



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Manuel João de Almeida Matos

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
AVALIAÇÃO PARA ENSAIOS DE PAVIMENTOS
RADIANTES HIDRÁULICOS**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, na área de Energia e Ambiente orientada pelo Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira, pelo Doutor Michael Alexander de Oliveira Brett e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2023

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Desenvolvimento de um sistema de avaliação para ensaios de pavimentos radiantes hidráulicos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Development of an evaluation system for hydraulic radiant underfloor tests

Autor

Manuel João de Almeida Matos

Orientadores

Almerindo Domingues Ferreira

Michael Alexander de Oliveira Brett

Júri

Presidente	Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Doutor Michael Alexander de Oliveira Brett Investigador do ITECONS
Vogais	Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

ITECONS



ITECONS

Coimbra, setembro, 2023

Aos meus pais, Pedro e Catarina.

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que me acompanharam ao longo desta jornada e que tornaram esta dissertação possível.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Almerindo Domingues Ferreira, pela sua inestimável disponibilidade e ajuda ao longo deste processo.

Ao meu co-orientador, Doutor Michael Alexander de Oliveira Brett, agradeço profundamente por todo o tempo, apoio e partilha de conhecimento, sendo parte fundamental para tornar tudo isto possível.

Ao Professor Nuno Vieira Simões, expresso a minha gratidão pela oportunidade que me concedeu e pelos preciosos conselhos que partilhou durante a realização deste projeto.

Aos engenheiros e colaboradores do ITECONS, quero manifestar o meu apreço pelo tempo e esforço que dedicaram para esclarecer as minhas dúvidas e pelo valioso ensinamento proporcionado.

Ao projeto SEERFLOOR, referência PTDC/ECI-CON/3436/2020, apoiado pela FCT Portugal (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), pelo seu contributo essencial para esta dissertação.

Aos meus amigos, que me acompanharam ao longo deste percurso e sempre me incentivaram, o meu mais sincero obrigado.

Por último, mas não menos importante, quero expressar a minha profunda gratidão à minha família, aos meus irmãos, avós e, em especial, aos meus pais, pelo amor demonstrado e por nunca terem deixado de acreditar.

Resumo

Nos tempos recentes, o sistema de pavimento radiante tem ganho uma relevância crescente, devido à sua eficiência de aquecimento e baixo consumo energético. A presente dissertação constitui um estudo detalhado de sistemas de pavimento radiante hidráulico, realizado durante o período de estágio no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (ITECONS).

Este estudo tem como objetivos desenvolver um sistema de avaliação de pavimentos radiantes, avaliar o desempenho energético dos sistemas, analisar a distribuição de calor no ambiente interior e, conseqüentemente, avaliar o conforto térmico proporcionado. Para cumprir tais objetivos, foram delineadas e implementadas ações destinadas à avaliação do sistema como a elaboração de um programa personalizado para a monitorização e controlo dos ensaios realizados, o planeamento do isolamento térmico do ambiente interno e a adesão a normas de conforto térmico estabelecidas.

Foram testados três pavimentos radiantes distintos, cada um com argamassa de características diferentes e com capacidade para desempenhar tanto a função de aquecimento como de arrefecimento, tendo sido analisados para quatro condições de temperatura e humidade relativa, através da utilização de uma câmara climática.

Adicionalmente, realizou-se uma simulação através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) com o propósito de complementar a avaliação experimental, procurando validar e corroborar o modelo desenvolvido e, por conseguinte, reforçar a fiabilidade dos resultados numéricos obtidos.

Os resultados da avaliação experimental foram processados, originando os gráficos essenciais para a análise do sistema. Estes resultados mostraram o desempenho energético do sistema em estudo e uma avaliação do conforto térmico bastante positiva. No entanto, não foi possível obter uma concordância semelhante entre a simulação CFD e os resultados experimentais.

Conclui-se que o sistema revela resultados promissores e adequados, tanto no que concerne à função de aquecimento como à de arrefecimento. São apresentadas as eficiências energéticas do sistema para cada ensaio, de modo a proceder à comparação entre eles, juntamente com parâmetros de conforto térmico relevantes. Além disso, evidencia uma

discrepância vertical de temperatura reduzida, o que remete para uma uniformidade das temperaturas no ambiente interior e revela um conforto térmico adequado. Ainda assim, é possível observar e constatar certas medidas para melhorias na análise do sistema, bem como sugestões pertinentes para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Sistemas de pavimento radiante hidráulico, Sistema de avaliação, Conforto térmico, Simulação CFD, Ensaios experimentais.

Abstract

In recent times, the radiant underfloor system has been gaining increasing relevance due to its heating efficiency and low energy consumption. This dissertation constitutes a detailed study of hydraulic radiant floor systems, conducted during an internship at the Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (ITECONS).

The objectives of this study are to develop an evaluation system for radiant underfloors, assess the energy performance of the systems, analyze heat distribution in the indoor environment, and consequently evaluate the provided thermal comfort. To achieve these objectives, actions were outlined and implemented to evaluate the system, including the development of a customized program for monitoring and controlling the conducted tests, planning the thermal insulation of the indoor environment, and adhering to established thermal comfort standards.

Three distinct radiant floor systems were tested, each with different mortar characteristics and the capacity to function for both heating and cooling. These systems were analyzed under four temperature and relative humidity conditions using a climatic chamber.

Additionally, a Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation was performed to complement the experimental evaluation, aiming to validate and corroborate the developed model and, thereby, enhance the reliability of the obtained numerical results.

The results of the experimental evaluation were processed, generating essential graphs for system analysis. These results demonstrated the energy performance of the system under study and a highly positive assessment of thermal comfort. However, it was not possible to achieve similar agreement between the CFD simulation and experimental results.

In conclusion, the system shows promising and suitable results for both heating and cooling functions. Energy efficiencies for each test are presented for comparison, along with relevant thermal comfort parameters. Additionally, it highlights a reduced vertical temperature discrepancy, indicating temperature uniformity in the indoor environment and adequate thermal comfort. Nevertheless, there are opportunities for improvement in the system analysis, along with pertinent suggestions for future work.

Keywords: Hydraulic radiant underfloor systems, Evaluation System, Thermal comfort, CFD simulation, Experimental tests.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Nomenclatura e Siglas	xiii
Nomenclatura.....	xiii
Siglas	xiv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Apresentação e objetivos do instituto	2
1.3. Estrutura do relatório	3
2. Estado da arte.....	5
2.1. Sistemas de pavimentos radiantes.....	5
2.1.1. Tipos existentes e respetivos métodos de funcionamento	6
2.1.2. Diferenças entre sistemas	11
2.1.3. Vantagens e desvantagens	11
2.2. Conforto térmico.....	12
2.2.1. Fatores ambientais	13
2.2.2. Fatores individuais.....	14
2.2.3. Modelo de Fanger.....	15
2.3. Normas e legislações	16
2.3.1. ISO 7730.....	16
2.3.2. ASHRAE 55	17
2.3.3. ISO 7243.....	19
2.4. Balanço energético.....	20
2.4.1. Métodos de transferência de calor	21
3. Simulação CFD	23
3.1. Geometria.....	23
3.2. Setup do modelo	24
3.2.1. Malha	24
3.2.2. Condições de fronteira.....	25
3.2.3. Propriedades dos materiais	26
3.2.4. Solução/Solver.....	26
3.2.5. Convergência	27
3.3. Análise de resultados	27
3.4. Síntese.....	28
4. Ensaio experimental	29
4.1. Sistema de avaliação de piso radiante.....	29
4.1.1. Equipamentos	29
4.1.2. Dimensionamento do isolamento	30
4.1.3. Software.....	32
4.2. Ensaio.....	39
4.2.1. Procedimento dos ensaios.....	39

4.2.2.	Condições dos ensaios.....	40
5.	Análise dos resultados.....	41
5.1.	Ensaios.....	41
5.1.1.	1º Ensaio (Temperatura exterior 14°C).....	41
5.1.2.	2º Ensaio (Temperatura exterior 7°C).....	44
5.1.3.	3º Ensaio (Temperatura exterior 2°C).....	47
5.1.4.	4º Ensaio (Temperatura exterior 32°C).....	50
5.2.	Síntese.....	53
5.3.	Comparação com a previsão do CFD.....	53
5.4.	Normas de conforto térmico.....	54
5.4.1.	ISO 7730.....	54
5.4.2.	ASHRAE 55.....	54
6.	Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.....	57
6.1.	Principais conclusões.....	57
6.2.	Recomendações para trabalhos futuros.....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
	APÊNDICE A.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Perfil de temperatura: Pavimento radiante VS Radiadores (Lemos, 2013).	6
Figura 2.2. Perfis de temperatura para diversos tipos de aquecimento (Lemos, 2013).	6
Figura 2.3. Constituição de um pavimento radiante elétrico (Warmup, 2018).	7
Figura 2.4. Rede radiante elétrica (EDP Comercial, 2021).	8
Figura 2.5. Constituição de um pavimento radiante hidráulico (Lemos, 2013).	9
Figura 2.6. Constituintes de um tubo PEX (Pinto, 2020).	10
Figura 2.7 Diversas disposições da tubagem (Batista, 2012).	10
Figura 2.8. Parâmetros de conforto térmico (Lemos, 2013).	13
Figura 2.9. Correlação dos índices PMV e PPD (ISO 7730:2005).	16
Figura 2.10. Zonas de conforto térmico (ASHRAE 55:2020).	18
Figura 2.11. Modelo de aceitabilidade de conforto térmico adaptativo (ASHRAE 55:2020).	19
Figura 2.12. Correlação entre a taxa metabólica e o índice WBGT (ISO 7243:2017).	20
Figura 2.13. Trocas de calor entre um pavimento radiante hidráulico e um ambiente interior (Jiang et al., 2021).	20
Figura 3.1. Tubagem projetada no <i>SolidWorks</i>	23
Figura 3.2. Malha do sistema (a) Vista lateral (b) Vista panorâmica.	25
Figura 3.3. Malha refinada na zona das tubagens.	25
Figura 3.4. Convergência da simulação CFD.	27
Figura 3.5. Gradiente vertical de temperaturas no ambiente interior (a) Vista ISO (b) Vista lateral.	28
Figura 4.1. Isolamento de poliestireno expandido (a) Vista isométrica (b) Vista de cima.	31
Figura 4.2. Pré-montagem das paredes.	31
Figura 4.3. Pós-montagem das paredes.	32
Figura 4.4. Visão geral do <i>software</i> de aquisição e tratamento de dados desenvolvido.	33
Figura 4.5. Secção dos parâmetros calculados.	33
Figura 4.6. Exemplo do esquema de termopares para o ambiente interior.	37
Figura 4.7. Gráficos da alteração de temperatura e caudal do sistema.	38
Figura 4.8. Gráficos do ambiente exterior e interior.	38
Figura 4.9. (a) Sistema aberto (b) Sistema fechado.	39
Figura 4.10. Circuito hidráulico do sistema.	40

Figura 5.1. Evolução da temperatura ambiente interior, exterior e inferior no primeiro ensaio.	42
Figura 5.2. Índices de conforto térmico(a) Índice PMV (b) Índice PPD no primeiro ensaio.	42
Figura 5.3. Temperatura de entrada e saída da água no primeiro ensaio.	43
Figura 5.4. Eficiência energética do sistema no primeiro ensaio.	43
Figura 5.5. Temperatura dos 6 níveis no primeiro ensaio.	44
Figura 5.6. Evolução da temperatura ambiente interior, exterior e inferior no segundo ensaio.	45
Figura 5.7. Índices de conforto térmico (a) Índice PMV (b) Índice PPD no segundo ensaio.	45
Figura 5.8. Temperatura de entrada e saída da água no segundo ensaio.	46
Figura 5.9. Eficiência energética do sistema no segundo ensaio.	46
Figura 5.10. Temperatura dos 6 níveis no segundo ensaio.	47
Figura 5.11. Evolução da temperatura ambiente interior, exterior e inferior no terceiro ensaio.	47
Figura 5.12. Índices de conforto térmico (a) Índice PMV (b) Índice PPD no terceiro ensaio.	48
Figura 5.13. Temperatura de entrada e saída da água no terceiro ensaio.	48
Figura 5.14. Eficiência energética do sistema no terceiro ensaio.	49
Figura 5.15. Temperatura dos 6 níveis no terceiro ensaio.	49
Figura 5.16. Evolução da temperatura ambiente interior, exterior e inferior no quarto ensaio.	50
Figura 5.17. Índices de conforto térmico (a) Índice PMV (b) Índice PPD no quarto ensaio.	51
Figura 5.18. Temperatura de entrada e saída da água no quarto ensaio.	51
Figura 5.19. Eficiência energética do sistema no quarto ensaio.	52
Figura 5.20. Temperatura dos 6 níveis no quarto ensaio.	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Taxas metabólicas para diversos tipos de atividade (ASHRAE 55:2020, ISO 7730:2005).....	14
Tabela 2.2. Resistência térmica de vestuário (Gil, 2017).....	15
Tabela 2.3. Categorias de conforto térmico para espaços interiores (ISO 7730:2005).....	17
Tabela 3.1. Propriedades dos materiais constituintes do sistema.	26
Tabela 4.1. Condições para cada ensaio realizado.	40
Tabela 5.1. Dados de conforto térmico para cada ensaio realizado.	54

NOMENCLATURA E SIGLAS

Nomenclatura

A_w – Área da envolvente

c_p – Calor específico do fluido

c_{pf} – Calor específico do pavimento

D – Diâmetro do globo negro

E_u – Energia útil

E_f – Energia fornecida

E_{dis} – Energia dissipada

e – Espessura do material

f_{cl} – Fator do vestuário

HR – Humidade relativa

h_c – Coeficiente convectivo entre a superfície exterior do vestuário e o ar exterior

I_{cl} – Resistência térmica do vestuário

M – Atividade física

PMV – *Predicted mean vote*

PPD – *Predicted percentage of dissatisfied*

p_{wv} – Pressão do vapor saturado

q_0 – Calor total fornecido pela água

q_r – Taxa de transferência de calor radiante

q_c – Taxa de transferência de calor por convecção

q_w – Calor dissipado pelas paredes e envolvente

R_s – Resistência térmica do material

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior

R_{si} – Resistência térmica superficial interior

T_{in} – Temperatura de entrada da água

T_{out} – Temperatura da saída da água

T_f – Temperatura média da superfície do pavimento

- T_w – Temperatura média da envolvente exterior
 T_e – Temperatura do ambiente exterior
 T_{cl} – Temperatura exterior do vestuário
 T_r – Temperatura média radiante
 T_g – Temperatura de globo negro
 T_a – Temperatura do ar
 T_o – Temperatura operativa
 U – Coeficiente global de transferência de calor da envolvente
 V_f – Volume do pavimento
 \dot{V} – Caudal volúmico
 v_{ar} – Velocidade do ar
 W – Trabalho mecânico
WBGT – *Wet-bulb globe temperature* (Índice da norma ISO 7243)
 τ – Tempo
 ε – Emissividade do globo negro
 η – Eficiência energética
 λ – Condutibilidade térmica

Siglas

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

CFD – Computational Fluid Dynamics

EPS – Poliestireno expandido

ITECONS – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade

MATLAB - *MATrix LABoratory*

PEX – Polietileno reticulado

SEERFLOOR – *Super Energy Efficient Radiant Floor Systems*

XPS – Poliestireno extrudido

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, procede-se à contextualização do trabalho de investigação, abordando a sua origem e relevância. Adicionalmente, é apresentada a instituição onde decorreu o estágio curricular, bem como os objetivos definidos. Por fim, é delineada a estrutura do relatório, proporcionando uma breve descrição sobre os tópicos abordados em cada capítulo.

1.1. Enquadramento

Desde tempos imemoriais, o ser humano procura o conforto térmico e essa busca permanece em constante aprimoramento. Para alcançar tal objetivo, diversos métodos têm sido criados e testados, com o intuito de beneficiar o bem-estar humano. O conforto térmico é avaliado mediante a consideração de vários fatores inter-relacionados, incluindo aspetos físicos e psicossociais, com o propósito de proporcionar um ambiente térmico agradável, no qual não haja sensação de frio ou de calor excessivo. Em geral, o conforto térmico pode ser definido como a condição mental de satisfação em relação ao ambiente circundante (Lemos, 2013).

Estima-se que 80% a 90% do tempo de vida humana seja passado em ambientes internos. Dessa forma, é possível inferir que o conforto térmico desempenha um papel crucial na produtividade e no desempenho das atividades diárias, ficando assim evidente a sua relevância (Schirmer et al., 2011).

Neste seguimento, o uso de sistemas de climatização tornou-se uma necessidade incontornável, assumindo uma crescente importância no mercado contemporâneo. O interesse em tais sistemas tem impulsionado o progresso tecnológico, resultando na exigência num aumento de qualidade de vida padrão. Como resposta a essa crescente demanda, foram desenvolvidos sistemas alternativos, visando promover a economia de baixo carbono e a consciencialização sobre sustentabilidade e eficiência energética.

Assim, entre os sistemas mais promissores, destaca-se o pavimento radiante. Este sistema, que pode ser alimentado recorrendo a fontes de energias renováveis, proporciona uma climatização homogénea e eficiente, com baixo consumo energético quando comparado a outros sistemas tradicionais. Dado que é um equipamento amplamente aceite e em constante crescimento, é relevante estabelecer um sistema de ensaio que permita avaliar a

eficácia no aquecimento do ar e o desempenho energético, bem como comparar diferentes sistemas.

Devido à sua inovação e potencial, o presente trabalho tem como foco o estudo de um sistema de pavimento radiante hidráulico, através do desenvolvimento de um sistema de avaliação/ensaio, da realização de testes experimentais e da simulação numérica usando ferramentas de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para avaliar o seu desempenho energético. Serão igualmente avaliados parâmetros de conforto térmico para permitir uma análise crítica e a obtenção de resultados mais favoráveis.

1.2. Apresentação e objetivos do instituto

Este relatório visa descrever o trabalho desenvolvido durante a realização do estágio curricular com duração de 5 meses, no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (ITECONS). Este estágio providenciou a oportunidade da inserção no mercado de trabalho, adquirindo experiência e competências num âmbito mais prático da engenharia mecânica.

O ITECONS é uma associação sem fins lucrativos, fundada em 2006 e localizada em Coimbra, que atua como uma instituição de utilidade pública, prestando serviços de investigação aplicada e consultoria.

O projeto *Super Energy Efficient Radiant Floor Systems (SEERFloor)* suportou o objeto de estudo e análise deste relatório. Retrata o desenvolvimento e a inovação de sistemas de pavimentos radiantes hidráulicos para aquecimento e arrefecimento, constituindo, assim, um avanço substancial e evolução destes sistemas.

Foram realizados ensaios experimentais para diferentes tipos de pavimentos radiantes hidráulicos, com diferentes características de argamassa. A fim de avaliar o seu comportamento, simularam-se diversas condições de temperatura e humidade relativa.

Delinearam-se os seguintes objetivos para o estudo:

- Desenvolver um sistema de avaliação de pavimentos radiantes,
- Avaliar o desempenho energético dos sistemas,
- Analisar a distribuição de calor no ambiente interior,
- Avaliar o conforto térmico proporcionado, recorrendo a normas específicas.

Através da avaliação de parâmetros relacionados com a eficiência energética e conforto térmico, torna-se possível formular uma conclusão sobre a eficácia dos pavimentos radiantes hidráulicos e proceder, assim, à comparação entre eles.

1.3. Estrutura do relatório

O presente relatório está dividido em 6 capítulos interligados entre si, relacionando os vários temas abordados de maneira coerente e lógica.

Este capítulo remete para a fase de introdução do relatório, onde é feito o enquadramento da temática em estudo e a especificação dos objetivos, assim como uma apresentação do instituto e do projeto desenvolvido nesse âmbito. Procede-se também a uma explicação detalhada da estrutura do relatório, bem como uma breve descrição dos tópicos a serem abordados.

No capítulo dois, é descrito o estado da arte, sendo apresentados conceitos e definições relevantes ao tema, como os seus diversos tipos, parâmetros de conforto térmico, normas que devem ser seguidas e uma análise teórica sobre a eficiência energética. Estas informações são essenciais para a compreensão e análise do sistema em estudo.

No terceiro capítulo, efetua-se uma simulação CFD de um sistema de pavimento radiante hidráulico, com o objetivo de indicar o seu propósito, descrever o procedimento adotado e analisar os diversos parâmetros envolvidos. Esta simulação proporciona um melhor entendimento do sistema e contribui para a avaliação do seu desempenho.

O capítulo quatro aborda a execução dos ensaios experimentais dos diferentes tipos de pavimentos radiantes hidráulicos, sendo apresentado pormenorizadamente o procedimento e metodologia adotados, assim como os equipamentos utilizados para esse efeito.

No quinto capítulo, são analisados os resultados experimentais obtidos e é realizada uma comparação destes com os da simulação CFD. Essa análise permite avaliar a concordância entre as duas abordagens e fornecer uma perspetiva mais abrangente sobre o desempenho do sistema de pavimento radiante hidráulico em estudo.

No sexto capítulo expõem-se as conclusões finais dos resultados obtidos e são apresentadas algumas recomendações para possíveis trabalhos futuros

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, são abordados o conceito e a origem do pavimento radiante, os diversos tipos existentes e o seu método de funcionamento. É também realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o conforto térmico e como este pode ser avaliado, através de parâmetros, fatores e normas padrão estabelecidos. Por fim, realiza-se ainda uma revisão da literatura das trocas de energia do sistema em questão.

2.1. Sistemas de pavimentos radiantes

O sistema de pavimento radiante remonta à era dos romanos, baseado no sistema hipocausto utilizado na altura. Esse sistema consistia no aquecimento do ar numa fornalha, que por sua vez, circulava sob o pavimento e através das paredes. No pós-Imperialismo, este tipo de aquecimento caiu em desuso na Europa e entrou em hibernação por muitos séculos. No entanto, voltou a ser empregue pelos franceses e britânicos, em meados do século XX (Rastello, 2013).

De maneira a obter conforto térmico, o desenvolvimento de sistemas radiantes mais eficientes e com baixos consumos energéticos veio a ganhar uma maior relevância. Tem como base a instalação de circuitos hidráulicos ou elétricos embutidos no pavimento, distribuídos criteriosamente por toda a superfície a climatizar.

Os pavimentos radiantes realizam a transferência de calor através dos três modos fundamentais: condução, convecção e radiação (Moran & Shapiro, 2006). No entanto, estes sistemas caracterizam-se como radiantes uma vez que mais de 50% da energia gerada se transfere por radiação (ASHRAE 2020).

O perfil térmico ideal indicia que a temperatura do ar deve ser maior na região inferior do corpo, diminuindo gradualmente até à altura da cabeça – conhecido como "Pés quentes cabeça fria". Para o utilizador, isto traduz-se numa situação de conforto sem que haja assimetrias térmicas significativas, ao contrário do que acontece com a utilização de alguns sistemas tradicionais, como ilustrado no exemplo apresentado da Figura 2.1 (UPONOR conforme referido por Lemos, 2013).

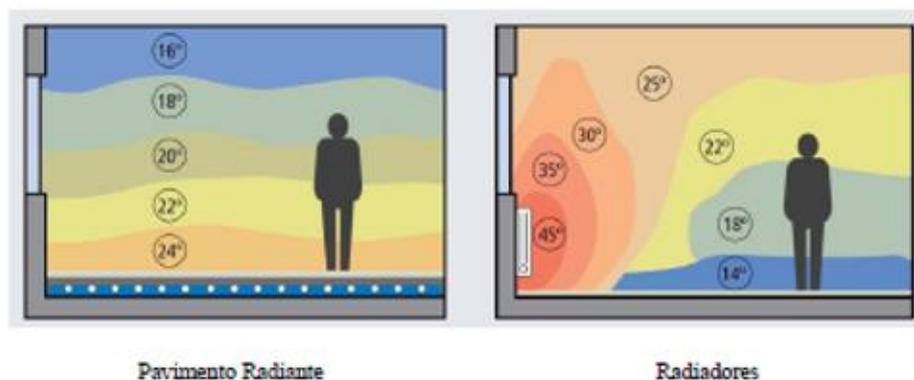


Figura 2.1. Perfil de temperatura: Pavimento radiante VS Radiadores (UPONOR, 2023).

O sistema de pavimento radiante, ao ser utilizado para aquecimento, apresenta um perfil bastante próximo do ideal. Isto deve-se ao facto deste sistema aquecer o espaço de forma uniforme com um gradiente negativo de temperaturas, como apresentado na Figura 2.2.

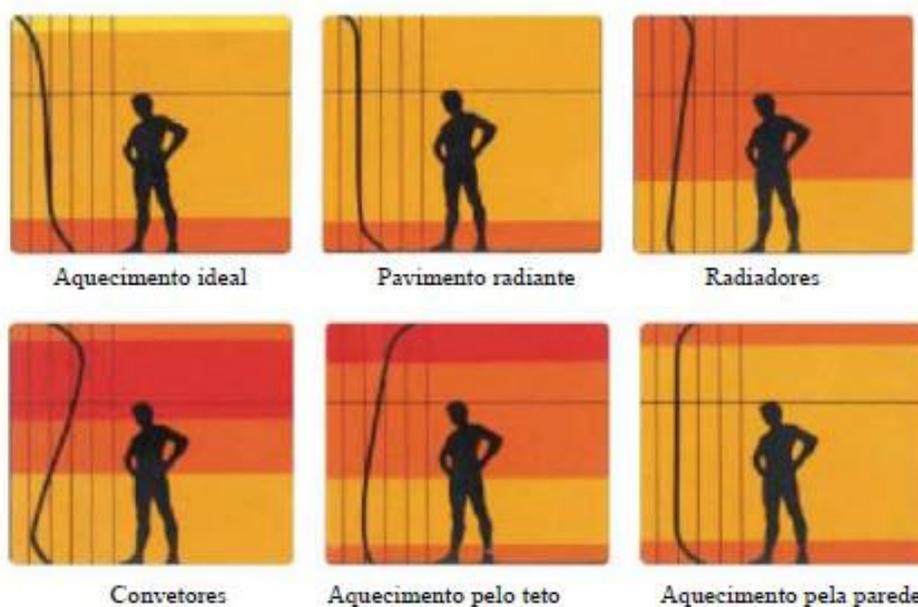


Figura 2.2. Perfis de temperatura para diversos tipos de aquecimento (UPONOR, 2023)

2.1.1. Tipos existentes e respetivos métodos de funcionamento

Atualmente, existem dois tipos principais de pavimentos radiantes: elétricos e hidráulicos. Os sistemas elétricos consistem no uso de cabos de aquecimento ou resistências elétricas embutidas no pavimento, por baixo do revestimento final e em cima de um isolamento térmico. Este tipo de sistema promove apenas aquecimento, sendo mais rápido

que o hidráulico, indicado para uma divisão não muito grande ou como suporte a outro sistema de aquecimento.

Os sistemas hidráulicos têm um processo de instalação mais complexo que o elétrico, no entanto, são mais eficazes e resultam num bom sistema de climatização central. Consiste na impulsão de água a uma temperatura moderada, através de tubos de polietileno reticulado embutidos no piso. A energia térmica do fluido é dissipada por condução para a argamassa envolvente. Deste modo, devido à sua inércia térmica, a energia armazenada na argamassa é transferida, por meio de radiação e convecção, para o espaço interior. Ao contrário do elétrico, este sistema é capaz de, não só efetuar aquecimento, como também arrefecimento (Batista, 2012).

O caudal de água é regulado e impulsionado de acordo com as necessidades de cada divisão do edifício. Uma vez que é um sistema particionado, é possível controlar, de forma independente, a temperatura de cada compartimento (UPONOR, 2023). Estes sistemas permitem utilizar a mesma estrutura para aquecimento e arrefecimento, devendo ser, contudo, instalados separadamente (Martins, 2011).

De acordo com as diretrizes atuais de conforto, a temperatura da superfície dos pisos radiantes deve estar entre 19°C a 29°C. Esta faixa de temperatura garante que haja um funcionamento seguro, eficiente e económico do sistema, proporcionando também um ambiente interior confortável (ISO 7730:2005).

2.1.1.1. Pavimento radiante elétrico

Este sistema é composto, geralmente, por três componentes, como está ilustrado na Figura 2.3 (Warmup, 2018):

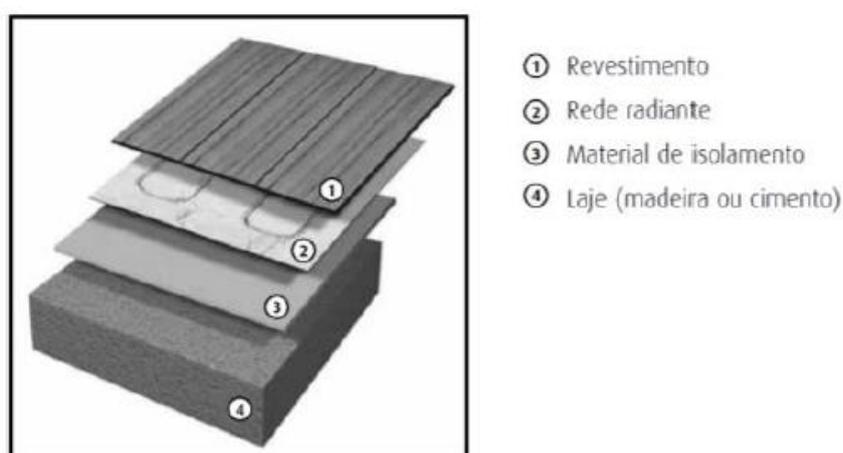


Figura 2.3. Constituição de um pavimento radiante elétrico (Warmup, 2018).

A rede radiante é o principal componente deste sistema, seguindo a disposição exemplificada na Figura 2.4. É composta por cabos ou tapetes elétricos responsáveis pela geração de calor e instalada por baixo do revestimento (Rodrigues, 2019). Geralmente, uma irradiação de 150 W/m^2 é suficiente para a maioria das aplicações, sendo, no entanto, aceitável um valor de 200 W/m^2 se o espaço tiver grandes perdas de calor para o exterior (VIESSMANN, 2022).

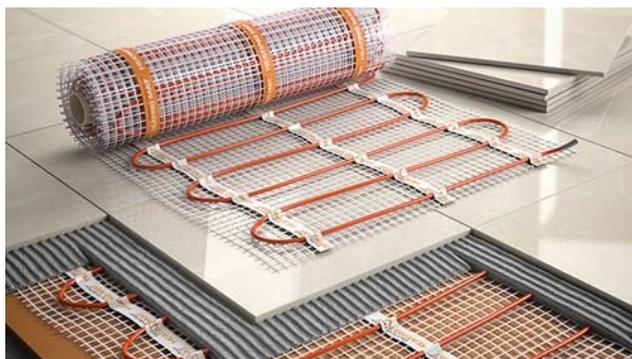


Figura 2.4. Rede radiante elétrica (EDP Comercial, 2021).

Adicionalmente, é instalado um termostato para controlar a temperatura do sistema de aquecimento e manter a temperatura desejada, um controlador de temperatura para monitorar a temperatura do sistema e ajustar a saída de calor conforme necessário e um sensor de temperatura que transmite a informação para o operador do sistema (CGE, 2018).

O revestimento e o isolamento são componentes em comum com o sistema hidráulico, pelo que o seu propósito e características são abordados posteriormente.

2.1.1.2. Pavimento radiante hidráulico

A configuração do pavimento radiante hidráulico é apresentada na Figura 2.5, representando o foco principal deste relatório. Este sistema é composto essencialmente por 5 componentes, nomeadamente:

- I. Isolamento Térmico/Termo Placa (EPS ou XPS),
- II. Tubos (Polietileno Reticulado),
- III. Argamassa Aditiva/Betonilha,
- IV. Faixa Perimetral (EPS),
- V. Revestimento Final (Madeira, Cerâmico, Linóleo, etc.).

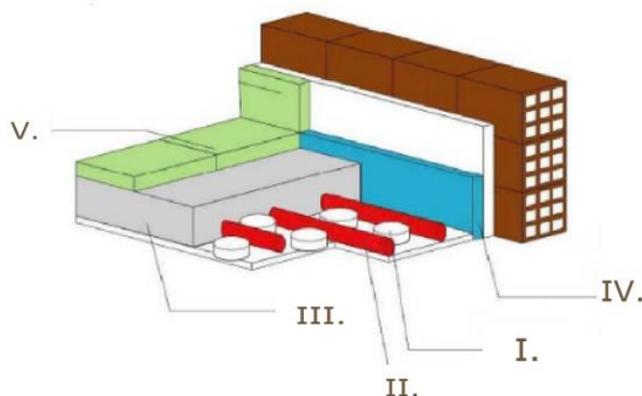


Figura 2.5. Constituição de um pavimento radiante hidráulico (Lemos, 2013).

I. Termoplaca

A termoplaca é um painel modular colocado sobre a laje, com o objetivo de facilitar a instalação da tubagem devido a um sistema de encaixe. Geralmente, é constituído por um material isolante, como poliestireno expandido (EPS) ou poliestireno extrudido (XPS), com condutibilidades térmicas inferiores ou iguais a $0,065 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$, de modo a reduzir as perdas de calor para baixo.

II. Tubagem

Inicialmente, eram utilizados tubos de cobre ou polibutileno para o transporte do fluido, no entanto, o cobre degradava-se em contacto com a argamassa e o polibutileno absorvia oxigénio, causando problemas de corrosão e possibilidade de fugas (LaVere, 2009). É essencial os tubos apresentarem uma boa flexibilidade e tolerância a altas temperaturas, pelo que o material mais indicado é o polietileno reticulado (PEX), devido às características que apresenta em relação aos outros materiais. O tubo é formado por três camadas: uma externa e interna de PEX e uma intermédia de alumínio com o objetivo de impermeabilizar ao oxigénio, evitando fugas e problemas de corrosão, conforme o ilustrado na Figura 2.6 (Pinto, 2020).

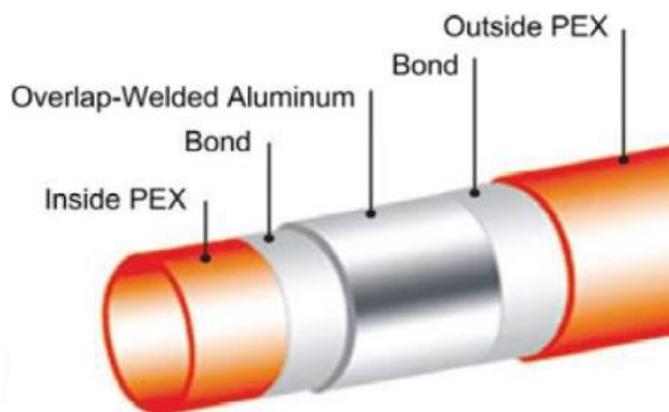


Figura 2.6. Constituintes de um tubo PEX (Mr.Pex, 2017)

Na tubagem podem variar alguns parâmetros importantes, de acordo com as necessidades térmicas de cada espaço, tais como o diâmetro, o caudal e a sua disposição (espaçamento e forma). O diâmetro e o caudal estão relacionados e são dimensionados para cumprir os requisitos de conforto térmico. No que toca à disposição, existem diversas formas, como apresentado na Figura 2.7.

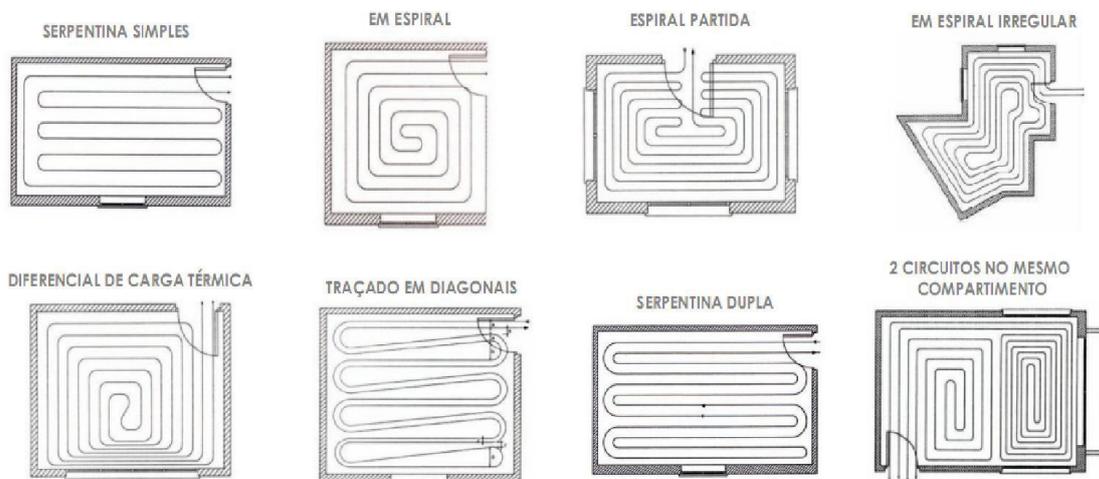


Figura 2.7 Diversas disposições da tubagem (LuxMagna, 2012)

III. Argamassa

A escolha da argamassa/betonilha tem um impacto significativo nos resultados apresentados pelo sistema. Existem quatro tipos de diferentes argamassas: dessolarizadas, aderente, flutuante e radiante(Pinto, 2020).

Para o sistema em estudo, a argamassa é do tipo radiante. Esta incorpora o sistema de tubagens e o seu conjunto pode ser referido como rede radiante. Deve ter uma espessura

mínima de 2 cm acima da tubagem e, ao seleccionar a argamassa, é importante considerar a sua condutividade e inércia térmica.

IV. Faixa Perimetral

A faixa perimetral tem um propósito semelhante ao da termoplaca, isolando termicamente o pavimento de modo a reduzir as perdas de calor e as pontes térmicas.

V. Revestimento Final

Existem vários materiais que podem servir de acabamento final para o sistema, como cerâmica, linóleo, madeira, etc. Porém, estes revestimentos finais costumam ser de preferência do ocupante, pelo que neste relatório não será abordado este parâmetro.

2.1.2. Diferenças entre sistemas

As principais diferenças entre os pavimentos radiantes eléctricos e hidráulicos são as seguintes(EDP Comercial, 2021):

- O hidráulico demonstra ser mais económico devido ao custo da electricidade ser superior ao da água;
- Sistemas eléctricos são aconselháveis para aquecimento de áreas muito reduzidas ou para complementar outros sistemas de aquecimento;
- Para renovações de casas, a instalação do sistema eléctrico revela-se consideravelmente mais simples, visto que tem uma menor complexidade e não altera muito a altura do piso;
- Para novos projetos de construção é recomendado o hidráulico;
- O pavimento hidráulico integra um sistema autónomo adequado para casa de grandes dimensões;
- Apesar dos custos iniciais de instalação serem inferiores nos sistemas eléctricos, os hidráulicos podem revelar-se mais vantajosos a longo prazo devido às despesas operacionais inferiores.

2.1.3. Vantagens e desvantagens

De seguida, são apresentadas algumas vantagens e desvantagens relativamente aos pavimentos radiantes hidráulicos.

Vantagens (ASHRAE, 2020; LaVere, 2009; Watson & Chapman, 2004):

- Distribuição uniforme de calor no ambiente;

- Climatização sem movimentação de ar;
- Maior economia de energia devido às infiltrações e fugas de ar reduzidas;
- Pouca manutenção;
- Filtragem do ar não necessária - não ocorre ventilação;
- Sistema “invisível” – devido ao facto de estar montado entre o pavimento;
- Compatibilidade com fontes de energias renováveis;
- Sistema particionado, de modo a obter diferentes temperaturas em cada compartimento;
- Ruído quase inexistente;
- Ausência de riscos – de queimaduras e ferimentos.

Desvantagens (ASHRAE, 2020; Watson & Chapman, 2004):

- Custo de instalação elevado;
- Como o sistema é embutido no pavimento, o acesso torna-se complicado e difícil, pelo que sempre que for necessário algum tipo de intervenção o seu custo será dispendioso;
- Tempo de resposta mais lento que os sistemas tradicionais;
- Se houver um incorreto dimensionamento e instalação do sistema, as temperaturas à superfície podem não ser uniformes.

2.2. Conforto térmico

De acordo com a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), o conforto térmico advém do estado da pessoa, como a expressão de satisfação com o ambiente inserido. A sua análise em relação ao sistema em questão segue o disposto das normas principais ASHRAE 55:2020 (*Thermal environmental conditions for human occupancy*), ISO 7730:2005, ISO 7243:2017 e da norma europeia EN 15251:2012, que, para além do conforto térmico, trata ainda da qualidade interna do ar, iluminação e da acústica. No entanto, este relatório não aborda as condições de iluminação e acústica, pelo que o seu estudo recai principalmente nas três primeiras normas mencionadas.

Entende-se, assim, que, para garantir o conforto, é necessário alcançar um equilíbrio térmico entre as trocas de calor do corpo com o ambiente, mantendo a temperatura interna do corpo estável, durante um período requerido.

Porém, conforto térmico não está apenas relacionado com a temperatura ambiente, sendo que é uma condição necessária, mas não suficiente. Existem outros parâmetros que influenciam o conforto térmico descritos nas normas mencionadas, tais como parâmetros físicos, relacionados com fatores ambientais e individuais, e parâmetros subjetivos, baseados em fatores psicossociais, como demonstrado esquematicamente na Figura 2.8 (Lemos, 2013).

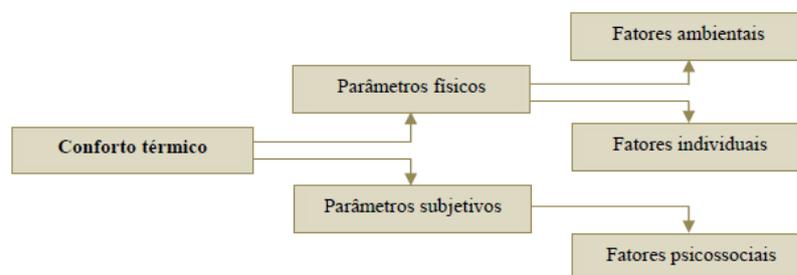


Figura 2.8. Parâmetros de conforto térmico (Lemos, 2013).

2.2.1. Fatores ambientais

Os fatores ambientais com implicação no conforto térmico são a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a humidade relativa e a velocidade do ar (Lemos, 2013).

Temperatura do ar

Esta temperatura corresponde à de bolbo seco, isto é, a temperatura seca do ar, capaz de ser medida por termómetros comuns e expressa em graus Celsius, Kelvin ou Fahrenheit.

Temperatura média radiante

É a temperatura média de todas as superfícies que envolvem um espaço, onde existe um balanço das transferências de calor por radiação entre um ocupante e o respetivo espaço (Gil, 2017).

Humidade Relativa

Relação entre a pressão parcial de vapor de água do ar e a pressão de vapor nas condições de equilíbrio. Este parâmetro é apresentado em percentagem, variando entre 0 e 100%.

Velocidade do ar

Pode ser especificada pela sua intensidade e direção, não tendo de ser necessariamente uma causa da ação do vento, podendo ser formada através dos processos de convecção em ambientes interiores. É um parâmetro bastante importante a ter em conta pelo facto de muitas vezes, gerar sensações de desconforto (Lemos, 2013).

Quanto maior a velocidade do ar, maior a sensação de troca de calor.

2.2.2. Fatores individuais

Os fatores individuais com influência no conforto térmico são a taxa metabólica e o vestuário.

Taxa Metabólica

O metabolismo reflete a taxa de utilização de energia pelo corpo, através de uma atividade física efetuada, quer seja sedentária ou ativa (Lemos, 2013).

Para a realização da mesma atividade, verificou-se que o metabolismo varia com a área corporal, pelo que é apresentado em W/m^2 , tendo como referência para a área o valor de $1,75 m^2$ para o corpo de um adulto (Martins, 2011).

Utiliza-se a unidade met, para uma melhor designação da respetiva taxa, onde 1 met ($58 W/m^2$) corresponde a uma atividade de repouso sem qualquer tipo de esforço. A Tabela 2.1 apresenta diversas atividades e as suas respetivas taxas metabólicas.

Tabela 2.1. Taxas metabólicas para diversos tipos de atividade (ASHRAE 55:2020, ISO 7730:2005).

Atividade física	Taxas metabólicas	
	(W/m^2)	(met)
Repouso, deitado	46	0,5
Repouso, sentado	58	1,0
Repouso, em pé	70	1,2
Atividade ligeira, sentado (escritório, escola, laboratório)	70	1,2
Atividade ligeira, em pé (compras, indústria ligeira)	93	1,6
Atividade média (vendedor, trabalho doméstico, trabalho com maquinaria)	116	2,0
Atividade pesada (trabalho com maquinaria pesada, trabalho de garagem)	174	3,0
Andar à velocidade de 2km/h	110	1,9
Andar à velocidade de 3km/h	140	2,4

Vestuário

A roupa é a primeira resistência das trocas de calor entre o corpo humano e o meio ambiente, caracterizando-se através da sua resistência térmica, I_{cl} , expressa em m^2K/W (Lemos, 2013).

Do mesmo modo que no metabolismo, para o vestuário é utilizado uma unidade própria para uma melhor designação da resistência térmica, o clo. Através da Tabela 2.2, é possível identificar a resistência térmica para distintas situações de vestuário sendo que, 1 clo equivale a $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ (Krieder & Rabl, 1994).

Tabela 2.2. Resistência térmica de vestuário (Gil, 2017).

VESTUÁRIO	Resistência térmica (I_{vest}) (clo)	Resistência térmica (I_{vest}) ($\text{m}^2\text{K/W}$)
Nu	0	0
Calções	0.1	0.016
Vestuário tropical	0.3	0.047
Vestuário leve de verão	0.5	0.078
Vestuário de trabalho	0.7	0.124
Vestuário de inverno para ambiente interior	1.0	0.155
Fato completo	1.5	0.233

2.2.3. Modelo de Fanger

Atualmente, é possível não só qualificar, como também quantificar o nível de conforto de um ambiente interior. Para este efeito, recorre-se ao modelo de *Fanger*, cujo trabalho constitui uma base de referência para os estudos e normas de conforto térmico.

O modelo de *Fanger* é um método utilizado para avaliar o conforto térmico em ambientes fechados. Desenvolvido pelo professor dinamarquês *Povl Ole Fanger*, na década de 1970, este modelo leva em consideração seis fatores principais que influenciam a perceção de conforto térmico: temperatura do ar, velocidade do ar, humidade relativa, temperatura média radiante, atividade física e vestuário (Lemos, 2013).

Com base nesses parâmetros, o modelo de *Fanger* determina o índice de conforto térmico *Predicted Mean Vote* (PMV), que consiste numa medida numérica da sensação térmica média de um grupo de pessoas num determinado ambiente. Este índice PMV varia de -3 a +3, onde valores negativos indicam desconforto térmico devido ao frio e valores positivos indicam desconforto térmico devido ao calor. O valor ideal do PMV é zero, o que indica uma sensação térmica neutra.

Além do PMV, o modelo de *Fanger* também calcula o índice *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) ou “percentagem previsível de desconfortáveis”, que representa a proporção de ocupantes que não se encontram satisfeitos com o ambiente inserido. Este valor

varia numa escala (percentil) de 0% a 100%, sendo que os valores mais próximos de 0% indicam um maior nível de satisfação com o ambiente inserido(Lemos, 2013).

Para um nível máximo de conforto térmico, o índice PMV apresentará um valor de 0 e o PPD um valor de 5%, isto porque não é possível agradar todos os indivíduos de igual forma, num determinado ambiente. A Figura 2.9 apresenta a correlação entre os dois índices mencionados. A forma de como ambos os índices são determinados é descrita posteriormente no capítulo do ensaio experimental, na secção 4.

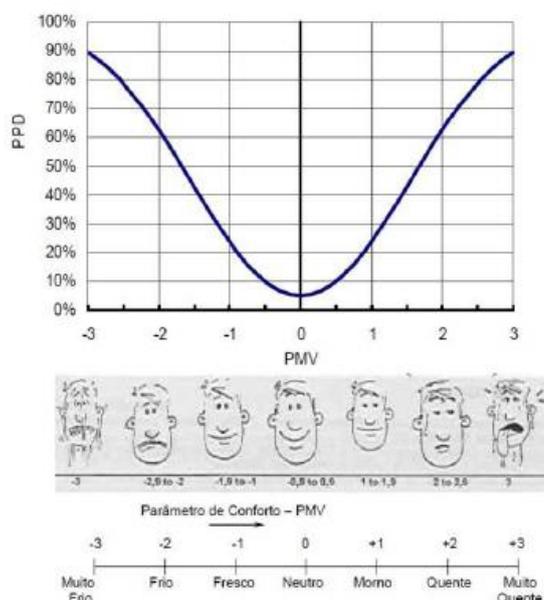


Figura 2.9. Correlação dos índices PMV e PPD (ISO 7730:2005).

2.3. Normas e legislações

O uso de normas deve-se à subjetividade e ambiguidade que há em relação ao conforto térmico. Assim, de modo a obter um sistema de referência, foram criadas normas para avaliar o conforto térmico com base em alguns fatores e parâmetros. Existem diversas normas para o conforto, pelo que é necessário escolher a mais apropriada para o tema em estudo (Gonçalves, 2017).

2.3.1. ISO 7730

A norma ISO 7730:2005, aplicada a ambientes térmicos moderados, faz a avaliação do conforto térmico através da caracterização dos parâmetros físicos (ambientais e individuais) previamente mencionados.

Após os parâmetros serem devidamente definidos, a sensação térmica do corpo pode ser quantificada a partir dos índices PMV e PPD.

Devido aos parâmetros subjetivos, é impossível projetar um ambiente satisfatório para todos. Assim, o requisito térmico é dimensionado para agradar a maioria dos seus ocupantes. Para isso, foram criadas três categorias com diferentes níveis de exigência, A, B e C.

De acordo com a Tabela 2.3 descrita na norma, a categoria A é a mais exigente, recomendada para pessoas débeis e com necessidades especiais, tais como crianças, idosos, doentes, etc. A categoria B é utilizada para edifícios novos e a C para edifícios já existentes, cujos requisitos não sejam muito rigorosos.

Tabela 2.3. Categorias de conforto térmico para espaços interiores (ISO 7730:2005).

Category	Thermal state of the body as a whole		Local discomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				vertical air temperature difference	warm or cool floor	radiant asymmetry
A	< 6	$-0,2 < PMV < +0,2$	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	$-0,5 < PMV < +0,5$	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	$-0,7 < PMV < +0,7$	< 30	< 10	< 15	< 10

2.3.2. ASHRAE 55

ASHRAE 55:2020 é uma norma americana que estabelece as condições ambientais internas aceitáveis, de modo a alcançar o conforto térmico dos ocupantes. Esta norma apresenta três formas de especificar as suas condições de conforto térmico.

A primeira abordagem consiste em definir a zona de conforto para uma atividade metabólica compreendida entre 1,0 e 1,3 met e, para o vestuário, uma resistência térmica entre 0,5 e 1 clo, como se pode observar na Figura 2.10.

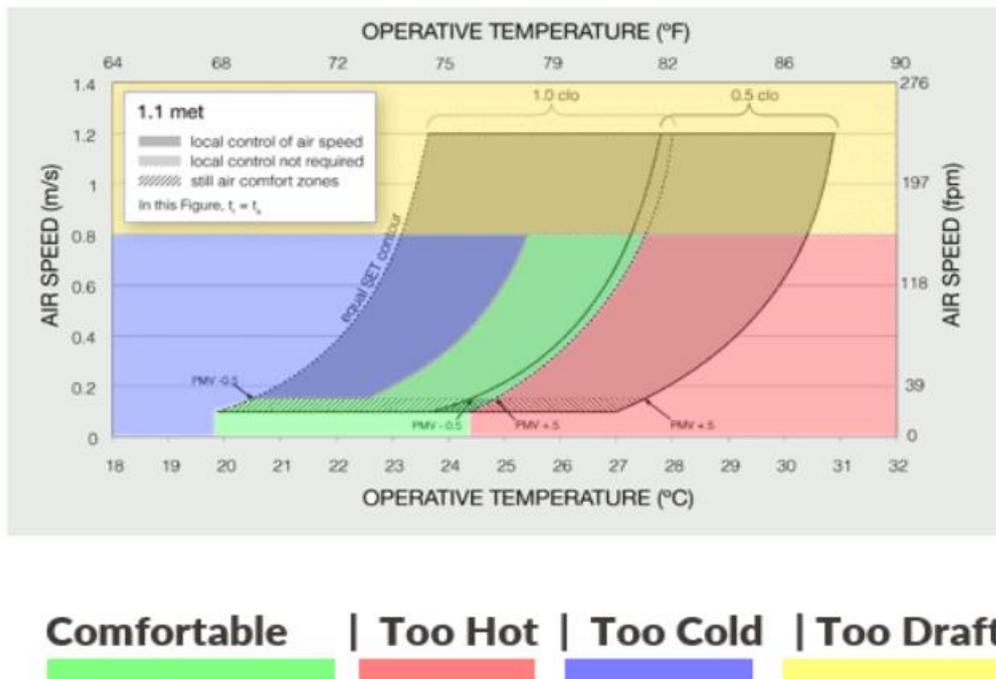


Figura 2.10. Zonas de conforto térmico (ASHRAE 55:2020).

À semelhança da norma ISO 7730:2005, a outra forma de especificar as condições de conforto vai ao encontro do modelo de *Fanger*, utilizando os índices PPD e PMV anteriormente descritos.

O último método utiliza o modelo adaptativo, que consiste na definição da zona de conforto através da temperatura operativa interna e da temperatura média do ar exterior, para duas faixas: uma de 90% de satisfação dos ocupantes (mais rígida) e a outra de 80%, conforme esquematizado na Figura 2.11.

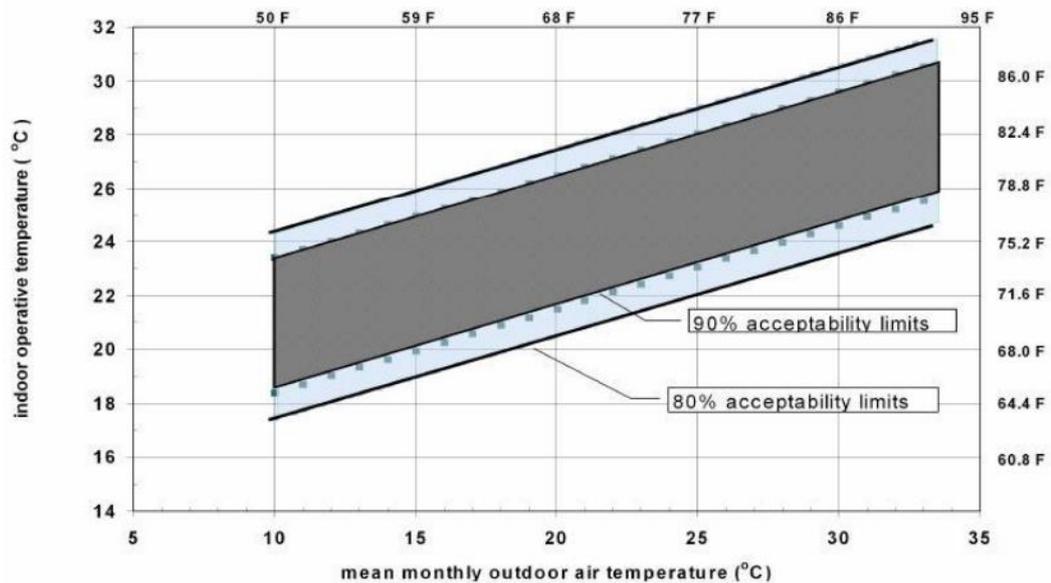


Figura 2.11. Modelo de aceitabilidade de conforto térmico adaptativo (ASHRAE 55:2020).

2.3.3. ISO 7243

Esta norma internacional fornece um método de avaliação do stress térmico a que o ocupante está sujeito. É destinada a ser utilizada na avaliação de ambientes térmicos quentes, moderados e frios. Apenas pode ser utilizada em exposições prolongadas, como um dia de trabalho (8 horas).

De acordo com a mesma norma, o índice *Wet-bulb globe temperature* (WBGT) é um tipo de temperatura aparente usada para estimar o efeito da temperatura, humidade relativa, velocidade do ar e radiação visível e infravermelha (geralmente luz solar) em humanos.

Assim, recorrendo ao índice WBGT e aos fatores individuais de vestuário e taxa metabólica, é possível determinar o stress térmico. O cálculo deste índice é apresentado no quarto capítulo.

A Figura 2.12 permite determinar se o indivíduo está em estado de conforto, estabelecendo uma relação entre o índice mencionado e a atividade metabólica do indivíduo.

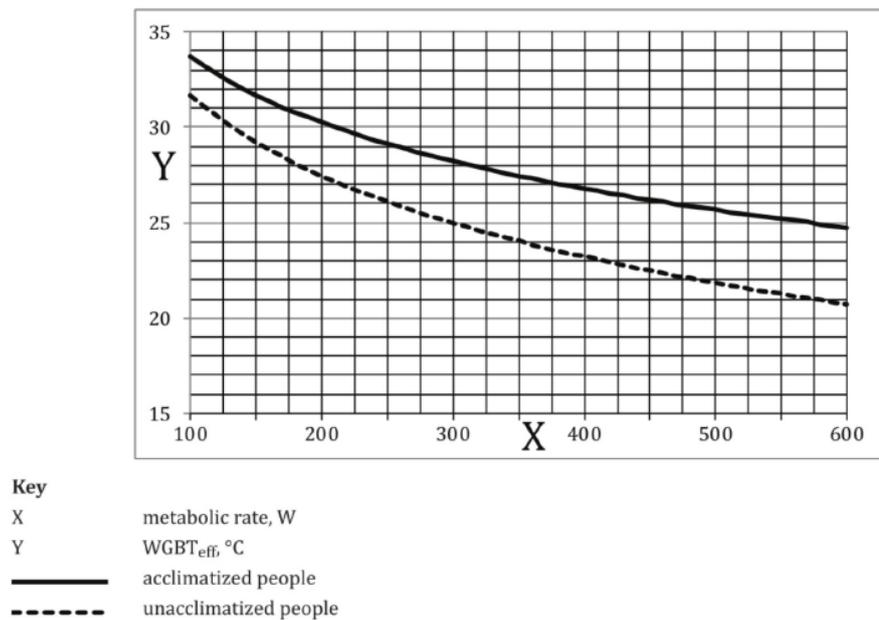


Figura 2.12. Correlação entre a taxa metabólica e o índice WBGT (ISO 7243:2017).

2.4. Balanço energético

Para avaliar o balanço energético do sistema é crucial analisar todos os processos de transferência de calor envolvidos. Neste sentido, é apresentado um esquema na Figura 2.13 com todos os processos que ocorrem entre um sistema de pavimento radiante hidráulico e o ambiente interior a climatizar (Jiang et al., 2021).

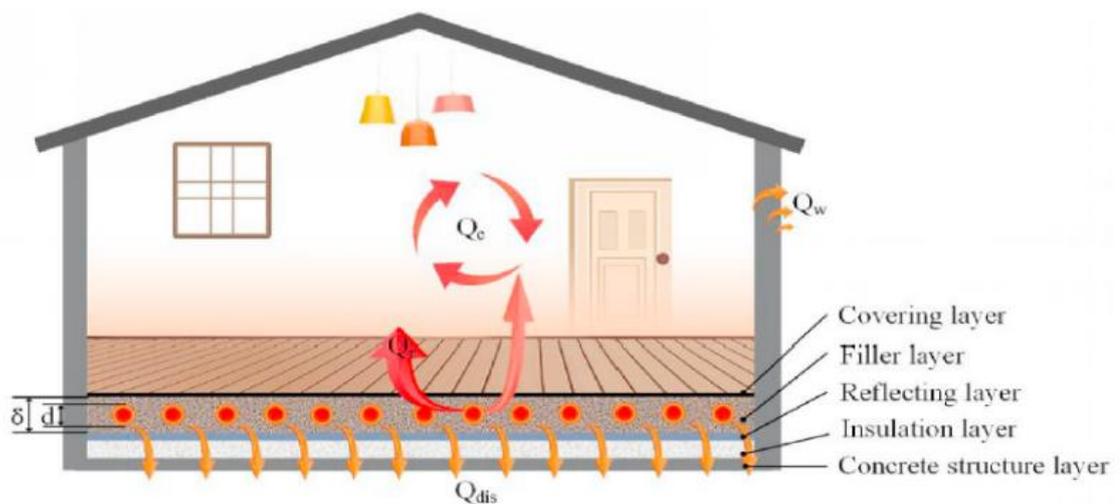


Figura 2.13. Trocas de calor entre um pavimento radiante hidráulico e um ambiente interior (Jiang et al., 2021).

2.4.1. Métodos de transferência de calor

De acordo com a equação (2.1), q_0 é o calor total fornecido ao sistema proveniente da água quente (W) e q_{dis} é a dissipação de calor que atravessa a laje térrea (W). O piso transfere calor para o ar interior por meio de radiação e convecção, representados por q_r e q_c (W), respetivamente. A taxa de calor fornecido pode ser definida, como mostra na equação (2.2):

$$q_0 = \rho_f \cdot c_p \cdot \dot{V} \cdot (T_{in} - T_{out}), \quad (2.1)$$

$$q_0 = \rho_f \cdot V_f \cdot c_{pf} \frac{dT_f}{d\tau} + q_r + q_c + q_{dis}. \quad (2.2)$$

onde, \dot{V} representa o caudal volúmico de água fornecida (m^3/s), c_p o calor específico da água ($J/kg \cdot K$) e T_{in} e T_{out} ($^{\circ}C$) a temperatura de entrada e de saída da água, respetivamente. Por sua vez, ρ_f (kg/m^3) corresponde à densidade do fluido, c_{pf} ($J/kg \cdot K$) o calor específico do chão e V_f (m^3) representa o volume do chão. Além disso, T_f é a temperatura média da superfície do pavimento e τ representa o tempo (s).

O calor dissipado através da envolvente q_w (W) é calculado em (2.3) onde, A_w é a área da parede externa (m^2), T_w a temperatura média da envolvente exterior ($^{\circ}C$), T_e a temperatura do ambiente exterior ($^{\circ}C$) e U é o coeficiente global de transferência de calor da envolvente ($W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$), cujos cálculos auxiliares serão inseridos no Apêndice A.

$$q_w = UA_w (T_w - T_e) \quad (2.3)$$

A transferência total de calor do sistema pode ser dividida em três etapas. Em primeiro, a água quente que circula o pavimento torna-se uma fonte de calor e aquece o chão. Em segundo, o chão previamente aquecido emite calor para o ar interior e aquece o espaço. Por fim, o espaço aquecido dissipa calor para o ambiente exterior através das suas envolventes.

3. SIMULAÇÃO CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) é um método de simulação numérico e computacional dos processos envolvidos no escoamento de um fluido num determinado sistema. O propósito do CFD é entender o comportamento detalhado dos fluidos, permitindo avaliar o desempenho do sistema e otimizá-lo da melhor maneira. Esta ferramenta é amplamente utilizada nas áreas de engenharia pela sua grande utilidade em vastas áreas, eliminando a necessidade de realizar testes físicos dispendiosos e economizar recursos (SIMSCALE, 2023).

Assim, foi realizada uma modelação/simulação 3D de um sistema de pavimento radiante hidráulico, utilizando o programa *Ansys Workbench Fluent*. Nos subcapítulos subsequentes, são apresentados os procedimentos e a metodologia adotados para a obtenção dos resultados. No final do capítulo são discutidos os resultados e é realizada uma comparação entre o modelo simulado e os valores experimentais.

3.1. Geometria

O componente principal e mais complexo deste sistema é a tubagem, através da qual o fluido circula para climatizar o espaço interior. Este elemento foi desenhado no *SolidWorks* e importado para o *Ansys DesignModeler*. A disposição da tubagem é em formato espiral, espaçada igualmente entre si, com dimensões de 1,9 m por 1,9 m, como ilustrado na Figura 3.1.

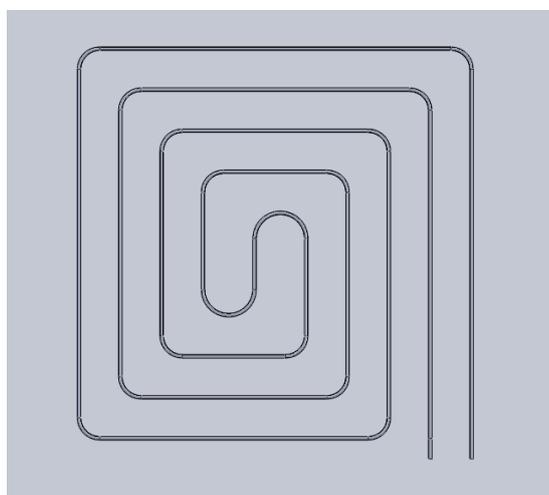


Figura 3.1. Tubagem projetada no *SolidWorks*.

No *Ansys DesginModeler*, acrescentou-se um pavimento onde a tubagem está embutida, juntamente com uma “caixa” com a condição de adiabática para representar um espaço interior e simular a propagação do calor proveniente do pavimento. O pavimento apresenta uma espessura de 14 cm, dos quais apenas 2 cm estão acima da tubagem, com dimensões de 2,1 m por 2,1 m. A “caixa” tem uma altura de 3 m, com o intuito de simular um pé-direito convencional.

3.2. Setup do modelo

No âmbito deste estudo, o *setup* do modelo é constituído por elementos essenciais, tais como a malha, as condições de fronteira, as propriedades dos materiais, o *solver* e a convergência de resultados.

3.2.1. Malha

A malha (ou *mesh*) é uma estrutura tridimensional composta por elementos discretos que envolvem a geometria do modelo. Esta malha é formada ao discretizar a geometria do modelo em elementos finitos, assumindo diversas formas de acordo com a complexidade do caso em estudo. A malha assume um papel crucial na CFD, pois, ao dividir o sistema em elementos menores, possibilita a análise e resolução das equações de fluxo e transporte de forma computacionalmente eficiente.

A malha utilizada para esta geometria foi inicialmente tetraédrica, composta por 15 milhões de elementos, no entanto, para uma obtenção de resultados mais precisos e uma convergência otimizada, optou-se por alterar para uma malha poliédrica, visualizada na Figura 3.2.

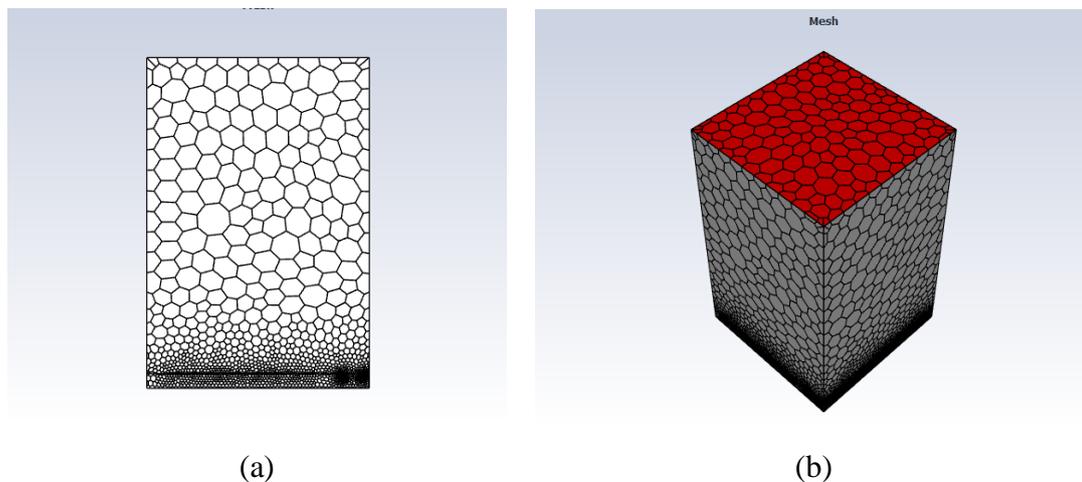


Figura 3.2. Malha e condições de fronteira do sistema (a) Vista lateral (b) Vista panorâmica.

Esta malha foi refinada nas zonas onde se esperavam gradientes mais acentuados ou geometrias mais complexas, como perfurações. Como se observa na Figura 3.3, a malha é refinada em algumas zonas, como a entrada e saída da tubagem e a transição da caixa para o pavimento.

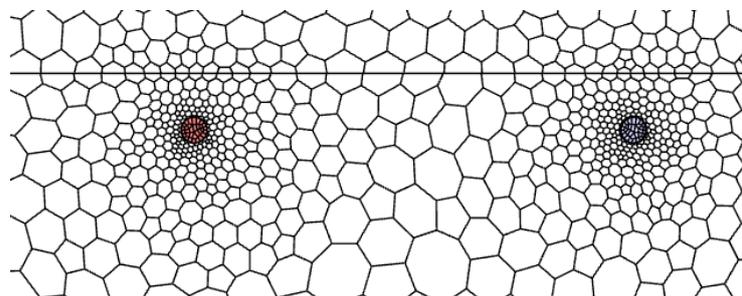


Figura 3.3. Malha refinada na zona das tubagens.

3.2.2. Condições de fronteira

As fronteiras consideradas neste estudo foram as paredes exteriores e interiores do sistema, assim como a entrada e saída da tubagem.

Paredes Exteriores

As paredes exteriores, constituídas pela “caixa” e o pavimento, foram configuradas com a condição de adiabático, de modo a anular qualquer perda de calor para o ambiente. A temperatura exterior adotada foi de 14°C, correspondendo, assim, à temperatura inicial do espaço a ser climatizado.

Paredes interiores

O calor proveniente da água é propagado através do pavimento para o espaço interior por radiação e convecção, podendo ser calculado através das equações (2.1) e (2.2).

Entrada e saída da tubagem

O diâmetro interior da tubagem é de 12,5 mm e assumiu-se um caudal volúmico de entrada de 1 l/min a uma temperatura de 35°C. Deste modo, o calor é propagado para o pavimento por meio de condução.

3.2.3. Propriedades dos materiais

Seguidamente, são descritos os materiais utilizados no sistema, bem como as suas propriedades características.

Fluidos

Os fluidos utilizados neste sistema são o ar e a água, ambos disponíveis na biblioteca do programa, o que permite a atribuição automática das suas propriedades.

Sólidos

Os materiais sólidos utilizados neste sistema são o PEX para a tubagem, argamassa para o pavimento e EPS como isolamento térmico para as paredes da “caixa”. Como estes materiais não estavam disponíveis na biblioteca do programa, foram atribuídos valores para os caracterizar com base em sistemas semelhantes que usam o mesmo tipo de materiais. Assim, é possível observar as propriedades de cada material na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Propriedades dos materiais constituintes do sistema.

Material	Densidade [kg/m ³]	Condutividade Térmica [W/(m.K)]	Calor específico (J/kg.K)
Poliétileno Reticulado (PEX)	930	0,37	2000
Argamassa	2000	2,5	1000
Poliestireno Expandido (EPS)	20	0,037	1200

3.2.4. Solução/Solver

As configurações do *solver* foram otimizadas tendo em conta a natureza física do problema. Os fluidos presentes no sistema foram considerados incompressíveis e em regime turbulento e, por isso, foi utilizado uma análise baseada em pressão, devido à sua

flexibilidade, desempenho eficiente e baixo consumo de memória. Para este efeito, também se usou o algoritmo SIMPLE para resolver as equações de *Navier-Stokes* e obter a solução de conservação de massa, quantidade movimento e energia.

3.2.5. Convergência

A convergência é fundamental nestas simulações e é alcançada quando os valores dos resíduos atingem níveis aceitáveis ao longo das várias iterações.

Foram realizadas análises de convergência para os modelos de turbulência e constatou-se que as condições eram satisfatórias. A Figura 3.4 apresenta o progresso da convergência dos resíduos, relacionados à conservação de massa, quantidade movimento e energia, com base no modelo de turbulência $k-\epsilon$ SST, após 32 iterações.

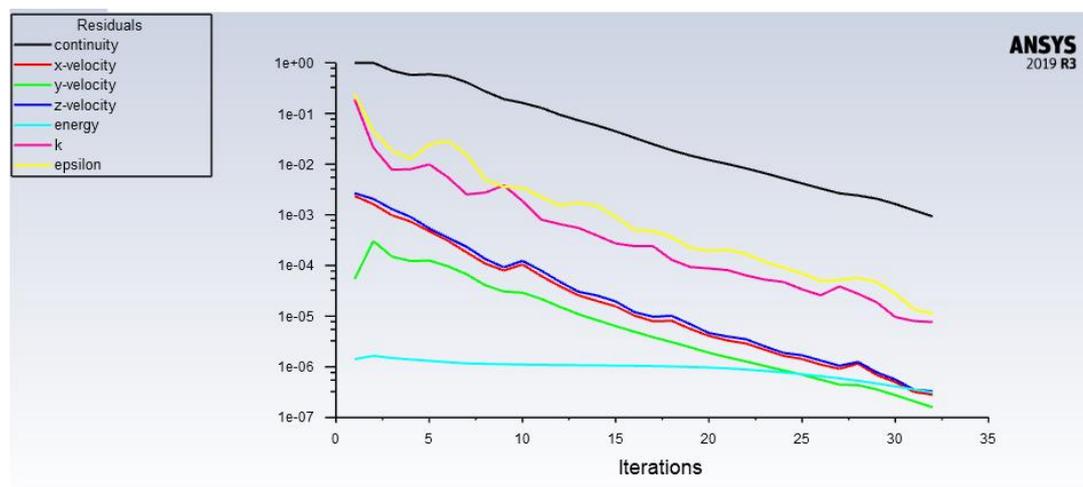


Figura 3.4. Convergência da simulação CFD.

3.3. Análise de resultados

A fluido-dinâmica computacional do pavimento radiante foi analisada através da variação de temperatura ao longo do tempo, de modo a avaliar o desempenho do sistema, analisar a transferência de calor e validar experimentalmente os modelos. Deste modo, no resultado obtido, é possível observar, através da Figura 3.5, um gradiente vertical negativo de temperatura quando se dá início ao aquecimento e a água percorre o pavimento a 35°C.

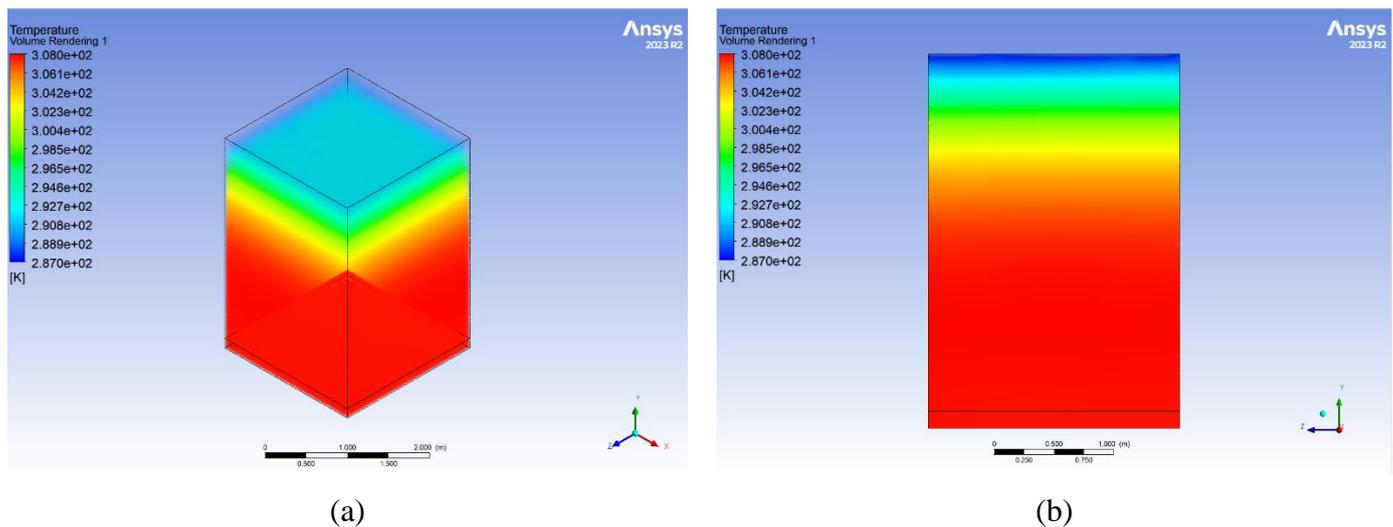


Figura 3.5. Gradiente vertical de temperaturas no ambiente interior (a) Vista ISO (b) Vista lateral.

3.4. Síntese

Em suma, a modelação tridimensional (3D) deste sistema tem como objetivo simular as variações de temperatura que ocorrem no mesmo, a fim de compreender o seu comportamento térmico. Posteriormente, esses resultados serão comparados com os dados provenientes obtidos do ensaio experimental abordado no capítulo subsequente deste estudo. A intenção subjacente é efetuar uma análise de congruência entre os resultados experimentais e computacionais, facultando, deste modo, a validação do modelo de Computação de Fluidos Dinâmicos (CFD) empregue. Esta análise tem por objetivo não apenas atestar a confiabilidade do modelo, mas também proporcionar uma compreensão mais profunda do comportamento térmico do sistema de pavimento radiante hidráulico em estudo.

4. ENSAIO EXPERIMENTAL

Este capítulo aborda o ensaio experimental realizado, que teve como objetivo analisar o comportamento de três sistemas de pavimentos radiantes hidráulicos, com configurações em formato espiral para a tubagem, sendo que cada sistema apresenta diferentes características e propriedades de argamassa. Contudo, de modo a manter este documento conciso, apenas um dos sistemas será avaliado com maior detalhe, servindo também como método de validação para o sistema de avaliação desenvolvido. Para esse efeito, recorreu-se a uma câmara climática que visa simular condições de verão e inverno, sendo fundamental avaliar tanto o conforto térmico em ambientes interiores como o desempenho energético deste referido sistema.

Para alcançar este propósito, adota-se uma metodologia e procedimento de ensaio que são devidamente explicados, auxiliado por equipamentos específicos que são brevemente mencionados.

4.1. Sistema de avaliação de piso radiante

No sentido de assegurar a otimização da preparação dos ensaios, desenvolveu-se um sistema de avaliação destinado a pavimentos radiantes hidráulicos. Este sistema leva em consideração a seleção dos equipamentos adequados a utilizar, o dimensionamento do isolamento térmico e o desenvolvimento do *software* dedicado à monitorização e controlo de dados.

4.1.1. Equipamentos

Câmara Climática

A câmara permite simular condições controladas de temperatura e humidade relativa, de modo a replicar situações reais. Outra vantagem das câmaras climáticas é a repetibilidade e reprodutibilidade dos ensaios, de maneira que seja possível replicar as mesmas condições por outro operador.

Unidade de termostatização

Este equipamento possibilita o controlo de temperatura e o caudal da água.

Sistema de aquisição de dados (*Datalogger*)

Este sistema é responsável por recolher e registar informações provenientes do pavimento radiante hidráulico em tempo real ou em intervalos definidos, permitindo a análise e monitorização de parâmetros específicos, bem como o controlo do processo

Termofluxímetro

Dispositivo colocado junto ao pavimento, para medir o fluxo de calor que o atravessa.

Termopar

Utilizaram-se 56 termopares de tipo K para medir a temperatura em vários pontos do sistema. A opção de termopares de tipo K prendeu-se com o facto de serem precisos e apresentarem uma boa gama de temperaturas.

Sonda de temperatura globo negro

Sonda que mede a temperatura de globo negro considerando a influência da radiação térmica.

Sonda de humidade relativa

Equipamento para a medição da humidade relativa no ambiente.

4.1.2. Dimensionamento do isolamento

Para otimizar o desempenho do sistema, foi projetado um isolamento de EPS com a finalidade de conferir ao sistema um carácter *quasi*-adiabático e reduzir as pontes térmicas. Tendo em vista esse efeito, construiu-se a envolvente a partir de EPS 100 com 15cm de espessura para as paredes e 20cm para a cobertura, a fim de diminuir as perdas de calor por convecção.

De seguida, apresentam-se cortes e imagens do isolamento térmico na Figura 4.1, desenhos feitos com o programa *SketchUp*.

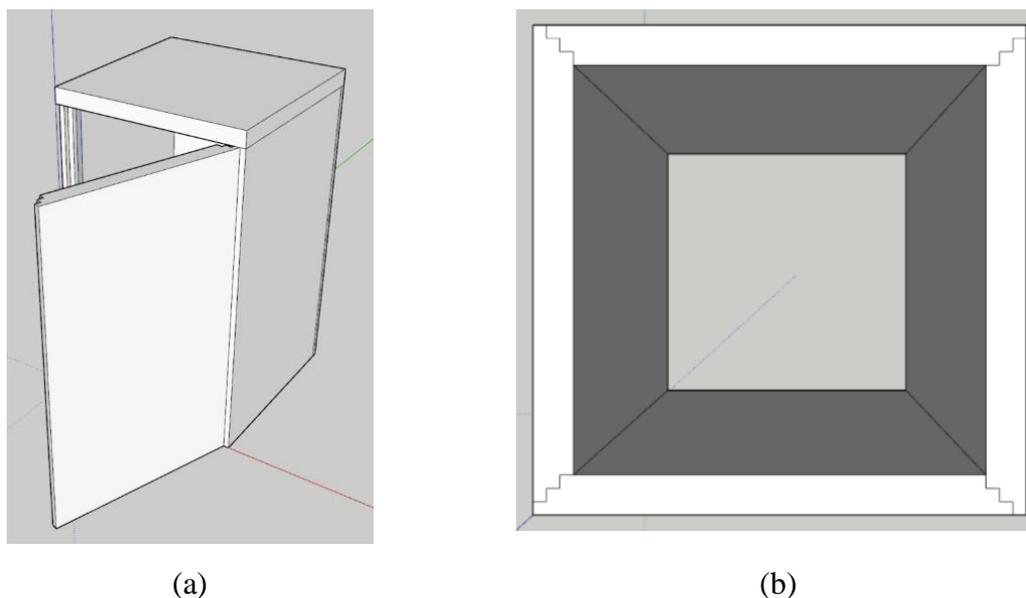


Figura 4.1. Isolamento de poliestireno expandido (a) Vista isométrica (b) Vista de cima.

As envolventes foram construídas com placas de 5cm de espessura, cada uma com dimensões de 1 m x 0,5 m, para formar paredes de 3m de altura e 1,78m de largura, com o objetivo de simular um pé direito convencional. Na Figura 4.2, mostram-se as placas antes da montagem ser efetuada.



Figura 4.2. Pré-montagem das paredes.

Como é possível observar na Figura 4.3, as placas foram colocadas de forma desfasada para criar uma ligação escalonada entre as paredes e reduzir ao máximo as perdas por calor.



Figura 4.3. Pós-montagem das paredes.

4.1.3. Software

O desenvolvimento de um *software* constitui uma tarefa crucial para compreender a funcionalidade e o comportamento do sistema em questão. O objetivo do *software* consiste em gerir e controlar dados de entrada e saída, bem como receber e processar informação de modo eficaz e preciso, assegurando a receção e processamento correto das informações, em conformidade com as especificações do sistema.

Foi utilizado o programa *LabVIEW* para a construção do respetivo *software*. Criaram-se diversas janelas/abas com diferentes propósitos, tais como a visão geral do ensaio, os cálculos programados, o esquema dos termopares e a distribuição gráfica da temperatura.

4.1.3.1. Visão geral

Na janela de visão geral do programa, mostrada na Figura 4.4, são apresentados os parâmetros mais relevantes para o controlo do sistema, nomeadamente o caudal volúmico e a temperatura de entrada da água, juntamente com a temperatura ambiente e humidade relativa da câmara climática. Adicionalmente, os parâmetros de conforto térmico também estão visíveis nesta secção, sendo posteriormente apresentado, na secção dos cálculos, uma explicação de cada uma destas variáveis e apresentado o processo utilizado para a sua obtenção.

Visão Geral	Cálculos	Esquema Termopares	Gráficos	Ambiente	Dados - Bancada	Circuitos	Controlo HMI1
Setup -							
Ambiente Interior - Piso Radiante				Ambiente Exterior - Câmara Climática			
Set C [l/min] <input type="text" value="0.0"/>				Temperatura Ambiente [°C] <input type="text" value="0"/>			
Set T3.1 [°C] <input type="text" value="0.00"/> <input type="text" value="0"/>				Humidade Relativa [%] <input type="text" value="0"/>			
Unidade de Termostatização <input type="button" value="Desligada"/>				Câmara Climática <input type="button" value="Desligada"/>			
Referência Itecons							
Etapa <input type="text"/>		Tempo de Etapa <input type="text"/>					
Parâmetros de Conforto Térmico							
Temperatura do Ar [°C] <input type="text" value="0"/>		PMV <input type="text" value="0"/>		Temperatura Média Radiante [°C] <input type="text" value="0"/>		PPD [%] <input type="text" value="0"/>	
Temperatura Operativa [°C] <input type="text" value="0"/>		Atividade [Met] <input type="text" value="0"/>		Temperatura de Globo Negro [°C] <input type="text" value="0"/>		Vestuário [clo] <input type="text" value="0"/>	
Temperatura de bulbo húmido [°C] <input type="text" value="0"/>		Velocidade do Ar [m/s] <input type="text" value="0"/>		Energia total fornecido ao sistema [W/m2] <input type="text" value="0"/>			
<input type="button" value="Iniciar Ensaio"/>				<input type="button" value="Exit Program"/>			

Figura 4.4. Visão geral do *software* de aquisição e tratamento de dados desenvolvido.

4.1.3.2. Cálculos

Seguidamente, expõem-se os parâmetros necessários para avaliar a eficiência energética e o conforto térmico do sistema, conforme ilustrado na Figura 4.5.

Visão Geral	Cálculos	Esquema Termopares	Gráficos	Ambiente	Dados - Bancada	Circuitos	Controlo HMI1
Tempo <input type="text" value="0"/> [h]		[kWh]					
Tempo de Estabilização do Pavimento <input type="text" value="0"/> [h]		Temperatura de entrada da água <input type="text" value="0"/> [°C]					
Temperatura média radiante [°C] <input type="text" value="0"/> [°C]		Temperatura de saída da água [°C] <input type="text" value="0"/> [°C]					
Temperatura Operativa [°C] <input type="text" value="0"/> [°C]		Temperatura do Ar [°C] <input type="text" value="0"/> [°C]					
Temperatura de Globo Negro [°C] <input type="text" value="0"/> [°C]		Humidade Relativa Interior [%] <input type="text" value="0"/> [°C]					
Eficiência Energética							
Fluxo de Calor que atravessa o Pavimento [W/m2] <input type="text" value="0"/> [W/m2]		PMV <input type="text" value="0"/>					
Energia total fornecida ao sistema [W/m2] <input type="text" value="0"/> [W/m2]		PPD <input type="text" value="0"/> [%]					
Eficiência energética do Sistema [%] <input type="text" value="0"/> [%]		U parede [W/m2°C] <input type="text" value="0"/> [W/m2°C]					
Energia dissipada pela envolvente <input type="text" value="0"/> [W/m2]		U cobertura [W/m2°C] <input type="text" value="0"/> [W/m2°C]					
Área da parede [m2] <input type="text" value="0"/> [m2]		U pavimento [W/m2°C] <input type="text" value="0"/> [W/m2°C]					
Área da cobertura [m2] <input type="text" value="0"/> [m2]		Vestuário, Icl <input type="text" value="0"/> [clo] <input type="text" value="0"/> [m2°C/W]		Atividade, M <input type="text" value="0"/> [met] <input type="text" value="0"/> [W/m2]			
Área do pavimento [m2] <input type="text" value="0"/> [m2]		Trabalho Mecânico, W <input type="text" value="0"/> [met]					
Índice WBGT <input type="text" value="0"/>		Temperatura exterior do vestuário (Tcl) <input type="text" value="0"/> [°C]					
Coeficiente convectivo vestuário - Ar (hc) [W/m2°C] <input type="text" value="0"/> [W/m2K]		Pressão parcial de vapor de água no ar (pwv) <input type="text" value="0"/> [°C]					
Fator do vestuário (fcl) <input type="text" value="0"/>							

Figura 4.5. Secção dos parâmetros calculados.

Foram utilizadas as seguintes equações no programa:

Temperatura média radiante

De acordo com a norma ISO 7726, a temperatura média radiante, definida na secção 2.2.1, pode ser determinada através da temperatura do globo negro e das suas características, como o diâmetro e a sua emissividade. Assim, ao seguir as diretrizes da norma, é possível calcular a temperatura média radiante para convecções naturais, utilizando a equação (4.1)

$$T_r = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{0,25 \times 10^8}{\varepsilon} \times \left(\frac{|T_g - T_a|^{1/4}}{D} \right) \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} \quad (4.1)$$

onde T_r é a temperatura média radiante, T_a é a temperatura do ar, T_g a temperatura de globo negro medida a partir do termómetro de globo negro, ε a emissividade do globo e o D o seu diâmetro (ISO 7726, 1998).

Temperatura Operativa

Temperatura operativa, T_o , é a temperatura de um recinto fechado isotérmico preto uniforme em que um ocupante iria trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção como num ambiente radiante não uniforme real. Pode dizer-se que é uma expressão da influência das temperaturas média radiante e do ar.

Por meio de simplificação, para a temperatura operativa T_o , assume-se o valor médio entre a temperatura média radiante T_r e a temperatura do ar T_a , indicado na equação (4.2), como demonstrado por Batista (2012):

$$T_o = \frac{T_r + T_a}{2} \quad (4.2)$$

Eficiência energética

Para calcular a eficiência energética utilizou-se a equação (4.3):

$$\eta = \frac{E_u}{E_f} \times 100\% \quad (4.3)$$

onde E_u é a energia útil do sistema, isto é, a energia trocada com o espaço a climatizar, e E_f a energia fornecida ao sistema através da água que percorre o pavimento radiante. Utilizando a equação (2.1), determinou-se a energia fornecida através da água. Posteriormente, o cálculo da energia útil E_u , determinada através da equação (4.5), foi apenas uma subtração

da energia dissipada E_{dis} através da envolvente, determinada em (4.4), à energia total fornecida E_f .

$$E_{dis} = q_w + q_{dis} \quad (4.4)$$

$$E_u = E_f - E_{dis} \quad (4.5)$$

Então, a eficiência energética η será avaliada como apresentado na equação (4.6):

$$\eta = \frac{E_f - E_{dis}}{E_f} \times 100\% \quad (4.6)$$

Índice PMV e PPD

O uso do modelo de *Fanger* irá permitir avaliar as condições de conforto térmico interior, considerando parâmetros como a temperatura do ar, a humidade relativa, a velocidade do ar e a resistência térmica do vestuário, como mencionado anteriormente. Assim, os índices *PPD* e *PMV* foram determinados através de (4.7) e (4.8) (Batista, 2012).

$$PMV = [0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028] \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_{wv}] \\ -0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_{wv}) \\ -0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) - 3,96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \\ -f_{cl} \cdot hc \cdot (T_{cl} - T_a) \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

onde:

- M é a atividade física [met ou W/m^2];
- W é o trabalho mecânico [J];
- I_{cl} é a resistência térmica do vestuário [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$];
- f_{cl} é o fator de vestuário [adimensional];
- v_{ar} é a velocidade do ar [$m \cdot s^{-1}$];
- h_c é o coeficiente convectivo entre a superfície exterior do vestuário e o ar exterior [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$];
- T_{cl} é a temperatura exterior do vestuário [$^{\circ}C$];
- p_{ws} é a pressão de vapor saturado [Pa].

Os restantes cálculos intermédios para a determinação dos índices de conforto térmico são apresentados no apêndice A.

No cálculo do índice PMV, foram realizadas simplificações e cálculos auxiliares de modo a facilitar o processo, tais como:

- O trabalho mecânico (W) foi desprezado;
- A resistência térmica do vestuário irá assumir valores entre 0,5 clo a 1,5 clo dependendo da temperatura ambiente a simular;
- A atividade física foi considerada de 1,2 met, o que remete para uma atividade sedentária;
- O processo iterativo para determinar T_{cl} onde a diferença de T_{cl} terá de ser próxima de 0. Este processo demora cerca de 20 iterações;
- Uma vez que movimentação do ar se realiza unicamente através do processo de convecção natural, assumiu-se um valor de 0,1 m/s para a sua velocidade.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,036 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (4.8)$$

$$PMV = 0 \longrightarrow PPD = 5\%$$

Índice WBGT

Através da norma ISO 7243:2017, o índice WBGT também foi determinado através de (4.9), para casos sem carga solar.

$$WBGT = 0,7t_{nw} + 0,3t_g \quad (4.9)$$

Coefficiente global de transferência de calor da envolvente – U

Como definido em (4.10), U pode ser determinado com o auxílio do ITE 50 da LNEC.:

$$U = \frac{1}{\sum R} \quad (4.10)$$

Os cálculos intermédios para determinar o U foram inseridos no apêndice A. Posteriormente, programou-se no software, a partir de (4.10), o calor dissipado pela envolvente, definido em (2.3).

4.1.3.3. Esquema de termopares

O espaço interior foi avaliado em 6 níveis distintos, equidistantes entre si, de forma a analisar a distribuição vertical da temperatura. Adicionalmente, colocou-se também um sensor de temperatura por baixo do piso para analisar as perdas de calor descendentes. Para esse efeito, foram fabricados e instalados 55 termopares de acordo com o esquema do exemplo apresentado na Figura 4.6.

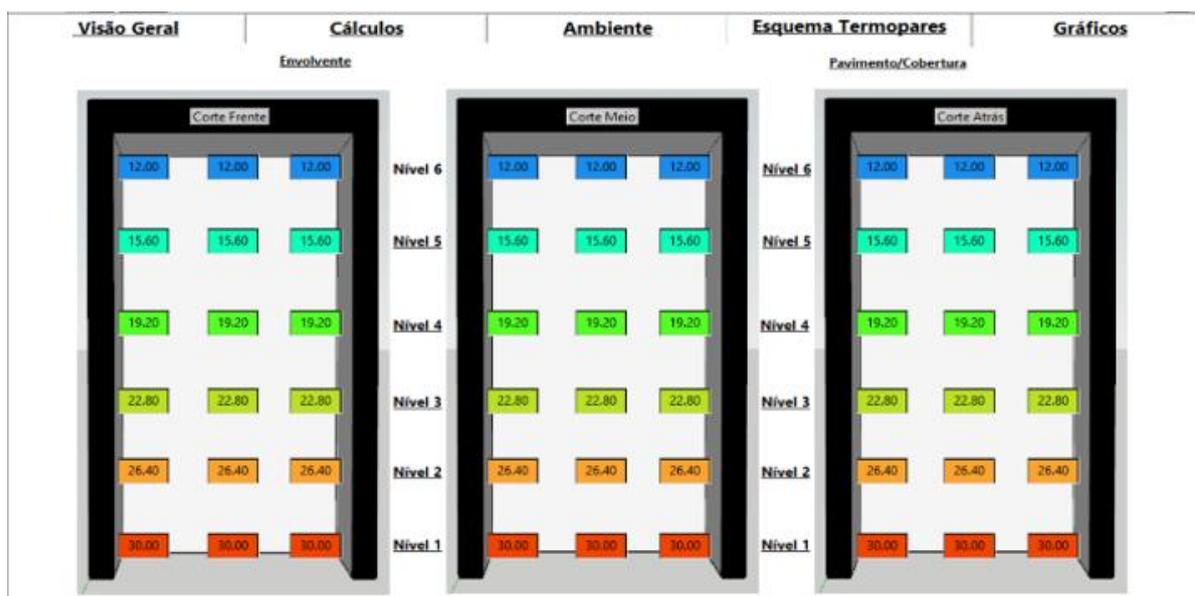


Figura 4.6. Exemplo do esquema de termopares para o ambiente interior.

4.1.3.4. Gráficos

Nesta interface do programa são apresentados dois gráficos conforme representado na Figura 4.7. No primeiro gráfico, é possível observar as alterações da temperatura e caudal da água, juntamente com a temperatura da superfície ao longo do tempo. No segundo gráfico, é apresentada a variação de temperatura nos distintos níveis mencionados previamente.

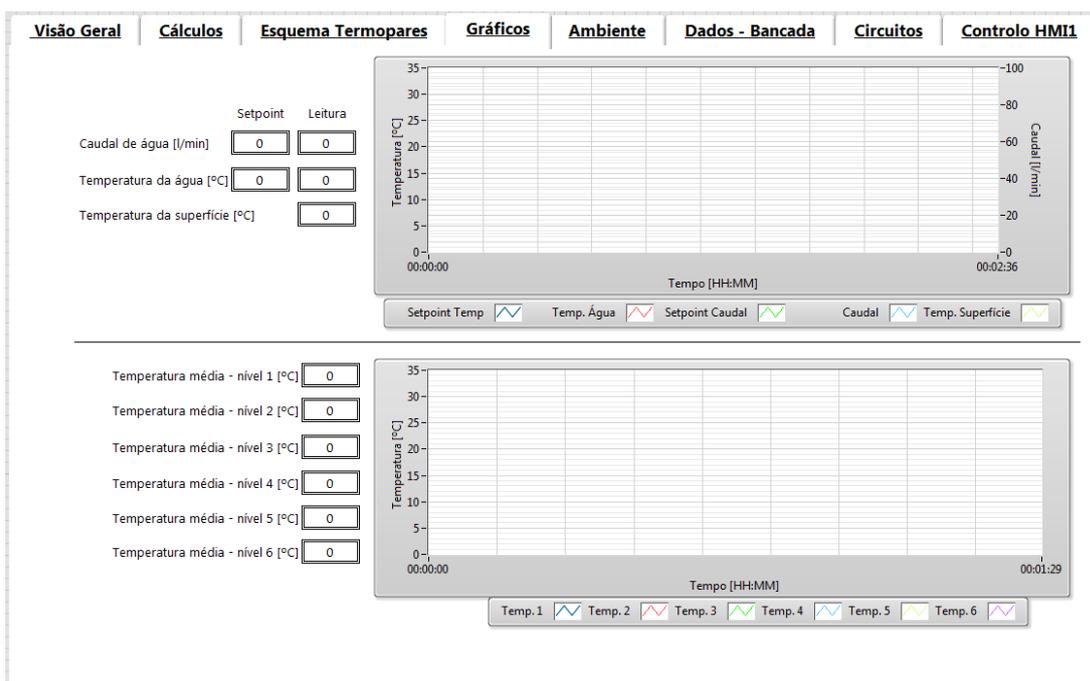


Figura 4.7. Gráficos da alteração de temperatura e caudal do sistema.

4.1.3.5. Ambiente

Na secção relativa ao ambiente, é possível observar a variação das condições predefinidas na câmara (ambiente exterior) relativamente ao ambiente interior, durante o decorrer do ensaio.

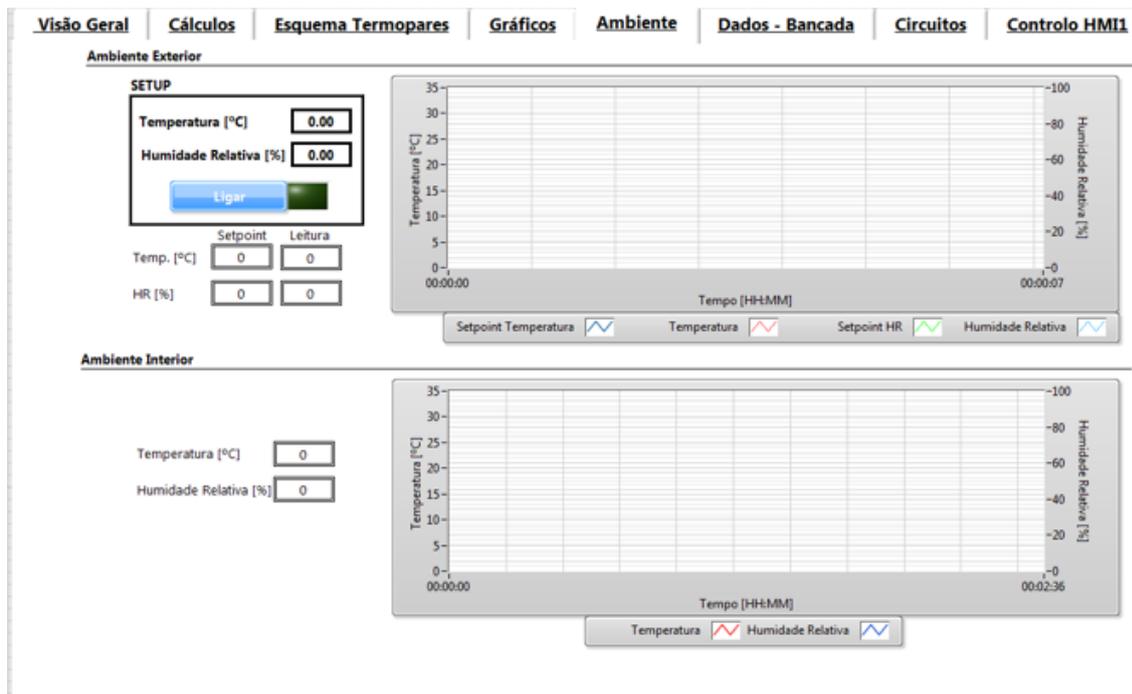


Figura 4.8. Gráficos do ambiente exterior e interior.

4.2. Ensaios

Para uma maior clareza acerca dos ensaios realizados, descrevem-se a seguir os procedimentos adotados e as condições estabelecidas. Este método de ensaio foi publicado em artigo científico na conferência internacional CEES 2023 (Moghaddam et al., 2023).

4.2.1. Procedimento dos ensaios

Para a realização de um ensaio, procedeu-se à instalação dos equipamentos previamente mencionados, fixando os termopares à estrutura de madeira visível na Figura 4.9 (a). Nesse sentido, o sistema é mantido em aberto, conforme ilustrado na Figura 4.9 (a), viabilizando a uniformização da temperatura com a da câmara climática, de modo que a temperatura interior seja igual à temperatura exterior. Quando a temperatura desejada é alcançada, instala-se a envolvente de isolamento térmico e o ensaio está pronto a iniciar, como se pode observar na Figura 4.9 (b).



(a)



(b)

Figura 4.9. (a) Sistema aberto (b) Sistema fechado.

No circuito hidráulico foi instalado uma válvula *bypass* para redirecionar o fluido e assegurar que a temperatura e o caudal iniciais sejam mantidos durante o ensaio, representado na Figura 4.10. Quando o ensaio é iniciado, a válvula *bypass* é desligada, permitindo que o fluido passe apenas pela tubagem de entrada e saída.

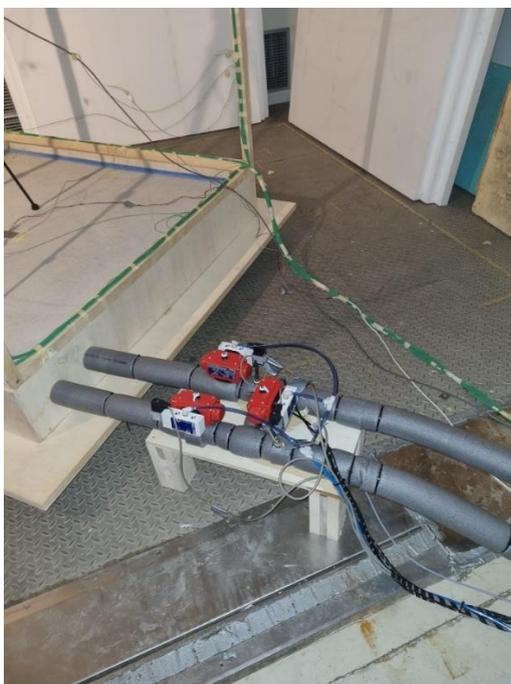


Figura 4.10. Circuito hidráulico do sistema.

4.2.2. Condições dos ensaios

Na Tabela 4.1, são apresentadas as condições específicas para a realização de cada ensaio. Inicialmente, foram realizados três ensaios de aquecimento e por fim, um último ensaio de arrefecimento.

Tabela 4.1. Condições para cada ensaio realizado.

Ensaio	$T_{\text{ambiente}}[^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{entrada}}[^{\circ}\text{C}]$	HR [%]	Caudal [l/min]	Vestuário
1º Ensaio	14	35	89,4	1	1,25
2º Ensaio	7	35	86,6	1	1,25
3ª Ensaio	2	35	85	1	1,25
4ª Ensaio	32	15,5	50	1	0,5

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são abordados e discutidos detalhadamente os resultados obtidos através dos ensaios experimentais realizados, assim como explicações e conclusões acerca dos parâmetros e variáveis observados. Com esse propósito, os dados recolhidos através do sistema de aquisição de dados são processados com o programa *MATrix LABoratory* (MATLAB), de modo a obter os gráficos desejados e tornar a informação acessível e de fácil compreensão.

Apenas os resultados provenientes do melhor sistema de pavimento radiante hidráulico são apresentados, de modo a não estender muito o documento e mantê-lo conciso, contendo apenas as informações mais pertinentes ao caso em estudo.

Por fim, são efetuadas análises detalhadas, incluindo uma comparação dos resultados experimentais medidos com os obtidos através da simulação CFD, a aplicação das normas estabelecidas e uma análise sobre a concordância dos ensaios com as expectativas e requisitos estabelecidos.

5.1. Ensaios

São avaliados os quatro ensaios mencionados, nos quais os resultados obtidos para cada ensaio são analisados de igual forma, visando compreender as diferenças entre cada um destes casos.

5.1.1. 1º Ensaio (Temperatura exterior 14°C)

Os resultados obtidos relativos ao primeiro ensaio, em que a temperatura exterior é de 14°C, são agora apresentados e discutidos (condições de ensaio, especificadas na Tabela 4.1). De acordo com a Figura 5.1, a duração do ensaio foi de 16 horas, sendo esse o período necessário para a temperatura interior estabilizar.

Também é possível observar que as perdas de calor através do piso para o chão são quase desprezáveis, visto que a temperatura inferior difere pouco da temperatura exterior.

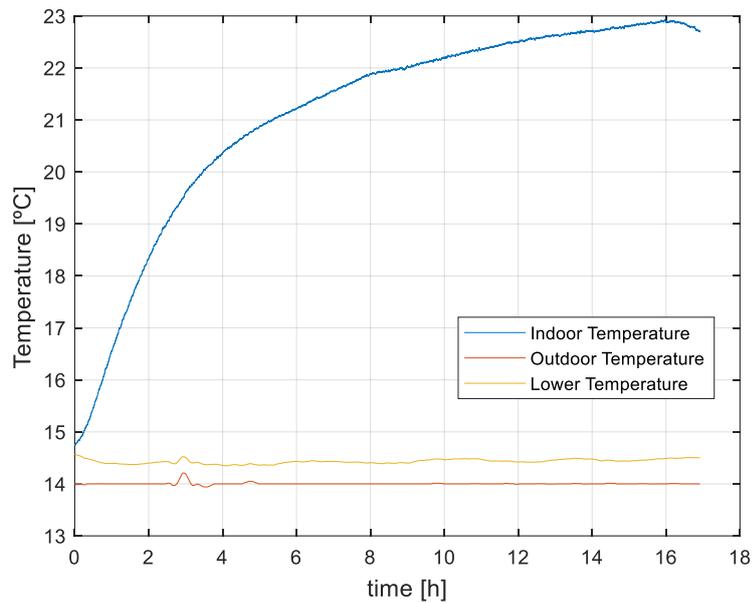
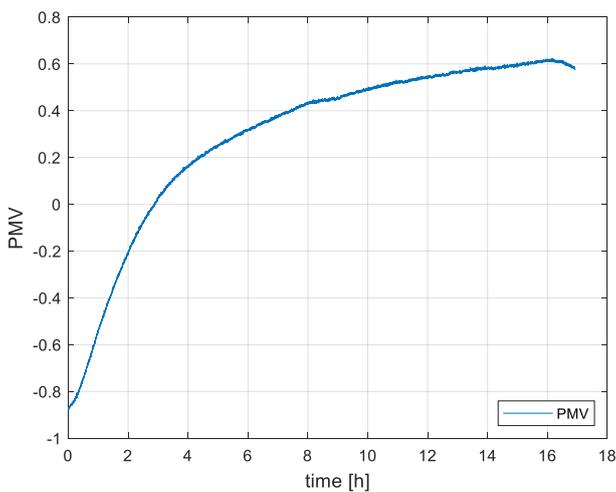
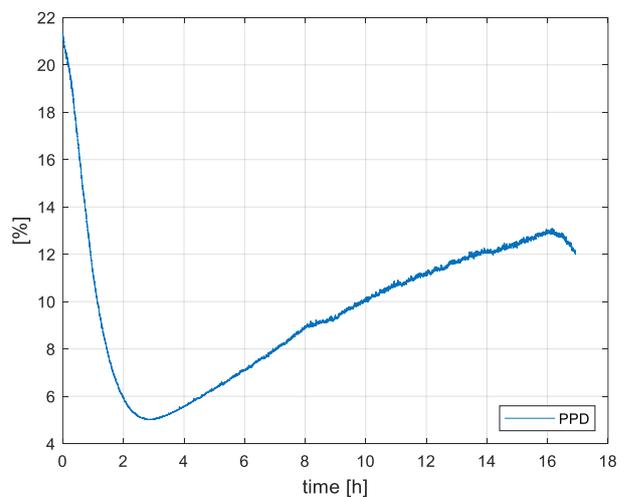


Figura 5.1. Evolução da temperatura ambiente interior, exterior e inferior no primeiro ensaio.

As Figura 5.2 permitem a observação do sistema em relação à sua avaliação de conforto térmico. Conforme evidenciado neste ensaio de aquecimento, através do índice PMV, constata-se que o nível de conforto térmico ideal ($PMV=0$) é atingido por volta das 3 horas de ensaio, sendo posteriormente ultrapassado. Isto deve-se ao facto de a temperatura de entrada de água não ter sido mantida sempre nos 35°C , devido à resposta lenta do sistema para caudais baixos, conforme ilustrado na Figura 5.3, o que resultou num aumento do PMV e, conseqüentemente, no PPD.



(a)



(b)

Figura 5.2. Índices de conforto térmico(a) Índice PMV (b) Índice PPD no primeiro ensaio.

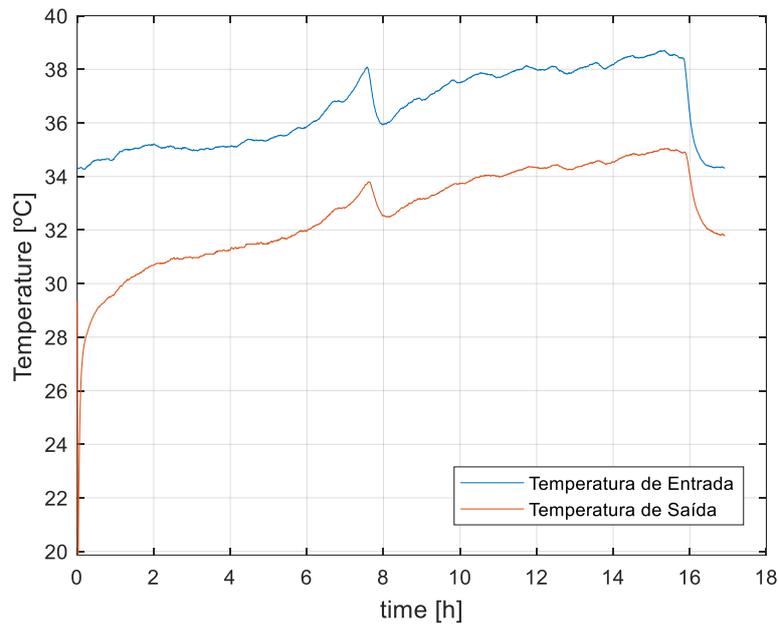


Figura 5.3. Temperatura de entrada e saída da água no primeiro ensaio.

A seguir, é avaliada a eficiência energética do sistema e como esta varia ao longo do ensaio, tendo estabilizado por volta dos 50%, conforme é observado através da Figura 5.4.

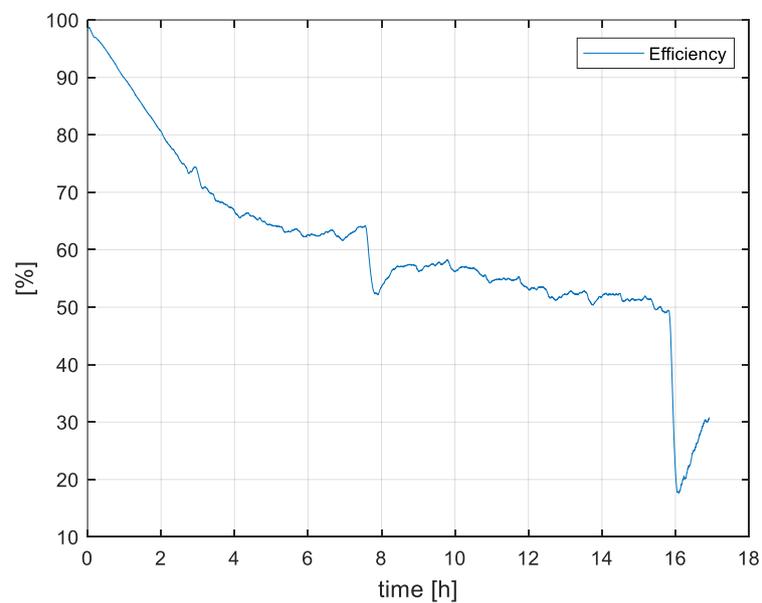


Figura 5.4. Eficiência energética do sistema no primeiro ensaio.

A eficiência energética, determinada através da equação (4.6), permite compreender a relação entre a energia útil do sistema e as trocas de calor para o exterior.

Por fim, são analisadas as temperaturas dos diversos termopares, de modo a observar o gradiente vertical de temperatura e como este varia ao longo do tempo, como é observado na Figura 5.5.

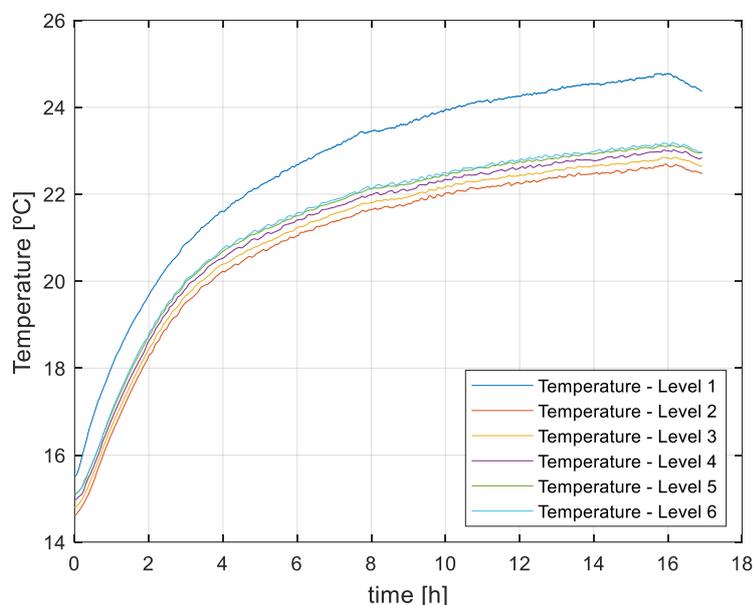


Figura 5.5. Temperatura dos 6 níveis no primeiro ensaio.

Como esperado, o nível 1, que corresponde ao nível do piso, apresenta as temperaturas mais elevadas. No entanto, ao analisar os outros níveis, observa-se que o nível 6 encontra-se a uma temperatura semelhante à do nível 5 e que estes evidenciam a segunda maior temperatura atingida. Essa situação ocorre devido às correntes de convecção natural, sendo assim, possível depreender que os níveis superiores alcançam temperaturas ligeiramente mais altas que os níveis inferiores (T2 a T4).

5.1.2. 2º Ensaio (Temperatura exterior 7°C)

É analisado agora o segundo ensaio experimental, em que a temperatura exterior é de 7°C (condições de ensaio, especificadas na Tabela 4.1).

Neste ensaio, o tempo de estabilização foi consideravelmente menor ao do 1º Ensaio, alcançado aproximadamente após 10 horas, conforme a Figura 5.6. A temperatura inferior não difere muito da temperatura interior, o que sugere que, em conformidade com o 1º ensaio, não existem muitas perdas de calor para o chão.

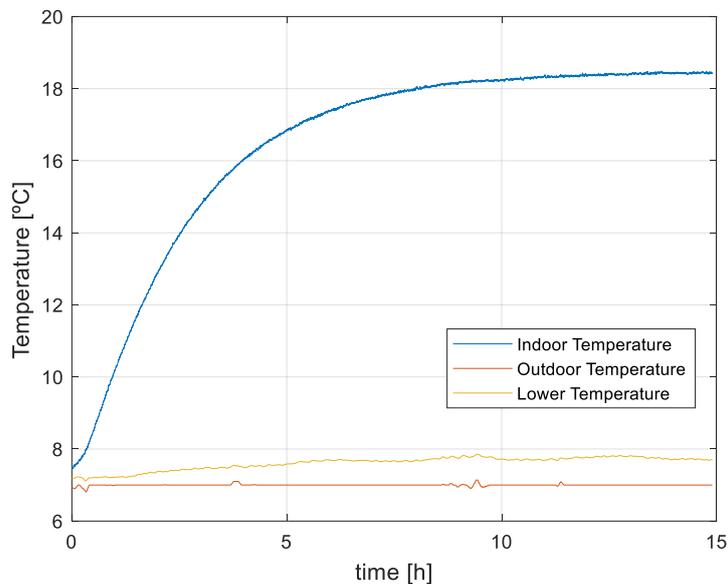


Figura 5.6. Evolução da temperatura ambiente interior, exterior e inferior no segundo ensaio.

Seguidamente, são analisados os dados relativos ao conforto térmico do sistema.

A Figura 5.7 mostra como o PMV e o PPD variam ao longo do ensaio. Estes valores dos índices são espectáveis, pois, neste ensaio, a temperatura de entrada da água foi sempre mantida próxima dos 35°C, conforme é visível na Figura 5.8.

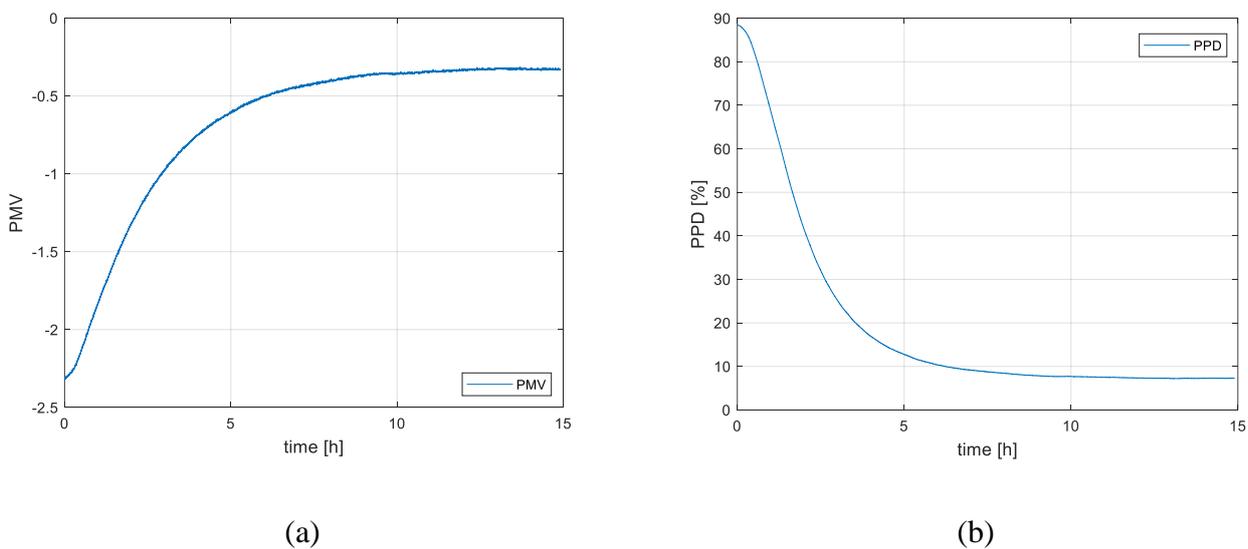


Figura 5.7. Índices de conforto térmico (a) Índice PMV (b) Índice PPD no segundo ensaio.

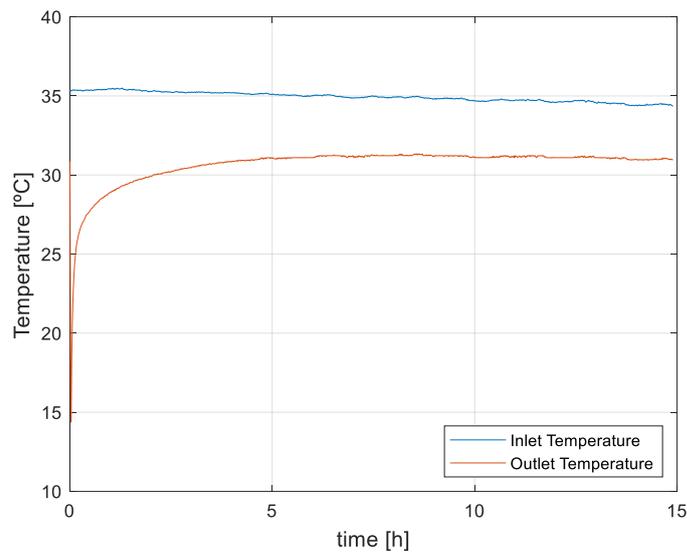


Figura 5.8. Temperatura de entrada e saída da água no segundo ensaio.

A eficiência energética deste ensaio (Figura 5.9), é inferior à do primeiro ensaio, devido à menor temperatura exterior, provocando uma maior demanda no consumo de energia para aquecer o ambiente, resultando, conseqüentemente, numa maior dissipação de energia através da envolvente.

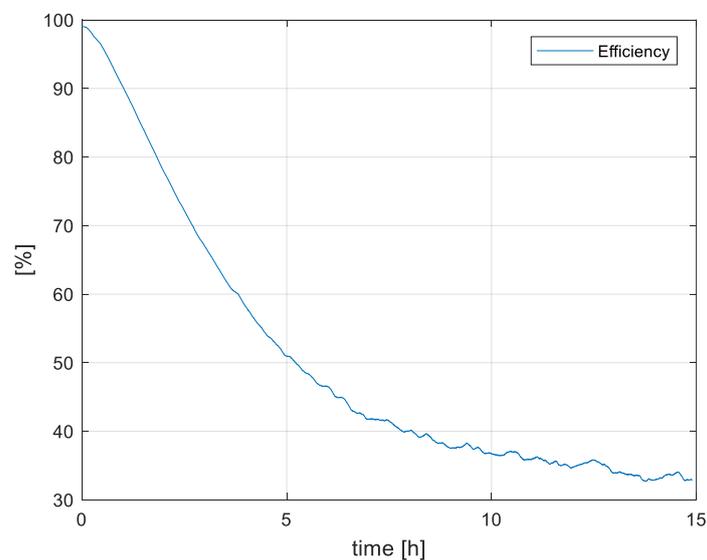


Figura 5.9. Eficiência energética do sistema no segundo ensaio.

A Figura 5.10 apresenta as temperaturas nos diversos níveis do sistema. O comportamento dos níveis referidos é semelhante ao observado no primeiro ensaio.

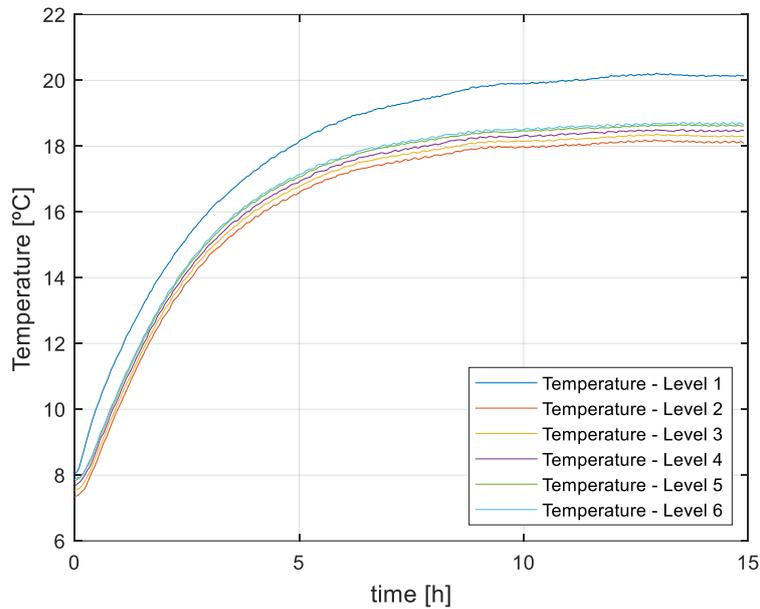


Figura 5.10. Temperatura dos 6 níveis no segundo ensaio.

5.1.3. 3º Ensaio (Temperatura exterior 2°C)

O terceiro ensaio foi o último para a função de aquecimento do respetivo sistema, tendo em conta que foi realizado sob a menor temperatura exterior observada até ao momento, de 2°C (condições de ensaio, especificadas na Tabela 4.1).

Ao analisar a Figura 5.11, observa-se que a temperatura interior do sistema estabiliza por volta das 10 horas, de forma semelhante ao ensaio anterior.

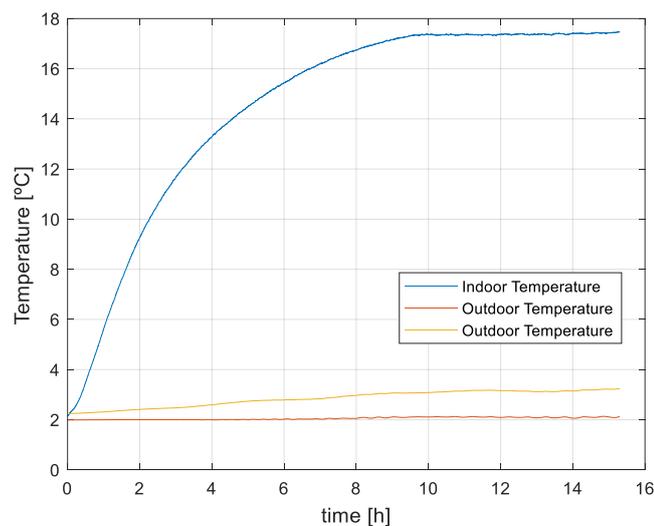


Figura 5.11. Evolução da temperatura ambiente interior, exterior e inferior no terceiro ensaio.

Devido a uma temperatura exterior bastante baixa, os índices de conforto térmico observados nas Figura 5.12 vão ao encontro ao esperado. A temperatura de entrada da água não foi mantida sempre igual a 35°C, mas sim um pouco acima, conforme explícito na Figura 5.13, provocando um aumento de energia fornecida ao sistema.

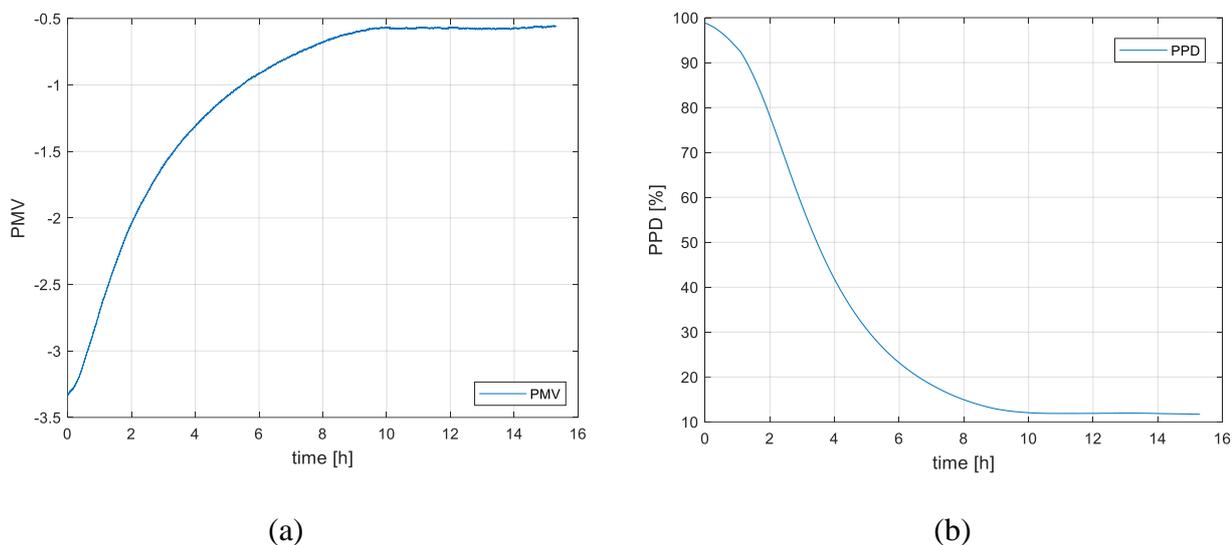


Figura 5.12. Índices de conforto térmico (a) Índice PMV (b) Índice PPD no terceiro ensaio.

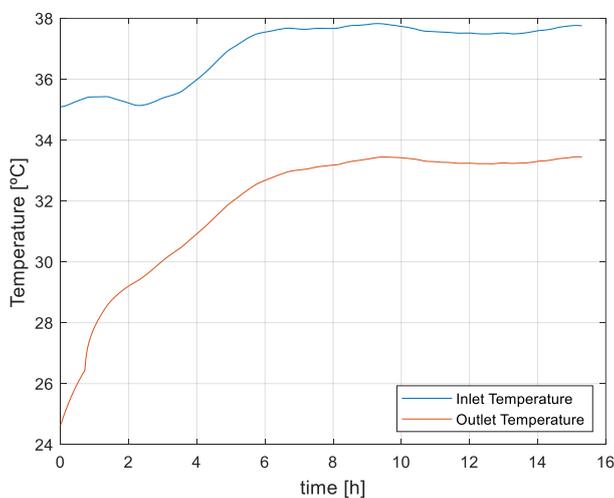


Figura 5.13. Temperatura de entrada e saída da água no terceiro ensaio.

Devido a uma necessidade acrescida de aquecimento em comparação aos outros ensaios e a temperatura de entrada da água ser ligeiramente superior a 35°C, a eficiência energética, ilustrada na Figura 5.14, é inferior à dos ensaios anteriores, decorrente de uma maior dissipação de energia através da envolvente.

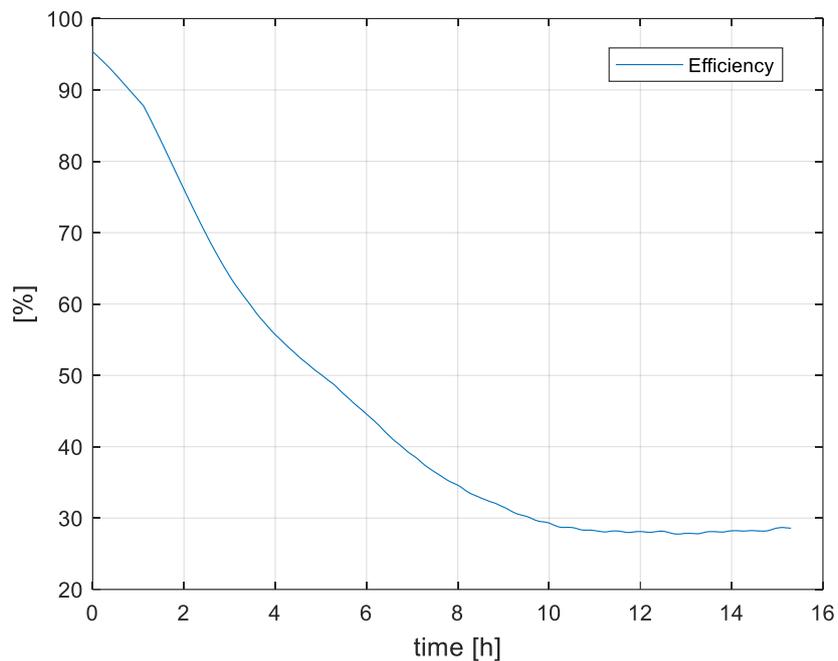


Figura 5.14. Eficiência energética do sistema no terceiro ensaio.

O gradiente vertical de temperatura, ilustrado na Figura 5.15 pelos diversos níveis do sistema, vai ao encontro aos ensaios anteriores.

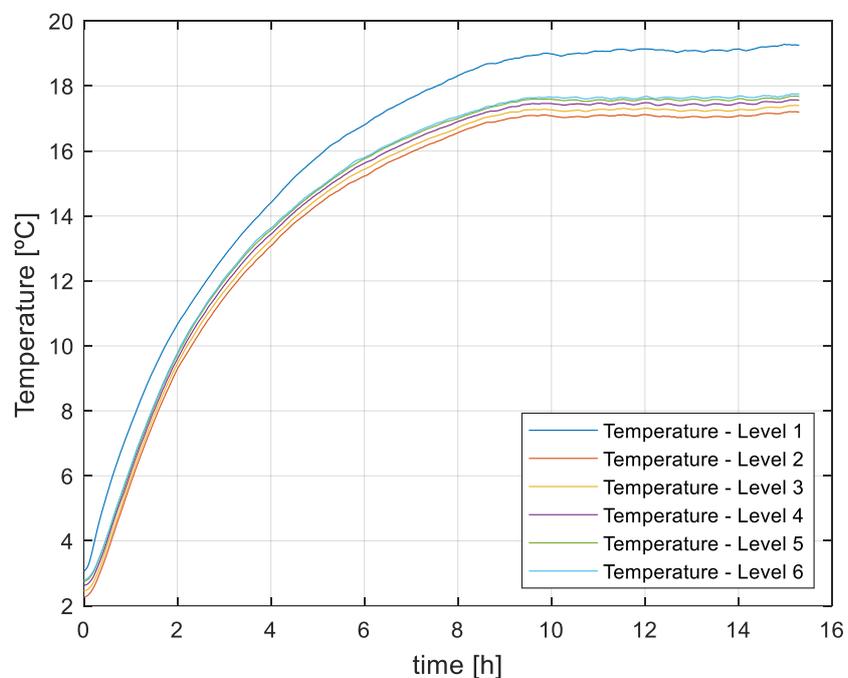


Figura 5.15. Temperatura dos 6 níveis no terceiro ensaio.

5.1.4. 4º Ensaio (Temperatura exterior 32°C)

Por fim, procede-se à análise do último e único ensaio destinado à função de arrefecimento de ambientes interiores, com uma temperatura exterior de 32°C (condições de ensaio, especificadas na Tabela 4.1).

Neste ensaio, conforme ilustrado na Figura 5.16, o tempo de estabilização para o sistema foi igual a aproximadamente 12 horas, sendo desprezáveis também as trocas de calor entre o piso e o chão.

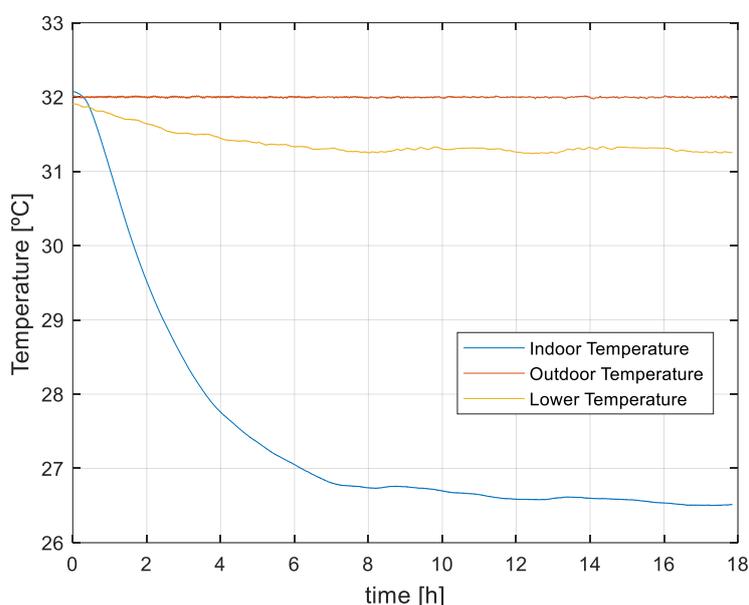
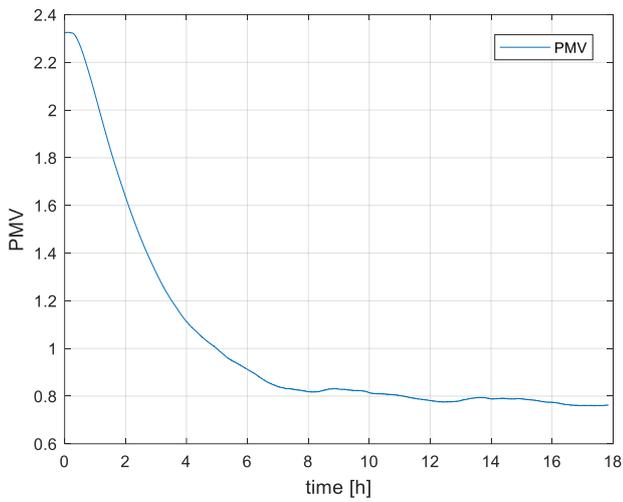
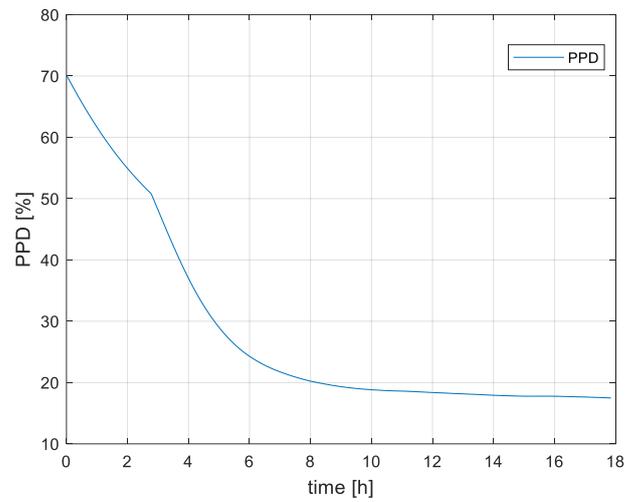


Figura 5.16. Evolução da temperatura ambiente interior, exterior e inferior no quarto ensaio.

Ao analisar os dados relativos ao conforto térmico nas Figura 5.17, constata-se que os índices PMV e PPD apresentam valores aceitáveis para o ensaio, embora ligeiramente piores aos dos ensaios de aquecimento. Esta discrepância pode ser atribuída ao facto de o sistema de pavimento radiante hidráulico ser mais adequado para aquecimento do que para arrefecimento. A temperatura de entrada da água foi fixada em sensivelmente 15,5°C, não havendo variações significativas, como ilustrado na Figura 5.18.



(a)



(b)

Figura 5.17. Índices de conforto térmico (a) Índice PMV (b) Índice PPD no quarto ensaio.

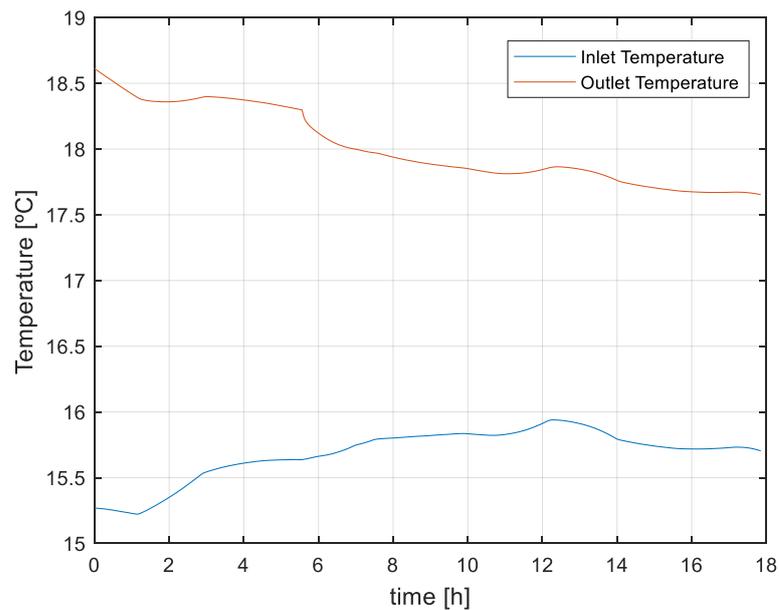


Figura 5.18. Temperatura de entrada e saída da água no quarto ensaio.

A eficiência energética do sistema, visualizada na Figura 5.19, estabiliza por volta dos 45%. Deste modo, este ensaio apresenta uma eficiência energética semelhante à do primeiro ensaio.

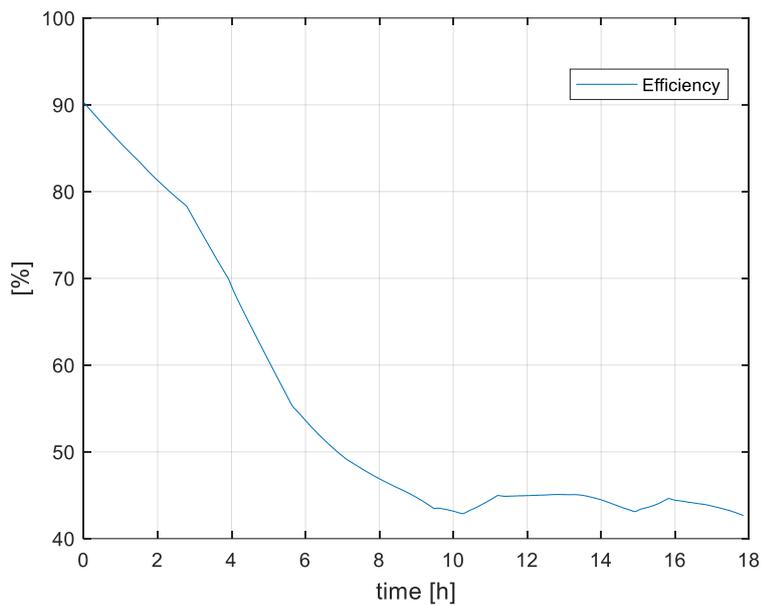


Figura 5.19. Eficiência energética do sistema no quarto ensaio.

Por fim, ao analisar os distintos níveis do ambiente interior, observa-se na Figura 5.20 que, ao contrário dos ensaios de aquecimento, a temperatura média de cada nível aumenta do nível 1 ao 6. Este efeito ocorre devido às correntes de convecção que provocam um gradiente vertical positivo de temperaturas.

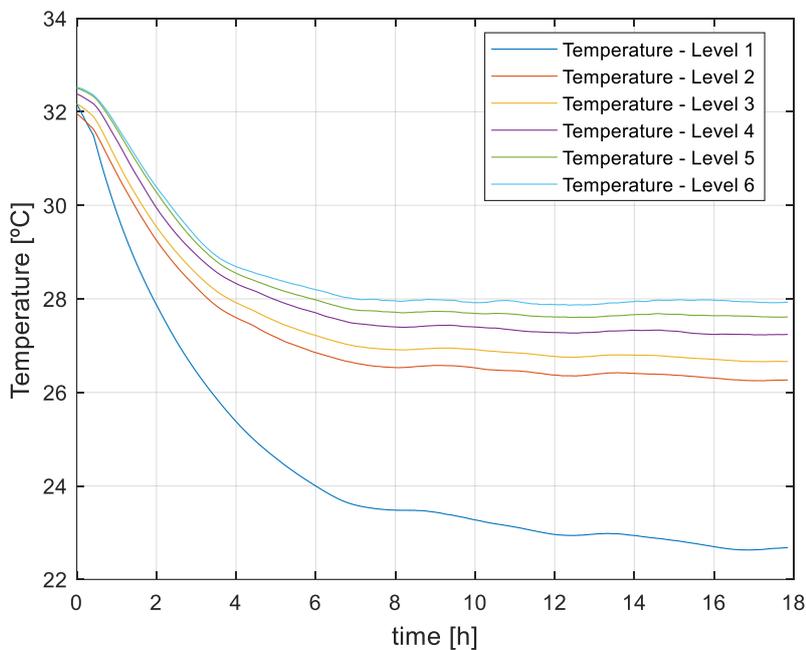


Figura 5.20. Temperatura dos 6 níveis no quarto ensaio.

5.2. Síntese

Resumindo, os resultados obtidos relativos aos quatro ensaios foram processados através do *software* MATLAB, sendo subsequentemente apresentados e interpretados detalhadamente. Todas as avaliações dos ensaios evidenciam uma temperatura inferior no piso, semelhante à temperatura interior, sugerindo, assim, que maior parte das perdas térmicas se verifica através das paredes e cobertura, que constituem a envolvente do ambiente interior, referido na secção 4.1.2.

No que diz respeito aos ensaios de aquecimento, os resultados foram bastante satisfatórios e promissores. Entende-se que, sob determinadas condições, é possível alcançar um nível de conforto térmico ideal ($PMV=0$) como observado no primeiro ensaio, sendo que o desempenho energético do sistema se altera de ensaio para ensaio devido às diversas temperaturas exteriores, que implicam diferentes exigências energéticas e de calor.

Apesar de não se observar uma estratificação de temperaturas nos níveis mencionados do sistema, os níveis de conforto térmico demonstram-se aceitáveis, nunca ultrapassando uma temperatura superficial do pavimento de 29°C.

Quanto ao ensaio de arrefecimento, também evidencia resultados positivos, exibindo um arrefecimento eficaz e uniforme. A análise da temperatura na superfície do pavimento no nível 1 revela uma discrepância de 3°C em relação aos outros níveis. Contudo, nos restantes patamares, a diferença é inferior a 2°C. Este fenómeno confere uma sensação de conforto térmico no interior do ambiente.

5.3. Comparação com a previsão do CFD

Ao comparar os resultados experimentais e computacionais obtidos nos capítulos quatro e cinco, observa-se uma discrepância relativamente ao gradiente vertical de temperatura. Na simulação CFD, é possível constatar um gradiente vertical negativo de temperatura, ao contrário dos dados adquiridos nos ensaios experimentais para os ensaios de aquecimento. Esta diferença pode ser atribuída ao facto de não ser possível atingir um estado adiabático perfeito nos ensaios experimentais, ao contrário da condição dada na simulação, onde não houve trocas de calor com o exterior.

Outro fator que pode explicar essa diferença é a possibilidade de as correntes de convecção, no ensaio experimental, serem superiores ao valor nulo considerado na

simulação. Esse fenómeno pode ter influenciado no gradiente de temperatura, causando a sua variação em relação aos resultados simulados.

5.4. Normas de conforto térmico

No sentido de relacionar os resultados obtidos com as normas de conforto térmico mencionadas, foi elaborada a Tabela 5.1. Deste modo, torna-se possível selecionar as categorias de conforto em que o ensaio está inserido.

Tabela 5.1. Dados de conforto térmico para cada ensaio realizado.

Dados	PMV	PPD [%]	WBGT	T _{op} [°C]	T _g [°C]	T _{intl} [°C]
1º Ensaio (14°C)	0,6	13	18,59	22,8	22,7	22,8
2º Ensaio (7°C)	-0,57	7,5	13,46	18,2	18	18,2
3ª Ensaio (2°C)	-0,6	12	11,86	17,2	17	17,4
4ª Ensaio (32°C)	0,77	18	23,64	26,5	26,7	26,5

5.4.1. ISO 7730

De acordo com a Tabela 2.3 da norma ISO 7730:2005, verifica-se que em nenhum dos ensaios o índice PMV estabilizou entre -0,5 a 0,5. Assim, conclui-se que a categoria atribuída para todos os ensaios é a categoria C, o que significa que o ambiente não sendo completamente confortável, é aceitável para a maioria das pessoas.

5.4.2. ASHRAE 55

A norma ASHRAE 55:2020 consiste na análise de três formas. No entanto, como um desses métodos vai ao encontro ao usado na norma ISO 7730:2005, apenas são analisadas as referentes ao modelo representado na Figura 2.10 e ao modelo adaptativo representado na Figura 2.11.

A primeira forma utiliza o modelo representado na Figura 2.10, que, com a velocidade do ar e a temperatura operativa, é possível identificar a zona onde cada ensaio está classificado. Neste caso, para efeitos de convecção natural, a velocidade do ar foi assumida igual a 0,1 m/s.

- 1º Ensaio – Zona confortável

- 2º Ensaio – Zona fria
- 3º Ensaio – Zona fria
- 4º Ensaio – Zona quente

O segundo método utiliza o modelo adaptativo referente à Figura 2.11. Desta forma, os ensaios são colocados nas duas possíveis faixas. Apenas os 1º e 4º ensaio são analisados, pois este método não trabalha com temperaturas exteriores inferiores a 10°C.

- 1º Ensaio – Zona de 90%
- 4º Ensaio – Zona de 90%

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresentam-se agora as principais conclusões do trabalho realizado, bem como recomendações e sugestões para futuros trabalhos de pesquisa na área do pavimento radiante hidráulico.

6.1. Principais conclusões

O propósito principal desta dissertação consistiu na realização de um estudo abrangente, acompanhado do desenvolvimento de um sistema de avaliação para ensaios experimentais destinado à análise de sistemas de pavimentos radiantes hidráulicos. Para esse efeito, diversos parâmetros foram utilizados com o intuito de avaliar o conforto térmico e a eficiência energética do referido sistema, incluindo a realização de simulações CFD.

Os resultados obtidos através dos ensaios experimentais e das simulações CFD possibilitaram uma comparação para efeitos de validação. Verificou-se que os resultados experimentais e computacionais apresentaram algumas discrepâncias entre si, devido às fortes correntes de convecção presentes nos ensaios experimentais.

Com o desenvolvimento do sistema de avaliação delineado e explicado no quarto capítulo, tornou-se exequível analisar o desempenho energético em cada ensaio, juntamente com os parâmetros pertinentes ao conforto térmico. Este sistema serviu como uma sólida base para o trabalho de investigação em questão, possibilitando a quantificação da eficiência energética em cada ensaio e viabilizando uma comparação entre eles. Adicionalmente, a sua criação permitirá, caso no futuro sejam realizados estudos e ensaios experimentais relativos a pavimentos radiantes hidráulicos, a aplicação do sistema delineado, uma vez que este foi validado com os resultados experimentais obtidos.

Ao proceder à análise dos resultados experimentais discutidos, constata-se que a eficiência energética no primeiro e último ensaio (50% e 43%, respetivamente), são superiores quando comparadas com o segundo e terceiro (33% e 29%, respetivamente). Isto deve-se ao facto das temperaturas exteriores no segundo e terceiro ensaio serem consideravelmente inferiores, exigindo uma quantidade acrescida de energia para o

aquecimento do espaço interior. Este processo, por sua vez, implica uma maior dissipação de energia e calor através da envolvente do sistema.

Outra expectativa relaciona-se com a estratificação das temperaturas no ambiente interior, ou seja, um gradiente vertical negativo de temperaturas visível. Contudo, tal não aconteceu devido à ocorrência de fortes correntes de convecção, resultando em maiores temperaturas nas camadas superiores durante os ensaios de aquecimento, em comparação com as camadas inferiores.

A análise do conforto térmico do ambiente interior revelou resultados bastante positivos. Através da utilização de normas e índices específicos, foi possível conduzir uma análise detalhada do sistema de pavimentos radiantes hidráulicos. Nos ensaios de aquecimento, o gradiente de temperaturas revelou-se confortável, uma vez que a diferença térmica ao longo de 3 metros de altura (correspondente a um pé direito convencional) nunca ultrapassou 3°C e manteve-se relativamente homogênea, ao contrário de outros sistemas de climatização. Os resultados dos índices PMV e PPD também indicam que é possível alcançar um nível de conforto ideal, embora seja necessário aumentar a temperatura de entrada da água para além dos 35°C, quando as temperaturas exteriores são inferiores a 14°C, de modo a evitar a zona fria mencionada na secção 5.4.2.

No que diz respeito ao ensaio de arrefecimento, observou-se um gradiente vertical de temperaturas positivo, evidenciando uma maior diferença entre os níveis superiores e inferiores. Os sistemas de pavimentos radiantes hidráulicos demonstraram ser mais eficientes em funções de aquecimento do que de arrefecimento. Não obstante, os resultados obtidos são considerados satisfatórios em termos de conforto térmico, permitindo um arrefecimento eficiente e adequado. Para alcançar um índice de conforto térmico ainda mais aprimorado, pode reduzir-se a temperatura de entrada para valores inferiores aos 15,5°C, a fim de obter temperaturas mais baixas no ambiente interior.

Em suma, esta dissertação proporcionou uma avaliação aprofundada dos sistemas de pavimentos radiantes hidráulicos, destacando a importância do desenvolvimento de um sistema de avaliação, dos ensaios experimentais e das simulações CFD para compreender e otimizar o desempenho desses sistemas no que toca ao conforto térmico e desempenho energético. As conclusões obtidas contribuem para o avanço do conhecimento neste campo e podem servir de base para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área de sistemas de aquecimento e arrefecimento de ambientes.

6.2. Recomendações para trabalhos futuros

O estudo realizado proporciona conclusões substanciais sobre o conforto térmico e a comparação das eficiências energéticas dos pavimentos radiantes hidráulicos analisados. Todavia, há áreas que podem ser exploradas para aprofundar o conhecimento e impulsionar a inovação nesse campo.

Dada a importância dos resultados das simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD) e dos testes experimentais, recomenda-se que pesquisas futuras investiguem essas discrepâncias em detalhe, no sentido de identificar as razões causadoras das diferenças e, possivelmente, obter uma melhor concordância entre os resultados experimentais e computacionais.

O sistema de avaliação destinado a pavimentos radiantes encontra-se sujeito a melhorias, particularmente no que toca a otimização da resposta lenta do sistema para caudais baixos. Caso esta melhoria seja implementada, seria viável alcançar e manter com maior precisão a temperatura de entrada da água, o que nem sempre foi possível nos ensaios experimentais conduzidos.

Outro ponto relevante é o tipo de revestimento usado no pavimento, que não foi considerado nesta análise. De acordo com os autores Sattari e Farhanieh (2006), constata-se que escolher um revestimento como madeira ou cerâmica pode afetar a transferência de calor para o ambiente interior. Importa explorar como diferentes revestimentos alteram os resultados obtidos e se isso tem um impacto significativo no sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE 55:2020. (2020). “*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.*” www.ashrae.org/technology.
- ASHRAE 2020. (2020). *Handbook, “Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment”, Inch-Pound Edition.*
- Batista, G. (2012). “*Sistema de controlo, regulação e comando de pisos radiantes hidráulicos*”. Tese de Mestrado em Engenharia Eletromecânica - Universidade da beira interior, Covilhã.
- CGE. (2018). *CGE*. <https://www.guiacasaeficiente.com/Pisos/RadianteEletrico.html>
- EDP Comercial. (2021). <https://www.edp.pt/particulares/content-hub/chao-aquecido-qual-o-melhor-piso-radiante/>
- Gil, M. (2017). “*Estudo da aplicação de um sistema solar térmico para climatização de uma habitação antiga*”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente - Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gonçalves, T. (2017). “*Conforto térmico no interior de edifícios thermal comfort in buildings*”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade de Coimbra, Coimbra.
- ISO 7243:2017. (2017). “*Ergonomics of the thermal environment - Assessment of the heat stress using the WBGT index.*”
- ISO 7726. (1998). “*Ergonomics of the thermal environment-Instruments for measuring physical quantities.*” <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/99f92eea-d1b3-48b4-8a3c->
- ISO 7730:2005. (2005). “*Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort.*”
- Jiang, C., Xie, G., Wu, D., Yan, T., Chen, S., Zhao, P., Wu, Z., & Li, W. (2021). “Experimental investigation on an energy-efficient floor heating system with intelligent control: A case study in Chengdu, China” *Thermal Engineering* 26 101094. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101094>
- Krieder, J., & Rabl A. (1994). “*Heating and Cooling of Buildings - Design for Efficiency.*” *Mechanical Engineering Series, International Editions, McGraw-Hill.*
- LaVere, T. (2009). “In-Floor Radiant Heat for Resorts”, *Engineered Systems Magazine. Engineered Systems Magazine.*
- Lemos, P. (2013). “*Viabilidade de utilização do sistema de pavimento radiante na otimização do conforto térmico em Edifícios Antigos*”. Tese de Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis- Universidade do Minho Escola de Engenharia.
- LNEC_ITE_50_Compilação. (n.d.).
- LuxMagna. (2012). *LuxMagna*.
- Martins, P. (2011). “*Análise do desempenho térmico de um piso radiante hidráulico*”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Da Beira Interior, Covilhã.
- Moghaddam, S. A., Matos, M., Brett, M., Vicente, R., & Simões, N. (2023). “*Experimental set-up and test procedure for the energy assessment of radiant floor systems*”. -

- International Conference on Construction, Energy, Environment and Sustainability - CEES 2023, 27-30 June, Funchal-Madeira, Portugal.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2006). *“Fundamentals of Engineering Thermodynamics”*, 5^a Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Mr.Pex. (2017). *Mr.Pex, “Technical Sheet,”* 2017. <https://mrpexsystems.com/>
- Pinto, C. (2020). *“Estudo de betonilhas de sistemas de pavimento radiante: simulação numérica e estudos paramétricos”* - Universidade de Aveiro.
- Rastello, M. (2013). *“Otimização de parâmetros de projeto de tubulações de sistemas de calefação por piso radiante”*. Tese de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Rodrigues, L. (2019). *“Estudo do desempenho térmico de um piso radiante com diferentes formulações de betonilha”* - Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- Sattari, S., & Farhanieh, B. (2006). “A parametric study on radiant floor heating system performance.” *Renewable Energy*, 31(10), 1617–1626.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.009>
- Schirmer, W. N., Pian, L. B., Sílvia, M., Szymanski, E., & Gauer, M. A. (2011). *“A poluição do ar em ambientes internos e a síndrome dos edifícios doentes.”*
- SIMSCALE. (2023). <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>
- UPONOR. (2023). <https://www.uponor.com/en-en/r/upgrade-of-underfloor-heating-control-system-in-a-single-family-house-in-heinola>
- VISSMANN. (2022). <https://www.viessmann.co.uk/en/heating-advice/heat-pumps/is-underfloor-heating-efficient.html>
- Warmup. (2018). <https://www.warmup.co.uk/underfloor-heating/electric>
- Watson, R., & Chapman, K. (2004). *“Radiant heating & cooling handbook - Introduction to Radiant Systems”*, 2nd ed. (2ⁿ ed.).

APÊNDICE A

Cálculos intermédios relativos ao índice PMV e PPD:

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)\}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} & \text{para } 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{para } 2,38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0,078m^2 \cdot K \cdot W^{-1} \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0,078m^2 \cdot K \cdot W^{-1} \end{cases}$$

$$\ln(p_{ws}) = \frac{Z_1}{T} + Z_2 + Z_3 \cdot T + Z_4 \cdot T^2 + Z_5 \cdot T^3 + Z_6 \cdot \ln(T)$$

Onde,

$$Z_1 = -5800,2206$$

$$Z_4 = 4,1764768 \times 10^{-5}$$

$$Z_2 = 1,3914993$$

$$Z_5 = 1,4452093 \times 10^{-8}$$

$$Z_3 = -4,8640239 \times 10^{-2}$$

$$Z_6 = 6,5459673$$

Onde p_{ws} é a pressão de vapor saturado e T a temperatura absoluta de bolbo seco do ar (K)

Sabendo p_{ws} pode calcular-se então p_{wv} através da equação x:

$$p_{wv} = \phi \cdot p_{ws}(T)$$

Cálculos intermédio relativos ao coeficiente global de transferência de calor da envolvente – U:

A energia dissipada pela envolvente do sistema referido pode ser dividida em três componentes distintas: a energia dissipada pelas paredes, pela cobertura e, por último, a transferida para o chão através do pavimento.

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

$$U = \frac{1}{\sum R}$$

Como a envolvente é constituída apenas por um material, a condutibilidade térmica é igual, neste caso, $\lambda = 0,037 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. No entanto, a espessura da cobertura é maior que a da parede e da termoplaca, pelo que o cálculo do U será dividido em três formas:

- Parede:

Valores de resistência térmica para fluxo de calor horizontal

$$e = 15 \text{ cm}$$

$$R_{se} = 0,04$$

$$R_{si} = 0,13$$

$$R_s = \frac{0,15}{0,037}$$

$$A_{parede} = 1,53 \times 2,95$$

$$U = \frac{1}{0,04 + \frac{0,15}{0,037} + 0,13} \times 4$$

- Cobertura:

Valores de resistência térmica para fluxo de calor ascendente

$$e = 20 \text{ cm}$$

$$R_{se} = 0,04$$

$$R_{si} = 0,10$$

$$R_s = \frac{0,20}{0,037}$$

$$A_{cobertura} = 1,53 \times 1,53$$

$$U = \frac{1}{0,04 + \frac{0,20}{0,037} + 0,10}$$

- Pavimento:

Valores de resistência térmica para fluxo de calor descendente

$$e = 5 \text{ cm}$$

$$R_{se} = 0,04$$

$$R_{si} = 0,17$$

$$R_s = \frac{0,05}{0,037}$$

$$A_{pavimento} = 1,50 \times 1,50$$

$$U = \frac{1}{0,04 + \frac{0,05}{0,037} + 0,17}$$