

# **SIMULAÇÃO DE TÉCNICAS PASSIVAS DE ARREFECIMENTO COM RECURSO AO *ENERGYPLUS***

**MIGUEL COSTA ALMEIDA GIESTA**

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

---

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

---

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de  
Almeida

JUNHO DE 2019

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019**

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 - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.*

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, em especial aos que partiram

*Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe*

*Leonardo Da Vinci*



## **AGRADECIMENTOS**

Desejo demonstrar um agradecimento a todos os professores que me lecionaram ao longo do meu percurso académico, desde o professor primário até à orientadora da minha dissertação. Trago um pouco de todos os meus conhecimentos académicos.

Deixo aqui um agradecimento especial à Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira pela ajuda, disponibilidade, simpatia, conhecimento, experiência e competência demonstradas na elaboração da presente dissertação.

Também fica aqui um agradecimento especial ao Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida nos mesmos termos dirigidos à professora Eva, com uma particular referência à partilha dos seus conhecimentos acerca do *software* utilizado para a execução desta dissertação.

Por fim, aos amigos que fiz na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com os quais aprendi algumas coisas relacionadas com curso e espero também ter partilhado algum do meu conhecimento convosco.

A todos os que tive o privilégio de privar, o meu obrigado.



## RESUMO

A sustentabilidade é um tema que está na ordem no dia na indústria da construção, apesar de haver uma recorrente banalização do termo. Encontrar estratégias e soluções construtivas mais sustentáveis é algo para o qual a indústria já está a dar resposta na situação presente em consequência da implementação de legislação e regulamentação nova, fazendo com que hajam alterações nos requisitos e exigências do cliente final. Um dos aspetos visados prende-se com os consumos energéticos dos edifícios em fase de utilização. Estima-se que cerca de 60% dos consumos energéticos totais de edifício atribuem-se ao aquecimento e arrefecimentos dos mesmos. Minimizar este valor passa pelo desenvolvimento de estratégias e soluções mais eficientes sob o ponto de vista energético. Para encontrar estas estratégias e soluções é necessário a realização de estudos de forma a obterem-se dados fiáveis que permitam chegar-se a conclusões.

Um método para se realizarem estes estudos passa pelo campo da simulação numérica, através da criação de um modelo que reproduza com precisão o que se pretende estudar e analisar. A presente dissertação adotou este método, recorrendo ao *software* de simulação EnergyPlus, aplicando-o ao uso de técnicas passivas de arrefecimento num módulo localizado na cidade de Palma, capital do estado de Tocantins no Brasil. Este estudo consistiu em primeiro lugar na seleção de literatura adequada ao tema em estudo, pelo um método de pesquisa meta-analítica onde se filtraram as revistas científicas da especialidade mais credíveis e conceituadas de acordo com os critérios de seleção do método de pesquisa. Posteriormente procedeu-se ao estudo de artigos publicados nas revistas selecionadas, relacionadas com o tema em estudo com o intuito de conhecer-se quais as técnicas passivas de arrefecimento mais aplicadas, em que contextos são aplicadas, o seu funcionamento e que efeitos produzem nas temperaturas interiores dos edifícios em que foram implementadas ou simuladas.

Também foram enunciadas algumas metodologias ao longo do tempo através de uma revisão da literatura existente para a determinação das zonas de conforto térmico, que não deve ser um aspeto ignorado quando se estudam técnicas de arrefecimento.

Foi definido um plano de simulação, onde se realizaram nove simulações anuais sujeitas às condições climáticas do local através da importação do ficheiro climático correspondente. Em cada simulação alteraram-se os parâmetros no modelo equivalentes à aplicação das duas técnicas passivas de arrefecimento testadas, ventilação natural e aplicação de uma pintura refletante nas paredes exteriores e na cobertura do módulo, e compararam-se os resultados obtidos.

De forma sintética este estudo concluiu que a aplicação da pintura refletante é a medida mais eficiente, das duas consideradas, no arrefecimento das temperaturas interiores do módulo. Mas esta conclusão é apenas válida para o modelo simulado nas condições simuladas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Técnicas passivas de arrefecimento, simulação numérica, EnergyPlus, ventilação natural, pintura refletante.



## **ABSTRACT**

Sustainability is a topic that is on the agenda in the construction industry, although there is a recurring trivialization of the term. Finding more sustainable constructive strategies and solutions is something for which industry is already responding in the present situation as a result of the implementation of new legislation and regulation, causing changes in the requirements and requirements of the end customer. One of the aspects addressed is the energy consumption of buildings in use. It is estimated that about 60% of total building energy consumption is attributable to heating and cooling. Minimizing this value requires the development of more energy-efficient strategies and solutions. In order to find these strategies and solutions, it is necessary to carry out studies in order to obtain reliable data enabling conclusions to be drawn.

A method for carrying out these studies involves the field of numerical simulation, creating a model that accurately reproduces what is intended to be studied and analyzed. The present dissertation adopted this method, using the EnergyPlus simulation software, applying it to the use of passive cooling techniques in a module located in the city of Palma, capital of the state of Tocantins in Brazil. This study consisted first of all in the selection of appropriate literature for the subject under study, by a method of analytic where scientific journals of the specialty were filtered more credible and conceptualized according to the selection criteria of the research method. Subsequently, articles published in the selected journals related to the topic under study were studied in order to find out which passive cooling techniques are most frequently applied, in which contexts they are applied, their operation and their effects on the indoor temperatures of the buildings in which they have been implemented or simulated.

A number of time-based methodologies have also been elaborated through a review of the existing literature for the determination of thermal comfort zones, which should not be overlooked when considering cooling techniques.

A simulation plan was defined, where nine simulations were carried out annually subject to the local climatic conditions by importing the corresponding climate file. In each simulation the parameters in the model equivalent to the application of the two passive cooling techniques tested, natural ventilation and the application of a cold paint on the exterior walls and the roof of the module were changed, and the results obtained were compared.

Synthetically, this study concluded that the application of cold ink is the most efficient measure of the two considered in cooling the interior temperatures of the module. But this conclusion is only valid for the simulated model in the simulated conditions.

**KEYWORDS:** Passive cooling techniques, numerical simulation, EnergyPlus, natural ventilation, cold paint.



## 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 E METODOLOGIA .....	2
1.3. ESTRUTURA DO TEXTO .....	2
<b>2. METODOLOGIA DE PESQUISA</b> .....	3
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	3
2.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AO TEMA EM ESTUDO .....	4
2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MÉTODO .....	14
<b>3. ESTADO DA ARTE</b> .....	15
3.1. SOLUÇÕES ARQUITETÓNICAS EM FUNÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS .....	15
3.2. EFEITOS DO CLIMA NO SER HUMANO E ZONA DE CONFORTO .....	18
3.2.2. SENSAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO E PARÂMETROS A CONSIDERAR .....	21
3.2.2.1. Parâmetros ambientais .....	22
3.2.2.2. Parâmetros individuais .....	22
3.2.2.3. Parâmetros Psicossociais .....	23
3.2.3. ZONA DE CONFORTO TÉRMICO .....	23
3.2.4. NORMALIZAÇÃO .....	28
3.3. TÉCNICAS PASSIVAS DE ARREFECIMENTO E DESCRIÇÃO .....	30
3.3.1. EXPLICAÇÃO DAS TÉCNICAS E ASSOCIAÇÃO À LITERATURA SELECIONADA .....	31
3.3.1.1. Ventilação de conforto diurna .....	31
3.3.1.2. Ventilação noturna .....	31
3.3.1.3. Arrefecimento por radiação .....	33
3.3.1.4. Torres de arrefecimento evaporativo .....	35
3.3.1.5. Arrefecimento evaporativo indireto .....	37
3.3.1.6. O solo como fonte de arrefecimento .....	39
3.3.1.7. Materiais de mudança de fase (PCM) .....	41

<b>4. PLANO DE SIMULAÇÃO</b> .....	45
<b>4.1. DISPOSIÇÕES GERAIS DAS SIMULAÇÕES</b> .....	45
4.1.1. EXPLICAÇÃO DO SOFTWARE EMERGYPLUS .....	45
4.1.2. LOCALIZAÇÃO E CLIMA .....	45
4.1.3. DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DO MÓDULO DE CONTROLO ....	46
<b>4.2. DESCRIÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO</b> .....	47
4.2.1. SIMULAÇÃO DE CONTROLO .....	47
4.2.2. RESTANTES SIMULAÇÕES.....	51
<b>5. RESULTADOS</b> .....	53
<b>5.1. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS</b> .....	53
5.1.1. SIMULAÇÃO S1 .....	53
5.1.2. SIMULAÇÃO S2 .....	54
5.1.3. SIMULAÇÃO S3.0 .....	55
5.1.4. SIMULAÇÃO S3.1 .....	56
5.1.5. SIMULAÇÃO S3.2 .....	57
5.1.6. SIMULAÇÃO S4.0 .....	58
5.1.7. SIMULAÇÃO S4.1 .....	59
5.1.8. SIMULAÇÃO S4.2 .....	60
<b>5.2. RESULTADOS TOTAIS DAS SIMULAÇÕES</b> .....	61
<b>5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	62
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	65
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	65
6.2. CONSIDERAÇÕES FOCADAS NOS RESULTADOS .....	65
6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	67
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Leque de revistas que publicaram artigos relacionados com o tema pesquisado..	4
Figura 2 – Seleção de revistas com mais artigos publicados .....	7
Figura 3 – Evolução ao longo dos anos de artigos publicados.....	8
Figura 4 – Evolução das seis palavras-chaves mais citadas ao longo dos anos .....	12
Figura 5 – Zonas climáticas, adaptado de.....	16
Figura 6 – Exemplo de habitações dos índios nas diferentes zonas climáticas .....	17
Figura 7 – Gráfico bioclimático de Olgyay.....	25
Figura 8 – Carta bioclimática de Givoni .....	25
Figura 9 – Gamas de temperatura operativa aceitáveis em edifícios naturalmente condicionados .....	28
Figura 10 - Valores bases de temperaturas operativas interiores para edifícios não climatizados.....	29
Figura 11 – Ventilação de conforto.....	31
Figura 12 – Ventilação noturna com inércia térmica alta .....	32
Figura 13 – Torre de vento.....	33
Figura 14 – Arrefecimento por radiação .....	33
Figura 15 – Exemplo de cobertura fria.....	34
Figura 16 – Edifício em Itália e telha a aplicar .....	34
Figura 17 – Tipos de fachadas ventiladas.....	35
Figura 18 - Esquema de cobertura com barreira de transmissão de radiação .....	35
Figura 19 – Torre de arrefecimento evaporativo .....	36
Figura 20 – Torre “Shower”.....	36
Figura 21 – Água na cobertura e cobertura verde .....	37
Figura 22 – Temperatura interior em casas não isoladas, em 3 cidades com diferentes tipos de coberturas .....	38
Figura 23 – Tubos enterrados (ar).....	39
Figura 24 – Esquema de arrefecimento pelo solo, combinado com chaminé solar .....	40
Figura 25 – Esquema de arrefecimento pelo solo combinado com torre de vento.....	40
Figura 26 – Ilustração do funcionamento de materiais PCM.....	41
Figura 27 – Poupança energética e redução da temperatura interior devido ao uso de PCM e capacidade de armazenamento de energia (Kj/Kg) de materiais correntes e PCM para um diferencial de temperatura de 10°K.....	41

Figura 28 – Ilustração e esquema da aplicação de microcápsulas de PCM numa parede interior ventilada.....	42
Figura 29 – Aplicação de PCM em diferentes elementos construtivos.....	42
Figura 30 – Localização de Palma.....	46
Figura 31 – Perspectiva (a), alçado poente (b) e alçado norte (c).....	46
Figura 32 – Comparação das temperaturas interiores e exteriores, com temperatura do solo as 18°C.....	48
Figura 33 – Comparação de temperaturas interiores e exteriores, com temperatura do solo a 20°C.....	48
Figura 34 – Comparação de temperaturas interiores e exteriores, com temperatura do solo a 25°C.....	49
Figura 35 – Comparação de temperaturas interiores e exteriores, com temperatura do solo a 28,66°C.....	49
Figura 36 – Gama de temperaturas S0.....	50
Figura 37 – Comparação das temperaturas da simulação com as medições.....	50
Figura 38 – Gama de temperaturas S1.....	53
Figura 39 – Comparação entre as temperaturas das simulações S1 e S0.....	54
Figura 40 – Gama de temperaturas S2.....	54
Figura 41 – Comparação entre as temperaturas das simulações S2 e S0.....	55
Figura 42 – Gama de temperaturas de S3.0.....	55
Figura 43 – Comparação entre as temperaturas das simulações S3.0 e S0.....	56
Figura 44 – Gama de temperaturas de S3.1.....	56
Figura 45 – Comparação entre temperaturas das simulações S3.1 e S1.....	57
Figura 46 – Gama de temperaturas de S3.2.....	57
Figura 47 – Comparação entre as temperaturas das simulações S3.2 e S2.....	58
Figura 48 – Gama de temperaturas de S4.0.....	58
Figura 49 – Comparação entre as temperaturas de S4.0 e S3.0.....	59
Figura 50 – Gama de temperaturas de S4.1.....	59
Figura 51 – Comparação entre as temperaturas de S4.1 e S3.1.....	60
Figura 52 – Gama de temperaturas de S4.2.....	60
Figura 53 – Comparação entre as temperaturas de S4.2 e S3.2.....	61
Figura 54 – Boxplots das temperaturas interiores das nove simulações.....	61
Figura 55 – Somatório das diferenças de temperaturas interiores positivas em cada simulação.....	62

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Vinte revistas com maior fator de impacto .....	5
Quadro 2 – Vinte revistas com mais citações .....	6
Quadro 3 – Distribuição dos artigos entre as revistas ao longo dos anos .....	7
Quadro 4 – Análise do número de artigos por autor .....	8
Quadro 5 – Artigos mais citados das revistas seleccionadas .....	9
Quadro 6 – Quantificação das palavras-chave.....	10
Quadro 7 – Classificação dos artigos de acordo com os parâmetros .....	12
Quadro 8 – Equações dos limites da aceitabilidade .....	29
Quadro 9 – Dados climáticos.....	46
Quadro 10 – Propriedades dos materiais.....	47
Quadro 11 – Parâmetros variáveis nas simulações .....	51
Quadro 12 - Resultados dos somatórios totais.....	62



## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

### SÍMBOLOS

- C – Taxa de arrefecimento sob a forma de convecção [Cal./m<sup>2</sup>/hr].
- C<sub>ac</sub> – Artigo em ata de conferência
- C<sub>p</sub> – Calor Específico [J/Kg.K]
- D – Massa Vol. [Kg/m<sup>3</sup>]
- E – Perdas de calor por evaporação [Cal./m<sup>2</sup>/hr]
- Esp – Espessura [mm]
- ET<sub>ext</sub> – Temperatura efetiva média exterior [°C]
- G – Fator Solar
- HR – Humidade relativa do ar [%]
- I<sub>cl</sub> – Resistência térmica do vestuário [m<sup>2</sup>.°C/W]
- K<sub>c</sub> – Constante de convecção
- K<sub>r</sub> – Constante de radiação total
- M – Taxa de metabolismo [Cal./m<sup>2</sup>/hr].
- met – Energia produzida por uma pessoa sentada em estado de repouso (1 met = 58,2 W/m<sup>2</sup>)
- mrt – Temperatura média de radiante [°C]
- O – Artigo original
- R – Artigo de revisão
- R – Radiação [W/m<sup>2</sup>]
- Rph – Renovações horárias [h<sup>-1</sup>]
- S – Ganhos ou perda de calor corporal [Cal./m<sup>2</sup>/hr]
- t<sub>a</sub> – Temperatura bolbo seco [°C]
- T<sub>a</sub> – Temperatura do ar
- T<sub>i</sub> – Temperatura média do ar ou de globo interior [°C]
- T<sub>int</sub> – Temperatura interior [°C]
- T<sub>m</sub> – Temperatura média exterior [°C]
- T<sub>maout</sub> – Temperatura exterior média mensal [°C]
- T<sub>mp</sub> – Temperatura exterior exponencialmente ponderada [°C]

$T_{n-1}$  – Temperatura média exterior do dia  $i$  anterior [°C]  
 $T_{neut}$  – Temperatura de neutralidade térmica [°C]  
 $T_{oc}$  – Temperatura operativa de conforto [°C]  
 $t_s$  – Temperatura média da pele [°C].  
 $U$  – Coeficiente de Transmissão Térmica [W/m<sup>2</sup>.K]  
 $V$  – Velocidade do ar [cm/s]  
 $V_0$  – Velocidade padrão [cm/s]  
 $v_a$  – Velocidade do ar [m/s]  
 $W$  – Energia correspondente ao trabalho mecânico realizado [W/m<sup>2</sup>]  
 $\lambda$  – Condutividade [W/m.K]  
 $\rho_v$  – Pressão parcial de vapor de água [kPa]  
 $\rho_{vs}$  – Pressão de saturação [Kpa]

## ACRÓNIMOS

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers  
AVAC – Aquecimento, ventilação e ar condicionado  
ISO – International Organization for Standardization  
NBR – Norma Técnica  
OSB – Oriented Stranded Board  
PCM – Phase Change Materials  
PMV – Predicted mean Vote

## ABREVIATURAS

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono  
Id – Identificação do artigo  
Ref – Referência da simulação

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A indústria da construção é considerada uma das mais poluentes à escala global, tanto em fase de execução como em fase de utilização e ciclo de vida dos edifícios. É sobre a fase de utilização dos edifícios que incide o tema desta dissertação. Estima-se que cerca de 60% da energia consumida num edifício [1] se destina a ventilação, aquecimento e arrefecimento do mesmo, mitigar estes consumos, tornando os edifícios mais eficientes sob o ponto de vista energético, reduzindo assim a emissão dos gases poluentes que advém dos consumos energéticos é um desafio que tem impulsionado a indústria a desenvolver alternativas às soluções construtivas correntes e tradicionais da mesma. Nesta dissertação pretende-se estudar e avaliar os efeitos de algumas destas soluções alternativas no que concerne ao arrefecimento dos edifícios, para a concretização deste objetivo recorrer-se-á a um *software* de simulação numérica que permita quantificar os impactos das técnicas passivas de arrefecimento nas temperaturas interiores, fazendo-se a modelação e tratamento numérico dos resultados extraídos.

A utilização de qualquer simulação numérica implica uma calibração e validação do modelo previamente, só desta forma os dados extraídos terão valor científico para poderem ser estudados e analisados com vista à implementação das técnicas no contexto real. Para a validação do modelo da simulação numérica realizar-se-á uma comparação entre as temperaturas obtidas pela simulação com as medições das temperaturas registadas “*in situ*”, sendo assim possível ajustar-se qualquer parâmetro de entrada da simulação caso seja necessário, de forma a aproximar-se o modelo o mais possível da realidade simulada.

A seleção das técnicas passivas de arrefecimento que serão consideradas nas simulações numéricas resultam do estudo da literatura associada ao tema desta dissertação, definida de acordo com um método de pesquisa meta-analítico. Depois desta seleção, as simulações serão executadas, procedendo-se a uma análise parcial e global comparativa entre os resultados obtidos para cada uma das simulações numéricas de forma identificar-se a técnica passiva de arrefecimento mais adequada ao modelo simulado. A interpretação e compreensão dos resultados extraídos, aliados ao conhecimento das potencialidades e limitações dos modelos de simulação numérica é que irão ditar a validade das técnicas passivas de arrefecimento a aplicar nos diferentes cenários.

## 1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Objetivo principal desta dissertação é analisar-se e quantificar-se a diminuição da temperatura interior aplicando as técnicas passivas de arrefecimento a um modelo de simulação numérica com recurso ao *software* EnergyPlus, sujeito ao clima da cidade de Palma no Brasil. Para a concretização deste objetivo estabeleceram-se objetivos intermédios que conduzissem este trabalho ao destino proposto. Estes objetivos intermédios são:

- Seleção da bibliografia associada ao tema através dos critérios do método científico de pesquisa meta-analítico7f;
- Identificação e explicação de técnicas passivas de arrefecimento através da literatura selecionada e associação a diferentes climas;
- Elaboração do modelo e descrição no plano de simulações;
- Validação da simulação de controlo;
- Interpretação e análise dos resultados obtidos de cada simulação e posterior análise comparativa entre as simulações;
- Conclusões a retirar da implementação das técnicas de arrefecimento no modelo simulado.

## 1.3. ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está dividido em seis capítulos.

Capítulo 1 – Introdução. Neste capítulo faz-se uma apresentação do tema em estudo e o seu enquadramento na situação atual na área da construção e no desempenho energético do edifícios, indicando-se os objetivos propostos e qual a metodologia a utilizar na sua execução. Conjuntamente é descrita a estrutura do texto.

Capítulo 2 – Metodologia de pesquisa. Enuncia-se qual a metodologia pesquisa bibliográfica adotada e respetivos critérios aplicados à seleção da bibliografia considerada, referindo-se a sua importância como ferramenta de filtragem e seleção de informação validada cientificamente. Identificação da bibliografia selecionada.

Capítulo 3 – Estado da arte. Procede-se à identificação e caracterização das zonas climáticas e a sua influência nas soluções arquitetónicas adotadas. Posteriormente aborda-se a sensação e zona de conforto térmico, indicando e descrevendo-se os métodos e parâmetros utilizados para a sua determinação. Na secção final deste capítulo identifica-se as técnicas passivas de arrefecimento e sua explicação, associadas à bibliografia selecionada.

Capítulo 4 – Plano de simulação. Explicação geral do funcionamento do *software* a usar nas simulações, identificação do local e clima onde as simulações irão ocorrer, caracterização do módulo, descrição e validação do modelo, explicação dos procedimentos e parâmetros a considerar nas simulações.

Capítulo 5 – Resultados. Neste capítulo apresentam-se os resultados parciais alcançados provenientes das diferentes simulações realizadas. Na secção final faz-se uma análise crítica e comparativa entre os resultados totais de todas as simulações executadas com o intuito de explicar os diferentes resultados alcançados em função dos parâmetros alterados.

Capítulo 6 – Conclusões. No último capítulo deste trabalho, são apresentadas as considerações finais sobre o tema em estudo, juntamente com as conclusões que se podem retirar da aplicação das técnicas passivas de arrefecimento simuladas, também propôs-se alguns desenvolvimentos futuros relacionados com o tema desta dissertação.

# 2

## METODOLOGIA DE PESQUISA

### 2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

“Informação é poder”, foi uma das frases mais repetidas no início do corrente século, numa adaptação da célebre frase de Francis Bacon “conhecimento é poder”. No segundo decénio deste século esta premissa já não é válida face ao universo de informação disponível em inúmeras bases de dados a que se tem acesso. É necessário tratar e filtrar a informação que se pesquisa, de modo a fazer-se a separação entre informação credível, verificada e validada, e informação incorreta, imprecisa e não validada. Só desta forma é possível obter-se garantias nos resultados das pesquisas que se efetuam. Para se alcançar estas garantias é necessário recorrer-se a metodologias de pesquisa que permitem sistematizar as pesquisas de acordo com um determinado procedimento.

O modelo de pesquisa utilizado nesta dissertação é uma adaptação do método *Meta-Analítico 7f* de Garcia e Ramirez [2] que é composto por sete fases. Uma explicação detalhada da aplicação do método pode ser encontrada em [3]. Nos parágrafos seguintes descrevem-se cada uma das fases do método.

**Fase 1: Determinação das revistas da área científica.** A primeira fase no estudo do estado da arte é saber quais as revistas científicas que mais abordam o tema em estudo. Através da consulta de bases de dados é possível definir-se que revistas são referência. Congressos, conferências e associações científicas são também uma fonte credível de revistas com importância na área.

**Fase 2: Definir revistas relevantes.** A segunda fase consiste em estabelecer quais as revistas de maior relevância. Para isso é necessário recorrer-se a critérios de relevância como: fator de impacto ISI; e o número de vezes que a revista é citada em artigos de maior citação. As revistas selecionadas nesta etapa serão a base de busca das pesquisas que se irão efetuar.

**Fase 3: Preencher a base de dados com artigos.** Depois de se estabelecer as revistas com maior relevância, efetua-se a pesquisa com as palavras-chaves do tema em estudo e selecionam-se as publicações que se definiu na etapa anterior. Para este efeito recomenda-se a utilização de uma base de dados bastante completa.

**Fase 4. Análise de autores e artigos.** Esta fase está dividida em duas partes:

- a) A primeira análise consiste em determinar-se o número de artigos publicados anualmente relacionados com o tema em estudo, e respetivas citações, juntamente com o número de citações das publicações selecionadas. Esta análise permitirá determinar se o tema pesquisado tem suscitado um crescente interesse científico ao longo dos anos.

- b) A segunda análise consiste em identificarem-se os autores mais publicados pelas revistas selecionadas e pelos estudos contidos nas bibliografias dos artigos encontrados. Esta segunda análise tem como objetivo conhecer-se que autores são mais referenciados nas revistas com estudos de maior qualidade.

**Fase 5. Determinar Linhas e Abordagens Teóricas de Pesquisa.** Nesta fase identificar-se-ão e estudar-se-ão as principais linhas de pesquisa e abordagens teóricas ao tema em estudo. Esta identificação é importante para que a revisão do estado da arte seja completa.

**Fase 6. Análise das Palavras-Chaves.** A análise das palavras-chaves dos artigos será importante para se perceber a evolução do tema em estudo e quais as linhas de pesquisa principais dentro do tema.

**Fase 7. Estudo das Relações.** Esta última fase é a mais ampla e tem como pré-requisito a escolha do tema e do modelo da pesquisa a ser testado. Trata-se do estudo das relações dos artigos previamente selecionados nas fases anteriores. Tem como finalidade descobrir os tamanhos das amostras dos estudos, técnicas estatísticas utilizadas, locais de estudo e significância das relações.

## 2.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AO TEMA EM ESTUDO

**Fase 1: Determinação das revistas da disciplina.** Nesta primeira etapa recorreu-se ao *ISI Web of Science* [4] que é reconhecida internacionalmente como uma das melhores e mais completas bases de dados. Fez-se uma pesquisa no tópico com as palavras-chaves “*Passive cooling techniques on buildings*”, refinando-se a amostra dos resultados a um período temporal entre 2008-2018, com idioma em inglês. Na figura 1 apresentam-se algumas das revistas que abordaram o tema em estudo.



Figura 1 – Leque de revistas que publicaram artigos relacionados com o tema pesquisado [4]

**Fase 2. Definição de revistas relevantes.** Para a seleção das revistas mais relevantes na área de estudo procedeu-se a uma seleção das vinte revistas registadas no *Journal of Citation Reports* com maior fator de impacto ISI (Equação 1) e maior número de citações, referentes ao ano de 2017 [5]. Esta seleção é apresentada Quadros 1 e 2.

$$\text{Fator de Impacto} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de citações em 2017 de artigos publicados em 2015 e 2016}}{\text{N}^\circ \text{ de artigos citados em 2015 e 2016}} \quad (1)$$

Conjugando-se os Quadros 1 e 2 obteve-se um total de vinte e quatro revistas diferentes, que constituem a base de dados das pesquisas.

Quadro 1 – Vinte revistas com maior fator de impacto [5].

Revista	Sigla	Fator de Impacto
RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	R.S.E.R	9.184
APPLIED ENERGY	A.P	7.900
ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT	E.C.M	6.377
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	J.C.P	5.651
ENERGY	E	4.968
RENEWABLE ENERGY	R.E	4.900
BUILDING AND ENVIRONMENT	B.E	4.539
ENERGY AND BUILDINGS	E.B	4.457
SOLAR ENERGY	S.E	4.374
APPLIED THERMAL ENGINEERING	A.T.E	3.771
EUROPEAN POLYMER JOURNAL	E.P.J	3.741
ENERGY SCIENCE & ENGINEERING	E.S.E	3.553
BUILDING RESEARCH AND INFORMATION	B.R.I	3.468
JOURNAL OF PLANNING LITERATURE	J.P.L	3.150
SUSTAINABLE CITIES AND SOCIETY	S.C.S	3.073
INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH	I.J.E.R	3.009
ENERGIES	E.S	2.676
ENERGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT	E.S.D	2.658
CONTROL ENGINEERING PRACTICE	C.E.P	2.616
CANADIAN GEOTECHNICAL JOURNAL	C.G.J	2565

Quadro 2 – Vinte revistas com mais citações [5].

Revista	Sigla	Citações
RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	R.S.E.R	67014
APPLIED ENERGY	A.E	63669
ENERGY	E	52650
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	J.C.P	45454
ENERGY CONVERSION MANAGEMENT	E.C.M	43333
APPLIED THERMAL ENGINEERING	A.T.E	35677
RENEWABLE ENERGY	R.E	34316
ENERGY AND BUILDINGS	E.B	31865
SOLAR ENERGY	S.E	29151
BUILDING AND ENVIRONMENT	B.E	21261
EUROPEAN POLYMER JOURNAL	E.P.J	18372
ENERGIES	E.S	11350
CANADIAN GEOTECHNICAL JOURNAL	C.G.J	9631
CONTROL ENGINEERING PRACTICE	C.E.P	6917
INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH	I.J.E.R	5260
COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY	C.R.S.T	3891
JOURNAL OF SOLAR ENERGY ENGINEERING –TRANS. ASME	J.S.E.E	3571
FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN	F.E.B	3365
BUILDING RESEARCH AND INFORMATION	B.R.I	2950
JOURNAL OF CULTURAL HERITAGE	J.C.H	2451

**Fase 3. Preenchimento da base de dados com artigos.** Fechada a base de dados que resulta da seleção das vinte e quatro revistas mais relevantes, efetuou-se a pesquisa num espaço temporal dez anos (2008-2018), uma vez que só a partir de 2008 é que passou a haver um interesse efectivo por parte dos líderes políticos mundiais em abordarem o tema da sustentabilidade do planeta. Os resultados da pesquisa efetuada perfazem um total de cento e vinte e um artigos relacionados com o tema pesquisado.

**Fase 4. Análise de autores e artigos.**

- a) Determinação do número de artigos publicados anualmente nas revistas mais relevantes. A figura 2 destaca as revistas selecionadas que mais artigos publicaram no intervalo de tempo considerado.

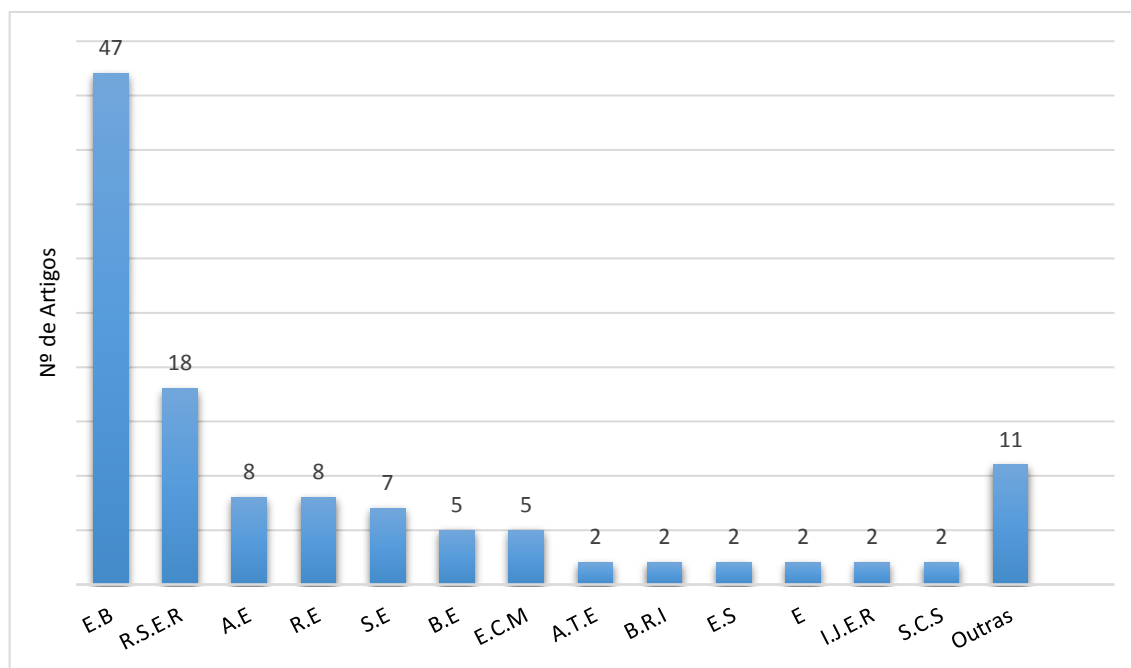


Figura 2 – Seleção de revistas com mais artigos publicados [4].

Entre as vinte e quatro revistas que publicaram artigos, no período de dez anos (2008-2018), relativos ao tema pesquisado, a ENERGY AND BUILDINGS é quem mais publicou, com um total de 47 artigos, seguindo-se a RENEWABLE SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS com 18 artigos e das APPLIED ENERGY e RENEWABLE ENERGY ambas com 8 artigos publicados. Para uma consulta mais detalhada da distribuição artigos publicados pelas revistas selecionadas em cada ano atente-se ao Quadro 3 e Figura 3. Pode-se concluir que o tema tem despertado algum interesse ao longo dos anos, confirmando-se a importância científica do tema em estudo.

Quadro 3 – Distribuição dos artigos entre as revistas ao longo dos anos [4].

Revista	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Total	%
E.B	1	1	1	6	5	5	2	4	5	11	6	47	38.8
R.S.E.R	2	0	1	2	0	1	2	0	3	4	3	18	14.9
A.E	0	0	0	0	0	1	3	1	1	2	0	8	6.6
R.E	2	1	2	0	1	0	1	0	1	0	0	8	6.6
S.E	0	1	0	2	2	0	0	0	2	0	0	7	5.8
B.E	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	2	5	4.1
E.C.M	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	5	4.1
A.T.E	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2	1.7
B.R.I	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	1.7
E.S	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	1.7
E	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2	1.7
I.J.E.R	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1.7
S.C.S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1.7
C.G.J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.8
C.R.S.T	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.8
C.E.P	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.8
E.S.E	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0.8
E.S.D	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0.8
E.P.J	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0.8
F.E.B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0.8
J.C.P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.8
J.C.H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0.8
J.P.L	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0.8
J.S.E.E	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0.8

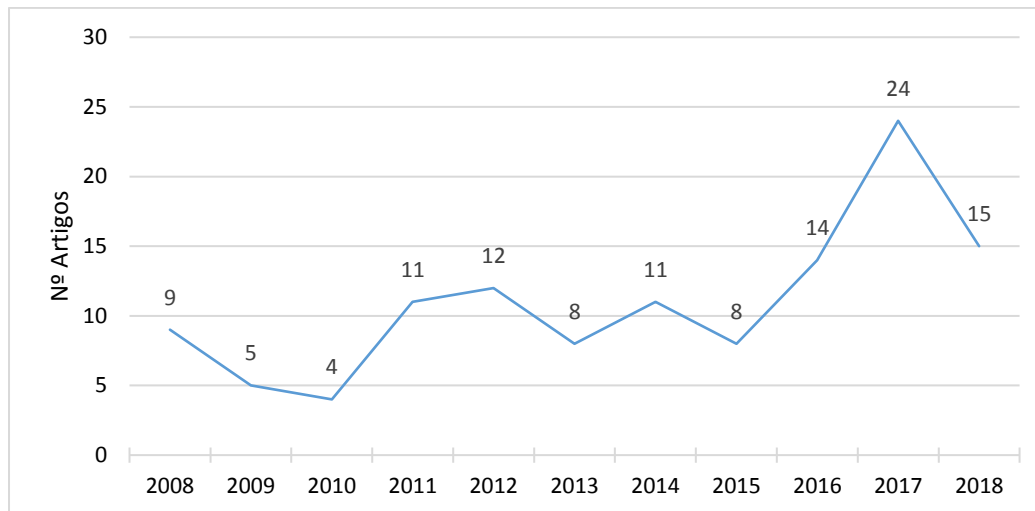


Figura 3 – Evolução ao longo dos anos de artigos publicados

b) Identificação dos autores mais publicados nas revistas seleccionadas. Numa primeira fase seleccionou-se um total de seis autores que publicaram artigos nas revistas seleccionadas pelo menos três vez, no espaço temporal considerado. O Quadro 4 refere os autores, título dos artigos, revista e ano da publicação, e o número de citações.

Quadro 4 – Análise do número de artigos por autor [4].

Id.	Autor	Artigo	Revista	Ano	Citações
1		A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes	R.S.E.R	16	121
2	Calautitf, JK; Jomehzadeh , F; Nejat, P	A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment	R.S.E.R	17	20
3		Evaluation of a two-sided windcatcher integrated with wing wall (as a new design) and comparison with a conventional windcatcher	E.B	16	13
4		Application of wind as a renewable energy source for passive cooling through windcatchers integrated with wing walls	E.S	18	0
5		Cool roofs impact on building thermal response: A French case study	E.B	11	47
6	Bozonnet, E	Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment	E.B	12	38
7		Indexes for passive building design in urban context - indoor and outdoor cooling potentials	E.B	18	0
8		The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring	E.B	14	60
9	Cotana, F	Summer and Winter Effect of Innovative Cool Roof Tiles on the Dynamic Thermal Behavior of Buildings	E.S	14	35
10		On an innovative integrated technique for energy refurbishment of historical buildings: Thermal-energy, economic and environmental analysis of a case study	A.E	16	33
11	Hughes, BR	A review of sustainable cooling technologies in buildings	R.S.E.R	11	53

Numa segunda fase fez-se uma seleção de artigos originais e artigos de revisão mais citados nas publicações anteriormente selecionadas. Nesta seleção foi incluída uma pesquisa paralela com as palavras-chaves “*Bioclimatic architecture*” e consideraram-se alguns artigos de conferências, de forma a ampliar a seleção de artigos a considerar, obtendo-se os artigos listados no Quadro 5.

Quadro 5 – Artigos mais citados das revistas selecionadas [4].

Id.	Autor	Artigo	Revista	Ano	Citações
12	Soares, N; Costa, JJ; Gaspar, AR; et al.	Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency	E.B	13	328
13	Castleton, HF; Stovin, V; Beck, SBM; et al	Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit	E.B	10	314
14	Sadineni, SB; Madala, S; Boehm, RF	Passive building energy savings: A review of building envelope components	R.S.E.R	11	308
15	Zinzi, M; Agnoli, S	Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region	E.B	12	161
16	Santamouris, M; Kolokotsa, D	Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art	E.B	13	134
17	Sun, B; Luh, P; Jia, QS; et al.	Building Energy Management: Integrated Control of Active and Passive Heating, Cooling, Lighting, Shading, and Ventilation Systems	IEEE.T.A.S.E*	13	80
18	Kubota, T; Chyeeb, DTH; Ahmad, S	The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia	E.B	09	60
19	Artmann, N; Manz, H; Heiselberg, P	Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation	R.E	08	59
20	Zhou, J; Chen, Y	A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China	R.S.E.R	10	58
21	Maerefat, M; Haghighi, AP	Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney	R.E	10	55
22	Romeo, C; Zinzi, M	Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study	E.B	13	54
23	Yildiz, Y; Arasan, ZD	Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates	E	11	51
24	Agugliaro, FM; Montoya, FG; Ortega, AS; et al.	Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort	R.S.E.R	15	39
25	Miller, W; Buys, L; Bell, J	Performance evaluation of eight contemporary passive solar homes in subtropical Australia	B.E	12	24
26	Karachaliou, P; Santamouris, M; Pangalou, H	Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens	E.B	16	23
27	Khambadkone, NK; Jain, R	A bioclimatic analysis tool for investigation of the potential of passive cooling and heating strategies in a composite Indian climate	B.E	17	7
28	Chávez, JRG; Melchor, FF	Application of combined passive cooling and passive heating techniques to achieve thermal comfort in a hot dry climate	E.P*	13	5

\* Artigo publicado em revista que consta na seleção de revistas.

**Fase 5. Determinação das Linhas de Pesquisa.** Nesta fase para a determinação das principais linhas de pesquisa que abordam o tema “*Passive Cooling Techiques on Buildings*” fez-se um estudo dos vinte e oito artigos selecionados de acordo com o método, chegando-se à conclusão que as linhas de pesquisa que mais abordam o tema são:

- Consumo energético em edifícios;
- Performance e eficiência energética em edifícios;
- Edifícios sustentáveis e ecológicos;
- Arquitetura bioclimática;
- Envolvente do edifício (Building Envelope);
- Massa térmica;
- Ganhos e perdas térmicas.

**Fase 6. Análise das Palavras-Chaves.** Esta fase tem como finalidade saber que rumo irão tomar os novos estudos e artigos. Para este fim fez-se uma busca das palavras-chaves presentes nos artigos selecionados de forma a proceder-se a uma quantificação das palavras-chaves ao longo do espaço temporal anteriormente definido. Para esta quantificação refinou-se a pesquisa apenas e só à categoria de Engenharia Civil do Web of Science incluindo todos os tipos de documentos publicados (artigos, artigos de revisão e artigos de conferências) de modo a que os resultados apresentados fossem fiáveis, caso contrário obter-se-iam resultados díspares e afastados da realidade do âmbito do caso de estudo. Esta quantificação é apresentada no Quadro 6 e na Figura 4.

Quadro 6 – Quantificação das palavras-chave [4].

Palavras-Chaves	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Total
Insulation	144	123	144	218	264	296	270	261	340	408	371	2809
Thermal Comfort	91	118	133	128	188	185	196	231	334	395	394	2393
Heat Transfer	157	128	125	192	213	221	227	210	271	321	260	2325
Thermal Performance	57	52	54	79	83	113	153	149	174	229	199	1342
Thermal Energy Storage	11	46	56	56	101	106	201	119	213	225	200	1334
Built Environment	46	52	71	63	72	116	83	120	144	224	166	1157
Building Envelope	44	46	53	71	77	101	102	102	125	164	117	1002
Natural Ventilation	57	72	47	71	77	92	79	98	110	132	129	964
Shading	31	21	35	34	44	58	59	57	85	95	58	577
Urban Heat Island	9	13	21	23	41	29	32	48	82	92	63	453
Sustainable Buildings	12	19	54	28	18	47	32	36	43	48	30	367
Thermal Mass	17	14	16	15	21	33	33	25	34	34	33	275
Green Roofs	4	1	7	15	18	23	18	30	56	59	30	261
Passive Cooling	11	9	17	18	18	22	17	20	20	48	27	228
Ventilation Rate	10	16	21	15	19	20	22	24	22	20	32	221
P.C.M	10	4	5	16	12	18	21	16	31	27	30	190
Evaporative Cooling	13	12	16	14	10	13	13	28	17	31	19	186

Palavras-Chaves	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Total
Indoor Air Quality	14	28	12	10	14	11	9	16	17	20	29	180
Night Ventilation	9	4	5	7	11	13	14	7	7	20	14	111
Solar Reflectance	6	1	2	4	7	5	15	10	24	17	7	98
Solar Chimney	7	5	6	9	10	5	4	8	11	18	5	88
Fenestration	3	3	3	3	5	9	7	14	11	14	11	83
Energy Efficiency in Buildings	3	1	3	6	7	6	9	9	13	7	10	74
Cool Roof	1	0	0	3	8	6	5	7	21	11	9	71
Energy Retrofitting	0	0	0	1	2	7	2	5	10	18	16	61
Shading Device	8	1	4	3	4	2	6	6	6	10	6	56
Wind Tower	2	2	3	2	3	6	7	10	6	5	3	49
Desiccant Cooling	2	1	6	3	7	3	0	6	1	3	8	40
Double Skin Facades	2	1	1	4	5	3	2	4	6	3	7	38
Geothermal Heat Pump	3	4	4	1	2	3	4	0	8	4	2	35
Wing Wall	2	0	3	3	2	1	2	0	8	4	1	26
Absorption Cooling	2	2	2	2	3	3	5	1	2	0	1	23
Cool Paints	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	5

Através da quantificação da palavras-chaves apresentada no quadro acima, pode-se verificar que os seis temas que mereceram maior estudo são:

- Isolamento;
- Conforto térmico;
- Transferência de calor;
- Performance térmica;
- Armazenamento de energia térmica;
- Ambiente construído.

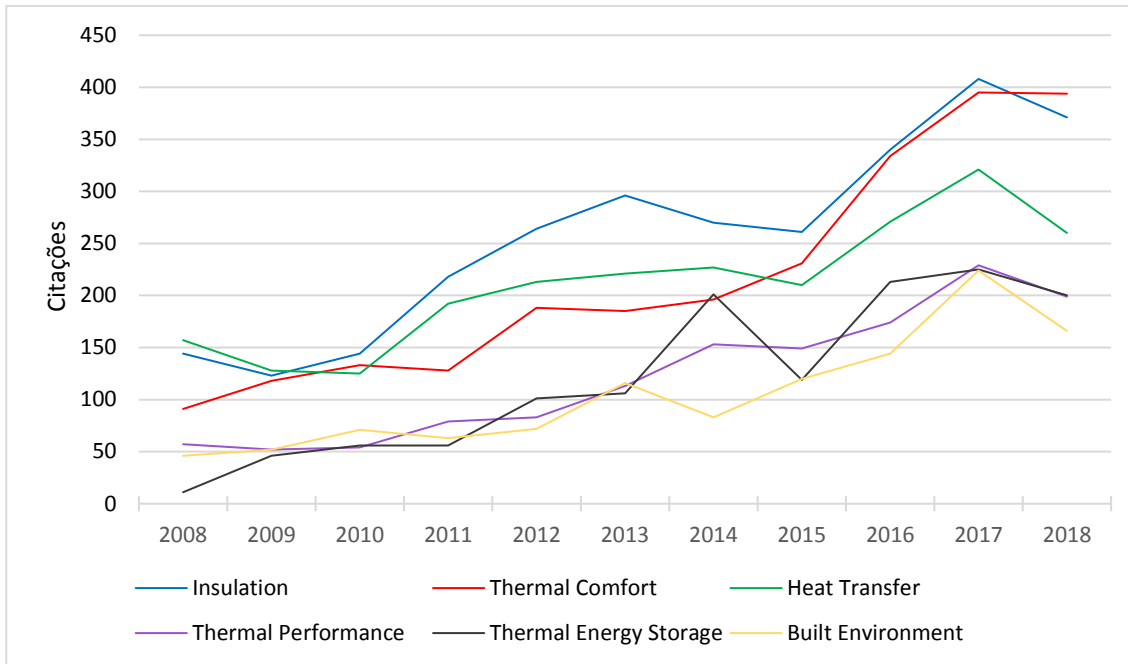


Figura 4 – Evolução das seis palavras-chaves mais citadas ao longo dos anos [4]

Na Figura 4 pode-se observar a evolução das seis palavras-chaves mais citadas ao longo dos anos, que poderá revelar futuras linhas de pesquisa e futuros temas de estudo, a Figura 4 demonstra que existe um interesse crescente nestas palavras-chaves indicando as tendências nos últimos anos.

**Fase 7. Estudo das Relações.** Uma vez completadas as seis primeiras fases do método, o estudo deve possuir o material necessário para se elaborar um modelo estrutural, procedendo-se a uma organização dos artigos seleccionados de acordo com determinados parâmetros, de forma a agruparem-se os artigos em função dos parâmetros coincidentes entre eles, o que irá facilitar a análise e comparação das técnicas adotadas e dos seus resultados. O Quadro 7 demonstra este estudo.

Quadro 7 – Classificação dos artigos de acordo com os parâmetros

Id.	Tipo	Local	Clima	Tipologia	Modelo	Técnica Arrefecimento
1	R	África; América do Norte e Sul; Ásia; Europa; Oceânia	Variado	Edifícios Residenciais e Escritórios	Experimental e Simulação	P.C.M na envolvente do edifício
2	R	África; Ásia; Europa	Variado	NA	Experimental e Simulação	Ventilação; Evaporativa, Permutador de calor,
3	O	Ásia	Tropical		Experimental e simulação	Ventilação natural
4	O	Ásia	Tropical	Edifício Genérico	Experimental e simulação	Ventilação natural
5	O	Europa	Temperado Oceânico	Edifício Residencial	Experimental e simulação	Cobertura fria
6	O	Europa	Temperado Oceânico	Edifícios em Arruamento	Experimental e Simulação	Refletância
7	O	Europa	Temperado	Edifício Comercial	Simulação	Ventilação; Refletância; Dispositivos de sombreamento
8	O	Europa	Temperado	Edifício Residencial	Experimental	Telha com alta refletância
9	O	Europa	Temperado	Edifício Residencial	Experimental	Telha com alta refletância

Id.	Tipo	Local	Clima	Tipologia	Modelo	Técnica Arrefecimento
10	O	Europa	Temperado	Edifício Histórico	Simulação	Telha com alta refletância
11	R	América do Norte; Ásia; Europa	Variado	Edifício Genérico	Experimental	Ventilação
12	R	NA	Variado	Edifício Genérico	Experimental e Simulação	P.C.M na envólvecia e elementos do edifício
13	R	América do Norte; Ásia; Europa	Variado	Variado	Experimental simulação	Cobertura Verde
14	R	Europa	Variado	Edifício Genérico	Simulação	Ventilação; Refletância; Evaporativa; Isolamento; P.C.M
15	O	África; Europa	Ameno	Edifícios Residenciais	Simulação	Evaporativo
16	R	América do Norte e Sul; Ásia; Europa; Oceânia	Variado	Variado	Experimental e Simulação	Ventilação; Evaporativa; Permutador de calor
17	O	Ásia	Quente e Húmido	Edifício Escritórios	Simulação	Sombreamento; Ventilação
18	O	Ásia	Quente Húmido	Edifício Residencial	Experimental	Ventilação
19	O	Europa	Variado	Escritório	Simulação	Ventilação
20	O	Ásia	Verão Quente; Inverno Frio	Edifício Comercial	Simulação	Ventilação; Dispositivos de sombreamento
21	O	NA	Quente	Edifício Residencial	Simulação	Ventilação; Permutador de calor ar-terra
22	O	Europa	Mediterrâneo	Edifício Escritórios Laboratório	Experimental e Simulação	Refletância
23	O	Ásia	Quente e Húmido	Edifício Residencial	Simulação	Análise de todos os parâmetros do edifício
24	R	América do Norte e Sul; África; Ásia; Europa	Variado	Edifícios Residenciais	NA	Isolamento; Evaporativo; Ventilação
25	O	Oceânia	Subtropical	Casas Unifamiliares	Experimental	Orientação; isolamento; Ventilação
26	C	Europa	Mediterrâneo	Edifício Escritórios	Experimental	Evaporativo
27	O	Ásia	Compósito	Edifícios Genéricos	Simulação	Ventilação; Evaporativo
28	C	América do norte	Quente e Seco	Módulos	Experimental	Tubos subterrâneos

Legenda:

O – Artigo original

R – Artigo de revisão

C<sub>ac</sub> – Artigo em ata de conferência

### **2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MÉTODO**

A revisão bibliográfica num estudo científico é o suporte para uma pesquisa eficiente e rigorosa. Pode-se observar que a abordagem meta analítica 7f é um método de revisão bibliográfica que visa selecionar e filtrar dados de forma sistemática de modo a obter-se informação científica validada. Os resultados deste método materializam-se numa seleção criteriosa de vinte e quatro revistas científicas e perfazem um total de vinte e oito artigos considerados, que estão relacionados com o tema em estudo nesta dissertação. Os resultados deste método confirmam a sua utilidade na abordagem e análise ao tema em estudo, e prepara o utilizador para que este saiba filtrar e organizar a informação nas pesquisas que realiza. Assim pode-se concluir que informação não é poder, mas sim, boa informação é poder.

# 3

## ESTADO DA ARTE

### 3.1. SOLUÇÕES ARQUITETÓNICAS EM FUNÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS

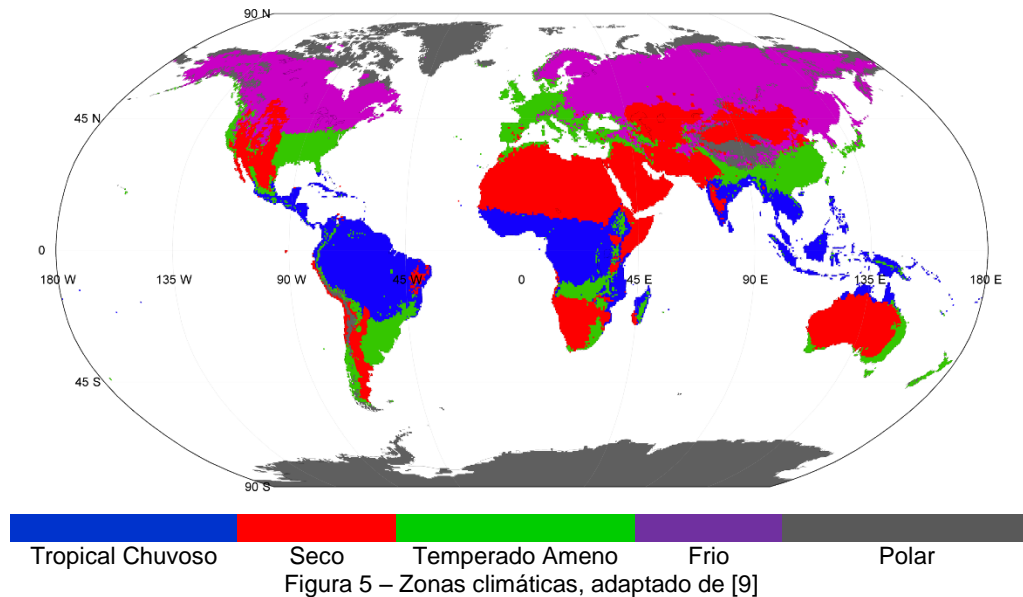
O planeta Terra é dinâmico, e uma das suas manifestações mais dinâmicas é o seu clima. A sua amplitude varia entre invernos rigorosos com temperaturas negativas até verões quentes e secos. O espectro climático das cores vai desde o azul frio até ao vermelho quente, mas é normalmente nas zonas de cor verde é que a vida lhe está associada. A determinação de uma zona ser quente ou fria está diretamente relacionada com a distância desta zona em relação ao equador, mas a presença solar também define se esta zona é húmida ou seca, e também influencia a predominância dos ventos existentes em cada zona. Assim o clima tem um papel fundamental nas mais diversas formas de vida (animal e vegetal) nas diferentes regiões do globo e obviamente isto também se manifesta no ser humano, que possui uma capacidade de adaptação superior em relação as outras espécies, às circunstâncias e ao meio que o rodeia. Esta superior capacidade de adaptação é visível por exemplo nos tipos de construção e soluções arquitetónicas adoptadas em busca do conforto desejado na habitação. Conforto este que segundo Ellsworth Huntington [6] numa primeira tentativa de definição do conceito de conforto térmico, logo pouco precisa, indica que este se situa nas seguintes condições climáticas.

- Temperatura médias compreendidas entre os 4°C nos meses mais frios até 21°C nos meses mais quente;
- Tempestades e ventos frequentes, de modo a manter a humidade relativa alta, com exceção em climas quentes, e precipitação em todas as estações;
- Sucessão constante de ciclones que provocam alterações moderadas na temperatura, mas que não são severos o suficiente para provocar danos.

Portanto pode-se concluir que as zonas temperadas são as zonas climáticas privilegiadas para habitação e conseqüente conforto térmico segundo Lynn Thorndike [7] mas primeiro é necessário identificar-se que zonas climáticas existem à escala terrestre e suas características. Embora existam vários sistemas e critérios de classificação das zonas climáticas, a classificação mais aceite é a de W. Köppen [8] que identifica cinco zonas climáticas existentes no planeta Terra que são:

- Tropical chuvoso;
- Seco;
- Temperado-ameno;
- Frio;
- Polar.

A Figura 5 identifica estas zonas e regiões do planeta em que se localizam [9].



No âmbito da arquitetura, a necessidade humana em procurar o conforto térmico na habitação é um fator decisivo como ela se manifesta, e tem sido este o objetivo principal há vários séculos por parte de quem constrói. É por isso que os estilos arquitetónicos das construções habitacionais são definidos mais pelas zonas climáticas onde se inserem do que pelo país onde foram construídos. Porém também existem outros factores que influenciam a expressão arquitetónica que podem ser agrupados em dois campos. Factores culturais, onde se inserem aspectos económicos, morais, históricos e sociais. E factores fisiológicos como a luminosidade, sonoridade, espaço e claro está o aspecto climático – térmico. Portanto na arquitetura contemporânea considerar o clima como um factor fundamental, só é válido se se considerar que o conforto ambiental é um aspecto que influencia a expressão da mesma. Segundo Dr. Walter B. Cannon “ O desenvolvimento de um ambiente térmico relativamente estável, deverá ser considerado como um dos avanços mais valiosos na evolução dos edifícios”

Um caso que corrobora esta ideia é o caso dos índios americanos [10] que apesar de terem o mesmo *background* étnico e cultural, construíram diferentes estilos de habitação em função das zonas climáticas onde se encontravam. É sabido que os índios americanos fixaram as suas populações nas diferentes regiões do continente norte americanos, e como tal estiveram sujeitos a uma gama alargada de condições climáticas, desde climas frios na região norte a climas quentes no sul passando por climas secos no oeste até as zonas húmidas no sueste do continente.

As tribos que se fixaram a norte, face ao frio extremo, tinham como prioridade a conservação do calor nas suas habitações, por estas eram compactas como o mínimo de área exposta. Uma destas soluções é o conhecido iglô, que tem uma forma hemisférica de baixa altura de forma desviar o vento frio e tem a vantagem do isolamento térmico que a neve proporciona. O gelo suave que se forma a superfície interior é um bom vedante evitando assim fugas de ar e o túnel de acesso está orientado na direção oposta à direção dos ventos predominantes de forma a evitar a fuga de ar quente. Estas estruturas são capazes de manter uma temperatura interior de 15°C quando a temperatura exterior é -45°C.

As tribos da Colúmbia Britânica deparam-se com um clima menos severo, no entanto a necessidade de preservar o calor era prioritária. Esta necessidade fez com que estas tribos edificassem as suas habitações em banda contínua de forma a reduzir as áreas expostas aos elementos climáticos. Estas habitações

consistiam em placas duplas de madeira que configuravam um espaço de ar entre elas proporcionando desta forma um isolamento térmico nos meses de inverno, no verão a placa exterior era removida para efeitos de ventilação. As coberturas eram pouco inclinada de forma a poderem reter a neve para que esta servisse de camada de isolamento térmico.

Na zona temperada, que naturalmente é a mais favorável, requeria menos exigências térmicas aos seus habitantes por isso há uma diversidade de estruturas presentes nestas tribos. A mais comum é tenda cónica, feita de pele que permite ter um bom comportamento face ao vento e à chuva.

Por contraste, as tribos das regiões climáticas quentes e secas, requeriam aos construtores das habitações soluções que minimizassem o efeito das altas temperaturas e que fornecessem sombra devido à presença constante do sol ao longo do dia. Tal como a tribos da Columbia Britânica, optaram por contruir estruturas geminadas para que as áreas expostas ao sol fossem menores. As coberturas e paredes feitas num tipo de barro, que permite um bom isolamento térmico e tem uma capacidade de retardar o efeito do calor, outra característica destas edificações é a presença de janelas de pequenas dimensões. Estas construções normalmente estavam orientadas na direção este-oeste de modo a reduzir o impacto calor da manhã e da tarde no verão.

Por sua vez, as zonas quentes e húmidas apresentavam dois problemas para os seus habitantes: radiação solar excessiva e a evaporação devido às brisas húmidas. Para solucionar estes dois problemas, as tribos nestas zonas optaram por construir as suas habitações de um modo a que o ar pudesse circular livremente, e que fossem abrangidas pelas sombras provenientes da vegetação presente. As habitações das tribos presentes nestas zonas quentes e húmidas apresentavam cobertura inclinada de duas águas constituídas por vegetação para proporcionar isolamento solar e sombra. A inclinação destas coberturas era bastante acentuada e prolongavam-se para além dos limites da habitação, protegendo-a das chuvas. O chão era elevado em relação ao plano de referência para que permanecesse seco, esta elevação também permitia a circulação de ar na parte inferior do chão. Estas habitações não tinham paredes. Na Figura 6 é possível observarem-se os diferentes tipos de construções e diferentes soluções adotadas pelas tribos no continente norte-americano.

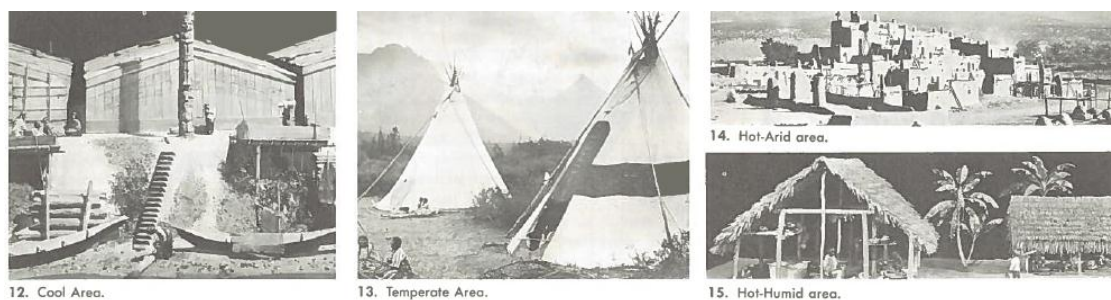


Figura 6 – Exemplo de habitações dos índios nas diferentes zonas climáticas [10], 5

Como se pode verificar através destas construções básicas dos índios norte-americanos, o ser humano possui uma capacidade notável para adaptar as suas habitações às características do meio envolvente de modo a que estas lhe confirmem o conforto e proteção desejadas. Estas diferentes construções e soluções arquitetónicas em função das zonas climáticas resultaram numa arquitetura de carácter regional.

### 3.2. EFEITOS DO CLIMA NO SER HUMANO E ZONA DE CONFORTO

É sabido que o clima tem uma grande influência na energia e na saúde das pessoas, é do senso comum que as condições atmosféricas podem potenciar e estimular a atividade humana, e por outras vezes podem promover um efeito contrário. Também é sabido que em zonas climáticas onde haja uma predominância excessiva de calor ou de frio, a energia que o ser humano possui é diminuída devido ao esforço biológico que o corpo humano realiza para se adaptar a estas condições climáticas mais severas. A influência dos efeitos do clima no ser humano tem sido estudada ao longo dos anos por vários autores, destacam-se aqui dois métodos: o primeiro descreve os efeitos negativos do clima no ser humano, que se manifesta através do *stress*, dores, doenças e morte. O segundo método consiste na definição das condições nas quais a produtividade, saúde, e energia física e mental no ser humano estão em níveis superiores. Ambos os métodos podem ser combinados para demonstrarem relações coincidentes e complementares na busca pelas condições atmosféricas e térmicas desejadas.

Um destes estudos foi realizado por Ellsworth Huntington [11] nos EUA em zonas temperadas, o autor analisou a produtividade de duas fábricas distintas, uma localizada no Connecticut e outra em Pittsburgh, e concluiu que a produtividade é mais baixa nos meses de inverno em ambas as fábricas, e que aumenta gradualmente à medida que os meses de verão se aproximam, mas caso os verões fossem muito quentes verificava-se uma quebra nesta mesma produtividade. O seu valor máximo é atingido nos meses de Outubro e Novembro. Neste mesmo estudo e no mesmo espaço temporal o autor também analisou as condições de saúde dos trabalhadores em duas fábricas distintas, uma localizada no Connecticut e outra na Pensilvânia. Chegando à conclusão que as condições de saúde dos funcionários deterioravam-se nos meses de menor produtividade, demonstrando assim que o clima tem um efeito considerável na atividade e na saúde das pessoas.

Os estudos deste autor provam que os períodos de maior e menor energia no ser humano ocorrem em diferentes alturas e em diferentes zonas climáticas. Nas latitudes superiores o período de maior índice de energia surge entre os meses de Julho a Setembro. Nas latitudes intermédias, este período está associado aos meses de primavera e outono. E nas latitudes mais baixas, nos meses de inverno é que se registam maiores índices de energia e produtividade.

O ambiente físico que rodeia o ser humano é constituído por vários elementos como: luz, som, clima e espaço. Todos estes elementos interagem com o corpo humano, que tanto os pode absorver como pode contrariar os seus efeitos, até atingir o seu equilíbrio biológico, resultando em reações físicas e fisiológicas. É inerente na natureza humana que o ser humano despenda o mínimo possível de energia para se adaptar ao meio ambiente em que se encontra. Quando essa adaptação é alcançada pode-se definir como a sua “zona de conforto”. O principal instrumento para o alcance dos seus requisitos de conforto, foi o abrigo. O abrigo permite melhorar as condições de habitabilidade, filtrando, absorvendo e repelindo os elementos que constituem o ambiente que não são benéficos para a aquisição por parte do ser humano deste conforto desejado. Numa análise mais ampla seriam considerados todas as necessidades fisiológicas do ser humano nesta busca da zona de conforto. Mas apenas será considerado o balanço térmico, uma vez que sem este qualquer definição de conforto seria impossível. Os principais elementos do clima que afetam o conforto humano são: temperatura do ar, radiação, fluxo de ar e humidade. Estes elementos interagem com o corpo do ser humano de uma forma complexa e podem ser quantificados através de uma escala calorífica designada por Temperatura Operativa [ $T_0$ ] que foi desenvolvida por Winslow, Herrington e Gagge [12]. As equações que definem esta escala, Equação 2, combinam a temperatura do ar, radiação e fluxos de ar com o metabolismo do corpo humano, explicando como este absorve os elementos climáticos e como consegue manter uma estabilidade térmica.

$$T_0 = t_s - \frac{M - E \pm S}{K_r + K_c} = \frac{K_r}{K_r + K_c} mrt + \frac{K_c}{K_r + K_c} \left[ \sqrt{\frac{V}{V_0}} t_a - \left( \sqrt{\frac{V}{V_0}} - 1.0 \right) t_s \right] \quad (2)$$

$t_s$  – Temperatura média da pele [°C].

$M$  – Taxa de metabolismo [Cal./m<sup>2</sup>/hr].

$E$  – Perdas de calor por evaporação [Cal./m<sup>2</sup>/hr].

$S$  – Ganhos ou perda de calor corporal [Cal./m<sup>2</sup>/hr].

$K_r$  – Constante de radiação total =  $4.92 \times 10^{-8} \times \text{Área efetiva de radiação do corpo humano em m}^2$ .

$K_c$  – Constante de convecção, que depende do tamanho e da postura do individuo.

$mrt$  – Temperatura média de radiante [°C].

$V$  – Velocidade do ar [cm/s].

$V_0$  – Velocidade padrão pela qual  $K_c$  foi determinado, 7.6cm/s.

$t_a$  – Temperatura bolbo seco.

As relações entre as temperaturas no interior de edifícios sem ar condicionado e as temperaturas exteriores juntamente com a radiação solar, são definidas pelos materiais que constituem o edifício, sobretudo o seu envolvente. A temperatura exterior e a radiação solar seguem um ciclo, no qual a temperatura exterior atinge o seu valor mínimo pouco antes do nascer do sol, aumentando até ao seu máximo que ocorre nas primeiras horas da tarde, decrescendo até ao início do novo ciclo, ou seja, até ao amanhecer. A radiação solar ao incidir sobre as fachadas e coberturas dos edifícios provoca um aumento das temperaturas médias interiores acima das temperaturas médias exteriores. Controlar este efeito que as temperaturas exteriores e a radiação solar causam no interior dos edifícios, face à impossibilidade de controlar as temperaturas exteriores e a radiação solar, é da responsabilidade da arquitetura e da engenharia, recorrendo a soluções construtivas e arquitetónicas a implementar nos edifícios. É importante referir, que é mais fácil controlar o efeito da radiação solar do que o efeito da temperatura exterior nos edifícios. Como foi referido acima, são os materiais que compõem os edifícios que definem as relações entre as temperaturas no exterior e o interior dos edifícios, é portanto necessário conhecer-se as suas propriedades. Segundo [13] existem três propriedades nos materiais que constituem a envolvente do edifício que importam referir: condutância térmica, fluxo de calor através da envolvente do edifício; mudança de temperatura da massa térmica do edifício devido à absorção ou libertação de calor e a absorção ou reflexão da radiação solar incidente.

As escolhas destes materiais e suas respetivas propriedades vão alterar e influenciar os efeitos resultantes das trocas de calor (ganhos e perdas) entre os edifícios e as condições exteriores, os seus cálculos dependem das propriedades térmicas dos materiais, especialmente da sua transmissão térmica. Diferentes metodologias são aplicadas para o cálculo de ganho e de perdas térmicas, devido aos diferentes efeitos de aspetos como a orientação, sombreamento de janelas e cor das diferentes superfícies. Estas trocas de calor manifestam-se através dos seguintes processos [13].

### 3.2.1. PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

**Condução** – É um processo de transferência de calor entre as moléculas que constituem um material sólido, esta transferência ocorre no sentido das moléculas com uma temperatura superior para as moléculas com temperatura inferior. Um material ao ser aquecido desencadeia uma vibração nas suas moléculas, esta vibração é mais forte quanto maior for a temperatura. O fluxo de calor por condução é provocado pela transferência de energia das moléculas com maior vibração para as moléculas com menor vibração que estão a uma temperatura inferior. Deste modo a energia cinética devido à vibração é convertida em transferência de calor. Em edifícios a condução térmica é portanto um processo de transferência de calor através de materiais sólidos, como uma parede ou uma cobertura, da parte mais quente para a parte mais fria do elemento construtivo. A sua taxa depende da condutividade do material e da sua espessura.

**Convecção** – É outro processo de transferência de calor através do movimento de um fluido, na generalidade dos casos o ar. As trocas de calor por convecção ocorrem em várias situações, desde a transferência de calor de uma superfície sólida para o ar que a envolve e vice-versa, até à transferência de calor entre duas superfícies a temperaturas diferentes através do fluxo de ar. Existem dois tipos transferência de calor por convecção: natural que ocorre devido a um diferencial de temperatura, e forçada que é provocada por um fluxo de ar que provém por exemplo do vento ou de uma ventoinha.

A convecção natural ocorre quando o ar está em contato com uma superfície quente, ao aquecer, o ar fica menos denso e sobe, arrefecendo ao entrar em contato com uma superfície mais fria, isto faz com que fique mais denso e desça. Este processo é mais acentuado quando o pavimento é a superfície mais quente e o teto a superfície mais fria e tende a gerar uma estratificação em função da temperatura do espaço onde ocorre. O ar mais quente acumula-se nos estratos mais perto do teto e por oposição o ar menos quente (ou mais frio) encontra-se nos estratos mais pertos do chão formando-se assim camadas de diferentes temperaturas. Este fenómeno é maximizado quando o teto é a superfície mais quente do espaço e o chão a superfície mais fria, normalmente ocorre durante o dia no verão.

A convecção forçada é frequentemente gerada pelo vento na envolvente do edifício ou pelo fluxo de ar no espaço interior do edifício, fluxo este que pode ser provocado por exemplo por ventilação cruzada. A taxa de transferência de calor depende essencialmente da velocidade do ar nas imediações da superfície em questão.

A transferência de calor por convecção em edifícios pode-se manifestar de várias formas.

- Na superfície interior das paredes com o ar interior;
- Entre o teto e o ar subjacente;
- Na superfície exterior das paredes e o ar exterior;
- Entre as superfícies interiores das paredes com caixa-de-ar;
- Em edifícios ventilados;
- Quando existe uma fuga de calor devido a uma fenda ou fissura, numa porta ou janela.

**Radiação** – A transferência de calor por radiação é a energia que é trocada entre superfícies através de ondas eletromagnéticas. Qualquer superfície emite radiação que pode ser considerada por discreta (fotões) ou por ondas com determinado comprimento de onda. A origem da radiação emitida deve-se à vibração das moléculas da superfície do elemento, e é proporcional à potência à quarta da temperatura absoluta da superfície. Devido à perda de energia pela emissão de radiação a temperatura do elemento emissor baixa, a onda eletromagnética percorre o espaço até ser atingir uma superfície opaca, onde uma parte desta radiação é absorvida e outra parte é refletida. A radiação absorvida faz aumentar a vibração das moléculas presentes na superfície do elemento aumentando a sua temperatura. Uma superfície a uma

temperatura superior à temperatura que a rodeia irradia mais energia do que a radiação que recebe das superfícies que a rodeiam. Assim a transferência de calor por radiação parte das superfícies mais quentes para as mais frias.

### 3.2.2. SENSAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO E PARÂMETROS A CONSIDERAR

A Equação (3) define como o corpo humano recebe determinados elementos climáticos. O corpo humano deseja manter uma estabilidade térmica essencialmente regulando os ganhos ou perdas térmicas de forma a proporcionar um equilíbrio metabólico. Este equilíbrio metabólico é expresso pela equação (3).

$$M - E \pm C \pm R = 0 \quad (3)$$

M – Taxa de metabolismo observada.

E – Taxa de arrefecimento sob a forma de perspiração.

C – Taxa de arrefecimento sob a forma de convecção.

R – Radiação.

Mais tarde Fanger [14] definiu a sensação de conforto térmico como “o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico” o seu conceito é de que o conforto térmico deriva de uma equação de balanço térmico que gere o processo termodinâmico das trocas de calor entre o corpo humano e o meio ambiente procurando alcançar um equilíbrio, este equilíbrio origina trocas de energia que englobam três parâmetros: calor produzido pelo corpo humano; o calor transferido para o ambiente e o calor armazenado pelo corpo. Com base neste equilíbrio Fanger definiu a Equação 4.

$$S = M - W - E \pm R \pm C \quad (4)$$

S – Acumulação de calor no corpo [W/m<sup>2</sup>]

M – Taxa de metabolismo.

W – Energia correspondente ao trabalho mecânico realizado.

E – Perdas de calor por evaporação.

R – Trocas de calor por radiação.

C – Trocas de calor por convecção.

Quando o balanço é nulo, ou seja S=0, o indivíduo encontra-se em equilíbrio térmico com o meio ambiente, possuindo uma sensação térmica neutra. Assim, de um ponto de vista puramente fisiológico, pode dizer-se que o conforto térmico corresponde às condições para as quais os mecanismos termorreguladores do corpo humano se encontram num estado de atividade mínima resultando numa sensação de conforto térmico neutra. Esta sensação de conforto térmico depende de parâmetros físicos (ambientais e individuais) e parâmetros psicossociais (factores de carácter sociocultural e psicológico).

### 3.2.2.1. Parâmetros ambientais

A temperatura do ar,  $T_a$  (°C), é forma simplificada de designar a temperatura de bolbo seco do ar, deve ser tida em conta na determinação das trocas de calor por convecção entre o corpo humano e o meio ambiente, de acordo com a ISO 7726 [15] é a temperatura do ar que circula em redor do corpo humano e é expresso em graus Celsius (°C)

Temperatura média radiante,  $T_{mr}$  (°C). É determinada recorrendo a um termómetro de globo negro, segundo ASHRAE 55 [16] este parâmetro é definido como a temperatura uniforme superficial de um compartimento negro que, por sua vez, corresponde à mesma quantidade de calor trocada por radiação por um ocupante no espaço real. O valor retirado diz respeito ao corpo inteiro de um indivíduo e é obtido através da observação simultânea da temperatura do termómetro de globo negro, da temperatura do ar e da velocidade do ar que rodeia o globo negro. Numa linguagem solene, a  $T_{mr}$  é a média ponderada das temperaturas superficiais envolventes do espaço onde se encontra um indivíduo, incluindo ainda o efeito da radiação solar incidente. Numa linguagem coloquial, a temperatura média radiante é uma medida da troca de calor por radiação entre o corpo humano e as superfícies envolventes.

Humidade do ar pode ser expressa em termos relativos ou absolutos. A humidade absoluta ou pressão parcial de vapor de água,  $\rho_v$  (kPa), é um parâmetro fundamental na determinação das perdas de calor por evaporação do corpo humano para o meio ambiente. E pode se determinada é a partir da humidade relativa do ar, HR (%), da temperatura do ar,  $T_a$ , e pressão de saturação,  $\rho_{vs}$  através da Equação 5 segundo [15]

$$\rho_v = \frac{\rho_{vs} \cdot HR}{100} \quad (5)$$

Uma humidade relativa do ar elevada reduz a possibilidade de evaporação superficial do corpo e constitui assim um constrangimento térmico para o indivíduo, principalmente em ambientes com temperatura elevada. A humidade absoluta tem uma influência reduzida na perceção do conforto térmico geral em temperaturas moderadas e em níveis de atividades ligeiras, verificando-se um maior impacto em ambientes com temperaturas mais elevadas.

Velocidade do ar,  $v_a$  (m/s), é definida como o fluxo de ar que intervém na determinação das trocas de calor por convecção e na variação das perdas de calor por evaporação ao nível do corpo humano. A velocidade do ar é uma grandeza definida pela sua intensidade e direção, geralmente difícil de quantificar devido às flutuações rápidas que sofre, quer em termos de intensidade, quer de direção. Este parâmetro pode influenciar tanto a sensação de conforto térmico como a de desconforto térmico localizado [17].

### 3.2.2.2. Parâmetros individuais

Atividade metabólica - a atividade física desenvolvida por um indivíduo pode ser quantificada pela taxa de metabolismo,  $M$  [W/m<sup>2</sup>], que representa a produção de energia obtida pelo organismo através do consumo de alimentos por unidade de tempo (J/s). Esta taxa varia em função da área da superfície corporal, que dever ser considerada de 1.8 m<sup>2</sup> para um adulto, para um idêntico nível de atividade física. Segundo a ASHRAE 55 [16] representa a taxa de transformação de energia química em calor e trabalho mecânico por atividades metabólicas de um indivíduo, por unidade de área superficial da pele. A unidade de referência é o “met”, sendo que 1 met corresponde à energia produzida por uma pessoa sentada em estado de repouso (1 met = 58,2 W/m<sup>2</sup>)

Para a determinação deste parâmetro pode-se consultar tabelas e quadros disponibilizados pela AHSRAE 55 [16] e a ISO 7730 [17]

Vestuário é uma resistência à transferência de calor entre o corpo humano e o meio ambiente que o rodeia, funcionando assim como uma barreira protetora do indivíduo com o intuito de manter o corpo num estado de equilíbrio proporcionando uma sensação térmica neutra desejada. A resistência térmica do vestuário,  $I_{cl}$  [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ] é expressa na unidade (clo) em que 1 clo equivale a  $0.155 m^2 \cdot ^\circ C/W$  o que corresponde a um homem de fato. Os valores para este parâmetro também podem ser consultados nas normas AHSRAE 55 [16] e a ISO 7730 [17].

### 3.2.2.3. Parâmetros Psicossociais

Tal como já foi referido a percepção de conforto térmico depende também de outros parâmetros para além dos seis considerados por Fanger [14]. Estudos posteriores revelaram a importância destes parâmetros de carácter sociocultural e psicológico, na percepção e na resposta a estímulos sensoriais, fruto de vivências térmicas passadas e da expectativa dos utentes relativamente aos espaços que ocupam [18].

Estes parâmetros abrangem diversas características: Demográficas, nomeadamente, o género, a idade e o estatuto económico dos indivíduos; contextuais, como o *design* e tipo de edifício, o clima ou a estação do ano, bem como o condicionamento social; e cognitivas, designadamente, as atitudes, preferências e as expectativas dos indivíduos em relação ao ambiente térmico. Assim, termo genérico “adaptação” considera os mecanismos fisiológicos de aclimação (adaptação fisiológica), a que os ocupantes de espaços interiores estão sujeitos, assim como os processos comportamentais e psicológicos (adaptação psicológica) a que recorrem no sentido de alcançarem um ambiente interior adequado às suas exigências pessoais de satisfação térmica [19].

Estas adaptações procedentes dos indivíduos designam-se como oportunidades adaptativas, podendo distinguir-se três categorias:

- Adaptação física – vestuário, postura, posição relativa no espaço, ingestão de bebidas, abertura de portas e/ou janelas entre outras;
- Adaptação fisiológica – capacidade do organismo se ajustar às condições térmicas;
- Adaptação psicológica – idade, género, cultura, expectativas, experiência.

Estudos que desprezaram a influência destes parâmetros psicossociais na sensação de conforto térmico por parte dos participantes no estudo produziram resultados desfasados da realidade. Assim uma abordagem adaptativa que considera o contexto real dos edifícios e tem em conta estes parâmetros psicossociais dos indivíduos produzirá resultados mais rigorosos na definição das condições de conforto térmico, isto porque num mesmo ambiente climático as opiniões podem ser discrepantes devido a estes parâmetros subjetivos.

### 3.2.3. ZONA DE CONFORTO TÉRMICO

A definição da zona de conforto tem sido alvo de alguma discórdia entre vários autores, e portanto não possível face a divergência de opiniões, definir um critério exato para a sua avaliação. Alguns autores consideraram que a temperatura limite superior é a insolação e a temperatura limite inferior é a temperatura de solidificação, assim a temperatura ideal para o conforto humano estará algures no meio destas temperaturas limites [20].

Experiências em animais na fundação John B. Pierce demonstraram que os animais preferem estar a uma temperatura ambiente de 21.1°C [21]. Outros autores por sua vez afirmam que a temperatura ideal que proporciona o conforto térmico no ser humano, com uma temperatura corporal média de 37°C, se situa algures a meio entre a temperatura mínima que o ser humano consegue suportar, sem um desconforto muito acentuado, e a temperatura máxima a partir da qual os seus sistemas circulatórios e de segregação de suores estariam sujeitos a um esforço considerável para que o ser humano se adaptasse ao calor.

O Departamento Científico Britânico e de Pesquisa Industrial, liderado por Drs. H. M.Vernon e T. Bedford, através das suas pesquisas e estudos com o intuito de definir as condições de conforto ideais, chegaram as seguintes conclusões. Segundo Vernon, a temperatura ideal, em condições de fluxo de ar ligeiro, é de 18.95°C no verão e de 16.7°C no inverno. Enquanto Bedford afirma que a temperatura do ar no interior de um edifício é de 18.2°C no inverno e define que a zona de conforto se situa a uma temperatura compreendida entre os 13.2 e os 23.2°C.

S. F. Markam [20] sugeriu que a gama de valores de temperatura ideal está entre os 15.5 e os 24.5°C com uma humidade relativa ao meio-dia entre os 40 e os 70%. C. E. P. Brooks [22] demonstrou que a zona de conforto britânica está entre os 14.5 e os 21.1°C e que a zona de conforto americana está entre os 20.5 e os 26.7°C. Em relação aos trópicos esta situa-se entre os 23.3 e os 29.4°C com humidades relativas de entre os 30 e os 70%.

A Experimental Building Station da Commonwealth Australiana realizou experiências fisiológicas que sugerem que em certas condições climáticas a temperatura de bolbo seco é um bom indicador para a sensação de calor até ao ponto que o corpo humano começa a transpirar. Cientistas Americanos tentaram estabelecer uma mediação fisiológica combinando os efeitos da temperatura, humidade e fluxo de ar, denominada por escala de temperatura efetiva (TE). Estes definiram que a zona de conforto se situa entre os 30 e os 70% de humidade relativa e que segundo os autores Houghton e Yaglou [23] a temperatura efetiva ótima é de 66° na escala de TE com uma amplitude de 63 até 71° tanto para homens como mulheres no inverno em situação de descanso e normalmente vestidos. Yaglou e Drinker determinaram que 71° na escala TE seria o ponto ótimo com uma amplitude de 66 até 75° para homens no verão em situação de descanso normalmente vestidos. Mais tarde novos estudos de Rowley, Jordan e Snyder [24] afirmaram que a escala TE sobrevaloriza a influência da humidade na sensação de calor e conforto em temperaturas ordinárias e subvaloriza a sua influência em temperaturas mais altas.

Olgyay [10] em colaboração com Yaglou com base em vários estudos realizados representaram num gráfico os efeitos de vários parâmetros que influenciam a sensação de conforto térmico, designando-o por gráfico bioclimático. Este gráfico apenas é válido para zonas temperadas e em edifício de baixa inércia térmica A Figura 7 apresenta o gráfico bioclimático.

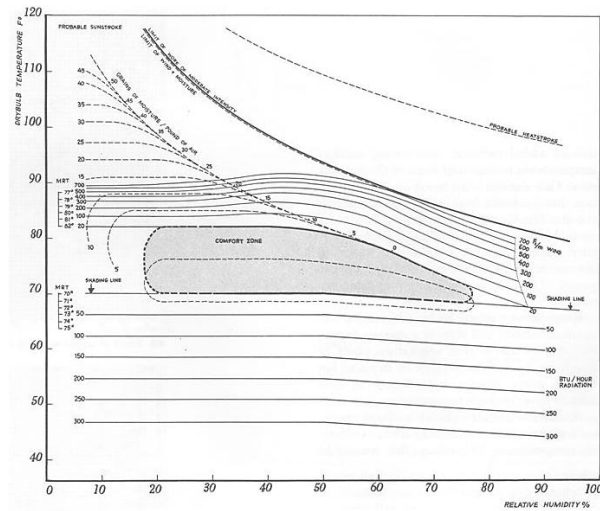


Figura 7 – Gráfico bioclimático de Olgay [10]

A zona de conforto é apresentada no centro do gráfico a sombreado, os parâmetros ambientais exteriores (velocidade do ar, humidade e radiação) são representados através de curvas que indicam os valores corretivos necessários para restabelecer a sensação de conforto em qualquer ponto fora dessa zona.

Mais tarde Givoni [13] com o intuito de corrigir algumas limitações do gráfico bioclimático de Olgay, desenvolveu uma carta bioclimática para edifícios (figura 8) a qual permite estimar as condições de conforto, tendo em conta a constituição do próprio edifício e a sua influência nas condições ambientes interiores. Nesta carta existem duas regiões de conforto térmico, uma para climas temperados e outra para climas quentes.

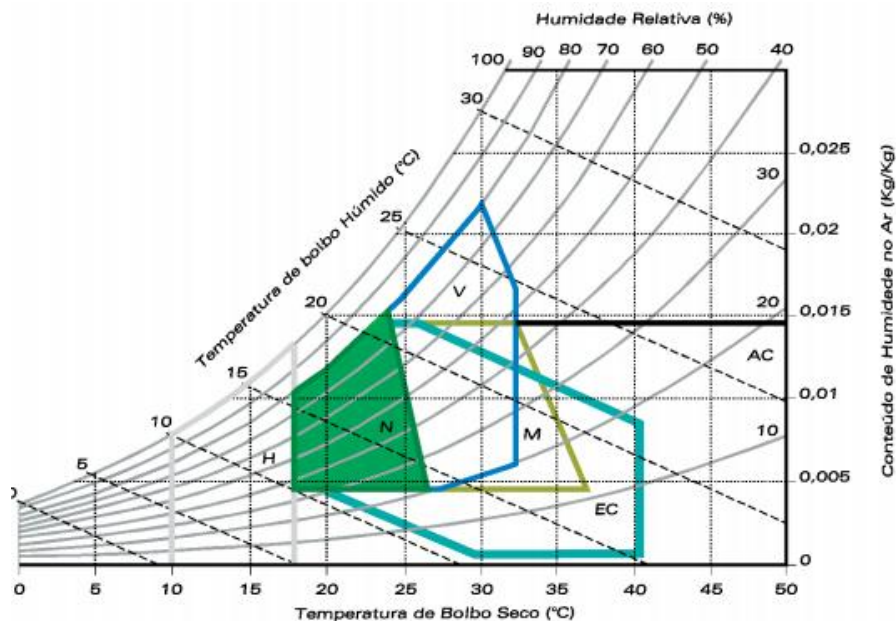


Figura 8 – Carta bioclimática de Givoni [25]

O autor sugere que nas zonas com climas temperados os limites de temperatura do ar, para condições de conforto, se situam entre os 18 e os 25°C no inverno, e entre os 20 e os 27°C no verão. Para pessoas

que vivam em zonas com climas quentes o autor sugere um aumento de 2°C na gama de temperaturas e de 2gr/Kg gama de humidade, por considerar que os habitantes destas zonas climáticas aceitam um aumento destes parâmetros, devido ao contexto social, cultural e a aclimação térmica.

A partir dos anos 70 do século passado foram propostos vários modelos adaptativos baseados em estudos de campo [26]. O primeiro modelo foi proposto por Humphreys [27] com base em 36 estudos de campo realizados em diversos países e por diferentes autores. Nestes estudos foi medida, a temperatura do ar apenas num só ponto do espaço e foram usadas diferentes escalas de sensação térmica nos estudos considerados, para que os utentes dos espaços exprimissem as suas sensações térmicas. Apoiado pelos resultados obtidos, Humphreys determinou uma dependência estatística significativa ( $R=0,96$ ) entre a temperatura de neutralidade térmica,  $T_{neut}$  [°C] e a temperatura média do ar ou de globo interior,  $T_i$ , expressada pela Equação 6.

$$T_{neut} = 2,56 + 0,83 \cdot T_i \quad (6)$$

Uma das conclusões mais importantes da análise de resultados, foi que os utentes consideravam confortável uma gama de temperatura que varia entres os 17 e os 30°C.

Posteriormente, em 1978, Humphreys procurou relacionar a temperatura de neutralidade com as condições exteriores. Descrevendo a temperatura de neutralidade,  $T_{neut}$ , em função da temperatura média exterior,  $T_m$ , quer para edifícios ventilados naturalmente quer para edifícios climatizados, através das Equações 7 e 8.

$$\text{Edifício não climatizado} \quad T_{neut} = 11,9 + 0,534 \cdot T_m \quad (7)$$

$$\text{Edifício climatizado} \quad T_{neut} = 23,9 + 0,295 \cdot (T_m - 22) \left[ \frac{(T_m - 22)}{33,94^2} \right] \quad (8)$$

Em 1981 Auliciems obteve uma nova base de dados constituída por 53 estudos. Com base neste novo conjunto de dados, obteve uma nova regressão linear, válida para edifícios climatizados e não climatizados, para temperaturas entre 18 e 28°C [28].

Humphreys e Nicol em 1995 desenvolveram um algoritmo adaptativo para controlo de temperatura em edifícios de escritórios no Reino Unido, similar ao desenvolvido por Auliciems, no qual consideram que a temperatura de conforto num ambiente interior depende da correspondente temperatura exterior no momento, e da temperatura dos dias mais recentes.

Até ao momento, o mais amplo projeto dedicado ao desenvolvimento de um modelo adaptativo, designado por ASHRAE RP 884, foi realizado por de Dear, Bragger e Cooper, em 1997 [19]. Este modelo foi desenvolvido com base em medições efetuadas em 160 edifícios, na grande maioria escritórios (21 000 dados), em oito países dos cinco continentes.

As principais variáveis subjetivas analisadas foram a neutralidade térmica (derivada dos votos de sensação térmica dos inquiridos) e a temperatura de preferência (estimada dos votos de preferência térmica).

Das múltiplas análises executadas ao mencionado projeto destacam-se os principais pontos:

- O valor da temperatura de neutralidade expresso pelos utentes dos espaços estudados foi idêntico para edifícios climatizados e não climatizados, sendo 23,5 e 22,5°C, respectivamente, para a estação de Verão e de Inverno;
- A gama de temperatura de preferência situa-se entre 21 e 27°C;
- A diferença verificada entre os valores determinados das temperaturas de neutralidade e de preferência (discrepância semântica), para um mesmo ambiente térmico foi mais expressiva em edifícios climatizados;
- A correlação linear significativa estabelecida entre a referida discrepância e a temperatura exterior para os edifícios climatizados, demonstrou que para temperaturas exteriores inferiores a 13,6°C a temperatura preferida é superior a temperatura de neutralidade, e acima do referido valor a situação inverte-se;
- A comparação do modelo adaptativo desenvolvido neste projeto com o modelo analítico de Fanger demonstrou uma boa relação, no caso dos edifícios climatizados contrariamente, no caso dos edifícios não climatizados as condições de conforto térmico especificadas pelos dois modelos divergem significativamente, verificando-se que a gama de temperatura de conforto térmico é cerca do dobro da correspondente, obtido com índice Predicted Mean Vote (PMV).

Tal como nos modelos desenvolvidos previamente, também neste projeto foram apresentadas relações entre as temperaturas interiores,  $T_{oc}$  [°C] (temperatura operativa de conforto) e exterior, sendo, o clima exterior expresso através da temperatura efetiva média exterior,  $ET_{ext}$ . Para edifícios não climatizados, onde os seus ocupantes possuem várias oportunidades adaptativas, a regressão linear apresentada tem a seguinte forma expressa pela Equação 9.

$$T_{oc} = 18,9 + 0,225 \cdot ET_{ext} \quad (9)$$

Mais tarde em 2001, com base no modelo anterior válido para edifícios não climatizados, Brager e de Dear reformularam a equação (9) de modo a que a temperatura de conforto fosse expressa em função da temperatura exterior média mensal,  $T_{pma_{out}}$ , em substituição de  $ET_{ext}$ , visto ser um parâmetro de mais fácil obtenção. Resultando na Equação 10 que tem a seguinte forma:

$$T_{oc} = 17,8 + 0,31 \cdot T_{pma_{out}} \quad (10)$$

Este modelo constitui, atualmente, o método opcional para a determinação de condições térmicas aceitáveis em espaços não condicionados, constante da norma ASHRAE 55:2013 [16]

Muitos outros estudos foram realizados no âmbito do tema ao longo do tempo, em diversos locais e condições diferentes, usando outros índices, aumentando consideravelmente as base de dados de informação sobre o tema, chegando os autores a outras expressões e/ou regressões algorítmicas, acrescentando valor e conhecimento.

### 3.2.4. NORMALIZAÇÃO

Com base nos modelos fisiológicos (de balanço térmico do corpo humano) atrás descritos e em diversos estudos efetuados com pessoas em ambientes térmicos controlados, foram desenvolvidas duas normas, com grande reconhecimento a nível internacional e atualmente em vigor, nomeadamente, a ASHRAE 55 e a EN ISO 7730

#### ASHRAE-55:2013

A norma ASHRAE-55, atualmente em vigor, desenvolvida pela American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE), especifica as condições de conforto térmico para as quais, pelo menos 80 % dos ocupantes com actividades sedentárias ( $\leq 1,2$  met) consideram o ambiente termicamente aceitável, é orientada para o projeto de edifícios ou espaços ocupados e seus sistemas de climatização e, ainda, para a avaliação de ambientes térmicos. A norma indica três métodos para especificar as condições de conforto térmico em modelos adaptativos

Nesta dissertação considerou-se analisar apenas o terceiro método, por ser o mais indicado para espaços condicionados naturalmente, visto enquadrar-se no âmbito do caso de estudo. Este método define que os utilizadores do espaço podem livremente adaptar o vestuário às condições climáticas exteriores e interiores do edifício, é limitado a uma temperatura média mensal compreendida entre os 10 e 33,5°C, a taxa de metabolismo dos ocupantes deve situar-se entre 1,0 a 1,3 met, a resistência térmica do vestuário não pode ser inferior a 0,5 clo e superior a 1 clo e os espaços não podem possuir qualquer sistema mecânico de refrigeração. Também é importante referir que o método baseia-se no modelo adaptativo atrás descrito (equação 10) e é apresentado sob a forma gráfica na Figura 9.

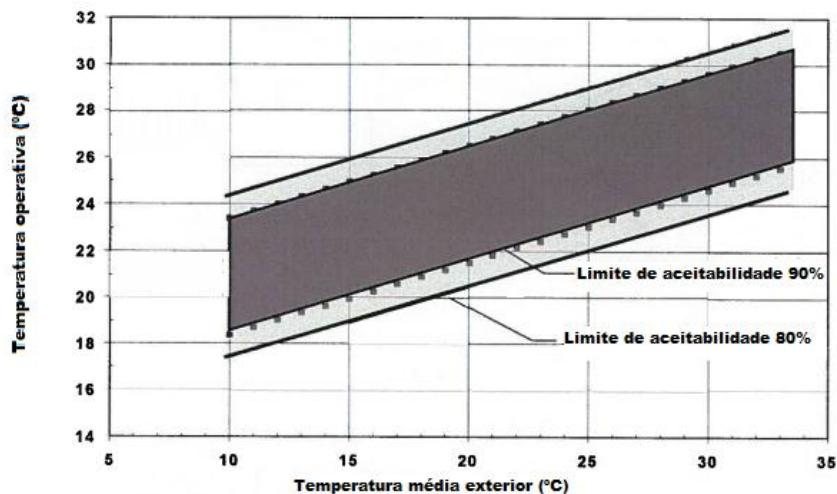


Figura 9 – Gammas de temperatura operativa aceitáveis em edifícios naturalmente condicionados, adaptado de [16]

Estas gamas de temperaturas são obtidas através de relações entre a temperatura operativa e temperatura média exterior e resultam das expressões expostas no Quadro 8, permite verificar se os valores da temperatura operativa (equação 10) e da temperatura média mensal exterior estão dentro das condições ambientais aceitáveis para 80% ou 90% dos ocupantes.

Quadro 8 – Equações dos limites da aceitabilidade

	Limite máximo	Limite mínimo
80%	$0,31\overline{t_{pm_{out}}} + 21,3$	$0,31\overline{t_{pm_{out}}} + 14,3$
90%	$0,31\overline{t_{pm_{out}}} + 20,3$	$0,31\overline{t_{pm_{out}}} + 15,3$

\*os limites de 90% de aceitabilidade são definidos a título adicional

Recentemente, em 2007, foi também aprovada a norma europeia EN 15251 na qual, se adoptam as recomendações especificadas na EN ISO 7730 para edifícios climatizados, e um modelo adaptativo para edifícios não climatizados.

### EN 15251

Esta norma [29] propõe um método adaptativo para a definição das condições aceitáveis de conforto térmico na versão final da norma europeia o método adaptativo sugere um outro modelo de avaliação utilizando igualmente a temperatura operativa, no entanto, correlacionando-o com a temperatura exterior exponencialmente ponderada,  $T_{mp}$ . Como demonstra a Equação 11.

$$T_{mp} = \frac{T_{n-1} + 0,8.T_{n-2} + 0,6.T_{n-3} + 0,5.T_{n-4} + 0,4.T_{n-5} + 0,3.T_{n-6} + 0,2.T_{n-7}}{3,8} \quad (11)$$

$T_{n-1}$  – Temperatura média exterior do dia i anterior

Segundo com a Equação 11, a temperatura exterior exponencialmente ponderada considera os últimos 7 dias relativamente ao dia em análise, atribuindo diferentes pesos a cada dia.

Este modelo é aplicado em edifícios sem sistemas mecânicos de arrefecimento, com presença de pessoas com atividades sedentárias, em que demonstram facilidade de adaptação às condições ambientais, por exemplo, adaptar o vestuário e/ou adotar procedimentos que condicionem o meio ambiente (abrir janelas ou portas). A norma consente que o edifício esteja provido de ar condicionado, no entanto, realça que deverá ser através da abertura e fecho das janelas o principal meio de controlo das condições térmicas. A Figura 10 indica os limites inferiores e superiores de aceitabilidade para as diferentes categorias na estação de arrefecimento.

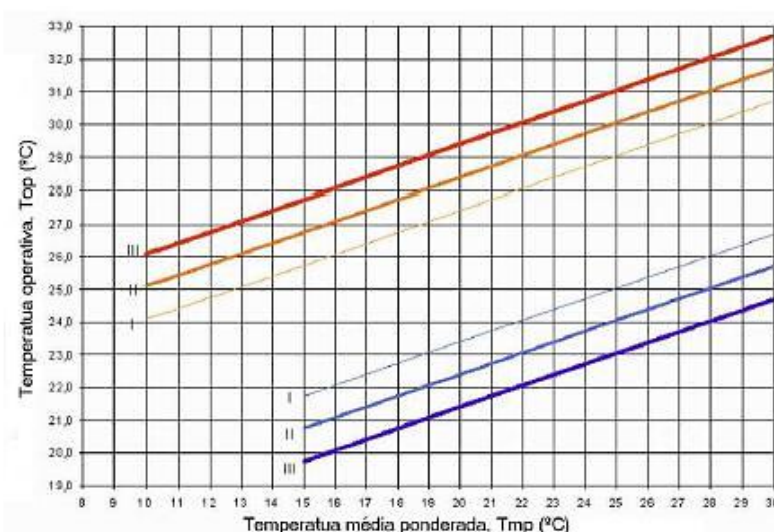


Figura 10 - Valores bases de temperaturas operativas interiores para edifícios não climatizados, Figura de [26]

### 3.3. TÉCNICAS PASSIVAS DE ARREFECIMENTO E DESCRIÇÃO

As alterações climáticas no planeta são consideradas um dos grandes desafios que as sociedades estão sujeitas, devido ao potencial dos seus impactos no meio ambiente com consequências diretas na população, fauna e flora. O CO<sub>2</sub> é dos gases que originam o efeito estufa, que resulta do consumo de combustíveis fósseis. Estima-se que 40% da energia total consumida na dimensão planetária é consumida por edifícios e que estes contribuem em mais de 40% nas emissões deste gás [30]. Além disto, os edifícios são responsáveis por 30% do consumo de eletricidade a nível mundial, este consumo eléctrico provém dos sistemas ativos de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) que representam mais de 60% dos consumos energéticos dos edifícios e que são fornecidos através de combustíveis fósseis. Por outro lado os sistemas de arrefecimento passivo abrem a porta a uma alternativa mais viável e sustentável, que visam reduzir tanto os consumos energéticos como a emissão de gases responsáveis pelos efeitos de estufa.

É sobre estes sistemas passivos, que o presente ponto pretende enunciar e explicar o seu funcionamento. Em termos gerais pode-se dividir as técnicas de arrefecimento passivo em três categorias principais: ventilação natural; arrefecimento evaporativo e arrefecimento através do solo.

As técnicas passivas de arrefecimento são um aspecto integral nas diretrizes para a conceção de edifícios em zonas climáticas quentes. O arrefecimento de um edifício usando técnicas passivas pode ser materializado através de vários dissipadores naturais de calor como o ar, a atmosfera superior e o solo. Estas técnicas de arrefecimento incluem [13] :

- Ventilação de conforto que fornece um conforto direto aos ocupantes do edifício através da ventilação, sobretudo em horário diurno;
- Ventilação noturna que tem um efeito de reduzir a temperatura interior do edifício durante o dia;
- Arrefecimento por radiação, aproveitando o comprimento de onda da radiação noturna para o céu;
- Arrefecimento direto não mecânico, evaporação do ar proveniente da ventilação, por exemplo torres de arrefecimento;
- Indireta, arrefecimento evaporativo do edifício através coberturas com água ou paredes condutoras molhadas e impermeabilizadas;
- Arrefecimento através do solo, utilização do solo como uma fonte de arrefecimento de um edifício.

Algumas destas técnicas tem efeitos imediatos quando estão em funcionamento, tal como a ventilação de conforto e o arrefecimento directo por evaporação. Outras não produzem o efeito desejado com a mesma rapidez, como é o caso arrefecimento por ventilação noturna e por radiação. Nestes casos a energia de arrefecimento é obtida durante o período noturno e fica armazenada , na maioria dos casos na massa estrutural do edifício. Esta massa estrutural arrefecida, irá funcionar como dissipador natural de calor no dia seguinte, absorvendo o calor gerado no interior do edifício durante o dia. Um solo frio ou uma cobertura com água podem suavizar ondas de calor periódicas provenientes de um aumento de temperatura anormal para a altura do ano ao longo de alguns dias.

A aplicação de um determinada técnica de arrefecimento depende do tipo de edifício e do tipo de clima. Os limites das condições climáticas sob as quais as técnicas de arrefecimento podem ser aplicadas estão relacionadas com as expectativas de conforto requeridas por parte das populações e podem não ser idênticas em todos os países. Pessoas que vivem em zonas climáticas quentes podem tolerar temperaturas mais altas até experienciam sensações de desconforto, devido ao fenómeno de aclimatização por comparação com pessoas que vivem em zonas climáticas frias.

### 3.3.1. EXPLICAÇÃO DAS TÉCNICAS E ASSOCIAÇÃO À LITERATURA SELECIONADA

#### 3.3.1.1. Ventilação de conforto diurna

O fluxo de ar proveniente do exterior de um edifício com uma determinada velocidade, amplia o limite superior da zona de conforto para além do limite em condição de ar em repouso no interior, e pode produzir um efeito direto fisiológico de arrefecimento. Esta situação verifica-se normalmente em período diurno quando por exemplo, se abre uma janela. Assim a ventilação durante o dia pode ser definida como ventilação de conforto direto, sobretudo em casos quando esta ventilação faz baixar a temperatura no interior do edifício, em que esta é superior à temperatura exterior nos casos de edifícios sem qualquer tipo de ventilação natural. A ventilação cruzada durante o dia faz com que a temperatura interior do ar, acompanhada por um aumento da velocidade do ar interior, tenda a aproximar-se da temperatura exterior do ar. Assim o limite de conforto da temperatura devido à aplicação da ventilação de conforto é o limite de conforto da velocidade do ar, em qualquer região ou estação do ano. Assumindo-se uma velocidade do ar no interior de 1,5-2,0 m/s, a ventilação de conforto é aplicável em regiões e estações do ano em que a temperatura exterior não exceda o intervalo compreendido entre os 28-32°C, embora dependa da aclimatização e das expectativas de conforto da população. No artigo id. 27, um estudo realizado em três cidades, localizadas no clima compósito da Índia. O estudo afirma que a ventilação natural é a melhor técnica passiva de arrefecimento para a melhoria de conforto, valores entre 24-30% e que a ventilação natural proporciona conforto térmico em 50% do ano nos locais considerados. A Figura 11 ilustra a ventilação de conforto.

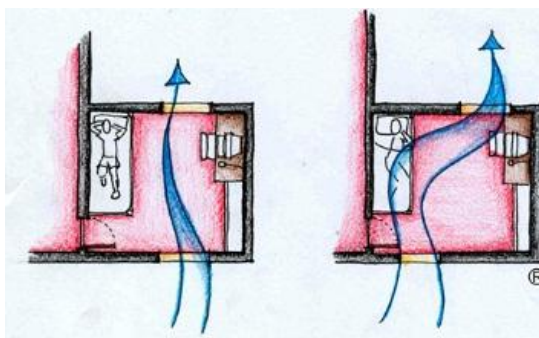


Figura 11 – Ventilação de conforto – janelas [31]

#### 3.3.1.2. Ventilação noturna

Quando um edifício de grande massa isolado termicamente é ventilado durante a noite, a sua massa estrutural é arrefecida por convecção a partir do interior, fazendo um *bypass* da resistência térmica da envolvente do edifício. Durante o dia estes elementos arrefecidos podem servir como dissipadores de calor, se a massa tiver uma área suficientemente grande e estiver adequadamente isolada do exterior. Esta massa irá absorver o calor gerado no interior do edifício que estará em contato com a sua superfície por radiação e por convecção natural, reduzindo desta forma o ritmo do aumento de temperatura no interior do edifício. Para se verificar este efeito, o edifício deverá estar fechado (sem ventilação) durante o dia, de modo a impedir que o ar mais quente no exterior aqueça o interior do edifício. Como resultado a temperatura interior do edifício será consideravelmente mais baixa que a temperatura exterior e também mais baixa do que a temperatura de um edifício similar que não seja ventilado em período noturno. Sob o ponto de vista climático a ventilação noturna é preferível à ventilação de conforto em regiões onde as temperaturas diurnas no verão estão acima do limite superior da zona de conforto, com uma velocidade interior do ar de 1,5 m/s.

Esta técnica deve ser aplicada em regiões com uma amplitude térmica diurna de superior a 15°C, em particular em regiões em que a temperatura durante o dia se situa entre os 32 e os 36°C e a temperatura noturna é inferior a 20°C [13]. A Figura 12 apresenta um esquema e um exemplo de ventilação noturna com inércia térmica alta.



Figura 12 – Ventilação noturna com inércia térmica alta [31]

As torres de vento são uma das técnicas de arrefecimento passivo em edifícios, consideradas nos artigos id 2 [32], 3 [1], 4 [33], 11 [34], 16 [35]. São abordados vários casos de estudo de diferentes autores em diferentes localizações e climas, com o intuito de avaliar a qualidade do ar interior e o conforto térmico, também apresentam alterações à conceção das torres de vento fazendo uma comparação com as torres de vento tradicionais, para que se possa obter uma performance de arrefecimento superior. Um dos estudos citado no artigo id 2 foi avaliada a performance de uma torre de vento comercial num edifício de escritórios no Reino Unido, o estudo revelou que o edifício baixou a sua temperatura interior em 4°C devido á ventilação noturna. Por sua vez, outro estudo citado no artigo, afirma que a ventilação noturna fez descer a temperatura interior do edifício de manhã em 1°C, e revelando que é uma técnica benéfica mesmo em edifícios com pouca massa térmica. Os autores destes estudos utilizaram dois tipos métodos; experimental onde se incluem modelos à escala real e modelos em laboratório; e modelos teóricos e analíticos recorrendo ao uso de *software* apropriado. No artigo id 4 os autores comparam os resultados obtidos entre os modelos teóricos e o modelo real, afirmando que as diferenças são apenas de 7%.

Os resultados apresentados indicam que as torres de vento são uma boa solução de arrefecimento passivo e geralmente proporcionam níveis de conforto térmico satisfatórios, e que a ventilação noturna é eficiente em zona temperadas e frias, artigo id 7 [36], combinadas com outras técnicas associadas à envolvente do edifício como por exemplo as coberturas frias. Enquanto em zonas climáticas quentes por si só não chega, sendo necessário recorrer a outras técnicas associadas às torres de vento, como arrefecimento por evaporação, permutadores de calor e sistemas de transferência de calor. A eficiência desta técnica depende das condições climáticas, microclima e das características do edifício, como a massa térmica, ganhos térmicos e fluxos de ar, artigo id 16 e 19 [37], no primeiro foram realizadas experiências em células de teste como o intuito de analisar os resultados da ventilação noturna combinada com isolamento na cobertura, em ambos os casos ocorreu redução da temperatura interior. Neste mesmo artigo também é referido um caso de estudo, num edifício de escritórios, no norte da China em que recorrendo ao *software* EnergyPlus verificou-se uma descida da temperatura radiante no interior diminuiu 3,9°C, chegando os autores à conclusão que a utilização destes sistemas de arrefecimento podem diminuir o consumo energético dos edifícios em cerca de 70% quando comparados com os sistemas de ar condicionado. Outros estudos, artigo id 11, fazem uma análise económica e energética da ventilação noturna e das torres de vento combinadas com técnicas ativas, afirmando que o coeficiente de performance dos equipamentos mecânicos melhora quando combinados com as técnicas passivas.

Num outro estudo realizado no clima tropical húmido da Malásia, artigo id 18 [38], foi feita uma comparação, em duas moradias similares, entre os efeitos da ventilação noturna e a ventilação diurna, os resultados demonstram que o uso de ventilação noturna fez baixar a temperatura de pico no interior em 2,5°C e que reduziu a temperatura noturna interior em média 2,0°C. Em contrapartida é referido que quando se consideram as perdas de calor por partes dos ocupantes através de evaporação, a ventilação noturna não é melhor opção devido a uma humidade relativa alta. A Figura 13 demonstra o funcionamento, e exemplos da aplicação de uma torre de vento.



Figura 13 – Torre de vento [31]

### 3.3.1.3. Arrefecimento por radiação

Uma superfície comum que “vê” o céu perde calor através da emissão de radiação de comprimento de onda grande, e poderá ser considerada como um radiador de calor. Embora as perdas de calor ocorram durante o dia e noite, o balanço radiante é apenas negativo durante a noite. Ao longo do dia a radiação solar absorvida contraria o efeito de arrefecimento proveniente da emissão de onda longa e produz no total um ganho de calor. As coberturas normalmente são isoladas de forma a minimizarem as perdas de calor no inverno e os ganhos no verão. Quando as perdas de calor ocorrem por radiação na superfície exterior da cobertura, o isolamento minimiza o arrefecimento que um edifício poderia ter pela radiação noturna, exceto se forem aplicadas soluções especializadas (sistemas de arrefecimento por radiação). O esquema e um exemplo desta técnica são representados na Figura 14.



Figura 14 – Arrefecimento por radiação [31]

As coberturas frias são outra técnica de arrefecimento passivo em edifícios com o objetivo de proporcionar o desejado conforto térmico aos utilizadores dos edifícios. Estas coberturas são caracterizadas por terem uma refletância solar e emissividade de infravermelhos altos como é referido nos artigos id 5 [39], 7 [36], 8 [40], 9 [41] e 10 [42]. Nos dois primeiros, realizados em cidades francesas, é abordado o impacto de coberturas frias na temperatura interior os autores afirmam que o seu efeito

médio é reduzido, mas que em temperaturas exteriores mais elevadas o seu efeito não deve ser ignorado se as coberturas forem isoladas. A Figura 15 exemplifica uma destas coberturas frias.



Figura 15 – Exemplo de cobertura fria [39]

Em relação aos artigos id 8 [40] e 9 [41] em que são analisados os efeitos térmicos devido a um tipo de telha inovadora, num edifício residencial em Itália monitorizado durante dois anos. Os autores do primeiro afirmam que há um decréscimo em média de 2°C na temperatura operativa nos meses de Junho a Agosto, porém no artigo id 9 os autores revelam que este decréscimo pode ir até aos 3°C.

Outro estudo também em Itália, artigo id 22 [43], resulta da aplicação de revestimentos de tons claros na cobertura que originam uma descida da temperatura na superfície da cobertura em 20°C e de 2,3°C na temperatura operativa interior, registando-se uma poupança de 54% no consumo energético para efeito de arrefecimento. O mesmo tema é abordado no artigo id 10 [42] mas desta vez aplicado a um edifício histórico, em que para além da solução de cobertura fria também são analisados os consumos energéticos antes e depois da aplicação das técnicas de arrefecimento. Na Figura 16 pode-se ver uma perspetiva edifício e um esquema do tipo de telha a aplicar.

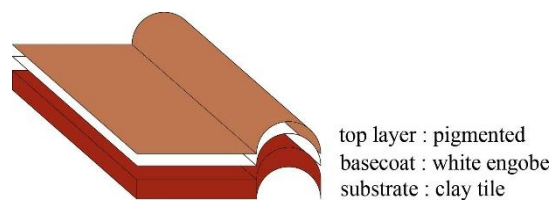


Figura 16 – Edifício em Itália e telha a aplicar [42]

No artigo id 7 [36] os autores afirmam que a combinação da técnica de coberturas frias com a ventilação natural noturna aumenta o potencial de arrefecimento no interior do edifício, no entanto pode aumentar o consumo energético no período de aquecimento.

Em relação a fachadas com alta refletância o artigo id 6 [44] faz uma comparação entre fachadas que foram submetidas à aplicação de uma pintura refletante por oposição a uma tinta normal, os autores concluíram que a temperatura interior pode ser mitigada em 10%.

Uma análise dos benefícios das fachadas ventiladas duplamente envidraçadas, é referido no artigo id 20 [45], estas fachadas são concebidas de modo a recolherem e emitirem a radiação solar absorvida, geralmente aplicado em edifícios comerciais, dispositivos de sombreamento (persianas) e a introdução de plantas também são consideradas. Os diferentes tipos de fachadas ventiladas duplamente envidraçadas então representados na Figura 17.

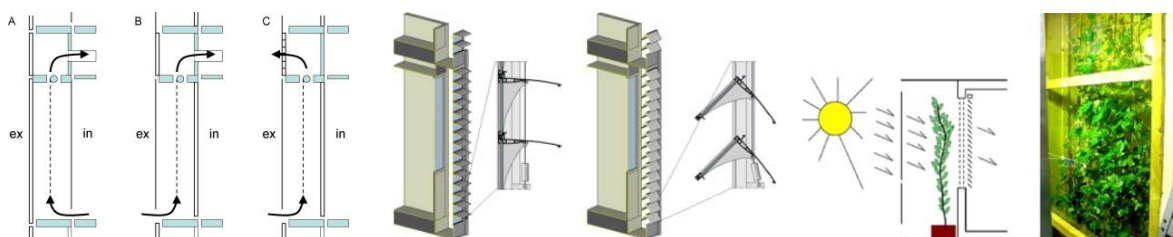


Figura 17 – Tipos de fachadas ventiladas [45]

As coberturas frias são também abordadas, entre outros elementos constituintes dos edifícios (paredes, portas, janelas e outros tipo de coberturas), no artigo id 14 [46], onde se registam a refletância solar, emissão de infravermelhos e temperatura dos tipos de superfície das coberturas. Este tipo de coberturas está representado no esquema da Figura 18.

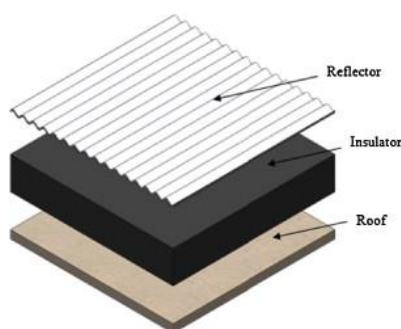


Figura 18 - Esquema de cobertura com barreira de transmissão de radiação [46]

O artigo id 23 [47] faz uma análise ao arrefecimento em edifícios de habitação em climas quentes e húmidos, considerando vários parâmetros como: orientação; geometria do edifício; áreas das janelas; cor das fachadas; tipos de sombreamento; massa térmica e valores de U nas superfícies opacas.

Por fim o artigo id 25 [48] faz investigação de todo o processo (produto e performance) de moradias sustentáveis unifamiliares, ventiladas naturalmente, sob a perspetiva dos utilizadores no que diz respeito ao conforto térmico no clima subtropical da Austrália.

#### 3.3.1.4. Torres de arrefecimento evaporativo

Existem dois tipos de torres de arrefecimento passivo que produzem um fluxo de ar arrefecido. A torre “Arizona” desenvolvida por Cunningham e Thompson e a torre “Shower” criada por Givoni. Cunningham e Thompson desenvolveram e testaram durante dois dias, uma torre de arrefecimento evaporativo do ar, acoplada a um edifício em Tucson, Arizona. O sistema consistia numa torre descendente em que no topo foram colocados painéis de celulose molhados com tratamento anti-

apodrecimento. A água aplicada aos painéis no topo, era recolhida na parte inferior e novamente distribuída para o topo através de um sistema de bombagem. Na parte oposta do edifício situava-se uma chaminé solar de forma a acelerar o fluxo de ar entre a torre de arrefecimento e o edifício. Os resultados obtidos foram significativos, quando a temperatura exterior máxima foi de 40,6°C e a temperatura de bolbo húmido de 21,6°C, a temperatura do ar de admissão ao edifício pela torre foi de 23,9°C. O esquema e a identificação das componentes desta técnica estão representados na Figura 19.

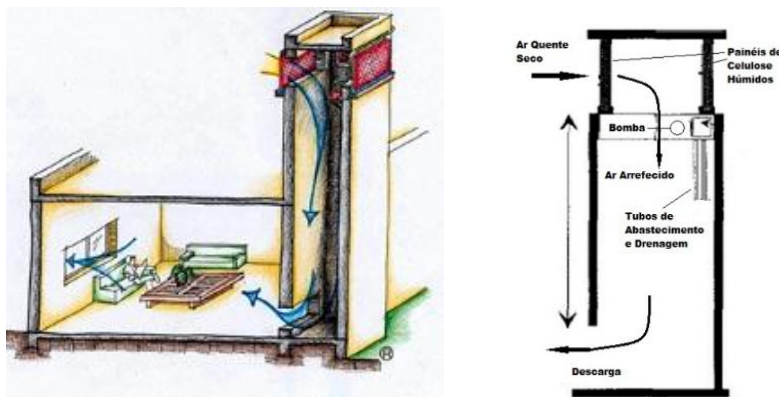


Figura 19 – Torre de arrefecimento evaporativo [31]

A torre “shower” desenvolvida por Givoni, foi apresentada na EXPO 92 em Sevilha, consiste na queda de gotículas de água que caem do topo da torre para a base, a água então é recolhida num pequeno lago situado na parte inferior da torre e é bombeada ciclicamente para o topo, repetindo-se o processo. A queda da água provoca um fluxo de ar descendente que sai pela base da torre. A evaporação das gotículas arrefece o ar para uma zona aproximada da temperatura de bolbo húmido do espaço. Uma das vantagens deste sistema é que funciona com todo o tipo de água, incluindo água salgada. Um estudo realizado por Al-Hemiddi [49] na Arábia Saudita afirma que para uma temperatura exterior de 44°C foi possível, recorrendo ao uso deste sistemas, manter a temperatura interior do espaço abaixo do 28°C, demonstrando que este sistema é eficiente mesmo em condições climáticas extremas. O protótipo da torre “shower” está representado na Figura 20.

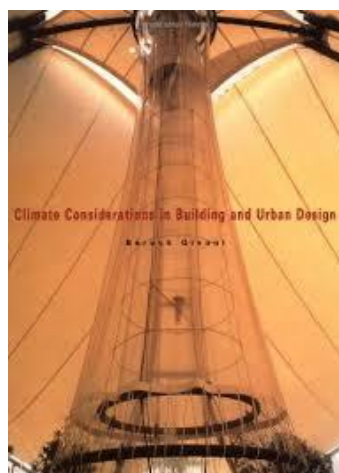


Figura 20 – Torre “Shower” [13]

O arrefecimento evaporativo é referido no artigo id 2 [32] em vários estudos realizados, e indica que a técnica de arrefecimento evaporativo associada às torres de vento pode reduzir a temperatura interior

até aos 18,6°C, embora seja apenas eficiente em zona climáticas quentes e secas. No artigo id 27 [50] os autores afirmam que o arrefecimento evaporativo através das torres de arrefecimento só é efetivo se a temperatura de bolbo húmido no verão for 21°C e a temperatura de bolbo seco 37,5°C.

### 3.3.1.5. Arrefecimento evaporativo indireto

Em vez do arrefecimento através da evaporação do ar com a introdução de vapor na atmosfera do ambiente interior, é possível arrefecer o ambiente interior por evaporação através de uma cobertura ou de uma parede. Estas coberturas albergam um pequeno lago ou até mesmo uma piscina, preferencialmente sombreados. Em relação às paredes, designadas por paredes de água, o sistema consiste em molhar paredes impermeáveis através da circulação de água na sua superfície exterior. Os artigos id 14 [46] e 24 [51] abordam este tipo de coberturas, no primeiro é referido que estas coberturas são apropriadas para climas tropicais e que podem reduzir a temperatura do espaço interior até 20°C. Já o artigo id 24 [51] realça que estas coberturas são indicadas para climas áridos e secos. Ambos fazem referência a outro tipo de cobertura, as coberturas verdes. As coberturas verdes como o nome sugere, apresentam no topo da cobertura uma camada de vegetação, que pode ser de vários tipos e de diferentes dimensões, a sua eficácia é alta em climas frios, por isso os autores sugerem novos estudo que comprovem a sua eficiência em climas quentes e secos. Este tipo de cobertura não só reflete a radiação solar como funciona como uma camada extra de isolamento. Os autores citam um estudo realizado em Toronto no Canadá em que os ganhos térmicos médios (verão) e as perdas térmicas (inverno) foram reduzidas em 70-90% e 10-30% respetivamente. A Figura 21 apresenta duas ilustrações e um exemplo de arrefecimento evaporativo indireto.



Figura 21 – Água na cobertura e cobertura verde [31]

Por sua vez o artigo id 15 [52] faz uma comparação energética entre os diferentes tipos de coberturas verdes, coberturas tradicionais e coberturas frias em diferentes cidades (Barcelona, Palermo e Cairo). Os resultados demonstram que a cobertura fria é a solução mais eficiente no que respeita à poupança energética para as zonas do centro e o sul da bacia do mediterrâneo, enquanto a performance das coberturas verdes depende muito da disponibilidade de água. Os resultados finais são apresentados na Figura 22.

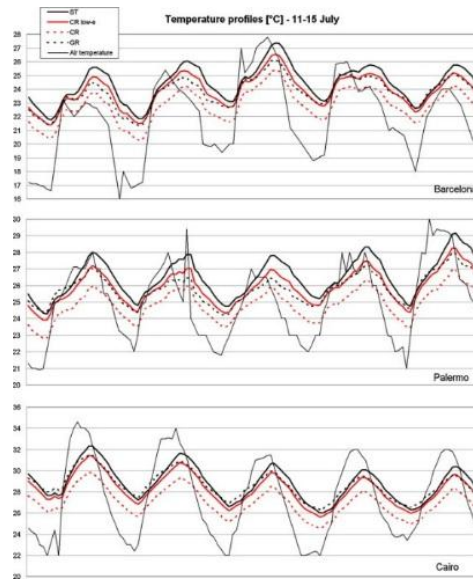


Figura 22 – Temperatura interior em casas não isoladas, em 3 cidades com diferentes tipos de coberturas [52]

O artigo id 13 [53] faz uma análise à literatura existente sobre os potenciais benéficos que as coberturas verdes têm no consumo energético dos edifícios indicando que este tipo de coberturas podem reduzir significativamente este consumo, tanto no verão como no inverno, principalmente em edifícios com coberturas com um fraco isolamento térmico, é citados um estudo em Atenas na Grécia onde estas poupanças ser na ordem dos 31-41% em coberturas não isoladas e apenas de 2% em coberturas bem isoladas. Por isso os autores realçam que os edifícios modernos que estão ou serão contruídos no Reino Unido de acordo com as regulamentações existente terão valores de transmissão térmica mais elevados associados a um melhor isolamento térmico nas coberturas, e por conseguinte as poupanças energéticas não serão consideráveis.

Em relação ao artigo id 26 [54] é feita uma estimativa, recorrendo ao EnergyPlus, das cargas de arrefecimento e aquecimento num edifício também em Atenas, e os resultados apontam para uma redução da carga de arrefecimento de 19,1% e uma redução de 11,4% na carga de aquecimento ao longo de um ano.

No que respeita a paredes de água, o seu conceito consiste em que o pano exterior contenha um material impermeável com condutividade térmica alta, como betão pesado ou aço galvanizado. A água flui sobre a superfície externa num circuito fechado, produzindo o arrefecimento por evaporação naquela superfície. A superfície interna da parede funcionará como elemento de arrefecimento para o espaço que está em contato direto com ela, o calor do espaço interior é transferido por convecção e radiação para a superfície interna da parede sendo posteriormente transferido por convecção para a superfície externa molhada. Este tipo de parede é referida no artigo 16 [35] onde são citados estudos e testes efetuados com diferentes sistemas de pulverização, e afirmam que quando a parede é pulverizada com água a temperatura na caixa-de-ar baixa 10°C por comparação à parede tradicional, permitindo reduzir a temperatura em 5°C.

Outros sistemas indiretos de arrefecimento evaporativo também são abordados no artigo id 16 [35], onde normalmente estes sistemas tem incorporados um permutador de calor ar-ar que retira o calor do ar sem adicionar humidade ao mesmo. Estudos apontam para uma eficiência na ordem dos 75%, e uma poupança de 40% no consumo de eletricidade quando comparado com sistemas diretos de arrefecimento como o ar condicionado, e são soluções aconselhadas para edifícios de médio-grande porte onde o clima é quente e húmido, e as variações de temperatura no exterior são reduzidas.

### 3.3.1.6. O solo como fonte de arrefecimento

Em regiões quentes, onde o arrefecimento é imperativo, a temperatura natural do solo no verão é geralmente demasiado alta para ser usado como fonte de arrefecimento. No entanto usando meios bastante simples é possível baixar a temperatura do solo consideravelmente abaixo da sua temperatura natural. Para se proceder ao arrefecimento é necessário eliminar o aquecimento provocado pelo sol, possibilitando um arrefecimento por evaporação pela superfície terrestre. Até à data dois métodos foram testados com sucesso por Givoni para baixar a temperatura do solo através de sombra ao mesmo tempo que se possibilita a evaporação da água presente no solo.

- Cobrir o solo com uma camada de gravilha ou e de lascas de madeira, até 10 cm de espessura mantendo a camada irrigada;
- Elevar a base do edifício em relação ao solo, possibilitando a evaporação do solo (que está sombreado) através de irrigação ou da água da chuva.

A Figura 23 ilustra esta técnica de arrefecimento através do solo.

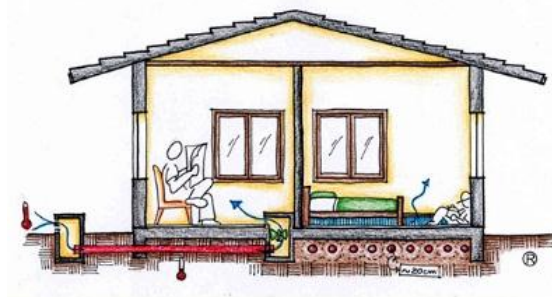


Figura 23 – Tubos enterrados (ar) [31]

Os artigos id 2 [32] e 21 [55] abordam o arrefecimento através do solo como técnica de arrefecimento passivo. No artigo 21 [55] é estudada esta técnica combinada com uma chaminé solar, procedendo-se à verificação se este sistema satisfaz as condições de conforto térmico requeridas num quarto. O arrefecimento através do solo é materializado através da colocação de uma série de tubo enterrados a uma certa profundidade, são testados vários comprimentos e diâmetros dos tubos. Os resultados apontam para um diâmetro ótimo dos tubos de 0,5 m e um comprimento superior a 20 m e que as condições requeridas de conforto (temperatura no interior e numero de renovações horárias do ar) são cumpridas mesmo em condições severas com temperaturas de 45°C e com uma radiação solar de apenas 100 W/m<sup>2</sup>. A Figura 24 apresenta uma ilustração do funcionamento da técnica.

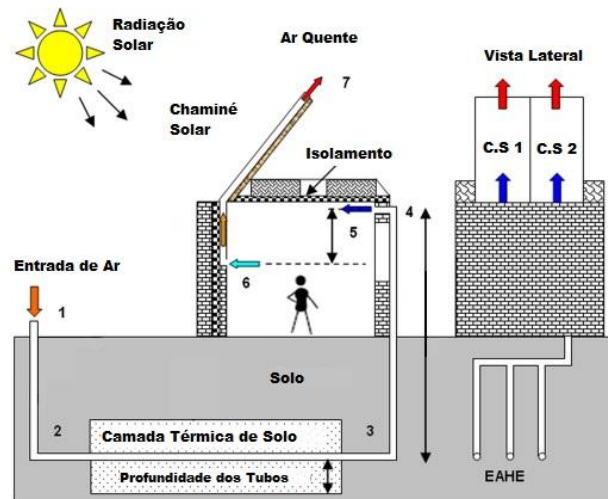


Figura 24 – Esquema de arrefecimento pelo solo, combinado com chaminé solar, adaptado de [55]

Relativamente ao artigo id 2 [32] que combina a mesma técnica com uma torre de vento citando dois estudos, um experimental e outro teórico. No experimental é referida uma redução da temperatura em 18°C enquanto no método teórico sugere um potencial de arrefecimento de 30,7 kWh. Esta combinação de arrefecimento através do solo combinado com a torre de vento é recomendada para climas mais quentes. Na Figura 25 está representado um esquema de funcionamento entre a técnica de arrefecimento pelo solo, combinada com uma torre de vento.

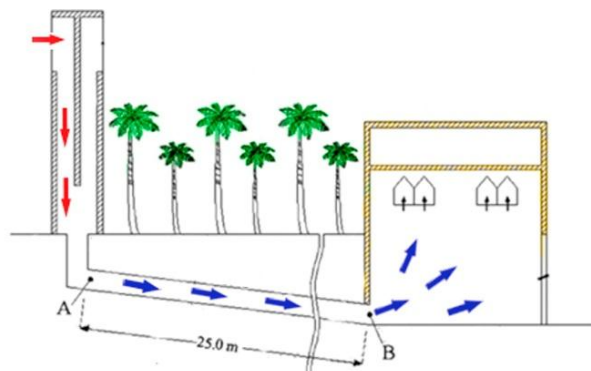


Figura 25 – Esquema de arrefecimento pelo solo combinado com torre de vento, adaptado de [32]

Vários estudos são citados no artigo id 16 [35] em diversas zonas climáticas, em múltiplos tipos de edifícios, com diferentes configurações do sistema. Os autores anunciam que esta técnica é bastante eficiente, e que em climas moderados a performance energética é entre 8-10 kWh/m<sup>2</sup> de área acoplamento e que a capacidade máxima de arrefecimento para uma temperatura de 32°C é de 45 W/m<sup>2</sup> de área de acoplamento.

Outro estudo é referido no artigo id 28 [56], realizado no clima quente e seco do México, em que foi comparado o efeito na temperatura interior de um módulo em que esta técnica de arrefecimento pelo solo foi instalada, com outro em que a técnica não foi aplicada, comparando-se assim as temperaturas exteriores máximas, mínimas e médias com as respetivas temperaturas no interior de dois módulos. Os resultados demonstram um impacto positivo do sistema nas três medições de temperatura no interior do

módulo, ocorrendo uma diminuição na temperatura máxima na temperatura média e um aumento na temperatura mínima.

### 3.3.1.7. Materiais de mudança de fase (PCM)

Os materiais PCM tem uma grande capacidade de armazenamento de energia térmica dentro de uma determinada gama de temperaturas que varia de material para material. Estes materiais podem absorver energia sob a forma de calor no interior dos edifícios, libertando-a posteriormente para o exterior e tem diferentes fases consoante os seus pontos de fusão. As Figuras 26 e 27 explicam o funcionamento dos materiais PCM de forma gráfica e esquemática.



Figura 26 – Ilustração do funcionamento de materiais PCM, adaptado de [30]

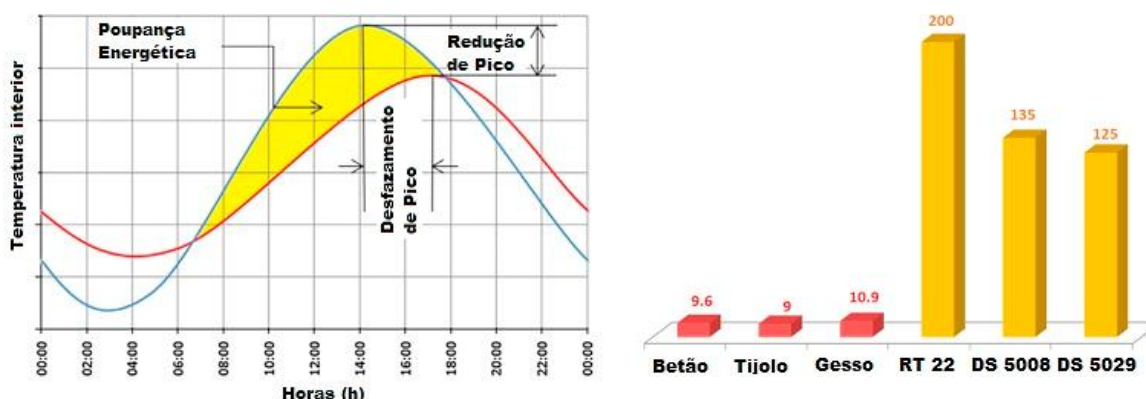


Figura 27 – Poupança energética e redução da temperatura interior devido ao uso de PCM e capacidade de armazenamento de energia (Kj/Kg) de materiais correntes e PCM para um diferencial de temperatura de 10°K, adaptado de [30]

Os artigos id 1 [30] e 12 [57] fazem uma revisão de vários estudos em relação à aplicação desta tecnologia como técnica de arrefecimento passivo em edifícios. Exploram como e quando os materiais PCM são utilizados nos sistemas passivos de armazenamento de energia térmica e calor latente apresentando uma análise geral relacionando-os com a performance energética dos edifícios. Um estudo recente citado no artigo id 1 [30] aponta para uma redução de consumos energéticos no âmbito de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) entre 10-30% em condições climáticas diferentes nos Estados Unidos. Outro estudo, realizado na Alemanha afirma que o uso de microcápsulas de PCM incorporadas nas paredes dos edifícios podem ajudar a manter a temperatura interior 4°C mais baixa do que num cenário onde esta técnica não é aplicada. Neste mesmo artigo os autores referem que existem uma grande variedade no mercado de materiais PCM com diferentes pontos de fusão e fazem uma classificação dos PCM dividindo-os em três categorias principais: orgânicos; inorgânicos e eutéticos.

Esta técnica não se limita apenas à aplicação nas fachadas dos edifícios, como demonstra mais um estudo citado no artigo id 1 [30], em que os autores recorrem ao *software* EnergyPlus para comparam os resultados obtidos com um modelo matemático, na aplicação de microcápsulas de PCM na parede interior de um edifício de escritórios, com a particularidade de a parede possuir uma caixa-de-ar ventilada naturalmente, como a Figura 28 demonstra.

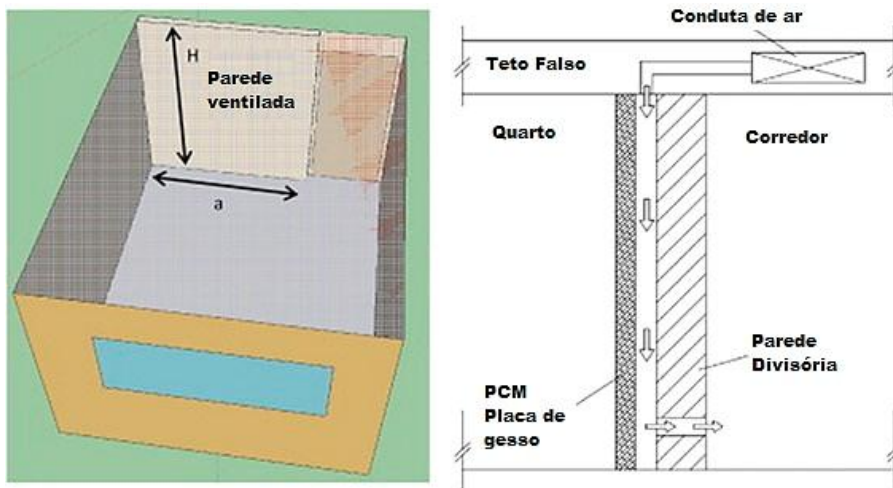


Figura 28 – Ilustração e esquema da aplicação de microcápsulas de PCM numa parede interior ventilada, adaptado de [30]

Os resultados provenientes da simulação e do modelo matemático desenvolvido demonstraram uma boa relação de concordância com apenas 7% de desvio. Este mesmo estudo também afirma que a temperatura operativa no quarto com PCM na parede com caixa-de-ar é mais baixa que nos outros dois cenários (parede sem PCM e parede com PCM sem caixa-de-ar) especialmente nas temperaturas de pico, em que esta redução chega aos 0,4°C quando comparada com o quarto sem a aplicação de PCM na parede.

Outros estudos, citados no artigo id 1 [30] aplicam esta tecnologia a outros elementos construtivos além das paredes, como coberturas, pavimentos e janelas. No total são referidos 26 estudos diferentes em ambientes climáticos diversos, recorrendo *softwares* variados e a modelos experimentais em escala real.

Numa abordagem semelhante, o artigo id 12 [57] destaca os principais critérios de seleção de PCM enunciando as propriedades a considerar (propriedades físicas, químicas, económicas, cinéticas e ambientais) e as suas aplicações aos mais variados elementos construtivos, desde paredes de gesso, incorporação em tijolos e em elementos de betão nos quais a sua resistência mecânica não é afetada, até a estores, persianas e paredes translúcidas. A Figura 29 exemplifica estas aplicações.

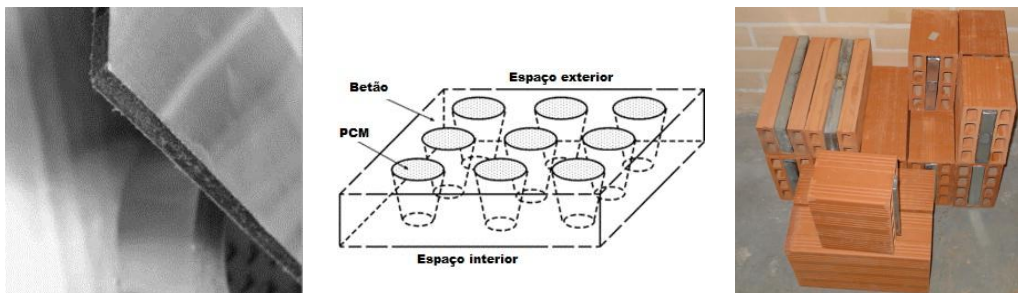


Figura 29 – Aplicação de PCM em diferentes elementos construtivos, adaptado de [57]

O artigo faz referência a dez estudos que utilizaram o *software* EnergyPlus para analisarem e avaliarem os efeitos desta técnica. Num destes estudos citados foi apresentado um modelo de PCM avançado num sistema dinâmico de isolamento, os dados obtidos foram comparados com as medições *in situ* e os resultados indicaram que o valor médio diário do fluxo de calor previsto pelo EnergyPlus através das paredes apenas apresentou um desvio de 9% quando comparado com as medições de *in situ*.

Os dois artigos concluem que a tecnologia PCM é uma alternativa viável aos sistemas de arrefecimento convencionais, que podem aumentar o conforto térmico no interior dos edifícios com a redução das temperaturas de pico, redução da oscilação das temperaturas durante o dia, redução dos consumos energéticos (aquecimento e arrefecimento) e consequente redução das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes destes mesmos consumos.



# 4

## PLANO DE SIMULAÇÃO

### 4.1. DISPOSIÇÕES GERAIS DAS SIMULAÇÕES

#### 4.1.1. EXPLICAÇÃO DO SOFTWARE EMERGYPLUS

No mercado existem vários *softwares* disponíveis (WufiPlus; Trnsys; Visual BOE; ESP-r) que têm como objetivo executar a simulação e o cálculo de ganhos e perdas térmicas, em função de múltiplas variáveis que são previamente definidas e configuradas no modelo a estudar. Estas variáveis, que irão influenciar os resultados obtidos, abrangem aspetos como a localização, associada ao respetivo clima, geometria, orientação e ocupação do modelo a ser testado. Os materiais e suas propriedades físicas e térmicas também são definidos e caracterizados no modelo. No final das simulações, pretende-se ficar a conhecer quais as variáveis que têm uma maior ou menor influência no âmbito dos resultados obtidos, como por exemplo as gamas de temperaturas e humidades relativas. Desta forma é possível prever-se que efeitos climáticos, positivos ou negativos, que as variáveis em análise geram no conforto térmico no interior do modelo, procurando-se encontrar as soluções construtivas mais eficientes, económicas e sustentáveis sem descurar os requisitos mínimos de conforto térmico associados à regulamentação em vigor. Nesta dissertação recorreu-se à utilização do *software* EnergyPlus, com extensão DesignBuilder, que é uma ferramenta de cálculo, de dimensionamento e simulação de cargas térmicas que considera as variáveis acima descritas.

#### 4.1.2. LOCALIZAÇÃO E CLIMA

O caso de estudo localiza-se na cidade de Palmas, capital do estado de Tocantins no Brasil. O estado de Tocantins na sua maioria não ultrapassa os 500 m de altitude em relação ao nível médio da água do mar, tendo o ponto de maior altitude 1340 m que se situa na serra das Traíras. Em relação às temperaturas, variam dos 38°C entre abril e setembro (período de seca) até aos 17°C entre outubro e março (período de chuvas). Segundo a classificação Koppen [9] a cidade de Palmas pertence á zona tropical chuvosa. A Figura 30 aponta a localização da cidade de Palma e o Quadro 9 indica os valores mínimos, máximos e médios dos dados de entrada mais relevantes do ficheiro climático no ano típico.



Figura 30 – Localização de Palma [58]

Quadro 9 – Dados climáticos

	Temperatura Exterior [°C]	Humidade Relativa [%]	Velocidade do Vento [m/s]
Mínimo	17,20	19,07	0
Máximo	38,10	94,64	9,50
Média	26,82	66,16	1,64

#### 4.1.3. DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DO MÓDULO DE CONTROLO

O módulo de controlo está assente sobre um pavimento de betão leve com 2,4x2,4 m<sup>2</sup> e possui paredes de 2,4 m de altura constituídas por painéis OSB (oriented stranded boards) com isolamento de lã de vidro. A cobertura é de duas águas com um pendente de 10% orientada no eixo norte-sul, e é constituída por telha acústica com isolamento de poliestireno expandido (EPS). É importante referir que não existem paredes na cobertura, tornando-a assim num espaço ventilado naturalmente. O módulo contém uma porta (com os mesmos materiais das paredes) e uma janela com o peitoril a 1,5 do solo, em vidro simples com caixilharia em alumínio [59]. As características geométricas do módulo estão indicadas na Figura 31, e o Quadro 10 demonstra as características dos materiais, tais como espessura, condutividade, densidade, calor específico, coeficiente de transmissão térmica e transmissão solar no caso do vidro.

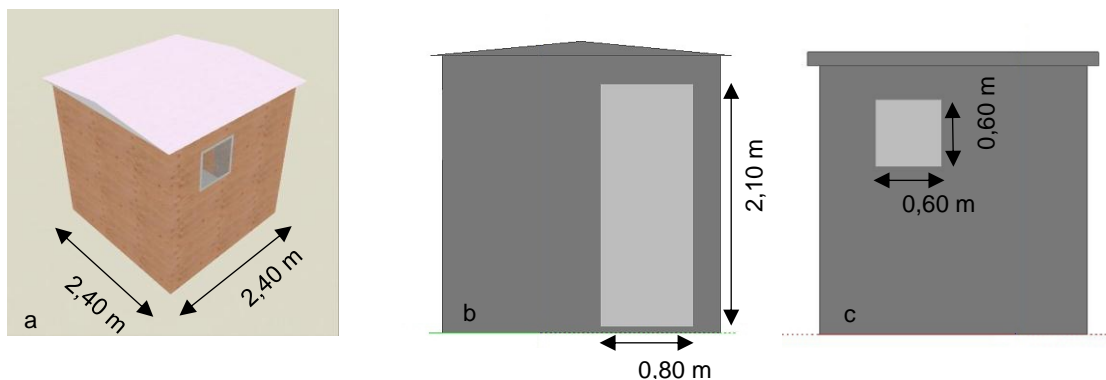


Figura 31 – Perspectiva (a), alçado poente (b) e alçado norte (c)

Quadro 10 – Propriedades dos materiais

Elemento	Esp.	$\lambda$	D	Cp	G	U
<b>Parede</b>						
OSB	9,5	0,129	640	1552	-	1,345
Lã de Vidro	20	0,04	12	840	-	
<b>Cobertura</b>						
Telha Acústica	25	0,057	290	1340	-	0,753
EPS	30	0,04	15	1400	-	
<b>Pavimento</b>						
Betão leve	50	0,38	1200	1000	-	2,928
<b>Tecto</b>						
OSB	9,5	0,129	640	1552	-	1,401
Lã de Vidro	20	0,04	12	840	-	
<b>Janela</b>						
Vidro	8	0,9			0,74	

Legenda:

Esp – Espessura [mm]

$\lambda$  – Condutividade [W/m.K]

D – Massa Vol. [Kg/m<sup>3</sup>]

Cp – Calor Específico [J/Kg.K]

G – Fator Solar

U – Coeficiente de Transmissão Térmica [W/m<sup>2</sup>.K]

## 4.2. DESCRIÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO

### 4.2.1. SIMULAÇÃO DE CONTROLO

Numa primeira simulação (S0) pretende-se fazer uma validação do modelo construído, e verificar se os resultados obtidos são fidedignos fazendo-se uma comparação com medições da temperatura “*in situ*” no mesmo período temporal, que será de uma semana. Esta simulação irá abranger as condições climáticas a que o modelo está sujeito durante um ano inteiro, com recurso ao ficheiro climático específico da cidade de Palmas, que está disponível nas bases de dados climática do EnergyPlus. Nesta simulação considerou-se uma ventilação contínua de 2,3 renovações de ar por hora (Rph), uma emissividade de 0,9 e uma absorvância solar de 0,7. A Figura 32 compara as temperaturas interiores do módulo com a temperatura exterior ao longo de uma semana, iniciando-se às 15:00 horas do dia 8 de agosto e terminando às 15:00 horas do dia 15 de agosto.

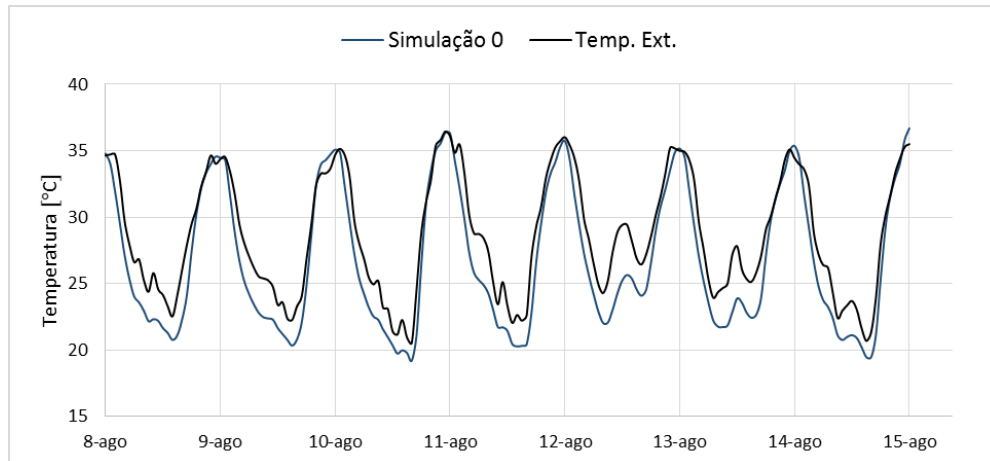


Figura 32 – Comparação das temperaturas interiores e exteriores, com temperatura do solo a 18°C

Através da análise da Figura 33 verifica-se que as temperaturas no interior do módulo situam-se abaixo das temperaturas exteriores em grande parte do período considerado, principalmente na fase noturna onde esta diferença é mais acentuada. Esta discrepância é explicada pela temperatura do solo, que numa primeira simulação o *software* assume por defeito o valor de 18°C como temperatura de referência do solo. Este valor de 18°C adotado para a temperatura do solo não é plausível no cenário considerado, porque face aos dados climáticos de entrada, a temperatura exterior média na semana considerada é de 28,66°C, logo não é razoável considerar-se 18°C como temperatura de referência do solo. O seu efeito na simulação manifesta-se através de uma redução excessiva da temperatura no interior do módulo que é potenciada devido à espessura da laje térrea ser apenas de 5cm. Este arrefecimento através do solo foi referido no capítulo 3 como uma das técnicas passivas de arrefecimento.

Perante estes resultados fez-se uma análise de sensibilidade recorrendo-se a novas simulações com novos valores de temperaturas do solo com o objetivo de calibrar-se o modelo da forma mais aproximada da realidade. As Figura 33, 34 e 35 demonstram os resultados das novas simulações com os valores de temperatura do solo de 20, 25 e 28,66°C respetivamente.

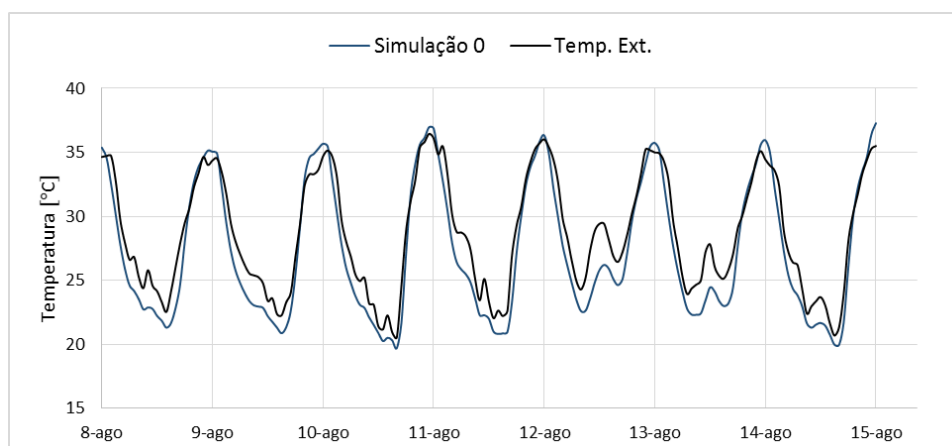


Figura 33 – Comparação de temperaturas interiores e exteriores, com temperatura do solo a 20°C

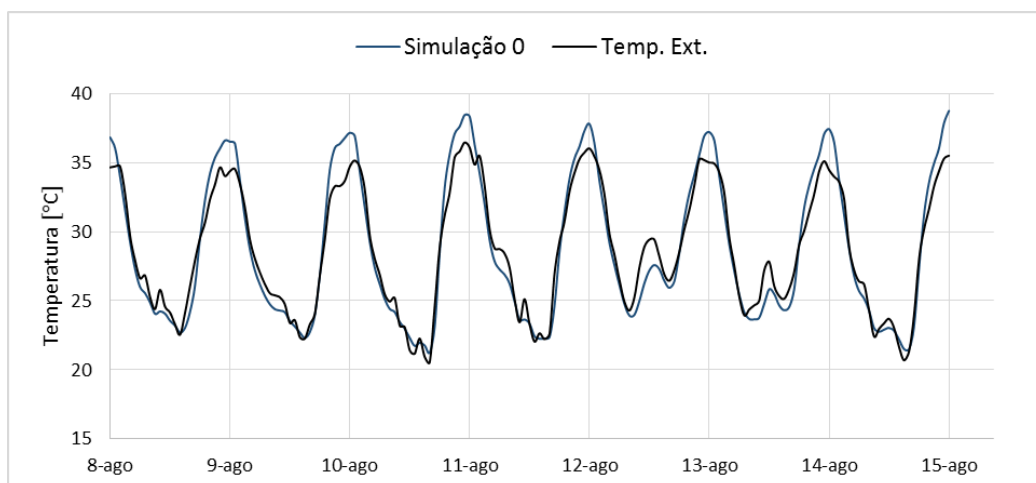


Figura 34 – Comparação de temperaturas interiores e exteriores, com temperatura do solo a 25°C

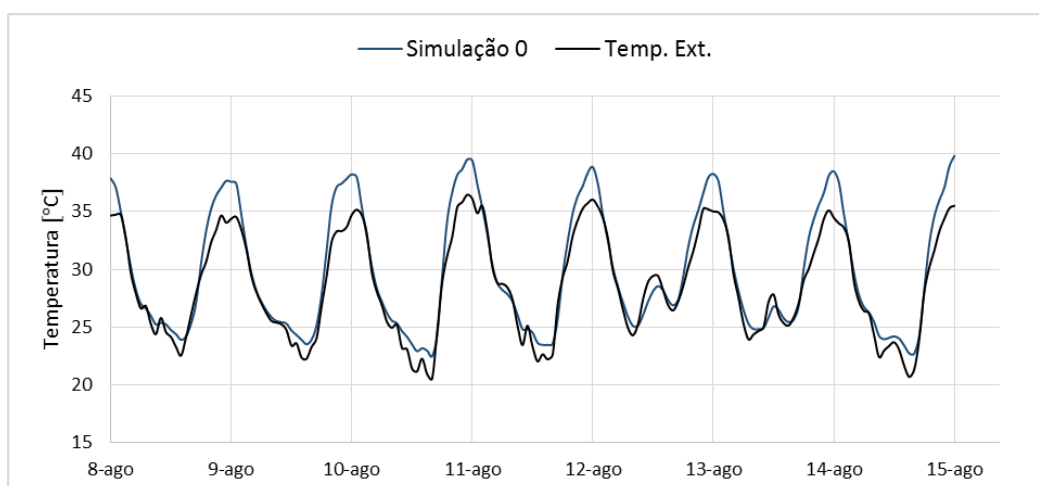


Figura 35 – Comparação de temperaturas interiores e exteriores, com temperatura do solo a 28,66°C

Como é possível verificar-se pela observação das Figuras 34, 35 e 36, as discrepâncias entre as temperaturas interiores e exteriores na fase noturna vão sendo diluídas à medida que a temperatura do solo se aproxima da temperatura exterior média na semana considerada. Para uma calibração do modelo mais precisa seria necessário obter-se medições “*in situ*” das temperaturas do solo para a semana considerada ou que os dados relativos à temperatura do solo fossem fornecidos pelo *software*.

A Figura 36 apresenta a dispersão das temperaturas interiores do módulo ao longo do ano típico na simulação S0.

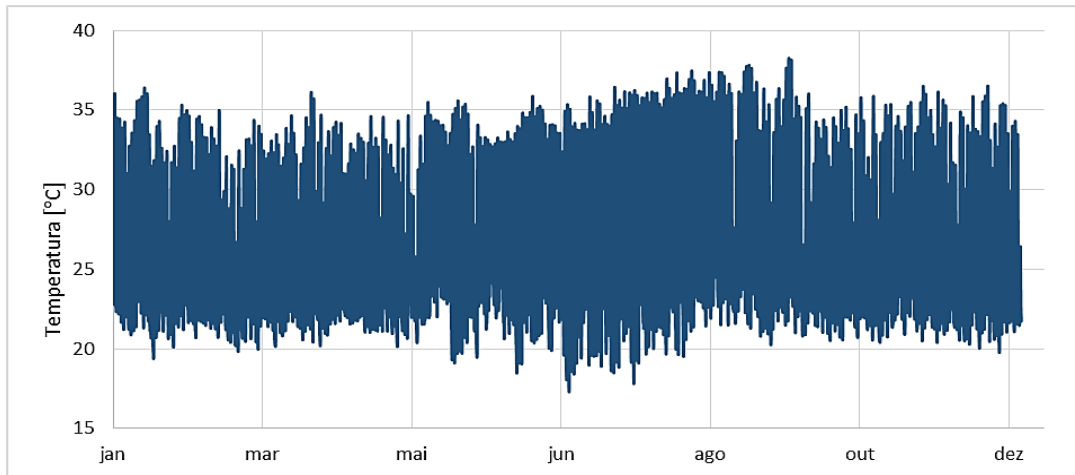


Figura 36 – Gama de temperaturas S0

A Figura 37 compara as temperaturas interiores do módulo, obtidas através da simulação, com as medições das temperaturas “*in situ*” em dois módulos (M1 e M2) juntamente com a temperatura exterior no período temporal compreendido entre as 15:00 horas do dia 8 de agosto e as 15:00 horas dia 15 de agosto.

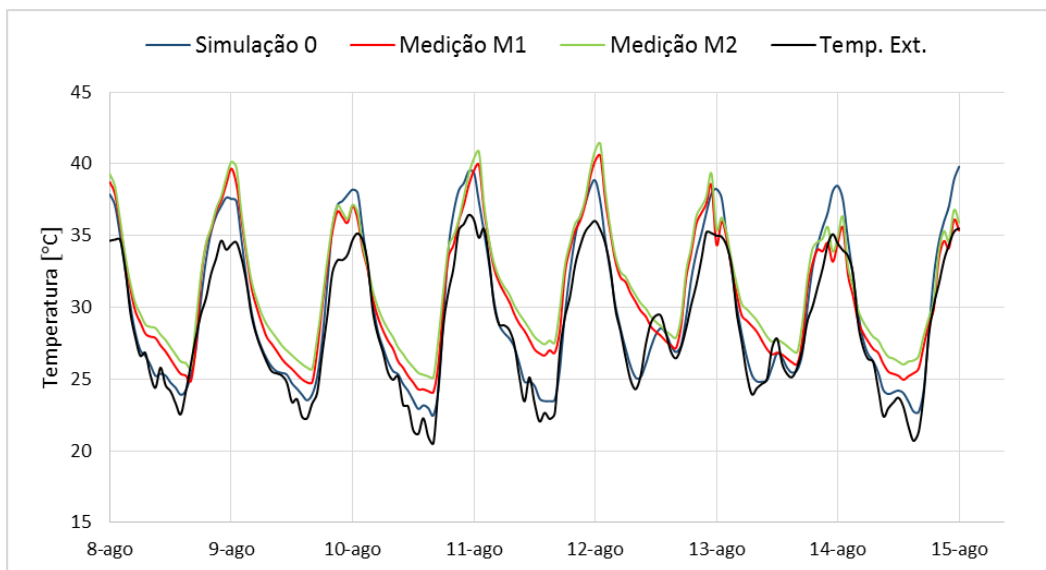


Figura 37 – Comparação das temperaturas da simulação com as medições

Analisando a Figura 37 verifica-se que as temperaturas de pico da simulação S0 são inferiores às registadas nos módulos “*in situ*”, ainda assim pode-se verificar que têm um padrão e amplitudes semelhantes. Esta discrepância pode ser justificada com o facto de os dados de entrada não serem exatamente os mesmos, uma vez que as medições foram registadas em agosto de 2018 e o ficheiro climático da simulação ocorre ano típico.

#### 4.2.2. RESTANTES SIMULAÇÕES

Todas as simulações foram realizadas com recurso à importação do ficheiro climático da cidade de Palma para o ano típico. O período temporal das simulações é de 1 de janeiro a 31 de dezembro. As simulações efetuadas podem-se agrupar em três categorias distintas. Na primeira categoria, onde se inserem as simulações S0, S1 e S2, apenas será alterado o parâmetro da ventilação. Na segunda categoria, referente às simulações S3.0, S3.1 e S3.2, serão alterados os parâmetros da ventilação, da emissividade e da absorção das paredes exteriores. Na terceira categoria, que engloba as simulações S4.0, S4.1 e S4.2, serão alterados os parâmetros da ventilação, emissividade e absorção relativos às paredes exteriores e à cobertura. O Quadro 11 indica as nove simulações a executar juntamente com os parâmetros a variar.

Quadro 11 – Parâmetros variáveis nas simulações

Ref.	Vent.	$\epsilon$	$\alpha$
S0	Contínua	0,9	0,7
S1	Contínua	0,9	0,7
S2	Noturna	0,9	0,7
S3.0	Contínua	0,6	0,3
S3.1	Contínua	0,6	0,3
S3.2	Noturna	0,6	0,3
S4.0	Contínua	0,6	0,3
S4.1	Contínua	0,6	0,3
S4.2	Noturna	0,6	0,3

Legenda:

Ref. - Simulação

Vent. – Ventilação

$\epsilon$  – Emissividade

$\alpha$  – Absorção solar

Na simulação S1, todos os parâmetros mantiveram-se em relação à simulação S0, exceto a ventilação contínua que será alterada para o valor 6,9 Rph. Na simulação S2, considerar-se-á uma ventilação noturna (período entre as 20:00 e as 8:00) a uma taxa de 6,9 e 2,3 Rph nas restantes horas, mantendo-se os restantes parâmetros idênticos às simulações S1 e S0.

Nas seguintes simulações alterar-se-ão os parâmetros da emissividade e de absorção solar das superfícies em que se irá aplicar uma pintura refletante. Numa primeira fase a tinta será apenas aplicada no exterior dos painéis de OSB, posteriormente numa segunda fase será aplicada também no exterior das telhas acústicas.

Assim na simulação S3.0 os parâmetros de emissividade e de absorção solar serão alterados para 0,6 e 0,3 respetivamente, resultante da aplicação da tinta. A ventilação a adotar é contínua de 2,3 Rph. Na simulação S3.1, os parâmetros de emissividade e de absorção manter-se-ão comparativamente com a simulação S3.0 alterando-se apenas a ventilação contínua para uma taxa de 6,9 Rph. Na simulação S3.2 irá adotar-se uma ventilação noturna com uma taxa de 6,9 Rph (período entre as 20:00 e as 8:00) e 2,3

Rph nas restantes horas, mantendo-se os valores de emissividade e de absorção solar em relação à simulação S3.1.

Na simulação (S4.0) a pintura refletante, para além de ser aplicada nos painéis de OSB, será também aplicada na telha acústica que constitui a cobertura do módulo. Alterando-se assim os valores de emissividade e de absorção solar nesta superfície para 0,6 e 0,3 respetivamente, que anteriormente eram de 0,9 e 0,7. A ventilação a considerar nesta simulação é contínua a uma taxa de 2,3 Rph. Na simulação S4.1, com ventilação contínua a uma taxa de 6,9 Rph, os valores de emissividade e absorção das superfícies onde a pintura refletante foi aplicada irão manter-se em relação à simulação S4.0. Na simulação S4.2, os parâmetros de emissividade e absorção solar das superfícies onde será aplicada a pintura refletante, serão idênticos aos da simulação S4.1. A ventilação a adotar é noturna a uma taxa de 6,9 Rph (período entre as 20:00 e as 8:00) e 2,3 nas restantes horas.

# 5

## RESULTADOS

### 5.1. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

#### 5.1.1. SIMULAÇÃO S1

A Figura 38 apresenta a dispersão das temperaturas interiores no módulo ao longo do ano da simulação S1.

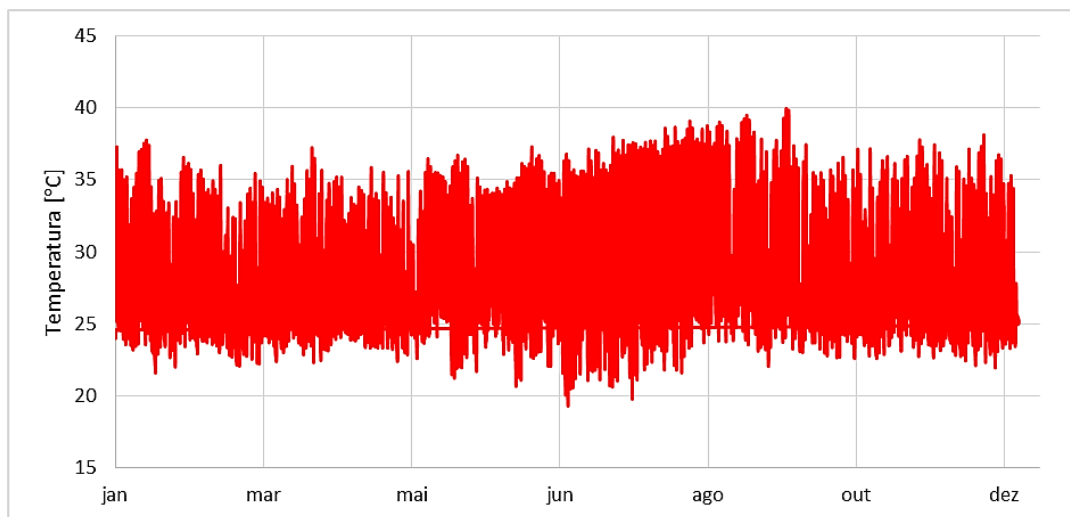


Figura 38 – Gama de temperaturas S1

A Figura 39 compara as temperaturas interiores do módulo, obtidas através das simulações S1 e S0, juntamente com as temperaturas exteriores no período compreendido entre o dia 8 de agosto a 28 de agosto.

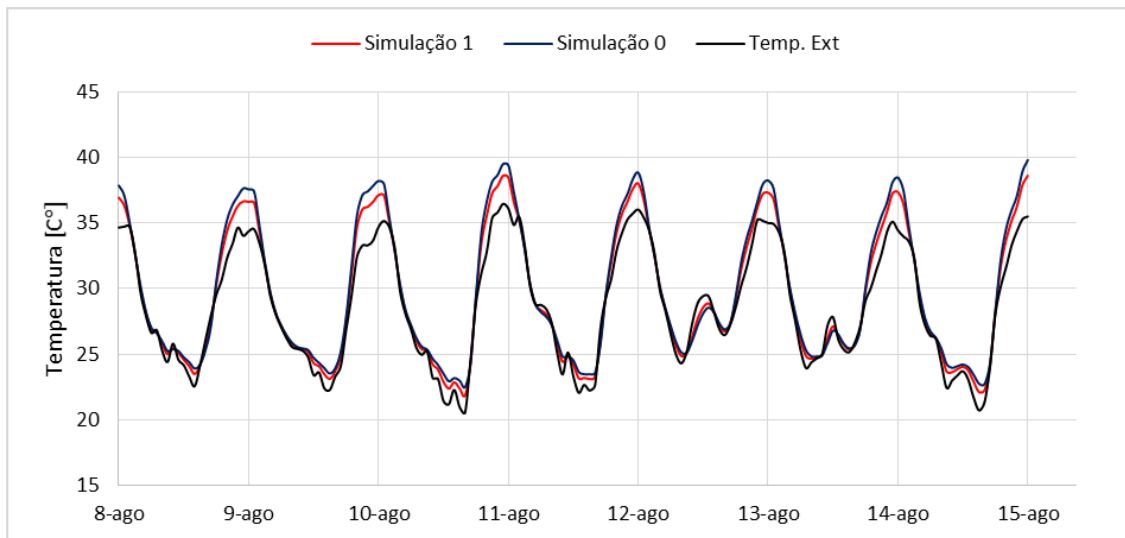


Figura 39 – Comparação entre as temperaturas das simulações S1 e S0

Analisando-se a Figura 39, pode-se observar uma ligeira redução do pico das temperaturas máximas e mínimas no interior do módulo comparativamente com as temperaturas interiores do módulo obtidas através da simulação S0.

#### 5.1.2. SIMULAÇÃO S2

A Figura 40 apresenta a dispersão das temperaturas interiores no módulo ao longo do ano da simulação S2.

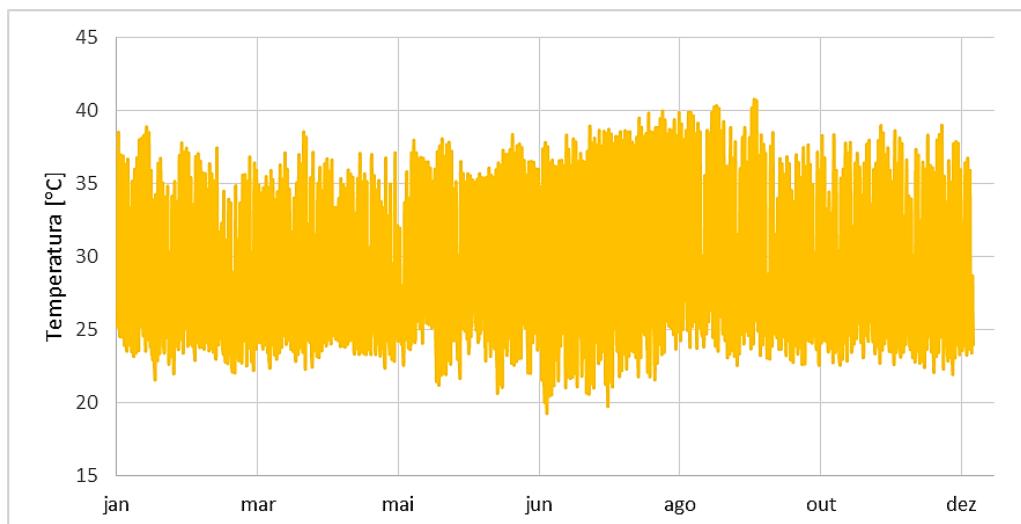


Figura 40 – Gama de temperaturas S2

A Figura 41 compara as temperaturas interiores do módulo, obtidas através das simulações S2 e S0, juntamente com as temperaturas exteriores no período compreendido entre o dia 8 de agosto e 15 de agosto.

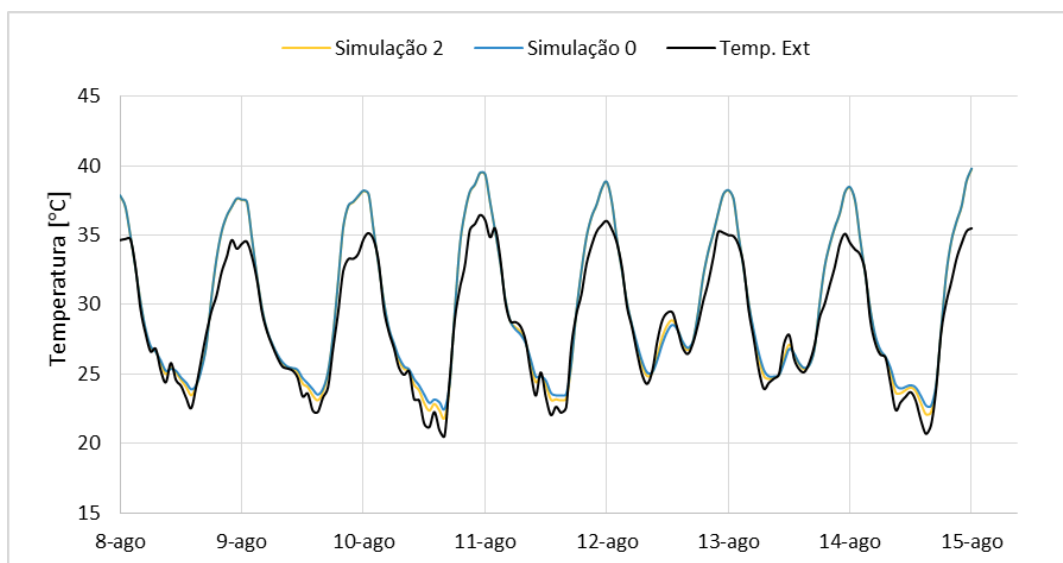


Figura 41 – Comparação entre as temperaturas das simulações S2 e S0

Através da análise da Figura 41, verifica-se apenas uma redução muito ligeira das temperaturas interiores do módulo, comparativamente às temperaturas obtidas pela simulação S0. Esta redução ocorre no período noturno, como consequência direta de uma taxa de ventilação superior neste mesmo período.

### 5.1.3. SIMULAÇÃO S3.0

A Figura 42 apresenta a dispersão das temperaturas interiores no módulo ao longo do ano da simulação S3.0

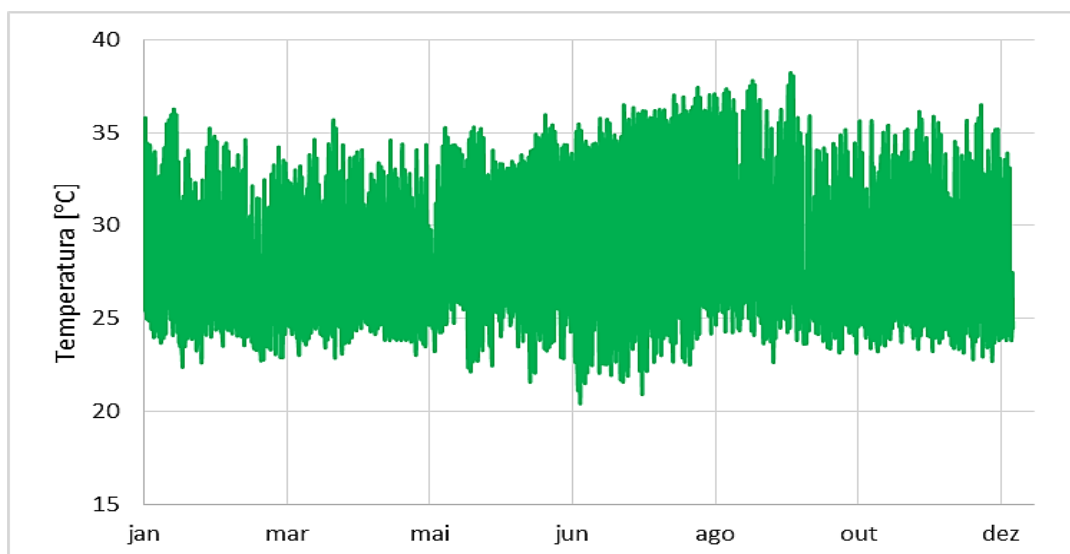


Figura 42 – Gama de temperaturas de S3.0

A Figura 43 compara as temperaturas interiores do módulo, obtidas pelas simulações S3.0 e S0, juntamente com as temperaturas exteriores durante a semana considerada. Ambas as simulações têm a mesma taxa de ventilação.

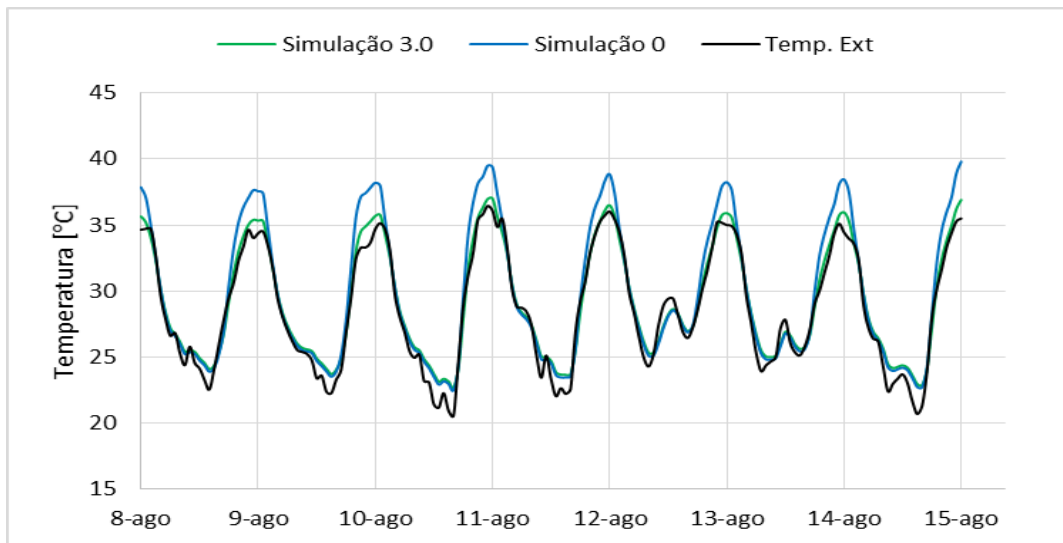


Figura 43 – Comparação entre as temperaturas das simulações S3.0 e S0

Pela análise da Figura 43 é possível observar-se uma redução das temperaturas interiores máximas por comparação com as temperaturas obtidas na simulação S0, por outro lado no período noturno esta redução não ocorre, porque o efeito da pintura refletante só se manifesta durante o dia.

#### 5.1.4. SIMULAÇÃO S3.1

A Figura 44 apresenta a dispersão das temperaturas interiores no módulo ao longo do ano da simulação S3.1

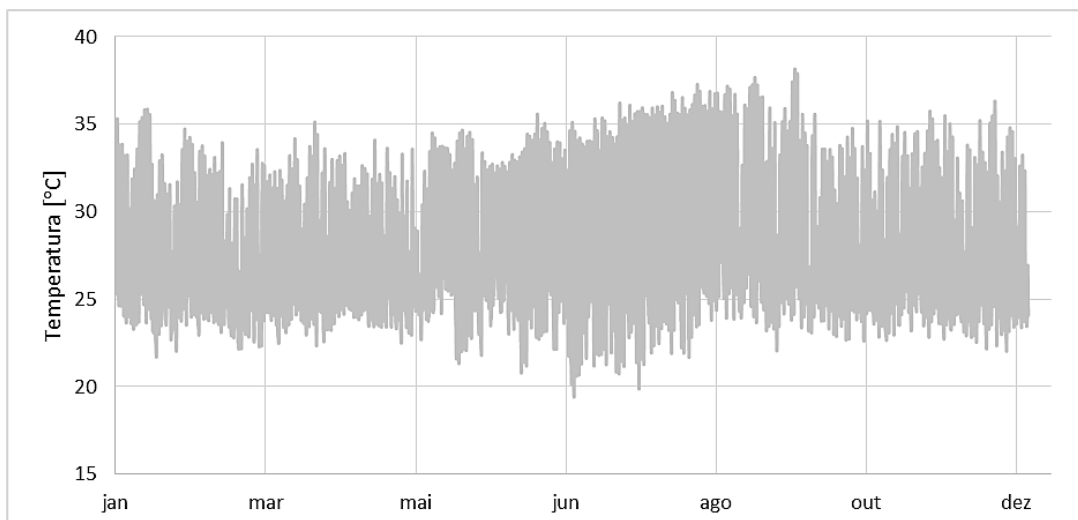


Figura 44 – Gama de temperaturas de S3.1

A Figura 45 compara as temperaturas interiores do módulo ao longo da semana considerada, obtidas através das simulações S3.1 e S1, ambas com a mesma taxa de ventilação contínua.

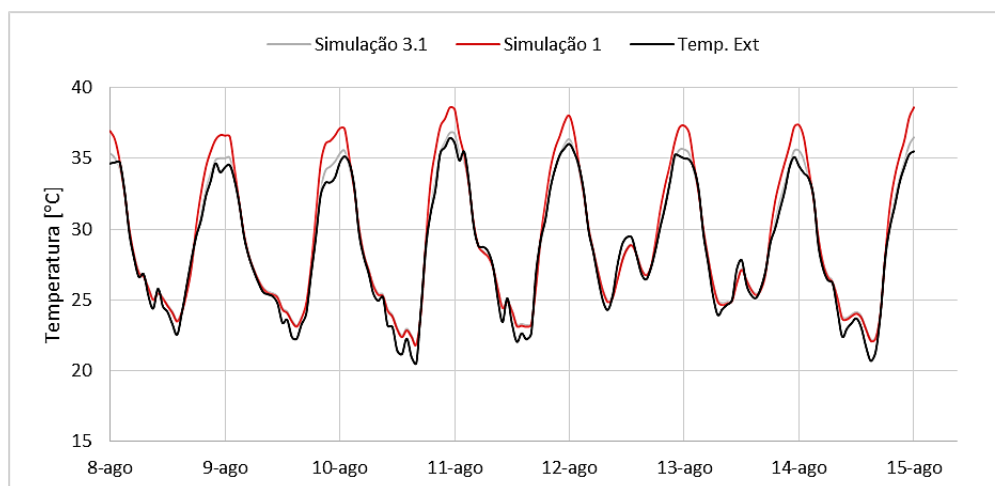


Figura 45 – Comparação entre temperaturas das simulações S3.1 e S1

Através da observação da Figura 45, verifica-se uma redução do pico das temperaturas interiores máximas da simulação S3.1 por comparação às temperaturas da simulação S1. Esta redução surge devido ao efeito da aplicação da pintura refletante nas paredes exteriores. Também é possível apurar-se que ocorre uma aproximação das temperaturas interiores da simulação S3.1 às temperaturas exteriores.

#### 5.1.5. SIMULAÇÃO S3.2

A Figura 46 apresenta a dispersão das temperaturas interiores no módulo ao longo do ano, obtidas pela simulação S3.2.

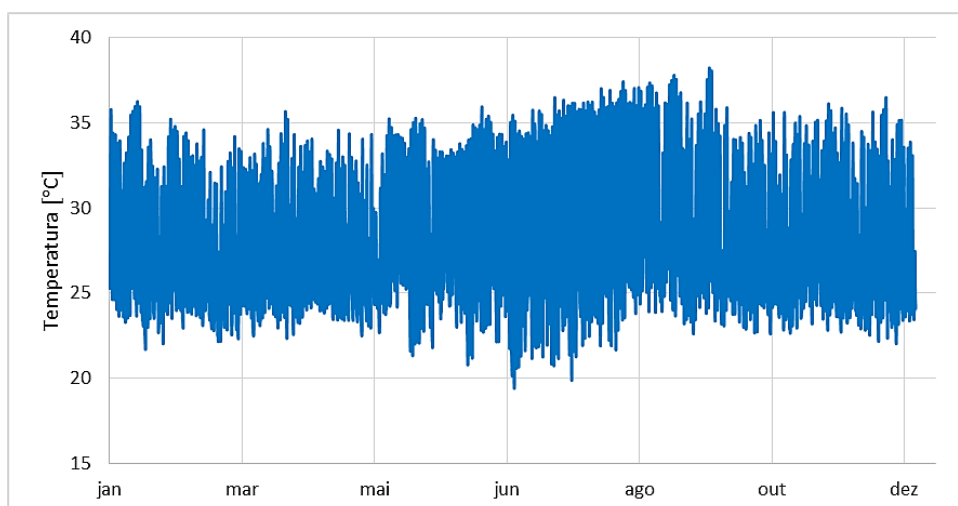


Figura 46 – Gama de temperaturas de S3.2

A Figura 47 compara as temperaturas interiores do módulo na semana considerada, obtidas através das simulações S3.2 e S2, ambas com ventilação noturna.

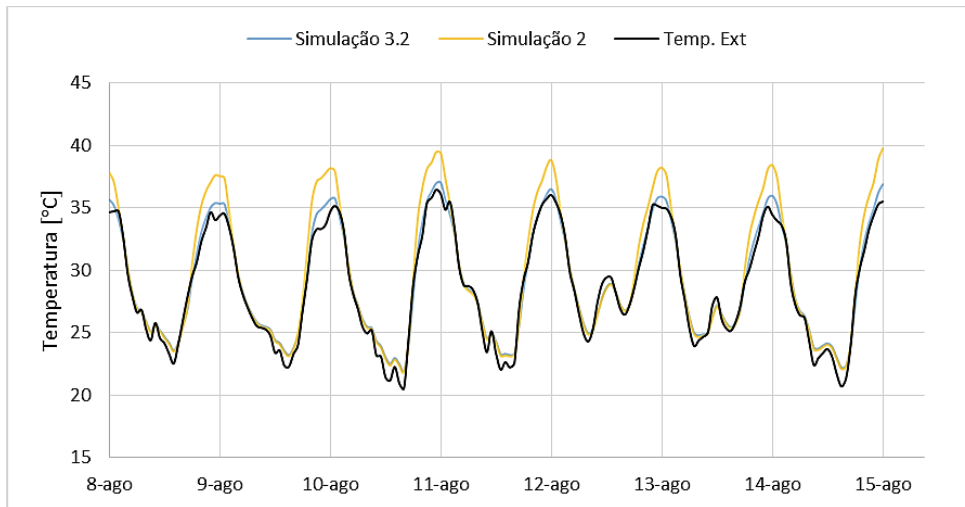


Figura 47 – Comparação entre as temperaturas das simulações S3.2 e S2

Pela análise da Figura 47, observa-se uma redução das temperaturas de pico interiores da simulação S3.2 comparativamente com a simulação S2, e verifica-se uma coincidência das temperaturas interiores destas duas simulações no período noturno.

#### 5.1.6. SIMULAÇÃO S4.0

A Figura 48 apresenta a dispersão das temperaturas interiores no módulo ao longo do ano, obtidas pela simulação S4.0.

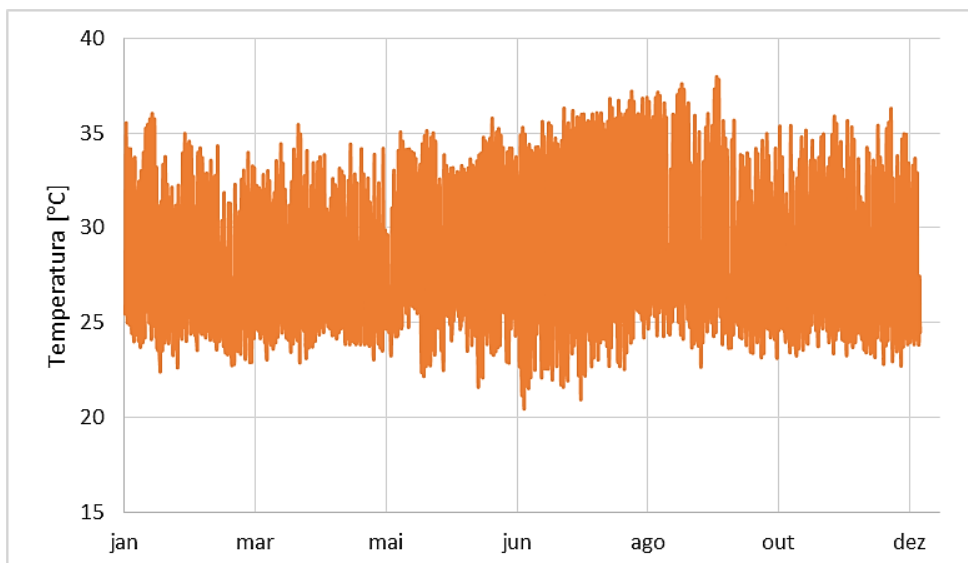


Figura 48 – Gama de temperaturas de S4.0

A Figura 49 compara as temperaturas interiores do módulo ao longo da semana considerada, obtidas através das simulações S4.0 e S3.0, ambas com ventilação contínua.

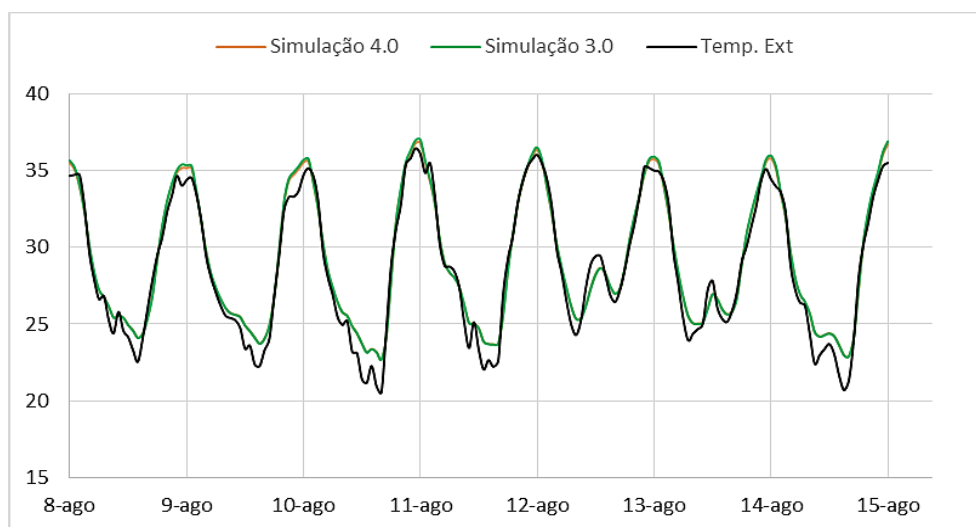


Figura 49 – Comparação entre as temperaturas de S4.0 e S3.0

A Figura 49 demonstra uma quase total coincidência entre as temperaturas interiores obtidas através das simulações S4.0 e S3.0. Isto explica-se com o facto de a cobertura do módulo não ser um espaço fechado, logo é ventilado. Devido a este motivo a aplicação da pintura refletante na cobertura do módulo não provoca por si só um efeito de arrefecimento no interior do módulo.

#### 5.1.7. SIMULAÇÃO S4.1

A Figura 50 apresenta a dispersão das temperaturas interiores no módulo ao longo do ano, obtidas pela simulação S4.1

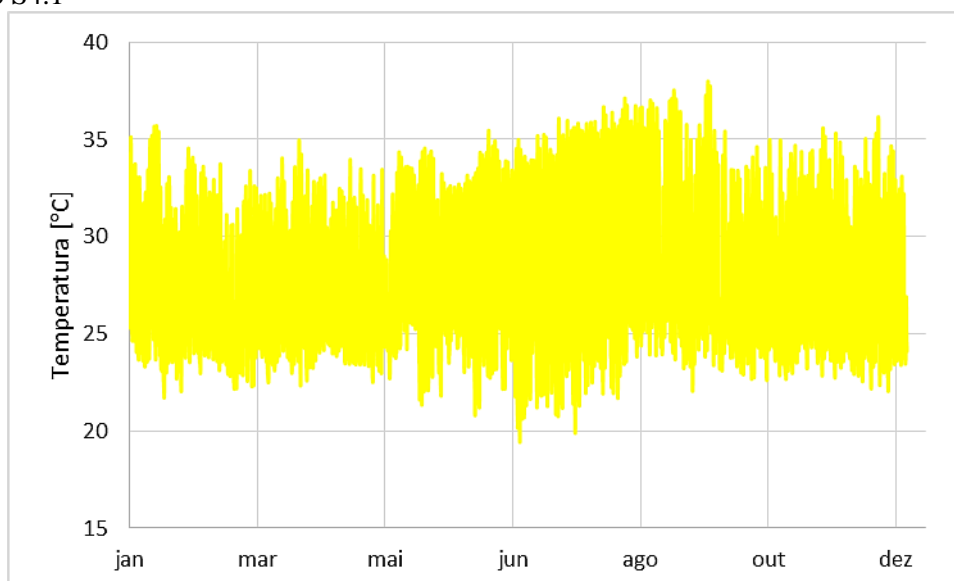


Figura 50 – Gama de temperaturas de S4.1

A Figura 51 compara as temperaturas interiores obtidas na semana considerada através das simulações S4.1 e S3.1, ambas com ventilação contínua.

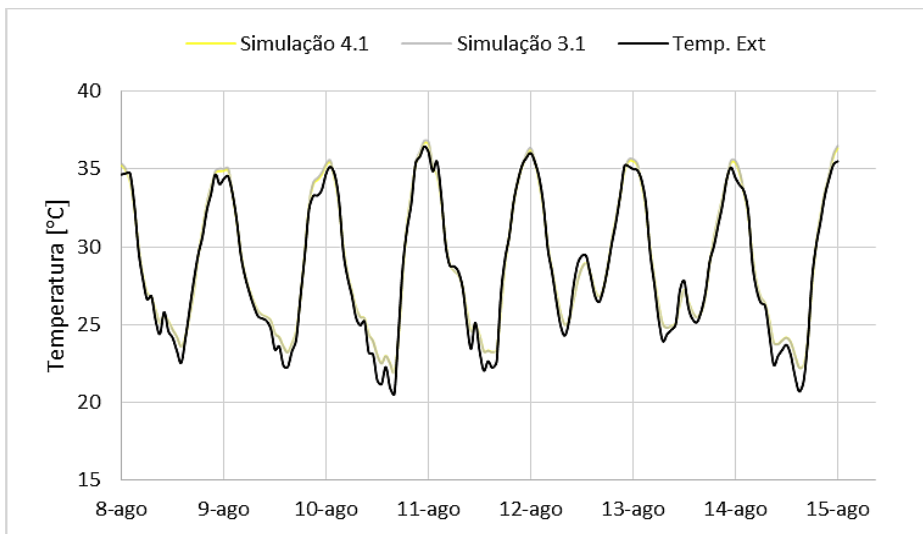


Figura 51 – Comparação entre as temperaturas de S4.1 e S3.1

Pela observação da Figura 51 verifica-se, tal como na Figura 50, uma similaridade entre as temperaturas interiores das duas simulações analisadas. Mas nesta situação verifica-se uma redução das diferenças entre as temperaturas de pico comparativamente com as temperaturas exteriores de pico. Esta redução de diferenças ocorre devido à taxa de ventilação considerada que é superior à taxa de ventilação adotada nas simulações da Figura 49. Em relação à aplicação da pintura refletante na cobertura, verifica-se novamente que não surte um efeito significativo de destaque.

#### 5.1.8. SIMULAÇÃO S4.2

A Figura 52 apresenta a dispersão das temperaturas interiores do módulo ao longo do ano, obtidas pela simulação S4.2.

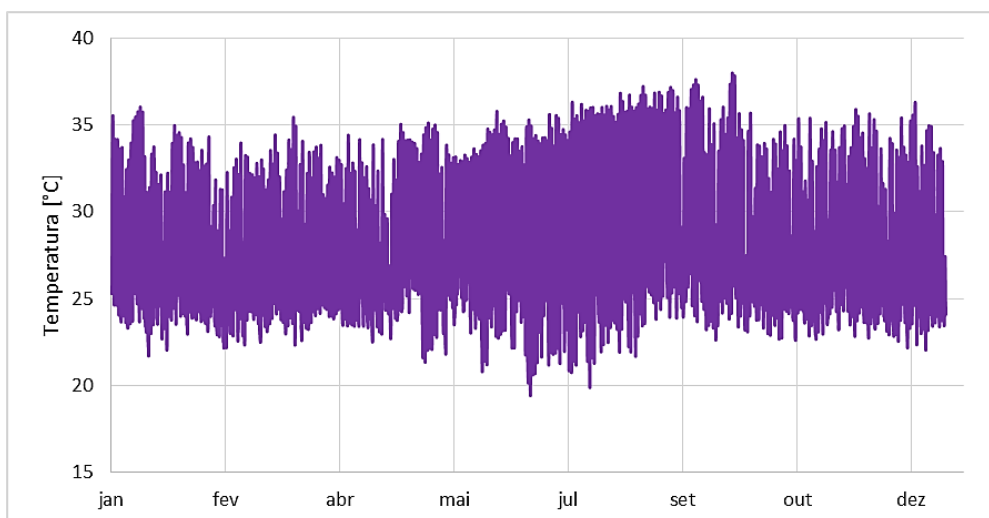


Figura 52 – Gama de temperaturas de S4.2

A Figura 53 compara as temperaturas interiores obtidas na semana considerada através das simulações S4.2 e S3.2, ambas com ventilação noturna.

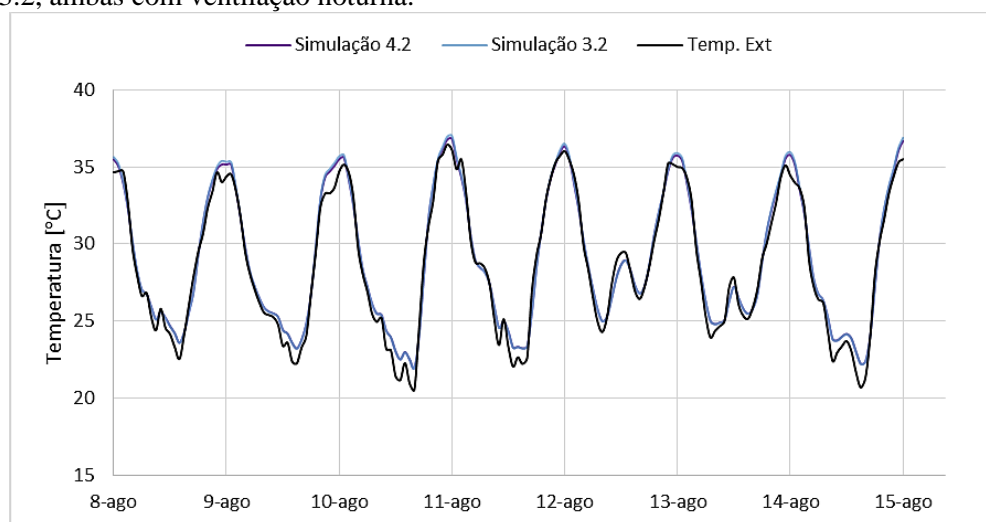


Figura 53 – Comparação entre as temperaturas de S4.2 e S3.2

Através da análise da Figura 53, verifica-se a mesma tendência observada nas Figuras 49 e 51, ou seja, a aplicação da pintura refletante na cobertura não produz reduções de temperaturas interiores dignas de registo, as curvas das temperatura interiores entre as simulações S4.2 e S3.2 coincidem. Isto deve-se, como já foi referido anteriormente, ao facto de a cobertura ser naturalmente ventilada, anulando assim qualquer efeito resultante da aplicação da pintura refletante na superfície exterior da cobertura.

## 5.2. RESULTADOS TOTAIS DAS SIMULAÇÕES

Para a comparação dos resultados obtidos entre as nove simulações anuais recorreu-se à Equação 12 que resulta no somatório das diferenças de temperaturas interiores positivas entre as temperaturas registadas no interior do módulo e temperatura de conforto no local, que segundo a norma brasileira NBR 15220 [60] é de 25°C. Os resultados dos somatórios são apresentados no Quadro 12 e na Figura 55. A Figura 54 demonstra as *Boxplots* das temperaturas.

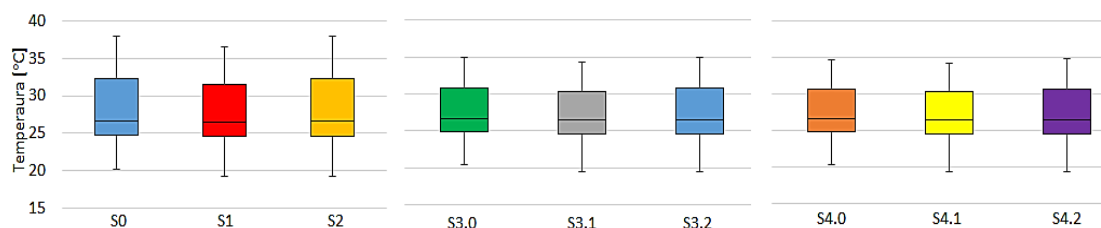


Figura 54 – *Boxplots* das temperaturas interiores das nove simulações

$$\sum (T_{\text{int}} - 25) > 0 \quad (12)$$

Legenda:

$T_{\text{int}}$  – Temperatura interior

Quadro 12 - Resultados dos somatórios totais

S0	S1	S2	S3.0	S3.1	S3.2	S4.0	S4.1	S4.2
33208,68	29524,00	32822,57	27191,20	25210,90	26766,80	26766,16	24914,82	26336,01

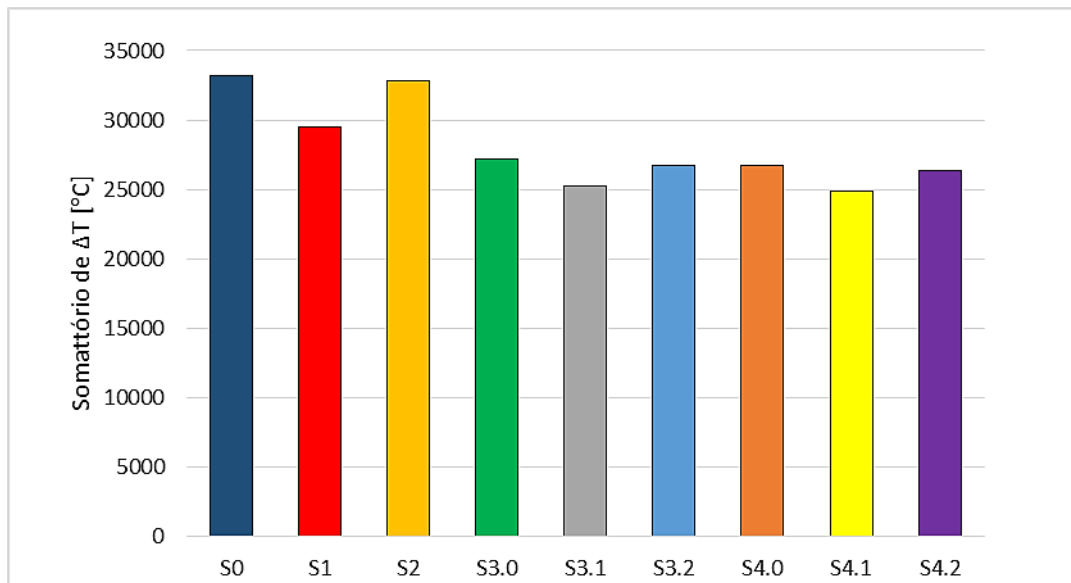


Figura 55 – Somatório das diferenças de temperaturas interiores positivas em cada simulação

### 5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisadas as três primeiras simulações (S0, S1 e S2) em que o parâmetro variável é a ventilação, verifica-se uma redução de 11,09% no somatório das diferenças de temperaturas interiores positivas da simulação S0 para a simulação S1. Esta redução deve-se ao aumento da taxa de ventilação de 2,3 Rph na simulação S0 para 6,9 Rph na simulação S1. Em relação às simulações S1 e S2, em que a ventilação adotada na simulação S2 é noturna, ou seja, 6,9 Rph no período das 20:00 horas até às 8:00 horas e 2,3 Rph nas restantes horas, observa-se um acréscimo de 11,17% do somatório das temperaturas interiores positivas da simulação S2 comparativamente com a simulação S1. Comparando os resultados entre as simulações S0 e S2, verifica-se uma redução no valor do somatório das temperaturas interiores positivas na simulação S2 de apenas 1,16%. [18]

No segundo grupo de simulações (S3.0, S3.1 e S3.2) em que para além do parâmetro da ventilação, alteraram-se os parâmetros de emissividade e de absorvância solar das paredes exteriores em relação às simulações do primeiro grupo, devido à aplicação de uma pintura refletante. Comparando os resultados entre as simulações S3.0 e S0, ambas com uma taxa de ventilação de 2,3 Rph, mas com valores de emissividade e absorvância solar diferentes, verifica-se um decréscimo de 18,12% no somatório das diferenças de temperaturas interiores positivas. Utilizando a mesma abordagem comparativa para as simulações S3.1 e S1, ambas com uma taxa de ventilação de 6,9 Rph, e valores de emissividade e absorvância solar diferentes, observa-se também um decréscimo, embora menos acentuado que na comparação anterior, no somatório das diferenças de temperaturas interiores positivas na ordem do 14,60%. Em relação às simulações S3.2 e S2, ambas com regime de ventilação noturna e parâmetros de

emissividade e absorvância solar diferentes, verifica-se o maior decréscimo do somatório das diferenças de temperatura positivas neste grupo, este decréscimo é de 18,45%.

No terceiro grupo de simulações (S4.0, S4.1 e S4.2) os valores da emissividade e da absorvância solar da cobertura foram alterados, em função da aplicação de uma pintura refletante nesta superfície, comparativamente com os dois grupos de simulações anteriores, mantendo-se os mesmos valores de emissividade e absorvância solar das paredes exteriores das simulações do segundo grupo. Procedendo-se à análise entre os resultados das simulações S4.0 e S3.0, ambas com a mesma taxa de ventilação de 2,3 Rph, verifica-se uma redução de apenas 1,56% no somatório das diferenças de temperatura interiores positivas. Relativamente às simulações S4.1 e S3.1, com uma taxa de ventilação de 6,9 Rph, também ocorre uma redução na mesma ordem de grandeza que na comparação anterior, ou seja, o decréscimo do somatório das temperaturas interiores é apenas de 1,17%. Por fim, comparando os resultados entre as simulações S4.2 e S3.2, ambas com ventilação noturna, o decréscimo no somatório das diferenças de temperaturas interiores positivas é igualmente muito reduzido situando-se nos 1,6%.



# 6

## CONCLUSÕES

### 6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas passivas de arrefecimento aplicadas aos edifícios tem como objetivo minimizar os consumos energéticos dos mesmos, evitando-se assim o desperdício, sem descurar o conforto térmico dos utilizadores. Não faz qualquer sentido consumir-se energia para o aquecimento de um edifício para posteriormente consumir-se a mesma quantidade de energia para o arrefecimento do mesmo. É sobre esta demanda que os agentes da indústria da construção devem laborar com o intuito de encontrarem um equilíbrio energético entre as fases de aquecimento e arrefecimento dos edifícios, através de soluções construtivas que melhor se adequem às diversas realidades e cenários. E é aqui que o campo da simulação numérica se destaca, e ganha particular interesse. Em primeiro lugar é menos dispendioso e mais rápido quando comparado com medições “*in situ*”. Em segundo lugar, permite criar diversos cenários e realidades, como por exemplo, a alteração dos dados de entrada climática de uma simulação e o seu período de extração de dados, para além de possibilitar a alteração de parâmetros no modelo sujeito à simulação, como arquitetura e geometria, materiais adotados e propriedades térmicas dos mesmos, orientações do edifício, tipos de ocupação, tipos de ventilação entre outros parâmetros variáveis. Claro que os resultados extraídos só serão fidedignos, perante uma calibração e validação do modelo prévia. Nesta dissertação recorreu-se ao *software* de simulação numérica EnergyPlus com o desígnio de extrair resultados referentes às temperaturas interiores de um modelo e averiguar se as medidas de arrefecimento passivo aplicadas, produzem efeitos palpáveis nos resultados extraídos. É através da análise e compreensão dos resultados obtidos pelas simulações, que se podem ou não implementar as técnicas de arrefecimento passivo nos edifícios.

### 6.2. CONSIDERAÇÕES FOCADAS NOS RESULTADOS

Antes de se fazer qualquer leitura e análise sobre os resultados obtidos, é importante referir que as conclusões obtidas, apenas são válidas para a realidade do caso em objeto de estudo, logo não devem ser extrapoladas para cenários distintos do corrente.

Os resultados obtidos dizem respeito a duas técnicas passivas de arrefecimento:

- Ventilação natural;
- Pintura refletante.

As ventilações nas simulações executadas variam entre regime contínuo e regime noturno. A aplicação da tinta altera a emissividade e absorvância solar das superfícies onde é aplicada, baixando os valores destes dois parâmetros comparativamente com a não aplicação de tinta ou com a aplicação de tintas correntes.

Na simulação S0 verificaram-se resultados dissonantes comparativamente com os resultados das medições “*in situ*”, logo a validação do modelo não poderia ser executada. Isto ocorreu devido à temperatura do solo estar configurada por defeito nos 18°C, que é um valor irreal considerando as temperaturas exteriores médias no local. Ultrapassado este imprevisto e corrigida a temperatura do solo, o modelo foi validado através da comparação dos resultados da simulação com os resultados das medições. As curvas dos resultados da simulação não são perfeitamente coincidentes com as curvas das medições, devido ao facto de os dados de entrada não serem exactamente os mesmos entre a simulação e as medições “*in situ*”. Não obstante, os valores obtidos são próximos dos valores das medições e apresentam similaridades suficientes, pois seguem o mesmo padrão e têm amplitudes térmicas semelhantes, para que o modelo fosse validado.

Então é possível obter-se as seguintes conclusões:

- Nas simulações S1 e S2, obteve-se uma redução das temperaturas interiores comparativamente com a simulação S0, esta redução ocorreu devido ao incremento da ventilação, no primeiro caso contínua e no segundo noturna. É legítimo concluir-se que o aumento da ventilação, uma vez que foi o único parâmetro alterado, gera uma redução das temperaturas interiores, mas é importante referir que esta assunção não é válida para todas as situações, pois depende de aspetos climáticos como a temperatura e humidade relativa no exterior;
- Nas simulações S3.0, S3.1 e S3.2 ocorreram descidas de temperaturas interiores mais acentuadas quando comparadas com as descidas de temperatura das simulações do primeiro grupo. Estas descidas indicam que a aplicação da pintura refletante nas paredes exteriores como técnica passiva de arrefecimento é uma medida mais eficiente do que aumentar as taxas de ventilação. Qualquer dos somatórios anuais entre as diferenças de temperaturas interiores positivas decorrentes das simulações S3.0, S3.1 e S3.2 são sempre mais baixos do que o respetivo somatório da simulação S1, que é o mais baixo das simulações do primeiro grupo, em que o parâmetro variável é a ventilação;
- Nas simulações S4.0, S4.1 e S4.2, as descidas das temperaturas interiores são muito ligeiras quando comparadas com as simulações do segundo grupo (S3.0, S3.1 e S3.2). Esta semelhança de resultados entre estes dois grupos de simulações, poderia precipitar uma conclusão errada acerca da aplicação da pintura refletante na cobertura, uma vez que a emissividade e absorvância solar da cobertura são os únicos parâmetros que diferem entre estes dois grupos, concluindo-se erradamente que a sua aplicação na cobertura não produz qualquer efeito significativo na redução das temperaturas interiores. Este raciocínio não é válido, porque o espaço entre o tecto do módulo e a superfície exterior da cobertura é ventilado estando assim sujeito as condições exteriores, devido à ausência de paredes laterais. Assim sendo não é razoável afirmar-se que a aplicação de tintas frias na cobertura não irão influenciar a gama de temperaturas interiores.

De todos os nove cenários simulados, os melhores resultados alcançados, provêm da simulação S4.1, que combina uma ventilação contínua elevada com valores de emissividade e absorvância solar baixos das superfícies exteriores do módulo, resultantes da aplicação da pintura refletante nas paredes e na cobertura. A diferença de resultados é mínima em relação à simulação S3.1, que também combina uma ventilação contínua elevada com a aplicação da pintura refletante mas apenas nas paredes.

Perante todos os resultados obtidos, pode-se concluir que nestas condições simuladas, a aplicação de uma pintura refletante como uma técnica passiva de arrefecimento é ligeiramente mais eficiente do que o recurso à ventilação.

### 6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Considerando o interesse crescente neste domínio da sustentabilidade na construção e eficiência energética dos edifícios, aliado ao veloz desenvolvimento e capacidade dos meios informáticos, é natural esperar-se que a área das simulações numéricas prospere. É muito provável o aparecimento de *softwares* de simulação numérica mais complexos, que considerem mais variáveis, que tenham bases de dados mais completas e precisas de forma a minimizar ou até mesmo anular as diferenças entre a simulação e a realidade.

Seria portanto interessante recorrer-se a outro *software*, concorrente do utilizado nesta dissertação, e executar-se exactamente as mesmas simulações sob as mesmas condições de localização e respetiva zona climática, arquitetura, geometria e materiais do módulo idênticos, considerando os mesmos parâmetros a variar e a analisar, durante o mesmo período de simulação para se comparar os resultados entre os dois *softwares* fazendo-se uma análise a qual das simulações produz resultados mais aproximados da realidade no local.

Outro desenvolvimento futuro, com validade científica passaria por fazer uma tradução entre as técnicas passivas de arrefecimento simuladas para as técnicas de arrefecimento não passivas, fazendo-se uma análise quantitativa de poupança energética e consequente análise económico-financeira.

Novas simulações aplicando outras técnicas passivas de arrefecimento, nomeadamente a utilização de PCM nos elementos construtivos, coberturas verdes, coberturas com água, torres de refrigeração e arrefecimento através do solo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Calautit, J.K., F. Jomehzadeh, and P. Nejat, "Evaluation of a two-sided windcatcher integrated with wing wall (as a new design) and comparison with a conventional windcatcher". ENERGY AND BUILDINGS 126, (agosto), 2016: p. 287-300.
- [2] Mariano, A., R. Cruz, and J. Arenas-Gaitán, *Meta Análises Como Instrumento de Pesquisa: Uma Revisão Sistemática da Bibliografia Aplicada ao Estudo das Alianças Estratégicas Internacionais. Meta Analysis as a Tool of Research: A Systematic Review of Bibliography Applied Study of International Strategic Alliances*. 2011.
- [3] Garcia, C.R.Y. and C.P. Ramirez, *El Meta Análisis Como Instrumento de Investigación en la Determinación y Análisis del Objeto del Estudio: Aplicado al Estudio de Sistema de Información*, in *Congreso de Alicante*. 2004. p. 1-13.
- [4] Garfield, E. *Web of Science*. 2019; Available from: <https://apps.webofknowledge.com>.
- [5] Analytics, C. *InCites journal citation reports*. 2019; Available from: <https://jcr.clarivate.com/JCRLandingPageAction.action>.
- [6] Huntington, E., *The Human Habitat*. 1927, Princeton, New Jersey: D. Van Nostrand Company. Chapter I.
- [7] Thorndike, L., *The Sphere of Sacrobsco and its Complementators*. 1949, Chicago: The University of Chicago Press.
- [8] Köppen-Geiger, *Handbuch der Klimatologie*. Vol. 1. 1936, Berlin: Gebruder Borntraeger.
- [9] Chen, D.H.W.C. *Using the Köppen classification to quantify the climate variation and change*. 2019; Available from: <http://hanschen.org/koppen>
- [10] Olgyay, V., *Design with climate bioclimatic approach to architectural regionalism*. 1963, New Jersey: Princeton University Press. 190 p.-190 p.
- [11] Huntington, E., *Principles of Human Geography*. 6ª edição. 1951, New York: John Wiley and Sons.
- [12] C. E. A. Winslow, L.P.H., *Temperature and Human Life*. 1949, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- [13] Givoni, B., *Climate considerations in building and urban design*. 1998. - XIV, [2], 464 p.
- [14] Fanger, P.O., *Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering*. 1970, Denmark: McGraw-Hill. - 244 p.
- [15] ISO, *Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. ISO 7726:1998*. 1998, EN ISO: Geneve.
- [16] American Society of Heating, R. and E. Air-Conditioning, *Thermal environmental conditions for human occupancy. ANSI/ASHRAE 55: 2013*. 2013: Atlanta. p. - 58 p.
- [17] ISO, *Ergonomics of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria ISO 7730: 2005*. 2005, EN ISO: Geneve. p. - 60 p.
- [18] Baker, N. and M. Standeven, "Thermal comfort for free-running buildings". ENERGY AND BUILDINGS 23, 1996: p. 175-182.
- [19] De Dear, R., G. Brager, and D. Cooper, "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference". Final report, ASHRAE RP-884, 1997.
- [20] Markam, S.F., *Climate and the Energy of Nations*. 1947, London: Oxford University Press.
- [21] Herrington, L.P., *Human Factors in Planning for Climate Control*, in *Research Conference Report No. 1*. 1950, Building Research Advisory Board: Whashington D. C. p. 85-91.
- [22] Brooks, C.E., *Climate in Everyday Life*. 1950, London: Ernest Bemm.
- [23] Houghton, F.C. and C.P. Yaglou, *Cooling effect on human beings produced byby various air velocities*. Vol. 30. 1924, USA: American Society of Heating and Ventilation Engineers.
- [24] Rowley, Jordan, and Snyder, "Comfort reactions of workers, heating, piping, and air conditioning". ASHVE Journal Section, (junho), 1947: p. 113.
- [25] Gonçalves, H. and J.M. Graça. *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em portugal*. 2019; Available from: <http://www.lneg.pt/download/4117/Conceitos%20Bioclim%C3%A1ticos.pdf>.

- [26] Matias, L.M.C., *"Desenvolvimento de um modelo adaptativo para definição das condições de conforto térmico em Portugal"*. 2010, Universidade Técnica de Lisboa, IST.
- [27] Humphreys, M., *"Field studies of thermal comfort compared and applied"*. Building Research Establishment CP 76/65, 1975.
- [28] Brager, G. and R. De Dear, *"Thermal adaptation in the building environment: a literature review"*. Energy and Buildings 27, 1998: p. 83-96.
- [29] CEN, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, EN 15251:2006*. 2006.
- [30] Akeiber, H., et al., *"A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes"*. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 60, (julho), 2016: p. 1470-1497.
- [31] Projeteee. *Estratégias bioclimáticas*. 2019; Available from: <http://projeteee.mma.gov.br/estrategias-bioclimaticas/>.
- [32] Calautit, J.K., F. Jomehzadeh, and P. Nejat, *"A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment"*. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 70, (abril), 2017: p. 736-756
- [33] Calautit, J.K., F. Jomehzadeh, and P. Nejat, *"Application of wind as a renewable energy source for passive cooling through windcatchers integrated with wing walls"*. ENERGIES 11, 2536 (outubro), 2018.
- [34] Hughes, B., H. Chaudhry, and S. Ghani, *"A review of sustainable cooling technologies in buildings"*. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 15, (agosto), 2011: p. 3112-3120.
- [35] Santamouris, M. and D. Kolokotsa, *"Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art"*. ENERGY AND BUILDINGS 57, (fevereiro), 2013: p. 74-94.
- [36] Kabore, M., et al., *"Indexes for passive building design in urban context - indoor and outdoor cooling potentials"*. ENERGY AND BUILDINGS 172, (agosto), 2018: p. 315-325.
- [37] Artmann, N., H. Manz, and P. Heiselberg, *"Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation"*. RENEWABLE ENERGY 33, (dezembro), 2008: p. 2589-2598.
- [38] Kubota, T., D. Chyee, and S. Ahmad, *"The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia"*. ENERGY AND BUILDINGS 41, (agosto), 2009: p. 829-839.
- [39] Bozonnet, E., M. Doya, and F. Allard, *"Cool roofs impact on building thermal response: A French case study"*. ENERGY AND BUILDINGS 43, (novembro), 2011: p. 3006-3012.
- [40] Pisello, A. and F. Cotana, *"The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring"*. ENERGY AND BUILDINGS 69, (fevereiro), 2014: p. 154-164.
- [41] Pisello, A., F. Rossi, and F. Cotana, *"Summer and Winter Effect of Innovative Cool Roof Tiles on the Dynamic Thermal Behavior of Buildings"*. ENERGIES 7, (abril), 2014: p. 2343-2361.
- [42] Pisello, A., et al., *"On an innovative integrated technique for energy refurbishment of historical buildings: Thermal-energy, economic and environmental analysis of a case study"*. APPLIED ENERGY 162, (janeiro), 2016: p. 1313-1322.
- [43] Romeo, C. and M. Zinzi, *"Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study"*. ENERGY AND BUILDINGS 67, (dezembro), 2013: p. 647-657.
- [44] Doya, M., E. Bozonnet, and F. Allard, *"Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment"*. ENERGY AND BUILDINGS 55, (dezembro), 2012: p. 42-50.
- [45] Zhou, J. and Y. Chen, *"A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China"*. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 14, (maio), 2010: p. 1321-1328.

- [46] Sadineni, S., S. Madala, and R. Boehm, "Passive building energy savings: A review of building envelope components". RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 15, (outubro), 2011: p. 3617-3631.
- [47] Yildiz, Y. and Z. Arsan, "Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates". ENERGY 36, (julho), 2011: p. 4287-4296.
- [48] Miller, W., L. Buys, and J. Bell, "Performance evaluation of eight contemporary passive solar homes in subtropical Australia". BUILDING AND ENVIRONMENT 56, (outubro), 2012: p. 57-68.
- [49] Al-Hemiddi, N.A., "Passive cooling applicable for buildings in hot dry climate of Saudi Arabia". 1995, Graduante School of Architecture, UCLA.
- [50] Khambadkone, N. and R. Jain, "A bioclimatic analysis tool for investigation of the potential of passive cooling and heating strategies in a composite Indian climate". BUILDING AND ENVIRONMENT 123, (outubro), 2017: p. 469-493.
- [51] Manzano-Agugliaro, F., F. Montoya, and A. Sabio-Ortega, "Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort". RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS 49, (setembro), 2015: p. 736-755.
- [52] Zinzi, M. and S. Agnoli, "Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region". ENERGY AND BUILDINGS 55, (dezembro), 2012.
- [53] Castleton, H., et al., "Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit". ENERGY AND BUILDINGS 42, (outubro), 2010: p. 1582-1591.
- [54] Karachaliou, P., M. Santamouris, and H. Pangalou, "Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens". ENERGY AND BUILDINGS 114, (fevereiro), 2016: p. 256-264.
- [55] Maerefat, M. and A. Haghghi, "Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney". RENEWABLE ENERGY 35, (outubro), 2010: p. 2316-2324.
- [56] Chavez, J. and F. Melchor. "Application of combined passive cooling and passive heating techniques to achieve thermal comfort in a hot dry climate". in ISES SOLAR WORLD CONGRESS. Novembro 2013. Cancun, México.
- [57] Soares, N., et al., "Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency". ENERGY AND BUILDINGS 59, (abril), 2013: p. 82-103.
- [58] Google. *Google Maps*. 2019; Available from: <https://www.google.pt/maps/>.
- [59] Marcolini, M., Barreira E., Almeida R.M.S.F., *Avaliação da Eficácia de Técnicas de Arrefecimento Passivo Aplicadas em Edifícios Localizados em Climas Quentes e Secos – Montagem de Células de Ensaio e Resultados Preliminares*, in *Reabilitar e Construir de Forma Sustentável*. Novembro 2018, Atas do Congresso: Feup Porto. p. 106-114.
- [60] ABNT, *Desempenho térmico de edificações. NBR 15220*. 2003, ABNT/CB-02: Rio de Janeiro. p. -66p.