores acima dos 25°C. Os gastos em aquecimento são muito grandes, 11983kWh, o que demonstra como o inverno é rigoroso em Bragança (classe I3), dando origem a situações de desconforto térmico caso os utilizadores não utilizem o aquecimento da habitação com o controlo necessário.

#### 3.4.4. NOVA SIMULAÇÃO DA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

Na análise das simulações com parede de trombe foi constatado que as temperaturas interiores de verão são elevadas, sendo algum do contributo devido ao insuficiente controlo do sombreamento nos envidraçados (estores exteriores em PVC), que ativam apenas quando a temperatura interior passa os 24°C.

Para confirmação deste facto foi simulado o edifício com a parede de trombe de 200mm na estação de arrefecimento já definida anteriormente, para as três localizações, com a proteção solar de estores exteriores em PVC ativada a 100%.

A Figura 3.33 apresenta uma comparação das temperaturas interiores na época de arrefecimento com a proteção solar ativada a 100% e com a proteção solar a ativar quando temperatura interior passa os 24°C em Lisboa.

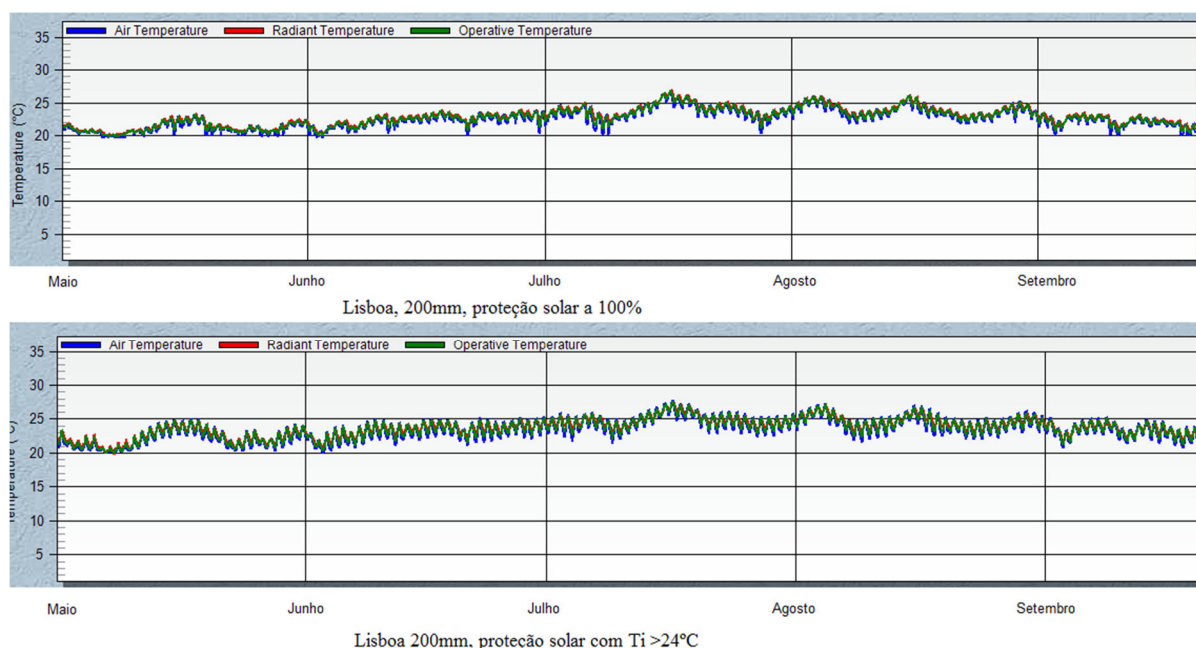


Fig.3.33 – Comparação de temperaturas em Lisboa com diferentes controlos da proteção solar

As temperaturas estão no geral mais baixas e menos oscilantes com a proteção solar sempre ativada, notando-se principalmente diferenças em Maio, Junho e Setembro, alturas em que a proteção apenas ativa quando a temperatura interior é superior a 24°C é menos utilizada.

A temperatura máxima atingida nos picos em Julho e Agosto é inferior, apenas um dia em Julho atinge o máximo de 27°C, confirmando que um maior controlo com a proteção solar atenua os ganhos térmicos de verão da parede de trombe.

Como se pode verificar pelas Figuras 3.34 e 3.35 a mesma situação acontece em Beja e Bragança, apesar de em Beja ainda se atingir por uma vez temperaturas de 29°C em Julho e alguns dias desconfortáveis. Em Bragança apenas em 3 dias de Julho se atingem temperaturas interiores acima dos 27°C, sendo confortável em praticamente toda a estação de arrefecimento.

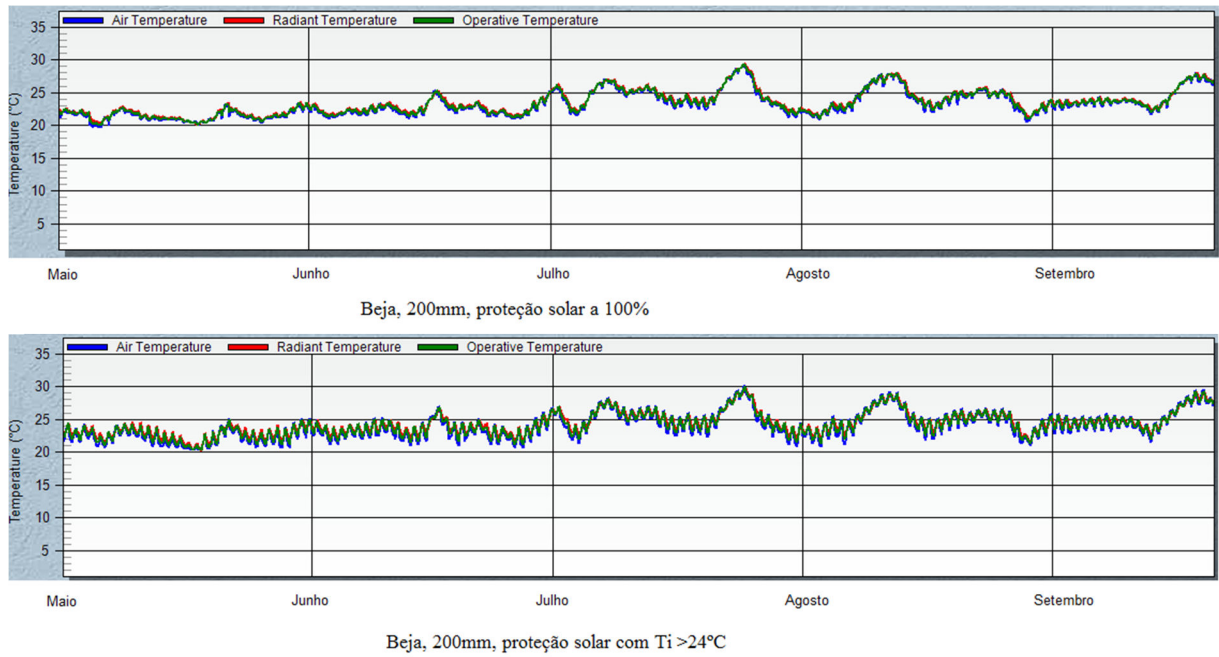


Fig.3.34 – Comparação de temperaturas em Beja com diferentes controlos da proteção solar

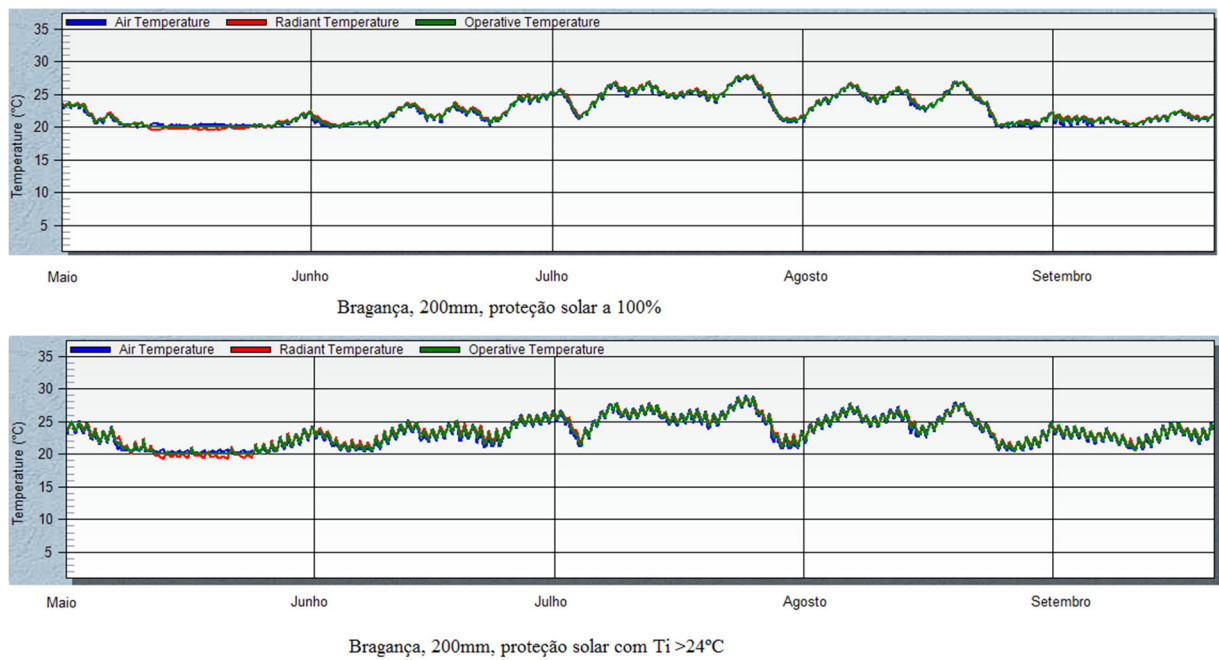


Fig.3.35 – Comparação de temperaturas em Bragança com diferentes controlos da proteção solar



# 4

## CONCLUSÕES

### 4.1. SIMULAÇÕES

Acabada a análise dos resultados das simulações, pode-se concluir que a parede de trombe contribui significativamente na redução dos custos com o aquecimento de uma habitação quando devidamente projetada. A orientação a sul é obrigatória, será sempre necessário simular com antecedência o desempenho da parede como foi efetuado neste trabalho, já que possui vários fatores que influenciam bastante as suas capacidades. A proteção solar terá de ser bem dimensionada e de preferência sem precisar de controlo para minimizar os ganhos térmicos indesejados na estação de arrefecimento.

As simulações com parede de trombe apresentam temperaturas médias interiores na estação de arrefecimento desconfortáveis nas zonas climáticas de verão V3 (Beja). Mesmo com proteção solar bem dimensionada e com o aumento da largura da parede de trombe as temperaturas são elevadas, sendo aconselhável uma exaustiva análise do comportamento térmico do edifício antes da instalação de paredes de trombe nestas zonas. Lisboa por ter o inverno mais ameno é a localização que beneficia menos na diminuição dos gastos de aquecimento com a parede de trombe, tanto em percentagem como em valor total, com valores de 1113kWh (17.44%) de poupança anual no aquecimento, contrastando com os 2896kWh (24.17%) de Bragança.

A parede de trombe apresenta-se bastante favorável em climas frios, quanto mais severo o clima mais energia se vai gastar em aquecimento, obtendo-se maiores poupanças. A largura da parede de trombe não influenciou muito os resultados em termos de gastos térmicos, mas provou-se benéfica a manter uma temperatura interior com menos oscilações, mais confortável, e um melhor comportamento no verão. Um aumento no controlo da proteção solar na estação de arrefecimento diminui os ganhos térmicos obtidos, resultando em temperaturas interiores mais baixas.

### 4.2. CONCLUSÕES FINAIS

A dependência energética que a nossa sociedade atravessa é cada vez mais preocupante. As fontes energéticas não renováveis ainda possuem um peso muito grande na quota energética em Portugal, sendo os edifícios responsáveis por 30% do consumo total de energia primária e 62% dos consumos de eletricidade, [3].

Uma parcela tão grande de gastos de energia por parte dos edifícios mostra a importância cada vez maior em reduzir os seus gastos energéticos, não apenas por razões económicas mas também ambientais. Como foi demonstrado no estudo realizado neste trabalho, a utilização de técnicas e sistemas solares passivos pode trazer reduções nos gastos energéticos bastante interessantes. A

utilização de sistemas integrados no edifício na altura da sua construção pode reduzir significativamente o seu custo de instalação, resultando em retornos financeiros mais curtos. A combinação de diferentes sistemas solares passivos permite ganhos maiores, podendo-se aproveitar ao mesmo tempo técnicas de ganho direto, indireto e separado.

A parede de trombe aqui simulada demonstrou ganhos térmicos bastante favoráveis em invernos rigorosos, é uma solução a ter em conta no nosso país para reduzir os gastos com aquecimento. O melhor resultado obtido foi com uma parede de trombe de 300mm de largura em Bragança, poupando 2896kWh por ano no aquecimento, uma redução de 24.17%.

As localizações em Portugal onde a parede de trombe irá obter resultados mais favoráveis pertencem às zonas climáticas de verão V1 ou V2, e às zonas climáticas de inverno I3 ou I2. Devido aos significativos ganhos térmicos na estação de arrefecimento, é necessário um cuidado extra ao dimensionar uma parede de trombe e seus dispositivos de sombreamento, verificando sempre o comportamento térmico do edifício no verão.

Sendo este sistema muito pouco utilizado em Portugal, será necessário consciencializar as pessoas envolvidas na construção desde projetistas a clientes das suas vantagens, para incentivar a aplicação de paredes de trombe em novos projetos, tirando partido das suas vantagens e otimizando as soluções.

#### **4.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Para complementar o trabalho realizado seria necessário desenvolver as seguintes tarefas:

- Realização de mais cenários, diferentes áreas de parede de trombe e diferentes materiais;
- Simulação numérica de mais sistemas passivos de aquecimento, arrefecimento ou ambos;
- Conjugação de sistemas passivos e efetuar simulação numérica do seu comportamento térmico;
- Verificar resultados obtidos com resultados reais com o intuito de testar a simulação numérica;

## BIBLIOGRAFIA

- [1] International Energy Agency – World Energy Outlook 2008, <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2008-1994/weo2008.pdf>, 8/03/2013;
- [2] <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20081216IPR44857+0+DOC+XML+V0//PT>, 05/03/2013;
- [3] [www.ine.pt](http://www.ine.pt), 14/03/2013;
- [4] Mendonça, P.; *Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados*; Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2005;
- [5] Magalhães, A., *Integração das tecnologias solares passivas no projeto de arquitetura corrente*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004;
- [6] Archard, P., Gicquel, R, *European passive solar handbook: basic principles and concepts for passive solar architecture*, Bruxelas, 1986;
- [7] Couto, M, *Reabilitação de Fachadas e o seu Contributo Energético – Caso de estudo de um hotel em Lisboa*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Arquitectura, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010;
- [8] Neiva, J., *Pré-Aquecimento do ar de ventilação por meios passivos – Um estudo paramétrico*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia civil, Feup, 2010;
- [9] Carlos, A, *Sistema Passivo de Pré-Aquecimento do Ar de Ventilação: A Dupla Janela Ventilada*, Universidade da Beira Interior, 2009;
- [10] Mateus, R., *Novas Tecnologias Construtivas com Vista à Sustentabilidade da Construção*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2004;
- [11] <http://www.cost-effective-renewables.eu/includes/images/Publications/Files/73f1eb7a9b2902e77ead334ee78cb2b6.pdf>, 14/03/2013;
- [12] Tenente, C., *Projecto de instalações de sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios*, Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Feup, Porto, 2010;
- [13] [http://www.lneg.pt/download/4078/BrochuraSolarXXI\\_Dezembro2005.pdf](http://www.lneg.pt/download/4078/BrochuraSolarXXI_Dezembro2005.pdf), 27/03/2013;
- [14] <http://www.mohsen-saleh.com/2012/02/hybrid-solar-thermal-facade-linear.html>, 6/04/2013;
- [15] Gonzaga, C., *A utilização intensiva do vidro na envolvente dos edifícios. Comportamento térmico de fachadas duplas transparentes ventiladas – estudo de caso*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Edição de autor, Coimbra, 2007;
- [16] <http://www.habitarportugal.org/hp2009/uploads/imgs/1242646846P9iHG6zx6Ip72LM3.jpg> , 21/05/2013;
- [17] [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/), 20/03/2013;
- [18] [http://www.designbuilder.co.uk/programhelp/trombe\\_walls.htm](http://www.designbuilder.co.uk/programhelp/trombe_walls.htm), 2/04/2013;
- [19] [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=26425](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=26425), 22/04/2013;
- [20] [https://www.ashrae.org/File%20Library/docLib/Public/20070710\\_140\\_2004\\_a\\_b\\_withfiles.zip](https://www.ashrae.org/File%20Library/docLib/Public/20070710_140_2004_a_b_withfiles.zip), 22/04/2013;

[21] *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)*, Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril, Diário da República – I série – A;