

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Ciências
ULisboa

Análise de aplicação de medidas de melhoria no desempenho e conforto térmico de uma habitação de baixo custo de construção em climas quentes.

Carolina Sofia Jorge Carneiro

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Guilherme Carrilho da Graça

Aos meus pais, Paulo e Fernanda, e à minha irmã, Joana.

“A persistência é o caminho do êxito”

Charles Chaplin

Agradecimentos

A presente dissertação foi desenvolvida na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Portugal, e representa o culminar de uma longa jornada. Esta não teria sido possível sem o importante contributo, apoio e incentivo de pessoas incríveis que cruzaram a minha vida e o meu percurso académico e profissional.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador Professor Guilherme Carrilho da Graça pela oportunidade de trabalhar neste tema bem como as orientações, o apoio, a disponibilidade e a partilha do saber que permitiram a realização desta dissertação. Ao Arquiteto Nadir Bonaccorso por toda a disponibilidade, apoio e dedicação na ajuda que prestou durante o decorrer do trabalho desenvolvido. Também um agradecimento especial ao Engenheiro Rafael Palma pela disponibilidade e partilha de conhecimentos.

Desejo igualmente agradecer aos meus colegas de curso que me marcaram nestes anos de faculdade, Adriana Cardoso, Anca Ciuntu, Mariana Graça, Bruno Mota e André Pires. Pessoas com as quais tive o privilégio de trabalhar, estudar, rir, que sempre estiveram nos bons e nos maus momentos e que para sempre estarão no meu coração.

A toda a família da Roçadas, por terem estado comigo ao longo de toda esta jornada, por me terem ajudado manter-me sempre no caminho correto e por me apoiarem sempre que necessitei. Em particular à Vanessa Trindade pela amizade, paciência, carinho e ombro amigo presente ao longo da minha vida.

À minha família Paulo, Fernanda, Joana e aos meus avós um agradecimento especial pela compreensão, suporte, positividade, inspiração, paciência e amor que constantemente me deram.

Quero agradecer a Deus, por tudo.

Resumo

O uso de elementos de baixo custo de construção, da simplificação do tipo de construção e da deteriorada infraestrutura em habitações nas favelas, conduz a que o conforto térmico da habitação seja praticamente nulo. Estas infraestruturas podem ser encontradas em zonas de clima quente e húmido. Esta dissertação tem como objectivo avaliar algumas medidas de melhoria para o conforto térmico de uma habitação de baixo custo de construção.

Foram realizados ensaios em células de teste que simulam este tipo de habitações, nas quais foram implementadas e analisadas seis propostas de melhoria de conforto térmico:

- Duas medidas de isolamento no teto da habitação: isolamento com garrafas *Tetra Pak* e isolamento radiante;
- Duas medidas que promovem a ventilação natural: chaminé simples e chaminé solar;
- Duas medidas conjuntas: a junção do isolamento *Tetra Pak* e chaminé simples, e a junção do isolamento barreira radiante e chaminé solar.

Nas medidas de isolamento, durante o período diurno o isolamento radiante apresenta melhores resultados, com uma diminuição da temperatura de 2.72 °C. No período noturno o isolamento *Tetra Pak* apresenta uma maior aproximação ao limite mínimo de conforto, com um aumento de 2.34 °C.

As temperaturas operativas das medidas de ventilação apresentam uma atenuação pouco significativa, observando-se uma diferença máxima de 0.82 °C. Ao nível da velocidade do ar no interior da habitação, estas medidas não geram um fluxo de ar com velocidade suficiente para influenciar a temperatura sentida.

Os ensaios com medidas conjuntas de isolamento e ventilação apresentam resultados intermédios quando comparados com as medidas de isolamento e medidas de ventilação. O conjunto chaminé simples e isolamento *Tetra Pak* apresenta melhores resultados na atenuação da temperatura operativa, face ao conjunto chaminé solar e isolamento radiante.

A partir dos resultados obtidos, a medida mais eficaz foi o isolamento.

Palavras-Chave: Habitação de baixo custo construção, Conforto térmico, Isolamento, Ventilação natural.

Abstract

The use of low-cost construction elements, the simplification of the type of construction and the deteriorated infrastructure in slums, means that the thermal comfort is practically null. These types of infrastructure can be found in hot and humid climates. The aim of this dissertation is the evaluation of some measures for improvement of thermal comfort.

In order to improve the thermal conditions inside, tests were carried out on test cells that simulate this type of houses, in which six proposals for improving thermal comfort were implemented and analyzed:

- Two insulation measures on the roof of the house: insulation with Tetra Pak bottles and radiant barrier;
- Two measures that promote natural ventilation: simple chimney and solar chimney;
- Two joint measures: the junction of the Tetra Pak insulation and single chimney, and the junction of the radiant barrier and solar chimney.

Of the insulation measures, the radiant barrier presents better results during the day, with a temperature decrease of 2.72 °C. At night, the Tetra Pak insulation presents a greater approximation to the minimum comfort limit, with an increase of 2.34 °C.

The operating temperatures of the ventilation measures show little attenuation, with a maximum difference of 0.82 °C. As of the air velocity inside the house, these measures do not generate an air flow with enough speed to influence the temperature felt by the occupant.

Tests with joint insulation and ventilation measures show intermediate results when compared to insulation and ventilation measures. The simple chimney plus Tetra Pak insulation presents better results in attenuating the operating temperature, when compared to the solar chimney set plus radiant barrier.

From the results obtained, insulation measures were the most effective improving the thermal comfort of poorest quality housing.

Keywords: Poorest quality housing, Thermal comfort, Insulation, Natural Ventilation.

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas.....	xiv
Siglas e Acrónimos.....	xv
Simbologia e Notações.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento Geral.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	1
2. Estado da Arte	3
2.1. Pobreza Energética e Localização Geográfica	3
2.2. Clima da Região em Estudo	4
2.3. Habitação de baixo custo de construção.....	8
2.4. Conforto térmico	9
2.5. Arrefecimento Passivo	10
2.6. Isolamento	12
2.7. Infiltração e Ventilação Natural	13
3. Métodos.....	15
3.1. Instalações experimentais.....	15
3.2. Planeamento do trabalho experimental	18
3.3. Metodologia da análise dos dados.....	22
4. Resultados e Discussão	25
4.1. Controlo.....	25
4.2. Isolamento	27
4.2.1. Isolamento <i>Tetra Pak</i>	27
4.2.2. Isolamento barreira radiante	30
4.3. Ventilação.....	33
4.3.1. Chaminé Simples.....	33
4.3.2. Chaminé Solar	34
4.4. Ventilação e Isolamento	36
4.4.1. Chaminé simples e isolamento <i>Tetra Pak</i>	36

4.4.2. Chaminé Solar e Isolamento Barreira Radiante	39
4.5. Síntese de Resultados	41
5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	43
6. Referências Bibliográficas	45

Índice de Figuras

Figura 2.1: Dados da IEA sobre a quantidade de população sem acesso a eletricidade para 2016 em milhões [2].....	4
Figura 2.2: Diagrama mundial da classificação do tipo de clima segundo Koppen-Geiger [3].....	5
Figura 2.3: Temperatura e Precipitação média mensal de Brasília, Brasil; Linha Vermelha: Temperatura; Colunas Azuis: Precipitação. Adaptado de [4].....	5
Figura 2.4: Temperatura e Precipitação média mensal de Caracas, Venezuela; Linha Vermelha: Temperatura; Colunas Azuis: Precipitação. Adaptado de [5].	6
Figura 2.5: Irradiação Global média anual (W/m ²), em Brasília, Brasil. Adaptado de [6].....	7
Figura 2.6: Irradiação Global média anual (W/m ²), em Caracas, Venezuela. Adaptado de [6].	7
Figura 2.7: Favelas em a) Caracas, Venezuela [26]; b) Brasília, Brasil [27].	8
Figura 2.8: Diagrama do método da zona de conforto, segundo o Standard 55-2010 da ANSI/ASHRAE [10].	9
Figura 2.9: Intervalo das temperaturas operativas e velocidade do ar aceitáveis para a zona de conforto, segundo o Standard 55-2010 da ANSI/ASHRAE [10].	10
Figura 2.10: Diagrama de técnicas de arrefecimento passivo. Adaptado de [13].	11
Figura 2.12: Esquema de um sistema: a) de ventilação cruzada; b) ventilação por efeito de chaminé; c) ventilação por abertura única. [24].....	14
Figura 3.1: Fachada a Este e planta da célula de teste.....	15
Figura 3.2: Fachada a Sul das duas células de teste presentes no Campus solar da FCUL.....	16
Figura 3.3: Localização do piranómetro e do anemómetro na célula de teste.....	16
Figura 3.4: Localização dos sensores de temperatura no interior das células de teste, vista de sul.	17
Figura 3.5: Localização dos sensores de temperatura no interior das células de teste, vista de norte...	17
Figura 3.6: Células de teste no Campus Solar da FCUL.....	18
Figura 3.7: Camadas que compõem as embalagens Tetra Pak [28].	19
Figura 3.8: Montagem do isolamento <i>Tetra Pak</i> em conjuntos, para facilidade de aplicação no teto da célula de estudo.	20
Figura 3.9: Aplicação do isolamento <i>Tetra Pak</i> na célula CT.....	20
Figura 3.10: Aplicação do isolamento radiante na célula CT.....	21
Figura 3.11: Dimensões da chaminé simples aplicada na célula CT.....	21
Figura 3.12: Dimensões da chaminé solar aplicada no telhado da célula CT.	22
Figura 3.13: Valores de A para aplicação na equação da temperatura operativa [10].	23
Figura 4.1: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 23 de junho a 30 de junho. Azul –Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;.....	25
Figura 4.2: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para o dia 24 de julho. Azul –Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;.....	26
Figura 4.3: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 30 julho a 6 de agosto. Azul –Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;.....	27
Figura 4.4: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 16 de agosto a 21 de agosto.	28
Figura 4.5: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para o dia 17 de agosto.	28

Figura 4.6: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura de superfície inferior do isolamento <i>Tetra Pak</i> da célula CT, para o dia 17 de agosto. Azul – Temperatura de superfície do telhado da célula REF; Vermelho – Temperatura de superfície inferior do isolamento na célula CT.	29
Figura 4.7: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 5 a 16 de agosto.	30
Figura 4.8: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas, para o dia 15 de agosto.	31
Figura 4.9: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura de superfície inferior do isolamento da célula CT, para o dia 15 de agosto. Azul – Temperatura de superfície do telhado da célula REF; Vermelho – Temperatura da superfície inferior do isolamento da célula CT.	32
Figura 4.10: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 30 de agosto a 2 de setembro.	33
Figura 4.11: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para os dias 30 e 31 de agosto.	34
Figura 4.12: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 2 a 9 de setembro.	35
Figura 4.13: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para o dia 4 de setembro.	36
Figura 4.14: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 26 a 30 de agosto.	37
Figura 4.15: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para o dia 29 de agosto.	37
Figura 4.16: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura de superfície do isolamento inferior da célula CT para o dia 29 de agosto.	38
Figura 4.17: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 9 a 13 de setembro.	39
Figura 4.18: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura da superfície inferior do isolamento da célula de teste para o dia 12 de setembro.	40
Figura 4.19: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura da superfície inferior do isolamento da célula CT para o dia 12 de setembro.	41

Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Planificação das diferentes soluções estudadas.	19
Tabela 3.2: Área relativa de cada superfície para o cálculo da temperatura radiante.	23
Tabela 4.1: Resultados obtidos para as soluções estudadas.	42

Siglas e Acrónimos

CT	Célula de teste
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
REF	Célula de referência

Simbologia e Notações

A_{Du}	Área de DuBois
C_{ext}	Concentração média no ar exterior do CO_2
C_{tp}	Limiar de proteção para a concentração de CO_2
G_{CO_2}	Taxa total de geração de CO_2
K	Concentração do poluente
K_0	Concentração do poluente inicial
M	Taxa de metabolismo
N	Número de ocupantes
Q_{AN}	Caudal mínimo de ar novo
T_a	Temperatura do ar ambiente
T_{op}	Temperatura operativa
T_r	Temperatura média radiante
$u_{ar, máxima}$	Velocidade máxima do ar
$u_{ar, média}$	Velocidade média do ar
\dot{V}	Caudal de ar
V	Volume
$\Delta T_{operativa, máxima}$	Diferença máxima de temperatura operativa
$\Delta T_{superfície cobertura, máxima}$	Diferença de temperatura de superfície da cobertura

1. Introdução

1.1. Enquadramento Geral

As favelas podem ser definidas como áreas residenciais de alta densidade populacional composta por moradias precárias, muitas vezes em situações de infraestrutura deteriorada, habitada por moradores menos favorecidos.

O uso de elementos de baixo custo de construção, da simplificação do tipo de construção e a deteriorada infraestrutura, conduz a que o conforto térmico neste tipo de habitações seja praticamente nulo. Podemos encontrar este tipo de áreas em grandes cidades por todo o globo, alguns exemplos são Dhaka no Bangladesh, Brasília no Brasil, Ho Chi Minh no Vietname, Jarkata na Indonésia, Caracas na Venezuela entre outros.

Além disso o clima em que a maioria destas habitações se insere apresenta valores médios mensais de temperatura acima dos 18 °C, e de irradiância global média de 800 W/m². Devido a este clima, característico das regiões em estudo, muitas das necessidades são no arrefecimento das habitações sendo que a maioria dos ganhos de calor provêm dos telhados das habitações.

Devido à necessidade de conforto, bem como a dificuldades financeiras das populações residentes neste tipo de habitações, é necessário encontrar medidas de melhorias de baixo custo que permitam o aumento do conforto térmico dos seus ocupantes.

1.2. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é avaliar algumas medidas de melhoria para o conforto térmico de uma habitação de baixo custo de construção. Adicionalmente, este projeto inclui três objetivos específicos:

- Analisar o desempenho térmico de uma habitação de baixo custo de construção.
- Aplicar várias medidas de melhoria de conforto térmico.
- Analisar o desempenho das medidas de melhoria de conforto térmico.

Para dar resposta a estes objetivos, serão analisadas propostas de melhoria de condições de conforto térmico. A primeira proposta é a aplicação de isolamento térmico, de forma a criar uma atenuação térmica. Outra proposta a ser estudada é a instalação de chaminés para promoção de ventilação natural. Será criada uma instalação experimental para realização de ensaios que permitirão analisar o desempenho térmico da habitação e das respetivas medidas de melhoria aplicadas.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação apresenta uma estrutura com 4 secções, o estado da arte, os métodos, a apresentação e discussão de resultados e a conclusão.

1. INTRODUÇÃO

Na Secção **2. Estado da arte** apresenta-se uma visão geral do ambiente climático e social da área em estudo, uma introdução aos conceitos aplicados nesta dissertação, bem como uma explicação das soluções aplicadas na fase experimental.

Na secção **3. Métodos** apresenta-se as instalações experimentais na qual ocorreu a experiência, bem como as medidas e a análise aplicada.

Na secção **4. Apresentação e discussão de resultados**, apresentam-se os resultados obtidos de forma a avaliar as melhorias ao conforto térmico, por comparação a uma referência que não sofre alterações, discutindo-se por fim esses resultados de forma a perceber qual a melhor solução estudada.

Por fim apresenta-se as **5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros** que se pode retirar do estudo efetuado para presente dissertação.

2. Estado da Arte

2.1. Pobreza Energética e Localização Geográfica

A energia é fundamental para abordar muitos dos desafios atuais do desenvolvimento global, incluindo a pobreza, a desigualdade, as mudanças climáticas, a saúde e a educação. No futuro próximo, o setor energético terá uma grande preocupação com a pobreza energética. A pobreza é uma constatação na vida de milhões de pessoas, e a pobreza energética é tanto uma causa quanto uma consequência disso. Segundo Mikel González-Eguino [1] a pobreza energética pode ser descrita como “*ter um nível de consumo de energia que é insuficiente para atender às necessidades básicas*”, e pode ser medido usando diferentes abordagens:

- Abordagem técnica: na qual a pobreza energética é um problema no acesso a serviços de energia (ou seja, eletricidade ou outras fontes que não a biomassa) para cozinhar e aquecer em casa;
- Abordagem física: que estima um consumo mínimo de energia associado às necessidades básicas;
- Abordagem econômica: que busca estabelecer a maior porcentagem de renda que é razoável destinar para os gastos energéticos.

A pobreza energética tem implicações significativas, uma vez que as necessidades básicas normais, como cozinhar, ferver água, aquecer e iluminar a casa, são comprometidas. O uso de energia em muitas casas nos países pobres é caracterizado apenas pelo uso de biomassa para cozinhar e aquecer. Esse tipo de uso de energia tem efeitos substanciais na saúde, pois está associado a altos níveis de poluentes devido à combustão ineficiente e à falta de ventilação nos domicílios.

Registos da IEA (*Internacional Energy Agency*) de 2017 indicaram que quase mil milhões de pessoas não têm acesso à eletricidade e cerca de 2,7 mil milhões dependem da biomassa para suprir as suas necessidades básicas [2]. Além disso, milhões de pessoas que têm acesso a infraestruturas não conseguem satisfazer as suas necessidades básicas de energia porque não a podem pagar. Quase 95% das pessoas sem acesso a eletricidade vivem na Ásia e na África Subariana. Existem outras áreas na América Latina, no Médio Oriente e no Norte da África que também não têm acesso a esses serviços como se pode observar na Figura 2.1.

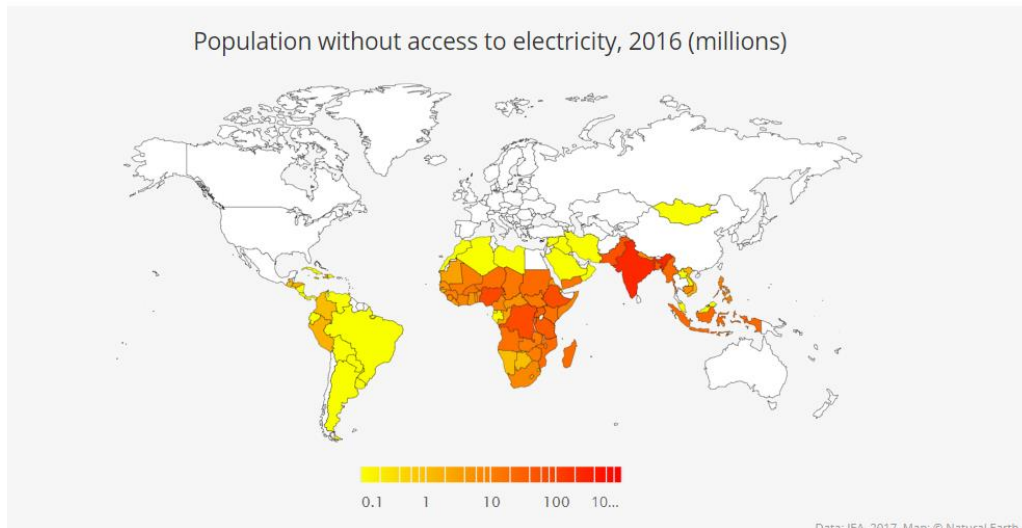


Figura 2.1: Dados da IEA sobre a quantidade de população sem acesso a eletricidade para 2016 em milhões [2].

Pela Figura 2.1 observa-se que a maioria das regiões onde a população não tem acesso a eletricidade, estão localizadas dentro da zona tropical, isto é a região entre o Trópico de Caranguejo ($23^{\circ}27'N$) e o Trópico de Capricórnio ($23^{\circ}27'S$).

2.2. Clima da Região em Estudo

Na zona tropical o clima é muito variável e pode ser classificado em vários grupos segundo a escala de Köppen-Geiger [3] como se pode verificar na Figura 2.2.

A classe Af representa o clima equatorial caracterizado pelas florestas tropicais, por médias de temperaturas mensais acima dos $18^{\circ}C$ e a precipitação média mensal superior a 60 mm, sendo a precipitação anual superior a 2000 mm.

A classe Am representa o clima tropical de monção também caracterizado pelas temperaturas médias mensais acima dos $18^{\circ}C$ mas uma precipitação média mensal inferior à da classe Af, sendo a precipitação anual cerca de 100 mm.

Já a classe Aw, apresentando valores médios mensais de temperatura acima dos $18^{\circ}C$, distingue-se das outras pelo nível de precipitação inferior a 60 mm de precipitação média mensal e menos de 100 mm de precipitação anual.

Alguns pontos da região mostrada na Figura 2.2, também apresentam a classe Bwh e Bsh que representam o clima Árido e Semiárido. O clima Árido (Bwh) tem como características uma precipitação média anual de 25 a 200 mm e uma temperatura média anual superior a $18^{\circ}C$. Já o clima Semiárido (Bsh) apresenta uma precipitação média anual de 200 a 500 mm e uma temperatura média anual superior a $18^{\circ}C$.

Apesar de esta zona tropical ser vasta no que resulta da diversidade do clima é importante perceber que o clima em estudo é a classe Aw típica das regiões de Brasília no Brasil e de Caracas na Venezuela.

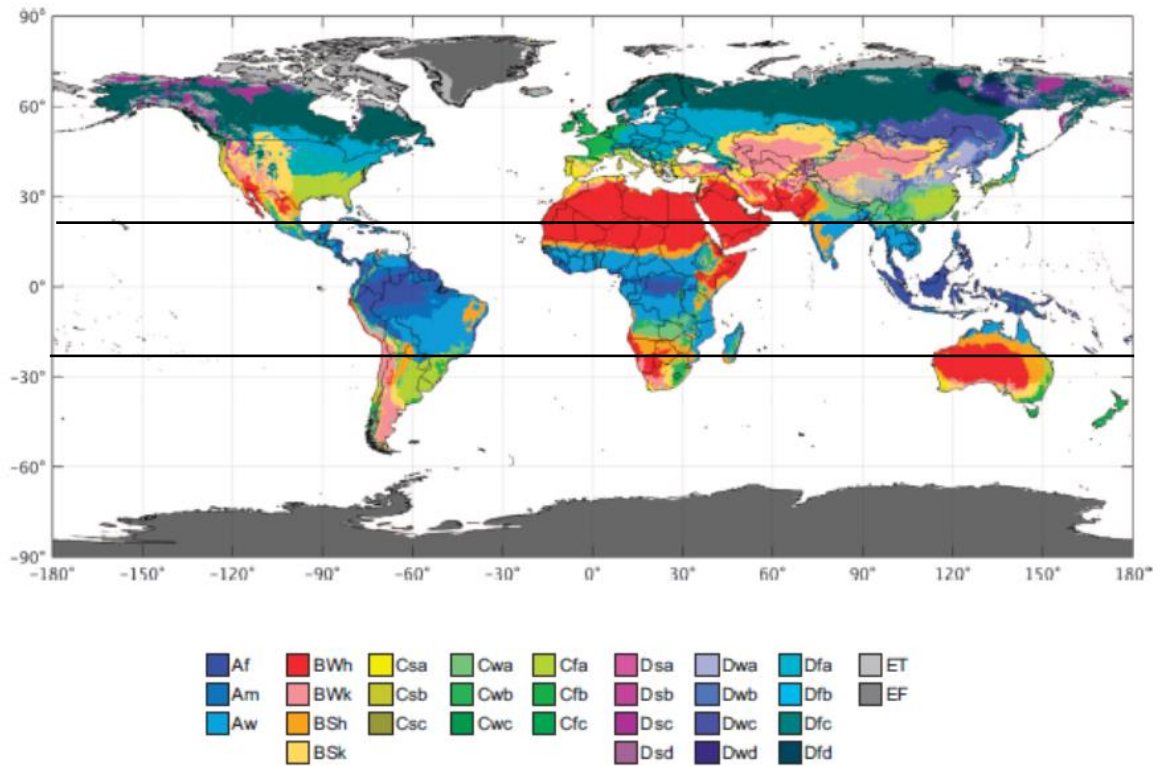


Figura 2.2: Diagrama mundial da classificação do tipo de clima segundo Köppen-Geiger [3].

De seguida estão representados os gráficos da precipitação e da temperatura média da região de Brasília na Figura 2.3 [4].

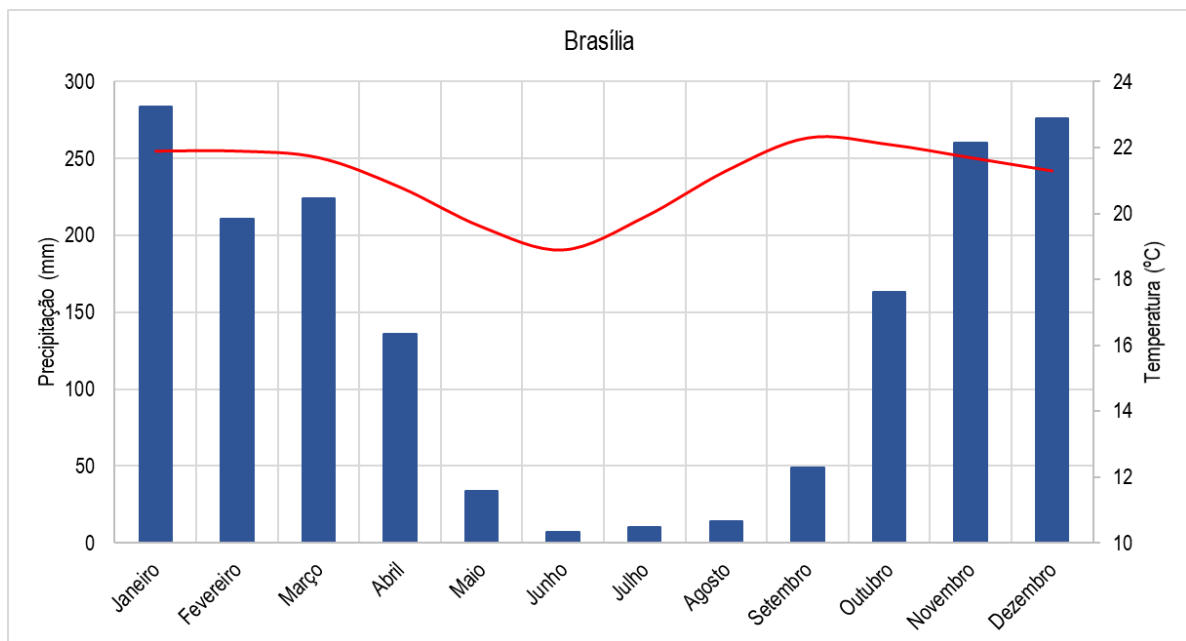


Figura 2.3: Temperatura e Precipitação média mensal de Brasília, Brasil; Linha Vermelha: Temperatura; Colunas Azuis: Precipitação. Adaptado de [4].

A temperatura média anual para Brasília é de 21.1 °C e a precipitação média anual é de 1668 mm.

Representou-se também na Figura 2.4 os gráficos da precipitação e da temperatura média anual da região de Caracas [5].

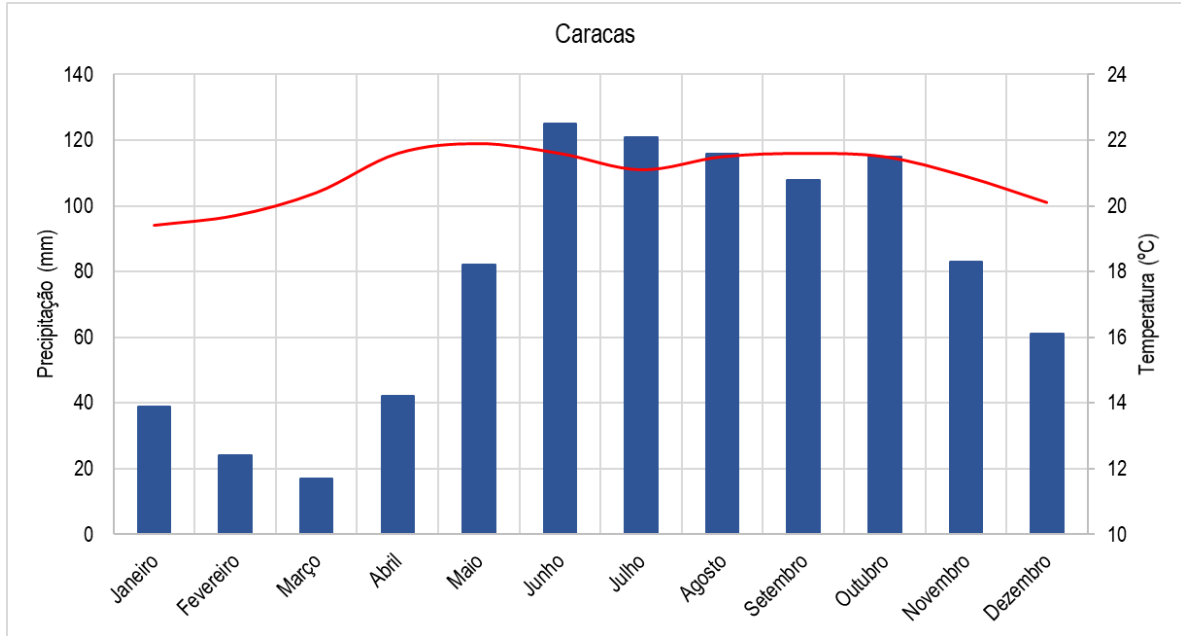


Figura 2.4: Temperatura e Precipitação média mensal de Caracas, Venezuela; Linha Vermelha: Temperatura; Colunas Azuis: Precipitação. Adaptado de [5].

Verifica-se que em ambos os casos a temperatura média anual é cerca de 20 °C sendo que no caso de Caracas os meses com mais precipitação são a partir de junho a outubro, enquanto que para Brasília os meses com mais precipitação são de novembro a março.

Com a ajuda do software PVGIS é possível representar-se nas Figura 2.5 e Figura 2.6 os gráficos da irradiância global média anual para as regiões de Brasília e de Caracas, respetivamente [6].

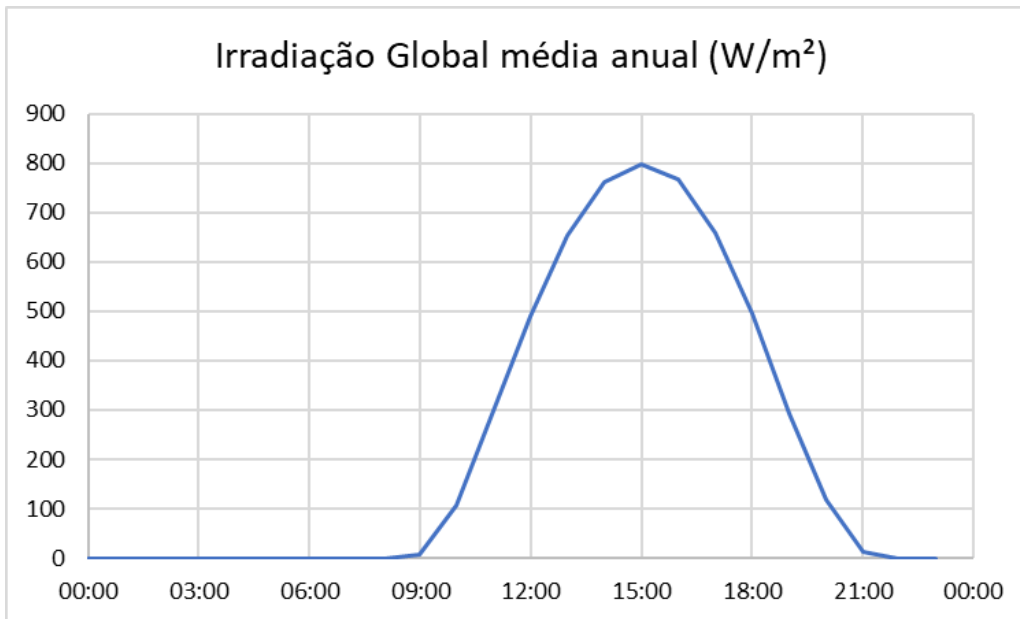


Figura 2.5: Irradiação Global média anual (W/m^2), em Brasília, Brasil. Adaptado de [6].

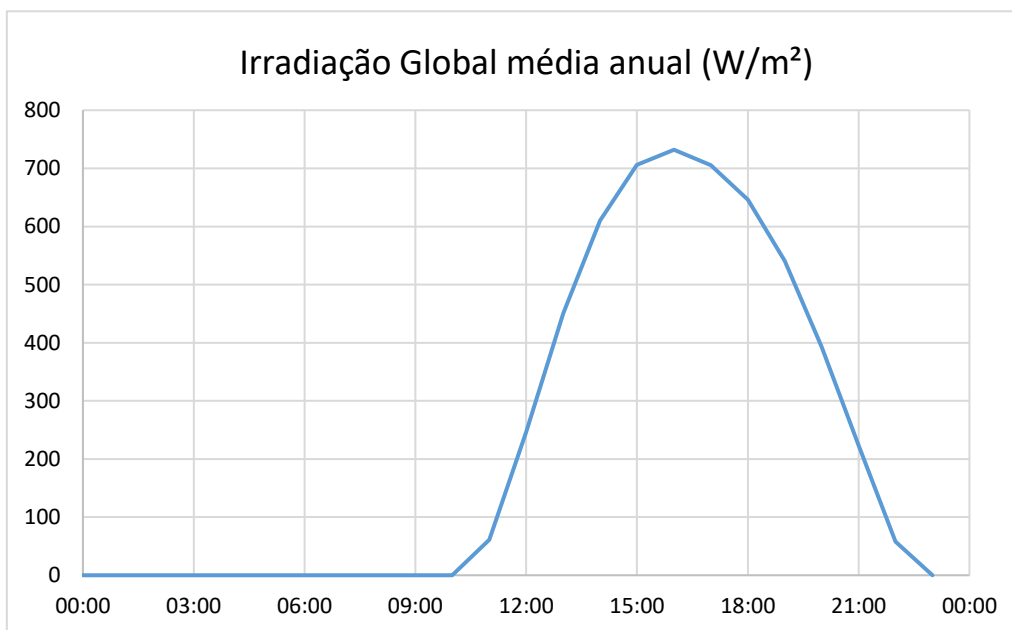


Figura 2.6: Irradiação Global média anual (W/m^2), em Caracas, Venezuela. Adaptado de [6].

Verifica-se em ambos os casos que a irradiação global média anual máxima varia entre $730 W/m^2$ e os $800 W/m^2$.

Após esta análise no clima de classe Aw, pretende-se que os dias analisados tenham uma semelhança ao referido acima, ou seja, uma temperatura média superior a $20^{\circ}C$, e uma irradiação diária máxima entre os 700 e os $800 W/m^2$.

Também é importante definir o tipo de estruturas das habitações bem como definir o que é o conforto térmico.

2.3. Habitação de baixo custo de construção

Segundo um relatório da UN-Habitat as favelas podem ser definidas como áreas residenciais de alta densidade populacional composta por moradias precárias, isto é, habitações de baixo custo construção, muitas vezes em situações de infraestrutura deteriorada, habitada por moradores com baixo rendimento [7][8].

As favelas podem ser caracterizadas pelas seguintes condições: estruturas habitacionais degradadas, falta de ventilação, sobrelotação, planeamento urbano irregular, iluminação inadequada, escassez de água potável, ausência de instalações sanitárias e indisponibilidade de serviços sociais básicos.

Das características acima referidas o planeamento urbano irregular conduz a uma falta de vegetação e de espaço dedicado às atividades urbanas, sendo que nestes pequenos espaços incide radiação solar direta ou, em alguns casos, nenhum tipo de radiação [9]. Devido a esta disposição próxima dos edifícios, as superfícies nas quais incide mais radiação são as dos telhados, correspondendo a ganhos solares. Devido a estes ganhos, gera-se desconforto térmico no interior das habitações já que a distribuição do calor é assimétrica, contrastando as temperaturas elevadas das zonas superiores (teto) com as temperaturas reduzidas das zonas inferiores (chão).

Geralmente, o nível de pobreza nas favelas influencia o consumo de energia utilizado ao nível doméstico, que se verifica na falta de acesso a energia comercial mais limpa e a equipamentos eficientes. Para além disso, conduz a uma alta dependência de biomassa tradicional, que é uma fonte de energia poluente. É necessário ter presente que em algumas destas regiões não existem infraestruturas capazes de fazer chegar a eletricidade a essas habitações, sendo necessário aumentar o conforto dentro das casas de forma passiva, para que as pessoas não dependam apenas dos combustíveis poluentes.

O tipo de construção das habitações em ambientes de favelas nestas regiões do globo varia consoante o país, neste caso de estudo, o foco é em habitações encontradas em regiões da América Latina como Brasília ou Caracas (Figura 2.7).



a)



b)

Figura 2.7: Favelas em a) Caracas, Venezuela [10]; b) Brasília, Brasil [11].

Os materiais usados na construção das habitações são:

- Cobertura: telhas de cerâmica ou chapa de aço galvanizado, sobre uma estrutura de madeira.
- Paredes: alvenaria de cimento ou cerâmico, suportados ou não por colunas de betão.

Esta dissertação pretende alcançar formas de melhoria para o conforto térmico destas habitações, de forma a melhorar as condições de vida destas populações.

2.4. Conforto térmico

Segundo “ANSI/ASHRAE Standard 55-2010”, pode-se definir conforto térmico como “*a condição que expressa satisfação com o ambiente térmico, e é avaliada de uma forma subjetiva*”, no entanto pode-se definir uma zona conforto consoante seis fatores principais sendo estes a taxa metabólica, o isolamento da roupa, a temperatura do ar, a temperatura radiante, a humidade e a velocidade do ar. Portanto, para determinar as condições térmicas aceitáveis em espaços ocupados existe um conjunto de variáveis que devem ser consideradas [12].

A primeira variável é a Temperatura Operativa, que permite definir uma zona de conforto. Obtêm-se as temperaturas operativas pela média entre as temperaturas médias radiantes e pelas temperaturas do ar. Para a determinação das temperaturas operativas limites da zona de conforto, utiliza-se um diagrama psicométrico como se mostra na Figura 2.8.

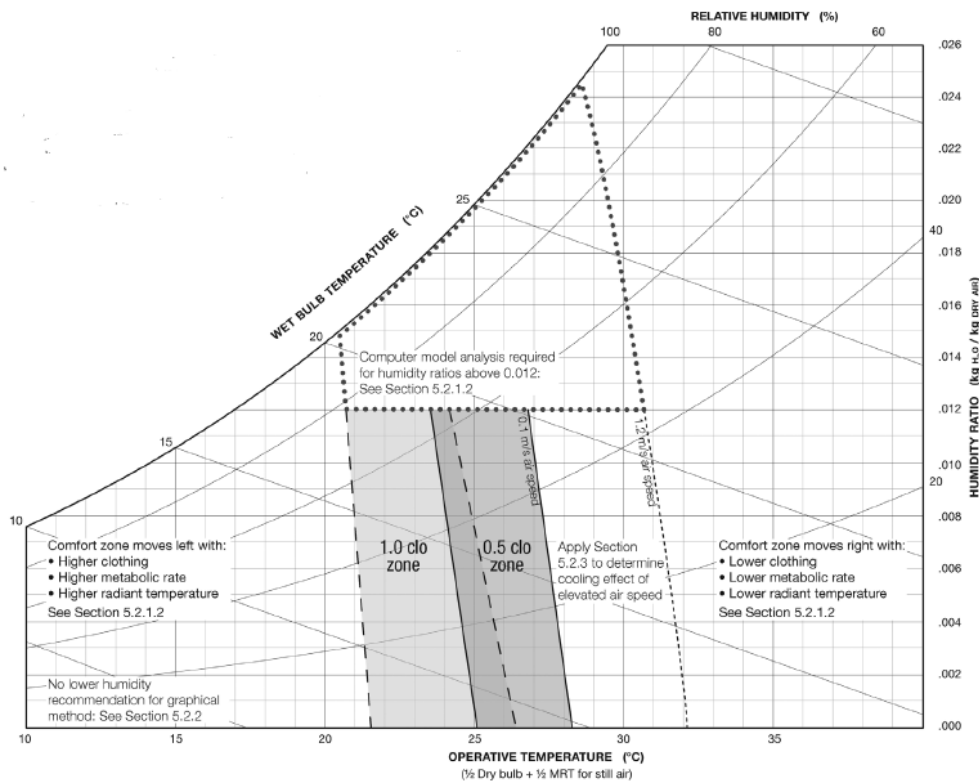


Figura 2.8: Diagrama do método da zona de conforto, segundo o Standard 55-2010 da ANSI/ASHRAE [12].

O arrefecimento passivo pode ser descrito como um método de melhoria no conforto térmico dos edifícios que se foca no controlo dos ganhos de calor bem como a dissipação de calor do edifício.

Segundo o artigo “*Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structure: The state of the art*” [13], o arrefecimento passivo em edifícios já se mostra como uma técnica em fase de maturidade, sendo que mostra resultados para o conforto térmico e a qualidade de ar interior bem como a minimização dos consumos energéticos.

Pode-se enquadrar o arrefecimento passivo em três passos, a **prevenção**, a **modulação** e a **dissipação** dos ganhos de calor.

A **prevenção** dos ganhos de calor pretende condicionar a temperatura do ar no interior da habitação. Existem 5 abordagens para a prevenção dos ganhos de calor, sendo estas: as perdas por radiação, perdas por condução, pela massa térmica dos materiais, a criação de um microclima e por fim através de arrefecimento pelo solo.

A **modelação** dos ganhos de calor pretende armazenar o excesso de calor na estrutura dos materiais. A abordagem utilizada na aplicação deste parâmetro envolve a massa térmica do edifício.

Por fim a **dissipação** do calor tem por base técnicas que permitam a transferência do excesso de calor para um ambiente com uma temperatura mais baixa. Pode-se utilizar 4 abordagens para a dissipação. Estas abordagens envolve a humedificação, a desumidificação, a ventilação natural e ventilação forçada [14].

De seguida apresenta-se na Figura 2.10 as diferentes técnicas dos tipos de arrefecimento passivo, anteriormente descritos.

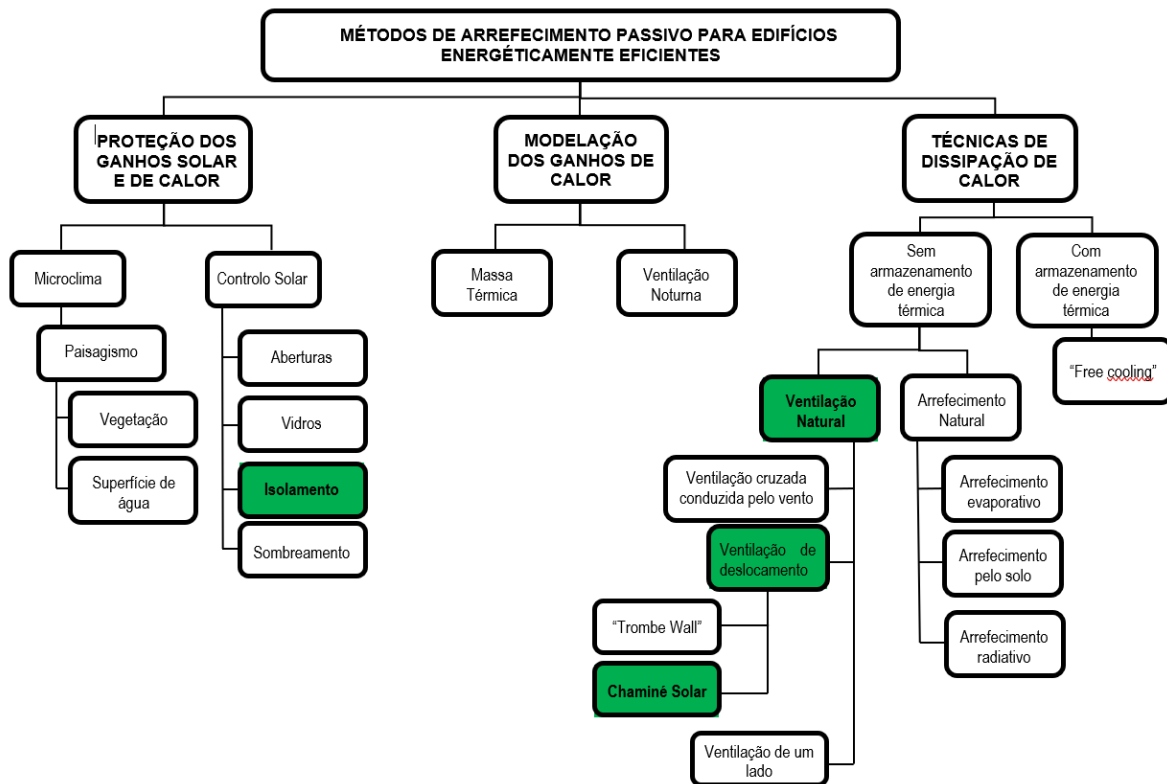


Figura 2.10: Diagrama de técnicas de arrefecimento passivo. Adaptado de [15].

Este trabalho procura encontrar soluções de baixo custo para o melhoramento térmico de favelas já existentes, e como estas se encontram em ambiente urbano de alta densidade populacional muitas das técnicas acima mencionadas não têm viabilidade, por exemplo não há viabilidade em criar superfícies de água e vegetação em zonas sem espaço para intervenção. No entanto pode-se utilizar soluções que sejam a nível estrutural, por exemplo a aplicação de isolamento, de forma a criar uma atenuação temporal e prevenir a entrada de ganhos de calor, bem como criar chaminés de forma a provocar ventilação natural.

Assim os métodos a estudar são duas soluções de isolamento, isolamento com *Tetra Pak* e com uma barreira radiante, como também dois métodos de ventilação, um método de ventilação natural, através de uma chaminé, e um método de ventilação forçada, através de uma chaminé solar.

2.6. Isolamento

O melhoramento dos edifícios existentes com isolamento pode reduzir o consumo de energia gasto em arrefecimento ou aquecimento, significativamente. Os materiais utilizados para isolamento são caracterizados por ter uma baixa condutividade térmica e a capacidade de impedir a passagem de ar para o interior dos edifícios [16].

Os isolamentos podem ser caracterizados em duas classes de acordo com a forma como influencia o ar, pelo isolamento térmico sendo que este permite reduzir o fluxo de calor por condução, e pelo isolamento refletivo [17][18]. Os materiais com um valor de massa térmica elevado conseguem absorver e reter o calor, retardando a velocidade com que os espaços são aquecidos e arrefecidos.

Podem ser utilizados materiais orgânicos ou inorgânicos para o isolamento térmico. Alguns exemplos de materiais inorgânicos são lã mineral, perlite, fibra de vidro e espuma de vidro. Alguns dos exemplos de materiais orgânicos são a lã de ovelha, algodão, celulose, fibra de madeira e palha.

No caso de isolamentos refletivos estes consistem de uma fina camada de alumínio laminado em um ou dois lados de uma camada de suporte, pode ser esta cartão, placas de plástico ou até papel pardo. Esta barreira apesar de não alterar o valor da resistividade permite reduzir a quantidade de calor que passa pelos espaços abertos adjacentes à barreira [19].

Vários estudos sobre isolamento térmico com base em materiais recicláveis e naturais mostram que existem resultados promissores. O primeiro, sobre o uso de fibras de Ichu, uma planta natural da região de Andes, mostra que as fibras desta planta podem ser usadas como isolamento térmico [20]. Outro estudo realizado em Marrocos utilizando materiais têxtil reciclados, revela que estes materiais mostram um bom comportamento térmico, tendo observado que para os meses de verão apresentavam uma diferença de temperatura de 9.0 °C só com a aplicação do isolamento, e que para os meses de inverno esta diferença apresenta ser de 4.8 °C [21]. Também um estudo sobre a análise térmica de embalagens *Tetra Pak* como isolante térmico, mostra que este chega a melhorar o ar interior em cerca de 2,5 °C sendo que este valor varia com a forma como se orientam as embalagens [22]. Outro estudo sobre a performance térmica do *Tetra Pak* como material para teto, refere que a condutividade térmica do *Tetra Pak* é semelhante à de materiais aplicados em isolamentos como a placa de cortiça [23].

O artigo “*Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage*” menciona dois casos de estudo. No primeiro caso descreve que para uma casa típica de 200 m² de área de chão, a resistência térmica do telhado apresenta um valor 23% mais pequeno que o

total calculado. Já o segundo estudo reporta que a transmissividade térmica pelo telhado pode ser reduzida ao adicionar isolamento no sótão por baixo do telhado ou por cima do teto [24].

Assim com base nestes estudos e de forma a melhorar o comportamento térmico nas favelas escolheram-se dois métodos de isolamento aplicado no telhado: isolamento refletivo, através de uma barreira radiante e isolamento térmico composto de garrafas *Tetra Pak*.

2.7. Infiltração e Ventilação Natural

Segundo o *ASHRAE handbook fundamentals* de 2001 [25], a infiltração e a ventilação são dois métodos de trocas de ar entre o exterior e o interior de um edifício. O fluxo de ar que entra num edifício através de brechas, orifícios não intencionais e da utilização de portas com contacto para o exterior é denominado por infiltração.

A ventilação natural é um processo que permite fornecer ou retirar ar de um espaço fechado através do fluxo de ar derivado de aberturas intencionais no edifício, sem recurso a sistemas mecânicos. O fluxo de ar é derivado da ação do vento sobre o edifício e da diferença de temperatura entre o ar exterior e interior. Os mecanismos de ventilação natural podem atuar isoladamente ou sob efeito combinado [25].

O processo de ventilação natural é das mais importantes técnicas de arrefecimento passivo, pois é utilizado maioritariamente para providenciar a qualidade do ar requerida dos espaços. P.F. Linden no seu artigo “*The Fluid mechanics of natural ventilation*” [26] refere que os principais fatores que controlam a qualidade do ar interior são o fluxo de ar novo, responsável pelo transporte de calor e poluentes, e a envolvente térmica do edifício, que influencia a temperatura sentida devido aos efeitos radiativos e às trocas de calor com o ar.

Os edifícios em estudo possuem desafios ao nível dos ganhos de calor e da qualidade do ar interior. A inclusão de projetos de ventilação num edifício dá resposta a esta problemática, removendo o excesso de calor e os poluentes do interior do edifício.

Segundo a Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro, para um espaço ser considerado adequadamente ventilado, deve certificar um caudal mínimo de ar novo promovido pelas trocas de ar entre o exterior e o interior. Este valor pode ser determinado através do método simplificado, uma vez que os edifícios em estudo não têm mais de quatro pisos e não são utilizados para atividades que implicam a emissão de poluentes específicos. Para o cálculo do caudal mínimo de ar novo é necessário calcular primeiramente a taxa total de geração de CO₂ (mg/h), que de acordo com o método analítico apresentado no ponto 2.1.1 do anexo da Portaria em questão, é obtida pela Equação 2.1

$$G_{CO_2} = (17000 \times A_{Du} \times M) \times N \quad (2.1)$$

em que M representa a taxa de metabolismo dos ocupantes [met], N representa o número de ocupantes, e A_{Du} a área de DuBois, que para um adulto apresenta o valor de 1.80 m².

O caudal mínimo de ar novo (m³/h) é calculado através da Equação 2.2

$$Q_{AN} = \frac{G}{C_{tp} - C_{ext}} \quad (2.2)$$

onde G é a taxa total de geração de CO_2 , C_{tp} é o limiar de proteção para a concentração de CO_2 e toma o valor de 2250 mg/m^3 e C_{ext} é o valor médio típico da concentração no ar exterior do CO_2 para a zona onde se encontra o edifício, em mg/m^3 . Na zona em estudo o valor da concentração de CO_2 é de 375 ppm que pode ser convertido em 675 mg/m^3 .

Aplicando os valores acima descritos, o caudal mínimo de ar novo requerido é de $19 \text{ m}^3/\text{h}$ e pode ser garantido tanto pela infiltração do edifício como por ventilação natural.

Segundo o artigo “*Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage*” a ventilação natural pode ocorrer devido a três métodos cuja diferença provem da localização das aberturas, do desenho interior do edifício e das características do vento [24]. Estes três métodos são a ventilação cruzada induzida pelo vento, a ventilação por efeito de chaminé e a ventilação por abertura única, respetivamente.

A ventilação cruzada ocorre através de aberturas em lados opostos de um espaço fechado. A ventilação por efeito de chaminé induzida pela ação do vento sobre o edifício e o efeito de impulsão térmica. A ventilação por abertura única, tipicamente aplica-se a divisões individuais, providenciando assim uma ventilação mais localizada.

Na Figura 2.11 estão representados esquemas de cada um dos três métodos de ventilação.

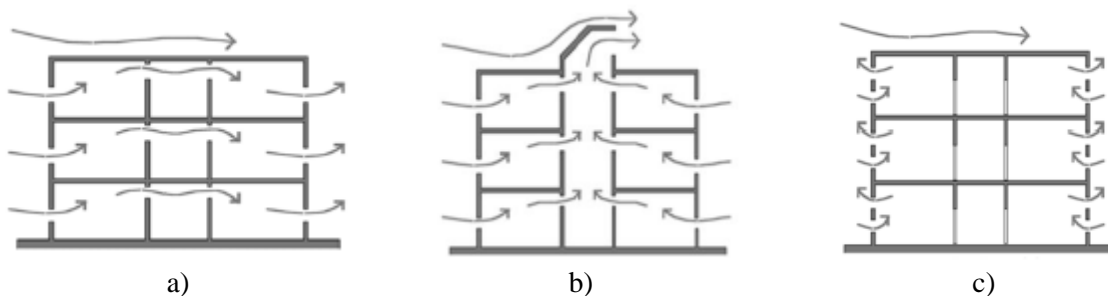


Figura 2.11: Esquema de um sistema: a) de ventilação cruzada; b) ventilação por efeito de chaminé; c) ventilação por abertura única. [24]

O conceito por detrás das chaminés solares é o uso da energia solar para criar grandes diferenças de temperatura forçando circulação de ar.

Estudos já foram efetuados sobre as chaminés solares no qual mostram que existe uma correlação entre a diferença de temperatura e a infiltração de ar no edifício [24][27][28]. A chaminé solar divide-se em duas partes o coletor solar e a chaminé. O ar no coletor solar aquece durante o dia, o que causa uma expansão e uma subida do ar, que por sua vez desloca o ar interior para fora da divisão através da chaminé.

3. Métodos

3.1. Instalações experimentais

Como referido anteriormente, a presente dissertação tem como objetivo avaliar algumas medidas de melhoria para o conforto térmico de uma habitação de baixo custo de construção. Para tal, foram construídas duas células de teste, uma que serve de referência e outra onde serão implementadas as medidas de melhoria. No restante trabalho, a célula de teste de referência será denominada como célula REF, e a célula onde serão introduzidas as medidas de melhoria como célula CT.

As células de testes encontram-se no Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e apresentam dimensões de acordo conforme a Figura 3.1.

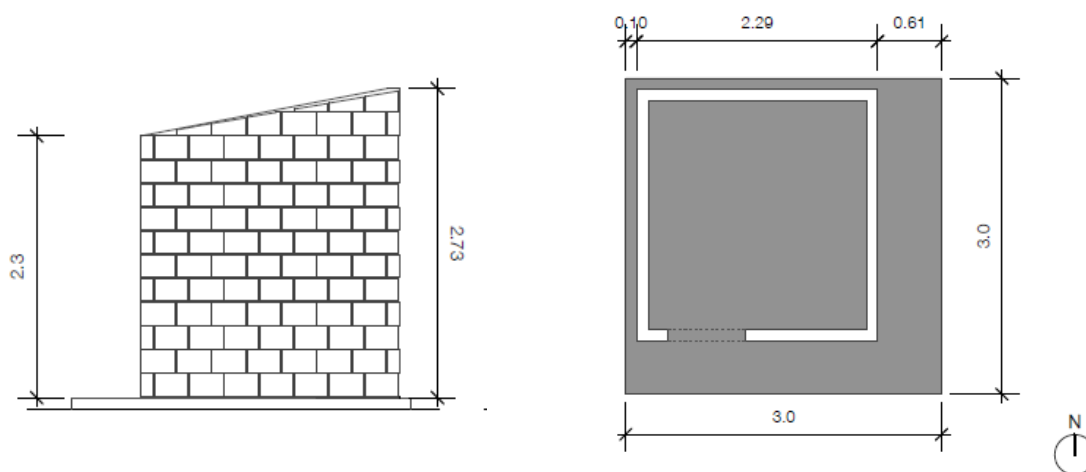


Figura 3.1: Fachada a Este e planta da célula de teste.

A construção das células de teste procede-se da seguinte forma: uma laje de cimento, na qual se constrói as paredes de tijolos de cerâmica ligados entre si por cimento, terminando com vigas de madeira a suportar telhas de cerâmica vermelha.

As duas células de teste estão dispostas uma ao lado da outra com 40 cm de distância entre si. Por este motivo, em cada lado exterior das células de teste foram construídas duas paredes a 40 cm de distância para a situação de fronteira, como pode ser vista na Figura 3.2.

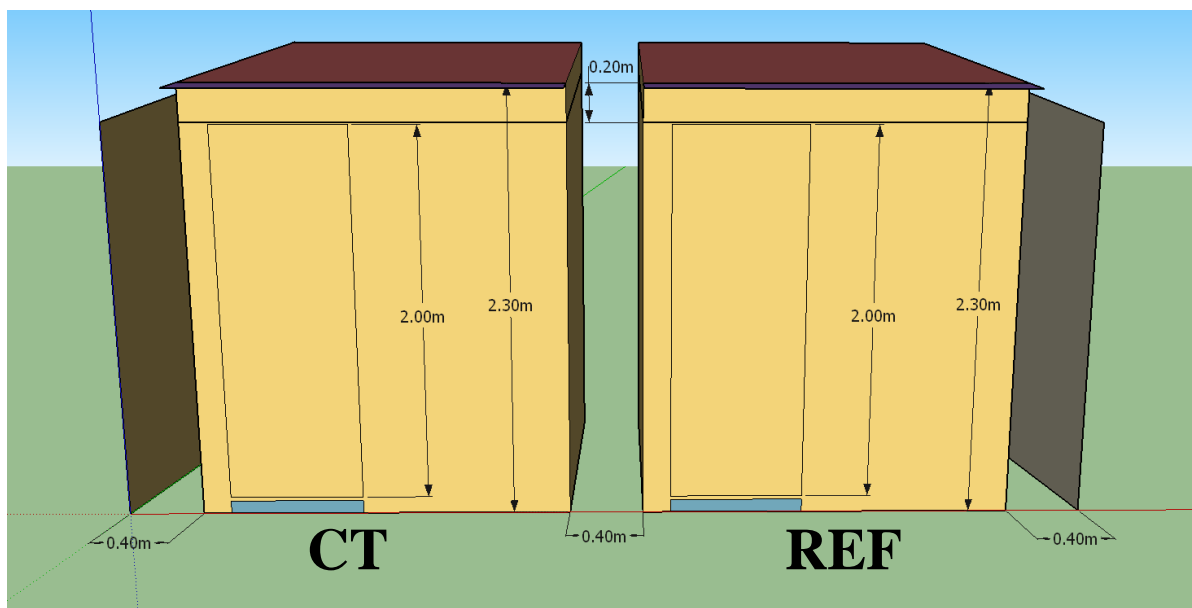


Figura 3.2: Fachada a Sul das duas células de teste presentes no Campus solar da FCUL.

Na realização dos testes, foram aplicados em ambas as células quatro sensores *HOBO's* de quatro canais *Analog Data Logger*, dois sensores *HOBO's* de um canal *Analog Data Logger*, catorze sensores de temperatura, um concentrador de CO_2 *TELAIRE*, um *datalogger CR1000* da *Campbell Scientific*, um anemómetro e um piranómetro. A localização do piranómetro e do anemómetro está apresentada na Figura 3.3.

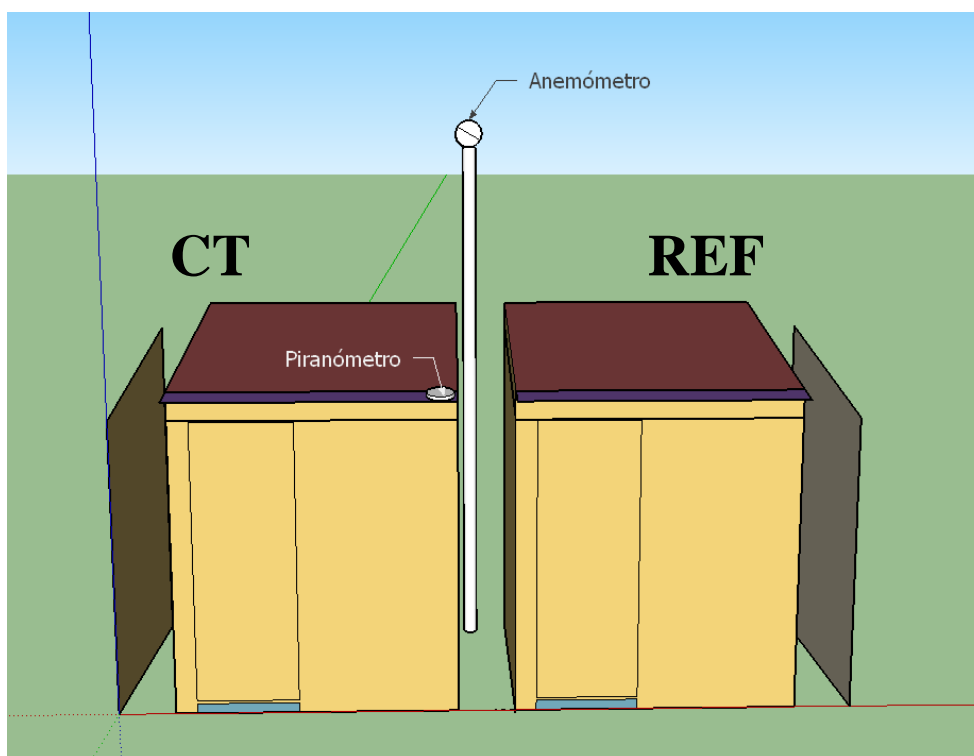


Figura 3.3: Localização do piranómetro e do anemómetro na célula de teste.

O programa utilizado para se obter os dados de temperatura foi o *HOBOWare*, que permite fazer a leitura dos diferentes *HOBO* e retirar os dados para um ficheiro *Excel*.

Para a análise das temperaturas de superfície foram colocados sensores a 1.30 m de altura nas paredes das células de testes e ao centro para a temperatura ambiente. Foram também colocados sensores no pavimento e no telhado das células de teste como verificado nas Figura 3.4 e Figura 3.5.

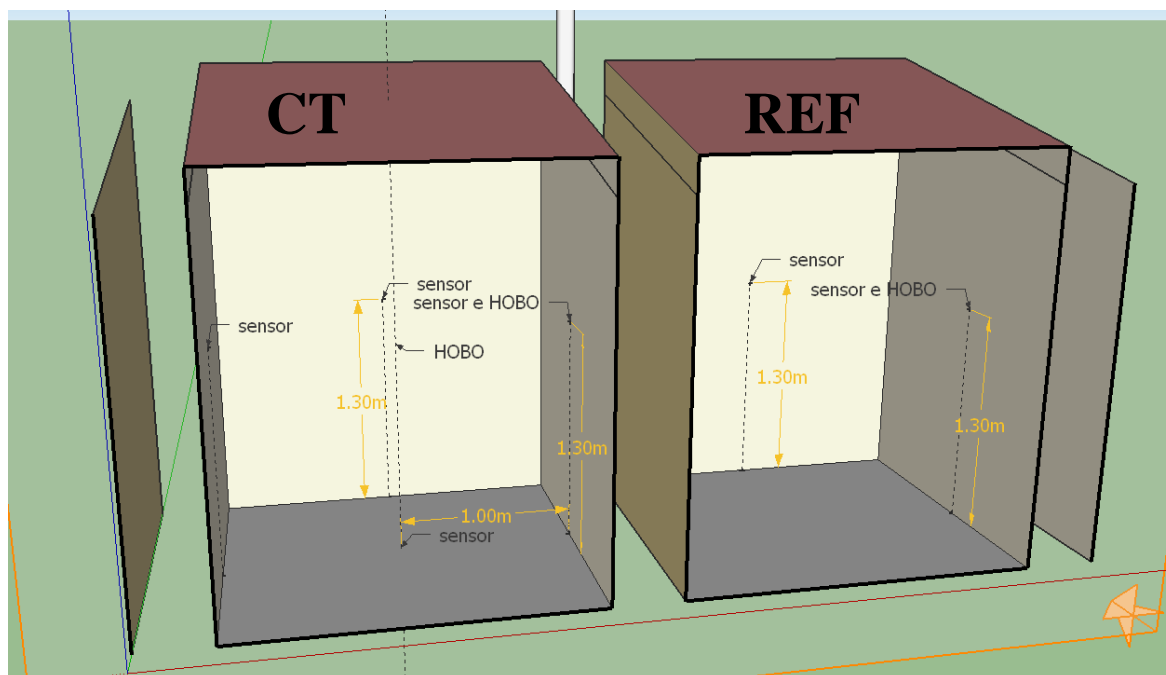


Figura 3.4: Localização dos sensores de temperatura no interior das células de teste, vista de sul.

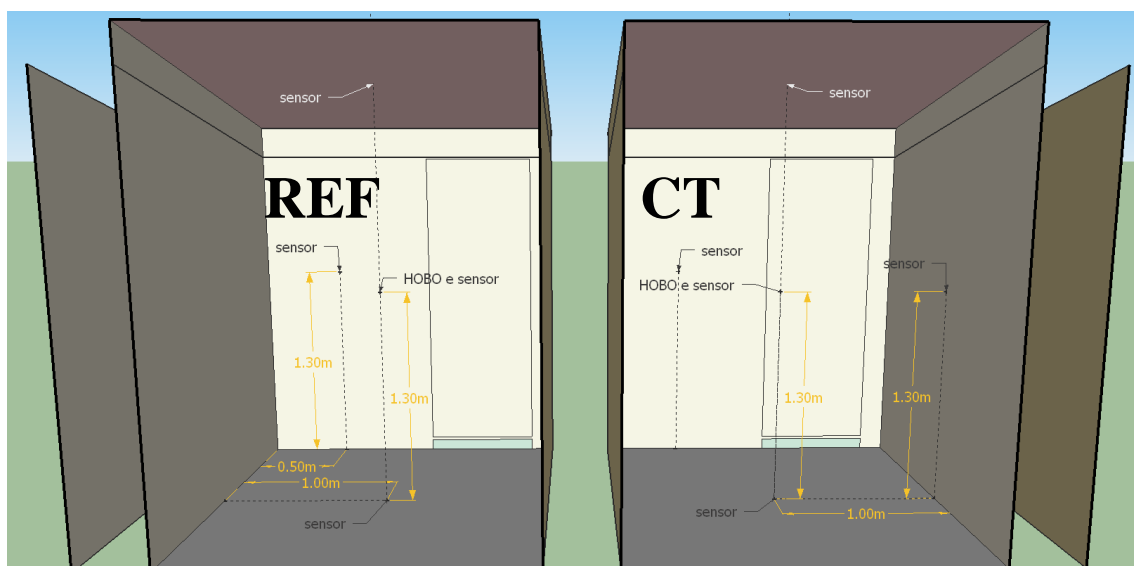


Figura 3.5: Localização dos sensores de temperatura no interior das células de teste, vista de norte.

Na Figura 3.6 apresenta-se uma fotografia das células de teste que se encontram no Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, nas quais se aplicaram todas as medidas descritas acima.



Figura 3.6: Células de teste no Campus Solar da FCUL.

3.2. Planeamento do trabalho experimental

Para análise da melhoria do conforto térmico, foram consideradas no total seis medidas de melhoria: duas medidas de isolamento, isolamento *Tetra Pak* e isolamento radiante, duas medidas de promoção de ventilação natural, chaminé simples e chaminé solar, e duas medidas que são a junção de uma medida de isolamento com uma medida de ventilação, nomeadamente isolamento *Tetra Pak* com chaminé simples e isolamento radiante com chaminé solar.

Numa primeira fase, foi realizado um ensaio de controlo onde não existe a implementação de medidas de melhoria na célula CT de forma a comparar o comportamento térmico de ambas as células. Posteriormente, para cada ensaio, foram aplicadas as respetivas medidas de melhoria a serem analisadas. Os ensaios foram realizados no período mais quente do ano, entre julho e setembro, de 2019 com duração entre 4 e 15 dias. Na Tabela 3.1, está apresentada a planificação semanal de cada uma das soluções estudadas.

Tabela 3.1: Planificação das diferentes soluções estudadas.

Data	Experiência				
	Controlo	Isolamento <i>Tetra Pak</i>	Isolamento Radiante	Chaminé Simples	Chaminé Solar
23/07 a 30/07	●				
30/07 a 05/08 e 16/08 a 20/08		●			
05/08 a 16/08			●		
26/08 a 30/08		●		●	
30/08 a 02/09				●	
02/09 a 09/09					●
09/09 a 13/09			●		●

Nos ensaios de implementação de medidas de melhoria de isolamento, na célula CT foram adicionalmente colocados dois sensores, um na superfície superior e outro na superfície inferior dos isolamentos.

A primeira solução a ser estudada foi a aplicação das garrafas *Tetra Pak*. Estas são compostas de 75% de cartão, 20% de polietileno e 5% de alumínio. Estes três materiais estão colocados em seis camadas que protege o interior das garrafas da luz, do oxigénio, do ar, e da humidade. As seis camadas são dispostas como mostra a Figura 3.7.

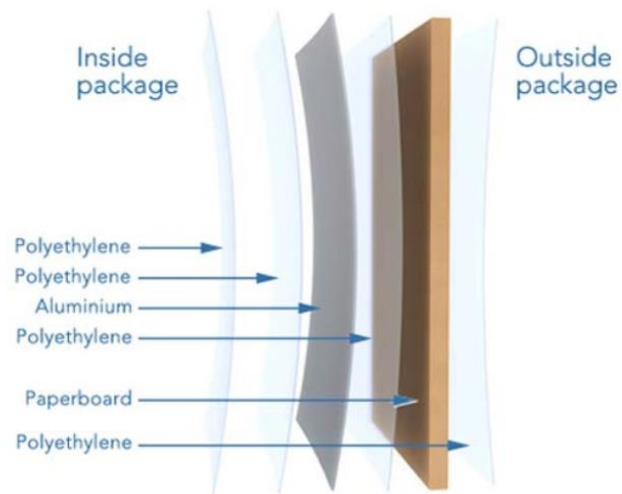


Figura 3.7: Camadas que compõem as embalagens Tetra Pak [29].

A montagem desta efetuou-se através da junção de duas garrafas, previamente lavadas com água e lixívia, agrupadas em conjuntos de quatro. De seguida junta-se em filas de cinco destes grupos para fazer um comprimento de 2 m, como se pode verificar segundo as Figuras 3.7. A aplicação deste isolamento promove uma camada isolada de ar de 5 cm, correspondendo à largura das garrafas *Tetra Pak*.

3. MÉTODOS



Figura 3.8: Montagem do isolamento *Tetra Pak* em conjuntos, para facilidade de aplicação no teto da célula de estudo.

O conjunto de isolamento *Tetra Pak* foi colocado a 2.10 m do chão, preso nas ripas de madeira que seguram as telhas através de cabos de eletricidade, mantendo assim a estrutura suspensa (Figura 3.9). Isolou-se com fita cola isolante as laterais entre a parede e o isolamento.



Figura 3.9: Aplicação do isolamento *Tetra Pak* na célula CT.

A segunda solução a ser estudada foi a barreira radiante, composta por duas folhas de alumínio de 0.1 mm de espessura separadas por uma camada de uma camada de ar de 2 mm de espessura e uma resistência térmica de $0.15 \text{ m}^2 \cdot \text{R/W}$. A barreira radiante foi suspensa através de duas calhas na parede este e oeste da célula CT, a 2.30 m do chão sendo posteriormente isolada com fita cola isolante nas paredes da célula de teste (Figura 3.10).



Figura 3.10: Aplicação do isolamento radiante na célula CT.

A terceira solução é a aplicação de uma chaminé simples composta por aço galvanizado, com uma forma circular de diâmetro de 30 cm, implicando uma área de abertura de 0.10 m^2 . Esta chaminé aliada à presença de uma abertura na porta da célula de teste com área de 0.10 m^2 , permite a ventilação por efeito de chaminé. O esquema da célula CT para este ensaio está apresentado na Figura 3.11.

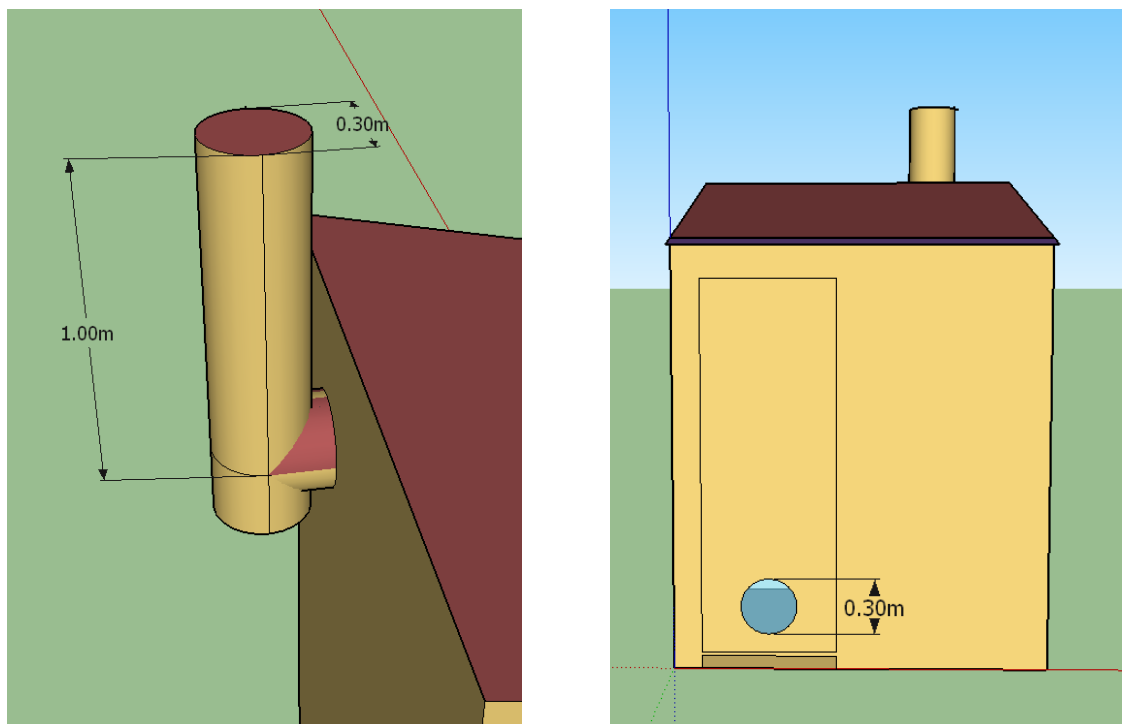


Figura 3.11: Dimensões da chaminé simples aplicada na célula CT.

A quarta solução advém da aplicação de uma chaminé solar. A chaminé é composta por cartão laminado e uma superfície metálica, que está virada a sul de forma a receber a radiação solar, permitindo assim aquecer o ar no interior da chaminé, criando uma diferença de pressão que provoca a movimentação do ar para o interior da célula de estudo. Neste trabalho a chaminé solar utilizada, provém de trabalhos anteriores realizados por Nadir Bonaccorso [30][31], apresentado o formato e dimensões da Figura 3.12.

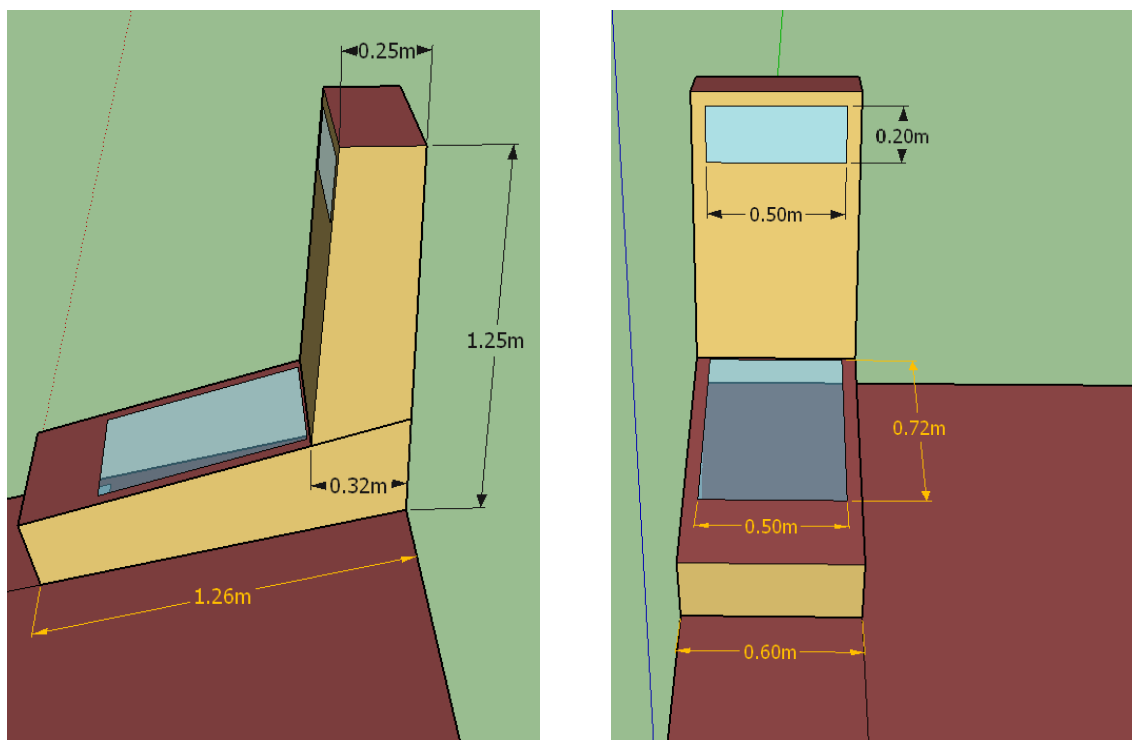


Figura 3.12: Dimensões da chaminé solar aplicada no telhado da célula CT.

As duas últimas soluções a serem analisadas são a combinação de um dos métodos de isolamento com um método de ventilação. Esta junção tem como objetivo controlar a entrada de ar no interior da habitação através de um fluxo de ar direcionado promovido pelas chaminés, com velocidade tal que aumente os limites da zona de conforto, mas sem interferência da infiltração de ar pelo telhado.

Como a aplicação da chaminé solar implica um corte no isolamento a ser aplicado e o isolamento radiante é mais simples de manusear, foi escolhido aplicar estes dois métodos simultaneamente.

Sendo assim, foram estudadas as combinações do isolamento *Tetra Pak* com a chaminé simples, e o isolamento radiante com a chaminé solar.

3.3. Metodologia da análise dos dados

Através dos ensaios realizados é possível obter a temperatura das superfícies, a temperatura do ar interior e exterior, a velocidade do ar proveniente das chaminés e a concentração de CO₂.

A temperatura média radiante define-se como a temperatura média ponderada da área de todas as superfícies no interior da célula, ou seja, as quatro paredes, o teto e o pavimento. Para tal teve-se em conta as áreas relativas de cada superfície, apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Área relativa de cada superfície para o cálculo da temperatura radiante.

SUPERFÍCIE	PERCENTAGEM
PAVIMENTO	14.30%
TETO	14.50%
SUL	16.40%
OESTE	17.80%
NORTE	19.20%
ESTE	17.80%

A temperatura do ar ambiente retira-se diretamente de um sensor colocado ao centro da célula de teste.

A temperatura operativa é calculada segundo o “ANSI/ASHRAE Standard 55-2010” [10], de duas formas distintas consoante a presença de ventilação. Num cenário sem ventilação, a temperatura operativa é calculada através da média entre a temperatura média radiante e a temperatura ambiente. Num cenário com ventilação a temperatura operativa é obtida através da média ponderada entre a temperatura radiante e a temperatura do ar segundo a Equação 3.1:

$$T_{op} = AT_a + (1 - A)T_r \quad (3.1)$$

onde T_{op} é a temperatura operativa, T_a é a temperatura do ar ambiente, T_r é a temperatura média radiante. A variável A é função da velocidade do ar e pode ser obtido através da tabela presente no anexo C do “ANSI/ASHRAE Standard 55-2010” [10], apresentada na Figura 3.8.

v_r	<0.2 m/s (<40 fpm)	0.2 to 0.6 m/s (40 to 120 fpm)	0.6 to 1.0 m/s (120 to 200 fpm)
A	0.5	0.6	0.7

Figura 3.13: Valores de A para aplicação na equação da temperatura operativa [10].

Para os dados da ventilação utilizou-se anemómetros de fio quente para retirar a velocidade do ar no interior da chaminé. Após obtidos esses valores, foi necessário multiplicar pela área de abertura das chaminés (0.1 m^2) de forma a determinar o caudal de ar que entra na célula de teste. Por fim para se obter a velocidade do ar no interior da célula de teste é necessário multiplicar pela área interior (4 m^2).

Obtidos os valores da velocidade, estes comparam-se com o valor de velocidade mínimo necessário para aplicação do modelo SET, 0.1 m/s (subcapítulo 2.4), de modo a verificar a alteração nos limites da zona de conforto.

Para o cálculo da infiltração em cada célula de teste, utilizou-se o método do decaimento da concentração [16]. Este método permite determinar a taxa de fluxo efetiva ao encontrar o melhor ajuste entre a curva de decaimento do poluente e a solução do decaimento da concentração que é representado pela Equação 3.2:

$$K(t) = K_0 \times \exp\left(-\frac{\dot{V}}{V} \times t\right) \quad (3.2)$$

onde K é a concentração do poluente, K_0 é a concentração do poluente inicial, \dot{V} caudal de ar (m^3/s), V o volume da divisão (m^3), e t o tempo decorrido.

Após a injeção de CO_2 , utilizou-se um concentrador de CO_2 para se registar a curva de decaimento da concentração. Ao aplicar o logaritmo na Equação 3.2, é possível ter uma regressão linear da qual se obtém o valor do caudal volumétrico da divisão em estudo.

$$\ln(K)(t) = -\frac{\dot{V}}{V} \times t + \ln(K_0) \quad (3.3)$$

Através do declive da Equação 3.3 $\left(\frac{\dot{V}}{V}\right)$ pode-se obter o valor das renovações por hora multiplicando esse valor por 3600 que corresponde ao número de segundos que existe numa hora.

Para obtenção de dados o mais semelhante à localização geográfica em estudo, é pretendido que os dias analisados tenham um clima semelhante ao destas regiões, classe Aw (subcapítulo 2.2). Assim, para cada ensaio, é escolhido o dia que apresenta uma temperatura máxima acima dos 30°C , uma temperatura média acima dos 20°C e uma irradiância diária máxima superior a $700 \text{ W}/\text{m}^2$.

Assim através das temperaturas operativas e da infiltração de CO_2 podemos retirar as conclusões face a uma melhoria das condições interiores da célula de teste. Por melhoria entende-se uma atenuação do perfil de temperatura, ou seja, uma diminuição da temperatura máxima diurna e um aumento da temperatura mínima noturna, no interior da célula CT face à célula REF, de forma a aproximar o perfil de temperatura aos limites da zona de conforto de 24 a 27°C .

Como referido na secção 2.7 para garantir a qualidade do ar interior, isto é garantir uma renovação do ar de modo a expelir o excesso de calor e poluentes, é necessário garantir um caudal mínimo de ar novo de $19 \text{ m}^3/\text{h}$.

4. Resultados e Discussão

4.1. Controlo

Como referido no subcapítulo 2.4, é através da temperatura operativa que se pode compreender como as alterações efetuadas nas células de teste afetam o conforto dentro das mesmas. Como o objetivo é determinar se existe melhoria térmica no interior da CT, é necessário verificar se as duas células, REF e CT, sem aplicação de melhorias, apresentam comportamentos térmicos semelhantes.

Na Figura 4.1 estão representadas as temperaturas operativas para cada uma das células bem como a temperatura exterior e a diferença de temperaturas operativas das duas células.

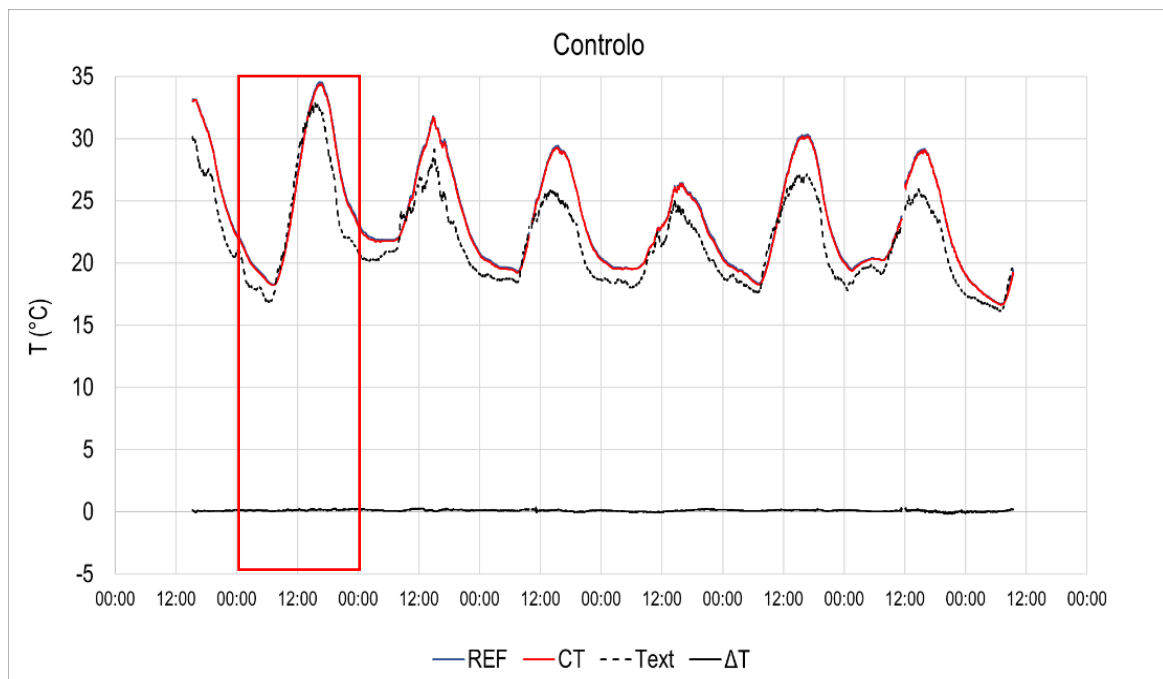


Figura 4.1: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 23 de junho a 30 de junho.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;
Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT.

De forma a estudar as melhorias em climas quentes escolheu-se o dia com a temperatura mais elevada. Podemos observar no gráfico acima que o dia 24 de julho se mostrou o dia mais favorável para análise, verificando-se uma temperatura máxima exterior de 33 °C. Representou-se na Figura 4.2, os valores da temperatura operativa para o dia 24 de julho.

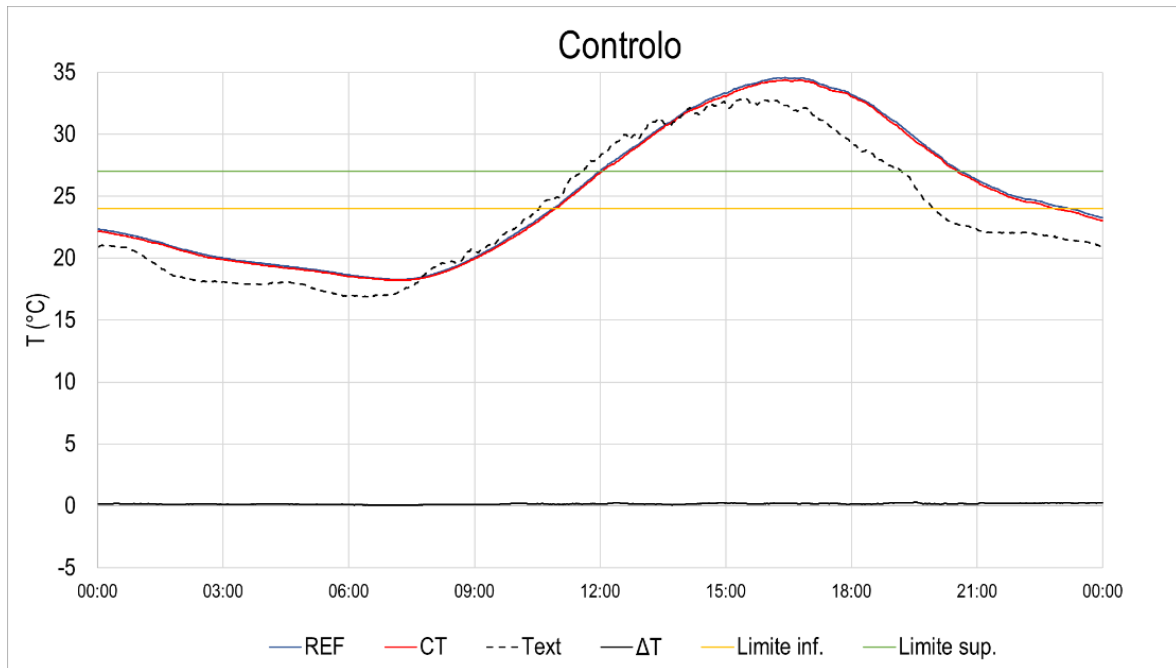


Figura 4.2: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para o dia 24 de julho.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;

Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT;

Amarelo – Limite inferior da zona de conforto, 24 °C; Verde – Limite superior da zona de conforto, 27 °C.

Através dos gráficos apresentados nas Figura 4.1 e Figura 4.2, verifica-se que as temperaturas operativas estão sobrepostas, o que significa que as duas células de teste têm comportamentos semelhantes, validando assim a sua comparação.

Utilizando o método do estudo do decaimento da concentração, obtém-se um valor de infiltração de 15.5 RPH, o que corresponde a uma infiltração de 155 m³/h. Este valor mostra-se muito superior ao valor de caudal mínimo de ar novo de 19 m³/h, garantindo a qualidade do ar no interior das células.

4.2. Isolamento

Neste subcapítulo são descritos e discutidos os resultados obtidos dos ensaios de aplicação de duas medidas de isolamento, nomeadamente o isolamento *Tetra Pak* e o isolamento barreira radiante.

4.2.1. Isolamento *Tetra Pak*

Na Figura 4.3, está apresentado o gráfico com as temperaturas operativas do ensaio com isolamento *Tetra Pak*.

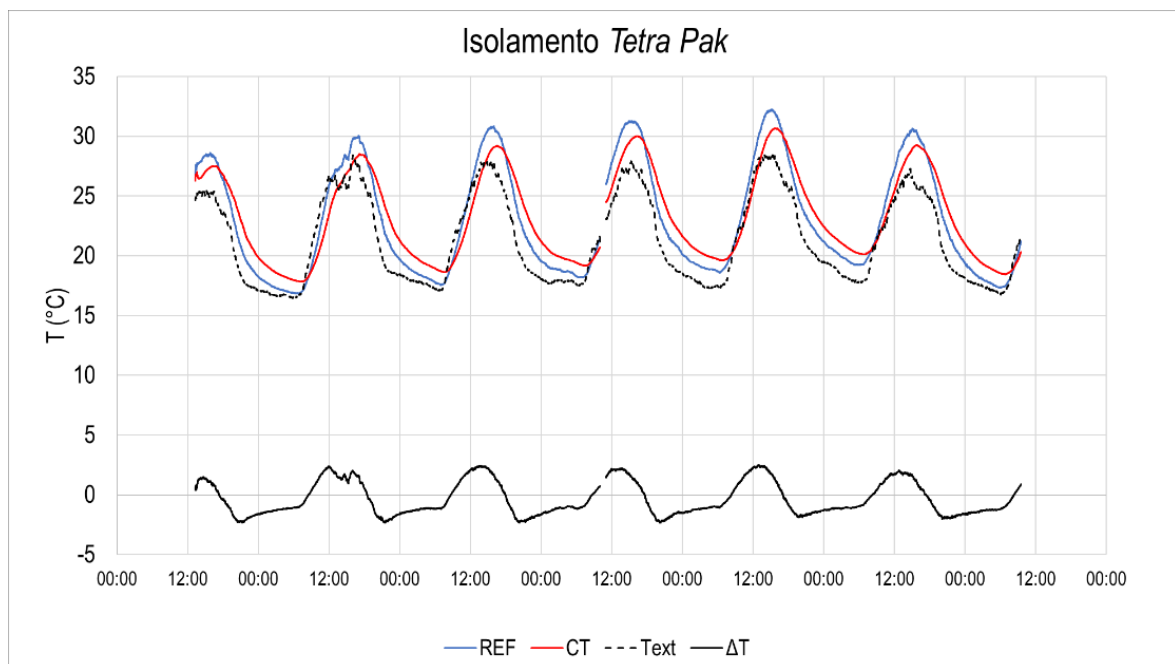


Figura 4.3: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 30 julho a 6 de agosto.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;

Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT.

Como referido no subcapítulo 3.3, para um ensaio ser válido é necessário que a temperatura máxima, de pelo menos um dos dias da duração do ensaio, seja superior a 30 °C. No entanto, ao analisar os dados da Figura 4.3, observou-se que nenhum dos dias contemplava esta condição, pelo que se repetiu o ensaio para o isolamento *Tetra Pak*. As temperaturas operativas para o novo ensaio estão apresentadas no gráfico da Figura 4.4.

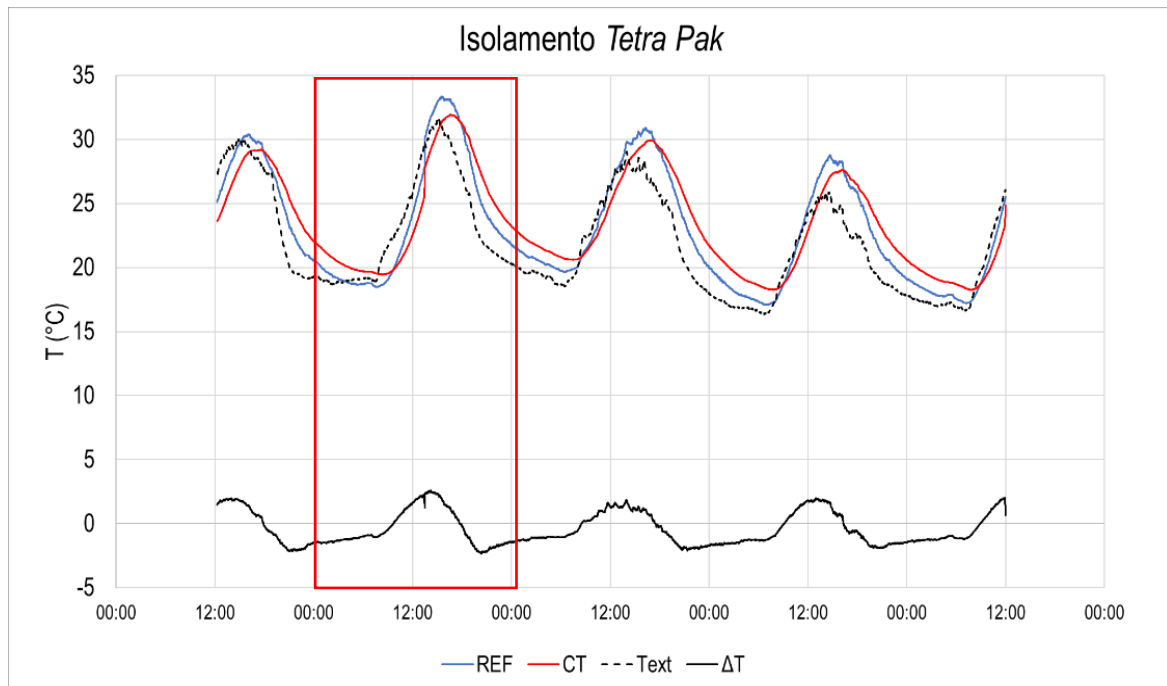


Figura 4.4: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 16 de agosto a 21 de agosto.
Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;
Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT.

Assinalou-se no gráfico o dia mais quente das medições, 17 de agosto, no qual a temperatura máxima foi de 32 °C e representou-se na Figura 4.5 os valores das temperaturas operativas para esse dia.

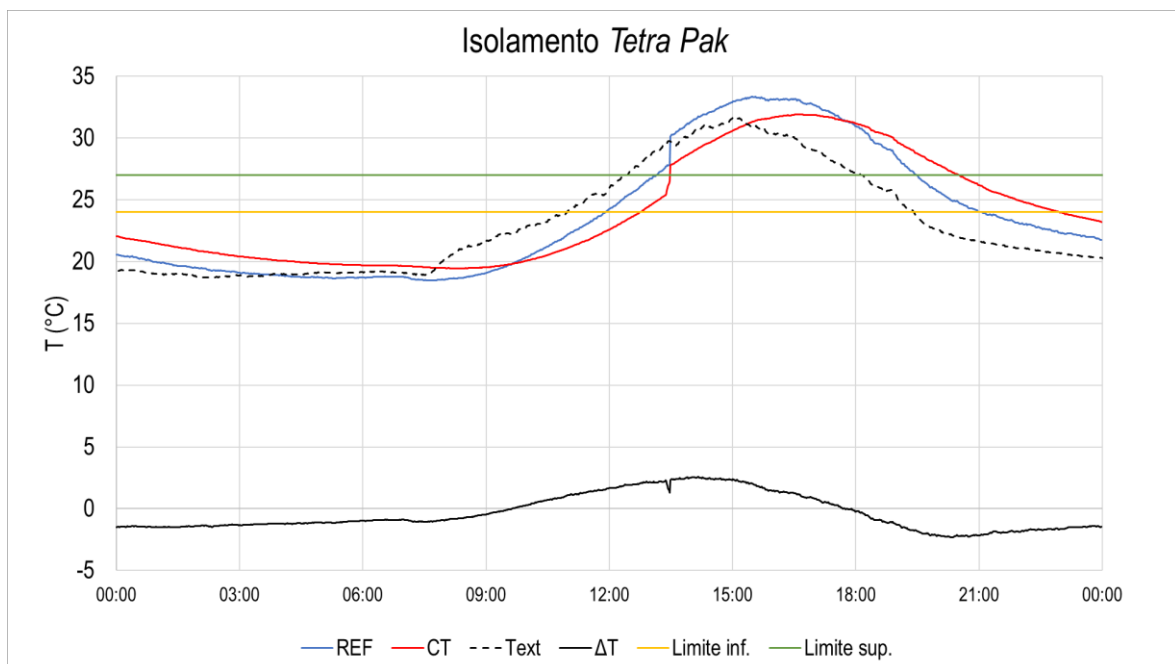


Figura 4.5: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para o dia 17 de agosto.
Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;
Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT;
Amarelo – Limite inferior da zona de conforto, 24 °C; Verde – Limite superior da zona de conforto, 27 °C.

Pela análise da Figura 4.5 observa-se que existe uma diferença nas temperaturas das duas células de teste. Durante o período diurno, a célula CT apresentou uma temperatura máxima 2.52 °C mais baixa que a célula REF. Durante o período noturno, a célula CT apresentou uma temperatura mínima 2.34 °C mais elevada que a célula REF. Sendo assim, o isolamento *Tetra Pak* promove a atenuação da amplitude térmica no interior da célula CT, como se pretendia.

Na Figura 4.6 estão apresentadas a temperatura do telhado da célula REF e a temperatura da superfície inferior do isolamento na célula CT. Verifica-se que existe uma grande diferença nas temperaturas de superfície das coberturas de cada célula, com uma diferença máxima registada de 14 °C.

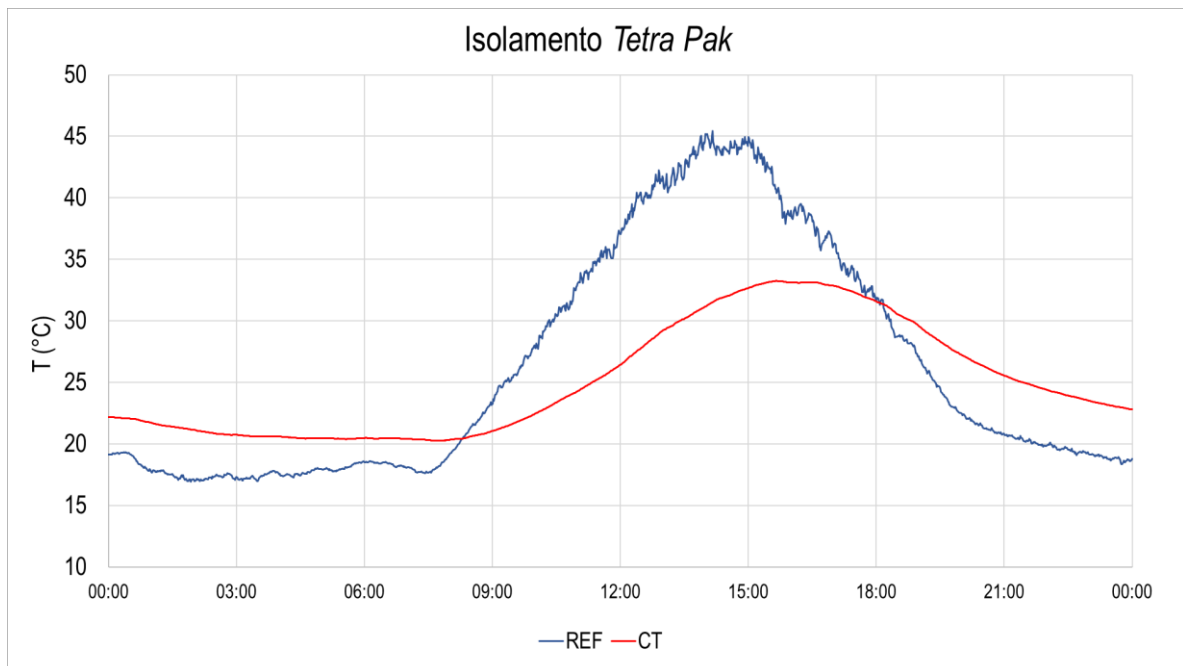


Figura 4.6: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura de superfície inferior do isolamento *Tetra Pak* da célula CT, para o dia 17 de agosto.
Azul – Temperatura de superfície do telhado da célula REF;
Vermelho – Temperatura de superfície inferior do isolamento na célula CT.

Para esta solução estudada verificou-se também que o valor da infiltração é de 4.3 RPH, que corresponde a 39.6 m³/h. Sendo este valor mais baixo que a infiltração do controlo, de 155 m³/h, mantém-se acima do limite de caudal mínimo de 19 m³/h, garantindo assim a qualidade do ar interior.

4.2.2. Isolamento barreira radiante

De seguida, na Figura 4.7 apresentam-se as temperaturas operativas para o isolamento barreira radiante.

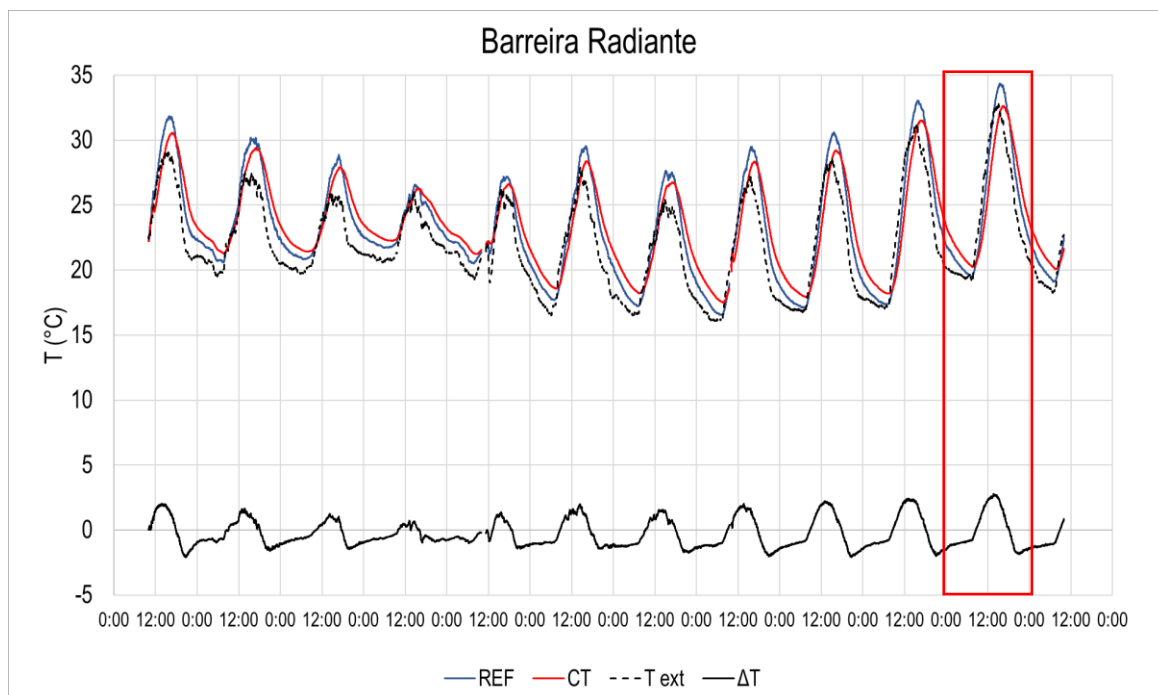


Figura 4.7: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 5 a 16 de agosto.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;

Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT.

Assinalou-se o dia 15 de agosto no gráfico da Figura 4.7, visto ser este o dia mais quente da semana em estudo, com uma temperatura máxima de 33 °C. Na Figura 4.8, estão apresentados os valores das temperaturas operativas para esse dia. Quando comparado estes valores com os do isolamento *Tetra Pak* (Figura 4.5), verifica-se uma similaridade do comportamento da temperatura ao longo do dia.

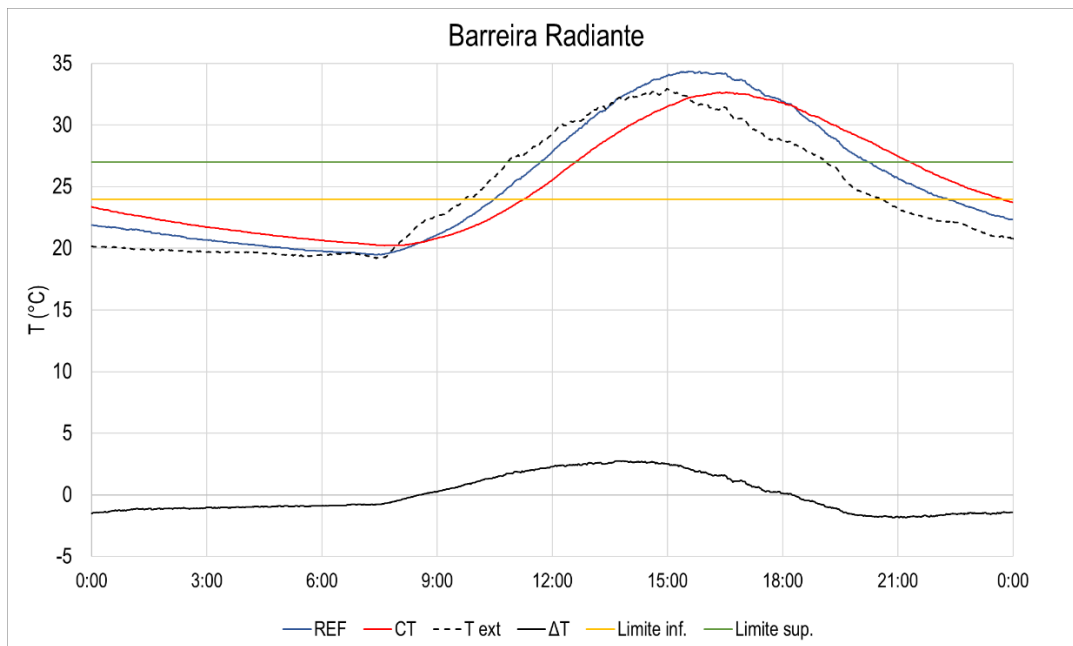


Figura 4.8: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas, para o dia 15 de agosto.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;

Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT;

Amarelo – Limite inferior da zona de conforto, 24 °C; Verde – Limite superior da zona de conforto, 27 °C.

Observando os resultados da Figura 4.8, podemos inferir que a colocação da barreira radiante apresenta uma atenuação da amplitude térmica no interior da célula CT, com uma melhoria de 2.72 °C no período diurno e uma melhora para o período noturno de 1.80 °C. Ao comparar os resultados das temperaturas operativas dos ensaios com isolamento radiante (Figura 4.8) e isolamento *Tetra Pak* (Figura 4.5), verifica-se uma similaridade na atenuação da amplitude térmica no interior da célula.

Na Figura 4.9 podem ser observadas a temperatura de superfície do telhado e a temperatura da superfície inferior do isolamento radiante.

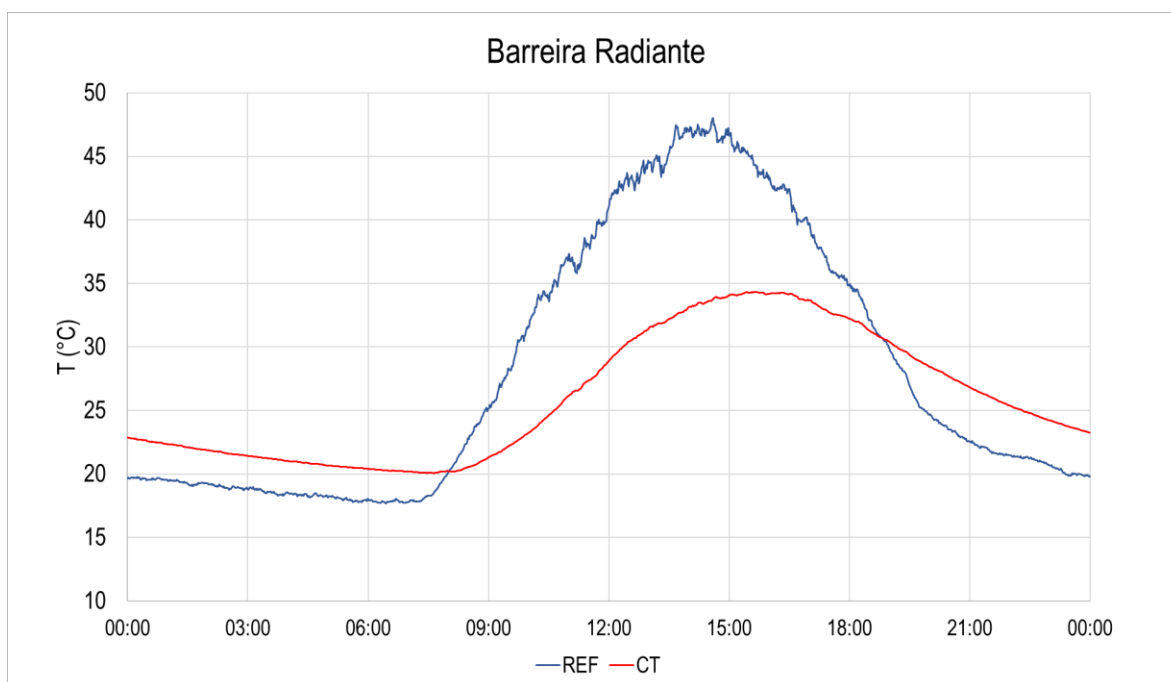


Figura 4.9: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura de superfície inferior do isolamento da célula CT, para o dia 15 de agosto.

Azul – Temperatura de superfície do telhado da célula REF;

Vermelho – Temperatura da superfície inferior do isolamento da célula CT.

Através da análise da Figura 4.9 verifica-se que, semelhantemente ao *Tetra Pak*, no isolamento por barreira radiante existe uma grande diferença nas temperaturas de superfície das coberturas de cada célula, sendo a diferença máxima registada de 15 °C. Este isolamento apresenta um valor de infiltração de 4.7 RPH, que corresponde a 43.2 m³/h, valor superior a 19 m³/h o que garante a qualidade do ar interior.

Comparando os dois isolamentos, isolamento *Tetra Pak* e isolamento barreira radiante, ambos apresentam o mesmo comportamento de atenuação da temperatura operativa no interior da célula, bem como uma diminuição no valor da infiltração. Apesar desta semelhança, o isolamento *Tetra Pak* apresenta uma melhor atenuação, para as temperaturas exteriores mais baixas, de 2.34 °C em comparação com o isolamento radiante que só apresenta uma melhoria de 1.8°C. No entanto para as temperaturas exteriores mais quentes o isolamento radiante apresentou uma diminuição de temperatura superior, de 2.72 °C, em comparação com o isolamento *Tetra Pak*, de 2.52 °C. Relativamente à infiltração ambos apresentam valores semelhantes, estando ambos acima do valor de caudal mínimo de 19 m³/h, apresentado na secção 2.7, garantindo a qualidade do ar interior.

4.3. Ventilação

No presente subcapítulo são apresentados e discutidos os resultados alcançados com a aplicação de medidas de ventilação no interior da célula CT. Como referido anteriormente estudou-se a aplicação de uma chaminé simples e uma chaminé solar.

Na aplicação destas medidas, o valor de infiltração não é calculado pois não existe alteração ao valor de infiltração quando comparado com o valor de controlo. No entanto, existe um movimento de ar proveniente da ventilação, estando sempre garantido um caudal de ar superior ao caudal mínimo de ar novo de 19 m³/h.

4.3.1. Chaminé Simples

Os dados de temperatura para a medida de melhoria de ventilação através de chaminé simples, estão apresentados na Figura 4.10.

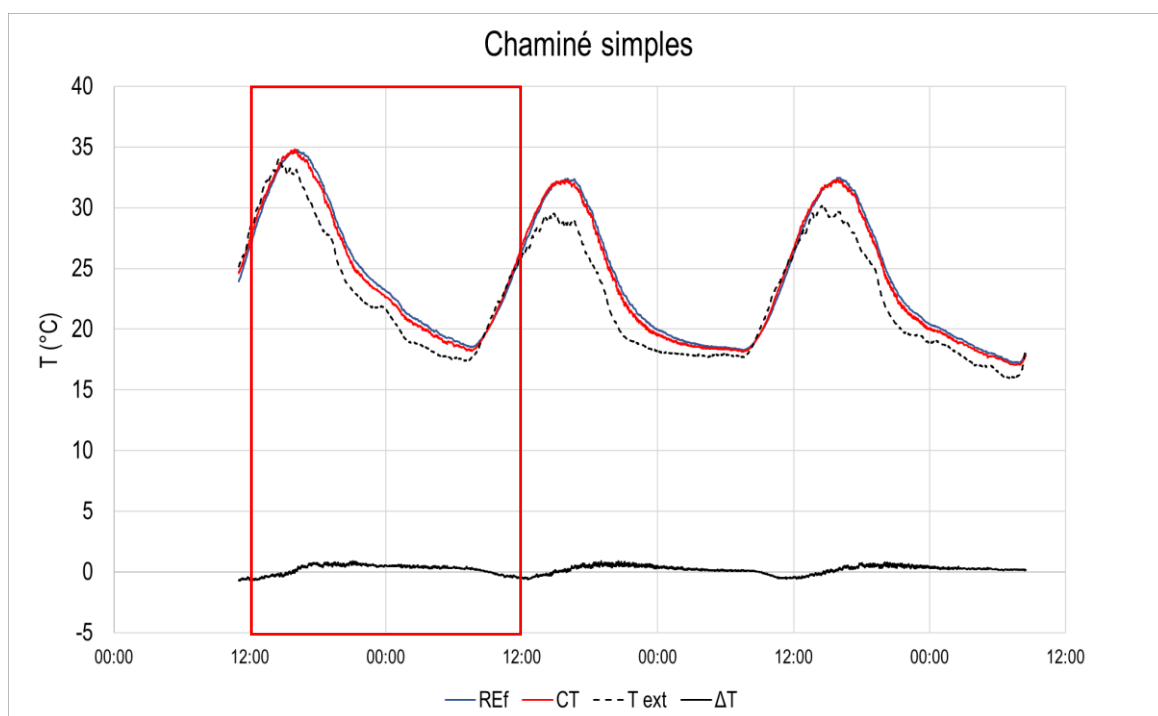


Figura 4.10: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 30 de agosto a 2 de setembro.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;

Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT.

Através da Figura 4.10 é possível inferir que o dia mais quente do período de medições foi 30 de agosto. No entanto, não existem dados para as 24h do dia, pelo que foi considerado um período de 24h com início às 12:00h do dia 30 e término às 12:00h do dia 31 de agosto.

Os valores das temperaturas operativas para esse período de tempo estão apresentados na Figura 4.11.

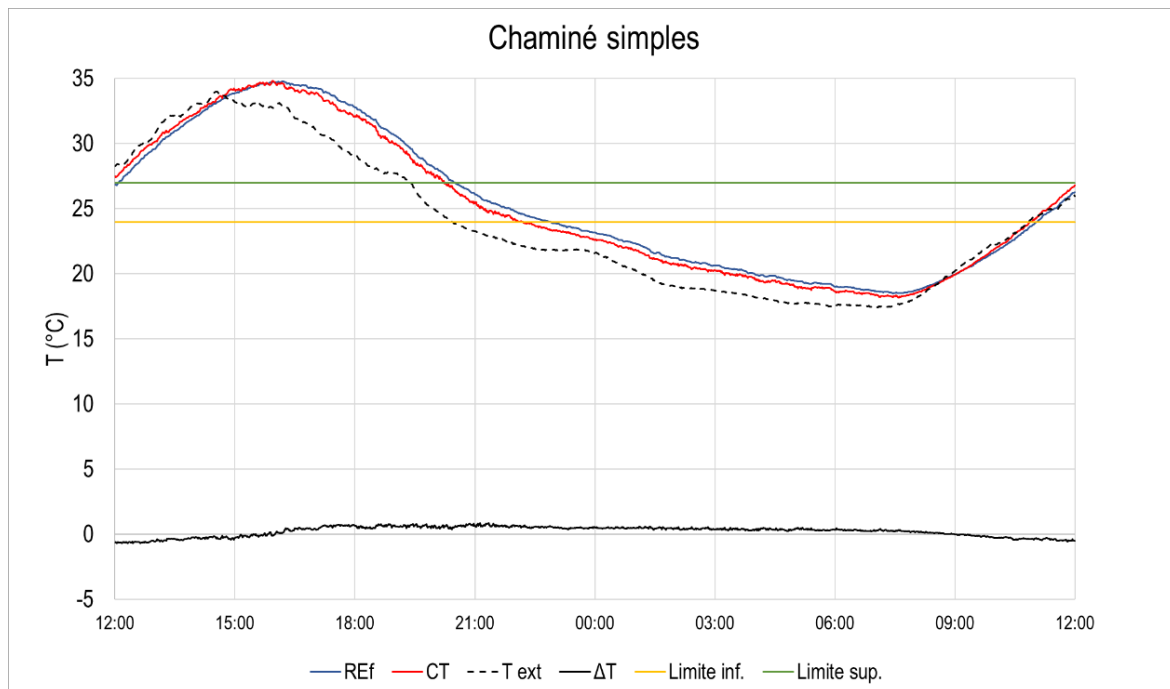


Figura 4.11: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para os dias 30 e 31 de agosto.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;

Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT;

Amarelo – Limite inferior da zona de conforto, 24 °C; Verde – Limite superior da zona de conforto, 27 °C.

Através da Figura 4.11, observa-se que existe uma ligeira atenuação da amplitude térmica, nomeadamente de 0.82 °C para a temperatura máxima diurna e de 0.67 °C para a temperatura mínima noturna. O uso da chaminé promove um fluxo de ar com velocidade média de 0.01 m/s e com períodos de velocidade máxima de 0.06 m/s. Este valor de fluxo do ar é inferior ao valor mínimo de 0.1 m/s, não alterando os limites da zona de conforto.

4.3.2. Chaminé Solar

Apresenta-se de seguida, na Figura 4.12, as temperaturas operativas para a solução chaminé solar.

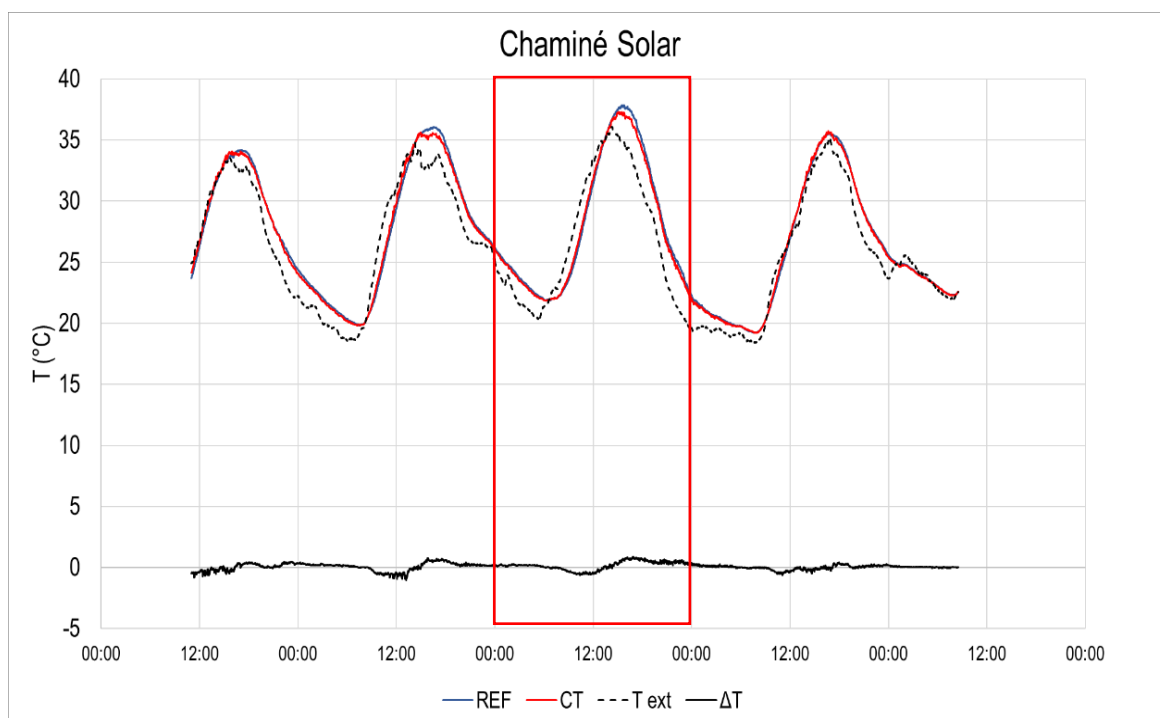


Figura 4.12: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 2 a 9 de setembro
Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;
Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT.

Seguindo a mesma metodologia, selecionou-se o dia mais quente do ensaio, neste caso, o dia 4 de setembro que apresenta um valor de temperatura exterior máximo de 36 °C (Figura 4.12). Os valores de temperatura operativa para o respetivo dia estão apresentados na Figura 4.13.

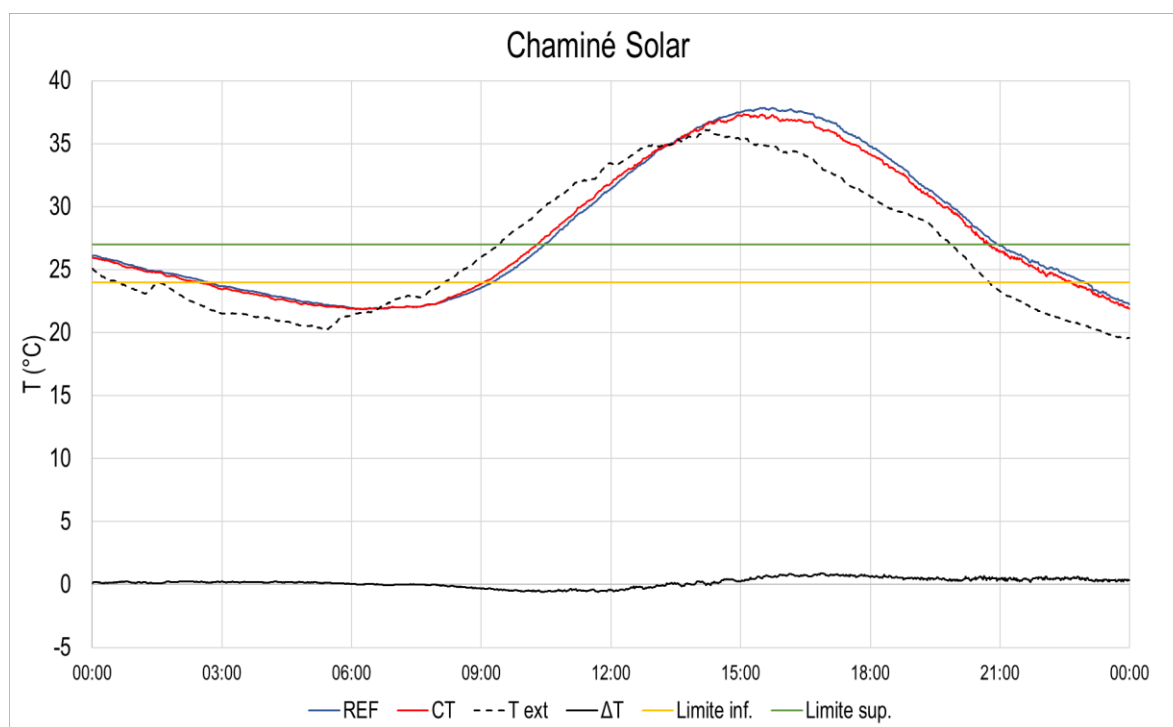


Figura 4.13: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para o dia 4 de setembro.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;

Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT;

Amarelo – Limite inferior da zona de conforto, 24 °C; Verde – Limite superior da zona de conforto, 27 °C.

Analisando a Figura 4.13, a chaminé solar apresenta uma atenuação da amplitude térmica muito pequena, com uma diferença de 0.77 °C para as temperaturas diurnas e de 0.54 °C para as temperaturas noturnas. Nestes ensaios, foi também verificado a presença de fluxo de ar na célula CT com velocidade média de 0.006 m/s e uma velocidade máxima de 0.04 m/s, não alterando os limites da zona de conforto.

Comparando as duas medidas de ventilação, depreende-se que ambas apresentam uma reduzida atenuação da amplitude térmica, com valor de diferença de temperatura operativa de 0.82 °C para a chaminé simples e de 0.77 °C para a chaminé solar. Também os valores da velocidade do ar no interior da célula de teste apresentam ser muito pequenos, pelo que não influencia a temperatura sentida pelo ocupante.

4.4. Ventilação e Isolamento

Neste subcapítulo serão analisados os resultados obtidos através da junção dos métodos do isolamento *Tetra Pak* e chaminé simples, e da junção do isolamento barreira radiante e chaminé solar.

4.4.1. Chaminé simples e isolamento *Tetra Pak*

Apresentam-se na Figura 4.14 as temperaturas operativas do ensaio de junção dos métodos do isolamento *Tetra Pak* e da Chaminé Simples.

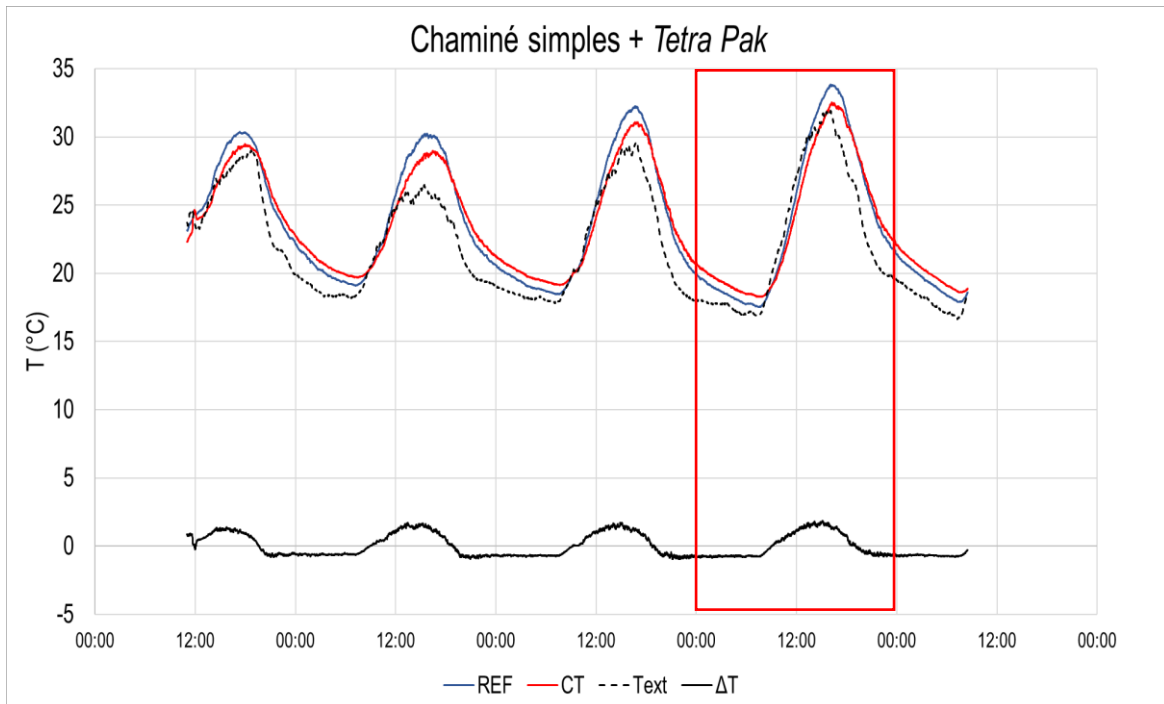


Figura 4.14: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 26 a 30 de agosto.
Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;
Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT.

Analisando dos dados da Figura 4.14, o dia que apresenta as melhores condições para análise é o dia 29 de agosto, com uma temperatura exterior máxima de 32 °C. As temperaturas operativas para o respetivo dia estão representadas na Figura 4.15.

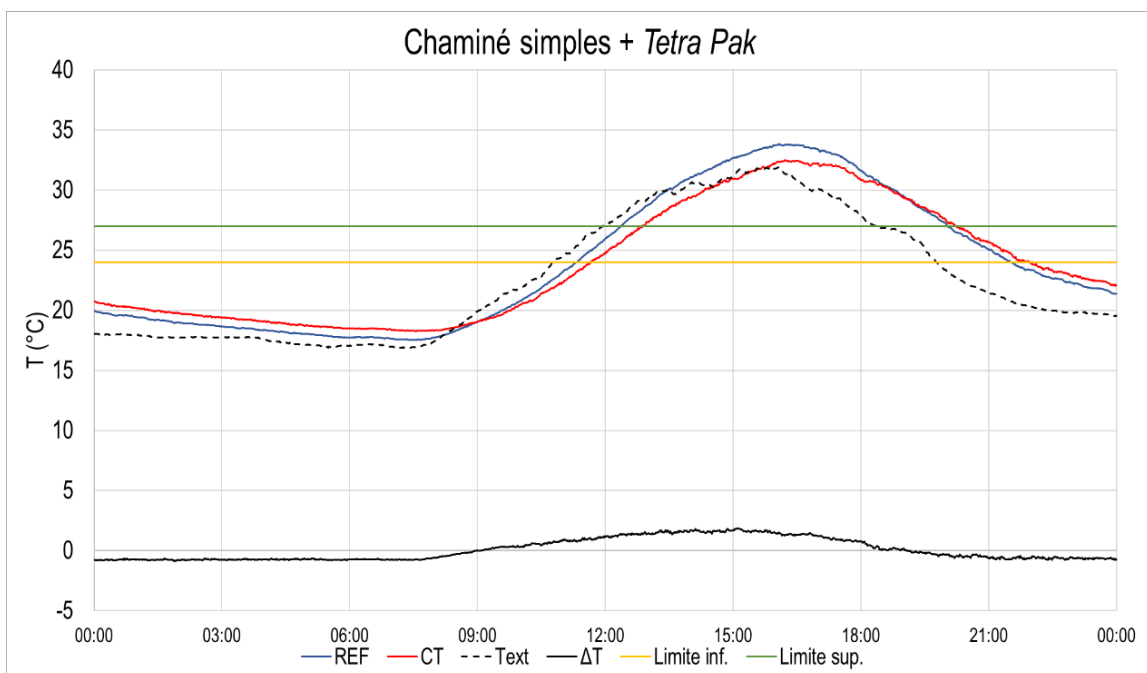


Figura 4.15: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para o dia 29 de agosto.
Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;
Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT;
Amarelo – Limite inferior da zona de conforto, 24 °C; Verde – Limite superior da zona de conforto, 27 °C.

A partir dos dados do gráfico da Figura 4.15, a aplicação conjunta das medidas de isolamento *Tetra Pak* e chaminé simples leva a uma atenuação da temperatura máxima diurna de 1.87 °C e da temperatura mínima noturna em 0.72 °C. O fluxo de ar no interior da célula CT, derivado da aplicação da chaminé simples, apresenta uma velocidade média de 0.012 m/s e períodos de velocidade máxima de 0.05 m/s, permanecendo abaixo da velocidade do ar mínima, 0.1 m/s, não alterando os limites da zona de conforto.

A infiltração apresenta valores de 15.8 RPH que corresponde a 144 m³/h. Este valor mostra-se superior ao caudal mínimo de 19 m³/h, sendo que se aproxima do valor de infiltração do controlo de 155 m³/h, estando garantida a qualidade do ar interior.

A temperatura de superfície do telhado e a temperatura da superfície inferior do isolamento radiante estão apresentadas na Figura 4.16, verificando-se uma diferença na temperatura de superfície do telhado e do isolamento, com máximo de 13 °C.

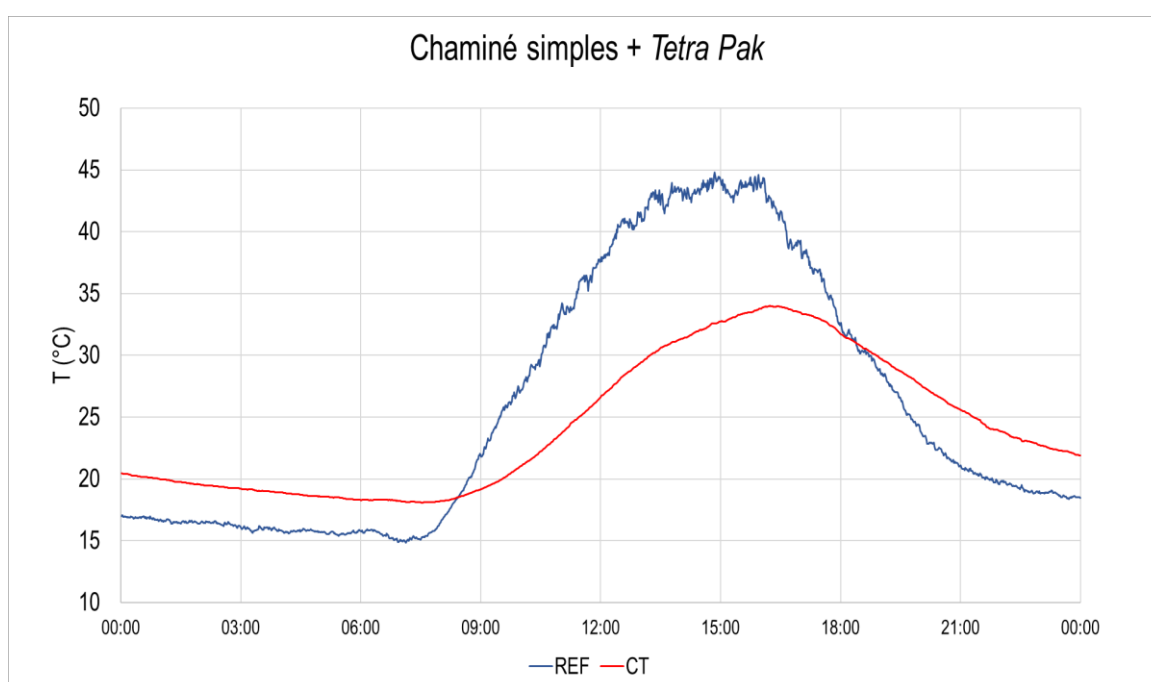


Figura 4.16: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura de superfície do isolamento inferior da célula CT para o dia 29 de agosto.

Azul – Temperatura de superfície do telhado da célula REF;
Vermelho – Temperatura da superfície inferior do isolamento da célula CT.

4.4.2. Chaminé Solar e Isolamento Barreira Radiante

Por fim, apresenta-se na Figura 4.17 as temperaturas operativas para a junção da barreira radiante com a chaminé solar.

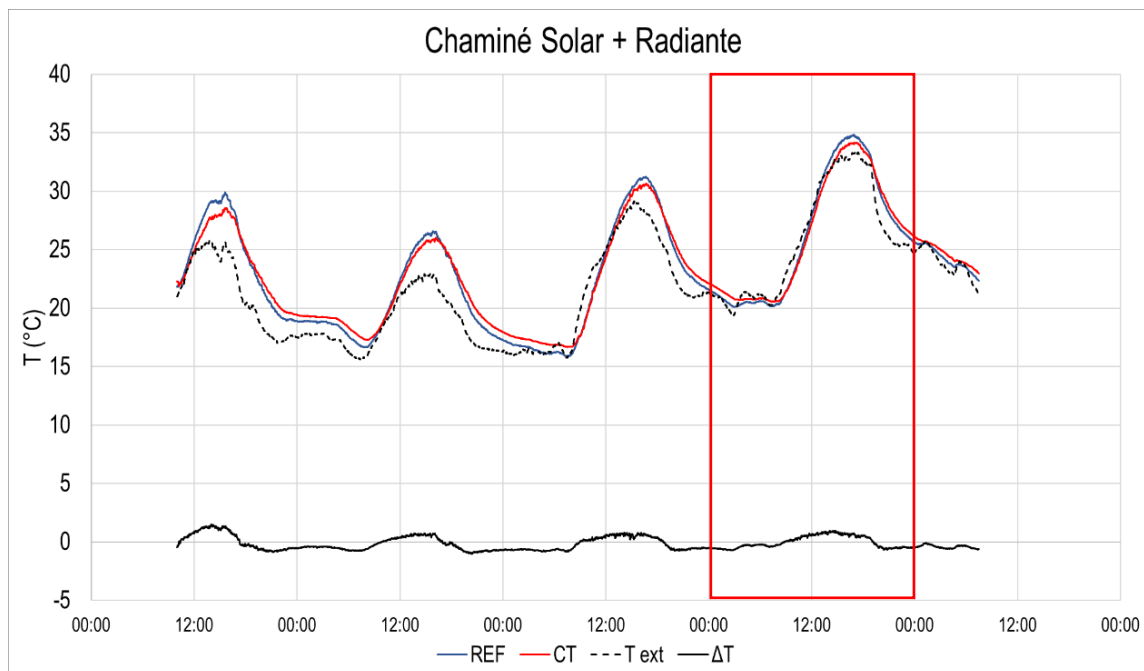


Figura 4.17: Representação gráfica das temperaturas operativas das duas células de teste, da temperatura exterior e da diferença entre as temperaturas operativas para a semana de 9 a 13 de setembro.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;

Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT.

Da análise da Figura 4.17, verifica-se que o dia mais quente foi o dia 12 de setembro, com uma temperatura máxima de 33°C. As temperaturas operativas para esse dia estão representadas na Figura 4.18.

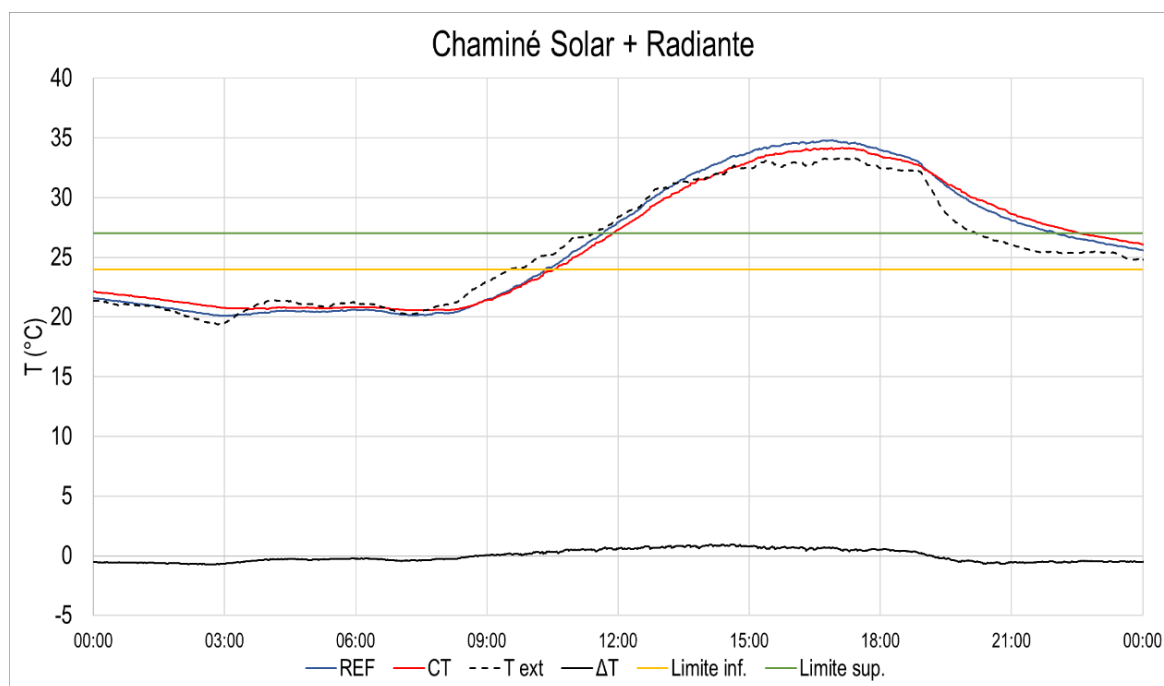


Figura 4.18: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura da superfície inferior do isolamento da célula de teste para o dia 12 de setembro.

Azul – Temperatura célula REF; Vermelho – Temperatura célula CT;
 Preto tracejado – Temperatura exterior; Preto – Diferença da temperatura das células REF e CT;
 Amarelo – Limite inferior da zona de conforto, 24 °C; Verde – Limite superior da zona de conforto, 27 °C.

Semelhantemente ao observado no subcapítulo 4.4.1, a junção da barreira radiante com a chaminé solar mostra melhorias a nível da temperatura operativa. Neste caso, verifica-se uma diferença máxima de 1°C para a temperatura diurna, e uma diferença máxima de 0.7°C para a temperatura noturna.

Na Figura 4.19, estão apresentadas as temperaturas de superfície no telhado da célula REF e da superfície inferior da barreira radiante da célula CT. Nesta, é possível observar que existe uma diferença nas temperaturas de superfície, no entanto esta diferença apresenta um valor máximo de 7.9°C, cerca de metade do valor da diferença com a barreira radiante sem a chaminé solar.

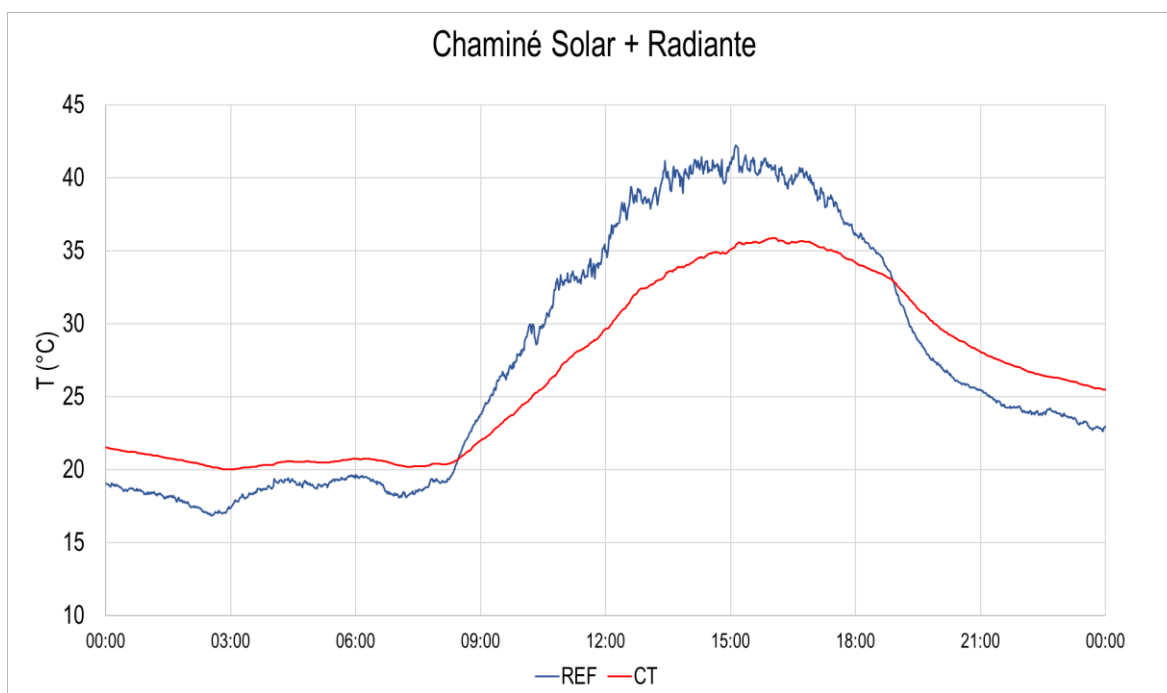


Figura 4.19: Representação gráfica da temperatura de superfície do telhado para a célula REF e da temperatura da superfície inferior do isolamento da célula CT para o dia 12 de setembro.

Azul – Temperatura de superfície do telhado da célula REF;

Vermelho – Temperatura da superfície inferior do isolamento da célula CT.

O uso da chaminé solar acrescenta um fluxo de ar com uma velocidade média de 0.008 m/s e uma velocidade máxima de 0.042 m/s. Estes valores não alteram os limites da zona de conforto, visto estarem abaixo da velocidade do ar mínima de 0.1 m/s.

Em relação à infiltração esta combinação apresenta valores de 18.4 RPH, o que corresponde a 180 m³/h, assegurando a qualidade do ar interior.

Em resumo as combinações chaminé mais isolamento, apresentam uma pequena melhoria face às soluções de chaminé para as temperaturas operativas. No entanto uma comparação com o controlo mostra que as melhorias observadas são mínimas, tendo apenas diminuído as temperaturas em 1°C. Relativamente ao valor da infiltração este mantém-se próximo do valor da célula de controlo, muito superior ao valor mínimo de 19 m³/h.

4.5. Síntese de Resultados

Na Tabela 4.1 está apresentado um resumo dos resultados, com a diferença máxima de temperatura operativa ($\Delta T_{\text{operativa, máxima}}$), a velocidade média do ar ($u_{\text{ar, média}}$), a velocidade máxima do ar ($u_{\text{ar, máxima}}$) e os valores da infiltração em m³/h. A diferença máxima de temperatura entre a superfície do telhado da célula REF e da superfície inferior do isolamento da célula CT, será designada como a diferença de temperatura de superfície da cobertura ($\Delta T_{\text{superfície cobertura, máxima}}$).

Tabela 4.1: Resultados obtidos para as soluções estudadas

Cenário	$\Delta T_{\text{operativa, máxima}}$		$\Delta T_{\text{superfície cobertura, máxima}}$	$u_{\text{ar, média}}$	$u_{\text{ar, máxima}}$	Infiltração
	Dia [°C]	Noite [°C]	°C	m/s	m/s	m ³ /h
Controlo	0.00	0.00	-	-	-	155.0
Isolamento <i>Tetra Pak</i>	-2.52	+2.34	-14.0	-	-	39.6
Isolamento barreira radiante	-2.72	+1.80	-15.0	-	-	43.2
Chaminé simples	-0.82	+0.67	-	0.010	0.059	-
Chaminé solar	-0.77	+0.54	-	0.006	0.042	-
Isolamento <i>Tetra Pak</i> + chaminé simples	-1.87	+0.72	-13.0	0.012	0.050	144.0
Isolamento barreira radiante + chaminé solar	-1.00	+0.70	-7.9	0.008	0.042	180.0

Examinando os valores obtidos das diferenças de temperatura no período diurno e noturno, observa-se que as soluções de isolamento apresentam uma maior diferença das temperaturas operativas, reduzindo as temperaturas operativas na ordem dos dois graus e meio. Tal diferença está relacionada com dois fatores, o primeiro é a redução em 15 °C da temperatura de superfície da cobertura, o segundo fator é a diminuição do valor da infiltração. Ao diminuir a infiltração, impedimos a entrada de calor exterior para o edifício, tendo o cuidado de manter o caudal mínimo necessário para a remoção de poluentes.

Entre as duas medidas de isolamento, não é possível determinar qual a melhor solução. Durante o período diurno, a solução de isolamento radiante apresenta melhores resultados, com uma diminuição da temperatura de 2.72 °C. Durante o período noturno, a solução de isolamento *Tetra Pak* apresenta uma maior aproximação ao limite mínimo de conforto, com um aumento de 2.34 °C.

As temperaturas operativas das medidas de ventilação, chaminé simples e chaminé solar, apresentam uma atenuação pouco significativa, observando-se uma diferença máxima de 0.82 °C. Também ao nível da velocidade do ar no interior da habitação, estas medidas apresentam valores reduzidos, com velocidades máximas abaixo de 0.06 m/s. Desta forma, não é possível aplicar o método SET de forma a aumentar os limites da zona de conforto de 24 a 27°C para 27 a 30°C.

Os últimos cenários estudados foram a junção da chaminé simples com isolamento *Tetra Pak* e chaminé solar com o isolamento radiante. Analisando na Tabela 4.1 os valores para estes cenários, o conjunto chaminé simples e isolamento *Tetra Pak* apresenta melhores resultados na atenuação da temperatura operativa, quer no período diurno quer no período noturno, face ao conjunto chaminé solar e isolamento radiante. Também ao nível da temperatura de superfície de cobertura, o cenário chaminé simples com isolamento *Tetra Pak* apresenta uma diferença máxima de 13 °C, mais 5 °C que o cenário chaminé solar e isolamento radiante.

Em ambas as soluções, a velocidade máxima do ar não ultrapassa os 0.05 m/s pelo que não existe possibilidade de aumentar os limites de temperatura da zona de conforto.

Para todos os cenários estudados, os valores de infiltração são superiores ao caudal mínimo de extração de poluentes, garantindo a qualidade do ar interior.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

As habitações de baixo custo de construção são uma realidade nas comunidades com menor capacidade económica e apresentam deficiências ao nível do conforto. A presente dissertação teve como principal objetivo avaliar desempenho térmico de uma habitação de baixo custo, e aplicar várias medidas de melhoria de conforto térmico e analisar o desempenho das mesmas, criando assim soluções de baixo custo para o melhoramento térmico. Na escolha das diferentes medidas de melhoria, teve-se em consideração a acessibilidade dos materiais utilizados e a facilidade de construção e aplicação das medidas.

Para simular o comportamento térmico das habitações de baixo custo em clima tropical-seco (classe Aw), foram criadas duas células de teste com construção de baixo custo e os ensaios decorreram no período do verão, que em Portugal se caracteriza por ser um clima quente e seco. Para cada ensaio, foi escolhido o dia em que os valores da temperatura máxima, a temperatura média e a irradiância máxima superior são semelhantes à classe Aw.

Dois problemas que caracterizam este tipo de habitações são os ganhos de calor que entram pelo telhado e a necessidade de arrefecimento devido ao clima quente. Para fazer face ao primeiro problema, propuseram-se duas medidas de isolamento a aplicar no teto da habitação: isolamento com garrafas *Tetra Pak* e isolamento utilizando uma barreira radiante. Para dar resposta ao segundo problema foram propostas medidas para promover a ventilação natural no interior da habitação, e assim ampliar os limites do conforto térmico. As soluções estudadas que promovem a ventilação natural são a chaminé simples e a chaminé solar. Adicionalmente, foram estudadas duas soluções que consistem na junção de medidas de isolamento e medidas de ventilação natural, nomeadamente a junção dos métodos isolamento *Tetra Pak* e chaminé simples, e a junção do isolamento barreira radiante e chaminé solar.

A análise do ensaio de controlo traduz o comportamento térmico das habitações de baixo custo. Neste ensaio observou-se que as temperaturas no interior das células estão maioritariamente fora da zona de conforto e o valor de infiltração é muito superior ao valor mínimo de caudal necessário para garantir a qualidade do ar no seu interior.

Em relação à atenuação das temperaturas máxima e mínima sentidas no interior da habitação, as propostas de isolamento demonstram ser as mais eficazes, sendo que a solução de isolamento radiante apresenta melhores resultados no período diurno, com uma diminuição de 2.72 °C, e a solução de isolamento *Tetra Pak* apresenta melhores resultados no período noturno, com um aumento de 2.34 °C. Este tipo de solução apresentou uma redução em 15 °C da temperatura de superfície da cobertura e uma redução do valor da infiltração em 100 m³/h, permanecendo ainda assim com valor de infiltração superior ao valor mínimo de caudal de ar novo. Destas duas soluções, o isolamento *Tetra Pak* requer mais trabalho, tanto ao nível da limpeza das garrafas como da montagem das mesmas. Assim face à análise efetuada conclui-se que é o isolamento radiante a melhor solução a ser aplicada nestas habitações.

As medidas de ventilação não apresentaram melhorias significativas, uma vez que a atenuação da temperatura é pouco significativa, cerca de 0,5 °C, e não geram um fluxo de ar com velocidade suficiente para influenciar a temperatura sentida pelo ocupante.

Os ensaios com medidas conjuntas de isolamento e ventilação apresentam resultados intermédios quando comparados com as medidas de isolamento e medidas de ventilação. Apesar de se verificar uma atenuação nas temperaturas operativas, o fluxo de ar proveniente da chaminé aplicada não é suficiente para aumentar os limites da zona de conforto.

Concluindo, a medida de melhoria estudada mais eficaz no conforto térmico no interior de habitações de baixo custo é o isolamento.

Face aos resultados obtidos, propõem-se estudar futuramente o efeito que o isolamento colocado no telhado como nas paredes influencia o ambiente interior. Analisar a aplicação de diferentes tipos de materiais à base de têxteis e testar outros tipos de telhados que permitam a diminuição dos ganhos de calor. Paralelamente, sugere-se estudar o conforto térmico de habitações de baixo custo em diferentes classes de climas e verificar se as medidas de isolamento apresentam a mesma eficácia.

6. Referências Bibliográficas

- [1] Mikel González-Eguino, Energy poverty: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 47, 2015, Pages 377-385, ISSN 1364-0321.
- [2] Energy Access Outlook 2017, International Energy Agency. [Consultado a 08 de outubro de 2019] <https://www.iea.org/access2017/>.
- [3] Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A.: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644.
- [4] Climate-Data.org, Clima Brasília. [Consultado a 15 de janeiro de 2019] <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/distrito-federal/brasil-852/>
- [5] Climate-Data.org, Clima Caracas. [online] [Consultado a 15 de janeiro de 2019] <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/venezuela/distrito-capital/caracas-5677/>
- [6] PVGIS solar radiation tool. [online] [Consultado a 15 de janeiro de 2019] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#MR
- [7] UN-Habitat, Twenty First Session of the Governing Council, 2007
- [8] UN-Habitat State of the worlds's cities 2006/7
- [9] Enzo Falco, Jesús Zambrano-Verratti, Reinout Kleinhans, Web-based participatory mapping in informal settlements: The slums of Caracas, Venezuela, *Habitat International*, Volume 94, 2019, 102038, ISSN 0197-3975.
- [10] Online [Consultado a 18 de março de 2020]: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/de/Petare_Slums_in_Caracas.jpg
- [11] Online [Consultado a 18 de março de 2020]: https://ogimg.infoglobo.com.br/in/22882454-182-a00/FT1086A/652/76741561_BRASILBrasiliaBSBPA14-05-2018PAEspecial-para-a-Revista-Epoca-sobre-a-comu.jpg?posicaoFoto10
- [12] ANSI/ASHRAE (2017) Standard 55: 2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE, Atlanta.
- [13] Mattheos Santamouris, Dionysia Kolokotsa, Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art, *Energy and Buildings*, Volume 57, 2013, Pages 74-94, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>.
- [14] Karthik Panchabikesan, Kumaresan Vellaisamy, Velraj Ramalingam, Passive cooling potential in buildings under various climatic conditions in India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 78, 2017, Pages 1236-1252, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.030>.
- [15] Karam M. Al-Obaidi, Mazran Ismail, Abdul Malek Abdul Rahman, Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 3, Issue 3, 2014, Pages 283-297, ISSN 2095-2635, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263514000399>
- [16] Ashok Kumar, B.M. Suman, Experimental evaluation of insulation materials for walls and roofs and their impact on indoor thermal comfort under composite climate, *Building and Environment*, Volume 59, 2013, Pages 635-643, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.023>.
- [17] L. Aditya, T.M.I. Mahlia, B. Rismanchi, H.M. Ng, M.H. Hasan, H.S.C. Metselaar, Oki Muraza, H.B. Aditya, A review on insulation materials for energy conservation in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 73, 2017, Pages 1352-1365, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>.
- [18] L. Aditya, T.M.I. Mahlia, B. Rismanchi, H.M. Ng, M.H. Hasan, H.S.C. Metselaar, Oki Muraza, H.B. Aditya, A review on insulation materials for energy conservation in buildings,

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 73, 2017, Pages 1352-1365, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>
- [19] Sau Wai Lee, Chin Haw Lim, Elias @ Ilias Bin Salleh, Reflective thermal insulation systems in building: A review on radiant barrier and reflective insulation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 65, 2016, Pages 643-661, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.002>.
- [20] S. Charca, J. Noel, D. Andia, J. Flores, A. Guzman, C. Renteros, J. Tumialan, Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions, *Energy and Buildings*, Volume 108, 2015, Pages 55-60, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.053>.
- [21] Ayoub Gounni, Mohamed Tahar Mabrouk, Mohamed El Wazna, Abdelhamid Kheiri, Mustapha El Alami, Abdeslam El Bouari, Omar Cherkaoui, Thermal and economic evaluation of new insulation materials for building envelope based on textile waste, *Applied Thermal Engineering*, Volume 149, 2019, Pages 475-483, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.057>.
- [22] Samuel Henrique Corso. "Thermal Analysis Of Tetra Pak Packaging As Thermal Insulation" *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, vol. 07, no. 03, 2018, pp. 08– 15. <http://www.irjes.com/Papers/vol7-issue3/C07030815.pdf>
- [23] Vieira, Gabriel & Borodinecs, A & Lima, Matheus. (2018). Thermal Performance of Tetra Pak Package as a Ceiling Material. 89.
- [24] Geetha, N.B. & Velraj, R.. (2012). Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage - A review. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*. 29. 913-946.
- [25] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2001). 2001 ASHRAE handbook: Fundamentals. Atlanta, GA: ASHRAE. <https://sovathrothsama.files.wordpress.com/2016/03/ashrae-hvac-2001-fundamentals-handbook.pdf>
- [26] P. F. Linden, "The Fluid Mechanics of Natural Ventilation", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Volume 31, 1999, Pages 201-238. <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.fluid.31.1.201>
- [27] Gan G, Riffat SB. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery. *Appl Therm Eng* 1998;18:1171–1187. https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_11632.pdf
- [28] Hayashi T, Ishizu Y, Kato S, Murakami S. CFD analysis on characteristics of contaminated indoor air ventilation and its application in the evaluation of the effects of contaminant inhalation by a human occupant. *Energy Build* 2002;37:219–230. https://www.academia.edu/5807751/Experimental_investigations_on_solar_chimney_for_room_ventilation
- [29] Online [Consultado a 10 de setembro de 2019]: 28 <https://www.tetrapak.com/pt/packaging/materials>
- [30] Bonaccorso, N. (2017). CHS.2. Plug-in solar chimney: an installed experiment in Brazil. SB-LAB 2017 Proceedings of the International Conference on Advances on Sustainable Cities and Buildings Development. Porto (PT), 15-17 November of 2017.
- [31] Bonaccorso, N., Martins, N. R., & da Graça, G. C. Validated Simulation of Low-Cost Thermal Envelope Upgrades for Slum Housing

