

2025

**Andreia Filipa  
Costa Cruz**

**Design passivo para a melhoria do conforto  
térmico em habitações existentes:  
Uma proposta para o contexto urbano de Lisboa**



2025

**Andreia Filipa  
Costa Cruz**

**Design passivo para a melhoria do conforto  
térmico em habitações existentes: Uma proposta  
para o contexto urbano de Lisboa**

Projeto apresentado ao IADE - Faculdade de Design, Tecnologia e Comunicação da Universidade Europeia, para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Design de Produto, Espaço e Interação realizado sob a orientação científica do Doutor João Nuno Gago Bernarda, professor auxiliar do IADE – Universidade Europeia.

## **agradecimentos**

Gostaria de agradecer ao Professor João Bernarda pela sua orientação e apoio ao longo de todo o processo de desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço também a todas as pessoas que responderam ao questionário dirigido a residentes em Lisboa, cuja participação foi essencial para a consolidação da componente empírica deste trabalho.

Aos especialistas que participaram no questionário dirigido a stakeholders, agradeço a disponibilidade e o contributo prestado para este trabalho.

Aos participantes do focus group, Thaynne Santos, Domingos Santos, Inês Francisco, Vítor Mota e Fábio Semedo, agradeço a disponibilidade, a generosidade e a profundidade das partilhas, que enriqueceram significativamente a reflexão crítica sobre o produto.

Um agradecimento especial à Engenheira Carla Noronha, pela colaboração nas estimativas energéticas.

Às minhas amigas do coração, Cheila e Filipa, por serem o meu maior apoio em todos os momentos.

Aos meus amigos Thay, Íris e Domingos, pelo incentivo constante e por me acompanharem com presença, força e leveza ao longo de todo este caminho.

Ao Rodrigo, pelo carinho, pela compreensão e por celebrar comigo cada passo desta jornada.

Ao meu melhor amigo Bee, pela companhia, o carinho e a paz.

E um agradecimento muito especial aos meus pais, Anita e Paulo, e ao meu irmão, Diogo, pelo amor e apoio incondicional ao longo de todo o percurso.

**palavras-chave**

Eficiência energética; Conforto térmico;  
Design passivo; Habitações; Lisboa.

**resumo**

O desempenho térmico dos edifícios constitui um eixo fundamental nas discussões atuais sobre sustentabilidade, eficiência energética e qualidade de vida. Em Portugal, e particularmente na cidade de Lisboa, o parque habitacional revela fragilidades construtivas e uma forte dependência de sistemas de climatização ativa, acentuando os impactos económicos e sociais, com especial incidência na pobreza energética. Este estudo investiga o potencial de um artefacto de design passivo adaptado às especificidades climáticas e construtivas do contexto urbano lisboeta, com o objetivo de melhorar o conforto térmico e reduzir a necessidade de climatização ativa em habitações existentes. A investigação segue uma abordagem mista, orientada pelo modelo *Double Diamond (Discover, Define, Develop, Deliver)*, combinando revisão bibliográfica, inquéritos a residentes, grupos focais com utilizadores, inquéritos a especialistas e, por fim, simulações térmicas do artefacto desenvolvido. Os resultados evidenciam uma predisposição generalizada dos residentes para o uso de estratégias passivas, ainda que a sua eficácia dependa fortemente da qualidade da construção existente. A realização de *focus groups* permitiu aferir a aceitação social do artefacto e recolher sugestões de melhoria, enquanto os inquéritos a especialistas identificaram oportunidades de aperfeiçoamento técnico e construtivo. As simulações térmicas confirmaram o potencial da solução para melhorar o conforto térmico, demonstrando capacidade para manter os espaços interiores dentro ou próximos dos limites definidos

pela norma EN 16798-1:2014, mesmo sob condições críticas de verão (30 ° C) e de inverno (10 ° C). Com valores de transmitância térmica entre 1,94 e 2,35W/m<sup>2</sup> ·K, o artefacto revelou-se eficaz na retenção de calor, contribuindo para compensar as deficiências da envolvente térmica em edifícios existentes. Esta investigação contribui, a nível prático, com o desenvolvimento de uma solução de climatização passiva aplicável ao edificado urbano existente, e, a nível teórico, com uma perspectiva integrada sobre desempenho térmico, comportamento dos utilizadores e critérios de design ajustados ao contexto climático e habitacional de Lisboa.

**keywords**

Energy efficiency; Thermal comfort;  
Passive design; Housing; Lisbon.

**abstract**

Thermal performance of buildings is a key topic in current debates on sustainability, energy efficiency, and quality of life. In Portugal, particularly in the city of Lisbon, the housing stock shows construction fragilities and a strong reliance on active climate control systems, which accentuates economic and social impacts, with particular incidence on energy poverty. This study investigates the potential of a passive design artefact adapted to the climatic and constructive specificities of Lisbon's urban context, aiming to improve thermal comfort and reduce dependence on active systems in existing dwellings. The research adopts a mixed-methods approach, guided by the Double Diamond model (Discover, Define, Develop, Deliver), combining literature review, resident surveys, user focus groups, expert questionnaires, and, finally, thermal simulations of the proposed artefact. The results reveal a general predisposition among residents to adopt passive strategies, although their effectiveness is strongly conditioned by construction quality; focus groups helped to assess the social acceptance of the system and gather improvement suggestions, while expert input identified opportunities for technical and constructive refinement. Thermal simulations confirmed the system's potential to improve comfort conditions, showing capacity to maintain indoor environments within or close to the comfort thresholds defined by EN 16798-1:2014, even under critical summer (30 °C) and winter (10 °C) scenarios. With thermal transmittance values ranging from 1.94 to 2.35 W/m<sup>2</sup>·K, the

artefact proved effective in heat retention, helping to mitigate the deficiencies of the existing building envelope. This research contributes, on a practical level, by proposing a passive climate control solution applicable to the urban built environment, and on a theoretical level, by offering an integrated perspective on thermal performance, user behaviour, and design criteria tailored to Lisbon's climatic and housing context.

## Índice

agradecimentos .....	i
resumo.....	ii
abstract .....	iv
Índice de figuras.....	ix
Índice de tabelas.....	x
I. Introdução .....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Problemática .....	2
1.3 Objetivos da investigação .....	4
1.4 Questões de investigação .....	5
1.5 Pertinência do estudo .....	5
1.6 Desenho da investigação.....	6
II. Enquadramento teórico .....	10
2.1 Caracterização do edificado lisboeta .....	10
2.2 Clima de Lisboa .....	12
2.3 Conforto Térmico.....	14
2.3.1 Modelos de Conforto Térmico.....	15
2.3.1.1 Modelo estático (Fanger, 1970).....	15
2.3.1.2 Modelo Adaptativo (Dear & Brager, 1998).....	16
2.3.2 Normas de conforto térmico .....	18
2.3.2.1 A norma En 16798-1:2014.....	21
2.4 Design Passivo .....	25
2.4.1 Conceitos fundamentais .....	25
2.4.1.1 Trocas térmicas .....	25
2.4.1.1.1 Condução .....	26
2.4.1.1.2 Convecção.....	27
2.4.1.1.3 Radiação.....	28
2.4.1.2 Propriedades físicas dos materiais .....	29
2.4.1.2.1 Propriedades físicas base .....	30
2.4.1.2.2 Propriedades radiativas .....	32
2.4.1.2.3 Propriedades de condução e armazenamento térmico .....	35

2.4.1.2.4	Relações entre propriedades térmicas .....	40
2.4.1.3	Aplicação da Carta de Givoni ao Clima de Lisboa.....	42
2.4.1.3.1	Estratégias passivas.....	46
2.4.1.3.1.1	Ganhos solares diretos .....	46
2.4.1.3.1.2	Ganhos solares indiretos .....	48
2.4.1.3.1.3	Sistemas de ganho isolado .....	58
2.4.1.3.1.4	Arrefecimento .....	61
III.	Metodologia .....	67
3.1	Fase <i>Discover</i> .....	67
3.1.1	Inquérito por questionário a habitantes da cidade de lisboa .....	67
3.2	Fase <i>Define</i> .....	78
3.2.1	<i>Mindmap</i> .....	78
3.3	Fase <i>Develop</i> .....	83
3.3.1	Sketching.....	83
3.4	Fase <i>Deliver</i> .....	87
3.4.1	<i>Focus Group</i> com potenciais utilizadores.....	87
3.4.2	Inquérito por questionário a <i>stakeholders</i> .....	92
3.4.3	Estimativas de conforto.....	104
IV.	Produto.....	114
4.1	Conceito: painel modular “Helie” .....	114
4.1.1	Módulo.....	116
4.1.1.1	Encaixe.....	118
4.1.1.2	Suporte regulável .....	119
4.1.1.3	Sistema de deslize .....	120
4.2	Liberdade de composição .....	121
4.3	Materiais .....	121
4.4	Sistema Helie no espaço .....	122
4.5	Custo .....	124
4.6	Desenho técnico .....	126
4.7	Ergonomia.....	129
V.	Conclusão.....	131
5.1	Limitações e recomendações futuras .....	132
	Referências Bibliográficas .....	135

Anexos ..... 142

## Índice de figuras

Figura 1: Desenho da investigação. Adaptado de: Design Council (2025). .....	9
Figura 2: Intervalos de temperatura operativa por categoria, para edificios naturalmente ventilados, em função da temperatura exterior média exponencialmente ponderada, segundo a EN 16798-1. Adaptado de: CEN (2014, Draft 8). .....	23
Figura 3: Carta bioclimática de Givoni. Fonte: Reproduzido por Vadoudi (2018), com base em Givoni (1992). .....	44
Figura 4: Ganhos diretos. Fonte: Moita (2010) .....	47
Figura 5: Funcionamento de uma parede de trombe. Adaptado de: Lechner (2015). .....	50
Figura 6: Funcionamento parede de trombe ventilada. Adaptado de: Émi & Acciona(2015). ....	52
Figura 7: Funcionamento roof pond. Adaptado de: Lechner (2015). .....	57
Figura 8: Representação estufa. Fonte: Moita (2010). .....	59
Figura 9: Isolamento móvel. Fonte: Moita (2010). .....	60
Figura 10: Sistema termossifão. Fonte: Hall (2010). .....	61
Figura 11: Mindmap. Fonte: a autora. ....	79
Figura 12: Sistemas calha. Fonte: a autora. ....	85
Figura 13: Configurações modulares. Fonte: a autora. ....	87
Figura 14: Funcionamento dual do sistema. Fonte: a autora. ....	116
Figura 15: Componentes módulo. Fonte: a autora. ....	117
Figura 16: Encaixe modular. Adaptado de: KNAPP, 2025. ....	118
Figura 17: Suporte regulável: Fonte: a autora. ....	119
Figura 18: Sistema de deslize. Adaptado de: Tengyu, 2022. ....	120
Figura 19: Liberdade de composição modular. Fonte: a autora. ....	121
Figura 20: Materiais módulo. Fonte: a autora. ....	122
Figura 21: Sistema Helie no espaço. Fonte: a autora. ....	123
Figura 22: Representação técnica. Fonte: a autora. ....	126
Figura 23: Pormenores (corte do vidro). Fonte: a autora. ....	127
Figura 24: Representação construtiva (Materiais). Fonte: a autora. ....	127
Figura 25: Pormenores (encaixe ferragens). Fonte: a autora. ....	128
Figura 26: Representação geométrica e técnica módulo janela. Fonte: a autora. ....	128

## Índice de tabelas

<i>Tabela 1: Esquema comparativo das normas de conforto térmico analisadas. Fonte: a autora.</i>	20
<i>Tabela 2: Descrição da aplicabilidade das categorias da norma En 16798-1:2014. Adaptado de: CEN (2014, Draft 8).</i>	22
<i>Tabela 3: Limites superiores e inferiores da temperatura operativa por categoria, com base na equação da EN 16798-1, para edifícios naturalmente ventilados. Adaptado de: CEN (2014, Draft 8).</i>	24
<i>Tabela 4: Absortividade e Emissividade de diferentes materiais. Adaptado de: Lamberts et al. (2014).</i>	33
<i>Tabela 5: Propriedades materiais. Adaptado de: Moita, 2010.</i>	41
<i>Tabela 6: Estratégias passivas recomendadas para Lisboa segundo a Carta de Givoni. Adaptado de: Gonçalves &amp; Graça (2004).</i>	45
<i>Tabela 7: Tabela justificativa das questões no inquérito por questionário a habitantes da cidade de Lisboa. Fonte: a autora.</i>	69
<i>Tabela 8: Síntese notas e respetivas implicações para o Design. Fonte: a autora.</i>	89
<i>Tabela 9: Tabela justificativa questões inquérito por questionário a stakeholders. Fonte: a autora.</i>	94
<i>Tabela 10: Custo módulo. Fonte: a autora.</i>	124
<i>Tabela 11: Valores forças médias para os respetivos rolamentos. Adaptado de: NTN Corporation (s.d., p. 55).</i>	172

# I. Introdução

## 1.1 Contextualização

O desempenho térmico de edifícios tornou-se, nas últimas décadas, um tema central no debate sobre sustentabilidade, energia e qualidade de vida. A forma como os edifícios interagem com o clima condiciona não apenas o conforto dos ocupantes, mas também os níveis de consumo energético e as emissões associadas. Num contexto europeu de forte dependência energética e de metas ambientais cada vez mais exigentes, compreender as fragilidades do parque edificado e explorar soluções que conciliem eficiência, acessibilidade e bem-estar é hoje uma prioridade. É a partir deste enquadramento que se desenvolve a presente contextualização, centrada na análise da ineficiência energética do edificado, das suas repercussões sociais e ambientais e do papel das estratégias passivas como alternativa sustentável para o conforto térmico.

Estima-se que 75% do parque edificado europeu seja energeticamente ineficiente e que a taxa anual de renovação se mantenha em apenas 1% (Diretiva (UE) 2023/1791). Edifícios com este desempenho apresentam dificuldades em reter o calor no inverno e em dissipar o excesso no verão, comprometendo o conforto térmico dos ocupantes. Este, é entendido como o estado de satisfação relativamente ao ambiente térmico envolvente sendo alcançado quando o corpo humano consegue manter o seu equilíbrio térmico, ou seja, quando a produção interna de calor é compensada pela sua dissipação para o meio exterior (ASHRAE, 2010). Na ausência desse equilíbrio, os utilizadores recorrem frequentemente a soluções de climatização ativa, como sistemas mecânicos e elétricos de aquecimento e arrefecimento (Moita, 2010). Esta dependência tem implicações ambientais significativas: o setor dos edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo final de energia e 36% das emissões de gases com efeito de estufa associadas à energia, o que reforça a sua centralidade nas metas europeias de sustentabilidade.

Para além das implicações referidas, a ineficiência energética do edificado tem também consequências sociais, em particular na forma de pobreza energética. Este conceito é entendido como a incapacidade de um agregado assegurar serviços energéticos essenciais, como aquecimento, arrefecimento, iluminação ou água quente, necessários para uma vida digna e saudável (Diretiva (UE) 2023/1791; ELPPE, 2024). O peso que a climatização ativa tem nos orçamentos familiares acentua desigualdades e contribui para a vulnerabilidade de milhões de

cidadãos europeus, evidenciando que a eficiência energética não é apenas uma questão ambiental, mas também de justiça social.

É também por essa razão que a União Europeia sublinha a importância de adaptar as medidas de eficiência energética às condições climáticas e locais de cada Estado-Membro, promovendo soluções que respondam não apenas às metas ambientais, mas também às necessidades concretas das populações (Diretiva (UE) 2023/1791). É neste enquadramento que surge a climatização passiva, capaz de oferecer uma resposta particularmente adequada por se basear no aproveitamento das condições naturais, como radiação solar, vento, humidade, vegetação e propriedades dos materiais, para assegurar o conforto térmico sem recurso a energia adicional (Moita, 2010). De acordo com a Agência Internacional de Energia, edifícios concebidos com princípios passivos podem reduzir o consumo energético em até 50% face a edifícios convencionais (International Energy Agency [IEA], 2019).

A climatização passiva, quando devidamente adaptada ao clima local, constitui uma alternativa sustentável e eficaz para melhorar o conforto térmico e reduzir a dependência de sistemas ativos. Embora este seja um desafio transversal a todos os Estados-Membros da União Europeia, a forma como se manifesta varia de acordo com as características de cada território. Em países como Portugal, marcado por um clima mediterrâneo e por um parque edificado envelhecido, estas questões assumem contornos específicos que importa compreender em maior detalhe. É precisamente neste enquadramento que se insere a problemática da presente investigação.

## 1.2 Problemática

Em Portugal, a questão da eficiência energética e do conforto térmico no setor residencial adquire contornos específicos, onde se cruzam fragilidades estruturais, desigualdades sociais e metas ambientais cada vez mais ambiciosas. Esta realidade torna-se ainda mais crítica em contextos urbanos como o da cidade de Lisboa, onde a elevada densidade habitacional e o envelhecimento do parque edificado agravam os desequilíbrios no desempenho térmico das habitações.

Apesar do claro alinhamento com os compromissos internacionais e nacionais, como o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030), o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 e a Estratégia Nacional de Longo Prazo para o Combate à Pobreza Energética (ELPPE), os avanços registados na reabilitação energética do edificado em Portugal têm sido limitados. O mais recente

Relatório de Progresso da ELPRE (2024) revela que, até 2023, apenas 16,1% do parque habitacional havia sido renovado, muito aquém da meta de 70% definida para 2030. Simultaneamente, a melhoria das condições de conforto térmico, medida pela redução acumulada das horas de desconforto térmico, foi de apenas -0,54%, quando a meta estabelecida é de -26% até 2030 (Grupo de Coordenação da ELPRE, 2024). Estes valores evidenciam uma discrepância significativa entre as metas estabelecidas e os progressos efetivamente alcançados.

Grande parte deste fraco desempenho pode ser explicada pelas limitações observadas nos programas de apoio direto às famílias, que constituem o principal instrumento de incentivo à melhoria da eficiência energética no setor residencial. No último aviso do Programa de Apoio a Edifícios Mais Sustentáveis, foram submetidas mais de 81 000 candidaturas, mas cerca de 30% foram excluídas do processo, quer por incumprimento dos critérios de elegibilidade, quer por incorreções formais na submissão. Até ao final de 2024, tinham sido pagas ou aprovadas para pagamento 13 995 candidaturas, enquanto mais de 6 100 foram recusadas e mais de 3 000 foram retiradas pelos próprios requerentes. Apesar destas dificuldades, o Governo tem vindo a reforçar os fundos disponíveis, com um aumento de 60 milhões de euros sobre os 30 milhões iniciais, num esforço claro de apoiar a melhoria da eficiência energética no setor habitacional. Contudo, o programa será encerrado após esta fase, e os apoios passarão a estar exclusivamente direcionados a famílias vulneráveis, excluindo a classe média da próxima geração de incentivos (Silva, 2024). Para além dos constrangimentos nos mecanismos de apoio, também o contexto energético nacional tem vindo a agravar a vulnerabilidade das famílias. Em 2024, Portugal registou o maior aumento dos preços da eletricidade doméstica na União Europeia (14,2%), enquanto atingiu um dos valores mais elevados de sempre no consumo total de energia elétrica (51,4 TWh) (Lusa, 2025). Embora 71% desse consumo tenha sido assegurado por fontes renováveis, a pressão sobre o sistema elétrico mantém-se elevada, refletindo-se em custos acrescidos para as famílias e em riscos de exclusão energética (REN, 2025).

No contexto específico da cidade de Lisboa, estas fragilidades adquirem contornos particulares, tanto pela pressão sobre o sistema energético como pelas características do edificado. Embora a maioria dos edifícios em Lisboa não evidencie necessidade imediata de reparação estrutural (61%), existe ainda uma fração, cerca de 2% em péssimo estado e 10% em mau estado, que reforça o cenário de vulnerabilidade do parque edificado (INE, 2021, como citado em Câmara Municipal de Lisboa, 2023).

A par das questões de conservação, o desconforto térmico nas habitações lisboetas é igualmente uma realidade amplamente partilhada. De acordo com a Lisboa E-Nova, 56,5% da população reporta desconforto térmico durante o verão e 63,2% no inverno, sendo frequente o recurso a sistemas de climatização ativa, utilizados por 58,9% dos inquiridos no verão e por 74,7% no inverno (Lisboa E-Nova, 2022). Este quadro de desconforto e dependência energética está diretamente relacionado com o fraco desempenho térmico do edificado existente.

A análise dos certificados energéticos emitidos no concelho de Lisboa entre 2014 e 2024 confirma a prevalência de um desempenho insatisfatório no parque edificado. Mais de metade das certificações (35,8% em classe C, 30,9% em D, 13,2% em E e 5,9% em F) situam-se entre níveis médios a fracos de eficiência energética. Já as classes superiores (A+, A, B e B-), representativas de desempenhos significativamente melhores do que o mínimo regulamentar, representam apenas cerca de 13,7% do total. Estes valores evidenciam que a melhoria substancial do desempenho energético continua a ser excepcional, permanecendo a maior parte do edificado abaixo dos padrões desejáveis (ADENE, 2025).

A persistência destas fragilidades, aliada à lentidão dos processos de renovação e à dependência crescente de sistemas de climatização ativa, evidencia a necessidade de explorar alternativas que promovam o conforto térmico de forma mais eficiente e sustentável. Neste contexto, a presente investigação propõe o desenvolvimento de uma solução de design passivo que responda às especificidades climáticas e construtivas da cidade de Lisboa, visando a melhoria do desempenho térmico das habitações existentes, a redução da pressão sobre o consumo energético e a contribuição efetiva para as metas nacionais em matéria de eficiência energética e justiça climática.

### 1.3 Objetivos da investigação

A presente investigação tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma solução de design passivo inovadora, adaptada ao contexto climático, construtivo e social da cidade de Lisboa, com vista à melhoria do conforto térmico e à redução da dependência de sistemas de climatização ativa em habitações existentes.

Para concretizar o objetivo geral, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o clima urbano e a construção habitacional da cidade de Lisboa, identificando os principais fatores ambientais e construtivos que influenciam o conforto térmico em habitações existentes.
- Investigar as estratégias de design passivo mais adequadas ao clima da cidade de Lisboa, bem como as propriedades térmicas dos materiais que favorecem a sua aplicação em habitações existentes.
- Estudar os comportamentos térmicos e as percepções de conforto dos residentes da cidade de Lisboa, com o intuito de identificar padrões relevantes que possam informar critérios de conceção da solução proposta.
- Explorar o contributo da solução desenvolvida para a melhoria do conforto térmico em habitações existentes na cidade de Lisboa.

#### 1.4 Questões de investigação

Em consonância com os objetivos definidos anteriormente, as questões de investigação a seguir delineadas orientam o percurso metodológico da presente dissertação.

##### Questão principal

- De que forma uma solução de design passivo inovadora, desenvolvida para o contexto climático e habitacional da cidade de Lisboa, pode melhorar o conforto térmico e contribuir para a eficiência energética em habitações existentes?

##### Questões secundárias

- Quais são as características climáticas e construtivas predominantes da cidade de Lisboa e de que forma influenciam o conforto térmico em habitações existentes?
- Quais são as estratégias de design passivo adequadas ao clima da cidade de Lisboa e que propriedades térmicas dos materiais favorecem a sua aplicação em habitações existentes?
- De que forma os comportamentos térmicos e as expectativas de conforto dos residentes da cidade de Lisboa podem informar o design de uma solução passiva?
- Em que medida a solução desenvolvida contribui para a melhoria do conforto térmico nas habitações da cidade de Lisboa?

#### 1.5 Pertinência do estudo

O presente estudo assume particular relevância perante a complexidade e a urgência dos desafios relacionados com o conforto térmico, a eficiência energética e a pobreza energética no setor habitacional português, com especial incidência na cidade de Lisboa, conforme detalhado na problemática.

Apesar do alinhamento com as ambiciosas metas de descarbonização e transição energética definidas em instrumentos como o PNEC 2030, o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 e a ELPPE, a implementação das estratégias de renovação do edificado tem-se revelado insuficiente. O 7.º Relatório de Progresso da ELPRE (2024) confirma que os avanços na reabilitação habitacional e na redução do desconforto térmico permanecem significativamente aquém das metas estabelecidas, revelando uma lacuna prática: a ausência de soluções acessíveis, adaptáveis e de fácil aplicação, capazes de mitigar o desconforto térmico em habitações existentes e reduzir a dependência de sistemas de climatização ativa, sobretudo no contexto urbano lisboeta.

Para além desta dimensão prática, a investigação articula-se também com limitações identificadas na literatura científica. Uma revisão sistemática recente, que analisou 84 publicações produzidas entre 1992 e 2024 sobre sistemas solares passivos, concluiu que a maioria dos estudos permanece centrada exclusivamente no desempenho energético, negligenciando outras dimensões relevantes. Como referem os autores, a análise da eficiência destas técnicas *“should undergo a more holistic approach, not only assessing the benefits for the building’s energy efficiency but also conducting a life cycle analysis of the entire system, its impact on occupant comfort, and an economic analysis, as well as an assessment of the system’s long-term performance”* (Toroxel & Silva, 2024, p. 25). É neste cruzamento entre uma necessidade prática e a ausência de abordagens suficientemente holísticas na literatura que se posiciona o presente estudo. Ao explorar o desenvolvimento de um artefacto de design passivo adaptado ao contexto urbano e climático de Lisboa, a investigação propõe uma abordagem que procura, em simultâneo, mitigar o desconforto térmico nas habitações e contribuir para o alargamento do conhecimento científico, através da consideração conjunta do desempenho energético, do conforto dos ocupantes, da viabilidade económica e da performance a longo prazo.

## 1.6 Desenho da investigação

A presente investigação organiza-se metodologicamente em torno da questão principal:

“De que forma uma solução de design passivo inovadora, desenvolvida para o contexto climático e habitacional da cidade de Lisboa, pode melhorar o conforto térmico e contribuir para a eficiência energética em habitações existentes?”.

Por forma a responder a esta questão de investigação, foi adotado o modelo *Double Diamond*, que estrutura o processo em quatro fases: *Discover*, *Define*, *Develop* e *Deliver*. Este modelo articula momentos de exploração divergente com fases de síntese convergente, assegurando uma abordagem iterativa, estruturada e orientada para a solução (Design Council, 2025).

A presente investigação caracteriza-se pela sua natureza aplicada, pois visa o desenvolvimento de uma solução prática para problemas concretos relacionados com o conforto térmico e a eficiência energética. Adota uma abordagem mista, que integra métodos qualitativos e quantitativos para combinação de análises teóricas, coleta de dados empíricos e processos criativos. Esta abordagem permite explorar de forma complementar diferentes dimensões do problema, garantindo uma resposta fundamentada à questão principal (Prodanov & Freitas, 2013).

As fases iniciais do processo (*Discover* e *Define*) tiveram como objetivo responder às três primeiras questões secundárias:

- “Quais são as características climáticas e construtivas predominantes da cidade de Lisboa e de que forma influenciam o conforto térmico em habitações existentes?”
- “Quais são as estratégias de design passivo adequadas ao clima da cidade de Lisboa e que propriedades térmicas dos materiais favorecem a sua aplicação em habitações existentes?”
- “De que forma os comportamentos térmicos e as expectativas de conforto dos residentes da cidade de Lisboa podem informar o design de uma solução passiva?”

As fases subsequentes (*Develop* e *Deliver*) centraram-se na última questão secundária:

- “Em que medida a solução desenvolvida contribui para a melhoria do conforto térmico nas habitações da cidade de Lisboa?”

#### Fase *Discover*

Esta primeira etapa consistiu em compreender em profundidade o problema, mapeando o enquadramento teórico e recolhendo dados empíricos específicos do contexto lisboeta. Para tal, recorreram-se a dois métodos complementares:

- A revisão de literatura foi orientada para a compreensão do contexto climático e construtivo da cidade de Lisboa, da definição de conforto térmico e das principais estratégias e

propriedades materiais associadas ao design passivo, com vista à fundamentação da proposta desenvolvida.

- Inquérito por questionário aplicado a residentes de Lisboa, que permitiu recolher dados sobre hábitos de climatização, perceções de conforto e estratégias comportamentais, fornecendo informações objetivas e mensuráveis para a identificação de padrões e relações entre variáveis que pudessem informar o design (Prodanov & Freitas, 2013).

#### Fase *Define*

Com base nos resultados da fase anterior, esta etapa centrou-se na organização e priorização da informação de modo a orientar o desenvolvimento do artefacto.

- *Mindmap*, utilizado como ferramenta de síntese visual para estruturar os achados e transformá-los em direções de design claras e fundamentadas (Martin & Hanington, 2012).

#### Fase *Develop*

A fase de desenvolvimento centrou-se na exploração visual de soluções, traduzindo as direções de design em propostas concretas.

- O método utilizado foi o *sketching*, que permitiu representar diferentes alternativas formais e funcionais, possibilitando a iteração e refinamento das ideias (Martin & Hanington, 2012).

#### Fase *Deliver*

A etapa conclusiva dedicou-se à validação da solução proposta, através de três vertentes:

- *Focus group* com potenciais utilizadores, realizado de forma presencial, permitiu avaliar a aceitação preliminar da solução e recolher perceções genuínas sobre o seu funcionamento, manutenção, integração arquitetónica, segurança e usabilidade. Este momento revelou dúvidas práticas e sugestões concretas, que orientaram ajustes no design e reforçaram a sua pertinência social (Martin & Hanington, 2012).
- Inquérito por questionário aplicado a especialistas numa fase final de validação, que recolheu feedback crítico quanto à adequação, aplicabilidade e pertinência do artefacto. Esta etapa permitiu identificar oportunidades de melhoria e realizar ajustes no design, assegurando maior robustez e alinhamento da proposta com as exigências do contexto real.
- Estimativas de conforto térmico, realizadas com o objetivo de avaliar o impacto potencial da solução. Estes cálculos forneceram evidências objetivas de viabilidade final.

A Figura 1 apresenta uma síntese visual do desenho metodológico adotado.

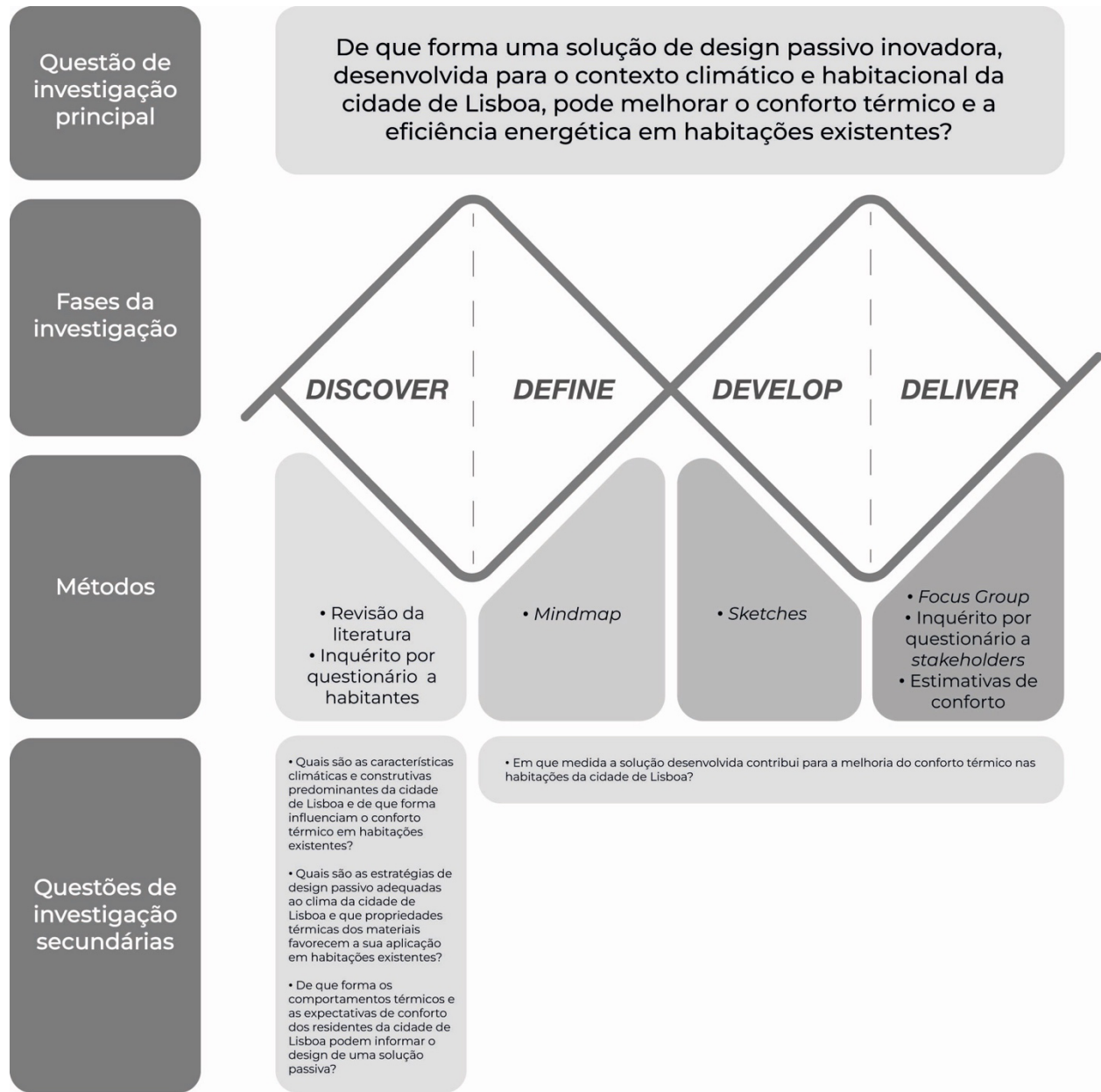


Figura 1: Desenho da investigação. Adaptado de: Design Council (2025).

Desta forma, o desenho metodológico garante uma abordagem coerente e fundamentada, articulando teoria, prática e validação empírica, com vista a responder de forma robusta à questão principal da investigação.

## II. Enquadramento teórico

### 2.1 Caracterização do edificado lisboeta

Ao longo da sua história, a cidade de Lisboa foi construindo um parque habitacional marcado pela diversidade construtiva, reflexo das várias fases de desenvolvimento urbano e da evolução das técnicas de construção. Essa diversidade, embora constitua uma riqueza patrimonial, traduz-se em fragilidades significativas ao nível do desempenho térmico. A principal razão encontra-se na ausência de regulamentação específica em matéria de eficiência energética até ao início da década de 1990, o que resultou na edificação de milhares de habitações sem isolamento adequado e com soluções construtivas que hoje se revelam insuficientes face às exigências atuais de conforto e eficiência. Compreender estas especificidades, reconhecendo as vulnerabilidades e identificando oportunidades de melhoria, é essencial para sustentar qualquer proposta de intervenção.

A análise da evolução construtiva confirma este cenário. Nos edifícios anteriores a 1919 predominava a alvenaria de pedra ou tijolo, frequentemente sem placa entre pisos e sem isolamento. O betão armado começou a ganhar expressão após 1945, representando 54% das construções entre 1971 e 1980 e mais de 60% após 1981 (INE, 2011, citado em Pedro, 2013). Contudo, esta transição estrutural não foi acompanhada pela introdução sistemática de camadas isolantes. O resultado foi um edificado em que a maioria das paredes exteriores apresentava valores de transmitância térmica ( $U$ ) muito elevados, ou seja, uma maior facilidade de trocas de calor com o exterior, originando perdas no inverno e ganhos excessivos no verão. Esses valores situam-se geralmente entre 0,9 e 1,7  $W/m^2 \cdot K$ , quando comparados com os cerca de 0,6  $W/m^2 \cdot K$  em paredes devidamente isoladas (Moita, 2010; Lamberts et al., 2014).

A ausência ou má execução do isolamento refletiu-se em diversas patologias, ainda hoje visíveis. Os dados da Lisboa E-Nova (2024) revelam que 46,4% dos ocupantes reportam fraco isolamento de janelas e portas, 42,3% registam humidade e 26,8% indicam fungos ou bolores. Estas situações estão intimamente ligadas às chamadas pontes térmicas, zonas da envolvente onde as trocas de

calor são mais intensas do que no restante edifício, devido à descontinuidade ou insuficiência do isolamento. Como explica Moita (2010), estas zonas criam superfícies frias no interior, propícias à condensação do vapor de água, que favorece a formação de bolores e degradação dos materiais. Acresce ainda que falhas nas selagens de coberturas e paredes exteriores facilitam infiltrações de água pluvial, agravando os problemas de humidade (Guimarães et al., 2015). Esta relação entre fragilidade construtiva e desconforto térmico é confirmada pelos inquéritos: habitações construídas antes de 1960 são as que mais frequentemente se associam a queixas de desconforto no inverno (Lisboa E-Nova, 2024).

Apesar de a ausência de isolamento nas paredes constituir um problema recorrente, Moita (2010) identifica as zonas envidraçadas como o ponto mais vulnerável da envolvente térmica. Segundo o autor, essa fragilidade resulta, por um lado, da elevada capacidade do vidro para transmitir calor entre o interior e o exterior, funcionando como uma ponte térmica direta e, por outro, da fraca estanquidade das caixilharias, frequentemente comprometida por fendas e frinchas mal vedadas, que facilitam a infiltração de ar.

Os dados empíricos reforçam esta conclusão. Mais de um terço das habitações inquiridas em Lisboa ainda apresenta janelas de vidro simples, tipologia que surge mais frequentemente associada a casas demasiado frias. Em contrapartida, apenas um quinto da amostra refere dispor de vidros duplos térmicos, mais comuns em habitações classificadas como termicamente confortáveis. Do ponto de vista do desempenho, a diferença é expressiva: janelas de vidro simples podem atingir valores de transmitância entre 5,0 e 6,5 W/m<sup>2</sup>·K, enquanto as de vidro duplo se situam entre 2,7 e 4,0 W/m<sup>2</sup>·K. A natureza das caixilharias contribui igualmente para este panorama: as metálicas sem corte térmico, predominantes em habitações frias, apresentam fracos desempenhos, ao contrário das caixilharias em PVC ( $\approx 2,7$  W/m<sup>2</sup>·K) e madeira ( $\approx 2,8$  W/m<sup>2</sup>·K), que oferecem melhor desempenho térmico (Lisboa E-Nova, 2024; Moita, 2010; Lamberts et al., 2014). Mesmo as janelas de melhor desempenho atualmente disponíveis, com vidro triplo e caixilharia isolante, raramente atingem valores inferiores a 0,8 W/m<sup>2</sup>·K (Grupo Sosoares, 2022). Estas soluções contrastam com os 0,9 a 1,7 W/m<sup>2</sup>·K típicos de uma parede não isolada (Moita, 2010; Lamberts et al., 2014), o que confirma a vulnerabilidade térmica dos vãos envidraçados face aos restantes elementos da envolvente opaca.

Em síntese, os estudos analisados apontam que o desempenho térmico deficiente das habitações lisboetas resulta de um conjunto de fatores estruturais e construtivos: a ausência histórica de

isolamento, a persistência de pontes térmicas e infiltrações em paredes e coberturas e, sobretudo, a elevada vulnerabilidade das zonas envidraçadas. Ainda que o reforço das paredes contribua para reduzir significativamente as perdas de calor, as janelas mantêm-se como o ponto mais vulnerável da envolvente, mesmo nas suas versões mais eficientes. Assim, qualquer proposta de intervenção passiva deve priorizar a mitigação destes pontos críticos, nomeadamente as janelas e paredes, de forma a colmatar as principais vulnerabilidades e garantir conforto térmico.

## 2.2 Clima de Lisboa

Dando continuidade à análise do edificado lisboeta, importa agora compreender o enquadramento climático em que este se insere. Neste contexto, o presente capítulo caracteriza os principais elementos climáticos da cidade de Lisboa, identificando os fatores que condicionam o conforto térmico nas habitações e as oportunidades para a sua melhoria.

Lisboa insere-se na classificação climática Csa de Köppen-Geiger, correspondente a um clima temperado com verão seco e quente. Apresenta uma temperatura média anual de 17,3 °C, com verões quentes, em que as temperaturas máximas médias rondam os 27 a 28 °C e picos superiores a 40 °C em episódios de ondas de calor. No inverno, o clima é moderado, com temperaturas máximas médias entre os 15 e 16 °C e mínimas entre os 8 e 10 °C (IPMA, 2020).

A cidade regista mais de 2 800 horas de sol por ano (Instituto de Meteorologia, s.d.), situando-se entre as capitais europeias com maior insolação anual (Copernicus Climate Change Service, 2020). Para o edificado lisboeta, esta exposição solar representa, por um lado, uma oportunidade para o aquecimento de interiores durante os meses frios, sobretudo em edifícios com fachadas orientadas a sul. Esta orientação é particularmente vantajosa no inverno, pois acompanha a trajetória mais baixa do sol, permitindo que a radiação solar incida de forma mais direta e prolongada sobre as superfícies envidraçadas. Como resultado, a energia solar penetra profundamente no interior das habitações, contribuindo para o aumento da temperatura ambiente e para a redução da necessidade de aquecimento artificial. Por outro lado, nos meses de verão, embora o sol atinja ângulos mais elevados, o que limita naturalmente a entrada direta da radiação nos espaços interiores, a intensidade e a duração da exposição solar podem, ainda assim, contribuir significativamente para o risco de sobreaquecimento (Walsh et al., 2006).

A precipitação média anual ronda os 722,5 mm, distribuindo-se de forma irregular ao longo do ano, com maior incidência no outono e no inverno. Durante o verão, em especial nos meses de julho e agosto, os valores são residuais (IPMA, 2020). Esta irregularidade hídrica condiciona o comportamento higrotérmico das construções, favorecendo o aparecimento de patologias de humidade em coberturas e fachadas no período chuvoso, e dificultando a secagem em períodos prolongados de estiagem (Ordem dos Arquitectos - Secção Regional Sul [OASRS], 2016).

Adicionalmente, Reis et al. (2020) indicam que a humidade específica do ar em Lisboa é geralmente baixa ( $< 0,01$  kg/kg), exceto durante o verão e nas noites húmidas de outono, onde os valores podem atingir os 0,012–0,013kg/kg, ultrapassando os limites recomendados para o conforto higrotérmico interior, 0,012 kg/kg (EN 16798-2 TR:2014). Nestes períodos, a eficácia da evaporação do suor é reduzida, dificultando a dissipação de calor pelo corpo humano e potenciando o risco de desconforto térmico e sobreaquecimento nos espaços interiores (Lamberts et al., 2014). O regime de ventos em Lisboa é marcado por predominância de fluxos do norte e noroeste (N e NW) ao longo de todo o ano, com velocidades médias entre 4 e 6 m/s. No verão, destaca-se a chamada nortada, que atua com intensidade moderada durante o dia e enfraquece à noite. No inverno, predominam ventos de oeste e sudoeste, associados a frentes atlânticas e precipitação intensa (Reis et al., 2020). Estes padrões de circulação atmosférica têm implicações relevantes para o edificado urbano. Por um lado, o vento pode contribuir positivamente para a remoção de calor acumulado nas superfícies exteriores, promovendo um arrefecimento natural das fachadas expostas durante os períodos mais quentes. Esta ação é particularmente significativa nos dias de verão com ventos moderados do quadrante norte, que ajudam a limitar o sobreaquecimento superficial. Por outro lado, no inverno, em edifícios com degradação construtiva ou fraca estanquidade, o vento pode também gerar pressões diferenciadas nas envolventes, potenciando infiltrações de ar indesejadas, perdas térmicas e desconforto interior durante o inverno (Moita, 2010).

O fenómeno da ilha de calor urbano é particularmente relevante em Lisboa, onde a diferença de temperatura entre zonas centrais densas e a periferia pode ultrapassar os 4 °C, sobretudo nas noites de verão. Este fenómeno, agravado por céu limpo, ventos fracos (2–4 m/s) e grande impermeabilização dos solos, compromete o arrefecimento noturno e acentua a carga térmica acumulada nos edifícios. Esta condição representa um desafio acrescido para o conforto interior e

o desempenho energético das habitações, sobretudo em bairros com pouca vegetação e elevada densidade construtiva (Reis et al., 2020).

Para além deste efeito, importa considerar também a influência de microclimas locais, resultantes da topografia, proximidade ao rio Tejo ou densidade urbana. Estas variações podem traduzir-se em diferenças significativas de temperatura e ventilação entre bairros próximos, condicionando o conforto térmico de forma desigual dentro da própria cidade (Bainbridge & Haggard, 2011).

Deste modo, o clima de Lisboa apresenta desafios e oportunidades cruciais. A elevada exposição solar, conjugada com temperaturas elevadas no verão e o fenómeno da ilha de calor urbano, coloca em evidência o risco de sobreaquecimento. Em contrapartida, a forte incidência solar durante o inverno, aliada a temperaturas mais amenas, constitui um fator favorável à obtenção de ganhos térmicos. A direção e intensidade dos ventos, de norte no verão e de sudoeste no inverno, influenciam o desempenho térmico do edificado, promovendo arrefecimento nas estações quentes e favorecendo perdas por infiltração nas frias. A humidade específica e a distribuição irregular da precipitação levantam ainda questões associadas à durabilidade dos materiais e à salubridade dos espaços interiores. Neste contexto, todos estes elementos deverão assim, ser cuidadosamente considerados na definição dos requisitos funcionais do artefacto.

### 2.3 Conforto Térmico

Após a caracterização do clima da cidade de Lisboa e das particularidades do seu parque edificado, importa agora abordar o conforto térmico enquanto fator central na análise do desempenho ambiental das habitações. Compreender o que se entende por conforto térmico, os modelos que o descrevem e as normas que o regulam é fundamental para orientar futuras decisões projetuais e, posteriormente, avaliar de forma rigorosa a eficácia da intervenção.

O conforto térmico descreve o estado de satisfação dos ocupantes relativamente ao ambiente térmico que os rodeia, sendo alcançado quando o corpo humano consegue manter o seu equilíbrio térmico, isto é, quando a produção interna de calor é compensada pela sua dissipação para o meio envolvente (Fanger, 1970; ASHRAE, 2010).

Este conceito é particularmente relevante na arquitetura e engenharia de edifícios, pois influencia diretamente o bem-estar, a saúde e a produtividade dos seus ocupantes. Depende de variáveis físicas, como a temperatura do ar, a humidade relativa, a velocidade do ar e a radiação térmica,

mas também de fatores subjetivos, como o nível de atividade metabólica, o vestuário, a adaptação individual e as preferências pessoais (Lamberts et al.,2014).

Graças à sua importância, a definição e quantificação do conforto térmico continuam a ser objeto de debate na comunidade científica e nos organismos de normalização. A norma ASHRAE 55 (2010) define conforto térmico como “a condição de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico”, salientando o seu carácter subjetivo. Esta subjetividade motivou o desenvolvimento de diferentes modelos teóricos, que procuram quantificar e prever a sensação térmica dos ocupantes em ambientes construídos.

Atualmente, destacam-se dois modelos principais: o modelo estático, proposto por Fanger (1970), e o modelo adaptativo, desenvolvido por Dear e Brager (1998). Ambos foram amplamente validados em estudos empíricos (de Dear & Brager, 2002; Nicol & Humphreys, 2010) e constituem a base das principais normas internacionais de conforto térmico, como a ISO 7730 (2010), a ASHRAE 55 (2010) e a EN 16798-1:2014.

Deste modo, a compreensão do conforto térmico, enquanto conceito multidimensional e regulado por normas internacionais, revela-se essencial para fundamentar intervenções projetuais mais eficientes e adequadas ao contexto climático de Lisboa. A articulação entre variáveis físicas, fatores subjetivos e modelos de avaliação permite, assim, estabelecer critérios de desempenho rigorosos, garantindo que a solução de design passivo proposta responda às reais necessidades dos utilizadores e contribua efetivamente para a melhoria do ambiente interior nas habitações existentes.

### 2.3.1 Modelos de Conforto Térmico

#### 2.3.1.1 Modelo estático (Fanger, 1970)

Desenvolvido por Povl Ole Fanger em 1970, o modelo estático constituiu uma das primeiras tentativas de quantificar o conforto térmico de forma objetiva. Parte do princípio de que é possível prever a sensação térmica dos ocupantes através do equilíbrio entre o calor produzido pelo corpo humano e o dissipado para o ambiente envolvente (Fanger, 1970).

Com base neste princípio, Fanger desenvolveu o modelo PMV-PPD (*Predicted Mean Vote – Predicted Percentage of Dissatisfied*), que se tornou uma das ferramentas mais utilizadas para

avaliar o conforto térmico em edifícios com climatização mecânica. O índice PMV estima a sensação térmica média de um grupo de ocupantes numa escala de -3 (muito frio) a +3 (muito quente), com 0 a representar a neutralidade térmica. Por sua vez, o PPD quantifica a percentagem de indivíduos insatisfeitos com as condições térmicas, mesmo quando o PMV se aproxima da neutralidade (ASHRAE, 2010).

O modelo PMV-PPD, embora amplamente reconhecido e adotado por normas internacionais como a ISO 7730, a ASHRAE 55 e a EN 16798-1 (especialmente em edifícios climatizados), tem sido alvo de críticas pela sua limitada aplicabilidade em contextos naturalmente climatizados. Uma das principais limitações deste modelo reside no pressuposto de que os ocupantes são passivos, ou seja, não intervêm no ambiente para melhorar o seu conforto térmico. Contudo, múltiplos estudos (Givoni, 1992; de Dear & Brager, 2002; Nicol & Humphreys, 2002, 2010) vieram demonstrar que, em edifícios com climatização natural, os utilizadores recorrem frequentemente a estratégias comportamentais como a abertura de janelas, o ajuste de sombreamentos ou a própria modificação do vestuário, como forma de responder às variações do ambiente térmico.

Adicionalmente, este modelo foi desenvolvido com base em experiências realizadas em câmaras climáticas controladas, com participantes sujeitos a condições padronizadas, o que limita a sua representatividade para contextos reais. Assim sendo, a sua aplicação revelou-se mais eficaz em edifícios com climatização mecânica constante, onde as variáveis ambientais são controladas de forma estável (Nicol & Humphreys, 2002, 2010).

Em síntese, o modelo PMV-PPD continua a ser uma referência importante para a avaliação do conforto térmico em edifícios climatizados. No entanto, a sua limitação em contextos onde os ocupantes desempenham um papel ativo na regulação térmica motivou o desenvolvimento de abordagens mais flexíveis, como o modelo adaptativo, que será aprofundado na secção seguinte.

#### 2.3.1.2 Modelo Adaptativo (Dear & Brager, 1998)

O modelo adaptativo surgiu como uma alternativa ao PMV-PPD ao reconhecer que o conforto térmico não é um estado fixo, mas um processo dinâmico, moldado pela interação contínua entre os ocupantes e o ambiente. Ao contrário do modelo estático, que se baseia em condições laboratoriais e assume que os indivíduos são passivos e reagem de forma uniforme a estímulos térmicos, o modelo adaptativo defende que os ocupantes ajustam ativamente fatores como o

vestuário, a ventilação natural, o sombreamento e a sua posição no espaço, de forma a regular a sua perceção térmica (Nicol & Humphreys, 2010). Assim, considera que a sensação de conforto térmico resulta não só das condições objetivas, mas também da capacidade de os utilizadores ajustarem o ambiente às suas necessidades.

Esta abordagem introduz uma dimensão de flexibilidade ao conceito de conforto térmico, ao reconhecer que não existe uma temperatura ideal universal, mas sim um intervalo aceitável que depende de fatores como a adaptação fisiológica e comportamental dos ocupantes, a sua experiência térmica prévia e as condições climáticas exteriores. De acordo com Nicol e Humphreys (2002), estudos anteriores como os de Baker e Standeven (1995) e Leaman e Bordass (1997) corroboram esta perspetiva, ao argumentarem que a perceção de conforto térmico está estreitamente relacionada com o grau de controlo que os utilizadores detêm sobre o ambiente. Em contextos onde existe essa autonomia, nomeadamente através da abertura de janelas, ventilação natural ou dispositivos de sombreamento, observa-se uma maior tolerância às variações térmicas. Por contraste, em edifícios totalmente dependentes de climatização mecânica, os níveis de satisfação tendem a ser inferiores, mesmo quando as condições térmicas se mantêm dentro dos parâmetros estabelecidos por modelos estáticos.

A validação empírica do modelo adaptativo baseia-se na análise de dados recolhidos em edifícios reais, tendo sido amplamente estudado por Dear e Brager (2002) e Nicol e Humphreys (2010). Estes autores demonstraram que o conforto térmico não depende de um valor fixo, mas adapta-se às condições exteriores e ao historial térmico recente. Para além disso, foi observado que indivíduos habituados a climas quentes tendem a aceitar temperaturas interiores mais elevadas, enquanto os que vivem em climas frios preferem ambientes ligeiramente mais frescos. Esta capacidade de adaptação, tanto comportamental como fisiológica, reforça a pertinência do modelo adaptativo para edifícios naturalmente climatizados, onde os utilizadores regulam ativamente o ambiente térmico em resposta às variações sazonais e diárias.

No contexto português, Matias e Santos (2013) um estudo com medições em habitações portuguesas para avaliar o conforto térmico no setor residencial, incluindo na cidade de Lisboa. Os resultados demonstraram que os ocupantes se sentiam confortáveis em temperaturas operativas inferiores às preconizadas pela regulamentação vigente à época, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)(2006), que estabelecia como referência 20 °C para o inverno e 25 °C para o verão. Verificou-se que muitas habitações registavam temperaturas

abaixo de 20 °C no inverno e acima de 25 °C no verão, sem que os ocupantes relatassem necessariamente desconforto térmico. Em particular, constatou-se que no inverno os inquiridos referiam conforto em temperaturas entre 14 °C e 19 °C, e no verão entre 24 °C e 26 °C. Estes valores sugerem que à data os limites regulamentares fixos não refletiam plenamente a percepção térmica real dos utilizadores, especialmente em habitações naturalmente climatizadas.

Com a transição do RCCTE para o atual Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), os valores de referência foram ajustados para 18 °C no inverno e 25 °C no verão, com uma faixa mais ampla entre 19 °C e 27 °C para edifícios híbridos ou passivos (SCE, 2021). Apesar dessa atualização, o enquadramento regulamentar português continua a assentar em temperaturas nominais fixas, definidas para efeitos de cálculo energético e não necessariamente representativas da experiência térmica real dos ocupantes. O estudo do LNEC reforça, assim, a pertinência do modelo adaptativo, ao demonstrar que, em muitos casos, os utilizadores recorrem prioritariamente a estratégias passivas, como o ajuste de vestuário, a ventilação natural ou a gestão dos ganhos solares, em vez de dependerem exclusivamente de sistemas de climatização mecânica (utilizados apenas por cerca de 20% dos inquiridos). Além disso, observou-se que muitos dos ocupantes dispunham de sistemas de climatização que, ainda assim, não eram utilizados de forma regular, o que reforça a ideia de que a percepção de conforto térmico é dinâmica e condicionada por múltiplos fatores para além da temperatura do ar.

Conclui-se que, o modelo adaptativo oferece uma abordagem mais realista para a avaliação do conforto térmico, especialmente em contextos residenciais onde predominam estratégias passivas. A sua capacidade de integrar fatores comportamentais e climáticos torna-o particularmente relevante para habitações em que os ocupantes exercem um papel ativo na regulação do ambiente térmico. Neste sentido, o modelo adaptativo é considerado nesta investigação como a base conceptual mais adequada para sustentar a análise futura.

### 2.3.2 Normas de conforto térmico

Os modelos de conforto térmico apresentados anteriormente sustentam diferentes normas internacionais, cada uma com metodologias específicas de avaliação e critérios distintos de aplicação. Estas normas não apenas orientam o projeto de edifícios, como também influenciam

diretamente a forma como o conforto térmico é definido, quantificado e regulado no setor da construção.

A norma ISO 7730, baseada exclusivamente no modelo PMV-PPD, é amplamente aplicada em edifícios com climatização mecânica. No entanto, a sua aplicabilidade a edifícios naturalmente climatizados é limitada, uma vez que assume que os ocupantes mantêm um comportamento passivo perante o ambiente (Nicol & Humphreys, 2010), como visto.

Já a ASHRAE 55 (2010), embora também se baseie inicialmente no modelo PMV-PPD, incorporou posteriormente o modelo adaptativo, especificamente para edifícios sem climatização mecânica. A norma define limites de conforto térmico com base na temperatura média exterior ponderada dos últimos sete dias. Contudo, a sua fundamentação depende principalmente da *ASHRAE Global Thermal Comfort Database*, o que restringe a sua representatividade a contextos climáticos e socioculturais norte-americanos (Nicol & Humphreys, 2002).

Em contrapartida, a EN 16798-1:2014, desenvolvida no âmbito do projeto europeu SCATs, apresenta uma abordagem mais alinhada com a realidade dos edifícios europeus. Tal como a ASHRAE 55 (2010), contempla ambos os modelos de conforto térmico: aplica o modelo PMV-PPD a edifícios climatizados artificialmente e o modelo adaptativo a edifícios naturalmente climatizados. Também recorre à temperatura exterior média exponencialmente ponderada dos últimos sete dias para definir os limites de conforto adaptativo (ASHRAE 55, 2010).

Uma outra diferença significativa entre as duas normas reside na sua aplicabilidade. A ASHRAE 55 (2010) limita o uso do modelo adaptativo apenas a edifícios naturalmente ventilados. Em contraste, a EN 16798-1:2014 pode ser aplicada a qualquer edifício que opere em modo *free-running*, ou seja, sem climatização ativa no momento da avaliação. Isso significa que edifícios com ventilação híbrida ou sistemas mecânicos temporariamente desligados podem ser avaliados pela EN 16798-1:2014, mas seriam excluídos da ASHRAE 55 (2010) (Nicol & Humphreys, 2002). Esta maior flexibilidade torna a EN 16798-1:2014 particularmente relevante para o contexto da cidade de Lisboa. Retomando o estudo de Matias e Santos (2013) anteriormente abordado, 60% das habitações analisadas em Lisboa dispunham de sistemas de arrefecimento, mas somente cerca de 20% estavam efetivamente em funcionamento durante as medições. No inverno, embora 44% das habitações estivessem equipadas com sistemas de aquecimento, a sua utilização também não foi observada. Estes dados indicam que, apesar da presença de sistemas de climatização, o seu uso é pontual, reforçando a adequação da aplicação da norma EN 16798-1:2014 a edifícios em modo

*free-running* e a pertinência desta abordagem na avaliação do conforto térmico em habitações lisboetas.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as três normas, destacando os seus principais critérios de aplicação.

Tabela 1: Esquema comparativo das normas de conforto térmico analisadas. Fonte: a autora.

Critério	ISO 7730	ASHRAE 55 (2010)	EN 16798-1:2014
Modelo de conforto térmico	PMV-PPD (modelo estático)	PMV-PPD (modelo estático) para edifícios climatizados + Modelo adaptativo para edifícios naturalmente ventilados	PMV-PPD (modelo estático) para edifícios climatizados + Modelo adaptativo para edifícios naturalmente ventilados
Aplicação principal	Edifícios climatizados	Edifícios climatizados e naturalmente ventilados	Edifícios climatizados e naturalmente ventilados (incluindo em modo <i>free-running</i> )
Base de dados	Estudos laboratoriais (modelo estático)	Estudos laboratoriais (modelo estático) + <i>ASHRAE Global Thermal Comfort Database</i> nos EUA (modelo adaptativo)	Estudos laboratoriais (modelo estático) + Projeto europeu SCATs e estudos de campo na Europa (modelo adaptativo)
Parâmetro climático de referência	Condições térmicas internas (modelo estático)	Condições térmicas internas (modelo estático) + Temperatura média exterior ponderada dos últimos 7 dias (modelo adaptativo)	Condições térmicas internas (modelo estático) + Temperatura média exterior exponencialmente ponderada dos últimos 7 dias (modelo adaptativo)

Adaptação a variações térmicas diárias	Não considerada	Considerada (modelo adaptativo)	Considerada (modelo adaptativo)
Critério de avaliação do conforto térmico	PMV-PPD (modelo estático)	PMV-PPD (modelo estático) para edifícios climatizados + Aceitação de 80% ou 90% dos ocupantes (modelo adaptativo) para edifícios naturalmente ventilados	PMV-PPD (modelo estático) para edifícios climatizados + Categorias 1, 2 e 3 (modelo adaptativo) para edifícios naturalmente ventilados
Adequação ao contexto europeu	Limitada	Moderada	Elevada

Tendo em conta todas estas considerações, a EN 16798-1:2014 será adotada como referência normativa nesta investigação. A sua compatibilidade com edifícios naturalmente controlados, bem como a sua adequação ao contexto climático e cultural europeu, fazem dela a norma mais apropriada para avaliar o conforto térmico no âmbito deste estudo.

### 2.3.2.1 A norma En 16798-1:2014

Dando seguimento à seleção da EN 16798-1:2014 como norma de referência, esta secção apresenta as condições de aplicação do modelo adaptativo, os níveis de exigência térmica e os critérios de cálculo definidos pela norma.

Segundo o documento técnico de apoio EN 16798-2 TR:2014 (CEN, 2014, Draft 8) a aplicação do modelo adaptativo está condicionada a um conjunto de requisitos técnicos e comportamentais:

- Modo de funcionamento: o edifício deve operar sem arrefecimento ou aquecimento mecânico ativo, em modo *free-running*;

- Ventilação natural: os ocupantes devem ter acesso direto a janelas operáveis ou elementos de fachada equivalentes, que lhes permitam regular o ambiente térmico interior;
- Temperatura exterior: a temperatura exterior média exponencialmente ponderada dos sete dias anteriores deve situar-se entre os 10 °C e os 30 °C;
- Atividade metabólica: a norma assume níveis de metabolismo entre 1,0 e 1,3 met, correspondentes a atividades sedentárias ou de baixa intensidade;
- Isolamento do vestuário: deve existir liberdade para ajustar o vestuário, dentro de um intervalo de 0,5 a 1,0 clo;
- Velocidade do ar: a velocidade média do ar no espaço não deve exceder 0,6 m/s. No entanto, a norma admite exceções no caso de existirem sistemas de controlo pessoal, como ventoinhas individuais utilizadas diretamente pelos ocupantes. Nestes contextos, é possível aplicar correções ao limite superior da temperatura operativa, uma vez que o aumento da velocidade do ar potencia a dissipação de calor pela pele. De acordo com a Tabela B.1.3 do documento técnico da norma, podem ser considerados acréscimos máximos de 1,2 °C, 1,8 °C e 2,2 °C, respetivamente para velocidades de 0,6 m/s, 0,9 m/s e 1,2 m/s, desde que os dispositivos sejam utilizados com autonomia individual e sem controlo centralizado.

Após definidos os critérios técnicos para a aplicação do modelo adaptativo, a norma organiza os níveis de conforto térmico em diferentes categorias de exigência. A Tabela 2 apresenta esta classificação, distinguindo os contextos de utilização e o grau de exigência associado a cada intervalo de conforto.

*Tabela 2: Descrição da aplicabilidade das categorias da norma En 16798-1:2014. Adaptado de: CEN (2014, Draft 8).*

Categoria	Explicação
I	Alto nível de exigência, utilizado apenas para espaços ocupados por pessoas mais sensíveis e frágeis
II	Nível de exigência normal para novos edifícios e renovações
III	Nível de exigência moderado (utilizado para edifícios existentes)

IV	Valores fora dos critérios das categorias acima (aceitável por períodos limitados)
----	--

A Figura 2 traduz graficamente os intervalos de conforto definidos pela norma, associando as categorias I, II e III aos respectivos limites térmicos, em função da temperatura exterior média exponencialmente ponderada.

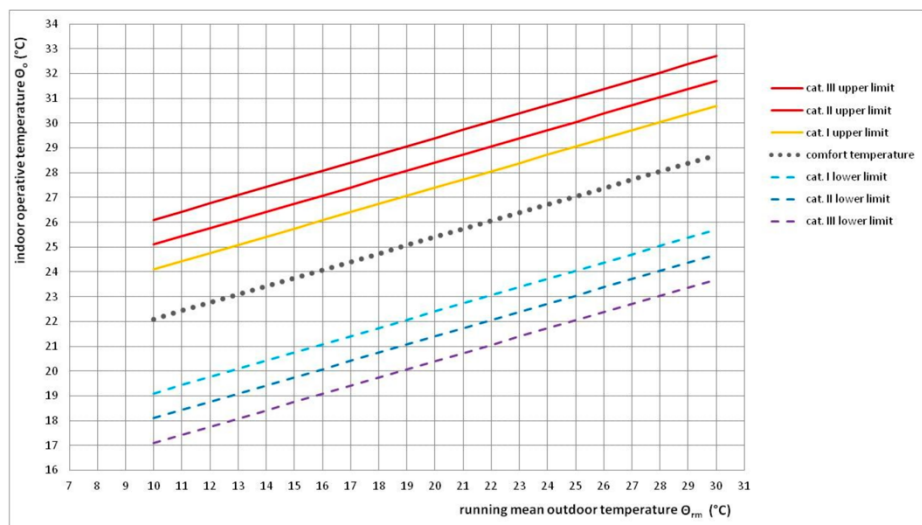


Figura 2: Intervalos de temperatura operativa por categoria, para edifícios naturalmente ventilados, em função da temperatura exterior média exponencialmente ponderada, segundo a EN 16798-1. Adaptado de: CEN (2014, Draft 8).

Os limites da temperatura operativa para cada categoria da norma são determinados com base na temperatura exterior média exponencialmente ponderada ( $\Theta_o$ ), definida pela seguinte equação (CEN, 2014, Draft 8):

$$\Theta_o = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

Onde:

- $\Theta_o$  = Temperatura operativa de conforto ( $^\circ\text{C}$ )
- $\Theta_{rm}$  = Temperatura exterior média exponencialmente ponderada ( $^\circ\text{C}$ )

A temperatura exterior média exponencialmente ponderada ( $\Theta_{rm}$ ) é determinada com base nas temperaturas médias diárias da semana anterior, sendo calculada através da equação 2 (CEN, 2014, Draft 8):

$$\Theta_{rm} = (\Theta_{ed-1} + 0,8\Theta_{ed-2} + 0,6\Theta_{ed-3} + 0,5\Theta_{ed-4} + 0,4\Theta_{ed-5} + 0,3\Theta_{ed-6} + 0,2\Theta_{ed-7}) / 3,8 \quad (2)$$

Onde:

- $\Theta_{rm}$  = Temperatura exterior média exponencialmente ponderada (°C)
- $\Theta_{ed-i}$  = Temperatura média exterior "i" dias antes (°C)

Com base na temperatura operativa de conforto ( $\Theta_o$ ), a norma estabelece intervalos de aceitação térmica específicos para cada categoria. Estes intervalos são definidos aplicando desvios fixos, superiores e inferiores, ao valor de  $\Theta_o$ , conforme o nível de exigência. A Tabela 3 apresenta esses limites, detalhando a fórmula aplicável para calcular os extremos aceitáveis em cada caso.

*Tabela 3: Limites superiores e inferiores da temperatura operativa por categoria, com base na equação da EN 16798-1, para edifícios naturalmente ventilados. Adaptado de: CEN (2014, Draft 8).*

Categoria I	Limite superior	$\Theta_o = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 + 2$
	Limite inferior	$\Theta_o = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 - 3$
Categoria II	Limite superior	$\Theta_o = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 + 3$
	Limite inferior	$\Theta_o = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 - 4$
Categoria III	Limite superior	$\Theta_o = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 + 4$
	Limite inferior	$\Theta_o = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 - 5$

Deste modo, e considerando que o presente estudo incide sobre habitações existentes, será adotada a Categoria III da norma EN 16798-1:2014 como critério de exigência, servindo o respetivo intervalo de aceitação térmica como base para a avaliação da eficácia do artefacto proposto na promoção do conforto térmico.

Na secção seguinte, será aprofundado o conceito de design passivo, com enfoque nos seus princípios fundamentais e no seu potencial de aplicação no contexto habitacional da cidade de Lisboa.

## 2.4 Design Passivo

O design passivo consiste numa abordagem projetual que utiliza os recursos naturais disponíveis, como o sol, o vento ou a vegetação, para aquecer, arrefecer e ventilar os espaços interiores, sem recurso a energia mecânica adicional (Altan et al., 2016; Brainbridge & Haggard, 2011). Assente numa resposta sensível ao clima local, procura tirar partido dos fluxos de energia térmica, orientando-os para a absorção, retenção ou dissipação do calor consoante as exigências sazonais (Noguchi, 2016).

Mais do que um conjunto de técnicas isoladas, o design passivo representa uma forma integrada de conceber o espaço habitado, na qual as decisões arquitetónicas são profundamente informadas pelas condições ambientais e pelo comportamento esperado dos materiais ao longo do tempo (Émi & Acciona, 2015). Esta lógica exige uma articulação eficaz entre o meio ambiente, as características construtivas e o uso quotidiano do espaço, permitindo criar edifícios mais eficientes, confortáveis e sustentáveis.

Com base nestes princípios, a presente secção analisa os mecanismos físicos fundamentais que suportam o design passivo, como as trocas térmicas, as propriedades térmicas dos materiais e as principais estratégias arquitetónicas aplicáveis ao contexto urbano de Lisboa.

### 2.4.1 Conceitos fundamentais

A aplicação eficaz de estratégias passivas de climatização exige a compreensão dos princípios físicos que regulam o comportamento térmico dos edifícios. Esta secção explora os mecanismos fundamentais de transferência de calor, condução, convecção e radiação, bem como a influência das propriedades térmicas dos materiais. Estes conceitos são cruciais para compreender como a energia térmica circula, se acumula e se dissipa no ambiente construído, formando a base científica das soluções passivas.

#### 2.4.1.1 Trocas térmicas

Sempre que existe uma diferença de temperatura entre dois corpos ou regiões, ocorre uma transferência espontânea de energia térmica do meio mais quente para o mais frio, até que ambos atinjam o equilíbrio térmico, ou seja, a mesma temperatura (Incropera et al., 2017). Este fenómeno, universal e inevitável, está na base de todo o comportamento térmico observado nos edifícios,

influenciando diretamente a distribuição de calor entre os diferentes elementos que compõem o espaço construído.

A transferência de calor nos edifícios ocorre por condução, convecção e radiação, três mecanismos que atuam em simultâneo e de forma interdependente, formando um sistema contínuo de trocas térmicas. Durante o dia, a radiação solar entra no edifício através dos vãos envidraçados e é absorvida pelas superfícies internas, como paredes, pavimentos e objetos, que aquecem e acumulam energia térmica. Parte dessa energia é reemitida sob a forma de radiação térmica de onda longa, que tende a permanecer no interior do edifício. Em simultâneo, o calor armazenado transfere-se por condução para os materiais em contacto direto e aquece o ar envolvente. Ao aquecer, esse ar torna-se menos denso e sobe, sendo substituído por massas de ar mais frio, dando origem a movimentos de convecção natural. Este ciclo de absorção, acumulação e redistribuição de calor molda o ambiente térmico interior ao longo do dia, com impacto direto no conforto dos ocupantes (Bainbridge & Haggard, 2011).

Compreender os mecanismos de transferência de calor permite interpretar de que forma o calor circula no interior dos edifícios, influenciando o seu comportamento térmico. Após esta introdução aos processos combinados de transferência térmica, as secções seguintes debruçam-se individualmente sobre cada um dos mecanismos, aprofundando os seus princípios e implicações no contexto da construção.

#### 2.4.1.1.1 Condução

A condução ocorre quando duas zonas com temperaturas diferentes entram em contacto direto, originando uma transferência de energia térmica da área mais quente para a mais fria, sem que haja deslocamento da matéria (Moita, 2010).

A nível microscópico, este fenómeno resulta da vibração das partículas (átomos ou moléculas) com maior energia térmica que, ao colidirem sucessivamente com partículas vizinhas menos energéticas, transmitem parte dessa energia. Esta transferência de calor é particularmente eficaz em materiais sólidos, onde a elevada proximidade entre partículas favorece o choque entre elas, facilitando a propagação contínua da energia térmica ao longo da estrutura (Incropera, 2008).

No contexto da construção, a condução manifesta-se, por exemplo, de forma crucial na transferência contínua de calor através da espessura dos elementos construtivos que separam o

interior do exterior, como paredes, coberturas ou pavimentos. Nesses componentes, o calor move-se diretamente de um lado para o outro, impulsionado pela diferença de temperatura entre as suas superfícies. Este processo influencia diretamente o balanço energético do edifício, pois pode resultar em perdas de calor indesejadas do ambiente interior para o exterior em climas frios, ou em ganhos de calor excessivos do exterior para o interior em climas quentes (Lechner, 2015).

Assim, compreender este mecanismo permite antecipar de que forma o calor se transmite entre elementos em contacto direto e fundamentar decisões informadas sobre o uso de materiais, seja para limitar perdas térmicas, seja para favorecer a transferência de calor entre espaços.

#### 2.4.1.1.2 Convecção

Nos ambientes construídos, o ar em movimento desempenha um papel determinante na redistribuição do calor. Esse transporte de energia ocorre por convecção térmica, que se manifesta sempre que um fluido, como o ar ou a água, entra em contacto com uma superfície sólida a uma temperatura distinta, sendo o calor transferido pelo próprio movimento do fluido (Moita, 2010).

Quando o ar entra em contacto com uma superfície mais quente, aquece, expande-se e torna-se menos denso. Por ser mais leve, sobe, enquanto o ar mais frio e denso desce para o substituir, criando uma circulação contínua conhecida como corrente convectiva (Incropera et al., 2008). Distinguem-se dois tipos principais de convecção: a natural, resultante da variação de densidade do fluido provocada por diferenças de temperatura e a forçada, induzida por mecanismos como ventiladores, vento ou exaustores, que aumentam a taxa de transferência de calor (Émi & Acciona, 2015).

A convecção desempenha um papel fundamental na forma como o calor se move e se redistribui no interior dos edifícios, manifestando-se em duas vertentes cruciais. Por um lado, atua diretamente sobre o ar interior, contribuindo para dissipar o calor acumulado em períodos mais quentes e, em períodos frios, facilitando a circulação do ar aquecido, o que promove a uniformização da temperatura ambiente (Gonçalves & Graça, 2004). Por outro lado, a convecção é o mecanismo primário pelo qual o calor é transferido das superfícies expostas para o ar (e vice-versa). Este processo permite que as próprias superfícies percam ou ganhem calor em interação com o fluido adjacente, regulando as suas temperaturas (Lechner, 2015). Ainda assim, existem dois regimes principais de escoamento que determinam a eficiência desta troca: o escoamento

laminar e o escoamento turbulento. O escoamento laminar caracteriza-se por um movimento suave e ordenado do fluido em camadas paralelas, com mínima mistura entre elas. Em contraste, o escoamento turbulento é desordenado e caótico, apresentando uma mistura intensa de partículas de fluido. Esta distinção é crucial, pois a transferência de calor por convecção é significativamente mais eficiente em condições de fluxo turbulento, devido à forma como a agitação do fluido acelera o transporte de energia térmica para e da superfície de contacto. Neste sentido, superfícies de materiais lisas e uniformes tendem a favorecer o desenvolvimento de um escoamento laminar do fluido adjacente em baixas velocidades, enquanto a presença de rugosidade superficial ou geometrias complexas pode promover a transição para o escoamento turbulento no fluido, intensificando a convecção e, conseqüentemente, a troca de calor (Incropera et al., 2008).

Desta forma, reconhecer a dinâmica da convecção é essencial para compreender como o calor circula nos espaços e como essas trocas podem ser estrategicamente pensadas no design térmico. A nível ambiental, reconhecer que o ar em movimento redistribui o calor entre superfícies e volumes permite prever zonas de maior ou menor acumulação térmica e ajustar o posicionamento do artefacto em função disso. A nível do próprio objeto, se o objetivo for acelerar a troca de calor com o ar circundante, seja para aquecer ou arrefecer o espaço, poderá ser vantajoso recorrer a superfícies rugosas ou geometrias mais complexas, que promovam o escoamento turbulento e aumentem a eficiência da convecção. Por outro lado, superfícies mais lisas e formas simples, poderão ser úteis quando se pretender moderar ou atrasar essas trocas térmicas.

#### 2.4.1.1.3 Radiação

A radiação é uma forma de transferência de calor que ocorre através de ondas eletromagnéticas, sem necessidade de contacto direto entre corpos ou de um meio material para se propagar (Lechner, 2015).

No contexto do design passivo, a radiação térmica assume um papel central, uma vez que a radiação solar, composta essencialmente por ondas curtas, atravessa os elementos transparentes do edifício, e aquece diretamente os elementos construtivos. Estes, por sua vez, reemitem calor sob a forma de radiação de onda longa, que tende a ficar retida no interior do espaço construído devido à opacidade dos vidros a esse comprimento de onda, potenciando o chamado efeito *greenhouse effect* (Bainbridge & Haggard, 2011).

Neste processo de reemissão de radiação, quanto mais elevada for a temperatura de uma superfície, maior será a quantidade de radiação que esta emite, o que é fundamental para compreender o comportamento térmico de elementos expostos ao sol, como paredes ou pavimentos, que continuam a libertar calor após o pôr-do-sol, prolongando o efeito de aquecimento no espaço interior (Chiras, 2002). Esse calor radiado pode contribuir significativamente para o conforto dos ocupantes, mesmo quando a temperatura do ar ambiente se encontra abaixo dos níveis convencionais de conforto, uma vez que o corpo humano recebe diretamente a radiação emitida pelas superfícies próximas, sem necessidade de contacto físico (Bainbridge & Haggard, 2011).

O desempenho destes elementos depende, em grande medida, das propriedades óticas e térmicas dos materiais que os constituem, as quais determinam a forma como interagem com a radiação solar. Ao incidir sobre uma superfície, a radiação pode ser:

- Absorvida ( $\alpha$ ), contribuindo para o aquecimento do material;
- Refletida ( $\rho$ ), sendo desviada de volta para o ambiente;
- Transmitida ( $\tau$ ), no caso de materiais translúcidos, atravessando o corpo do material.

Estas três componentes totalizam sempre 100% da radiação incidente, o que pode ser expresso pela equação:  $\alpha + \rho + \tau = 1$  (Lamberts et al., 2014, p. 208).

Para além das propriedades do material, a quantidade de radiação absorvida por uma superfície depende também do ângulo de incidência da radiação solar. Quando os raios solares incidem perpendicularmente à superfície, a intensidade da radiação recebida é máxima. À medida que o ângulo se afasta da perpendicular, a quantidade de energia absorvida diminui, reduzindo o potencial de aquecimento (Moita, 2010).

Desta forma, dominar o mecanismo da radiação térmica e reconhecer a sua influência nos espaços é fundamental, pois permite não só otimizar o aproveitamento da radiação solar quando benéfica, mas também evitá-la quando prejudicial.

#### 2.4.1.2 Propriedades físicas dos materiais

Tendo compreendido os mecanismos pelos quais o calor se propaga, importa agora caracterizar os materiais que participam nesse processo. As suas propriedades físicas definem o modo como respondem às variações térmicas, regulando o armazenamento, a dissipação e a resistência ao fluxo de calor, aspetos cruciais para o desempenho térmico dos edifícios.

#### 2.4.1.2.1 Propriedades físicas base

As propriedades físicas base descrevem os atributos intrínsecos dos materiais que, na sua essência, definem o seu potencial para concentrar massa e acumular energia térmica, sendo fundamentais para a determinação do potencial de armazenamento de calor de um dado volume e para a sua influência na estabilidade de temperatura dos espaços.

##### - Densidade

A densidade é uma propriedade física fundamental dos materiais, expressa em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ), que indica a quantidade de massa contida num determinado volume (Moita, 2010). No contexto da climatização passiva, este parâmetro influencia significativamente o comportamento dos materiais, não apenas do ponto de vista térmico, mas também estrutural e construtivo.

Materiais com elevada densidade, como o betão ( $\rho \approx 2500 \text{ kg/m}^3$ ), apresentam uma estrutura interna compacta que lhes confere maior capacidade de armazenamento de calor por unidade de volume. Esta característica torna-se particularmente relevante quando se pretende aumentar o potencial de acumulação de energia térmica no corpo do material. No entanto, essa mesma capacidade acarreta um peso estrutural significativamente superior, o que pode representar um desafio em certas tipologias construtivas. Por oposição, materiais de densidade moderada, como a madeira ( $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ), oferecem vantagens evidentes pela sua leveza e facilidade de manuseamento, embora a sua reduzida massa por volume limite o potencial de acumulação térmica, tornando-os menos eficazes em sistemas que visam prolongar a estabilidade térmica interior (Lechner, 2015).

Neste sentido, a compreensão da densidade como propriedade autónoma é essencial para o dimensionamento e desempenho do artefacto proposto. Permite avaliar com precisão o equilíbrio entre armazenamento térmico e peso estrutural, dois critérios que devem ser geridos cuidadosamente para garantir tanto a eficiência térmica como a viabilidade construtiva da solução. Selecionar materiais com uma densidade adequada será, assim, decisivo para otimizar o comportamento térmico do artefacto sem comprometer a sua integração prática no espaço habitacional.

#### - Capacidade térmica específica

A capacidade térmica específica é outra propriedade fundamental no estudo do comportamento térmico dos materiais, pois descreve a quantidade de energia necessária para provocar uma variação de temperatura numa determinada massa.

Expressa em joules por quilograma por grau Kelvin ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ), a capacidade térmica específica indica a quantidade de calor necessária para aumentar em  $1\text{ }^\circ\text{C}$  a temperatura de  $1\text{ kg}$  de material (Moita, 2010). Quanto maior for este valor, mais calor o material consegue absorver sem que a sua temperatura se altere significativamente. Por exemplo, a água ( $c \approx 4186\text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) possui uma das capacidades térmicas específicas mais elevadas entre os materiais comuns, o que lhe permite reter grandes quantidades de calor antes de aquecer significativamente, ou seja, exige mais energia para elevar a sua temperatura. Como consequência, a água aquece de forma lenta e liberta calor de forma igualmente progressiva, o que prolonga a sua influência térmica ao longo do tempo no espaço. Por oposição, materiais como o aço ( $c \approx 486\text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) ou o vidro ( $c \approx 828\text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) aquecem rapidamente quando sujeitos a fluxos de calor, mas também perdem essa energia de forma quase imediata, traduzindo-se num menor potencial de retenção térmica (Lechner, 2015).

Neste sentido, a capacidade térmica específica permite avaliar a resistência térmica interna de um material perante as variações de temperatura, fornecendo uma base sólida para a seleção de soluções construtivas com maior ou menor sensibilidade térmica.

#### - Capacidade térmica volumétrica

Já a capacidade térmica volumétrica é uma propriedade que traduz a quantidade total de calor que um determinado volume de material pode armazenar quando a sua temperatura aumenta  $1\text{ }^\circ\text{C}$  (Lamberts, 2004). Ao contrário da capacidade térmica específica, que se refere à massa, esta propriedade considera a quantidade de calor armazenada por unidade de volume (expressa em  $\text{J/m}^3\cdot\text{K}$ ).

Esta capacidade resulta da multiplicação da densidade do material pela sua capacidade térmica específica, o que permite compreender não apenas quanto calor um material pode armazenar por quilograma, mas quanto calor pode reter no seu volume total. Assim, mesmo que dois materiais tenham capacidades térmicas específicas semelhantes, aquele com maior densidade terá uma capacidade térmica volumétrica mais elevada e, conseqüentemente, maior potencial de acumulação de energia térmica no seu corpo (Johra, 2021).

Por exemplo, o betão ( $\rho \approx 2500 \text{ kg/m}^3$ ;  $c \approx 936 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ), anteriormente referido pela sua elevada densidade, combina também uma capacidade térmica específica considerável, resultando numa capacidade volumétrica notável. Já a madeira leve, apesar de apresentar um calor específico relativamente moderado, possui uma densidade bastante inferior, o que condiciona negativamente o seu potencial de acumulação térmica por unidade de volume (Moita, 2010; Chiras, 2002).

Em síntese, a capacidade térmica volumétrica permite antecipar o volume de calor que um determinado material é capaz de acumular no espaço que ocupa, sendo uma métrica objetiva do seu potencial de armazenamento térmico. Esta propriedade torna-se, assim, especialmente útil, pois permite selecionar materiais com maior ou menor capacidade de retenção de energia térmica, consoante se pretenda potenciar ou limitar a acumulação de calor no seu interior.

#### 2.4.1.2.2 Propriedades radiativas

Outro grupo que importa considerar nas propriedades térmicas dos materiais são as propriedades radiativas. Estas, determinam a forma como os materiais respondem ao contacto superficial com a radiação solar, influenciando diretamente o seu comportamento térmico.

##### - Absortividade e Emissividade

Entre estas, destacam-se a absortividade e a emissividade, responsáveis por regular a forma como a energia radiante interage com a superfície dos materiais. É nesta camada superficial que a radiação pode ser refletida, absorvida e convertida em calor, ou reemitida sob a forma de radiação térmica. Estas dinâmicas têm um impacto direto na quantidade de calor que entra, permanece ou se dissipa no ambiente construído.

A absortividade ( $\alpha$ ) representa a fração da radiação solar incidente que é efetivamente absorvida por uma superfície e transformada em calor. Esta propriedade depende principalmente da cor e do acabamento superficial: superfícies escuras tendem a absorver mais radiação, enquanto superfícies claras a refletem (Lamberts, 2014). Quanto à rugosidade superficial, de acordo com Dornelles (2009, citado em Coimbra et al., 2011), influencia significativamente a absortividade solar das superfícies. Em estudos anteriores, Seker e Tavit (1996, citados em Coimbra et al., 2011) já haviam identificado um aumento linear da absortividade em função da rugosidade, observando acréscimos de até 23% para cada 0,08 mm de aumento. Essa tendência foi posteriormente confirmada pelos

ensaios laboratoriais de Coimbra et al. (2011), que verificaram que tintas escuras, como preta, verde e vermelha, com absorvâncias naturalmente elevadas (superiores a 80%) apresentaram pouca variação entre superfícies lisas e rugosas, dado que já absorvem grande parte da radiação incidente. Por outro lado, tintas claras, como a branca, revelaram diferenças expressivas de absorvância com variações relativas que chegaram a 48% confirmando que em materiais com menor capacidade de absorção, a rugosidade exerce um papel mais relevante.

A emissividade ( $\epsilon$ ), por sua vez, expressa a capacidade do material que absorveu calor de o reemitir sob a forma de radiação térmica. Tal como a absorvidade, trata-se de uma propriedade superficial, influenciada pelo tipo de material e pelo seu acabamento. Superfícies metálicas polidas, por exemplo, possuem emissividades muito baixas ( $\epsilon \approx 0,05$ ), dificultando a dissipação de calor. Já materiais como o betão ou o reboco apresentam valores elevados ( $\epsilon \approx 0,90$ ), promovendo uma libertação térmica mais eficaz. Ainda assim, a emissividade pode ser significativamente alterada por modificações no acabamento: uma chapa metálica pintada com tinta opaca pode ver a sua emissividade aumentar de 0,20 para 0,90 (Lamberts, 2014).

*Tabela 4: Absorvidade e Emissividade de diferentes materiais. Adaptado de: Lamberts et al. (2014).*

Tipo de Superfície	Absorvidade ( $\alpha$ )	Emissividade ( $\epsilon$ )
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15	0,12
Chapa de aço galvanizado (nova e brilhante)	0,25	0,25
Betão aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
Vidro comum de janela	Transparente	0,90 / 0,95

Tintas (Cores de Pintura)		
Branca	0,20	0,90
Amarela	0,30	0,90
Verde-claro	0,40	0,90
“Alumínio” (cor metálica)	0,40	0,50
Verde-escuro	0,70	0,90
Vermelha	0,74	0,90
Preta	0,97	0,90

Apesar de frequentemente apresentarem valores semelhantes, a absorptividade e a emissividade não são propriedades equivalentes. No contexto da construção, por exemplo, ao nível da envolvente do edifício, se o objetivo for aquecer o espaço interior, é desejável que a superfície voltada para o interior da habitação apresente alta emissividade, permitindo que o calor previamente absorvido seja reemitido sob a forma de radiação térmica, contribuindo para o aquecimento do espaço. Por outro lado, em superfícies expostas ao exterior, uma baixa emissividade reduz as perdas de calor por radiação, favorecendo a sua retenção no interior. Esta lógica é também aplicada em revestimentos seletivos, como os utilizados em coletores solares, que combinam alta absorptividade com baixa emissividade na face exterior, maximizando a captação solar e minimizando a perda de calor (Bainbridge & Haggard, 2011).

Em síntese, a forma como um material absorve e emite radiação térmica influencia diretamente a sua capacidade de aquecer, arrefecer ou estabilizar o ambiente interior. No contexto do artefacto de design passivo em estudo, caso este se localize no interior da habitação, poderá ser vantajoso recorrer a materiais com alta absorptividade e alta emissividade, maximizando a captação de calor e a sua libertação para o espaço envolvente em períodos frios. Por outro lado, caso seja posicionado no exterior ou próximo de fontes intensas de radiação solar, será importante ponderar soluções com baixa absorptividade e emissividade controlada, de modo a minimizar o sobreaquecimento no

verão. A escolha final deverá considerar o posicionamento, a função pretendida e a estratégia térmica desejada para cada estação.

#### 2.4.1.2.3 Propriedades de condução e armazenamento térmico

Já as propriedades de condução e armazenamento térmico permitem compreender de que forma o calor se desloca e se acumula nos materiais, sendo essenciais para isolar, armazenar ou retardar a sua transferência ao longo do tempo.

##### - Condutividade térmica

A condutividade térmica ( $\lambda$ ), expressa em  $W/m \cdot K$ , é a propriedade que descreve a facilidade com que o calor se propaga num material por contacto direto entre as partículas que o compõem. Este parâmetro representa a quantidade de calor que atravessa um metro de espessura do material por cada grau de diferença de temperatura entre as faces, num dado intervalo de tempo (Lamberts, 2014).

Materiais com diferentes níveis de condutividade térmica apresentam comportamentos distintos quanto à forma como transferem calor ao longo do tempo. De acordo com Walsh et al. (2006), materiais com condutividade elevada, como os metais, por exemplo o alumínio ( $\lambda \approx 237 W/m \cdot K$ ), permitem que o calor se propague rapidamente no seu interior, aquecendo e arrefecendo quase de imediato. Esta rapidez favorece trocas térmicas intensas, mas dificulta a retenção prolongada de calor. Em contraste, materiais com condutividade térmica moderada, como a pedra natural ( $\lambda \approx 1,3 W/m \cdot K$ ), permitem uma transferência de calor mais lenta e progressiva, facilitando uma difusão gradual ao longo do seu volume. Esta característica pode revelar-se vantajosa em contextos onde se pretende distribuir o calor de forma equilibrada. Já os materiais com condutividade muito baixa, como a cortiça aglomerada ( $\lambda \approx 0,060 W/m \cdot K$ ), a lã mineral ( $\lambda \approx 0,035 W/m \cdot K$ ) ou espumas porosas, dificultam fortemente a propagação do calor devido à presença de ar aprisionado no seu interior, um mau condutor térmico ( $\lambda \approx 0,026 W/m \cdot K$ ). Estas características tornam-nos eficazes como isolantes térmicos, essenciais para reduzir perdas de calor no inverno e limitar os ganhos térmicos excessivos no verão (Moita, 2010).

Neste sentido, a seleção dos materiais deve ser orientada pela função térmica que se pretende privilegiar no espaço edificado. Em situações que exigem respostas térmicas rápidas, como zonas com elevada exposição solar ou superfícies que necessitam de aquecimento célere, os materiais

com elevada condutividade térmica podem revelar-se mais eficazes. Quando o objetivo passa por armazenar calor e libertá-lo de forma gradual, os materiais com condutividade intermédia são os mais indicados. Por fim, em componentes cuja função principal é o isolamento térmico, a utilização de materiais com baixa condutividade é fundamental para reduzir as trocas de calor com o exterior.

#### - Resistência térmica

A resistência térmica quantifica a dificuldade com que o calor atravessa um elemento construtivo com 1 m<sup>2</sup> de superfície, quando existe uma diferença de temperatura de 1 °C entre os ambientes que o delimitam, como o interior e o exterior de um edifício. Quanto maior for este valor, mais eficaz será o material ou sistema em limitar a transferência de calor. A unidade usada é m<sup>2</sup>·K/W (Moita, 2010).

Nos elementos construtivos, a resistência térmica representa a capacidade de cada componente, como paredes, coberturas ou pavimentos, em dificultar a passagem de calor entre ambientes. Esta resistência depende não só da espessura dos materiais utilizados, mas também da sua condutividade térmica. Materiais espessos e com baixa condutividade oferecem maior resistência, funcionando como barreiras à transferência de calor. Assim, ao projetar uma envolvente térmica eficiente, por exemplo, é essencial considerar não apenas os materiais individualmente, mas o conjunto de camadas que compõem cada elemento construtivo, já que a resistência total resulta da soma das resistências parciais de cada camada (Lamberts, 2014).

Desta forma, a escolha de materiais com elevada resistência térmica, ou a combinação de camadas que aumentem esse valor global, pode ser decisiva para reduzir perdas de calor no inverno ou ganhos excessivos no verão, garantindo maior estabilidade térmica no seu interior.

#### - Transmitância térmica

A transmitância térmica é uma propriedade composta que avalia o desempenho térmico global de um elemento construtivo, expressando a quantidade de calor que o atravessa por unidade de área e por diferença de temperatura entre os ambientes que separa. É representada pela letra “U” e expressa em W/m<sup>2</sup>·K. Quanto mais baixo for o valor da transmitância térmica, maior será a capacidade do elemento em resistir à passagem de calor, promovendo um ambiente interior mais estável e confortável (Moita, 2010).

No contexto da construção, a transmitância térmica permite comparar a eficiência térmica dos diferentes componentes da envolvente de um edifício, como por exemplo uma parede simples em alvenaria ( $U \approx 1,5\text{--}2,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ), uma parede dupla com isolamento incorporado ( $U \approx 0,3\text{--}0,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ), uma janela simples ( $U \approx 3,4\text{--}6,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) ou janelas com vidro duplo ( $U \approx 1,1\text{--}1,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ). Elementos com transmitância elevada deixam entrar mais calor no verão e perdem mais calor no inverno, obrigando ao uso de sistemas de climatização ativa. Por outro lado, valores de transmitância reduzida estão associados a um melhor desempenho térmico, maior eficiência energética e conforto acrescido (Lamberts, 2014).

No âmbito do presente estudo, a transmitância térmica revela-se um parâmetro decisivo para compreender o comportamento global do conjunto de materiais que o compõem. Uma vez que esta propriedade resulta da conjugação entre condutividade térmica e espessura dos materiais, permite avaliar a facilidade com que o calor atravessa o artefacto como um todo. Valores mais baixos de transmitância indicam maior resistência à passagem de calor, sendo vantajosos em contextos onde se pretende conservar a energia térmica acumulada ou proteger o interior de ganhos térmicos indesejados. Por outro lado, transmitâncias mais elevadas poderão ser estratégicas para dissipar rapidamente o calor, arrefecendo o ambiente. Assim, a análise da transmitância térmica orienta escolhas construtivas consoante a função térmica desejada, reforçando a importância da sua consideração no desempenho passivo do objeto.

#### - Inércia térmica

A inércia térmica é a propriedade dos materiais que lhes permite resistir a variações rápidas de temperatura, atenuando os picos térmicos através de um processo lento de absorção, retenção e devolução de calor ao meio envolvente. Esta capacidade não resulta de um único atributo físico, mas sim da interação entre três propriedades fundamentais: a densidade, a capacidade térmica específica e a condutividade térmica do material (Bainbridge & Haggard, 2011).

Elementos construtivos com elevado desempenho inercial aquecem lentamente quando expostos a fontes térmicas, como a radiação solar direta ou o ar aquecido, absorvendo parte significativa da energia térmica no seu interior. Posteriormente, à medida que a temperatura ambiente desce, libertam gradualmente esse calor acumulado, contribuindo para um ambiente interior mais estável e confortável (Lechner, 2015). Esta função amortecedora suaviza as oscilações térmicas entre o

dia e a noite, reduzindo tanto os riscos de sobreaquecimento como o arrefecimento abrupto dos espaços (Bainbridge & Haggard, 2011).

A eficácia inercial depende, sobretudo, do equilíbrio entre a capacidade de acumulação térmica (expressa pela capacidade térmica volumétrica) e a velocidade de propagação interna do calor (determinada pela condutividade térmica). Materiais com condutividade muito elevada, como os metais (ex.: ferro,  $\lambda \approx 73 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), embora apresentem elevada capacidade térmica volumétrica devido à sua alta densidade e calor específico, permitem uma transferência de calor tão rápida que o armazenamento útil de energia térmica é praticamente nulo. Já os materiais com condutividade moderada e elevada capacidade térmica volumétrica, como a alvenaria maciça, a pedra natural ou o tijolo maciço ( $\lambda \approx 0,6\text{-}0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), demonstram o equilíbrio ideal: absorvem o calor lentamente, armazenam-no em profundidade e libertam-no de forma gradual, atenuando flutuações de temperatura entre o dia e a noite. Em contraste, materiais com condutividade muito baixa, como o gesso ( $\lambda \approx 0,35 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), embora apresentem uma capacidade térmica específica relativamente elevada, possuem uma densidade reduzida, o que limita a sua capacidade térmica volumétrica. Como resultado, o calor tende a concentrar-se nas camadas superficiais, sem se distribuir eficazmente no interior do material, comprometendo o seu desempenho inercial (Walsh et al., 2006; Moita, 2010).

Neste enquadramento, a inércia térmica revela-se um recurso estratégico no design passivo, capaz de promover a estabilidade térmica interior sem consumo energético adicional. Ao integrar esta propriedade na definição do artefacto, torna-se possível direccionar a sua atuação: seja para armazenar energia térmica e libertá-la de forma controlada, contribuindo para a estabilização do conforto interior, seja para dissipar rapidamente o calor excessivo, evitando o sobreaquecimento em contextos de elevada exposição solar. A eficácia dependerá, assim, da conjugação adequada entre condutividade e capacidade térmica volumétrica, bem como da função específica que se pretenda atribuir ao artefacto no sistema térmico da habitação.

#### - Materiais mudança de fase (Phase Change Materials - PCMS)

Entre as soluções tecnológicas mais exploradas nas últimas décadas para a melhoria do desempenho térmico dos edifícios, destaca-se a integração de materiais de mudança de fase (Phase Change Materials – PCMs). Estes materiais distinguem-se pela sua capacidade de armazenar e libertar grandes quantidades de energia térmica sob a forma de calor latente, durante os processos

de fusão (passagem do estado sólido ao líquido) e solidificação (líquido para sólido). Esta transição ocorre a uma temperatura específica e estável, própria de cada material, permitindo aos PCMs atuar como reguladores térmicos eficazes: quando a temperatura ambiente sobe e atinge o ponto de fusão, o material absorve o excesso de calor sem alterar a sua temperatura; quando a temperatura desce abaixo desse ponto, liberta essa energia acumulada, estabilizando o ambiente interior (Farid et al., 2004; Cabeza et al., 2011). Esta propriedade torna-os particularmente interessantes no contexto da climatização passiva, pois permite acumular e libertar energia de forma eficiente com uma massa significativamente inferior à dos materiais tradicionais de elevada inércia térmica, como o betão, o tijolo ou a pedra.

A investigação neste domínio tem revelado resultados promissores. Em contextos mediterrânicos, os PCMs aplicados em revestimentos interiores, fachadas ventiladas ou elementos construtivos leves demonstraram reduções entre 3–6 °C nas temperaturas interiores durante o verão e poupanças energéticas na ordem dos 15–35 % (Vedrtnam et al., 2025). Também em Portugal, alguns estudos exploraram a sua aplicação com resultados relevantes: Mustaparta et al. (2013) verificaram reduções até 22,9 % no consumo energético numa simulação de habitação unifamiliar com PCM de hidrato de sal, embora com custos de implementação significativamente superiores aos benefícios económicos estimados. De forma semelhante, Durães et al. (2023) analisaram a viabilidade da incorporação de PCMs microencapsulados em rebocos exteriores aplicados em Lisboa, apontando melhorias térmicas, mas salientando a fraca relação custo-benefício. Já Sá (2015), num estudo desenvolvido para o Porto, reportou ganhos na estabilidade térmica interior com o uso de PCMs em painéis de gesso, mas confirmaram que a recuperação do investimento é ainda pouco realista, principalmente em contextos de reabilitação de edifícios existentes.

Além disso, a eficiência térmica dos PCMs depende fortemente da ocorrência regular de ciclos completos de fusão e solidificação, o que implica atingir com frequência temperaturas próximas do seu ponto de mudança de fase. No entanto, as condições necessárias para esse funcionamento ideal nem sempre estão garantidas em habitações existentes, o que compromete a previsibilidade do seu desempenho e dificulta a sua integração numa solução passiva orientada para uma aplicação generalizada, como a que se propõe no presente estudo (Mustaparta et al., 2013; Vedrtnam et al., 2025).

Uma revisão recente da literatura (Vedrtnam et al., 2025), que analisou mais de 60 estudos entre 2004 e 2025, confirma esta ambivalência: embora os PCMs representem um vetor emergente na

investigação sobre design passivo e realmente demonstrem uma elevada eficiência, os desafios associados à sua estabilidade térmica e à sua viabilidade económica continuam a limitar a sua aplicabilidade prática em contextos residenciais reais, como o parque edificado da cidade de Lisboa.

Nesse sentido, apesar de se reconhecer o potencial desta tecnologia, os desafios práticos e económicos limitam a sua aplicação no contexto do presente estudo. Por essa razão, a proposta de design não incluirá PCMs, privilegiando a utilização de estratégias passivas de menor complexidade, custo reduzido e maior previsibilidade térmica, alinhadas com o objetivo de uma solução acessível e generalizável para o edificado de Lisboa.

#### 2.4.1.2.4 Relações entre propriedades térmicas

A compreensão isolada das propriedades térmicas dos materiais fornece uma base sólida para avaliar o seu comportamento. No entanto, é na análise das relações entre essas propriedades que se revela o seu verdadeiro potencial no design passivo. As interações entre densidade, capacidade térmica específica, capacidade térmica volumétrica, condutividade, resistência, transmitância e inércia térmica permitem identificar materiais com respostas térmicas equilibradas, adaptadas aos diferentes objetivos de conforto e eficiência.

Se o objetivo for armazenar calor de forma eficaz e libertá-lo gradualmente ao longo do tempo evitando oscilações térmicas, o ideal é recorrer a materiais com elevada capacidade térmica volumétrica (isto é, elevada densidade e elevado calor específico), mas com condutividade moderada. Este equilíbrio permite que o calor penetre lentamente no material, seja armazenado em profundidade e libertado de forma progressiva. A pedra natural ( $\rho \approx 2600 \text{ kg/m}^3$ ;  $c \approx 900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ;  $\lambda \approx 1,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) ou o tijolo maciço constituem exemplos paradigmáticos dessa combinação equilibrada (Moita, 2010).

Em contraste, se o objetivo for favorecer aquecimentos ou arrefecimentos rápidos, por exemplo, em componentes que requeiram resposta térmica imediata, a condutividade térmica torna-se o parâmetro dominante. Materiais como o alumínio ( $\lambda \approx 205 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ;  $c \approx 900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) aquecem e arrefecem quase instantaneamente, apesar de apresentarem elevadas capacidades térmicas volumétricas. Contudo, esta energia térmica entra e sai com tal rapidez que o efeito de armazenamento útil é praticamente inexistente (Lechner, 2015).

Já no caso do isolamento térmico, a prioridade é impedir a propagação de calor entre o exterior e o interior. Aqui, os materiais mais eficazes são os que apresentam condutividade térmica extremamente baixa, como o poliestireno expandido (EPS,  $\lambda \approx 0,03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) ou a lã mineral ( $\lambda \approx 0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), cuja estrutura porosa aprisiona ar, transformando-o em mau condutor, uma vez que como dito, o ar parado é um dos piores condutores térmicos. Ainda que a densidade e a capacidade térmica específica destes materiais seja baixa, a sua função não é armazenar, mas sim resistir à transferência de energia (Lamberts et al., 2014).

Nem sempre, porém, a relação entre propriedades é linear. A madeira leve, por exemplo, combina uma capacidade térmica específica relativamente alta ( $c \approx 1400 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ) com uma densidade baixa ( $\rho \approx 500 \text{ kg/m}^3$ ), resultando numa capacidade térmica volumétrica modesta ( $\approx 700\,000 \text{ J/m}^3\cdot\text{K}$ ). A sua baixa condutividade ( $\lambda \approx 0,12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) limita a propagação do calor, que tende a concentrar-se superficialmente e a dissipar-se rapidamente, dificultando o armazenamento térmico em profundidade (Moita, 2010).

De forma a apoiar não apenas a análise teórica, mas também a futura fase de desenvolvimento projetual, a tabela seguinte inclui materiais analisados ao longo do capítulo, bem como outros materiais referência para as propriedades. Esta ferramenta pretende, assim, servir como base de consulta técnica para a definição dos materiais a aplicar no artefacto em desenvolvimento.

Tabela 5: Propriedades materiais. Adaptado de: Moita, 2010.

Função térmica	Material	Densidade ( $\rho$ ) $\text{kg/m}^3$	Capacidade térmica específica ( $c$ ) $\text{J/kg}\cdot\text{K}$	Capacidade térmica volumétrica ( $\rho\cdot c$ ) $\text{kJ/m}^3\cdot\text{K}$	Condutividade térmica ( $\lambda$ ) $\text{W/m}\cdot\text{K}$
Armazenar	Água	1000	4180	4180	0,61
	Betão (concreto)	2400	880	2112	2,10
	Cerâmica (terracota)	1600	920	1472	0,84
	Pedra natural (granito)	2700	790	2133	3,00

	Tijolo maciço	1800	840	1512	0,72
	Vidro comum	2500	840	2100	1,00
Isolar	Ar (a 20 °C, 1 atm)	1,204	1005	1,21	0,026
	Cortiça aglomerada	120	1800	216	0,045
	Lã mineral	150	1030	155	0,037
	Poliestireno expandido	20	1300	26	0,035
Resposta térmica rápida	Aço (carbono)	7850	470	3689,5	50,20
	Alumínio	2700	900	2430	237,00
	Ferro	7870	440	3462,8	80,00
Desempenho limitado	Gesso	850	1090	926,5	0,35
	Madeira (pinho seco)	520	1600	832	0,13

Assim, uma análise integrada permite seleccionar com rigor os materiais mais adequados à função térmica pretendida no artefacto em desenvolvimento, quer se trate de absorver, reter ou bloquear o calor. Com base nestas relações, torna-se possível otimizar a performance passiva do sistema e responder às exigências específicas de cada ambiente ou estação do ano.

#### 2.4.1.3 Aplicação da Carta de Givoni ao Clima de Lisboa

Compreendidos os princípios físicos que regem o comportamento térmico dos edifícios assim como o papel do design passivo na eficiência energética, importa agora identificar quais as estratégias passivas mais adequadas ao clima específico da cidade de Lisboa. Para esse fim,

destacam-se as cartas bioclimáticas, ferramentas que associam variáveis como a temperatura e a humidade a soluções de climatização passiva. Estas metodologias oferecem orientações fundamentais para o desenvolvimento de edifícios energeticamente eficientes, sendo reconhecidas pela sua capacidade de informar soluções adaptadas ao contexto local, como sublinha Émi & Acciona (2015), “*exterior climatic conditions should be studied to design the correct protections. Bioclimatic diagrams will provide useful information for the hydrothermal design*”. Entre os modelos mais consolidados encontram-se a Carta de Olgyay, a Carta de Szokolay, a Tabela de Mahoney e, com particular destaque nesta investigação, a Carta de Givoni.

Entre as várias cartas bioclimáticas, a Carta de Givoni é amplamente reconhecida pela sua eficácia na adaptação de estratégias passivas a diferentes realidades climáticas, com aplicações já registadas em diversos contextos (Da Casa Martín et al., 2019; Zubarev & Zobnina, 2023; Silva et al., 2024). No caso de Lisboa, a investigação de Gonçalves e Graça (2004) assume particular relevância e serve de base à presente dissertação.

A Carta de Givoni assenta num diagrama psicrométrico que relaciona três variáveis fundamentais: a temperatura do ar (eixo das abcissas), a humidade relativa (eixo das ordenadas) e a humidade absoluta (curvas de referência). Através destas variáveis, é possível identificar a zona de conforto térmico, entendida como o intervalo de condições em que a maioria das pessoas não sente desconforto térmico. Quando os dados climáticos de um determinado local se situam fora dessa zona, a carta recomenda estratégias passivas específicas para restaurar o conforto. Em cenários mais extremos, é aconselhado o recurso a estratégias mecânicas, como a desumidificação ou o ar condicionado (Givoni, 1992). A Figura 3 apresenta um exemplo genérico da Carta de Givoni, ilustrando a estrutura do gráfico e a forma como as variáveis são representadas, incluindo a zona de conforto e as recomendações de estratégias.

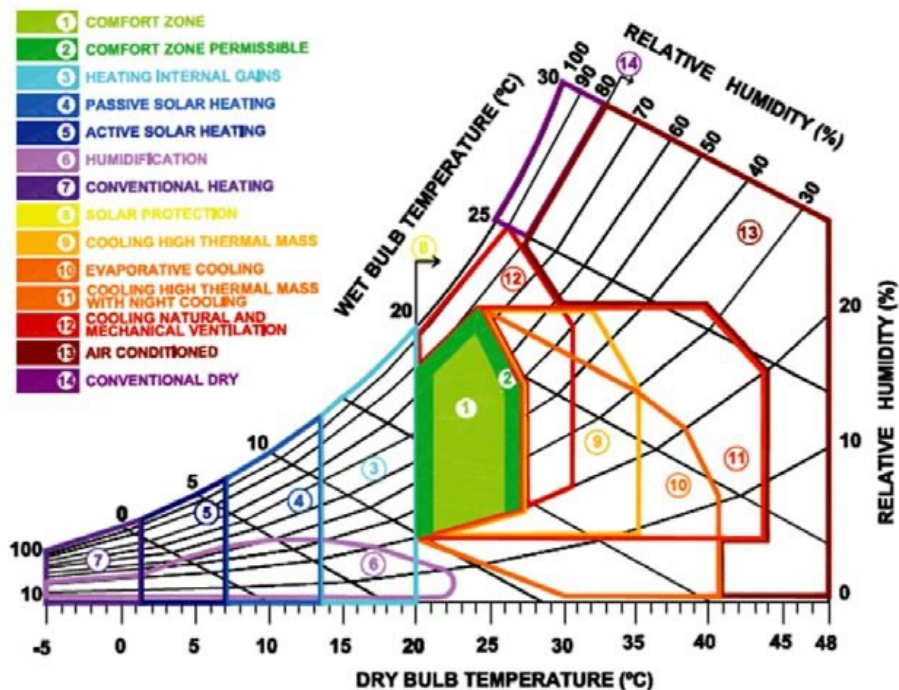


Figura 3: Carta bioclimática de Givoni. Fonte: Reproduzido por Vadoudi (2018), com base em Givoni (1992).

Importa referir que, embora a Carta Bioclimática de Givoni se baseie num modelo estático de conforto térmico, com limites fixos de temperatura e humidade, reconhece-se a sua utilidade na fase inicial de conceção. O próprio Givoni admite que os ocupantes de edifícios naturalmente ventilados toleram variações térmicas superiores e velocidades do ar mais elevadas, o que aproxima parcialmente a sua abordagem de modelos adaptativos, mesmo sem os incorporar diretamente (Givoni, 1992).

Assim, a Carta de Givoni é utilizada nesta investigação como instrumento de apoio à fase inicial do design passivo, permitindo identificar estratégias adaptadas ao clima de Lisboa. No entanto, por se basear num modelo estático e não considerar diretamente a interação dinâmica dos ocupantes com o ambiente, a sua aplicação limita-se à definição inicial de soluções. A avaliação do conforto térmico será realizada com base na norma EN 16798-1:2014, já previamente justificada, assegurando um enquadramento metodológico mais alinhado com a realidade de habitações naturalmente ventiladas.

No estudo de Gonçalves e Graça (2004), a aplicação da Carta de Givoni ao clima de Lisboa analisou as diferentes zonas climáticas<sup>1</sup> e demonstrou que a cidade pode beneficiar da adoção de estratégias passivas distintas, ajustadas às exigências térmicas sazonais, diferenciando claramente as necessidades do período de aquecimento das do período de arrefecimento.

*Tabela 6: Estratégias passivas recomendadas para Lisboa segundo a Carta de Givoni. Adaptado de: Gonçalves & Graça (2004).*

Estação	Estratégias Passivas Recomendadas
Inverno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maximizar os ganhos solares</li> <li>- Minimizar as perdas térmicas por condução</li> <li>- Utilizar materiais com elevada inércia térmica</li> </ul>
Verão	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restringir os ganhos solares</li> <li>- Minimizar os ganhos térmicos por condução</li> <li>- Promover a ventilação natural</li> <li>- Utilizar materiais com elevada inércia térmica</li> </ul>

Importa salientar que a Tabela 6 não corresponde a uma transposição literal da Carta de Givoni, mas a uma interpretação realizada por Gonçalves & Graça (2004), que traduziram as recomendações do diagrama em orientações práticas para o contexto climático lisboeta. Enquanto a carta original identifica zonas psicrométricas e estratégias genéricas, como ventilação natural, arrefecimento evaporativo, massa térmica ou aquecimento solar passivo, a versão adaptada aqui utilizada sintetiza essas recomendações em orientações práticas.

A análise da Carta de Givoni confirma, assim, o seu valor como ferramenta para orientar soluções passivas em Lisboa. A diferenciação sazonal das estratégias evidencia a necessidade de uma abordagem dinâmica, capaz de responder tanto à captação e retenção de calor no inverno como à

<sup>1</sup> As zonas climáticas de inverno (I1, I2, I3 — sendo I1 a menos rigorosa e I3 a mais severa) e de verão (V1, V2, V3 — sendo V1 a menos intensa e V3 a mais quente) constituem um sistema de classificação adotado em Portugal, que agrupa os concelhos do território nacional com base em critérios climáticos. Este zonamento permite adequar os requisitos de qualidade térmica dos edifícios às condições específicas de cada local. Inicialmente estabelecido pelo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), este sistema foi posteriormente integrado no atual Sistema de Certificação Energética (SCE). A classificação climática de inverno baseia-se no número de graus-dias de aquecimento, indicador que expressa a necessidade de aquecimento em função da diferença entre a temperatura exterior e um valor de referência. Já a classificação de verão é determinada pela temperatura média exterior durante a estação de arrefecimento, refletindo a severidade do período quente (República Portuguesa, 2006).

sua limitação e dissipação no verão. Este entendimento estabelece a base metodológica para a secção seguinte, dedicada à materialização arquitetónica das estratégias identificadas.

#### 2.4.1.3.1 Estratégias passivas

As recomendações sazonais da Carta de Givoni podem ser traduzidas em soluções arquitetónicas concretas. No inverno, a maximização dos ganhos solares concretiza-se através de estratégias de ganhos diretos, indiretos ou isolados, cuja eficácia depende da minimização simultânea das perdas por condução e do uso de materiais com elevada inércia térmica. No verão, a limitação dos ganhos solares alcança-se por meio de dispositivos de sombreamento, enquanto a dissipação do calor é favorecida pela ventilação natural, quer cruzada, quer noturna, em articulação com a massa térmica que estabiliza o regime térmico. As secções seguintes detalham estas estratégias, evidenciando os seus mecanismos de funcionamento e potenciais de aplicação no contexto habitacional de Lisboa.

##### 2.4.1.3.1.1 Ganhos solares diretos

Os sistemas de ganho solar direto constituem a forma mais imediata de aproveitamento da energia solar no ambiente construído. Nestes sistemas, a radiação solar atravessa os vãos envidraçados e é transferida diretamente para o espaço interior, aquecendo o ar e as superfícies expostas. Trata-se de uma estratégia simples e de grande eficácia, já que permite utilizar de forma direta a radiação disponível para melhorar o conforto térmico, reduzindo a necessidade de aquecimento mecânico. Um elemento central neste processo é a massa térmica, isto é, a utilização de materiais capazes de armazenar calor e libertá-lo de forma gradual ao longo do tempo (Lechner, 2015). Como visto na secção 2.4.1.2.3, essa capacidade decorre da sua inércia térmica, propriedade física associada a uma combinação equilibrada entre elevada densidade, elevado calor específico e condutividade térmica moderada. Nas habitações, esta massa térmica encontra-se sobretudo em elementos construtivos pesados, como paredes, pavimentos e tetos de alvenaria ou betão, mas pode também estar presente em acabamentos e até em mobiliário com elevada densidade (Chiras, 2002).

A massa térmica pode ser ativada por diferentes mecanismos de transferência de calor: radiação solar direta, convecção com o ar quente ambiente ou radiação emitida por outras superfícies interiores. No entanto, superfícies aquecidas apenas indiretamente armazenam pouca energia

térmica (Lechner, 2015). Segundo Chiras (2002), citando a Steven Winter Associates, uma massa térmica aquecida apenas indiretamente pelo ar requer cerca de quatro vezes mais área para alcançar o mesmo efeito térmico de uma superfície exposta à radiação solar direta.

A Figura 4 ilustra esquematicamente o sistema de ganho solar direto e o mecanismo de transferência de calor para a massa térmica no ambiente construído.

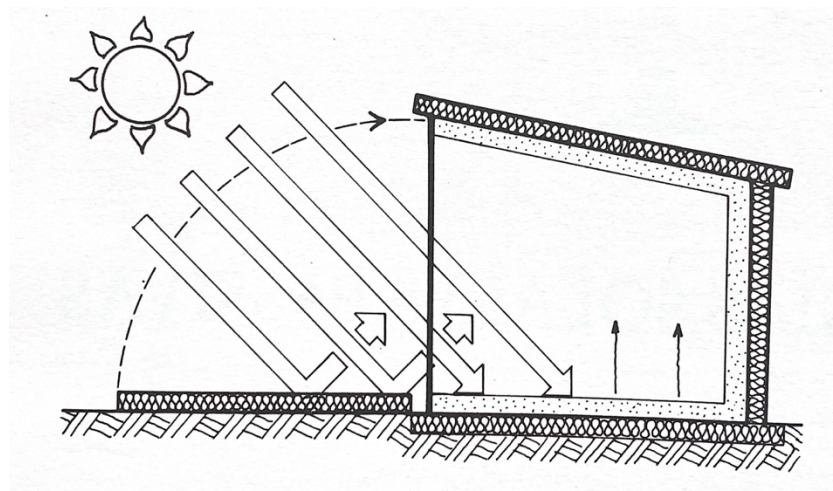


Figura 4: Ganhos diretos. Fonte: Moita (2010)

Outro aspecto técnico determinante é a espessura dos elementos utilizados. Estudos indicam que, durante o ciclo térmico diário, o calor penetra eficazmente até cerca de 10 centímetros de profundidade (Lechner, 2015). Aumentos superiores a este valor resultam em ganhos marginais, já que as camadas internas permanecem praticamente inativas. Chiras (2002) aponta, por exemplo, que uma parede com 15 cm de espessura oferece apenas cerca de 8% mais eficácia térmica do que uma com 10 cm. Acrescenta ainda que a eficácia da massa térmica depende sobretudo da área de superfície exposta ao espaço habitado, em detrimento da espessura do material. Assim, é mais vantajoso aplicar materiais com espessura moderada distribuídos por uma área mais ampla, em detrimento de concentrar grandes volumes de massa num único ponto.

Esta lógica reforça a importância da configuração espacial da massa térmica no interior da habitação. Lechner (2015) explica que os elementos podem estar concentrados, por exemplo, numa parede interior espessa, ou dispersos em diferentes planos, como pavimentos, tetos ou até superfícies integradas no mobiliário. Segundo o autor, a distribuição uniforme tende a oferecer um conforto térmico mais equilibrado, enquanto a concentração localizada pode responder a

exigências térmicas específicas. A combinação de ambas é frequentemente apontada como a solução mais eficaz.

Os acabamentos superficiais e a tonalidade das superfícies de massa térmica são igualmente relevantes para o seu desempenho térmico. Durante muito tempo, prevaleceu a ideia de que todas as superfícies com função térmica no interior de uma habitação deveriam apresentar tonalidades escuras, por forma a maximizar a absorção da radiação solar direta. No entanto, investigações posteriores demonstraram que a presença de superfícies claras, estrategicamente posicionadas, especialmente junto a vãos envidraçados, podem desempenhar um papel complementar essencial. Ao refletirem a radiação solar incidente, estas superfícies contribuem para redirecionar a energia luminosa para zonas mais profundas do espaço, onde outros elementos de massa térmica, mesmo de cor escura, podem absorver esse calor de forma eficaz. Este mecanismo favorece uma distribuição mais homogénea da radiação e, por conseguinte, uma repartição mais equilibrada do calor armazenado no ambiente interior (Chiras, 2002).

Para além destes fatores físicos e construtivos, importa considerar também aspetos operacionais que influenciam diretamente o desempenho térmico da massa. Um estudo recente de Han et al. (2025) identificou uma limitação relevante na aplicação tradicional da massa térmica: a tendência para armazenar e libertar calor em momentos que não coincidem com a presença de ocupantes no espaço, resultando num aproveitamento térmico ineficiente. Através da monitorização de 76 compartimentos com distintos regimes de ocupação, os autores demonstraram que a eficácia desta estratégia passiva depende de forma decisiva da sua articulação com os padrões reais de utilização. Quando esse alinhamento não se verifica, o calor acumulado é desperdiçado, comprometendo o desempenho energético global.

Assim, a massa térmica constitui um recurso central para o funcionamento eficaz dos ganhos solares diretos, permitindo armazenar e redistribuir a energia captada ao longo do dia. No entanto, o seu papel não se esgota nesta estratégia, podendo ser igualmente explorado em outros mecanismos passivos de aproveitamento solar, que serão analisados nas secções seguintes.

#### 2.4.1.3.1.2 Ganhos solares indiretos

Nos sistemas de ganho solar indireto, a radiação solar não aquece diretamente o espaço habitado, sendo antes absorvida por um elemento de elevada massa térmica que atua como mediador. A

energia é posteriormente transferida para o interior por condução, radiação ou convecção natural (Émi & Acciona, 2015).

Entre os exemplos mais representativos encontram-se as paredes de Trombe e os telhados acumuladores (*roof ponds*).

#### - Parede de Trombe - conceito geral de funcionamento

As paredes de Trombe constituem uma das soluções mais emblemáticas da arquitetura solar passiva, representando a aplicação direta da massa térmica no envelope do edifício. O seu funcionamento baseia-se na conjugação entre captação solar e armazenamento retardado: a radiação atravessa um envidraçado orientado a sul, é absorvida por uma superfície de elevada massa térmica, geralmente em betão, tijolo, pedra ou adobe, e é libertada posteriormente para o interior com um desfasamento temporal.

A massa térmica atua, neste caso, como regulador do ambiente interior, evitando sobreaquecimentos durante períodos de elevada insolação e garantindo maior estabilidade térmica mesmo em dias de radiação reduzida. Por essa razão, a literatura identifica as paredes de Trombe como particularmente adequadas a climas que combinam invernos frios com elevada percentagem de radiação direta (Moita, 2010), como sucede em Lisboa (visto na secção 2.2).

Ao longo do tempo surgiram múltiplas variantes, clássica, de água, em ziguezague, Transwall, composta ou com materiais de mudança de fase (PCM), bem como versões tecnologicamente assistidas. Nesta revisão, a análise incide exclusivamente sobre soluções de natureza estritamente passiva, excluindo as que dependem de sistemas ativos (como as paredes de Trombe fotovoltaicas ou fluidizadas) e as que incorporam PCMs, dado que, conforme discutido na Secção 2.4.1.2.3, estes materiais não se revelam adequados para os objetivos desta investigação.

#### - Parede de trombe clássica:

A parede de Trombe clássica constitui a configuração mais elementar deste sistema de aquecimento solar passivo, sendo considerada a matriz conceitual das variantes desenvolvidas posteriormente. É composta por uma parede maciça de elevada massa térmica, geralmente em betão, tijolo, pedra ou adobe, disposta atrás de um envidraçado orientado a sul, separada deste por uma câmara de ar com espessura típica de 3 a 12 cm. Este arranjo potencia o efeito de estufa e

regula a transferência de calor para o interior, através da absorção e armazenamento da radiação solar pela superfície opaca e da sua posterior libertação sob a forma de radiação ou convecção natural (Lechner, 2015).

O sistema pode ser entendido através da Figura 5.

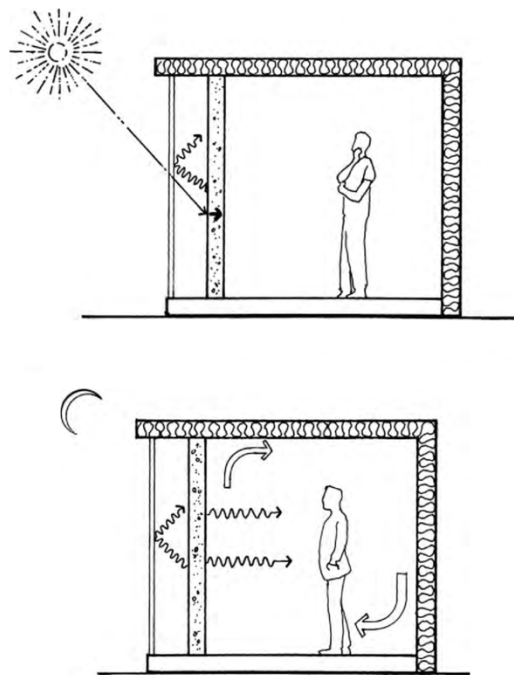


Figura 5: Funcionamento de uma parede de trombe. Adaptado de: Lechner (2015).

Diversos estudos têm procurado otimizar o desempenho da parede de Trombe clássica, com particular enfoque na escolha dos materiais e na espessura da parede. Abbassi, Naili e Dehmani (2022) analisaram o contexto climático mediterrânico da Tunísia com base em critérios energéticos e económicos, concluindo que a espessura ideal varia consoante o material: 0,195 m para tijolo, 0,132 m para adobe, 0,341 m para pedra e 0,322 m para betão. Apesar de exigir maior espessura, o betão revelou-se a opção mais económica, combinando bom desempenho térmico com baixo custo inicial e reduzida manutenção, resultando no menor custo total do ciclo de vida (LCC) e num período de retorno de apenas 2,56 anos. Resultados complementares apontam ainda que blocos de betão com argamassa apresentam elevada variabilidade térmica e fraca retenção de calor, comprometendo o conforto em ambas as estações, enquanto o betão e a pedra basáltica

evidenciaram desempenhos superiores, com boa capacidade de retenção e libertação de calor no período noturno. Estes achados sugerem que materiais com transmitância térmica superior a  $3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  têm maior potencial para assegurar conforto térmico em climas amenos.

Estudos recentes destacam que a aplicação de revestimentos exteriores com elevada absorvência solar pode aumentar significativamente a capacidade de armazenamento térmico das paredes de Trombe, desde que acompanhada por uma análise cuidada da espessura e do custo-benefício ao longo do tempo, considerando também as perdas por radiação e convecção no interior do sistema (Nwachukwu & Okonkwo, 2008).

O envidraçado constitui igualmente um fator determinante no desempenho da parede de Trombe. Moita (2011) relembra que parte da energia absorvida pela parede é retransmitida, por radiação e convecção, para o envidraçado, sendo posteriormente perdida para o exterior. Para mitigar este efeito, o autor propõe a aplicação, no lado interior do vidro, de uma folha transparente refletora ou, em alternativa, a utilização de revestimentos seletivos na superfície da parede. Estes ganhos resultam da capacidade deste tipo de vidro em permitir a entrada da radiação solar e, simultaneamente, reduzir a quantidade de calor que se perde para o exterior (Lamberts, 2014).

A gestão das aberturas e da ventilação é outro aspeto crítico. Nas variantes ventiladas, introduzidas por Trombe e Michel em 1956, as aberturas inferiores e superiores ativam a circulação natural do ar, prolongando a transferência de calor após o pôr-do-sol. Contudo, essas aberturas devem ser fechadas durante a noite para evitar perdas de calor. A circulação ocorre quando o ar quente escapa pela abertura superior para o espaço situado atrás da parede, sendo substituído por ar mais frio que entra pelas aberturas inferiores (Émi & Acciona, 2015).

O funcionamento é ilustrado na Figura 6.

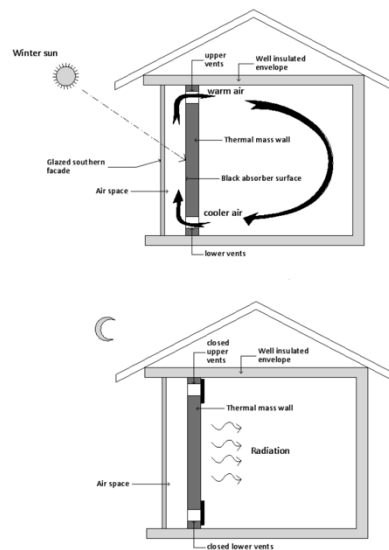


Figura 6: Funcionamento parede de trombe ventilada. Adaptado de: Émi & Acciona(2015).

Pesquisas mais recentes têm explorado o papel do canal de ar e de dispositivos de controlo. Sanchez e Hanco (2023) verificaram que a introdução de meios porosos aumenta a ventilação natural. Já Myroniuk et al. (2024) avaliaram experimentalmente uma parede de Trombe adaptada como sistema de ventilação passiva em habitações modulares, substituindo o envidraçado por uma chapa metálica preta de 3 mm de espessura como superfície absorvente, criando um canal de ar entre essa chapa e a parede interior. Foram testadas diferentes espessuras de camada de ar (40 mm, 70 mm e 100 mm) e dimensões de aberturas de ventilação. Os indicadores avaliados incluíram caudal de ar (L) e taxa de renovação (k). A melhor configuração foi obtida com 100 mm de espessura e abertura de 0,056 m<sup>2</sup>, alcançando um caudal máximo de 120 m<sup>3</sup>/h e uma taxa de renovação de 8,6 h<sup>-1</sup>. Estes resultados confirmam o potencial do sistema como solução eficaz de ventilação natural para habitações. Importa, contudo, sublinhar que o estudo testou apenas três espessuras da camada de ar (até 100 mm), não sendo possível determinar se valores superiores poderiam melhorar ainda mais a eficiência

O estudo de Simões, Manaia e Simões (2021) analisou parametricamente o desempenho de paredes solares e paredes de Trombe ventiladas em edifícios residenciais situados em várias regiões do clima mediterrânico. As simulações dinâmicas, realizadas no EnergyPlus, mostraram que a aplicação de paredes de Trombe em edifícios com elevada inércia térmica contribui para uma

maior estabilidade da temperatura interior e para uma redução significativa das necessidades de aquecimento: mais de 20% em cidades como Ancona e Veneza, e até 31% em Évora, sobretudo quando associadas a venezianas como sistema de sombreamento. No verão, verificou-se que a ventilação contínua da camada de ar contribui para o arrefecimento passivo da parede, reduzindo a carga térmica transmitida ao interior. As variações na largura do canal (5–30 cm) e no tamanho das aberturas revelaram impacto limitado no desempenho global, com diferenças máximas de cerca de 6%, o que sugere maior flexibilidade no dimensionamento e adaptação a diferentes contextos construtivos. Contudo, em zonas áridas do sul do Mediterrâneo, a aplicação isolada da parede de trombe pode agravar a carga térmica no verão. Nestes casos, a articulação com estratégias complementares, como a ventilação noturna, revelou-se eficaz, permitindo uma redução das necessidades de arrefecimento superior a 35%.

Outro campo de investigação recai sobre o isolamento térmico. A literatura recomenda, portanto, que o isolamento seja sempre conjugado com estratégias de aquecimento, sob pena de comprometer o desempenho global (Gonçalves & Graça, 2004). Apesar deste risco, o isolamento apresenta vantagens adicionais: reduz a espessura necessária da massa térmica, tornando o sistema mais eficiente em termos construtivos e de utilização de materiais (Chiras, 2002). Um estudo comparativo entre a parede de Trombe clássica e uma variante composta, designada por parede Trombe–Michel, realizado por Shen et al. (2007), veio reforçar esta abordagem. A variante composta integra uma camada adicional de isolamento térmico no lado interior da parede maciça, separada desta por um canal de ar ventilado, culminando numa estrutura tripla: vidro – parede de acumulação – isolamento. Simulações conduzidas com recurso ao TRNSYS e à metodologia de diferenças finitas (FDM), validadas por ensaios experimentais, revelaram que a parede composta apresenta melhor desempenho energético em condições de frio e céu encoberto, reduzindo significativamente as perdas térmicas noturnas, comuns na parede clássica. Por exemplo, observou-se que, enquanto a parede clássica registava oscilações térmicas elevadas (com temperaturas interiores da superfície da parede a variar entre 17 °C e 26 °C), a parede composta manteve variações inferiores a 1 °C em torno da temperatura interior de referência (19 °C), assegurando um fluxo térmico mais constante e eficaz durante a noite. Estes resultados sublinham o papel crucial do isolamento térmico quando estrategicamente integrado no sistema.

Em síntese, a parede de Trombe clássica distingue-se pela elevada inércia térmica da sua massa sólida, que lhe confere capacidade de suavizar as oscilações térmicas ao longo do dia. Esta resposta

lenta garante estabilidade em climas frios, mas implica risco de sobreaquecimento na ausência de mecanismos de controlo adequados. A literatura mostra que soluções como isolamento seletivo, ventilação natural controlada e dispositivos de sombreamento são essenciais para transformar esta configuração elementar num sistema eficaz ao longo do ano. Assim, a parede clássica evidencia simultaneamente o potencial e a fragilidade dos sistemas passivos: a sua simplicidade estrutural explica tanto a sua ampla difusão como as suas limitações, sendo que pequenas alterações de materiais ou configurações podem alterar significativamente a eficiência.

#### - Paredes de água

A parede de água constitui uma variante da parede de Trombe em que o elemento de massa térmica é a água, armazenada em superfícies transparentes ou opacas. O princípio de funcionamento é semelhante ao da Trombe clássica: a radiação solar atravessa um envidraçado orientado a sul e é absorvida pelo contentor, sendo posteriormente transferida para o espaço interior por radiação e convecção. A principal diferença reside na natureza do material, já que o calor específico da água é significativamente superior ao dos materiais convencionais de construção, como o betão, o tijolo ou o adobe, permitindo-lhe armazenar maior quantidade de energia térmica (Émi & Acciona, 2015).

Do ponto de vista experimental, vários autores comprovaram essa vantagem. O estudo de Singh e O'Brien (2022) baseou-se na construção e ensaio experimental de um protótipo laboratorial de parede de Trombe de água, concebido para avaliar o seu desempenho térmico e potencial multifuncionalidade. O modelo, com estrutura em madeira isolada e um reservatório de acrílico transparente preenchido com água, foi submetido a radiação artificial proveniente de uma lâmpada de halogeneto metálico de 1000 W durante cinco horas, simulando a incidência solar. Foram testadas diferentes configurações, incluindo a integração de uma lâmina de acrílico escuro e a adição de camadas de plexiglass na face posterior, permitindo comparar níveis distintos de absorção e isolamento. Os resultados evidenciaram eficiências de armazenamento térmico entre 57,9% e 83,2%, com temperaturas da água no topo do reservatório a atingir aproximadamente 56 °C, suficientes para reutilização em sistemas de água sanitária.

Resultados complementares foram apresentados por Turner et al. (1994, citado por Singh & O'Brien, 2022), que estudaram o desempenho de uma parede de Trombe de água composta por tubos plásticos de 7,6 cm de diâmetro embebidos numa parede estruturada com montantes. Durante

a estação de inverno, o sistema foi carregado durante 6 horas com ar quente ambiente e depois descarregado passivamente durante 18 horas. Os resultados mostraram que a temperatura da parede de Trombe se manteve aproximadamente 2,6 °C mais elevada mesmo após o ciclo de descarga, o que contribuiu para a redução da necessidade de aquecimento da habitação.

Também Adams et al. (2010), no Oregon, conduziram um estudo experimental em ambiente controlado para avaliar o efeito da espessura dos contentores de água. Foram comparadas três configurações (3, 6 e 9 polegadas  $\approx$  7,5, 15 e 23 cm). Os resultados indicaram que as paredes de 6 e 9 polegadas apresentaram desempenho superior, mantendo temperaturas interiores mais estáveis tanto em condições de frio como de calor. Os autores concluíram que paredes demasiado finas descarregam o calor rapidamente e comprometem a estabilidade, enquanto maiores espessuras aumentam a inércia e garantem libertação gradual e prolongada.

No contexto português, destaca-se o protótipo da parede de água apresentado em Oeiras. O sistema foi concebido com vidro triplo e dois espaços de ar: no inverno, um desses espaços é preenchido com água, atuando como massa térmica, enquanto o outro permanece com ar, funcionando como isolamento. No verão, ambos os espaços são preenchidos apenas com ar, eliminando a capacidade de armazenamento e reforçando o isolamento. Em condições ideais, esta solução demonstrou reduções de consumo energético na ordem dos 30%, evidenciando a sua eficácia como estratégia passiva de regulação térmica (Graça Costa, 2007).

Apesar das vantagens térmicas, importa referir que as soluções baseadas em água apresentam limitações técnicas significativas, sobretudo no que respeita à manutenção. O armazenamento prolongado de água em sistemas fechados pode favorecer o desenvolvimento de fungos, algas e bactérias, afetando a transparência das superfícies e comprometendo o desempenho e a durabilidade do sistema. Para mitigar estes efeitos, é comum recorrer à adição de bioinibidores, gelificantes ou tratamentos químicos (Saadatian et al., 2012).

Contudo, essa mesma característica que permite à água acumular grandes quantidades de energia num volume reduzido traduz-se também numa resposta térmica mais rápida: a mobilidade do fluido favorece correntes convectivas internas que aceleram a transferência de calor com o ambiente, antecipando a descarga noturna (Lechner, 2015). Esse efeito é ainda mais evidente em variantes modulares como a Transwall, onde a subdivisão em recipientes de menor volume amplifica a instabilidade, mesmo que a solução conjugue ganho indireto (armazenamento) e ganho direto (radiação transmitida). Para mitigar esta limitação, estudos apontam para dispositivos de

controle, como defletores transparentes, capazes de retardar a dissipação e prolongar a libertação de calor ao longo do ciclo diário (Saadatian et al., 2012).

Em síntese, as paredes de água, nas suas versões contínuas ou modulares, representam uma evolução significativa face às Trombe clássicas, tirando partido do elevado calor específico da água para acumular mais energia em menor volume. A sua adaptação em formatos como a Transwall demonstra o potencial de conjugar modularidade e ganhos diretos/indiretos, mas também evidencia a necessidade de dispositivos complementares que assegurem estabilidade térmica e controlem a descarga noturna.

#### - Sistema de Cobertura com Lago (*Roof Pond*)

Entre as diversas estratégias de climatização passiva, o sistema de cobertura com lago, conhecido como *roof pond*, destaca-se pela sua abordagem inovadora e reversível, baseada na utilização da água como elemento de armazenamento térmico. Esta solução explora o elevado calor específico da água para promover o equilíbrio térmico interior, aproveitando a variação diária e sazonal da temperatura ambiente.

Construtivamente, o sistema consiste numa massa líquida posicionada sobre uma cobertura plana, com profundidade entre 100 mm e 250 mm, contida em reservatórios normalmente pintados de preto para maximizar a absorção solar. Associado a esta massa líquida, encontra-se um conjunto de painéis isolantes móveis que regulam a exposição da água ao exterior, ajustando o seu comportamento térmico consoante a estação do ano (Émi & Acciona, 2015).

O sistema pode ser representado pela Figura 7.

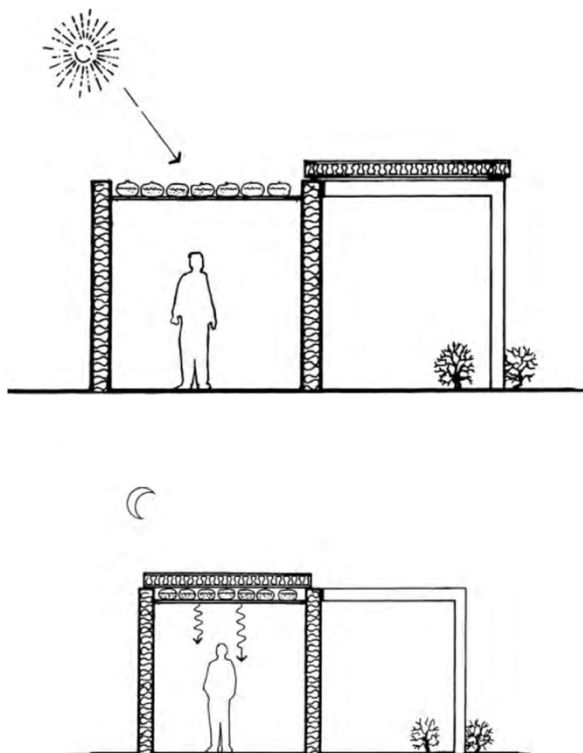


Figura 7: Funcionamento roof pond. Adaptado de: Lechner (2015).

Durante o inverno, os painéis são removidos durante o dia, permitindo que a radiação solar incida diretamente sobre a superfície da água, aquecendo-a. À noite, os painéis são recolocados, isolando a água da atmosfera e direcionando a energia armazenada para o interior do edifício, através da emissão de calor pela cobertura, que funciona simultaneamente como teto radiante. Já no verão, o funcionamento inverte-se: os painéis mantêm-se fechados durante o dia, bloqueando o ganho solar e permitindo que a água absorva o calor proveniente do interior; durante a noite, os painéis são abertos, permitindo a dissipação do calor para o céu, aproveitando o arrefecimento radiativo noturno (Watson e Labs, 1983).

A principal vantagem do *roof pond* reside na sua capacidade de atuação dual, como fonte de aquecimento ou arrefecimento, e na sua eficácia tanto em dias solarengos como nublados, devido à radiação uniforme a partir da cobertura. A presença da água diretamente acima do espaço

habitado permite uma distribuição térmica homogénea e contínua, contribuindo para o conforto interior ao longo do dia (Émi & Acciona, 2015).

Desta forma, o sistema *roofpond* evidencia a importância de uma abordagem dinâmica no desenho passivo, em que o controlo da radiação solar pode ser mediado por dispositivos adaptáveis. Algo ainda não observado na presente revisão. A articulação entre captação e dissipação térmica, viabilizada por componentes móveis, revela um modelo operativo reversível que valoriza a sazonalidade como premissa projetual. Esta lógica reforça a pertinência de integrar mecanismos ajustáveis que potenciem a resposta climática do edifício, ampliando a eficácia das estratégias passivas em diferentes contextos sazonais.

#### 2.4.1.3.1.3 Sistemas de ganho isolado

Os ganhos isolados correspondem a sistemas solares passivos em que o espaço coletor se encontra separado da zona habitada, estabelecendo uma ligação térmica indireta com o interior. Nestes sistemas, a radiação solar é captada por uma superfície envidraçada e acumulada numa massa térmica localizada num compartimento distinto (como estufas solares ou termossifões), sendo depois transferida para os espaços interiores por condução ou convecção natural do ar (Hall, 2010).

##### - Estufas

As estufas solares, também conhecidas como *sunspaces* ou solários, constituem o exemplo mais representativo dos sistemas de ganho isolado. Nestes casos, a radiação solar é captada num espaço separado do volume habitado e transferida para o interior por condução, através de paredes de massa térmica, ou por convecção natural, mediante aberturas que permitem a circulação do ar entre compartimentos (Moita, 2010; Lechner, 2015). Para além da radiação direta, estes espaços conseguem também aproveitar a radiação difusa, assegurando ganhos mesmo em dias de céu encoberto (Patel, 2024).

A Figura 8 ilustra o funcionamento de uma estufa.

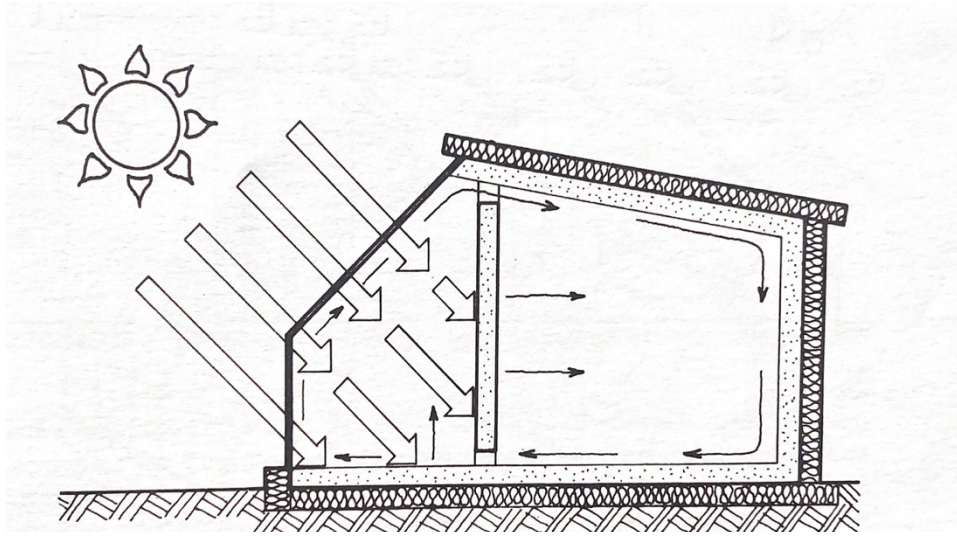


Figura 8: Representação estufa. Fonte: Moita (2010).

A literatura distingue dois tipos principais de estufas: a exposta e a integrada. A primeira apresenta maior superfície em contacto com o exterior, registando temperaturas internas mais baixas, perdas significativas durante a noite e amplitudes térmicas mais elevadas. Já a estufa integrada, parcialmente envolvida pela volumetria do edifício, beneficia de menor área exposta, maior ligação à massa térmica e temperaturas mais estáveis, resultando em melhor distribuição do calor armazenado (Moita, 2010). Em ambos os casos, a estufa desempenha um papel relevante como zona tampão, reduzindo perdas energéticas do compartimento adjacente em períodos noturnos ou de fraca insolação (Gonçalves & Graça, 2004).

Estudos indicam que as estufas solares podem reduzir os consumos energéticos para aquecimento em cerca de 15 a 30%, dependendo do clima e das características construtivas. O uso de contentores de água, pela sua elevada capacidade calorífica, baixo custo e facilidade de integração, é apontado como uma das soluções mais eficazes para armazenamento térmico neste tipo de sistemas (Moita, 2010).

Patel (2024) salienta que “minimizar o risco de sobreaquecimento nos compartimentos adjacentes às estufas constitui uma tarefa complexa de projeto”, acrescentando que a sua eficiência depende não só do clima, mas também do grau de utilização e da forma como o espaço é gerido pelos ocupantes. Outros autores reforçam que, para mitigar estes riscos, as estufas devem integrar dispositivos complementares de sombreamento externo e painéis móveis ou recolhíveis de

isolamento, capazes de reduzir as perdas noturnas e controlar os ganhos excessivos durante o verão (Moita, 2010; Émi&Acciona, 2015). Ilustrado na Figura 9.

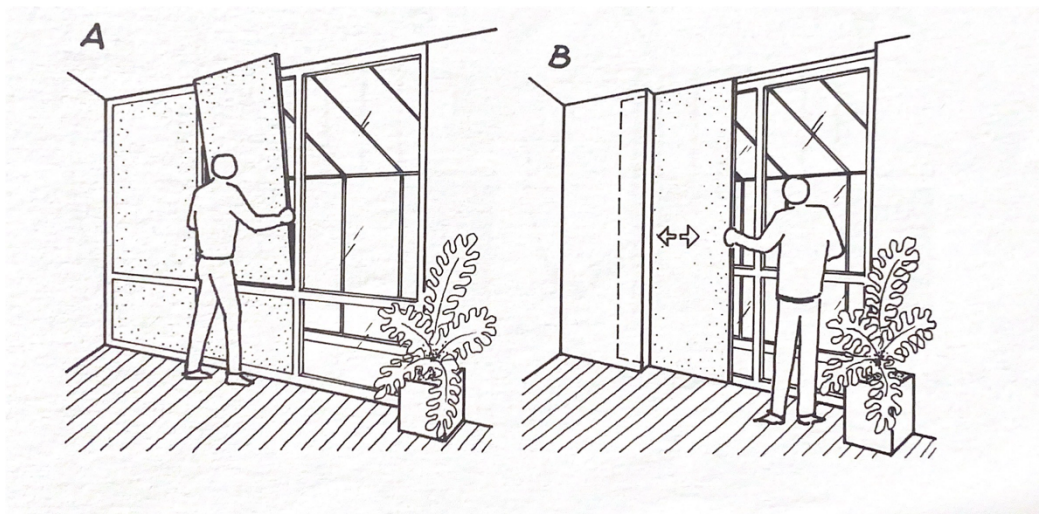


Figura 9: Isolamento móvel. Fonte: Moita (2010).

Em síntese, as estufas constituem sistemas versáteis de ganho isolado, capazes de conjugar aquecimento, regulação térmica e criação de espaço adicional. A literatura evidencia, mais uma vez, que a sua eficácia está fortemente condicionada pela sazonalidade, exigindo a integração de dispositivos complementares de sombreamento, ventilação e isolamento. Tal como observado nos *roof ponds*, também no caso das estufas a investigação abre espaço para soluções dinâmicas e adaptáveis, capazes de responder às diferentes exigências sazonais.

#### - Termossifão

O sistema de termossifão constitui uma solução de ganho isolado baseada na convecção natural, explorando o movimento ascendente do ar aquecido e descendente do ar arrefecido. Quando a radiação solar incide sobre a superfície de um coletor, o ar no seu interior aquece, expande-se e sobe, enquanto o ar mais frio é admitido pela base, estabelecendo-se um circuito contínuo de circulação. O calor resultante pode ser conduzido diretamente para o espaço habitado ou acumulado em elementos de elevada inércia térmica, prolongando a sua libertação para além do período de insolação (Hall, 2010).

O funcionamento pode ser ilustrado pela Figura 10.

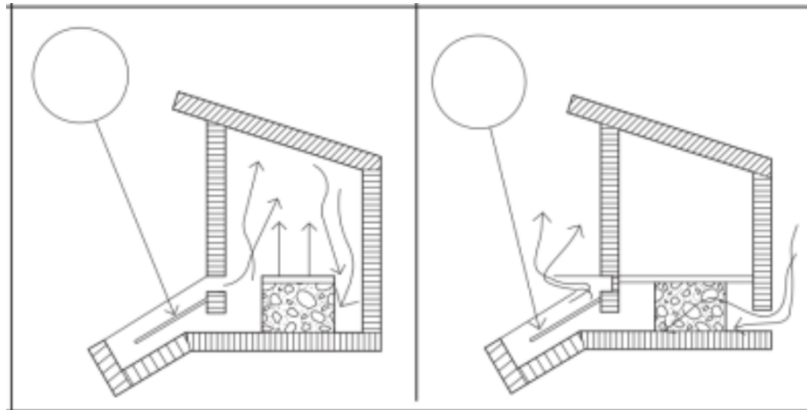


Figura 10: Sistema termossifão. Fonte: Hall (2010)

Durante o verão, o mesmo princípio pode ser explorado de forma inversa, transformando o sistema numa chaminé térmica. Nestes casos, o ar aquecido ascende e é expelido, induzindo a entrada de ar mais fresco proveniente do solo ou de zonas sombreadas, que atravessa a massa térmica e contribui para o arrefecimento do espaço interior. Assim, o termossifão evidencia uma lógica de funcionamento dual e adaptativa, capaz de responder às exigências sazonais sem recorrer a energia auxiliar (Émi & Acciona, 2015).

Em síntese, o sistema de termossifão distingue-se por explorar o ar como fluido de transferência térmica, através de circuitos convectivos naturais que permitem tanto a acumulação de calor em massas específicas no inverno como a sua utilização inversa como chaminé térmica no verão. A possibilidade de associar o coletor a massas de armazenamento deslocadas, evidencia uma maior flexibilidade de integração em relação a outros sistemas de ganho passivo, ainda que a sua aplicação dependa de um correto dimensionamento e da exposição solar direta.

#### 2.4.1.3.1.4 Arrefecimento

##### - Ventilação natural

A ventilação natural é uma estratégia passiva que se baseia no movimento do ar induzido por diferenças de pressão ou temperatura entre o interior e o exterior do edifício. Quando o ar interior aquece, torna-se menos denso e tende a subir, criando gradientes de pressão que favorecem a

entrada de ar mais fresco. Simultaneamente, a ação do vento sobre as fachadas pode acelerar este processo, assegurando a substituição do ar interior por ar mais frio e promovendo o arrefecimento do espaço (Zhang et al., 2021).

Uma das formas mais eficazes desta estratégia é a ventilação cruzada, que ocorre quando existem aberturas em fachadas opostas ou adjacentes. Este arranjo permite a criação de um percurso de entrada e saída do ar, em que o vento atua como motor do escoamento: o ar fresco entra por uma fachada e o ar quente é expulso pela abertura oposta. A sua eficiência depende da orientação do edifício em relação aos ventos dominantes, da diferença de pressão entre fachadas e da ausência de obstáculos que comprometam a continuidade do fluxo (Noguchi, 2016).

Complementarmente, a ventilação noturna consiste na abertura de janelas durante a noite, aproveitando as temperaturas exteriores mais baixas para promover o arrefecimento natural do edifício. Esta estratégia não só permite renovar o ar interior, como também descarrega o calor acumulado nas massas térmicas internas (Gonçalves & Graça, 2004).

No caso de Lisboa, como visto na secção 2.2, a nortada de verão desempenha um papel relevante. Este vento dominante do quadrante norte, com intensidades médias de 4 a 6 m/s, pode atuar como motor natural da ventilação cruzada, permitindo que o ar fresco entre pelas aberturas a norte e expulsa o ar aquecido para sul. No entanto, tal como destacado por Debnath et al. (2024), em contextos urbanos densos, a proximidade entre edifícios e a configuração dos espaços construídos reduzem significativamente a eficácia deste tipo de ventilação, uma vez que o fluxo de ar tende a ser bloqueado, canalizado inadequadamente ou desviado. Lisboa, pelas suas características morfológicas, como a elevada compacidade em certas zonas, o estreitamento dos vãos urbanos e a orientação irregular do traçado urbano, pode apresentar estas limitações de forma acentuada. Esta condição é agravada pela ocorrência de episódios de ilha de calor urbano, em que as temperaturas noturnas se mantêm elevadas e a renovação do ar é comprometida, dificultando a dissipação do calor acumulado, como observado também na secção 2.2.

Estudos de simulação dinâmica confirmam o impacto desta estratégia. Um estudo reporta que a ventilação natural através da abertura de janelas pode reduzir a temperatura interior em cerca de 2 °C com uma renovação de ar por hora, 3 °C com duas renovações e até 7 °C com 11 renovações por hora, traduzindo-se numa redução de 8% na carga anual de arrefecimento (Florides et al., 2002). No caso específico da ventilação cruzada, investigações recentes indicam que pode atingir taxas de renovação de até 5 trocas de ar por hora, representando uma economia energética de 35%,

enquanto o efeito chaminé pode contribuir para uma redução de 20% (Debnath et al., 2024). De forma complementar, a literatura sobre chaminés solares, dispositivos que exploram o empuxo térmico (subida natural do ar aquecido, menos denso, que cria sucção para entrada de ar fresco pelas aberturas inferiores), aponta taxas de renovação entre 0,2 e 15 ACH e reduções de temperatura até 5 °C em sistemas autónomos, podendo alcançar valores superiores quando combinadas com outras estratégias passivas, como torres de vento ou arrefecimento evaporativo (Zhang et al., 2021).

Para além destas soluções tradicionais, estudos recentes têm explorado abordagens geométricas inovadoras. Stein-Montalvo et al. (2024) demonstraram que *louvers* angulados (lâminas inclinadas que captam o vento e o redirecionam para o interior de um espaço) e superfícies inspiradas no kirigami (técnica japonesa de corte em papel que, ao ser aplicada em materiais de construção, gera aberturas tridimensionais adaptativas capazes de canalizar o vento) conseguem aumentar significativamente a ventilação em zonas de estagnação, sobretudo em contextos urbanos densos. Já Najafi Ziarani et al. (2023) mostraram que pequenas alterações nos vãos podem ter impacto substancial: a introdução de *guide vanes* (aletas fixas que orientam o fluxo de ar para dentro do espaço) multiplicou em até cinco vezes a taxa de renovação em ventilação unilateral, enquanto louvers convencionais mal dimensionados reduziram a eficácia, apesar de trazerem vantagens em termos de sombreamento e privacidade.

Desta forma, no contexto de Lisboa, a ventilação natural não deve ser entendida apenas como mecanismo de conforto, mas também como condicionante de projeto. A relação entre a direção dominante dos ventos e a localização dos elementos de armazenamento térmico pode transformar-se num fator determinante para o desempenho do artefacto, ao garantir tanto a dissipação do calor no verão como a sua reutilização nos ciclos seguintes. Para além da orientação e do dimensionamento das aberturas, a integração de elementos complementares que conduzam e regulem o ar pode revelar-se decisiva para potenciar o desempenho passivo do edifício em contextos urbanos menos favoráveis.

#### - Proteções solares

As proteções solares constituem um dos elementos fundamentais no design passivo dos edifícios, dado o seu papel na regulação da radiação solar incidente, no controlo do ofuscamento e na promoção de uma iluminação natural difusa, essencial para o conforto visual dos ocupantes. A

escolha do tipo e da dimensão dos dispositivos de sombreamento depende diretamente da orientação da janela, sendo que elementos horizontais são geralmente mais eficazes em fachadas orientadas a norte e sul, enquanto, nas orientações este e oeste, dispositivos verticais se mostram mais adequados para bloquear a radiação solar proveniente de ângulos baixos. Nas orientações sudeste e sudoeste, o desafio é maior, uma vez que o sol se encontra em altitudes intermédias, o que inviabiliza a eficácia de sistemas exclusivamente horizontais ou verticais, sendo por isso necessária uma combinação de ambos para garantir um desempenho satisfatório (Springer).

Os sombreadores podem ser posicionados no interior ou no exterior do edifício, sendo que os exteriores são geralmente preferíveis, uma vez que impedem a penetração direta da radiação solar e reduzem os ganhos térmicos por convecção. Já os interiores, apesar de bloquearem a luz, podem contribuir para o sobreaquecimento do espaço. Entre as soluções exteriores, os dispositivos fixos são bastante comuns, mas podem revelar-se limitativos, uma vez que, ainda que dimensionados para permitir a entrada de radiação solar no inverno, podem restringir também a radiação difusa, essencial para a iluminação natural nesta estação. Neste sentido, sistemas móveis ou ajustáveis revelam-se mais eficazes, pois permitem uma maior adaptação às variações sazonais (Moita, 2010).

Além dos dispositivos tradicionais, como beirais, lâminas e grelhas, novas soluções têm sido desenvolvidas para potenciar a eficiência energética e o conforto ambiental. A aplicação de películas de baixa emissividade (low-E) surge como uma alternativa de retrofit não intrusiva. Num estudo de caso em Gävle, na Suécia, a utilização de uma película comercial em janelas duplas permitiu reduzir em 36% as perdas no inverno e em 35% os ganhos no verão, com impacto direto na diminuição do consumo energético e das horas de desconforto (Moghaddam et al., 2021).

Inovações recentes incluem também o desenvolvimento de materiais biobaseados com capacidade de resposta passiva às condições ambientais. Cheng et al. (2024) exploraram a utilização de celulose impressa em 4D para criar sistemas de sombreamento adaptativo que reagem à temperatura e à humidade. Estes dispositivos permanecem abertos no inverno, favorecendo a entrada de radiação solar, e fecham-se no verão, reduzindo os ganhos térmicos, apresentando baixo custo, escalabilidade e robustez em ensaios de longo prazo.

Outra solução inovadora recorre a módulos de sombreamento dinâmico baseados em vigas bimetalicas que se deformam elasticamente em função da temperatura. Esse movimento, transmitido a cascas acopladas, permite que estas se abram ou fechem de forma semelhante a

pétalas, dispensando motores ou consumo energético. Ensaio demonstraram reduções de até 43% nas cargas de aquecimento e arrefecimento, com melhorias adicionais no conforto térmico e visual (Loonen et al., 2014).

Assim, no âmbito do design passivo, as proteções solares devem ser concebidas para garantir que no verão limitam eficazmente os ganhos solares diretos e o ofuscamento, enquanto, no inverno, permitem a entrada da radiação benéfica que contribui para o aquecimento e a iluminação natural dos espaços. Este equilíbrio pode ser alcançado através da escolha criteriosa de geometrias adequadas a cada orientação e, sobretudo, pela integração de soluções móveis ou adaptativas, que asseguram flexibilidade ao longo do ano e potenciam a qualidade do ambiente interior.

#### - Paredes verdes

As paredes verdes são sistemas vegetais aplicados verticalmente sobre as fachadas dos edifícios, podendo assumir a forma de fachadas verdes simples, onde trepadeiras se apoiam diretamente na parede ou em estruturas de suporte, ou de sistemas modulares mais complexos, denominados *living walls*, compostos por substrato e módulos técnicos que albergam a vegetação (Li et al., 2019; Wong et al., 2009). Ambos os sistemas funcionam como uma camada adicional entre o edifício e o meio exterior, promovendo sombreamento, evapotranspiração e aumento da inércia térmica da envolvente, com impacto direto na regulação térmica do interior e na redução do consumo energético (Privat & Guerrieri, 2021).

Em climas quentes e temperados, como o mediterrânico, os efeitos mais significativos das paredes verdes estão associados à redução dos ganhos térmicos no verão, pela criação de barreiras vegetais que absorvem e refletem parte da radiação solar. Wong et al. (2009) identificaram reduções no consumo energético entre 20% e 30% em edifícios equipados com fachadas verdes. Resultados semelhantes foram observados por Li et al. (2019), num estudo de simulação microclimática realizado em Chenzhou, China, onde se verificaram reduções interiores de temperatura até 4,5 °C em *living walls* com substrato de elevada retenção de água (*super soil*), em contraste com quedas mais modestas de 1,5 °C em fachadas com trepadeiras simples. Os autores também observaram poupanças energéticas diárias superiores a 19% nos sistemas mais eficientes, reforçando a importância da escolha do tipo de substrato e do sistema construtivo.

Embora o impacto direto destas soluções no ar urbano envolvente seja limitado (com reduções inferiores a 0,25 °C), o seu contributo para o conforto térmico e eficiência energética é amplamente

reconhecido (Li et al., 2019). Em regiões com invernos frios, as paredes verdes também podem reter calor acumulado durante o dia, contribuindo para reduzir perdas térmicas noturnas e atuando como isolamento adicional (Jim, 2014).

A eficácia das paredes verdes em climas mediterrânicos exige uma abordagem de projeto cuidadosa, que considere a orientação solar, a densidade da vegetação, a espessura e composição do substrato e a adequação ecológica das espécies utilizadas. O estudo de Patti, Musarella e Spampinato (2025) desenvolveu uma metodologia sistemática para selecionar espécies vegetais nativas adaptadas à radiação intensa e baixa disponibilidade hídrica, identificando 368 espécies adequadas para paredes verdes urbanas, com ênfase em famílias como Asteraceae, Fabaceae e Lamiaceae. Este enfoque ecológico é essencial para garantir a resiliência das soluções, minimizar necessidades de rega e promover a biodiversidade urbana.

Do ponto de vista construtivo, os sistemas *living wall* mais eficazes apresentam camadas técnicas específicas, incluindo uma membrana impermeável anti-raiz, painéis de isolamento térmico, substrato leve com elevada capacidade de retenção de humidade e espécies vegetais selecionadas com base em parâmetros como índice de área foliar (*Leaf Area Index*), resistência estomática e altura da vegetação. Nestes casos, reduções de temperatura superficial até 11 °C foram registadas no verão, com melhor desempenho nas fachadas orientadas a sul (Sustainability, 2020).

Simulações energéticas complementadas com Análise de Ciclo de Vida (ACV) demonstram que soluções modulares bem otimizadas, como aquelas compostas por módulos de polietileno reciclado e fibras de coco, podem alcançar poupanças anuais de energia até 24%, com impactos ambientais reduzidos face a soluções convencionais (Buildings, 2024). Contudo, estes sistemas também apresentam desafios operacionais importantes, incluindo necessidade de manutenção contínua, riscos de infiltrações, queda de folhas, acesso de insetos e animais e obstrução de drenagens (Mohammed, 2022), pelo que a sua adoção deve ser ponderada em função do contexto urbano e dos recursos disponíveis para a sua manutenção a longo prazo.

Assim, no âmbito do design passivo, a integração de paredes verdes deverá considerar sistemas modulares compostos por substratos leves e vegetação criteriosamente selecionada, adaptada às condições do clima mediterrânico. A sua aplicação em fachadas expostas à radiação solar direta permite reforçar o sombreamento e potenciar os efeitos da evapotranspiração, contribuindo para a regulação térmica dos espaços interiores. Para garantir o desempenho e a durabilidade do sistema, é essencial atender à orientação da fachada, à composição das camadas técnicas e à escolha de

espécies nativas com baixa exigência hídrica, assegurando simultaneamente benefícios ambientais e viabilidade de manutenção ao longo do tempo.

### III. Metodologia

Conforme delineado no desenho da investigação, a metodologia adotada estrutura-se segundo o modelo *Double Diamond*, combinando distintos métodos de recolha, análise e validação de dados. A presente secção detalha os instrumentos utilizados em cada fase e o seu contributo específico para a construção e avaliação da proposta.

#### 3.1 Fase *Discover*

Complementando a revisão teórica já apresentada, esta fase prossegue agora com a recolha de dados empíricos, aprofundando o contexto real da investigação.

##### 3.1.1 Inquérito por questionário a habitantes da cidade de Lisboa

###### - Objetivo

A revisão da literatura evidenciou que as estratégias de design passivo são mais eficazes quando atuam de forma combinada e adaptada ao contexto de utilização real. Para que haja dissipação eficaz do calor acumulado, por exemplo, é necessária ventilação cruzada, o que pressupõe a criação de correntes de ar. Para que a massa térmica capte calor solar no inverno, é necessário permitir a entrada de radiação, o que implica ações simples como abrir cortinas e persianas durante o dia. Estes exemplos demonstram que a eficácia das estratégias passivas depende diretamente da ação dos utilizadores, ainda que muitas vezes de forma inconsciente.

Neste sentido, o inquérito por questionário teve como principal objetivo recolher dados empíricos sobre os comportamentos térmicos dos residentes da cidade de Lisboa, com especial foco nas práticas adaptativas relacionadas com estratégias de climatização passiva, nas perceções de conforto ao longo das estações e nas barreiras práticas à sua aplicação. Estes dados permitiram compreender como os utilizadores interagem com o seu espaço habitacional e forneceram um

contributo essencial para o desenvolvimento de uma proposta de design passivo informada, contextualizada e coerente com a vivência quotidiana.

- Tipo de pesquisa

A presente pesquisa segue uma abordagem quantitativa, com o objetivo de compreender os hábitos, motivações e percepções dos moradores de Lisboa sobre a climatização das suas habitações. Este método foi selecionado pela sua capacidade de gerar dados objetivos e mensuráveis, permitindo a identificação de padrões comportamentais e a análise de relações entre variáveis (Prodanov & Freitas, 2013).

- Método de recolha de dados

O estudo utilizou um inquérito por questionário de administração direta, aplicado online através da plataforma Google Forms, devido à sua capacidade de obter respostas padronizadas e comparáveis. Conforme destacado por Carmo e Ferreira (1998), o questionário é uma ferramenta essencial para a exploração sistemática de problemas bem definidos, permitindo não apenas a recolha e quantificação de dados relevantes, mas também a identificação de correlações significativas entre as variáveis analisadas, promovendo assim uma compreensão mais aprofundada das questões em investigação.

A elaboração do instrumento foi guiada pelo método AEIOU (Atividades, Ambientes, Interações, Objetos e Usuários), desenvolvido para observar e categorizar informações de forma sistemática (Martin & Hanington, 2012). Este método, originalmente concebido para etnografia e design, foi adaptado ao contexto do presente estudo, estruturando o questionário nas seguintes dimensões:

- Atividades: Comportamentos e ações relacionadas ao uso de métodos de climatização.
- Ambientes: Características físicas das habitações, como isolamento térmico e orientação solar.
- Interações: Relações entre os participantes e as práticas ou objetos utilizados, avaliando, por exemplo, motivações e percepções de eficácia.
- Objetos: Elementos materiais e dispositivos associados ao conforto térmico.
- Usuários: Dados demográficos essenciais para compreender contextos e preferências individuais.

Esta adaptação permitiu compreender a situação estudada como um sistema integrado, onde cada elemento (atividades, ambientes, interações, objetos e usuários) se influencia mutuamente. Essa abordagem possibilitou captar tanto realidades específicas quanto as interações complexas entre os diferentes fatores, fornecendo uma visão integrada do contexto estudado.

O questionário incluiu uma introdução que apresentou os objetivos do estudo, assegurando o anonimato e o consentimento informado dos participantes. Foram formuladas perguntas fechadas e de resposta múltipla para captar informações específicas de forma padronizada. Escalas de Likert foram utilizadas para medir percepções subjetivas, como conforto térmico e eficácia, enquanto perguntas escalonadas avaliaram a frequência de uso de métodos de climatização.

Adicionalmente, foi incluída a opção de resposta "Outra" sempre que pertinente, permitindo aos participantes apresentar respostas alternativas, o que enriquece a análise com dados não previstos nas opções padrão (Leedy & Ormrod, 2020).

Para complementar, foi desenvolvida uma tabela que justifica detalhadamente cada questão, indicando a sua pertinência e objetivo:

*Tabela 7: Tabela justificativa das questões no inquérito por questionário a habitantes da cidade de Lisboa. Fonte: a autora.*

Questão	Pertinência	Objetivo
1- Idade	Identificar padrões de comportamento e percepções entre diferentes faixas etárias.	Avaliar como a idade influencia os hábitos e percepções sobre conforto térmico e climatização.
2- Género	Compreender diferenças significativas nas percepções ou hábitos entre géneros.	Explorar se o género impacta experiências e necessidades relacionadas ao conforto térmico e climatização.
3- Situação Profissional	Compreender o regime ocupacional das habitações, identificando em que	Adequar a resposta térmica do artefacto aos períodos reais de ocupação, garantindo conforto nos momentos em

	momentos do dia estas são mais utilizadas.	que os moradores efetivamente utilizam o espaço.
4- Tipo de habitação	Explorar como o tipo de habitação influencia a experiência térmica dos moradores.	Avaliar como o tipo de moradia impacta o conforto térmico e o uso de diferentes métodos de climatização.
5- Freguesia de residência em Lisboa	Investigar a influência do microclima nos hábitos de climatização.	Correlacionar as características das zonas urbanas com os hábitos de climatização e desafios específicos de conforto térmico.
6- Quais das seguintes características estão presentes na sua habitação?	Explorar as características arquitetónicas e estruturais que influenciam diretamente o desempenho térmico das habitações.	Mapear as características arquitetónicas e construtivas das habitações, como isolamento, orientação solar ou revestimentos, por forma a entender o seu impacto térmico.
7/8/9/10- Que práticas naturais/equipamentos utiliza para refrescar/aquecer a sua habitação durante o verão/inverno?	Compreender os comportamentos adaptativos e práticas de controlo térmico.	Identificar métodos mais comuns e padrões de uso nas diferentes estações, contribuindo para decisões de design mais adequadas.
7.1/8.1/9.1/10.1- Com que frequência utiliza essas/esses práticas/equipamentos?	Analisar a dependência de práticas naturais e	Quantificar a frequência de utilização, permitindo comparações entre métodos e estações do ano.

	equipamentos em ambas as estações.	
7.2/8.2/9.2/10.2- Porque utiliza essas/esses práticas naturais/equipamentos?	Investigar os motivos que levam os moradores a adotar práticas específicas de climatização.	Identificar os fatores determinantes na escolha de práticas de climatização, categorizando as motivações em custo-benefício, praticidade, sustentabilidade, eficácia ou hábito.
7.3/8.3/9.3/10.3- Quão eficazes considera essas/esses práticas/equipamentos?	Compreender como os moradores avaliam a eficácia das práticas e equipamentos utilizados para climatização.	Avaliar a percepção dos moradores sobre a eficácia das práticas e equipamentos, determinando quais são considerados mais ou menos eficazes.
11- Nos últimos anos, notou alterações no clima de Lisboa?  12- Essas alterações climáticas influenciaram os seus hábitos de climatização?  13- Se os seus hábitos mudaram, quais foram os principais motivos?	Explorar como as alterações climáticas percebidas estão a moldar os desafios térmicos nas habitações de Lisboa.	Determinar se as alterações climáticas percebidas levaram a mudanças nos hábitos de climatização, identificando as principais tendências de adaptação e motivações.
14- Por conforto térmico entende-se a sensação de bem-estar ou equilíbrio térmico, em que a pessoa não	Recolher dados subjetivos sobre conforto térmico nas estações.	Avaliar o grau de satisfação com as condições térmicas e identificar pontos de desconforto que possam ser melhorados.

sente frio nem calor excessivo. Assim, numa escala de 1 a 5, sendo 1 “Muito desconfortável” e 5 “Muito confortável”, como avalia o conforto térmico da sua habitação: 14.1/14.2 - No verão/inverno		
---	--	--

Por fim, algumas questões foram deliberadamente repetidas, como aquelas relacionadas às práticas naturais e aos equipamentos de climatização, aplicadas tanto no inverno quanto no verão. Essa repetição possibilitou uma análise comparativa das motivações e percepções dos participantes em diferentes contextos climáticos, facilitando a identificação de padrões (versão integral do instrumento no Anexo A).

#### - Amostra

Para a seleção dos participantes, foram definidos critérios claros de inclusão e exclusão: apenas indivíduos com idade superior a 18 anos e residentes na cidade de Lisboa foram considerados elegíveis para o estudo. O cálculo do tamanho ideal da amostra foi realizado através da ferramenta disponibilizada pelo site *Delighted*, utilizando um nível de confiança de 95% e uma margem de erro de 5%. Com base no número estimado de habitações da cidade de Lisboa ( $\approx 320\ 000$ , Câmara Municipal de Lisboa, 2023), determinou-se que seria necessário recolher dados de, no mínimo, 384 respondentes para garantir a representatividade estatística da amostra.

O questionário foi divulgado através de redes sociais e contactos pessoais, recorrendo assim a uma amostragem por conveniência. No total, foram obtidas 170 respostas válidas, número inferior ao recomendado pelo cálculo inicial, não sendo possível assegurar plenamente a representatividade estatística da população-alvo. Ainda assim, os dados recolhidos oferecem uma base relevante para a análise exploratória e para a identificação de tendências significativas.

#### - Validação do instrumento

O questionário foi submetido a um processo de validação que incluiu duas etapas principais. Primeiramente, foi avaliado por dois especialistas na área do design, que analisaram o instrumento com o objetivo de assegurar a sua clareza, coerência e alinhamento aos objetivos do estudo. Em seguida, realizou-se um teste piloto com 10 participantes, utilizando a técnica de 'pensar alto' (*think-aloud protocol*), conforme descrito por Leedy e Ormrod (2020). Nesta técnica, os participantes foram incentivados a verbalizar os seus pensamentos enquanto respondiam ao questionário, permitindo a identificação de possíveis ambiguidades ou dificuldades na interpretação das questões. Com base no feedback obtido, foram realizadas revisões para aperfeiçoar a redação das perguntas, garantindo maior clareza e aumentando a validade do instrumento.

#### - Considerações éticas

O consentimento informado foi obtido de todos os participantes ao clicaram no link do questionário, indicando a sua concordância voluntária em participar. Adicionalmente, a introdução do questionário esclareceu que as respostas seriam anónimas e que os dados recolhidos seriam tratados de forma confidencial, garantindo a proteção da privacidade dos participantes.

#### - Estratégia de análise de dados

Os dados recolhidos foram analisados por meio de uma abordagem descritiva, com o objetivo de calcular frequências, percentagens e médias. Este método permitiu descrever os hábitos de climatização, as perceções de eficácia e o conforto térmico reportados pelos participantes. A análise descritiva é reconhecida como uma abordagem eficaz para sintetizar e interpretar dados quantitativos, oferecendo uma visão clara dos padrões e tendências observados (Creswell, 2009). Além disso, as respostas foram posteriormente cruzadas com a revisão da literatura, permitindo contextualizar os resultados e aprofundar a análise com base em evidências previamente documentadas. Para viabilizar essa análise, foi utilizada a ferramenta Google Forms, que possibilitou a recolha e organização dos dados. Esta ferramenta é amplamente utilizada em pesquisas quantitativas pela sua acessibilidade e eficiência na gestão de dados (Creswell, 2009). Ainda assim, para o cruzamento entre variáveis, recorreu-se ao Microsoft Excel, que possibilitou

a sistematização dos dados e o cálculo de médias, facilitando a identificação de padrões e relações estatísticas relevantes.

#### - Resultados e discussão

A amostra deste estudo é composta por 170 participantes, maioritariamente do género feminino (62,9%), com predominância nas faixas etárias entre os 25 e 44 anos. Embora a literatura aponte para possíveis diferenças na perceção de conforto térmico associadas ao género e à idade, sendo frequentemente observada uma maior sensibilidade ao conforto térmico entre mulheres e idosos (Fanger, 1970; Lamberts, 2014), os resultados obtidos no presente estudo não evidenciaram diferenças significativas no conforto térmico reportado com base nessas variáveis. Assim, a análise centrou-se sobretudo em elementos de ordem construtiva e comportamental, os quais demonstraram exercer um impacto mais direto e consistente nas estratégias de climatização e na perceção de conforto dos ocupantes.

No que diz respeito ao regime de ocupação, verificou-se que 72,9% dos participantes trabalham a tempo inteiro, o que significa que as habitações são ocupadas sobretudo ao final da tarde, durante a noite e no início da manhã. Este padrão de uso torna fundamental alinhar as estratégias de climatização com esses períodos, maximizando o conforto térmico precisamente nos momentos em que os espaços são efetivamente utilizados.

Em ambas as estações, os inquiridos privilegiam práticas naturais. No verão, 88,8% recorrem frequentemente/sempre a estratégias comportamentais, criar correntes de ar (81,2%), fechar cortinas/persianas (73,5%) e ventilar à noite (50,6%). Toldos surgem apenas em 19,4%. Os motivos principais de utilização são hábito (65,9%), custo-benefício (61,2%) e eficácia percebida (58,2%), com praticidade (51,8%) e sustentabilidade (24,1%) a pesarem menos. A eficácia percebida é alta (51,2% nota 4; 20,6% nota 5; sem notas 1), o que reforça a confiança nestas soluções. O uso de equipamentos é mais contido: apenas 9,9% “sempre”, 35,6% uso moderado, 21,8% ocasional, 5% muito raramente e 40,6% declaram não usar nenhum método mecanizado. Entre os equipamentos, a ventoinha (45,9%) domina, seguida do ar-condicionado (18,2%) e do climatizador evaporativo (1,2%); os motivos concentram-se na eficácia (48,5%), hábito (43,6%) e praticidade (40,6%), com menor peso do custo-benefício (9,9%) e da sustentabilidade (2%). A eficácia percebida é mais dividida (38,6% nota 3; 34,7% nota 4; 25,7% nota 5). Em média, as práticas no verão atingem 4,22 e os equipamentos 3,1.

No inverno, a preferência por práticas mantém-se e até se intensifica: 91,7% usam-nas frequentemente/sempre, sobretudo abrir cortinas para captar sol (84,1%), fechar janelas (81,2%) e portas (45,3%) para concentração do calor. As motivações repetem o padrão, hábito (68,5%) e custo, benefício (66,1%), seguidos de eficácia (45,8%) e praticidade (44,0%); a sustentabilidade é residual ( $\approx 22,0\%$ ). A eficácia percebida das práticas é elevada, mas menos consensual do que no verão (55,4% nota 4; 6,5% nota 5; 33,3% nota 3). Já os equipamentos ganham tração: 32,9% uso frequente; 30,9% moderado; 25,7% baixo; 9,9% sempre. Destacam-se aquecedor elétrico (25,9%), a óleo (24,1%) e AC reversível (19,4%); 10,6% não usam equipamento. A eficácia percebida é superior à de verão (51,3% nota 4; 32,9% nota 5  $\rightarrow$  84,2% em 4–5), provavelmente devido à resposta mais imediata destes equipamentos em contexto de frio e à perceção de menor eficácia das estratégias passivas nesta estação. Em média, práticas no inverno 4,46 e equipamentos 3,2.

Tal como é descrito na literatura sobre o modelo adaptativo de conforto térmico, os ocupantes tendem a intervir ativamente no ambiente habitacional para restaurar o conforto quando expostos a variações térmicas (Nicol & Humphreys, 2010). Os dados recolhidos demonstram a aplicação prática deste modelo no contexto habitacional de Lisboa, com a maioria das habitações a operar num regime híbrido que combina práticas passivas e uso pontual de equipamentos ativos e, ainda confirma a relevância da aplicação da norma EN 16798:2014 para a avaliação do conforto térmico no presente estudo.

Apesar deste padrão “práticas primeiro”, o conforto percebido difere entre estações: no verão, 54,2% sentem-se confortáveis (42,4% nota 4; 11,8% nota 5), enquanto no inverno apenas 30% atingem 4–5. Esta assimetria abre a questão “porquê, se o esforço térmico parece semelhante?”.

Parte da resposta está nas características construtivas. Em pares comparáveis, a envolvente envidraçada e o isolamento explicam variações de conforto sob esforços semelhantes. A análise comparativa entre duas tipologias construtivas permite observar de forma clara o impacto de elementos específicos na perceção de conforto térmico. Ambas as habitações em análise apresentam paredes maciças e boa orientação solar, mas diferem no tipo de envolvente envidraçada: em Marvila observa-se a presença de vidro duplo, enquanto nas Avenidas Novas se presume a existência de janelas simples.

No verão, apesar da maior intensidade de utilização de equipamentos nas Avenidas Novas (4,6 face a 3,9 em Marvila), o conforto térmico reportado é inferior (2,6 vs. 3,0). No inverno, repete-se a mesma tendência: em Marvila o conforto médio foi de 3,0, superior ao das Avenidas Novas (2,0),

embora ambas recorressem a níveis semelhantes de práticas naturais (4,1 vs. 4,3) e a intensidade de equipamentos fosse até ligeiramente inferior (4,0 vs. 4,6). Ou seja, a presença de janelas eficientes em Marvila permitiu alcançar melhores níveis de conforto com menor esforço energético.

Tal como é sublinhado na literatura, as janelas constituem um dos principais pontos de perda e ganho térmico da envolvente (Moita, 2010). A comparação entre estes dois casos confirma empiricamente essa evidência: a simples diferença no tipo de caixilharia e envidraçado traduziu-se em melhorias substanciais na perceção de conforto. A conjugação de massa térmica, vidro duplo e orientação solar favorável garantiu, no caso de Marvila, um desempenho mais equilibrado ao longo do ano.

Noutro contraste, isolamento + vidro duplo (Benfica: práticas verão 4; equipamentos 0; conforto verão 4; no inverno práticas 4; equipamentos 2; conforto 3) supera paredes maciças + vidro duplo (Marvila) com menor dependência de equipamentos, indicando que o isolamento controla melhor ganhos/perdas térmicas. Em síntese: com janelas eficientes e isolamento, o conforto acompanha o esforço; sem eles, o mesmo esforço produz conforto inferior.

O microclima urbano, segundo a literatura, pode também influenciar de forma significativa o conforto térmico (Bainbridge & Haggard, 2011). Contudo, na amostra analisada, esse efeito mostrou-se limitado. Em Belém, com práticas 3,5, equipamentos 3 e conforto 4, e em Benfica, com práticas 4, equipamentos 0 e conforto 4, a proximidade ao Tejo não impõe um padrão determinante quando a construção e os comportamentos são semelhantes. Em casos como Parque das Nações (paredes maciças: práticas 4; equipamentos 3; conforto 3) versus Avenidas Novas (práticas 4,3; equipamentos 4,6; conforto 2,6), pode haver indícios marginais de influência local, mas o peso dominante continua a ser construtivo/comportamental.

Em paralelo, a perceção de alterações climáticas ajuda a projetar tendências de comportamento. Entre os 170 inquiridos, 75,9% notam maior variabilidade climática; 40% verões mais quentes. 22,4% referem invernos mais frios. 14,1% invernos mais quentes. Apenas 6,5% não notaram mudanças. Essa leitura traduz-se em ajustes: 62,4% passaram a usar mais práticas e 34,1% aumentaram equipamentos; 2,4% reduziram práticas, 18,8% reduziram equipamentos e 22,9% mantiveram hábitos. Entre os 131 que mudaram, destacam-se motivos económicos (79,4%) e climáticos (67,9%), seguidos de saúde (21,4%), sociais (15,3%) e ambientais (9,9%). O padrão futuro mais provável é a manutenção de um modelo “práticas como base, equipamentos como

complemento pontual”, calibrado pelo custo da energia e pela eficácia percebida das soluções passivas.

Daqui resulta uma regra empírica útil: quando as práticas se situam em 4 (ou mais) e os equipamentos variam entre 0–3, o conforto tende a atingir pelo menos 4, sobretudo em casas com isolamento e vidro duplo. Ou seja, há uma relação quase direta “esforço térmico → conforto”, condicionada pela qualidade da envolvente: quanto melhor a envolvente, mais o conforto acompanha o esforço. Quanto pior, mais o esforço encontra “teto” e exige equipamentos para compensar.

#### - Conclusões

O estudo evidencia que existe uma cultura consolidada de uso de estratégias passivas na climatização das habitações em Lisboa. Esta predisposição comportamental cria um contexto favorável à introdução de um artefacto de design passivo, já que os ocupantes demonstram familiaridade, confiança e valorização deste tipo de soluções.

A análise confirma que a eficácia dessas práticas está fortemente dependente da qualidade construtiva, nomeadamente do isolamento e da envolvente envidraçada. Em edifícios eficientes, o conforto acompanha o esforço térmico. Em edifícios deficitários, esse esforço encontra um limite, tornando o desempenho das soluções passivas mais frágil. Este cenário aponta para o papel do artefacto como ferramenta de compensação das fragilidades construtivas, permitindo ampliar os ganhos de conforto mesmo em contextos construtivos menos favoráveis.

Identifica-se também um desfazamento entre verão e inverno, com maior dificuldade em garantir conforto durante o frio. O artefacto deve, por isso, ser concebido para atuar de forma sazonalmente adaptável, potenciando estratégias de retenção de calor no inverno sem comprometer o desempenho no arrefecimento de verão.

A perceção generalizada das alterações climáticas e a tendência para reforçar soluções de baixo consumo energético reforçam a oportunidade de um artefacto que aumente o conforto sem custos acrescidos relevantes. Esta motivação, predominantemente económica, mas também climática, garante abertura à adoção de soluções inovadoras, desde que intuitivas e de baixo esforço de integração no quotidiano.

Em síntese, o artefacto proposto deve:

- Potenciar e otimizar as estratégias passivas já praticadas.

- Oferecer benefícios claros em edifícios com limitações construtivas.
- Responder às necessidades distintas de verão e inverno.
- Integrar-se naturalmente na rotina dos utilizadores.

### 3.2 Fase *Define*

Nesta fase, a informação recolhida é organizada e interpretada, permitindo estruturar direções claras para o desenvolvimento do artefacto.

#### 3.2.1 *Mindmap*

##### - Objetivo

O *mindmap* foi utilizado como ferramenta de síntese visual para estruturar os achados da revisão da literatura e do inquérito por questionário a habitantes da cidade de Lisboa e transformá-los em direções de design claras e fundamentadas (Martin & Hanington, 2012).

##### - Método de recolha de dados

O método consistiu na criação de uma prancha visual na plataforma *Adobe Illustrator*, onde foram sistematizados todos os dados recolhidos por ambas as vias de investigação (questionário e revisão). Para facilitar a leitura e a interligação dos conteúdos, a informação foi organizada em categorias principais: clima, construção de Lisboa, propriedades materiais, estratégias passivas e dados do inquérito.

##### - Estratégia de análise

A análise baseou-se num processo indutivo e interpretativo, em que as relações estabelecidas no *mindmap* foram progressivamente exploradas como hipóteses de ligação funcional entre contexto, problemas e soluções. Este processo permitiu observar interdependências, como por exemplo a articulação entre o regime ocupacional noturno e a necessidade de massa térmica exposta ao sol, ou a relação entre ventilação natural e dissipação do calor acumulado. A partir destas conexões, foi possível extrair conclusões integradoras que orientam o design do artefacto.

## - Resultados e discussão

A Figura 11 apresenta o *mindmap* desenvolvido, que reúne de forma visual os principais achados e permite evidenciar as relações entre contexto, problemas e estratégias analisadas (encontra-se no anexo B a versão horizontal para melhor leitura).



Figura 11: Mindmap. Fonte: a autora.

A análise das condições construtivas e climáticas de Lisboa, cruzada com os padrões de ocupação e os comportamentos dos residentes, permite identificar um conjunto coerente de requisitos funcionais para uma estratégia passiva eficaz.

### 1. Problemas construtivos e vulnerabilidades

O edificado lisboeta revela fragilidades significativas na envolvente, sendo as janelas o ponto de maior perda térmica, seguido das paredes. Estas zonas críticas funcionam como pontes térmicas, onde se intensificam as trocas de calor e se forma condensação, potenciando humidade, fungos e bolores. A ausência de isolamento eficaz acentua este problema. Qualquer artefacto desenvolvido deve, portanto, atuar como compensação destas fragilidades, funcionando como uma camada adicional de isolamento e armazenamento térmico, sem exigir grandes intervenções na estrutura existente.

## 2. Clima e condicionantes ambientais

Lisboa apresenta uma sazonalidade marcada: no inverno, a baixa altura solar favorece a entrada direta de radiação, permitindo ganhos significativos; no verão, o sol alto e a elevada exposição exigem estratégias de sombreamento e dissipação de calor. A nortada, vento predominante de verão, constitui uma oportunidade para ventilação cruzada (norte-sul), mas a densidade da malha urbana pode bloquear este potencial, exigindo mecanismos alternativos de ventilação, como a convecção turbulenta induzida por rugosidade ou geometrias. Estas condições sublinham a necessidade de um sistema que se adapte sazonalmente e que tire partido tanto da radiação como do movimento do ar.

## 3. O fator comportamental

Os inquéritos revelaram um regime ocupacional concentrado ao final do dia e durante a noite. Este dado invalida a eficácia plena de estratégias de ganhos diretos simples, que libertam calor no período diurno, exigindo, em contrapartida, sistemas de massa térmica com libertação diferida. Além disso, os residentes demonstram comportamentos que favorecem a eficácia passiva: no verão, recorrem à ventilação noturna, correntes de ar e fecho de persianas. No inverno, maximizam a exposição solar através da abertura de cortinas e fecho de portas para reter calor. Existe ainda uma cultura consolidada de práticas naturais, com uso pontual de climatização ativa, reforçando a aceitação de soluções passivas que complementem estas rotinas.

## 4. Síntese estratégica e lições das soluções existentes

A literatura evidencia que os ganhos solares indiretos, através de sistemas como a parede de Trombe, oferecem estabilidade térmica, mas requerem ventilação controlada para evitar sobreaquecimento. A introdução de isolamento nestas soluções mostrou reduzir as oscilações térmicas e melhorar a eficiência construtiva. A evolução para sistemas de parede de água e Transwall revelou ganhos adicionais: a água, pela sua elevada capacidade calorífica, permite acumular mais energia num volume reduzido, prolongando a libertação de calor e assegurando maior eficácia em contextos de ocupação noturna. Já soluções como o *roof pond* e as estufas solares trouxeram a lógica da adaptabilidade, introduzindo dispositivos móveis capazes de inverter funções consoante a estação.

No domínio do arrefecimento, as estratégias de ventilação natural e ventilação noturna são reforçadas pela nortada, mas exigem dispositivos que facilitem o escoamento em contextos urbanos densos. Por sua vez, as proteções solares móveis e até soluções vegetais como as paredes verdes oferecem regulação dinâmica dos ganhos solares, promovendo conforto térmico e visual.

## 5. Requisitos funcionais para o artefacto

A triangulação entre clima, construção e comportamento permite consolidar três requisitos inegociáveis para o artefacto:

- Inércia com libertação diferida: integrar massa térmica de elevada capacidade (sólida ou líquida) para alinhar a captação diurna com o período real de ocupação noturna.
- Regime adaptativo sazonal: incorporar mecanismos móveis ou ajustáveis que maximizem ganhos no inverno e permitam dissipação e ventilação no verão.
- Rigor construtivo e isolamento: reduzir pontes térmicas, reforçar o desempenho da envolvente e compensar fragilidades construtivas existentes.

## 6. Direções para o Design

A análise realizada não aponta para uma solução única e definitiva, mas para um conjunto de linhas orientadoras que podem ser exploradas na fase de *sketching*. Estas direções derivam diretamente da triangulação entre clima, construção e comportamento e devem servir como guias de projeto:

- Exploração da massa térmica líquida e híbrida: a água destaca-se pela elevada capacidade calorífica, mas a combinação com materiais sólidos pode gerar sistemas mais estáveis e robustos.
- Modularidade e leveza construtiva: soluções modulares facilitam a instalação em diferentes contextos habitacionais e reduzem a necessidade de intervenção estrutural pesada.
- Transparência e iluminação natural: o uso de materiais translúcidos (vidro, acrílico, água) permite captar energia solar sem comprometer a qualidade da luz natural.

- Mecanismos móveis e ajustáveis: inspirados em sistemas como *roof ponds* e estufas, elementos reguláveis asseguram o funcionamento sazonal (ganho no inverno, sombreamento/dissipação no verão).
- Integração da ventilação natural: a articulação com a nortada e a indução de convecção em malha urbana densa podem ser exploradas como recursos fundamentais de arrefecimento.
- Compatibilidade com práticas culturais: o artefacto deve ser coerente com hábitos já existentes dos residentes (uso de persianas, ventilação noturna, abertura de cortinas no inverno), reforçando a confiança em soluções passivas.

Deste modo, o artefacto deve ser entendido como uma extensão funcional da envolvente, capaz de simultaneamente armazenar, modular e dissipar energia, em sintonia com as práticas culturais dos residentes e com as condições ambientais específicas de Lisboa.

#### - Conclusões

Desta forma o artefacto deve:

- Os problemas construtivos (janelas, paredes, humidade) exigem soluções que funcionem como compensação e não como substituição da estrutura.
- O clima de Lisboa, com sol abundante e nortada, oferece recursos que podem ser aproveitados através da massa térmica e ventilação natural.
- O regime ocupacional noturno impõe massa térmica com libertação diferida.
- Os comportamentos culturais já existentes (ventilação noturna, fecho de persianas, abertura de cortinas) reforçam a eficácia de soluções passivas.
- Estratégias analisadas (Trombe, paredes de água, *roof pond*, estufas, ventilação, proteções solares, paredes verdes) mostram que a chave está na adaptação sazonal e na integração com ventilação.
- O artefacto deve ser entendido como extensão funcional da envolvente, com três requisitos fundamentais: inércia diferida, adaptabilidade sazonal e isolamento.

### 3.3 Fase *Develop*

Com base nas direções definidas, procede-se à materialização exploratória das soluções através de sketching.

#### 3.3.1 Sketching

##### - Objetivo:

O *prototyping* de baixa fidelidade foi adotado como método de design exploratório, assumindo a forma de *sketching* manual. A sua finalidade consistiu em transformar as direções de design previamente estruturadas no *mindmap* em representações visuais concretas. Este processo permitiu analisar hipóteses de forma rápida, apoiar a reflexão crítica e orientar a evolução progressiva da proposta até à sua configuração final (Martin & Hanington, 2012).

##### - Método de recolha de dados

O processo consistiu na realização de esboços sucessivos, desenvolvidos manualmente em folhas de papel, utilizando lápis e caneta como instrumentos principais de registo gráfico. Estes esboços partiram das direções de design previamente sintetizadas e materializaram diferentes hipóteses de solução, funcionando como registo visual do processo criativo e suporte à evolução da proposta.

##### - Estratégia de análise

A análise foi conduzida pela investigadora, incidindo sobre a viabilidade técnica das soluções propostas e sobre o seu alinhamento com os princípios de design passivo. Estes dois critérios orientaram a seleção dos esboços mais consistentes e fundamentaram o refinamento progressivo até à configuração final do artefacto.

##### - Resultados e Discussão

O processo de desenvolvimento iniciou-se com a exploração de diferentes soluções construtivas através de esboços. Numa fase preliminar, considerou-se a criação de uma estrutura extensível que não implicasse intervenção no edificado. Esta proposta assentava em pés telescópicos superiores e inferiores, integrando ao centro um bloco de água. O princípio de estabilidade decorria da força de reação exercida pelo bloco de água, que mantinha os pés em compressão entre pavimento e

teto. Contudo, verificou-se que, ao deslizar lateralmente para fora da zona de incidência solar no verão ou para permitir o acesso à janela, esse equilíbrio de forças seria interrompido, deixando uma das extremidades sem oposição adequada e comprometendo a estabilidade da estrutura.

Dado que a capacidade de deslize foi definida como requisito central, essencial tanto para a regulação sazonal da exposição solar como para a abertura e fecho quotidiano das janelas, optou-se por preservar esta característica, assegurando a estabilidade através da fixação das portas deslizantes à própria estrutura habitacional. Com o objetivo de garantir a maior standardização possível, foram analisados diferentes sistemas de calhas, tendo-se escolhido a solução menos invasiva e simultaneamente mais prática em termos de instalação.

Inicialmente, o sistema foi concebido com pés extensíveis superiores e inferiores, cada conjunto associado a uma calha instalada no teto e outra no pavimento. Numa fase seguinte, ponderou-se a substituição da calha inferior por um pequeno rasgo no chão, uma vez que, estando a estrutura posicionada em frente à janela, a introdução de uma segunda calha no pavimento poderia não só ser redundante em relação à existente, como também representar um risco de queda para o utilizador. Considerou-se então a possibilidade de transferir o peso e o movimento de deslize para rodas na base, mantendo apenas a calha superior como guia. Embora mais prática, esta solução continuava a exigir pés extensíveis no topo para garantir a ligação entre o bloco de água e a calha assim como a adequação a vários vãos, o que dificultava a standardização e comprometia a simplicidade da instalação.

Com o intuito de ultrapassar essa limitação, explorou-se o sistema das *ghost doors*, no qual o rolamento é incorporado junto ao início da janela. Esta solução revelou-se mais eficiente, eliminando a necessidade de calhas externas no teto e permitindo retirar os pés extensíveis superiores. No entanto, as *ghost doors* sustentam o peso nas paredes da habitação, perante a impossibilidade de prever a qualidade desta envolvente nas habitações lisboetas, considerou-se colocar o peso sobre o chão. Assim sendo, foi pensado em rolamentos nas paredes apenas para estabilidade e rodas na base da estrutura que carregariam quase a totalidade do peso.

No caso específico das janelas, considerou-se fundamental que os módulos correspondessem unicamente à área envidraçada. Estruturas posicionadas fora da incidência não iriam contribuir para mais ganhos, portanto seria meio redundante. Para responder a esta exigência, retomou-se a lógica inicial da estrutura extensível, adaptando-a de modo a acompanhar as diferentes alturas de parapeito.

Estes passos encontram-se representados na Figura 12.

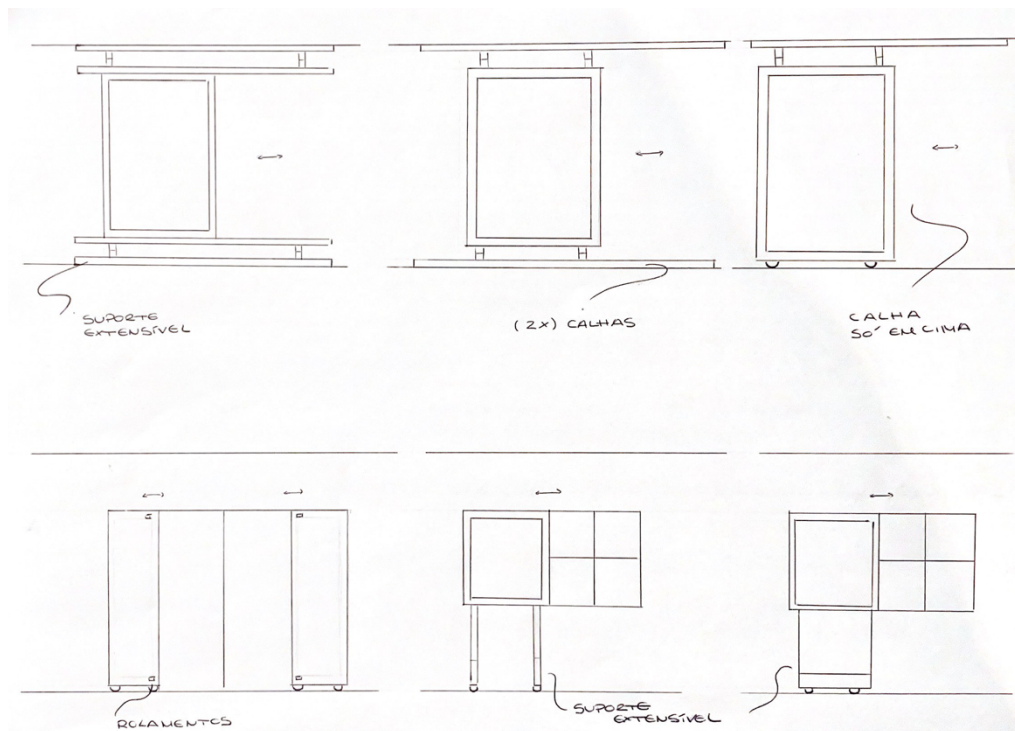


Figura 12: Sistemas calha. Fonte: a autora.

Inicialmente, o bloco de água foi concebido como uma unidade única, de forma a maximizar a superfície ativa considerada nos cálculos energéticos. No entanto, constatou-se que, em termos de transporte, instalação e manuseamento, o peso total tornar-se-ia excessivo. Assim, a proposta evoluiu para a adoção de módulos independentes, capazes de se articular entre si e de se adaptar às dimensões padronizadas de janelas no mercado. Embora tal opção implicasse uma ligeira redução da eficiência térmica, considerou-se essencial pela exequibilidade prática. Para mitigar este efeito, privilegiou-se o desenho de módulos de dimensões mais generosas, assegurando simultaneamente a performance energética e a viabilidade construtiva.

O sistema foi concebido para possibilitar diferentes configurações, permitindo ao utilizador optar por portas completas em um ou ambos os lados da janela, ou ainda por soluções parciais. Para este efeito, foram explorados diferentes mecanismos de encaixe, que garantissem a multiplicação de módulos tanto na horizontal como na vertical.

Numa fase inicial, os esboços exploraram a possibilidade de conceber diferentes tipos de módulos, cada um com funções específicas. Foram estudadas três variantes principais: um módulo superior, apenas com encaixes em baixo, destinado apenas a completar a parte superior da estrutura; um módulo intermédio, com ligações em cima e baixo; e um módulo inferior, preparado para integrar rodas e encaixe superior. Esta lógica permitia atribuir a cada peça uma função própria, mas ao mesmo tempo gerava maior complexidade no fabrico, na montagem e na gestão de peças de substituição.

A evolução do processo levou à perceção de que esta diferenciação não era necessária. Ao invés de três componentes distintos, seria possível desenvolver um único módulo estandardizado e repetível, capaz de desempenhar as funções atribuídas a qualquer uma das posições, superior, intermédia ou inferior, mediante simples ajustes ou acessórios complementares. Esta simplificação não só facilita a produção em série e reduz custos, como também torna o sistema mais intuitivo para o utilizador, que passa a lidar apenas com uma tipologia de módulo facilmente replicável.

Por fim, foram desenvolvidas soluções para simplificar a circulação, o enchimento e o esvaziamento da água no interior dos módulos. Numa versão inicial, previu-se um canal central, ligando a superfície da moldura ao reservatório e repetido na parte superior e inferior para assegurar o enchimento integral. Contudo, esta solução revelou-se inadequada para o esvaziamento, sobretudo em portas de correr, nas quais a abertura se situaria demasiado próxima do pavimento. Em alternativa, introduziram-se dois canais laterais inferiores em cada módulo, possibilitando a ligação direta de uma mangueira e garantindo o esvaziamento eficiente da estrutura.

Estes desenvolvimentos encontram-se ilustrados no esboço apresentado na Figura 13.

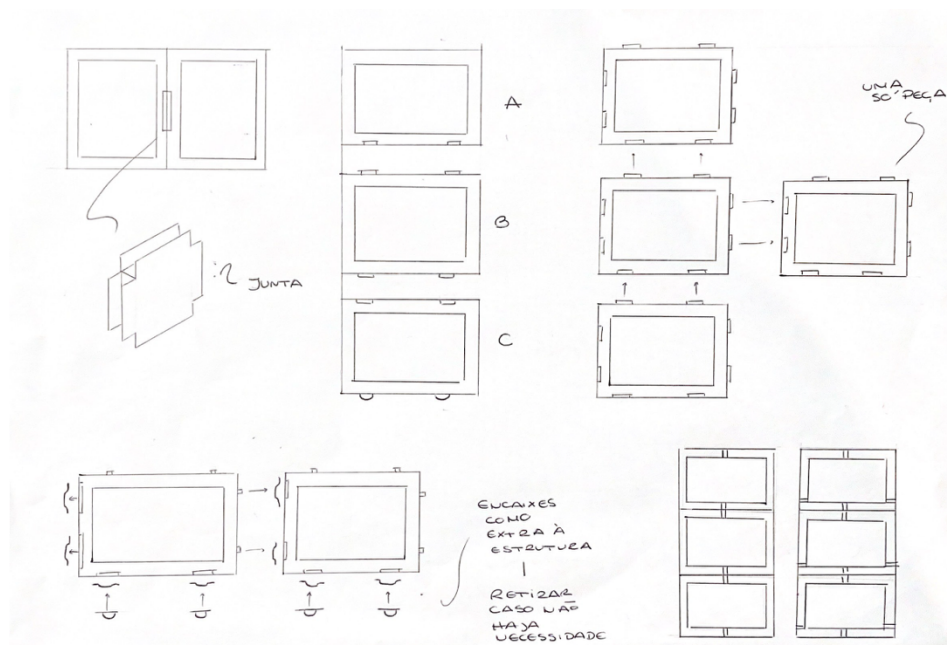


Figura 13: Configurações modulares. Fonte: a autora.

### 3.4 Fase Deliver

A fase final centra-se na validação da solução, através de diferentes instrumentos que permitem aferir a sua adequação e impacto no contexto real.

#### 3.4.1 Focus Group com potenciais utilizadores

##### - Objetivo

O *focus group* teve como objetivo avaliar a aceitação preliminar da solução proposta junto de potenciais utilizadores, procurando aferir a disposição para a considerar como alternativa de melhoria do conforto térmico. Em paralelo, a sessão permitiu recolher perceções, dúvidas e contributos que ajudaram a identificar barreiras à adoção e a orientar ajustes no design, de forma a responder melhor às necessidades reais dos ocupantes.

#### - Tipo de pesquisa

Trata-se de uma pesquisa de carácter qualitativo, adequada para captar opiniões, atitudes e interpretações em profundidade. O *focus group* permite compreender experiências e narrativas individuais e coletivas que emergem da interação entre os participantes, possibilitando o acesso a perspetivas práticas de utilizadores (Martin & Hanington, 2012).

#### - Método de recolha de dados

A sessão decorreu em formato de conversa aberta, realizada presencialmente, com o apoio de uma apresentação em formato PDF projetada em ecrã inteiro. Esta apresentação seguia uma estrutura simples, abordando tópicos como o contexto da problemática, a oportunidade de intervenção, o conceito e o funcionamento do sistema modular. Foi intencionalmente redigida em formato escrito, de forma a permitir o registo fiel da informação transmitida e reforçar a transparência metodológica. O documento encontra-se incluído no Anexo C1.

Embora o conteúdo estivesse estruturado, os participantes levantaram questões e comentários de forma espontânea, muitas vezes antecipando os temas previstos. Esta dinâmica, ainda que menos linear, revelou-se positiva, pois permitiu que as preocupações emergissem de modo genuíno, sem serem previamente enquadradas pela explicação da investigadora. Os contributos foram registados em notas no computador da investigadora, de modo a sintetizar as principais impressões, dúvidas e sugestões levantadas.

A sessão foi ainda registada fotograficamente, com o intuito de documentar o momento e reforçar a validade do processo metodológico adotado. A imagem encontra-se disponível no Anexo C2.

#### - Amostra

A amostra foi composta por cinco participantes, seleccionados por conveniência entre potenciais utilizadores residentes na cidade de Lisboa. De acordo com Leedy, Ormrod e Johnson (2019), os *focus groups* não devem exceder 10 a 12 participantes, de forma a assegurar a participação equilibrada de todos os elementos. O número adotado situa-se, assim, dentro das recomendações metodológicas.

- Considerações éticas

Após serem informados sobre o objetivo da sessão, os participantes consentiram a sua participação. As suas respostas foram asseguradas com total confidencialidade, e o debate decorreu num ambiente informal de modo a facilitar a partilha genuína de opiniões.

- Estratégia de análise

As notas de campo recolhidas durante a sessão foram submetidas a um processo de categorização temática, no qual as observações dos participantes foram agrupadas em áreas-chave: funcionamento térmico, manutenção, integração arquitetónica, segurança e usabilidade, bem como perceção geral. As categorias resultantes foram, posteriormente, interpretadas em termos de implicações para o design, constituindo a base para orientar ajustes e refinamentos no desenvolvimento do produto.

- Resultados e discussão:

Os resultados do *focus group* foram sistematizados na Tabela 8, onde se apresentam as principais preocupações e sugestões dos participantes, bem como as implicações diretas para o design do artefacto.

Tabela 8: Síntese notas e respetivas implicações para o Design. Fonte: a autora.

Categorias	Notas	Implicações para o Design
Funcionamento térmico	Ceticismo quanto à eficácia do funcionamento passivo, sobretudo no verão	Reforçar a comunicação sobre o princípio de funcionamento passivo (materiais gráficos/demonstrações)
Manutenção	Um participante manifestou preocupação relativamente ao processo de esvaziamento do módulo. Questionou-se a viabilidade da drenagem por gravidade	Incorporar bomba de pressão como opção para drenagem facilitada

	<p>se a mangueira precisasse de subir em relação à altura do módulo, tendo sido sugerida a inclusão de uma pequena bomba de pressão para auxiliar o processo</p>	
	<p>Foram ainda levantadas dúvidas quanto à substituição de peças. Preocupação sobre se teriam de comprar um módulo inteiro para substituir em caso de desgaste</p>	<p>Foi esclarecido que as peças externas do módulo (como calhas, parafusos ou encaixes) podem ser facilmente adquiridas em grandes superfícies comerciais. Os participantes valorizaram esta possibilidade de substituição independente</p>
Integração arquitetônica	<p>Os participantes questionaram quanto espaço seria necessário para a abertura das portas do módulo. Após a indicação de cerca de 60 cm de cada lado, manifestaram alguma reticência, observando que nem todas as habitações dispõem dessa margem, o que pode dificultar a instalação</p>	<p>Foi então apresentado que, pela sua modularidade, o sistema permite diferentes configurações, como meia porta, duas portas ou uma porta inteira apenas num dos lados, o que foi considerado pelos participantes uma solução válida para ultrapassar essa limitação</p>
Segurança e usabilidade	<p>Foram discutidos riscos de sobreaquecimento da estrutura, com</p>	<p>Escolha de vidro adequado (com baixa condutividade térmica ou camadas</p>

	possibilidade de queimaduras em contacto direto, sobretudo em crianças	protetoras) para minimizar o risco de sobreaquecimento superficial
	Receio com quebra do vidro e fuga de água	Prever dupla proteção no envidraçado: uma camada exterior de proteção mecânica e uma camada interior em contacto com a água, assegurando proteção adicional em caso de quebra
	Alguns participantes mostraram preocupação com o peso do sistema, questionando se a abertura e o fecho poderiam ser demasiado pesados para o utilizador comum	Cálculos mostram que a força necessária para deslizar a porta é muito baixa (1,6–7,9 N, o equivalente a empurrar entre um smartphone ou meia garrafa de água). Assim, o manuseamento revela-se confortável. Aceite pelo grupo
Perceção geral	Os participantes mostraram interesse e curiosidade genuína pelo produto. A aceitação foi globalmente positiva, reconhecendo o seu potencial como solução inovadora para o conforto térmico	Confirma-se a viabilidade social do produto. A aceitação positiva valida a pertinência do desenvolvimento, demonstrando predisposição dos utilizadores para adotar a solução

O *focus group* permitiu identificar barreiras práticas e percepções de risco que não estavam totalmente previstas, enquanto validou a pertinência da proposta. A discussão demonstra como o feedback dos utilizadores complementa os cálculos técnicos, reforçando a robustez e aplicabilidade do design.

- Conclusões:

O *focus group* evidenciou uma predisposição positiva dos utilizadores para a adoção da solução proposta, reconhecendo o seu potencial como alternativa inovadora de melhoria do conforto térmico. Foram validados aspetos centrais do conceito como a possibilidade de substituição independente de peças, a modularidade do sistema e o esforço reduzido necessário para a abertura e fecho dos painéis.

Em paralelo, emergiram contributos relevantes para o seu aperfeiçoamento, nomeadamente a necessidade de reforçar a comunicação sobre o princípio de funcionamento passivo, de prever soluções que simplifiquem ainda mais a drenagem e de garantir medidas de segurança acrescida, em especial no que respeita ao risco de sobreaquecimento e de quebra do vidro.

Em síntese, a sessão permitiu confirmar a pertinência social da proposta e, simultaneamente, gerar indicações práticas para o seu refinamento, assegurando maior alinhamento entre a solução desenvolvida e as necessidades reais dos utilizadores.

### 3.4.2 Inquérito por questionário a *stakeholders*

- Objetivo

O objetivo deste inquérito consistiu em recolher feedback especializado sobre o sistema Helie, com enfoque na sua validade enquanto proposta de design. Pretendeu-se compreender a perceção dos especialistas quanto à relevância do conceito, identificar eventuais fragilidades construtivas ou funcionais, e recolher sugestões para o seu aperfeiçoamento.

- Tipo de pesquisa

A presente etapa da investigação segue uma abordagem de métodos mistos, com estrutura de tipo embutido (*embedded design*), conforme descrito por Creswell e Plano Clark (2007, citado por Creswell, 2009). Neste modelo, os dados quantitativos, recolhidos através de escalas de Likert,

constituem a base da análise, enquanto os dados qualitativos, obtidos por meio de perguntas abertas, assumem um papel complementar, fornecendo apoio interpretativo ao conjunto dos resultados.

Esta combinação metodológica revelou-se especialmente adequada à avaliação da proposta de design, permitindo reunir evidência quantificável sobre a percepção geral do sistema Helie, enquanto se recolheram críticas construtivas e sugestões técnicas por parte dos especialistas participantes.

#### - Método de recolha de dados

Face à indisponibilidade de realizar entrevistas em tempo real com os especialistas, recorreu-se a um questionário de administração direta, aplicado online através da plataforma Google Forms, como solução prática e eficaz para a recolha de *feedback* estruturado (versão integral do instrumento no Anexo D1).

O instrumento foi concebido com um formato semi-estruturado, conjugando perguntas de escala (Likert de 1 a 5) com campos de resposta aberta, permitindo justificar as escolhas e apresentar comentários adicionais. Esta abordagem tornou possível recolher, por um lado, dados quantificáveis e, por outro, opiniões fundamentadas, essenciais para a avaliação crítica do sistema Helie.

Na introdução ao questionário, foi disponibilizado aos participantes um link com uma apresentação visual e explicativa do conceito Helie, incluindo o contexto da problemática, a oportunidade de intervenção, o conceito e o funcionamento do sistema modular. Esta etapa assegurou que os especialistas respondiam com conhecimento de causa, após análise prévia da proposta (ver anexo D2).

As questões foram organizadas de forma sequencial, iniciando-se com a avaliação da relevância da abordagem científica do design passivo, seguida da análise da pertinência do sistema Helie enquanto proposta concreta. Posteriormente, foram explorados aspetos técnicos, como os materiais e a solução construtiva, culminando com questões relativas a possíveis melhorias. Esta estrutura procurou orientar a reflexão dos especialistas de forma lógica e progressiva, promovendo uma análise crítica e fundamentada da proposta apresentada.

Para complementar, apresenta-se de seguida uma tabela que justifica detalhadamente cada questão do inquérito, indicando a sua pertinência e respetivo objetivo:

Tabela 9: Tabela justificativa questões inquérito por questionário a stakeholders. Fonte: a autora.

Questão	Pertinência	Objetivo
1 – Considera relevante a integração da área científica do design passivo como estratégia central para responder ao problema de conforto térmico identificado nas habitações da cidade de Lisboa?	Compreender a validação do design passivo como abordagem relevante no contexto urbano.	Avaliar a perceção sobre a importância do design passivo como base teórica e estratégica da proposta.
1.1 – Se atribuiu uma nota inferior a 3, por favor justifique.	Investigar as razões por detrás de avaliações negativas ou neutras.	Identificar possíveis críticas ou reservas conceptuais à abordagem adotada.
2 – Como avalia a pertinência do sistema “Helie” enquanto proposta para mitigar o problema de conforto térmico nas habitações da cidade de Lisboa?	Verificar se a proposta apresenta coerência com a problemática estudada.	Avaliar o grau de adequação do sistema “Helie” como resposta conceptual ao problema identificado.
2.1 – Se atribuiu uma nota inferior a 3, por favor justifique.	Recolher feedback crítico sobre eventuais limitações percebidas.	Obter contributos que ajudem a reformular ou melhorar a proposta.
3 – Que adequação atribui aos materiais propostos para os painéis modulares?	Os materiais influenciam o desempenho, a sustentabilidade e a aplicabilidade do artefacto.	Avaliar a adequação técnica, funcional e ambiental dos materiais seleccionados.
3.1 – Se atribuiu uma nota inferior a 3, por favor justifique.	Identificar elementos específicos considerados desajustados.	Recolher sugestões de substituição ou melhoria dos materiais propostos.

4 – Como avalia a solução construtiva do sistema "Helie" em termos técnicos e estruturais?	A solução construtiva deve garantir viabilidade técnica e estabilidade estrutural.	Verificar se o sistema é tecnicamente exequível e bem resolvido do ponto de vista construtivo.
4.1 – Se atribuiu uma nota inferior a 3, por favor justifique.	Permitir a identificação de fragilidades na proposta técnica.	Obter orientações para reforçar ou corrigir a solução construtiva.
5 – Na sua opinião, considera que existem obstáculos técnicos ou práticos à aplicação deste sistema?	Antecipar possíveis limitações à implementação em contexto real.	Diagnosticar barreiras técnicas, legais, económicas ou de aplicação prática.
5.1 – Se respondeu “Sim” na questão anterior, quais seriam esses obstáculos?	Recolher dados qualitativos sobre os desafios apontados pelos especialistas.	Orientar a adaptação do sistema para melhorar a sua viabilidade prática.
6 – Que recomendações adicionais faria para o aperfeiçoamento do sistema?	Estimular a partilha de contributos críticos e sugestões livres.	Recolher propostas práticas para o desenvolvimento e melhoria do sistema Helie.

As escalas de avaliação foram acompanhadas de subquestões abertas sempre que a pontuação atribuída fosse inferior a 3, com o intuito de esclarecer os motivos subjacentes a uma avaliação negativa ou pouco favorável.

#### - Amostra

A amostra foi composta exclusivamente por especialistas em design industrial. A seleção deste perfil visou obter uma avaliação crítica centrada na funcionalidade, viabilidade construtiva, escolha de materiais e coerência formal do sistema.

Este inquérito complementa outras duas frentes de validação já realizadas: a componente técnica foi analisada com uma especialista em engenharia mecânica, assegurando a viabilidade do funcionamento térmico passivo, e a aceitação social foi avaliada através de um inquérito aplicado a residentes da cidade de Lisboa.

Desta forma, a participação dos especialistas em design industrial contribuiu para consolidar a proposta do artefacto numa perspetiva prática e aplicada, reforçando o seu potencial enquanto solução de climatização passiva adaptada ao contexto urbano.

#### - Considerações éticas

Todos os participantes foram informados sobre os objetivos do estudo e a natureza académica da investigação. A participação foi voluntária e anónima, não tendo sido recolhidos dados pessoais. As respostas foram tratadas de forma confidencial, respeitando os princípios éticos da investigação científica.

#### - Estratégia de análise de dados

A análise dos dados seguiu uma abordagem mista, articulando técnicas quantitativas e qualitativas. As respostas às escalas de Likert foram tratadas através de estatística descritiva, com recurso à funcionalidade analítica do Google Forms, que permitiu calcular frequências e percentagens, facilitando a identificação de tendências nas perceções dos especialistas.

Paralelamente, as respostas abertas foram analisadas qualitativamente, com base na leitura interpretativa dos comentários fornecidos. Esta análise permitiu identificar sugestões recorrentes, críticas construtivas e recomendações específicas para o aperfeiçoamento do sistema Helie.

A utilização do Google Forms revelou-se adequada à natureza exploratória da investigação, permitindo uma recolha eficiente de dados estruturados e a sua organização imediata em gráficos de fácil leitura. Esta abordagem contribuiu para uma análise integrada, combinando evidência objetiva com contributos subjetivos de natureza crítica.

#### - Resultados e discussão

A tabela integral de comentários (C1–C16) e respetivos excertos textuais encontra-se no Anexo D3.

#### Questão 1 – Relevância da integração da área científica do design passivo

Todos os especialistas consideraram relevante a integração do design passivo como estratégia central para mitigar o desconforto térmico nas habitações da cidade de Lisboa, com metade a atribuir a nota máxima (5), 33,3% nota 4 e 16,7% nota 3. A ausência de respostas negativas (notas

1 ou 2) revela um consenso alargado quanto à validade da abordagem passiva no contexto urbano analisado.

Questão 2 – Pertinência do sistema Helie enquanto proposta para mitigar o desconforto térmico

As respostas à questão 2 revelaram uma avaliação moderada da pertinência do sistema Helie, com 50% dos especialistas a atribuírem nota 4, 16,7% nota 3 e 33,3% nota 2, não tendo sido registada qualquer nota máxima. Os comentários associados (C1, C2) expressam reservas quanto à eficácia do sistema, destacando as seguintes limitações:

A sua aplicação sobre janelas e portas (C1), por se tratar de elementos dinâmicos que precisam de ser abertos com frequência, criam inevitavelmente zonas de troca térmica. Embora este ponto seja muito pertinente, reconhece-se que o impacto térmico efetivo só poderá ser avaliado com precisão através de testes térmicos reais para aferir se realmente estas trocas térmicas afetam a eficiência da estrutura. Ainda no comentário C1, foi levantada a hipótese de a camada de água apresentar uma eficiência inferior à de soluções como vidro duplo ou triplo, sendo sugerido que o problema térmico das habitações reside sobretudo na qualidade dos elementos opacos, como paredes e pavimentos. Já no comentário C2, é posta em causa a capacidade de isolamento do sistema, afirmando-se que terá um desempenho inferior ao de janelas eficientes. A este conjunto de argumentos, contrapõem-se os resultados da presente investigação, que demonstram que a estrutura é capaz de aquecer e arrefecer a habitação em condições críticas de verão e inverno, mantendo os interiores dentro do intervalo de conforto térmico. Para além disso, fornece uma barreira adicional contra perdas de calor, com uma transmitância térmica de  $2,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , um valor que se posiciona ligeiramente abaixo do intervalo típico de janelas com vidro duplo ( $2,7\text{--}4,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) de acordo com Lamberts et al. (2014), significando que apresenta ligeiramente melhor desempenho. Moita (2010) reforça ainda esta perspetiva, identificando as zonas envidraçadas como os pontos mais vulneráveis da envolvente térmica. Esta tendência foi igualmente confirmada através do questionário aplicado a habitantes, onde se observou uma perceção superior de conforto térmico nas habitações com vidro duplo (Marvila), face àquelas com janelas simples (Avenidas Novas), tanto no verão (3,0 vs. 2,6) como no inverno (3,0 vs. 2,0), apesar da maior utilização de equipamentos nas segundas. Quanto às preocupações com o peso do sistema (C2), destaca-se que a espessura da câmara de água, fixada em 6 cm, foi determinada com base em estimativas térmicas que demonstraram ser essa a configuração mínima capaz de garantir conforto térmico passivo em

condições extremas. A redução desta espessura implicaria uma diminuição da massa e, portanto, da carga sobre o piso, mas também uma perda significativa da capacidade térmica dos módulos (consultar anexo E). Como revisto na literatura, a densidade está diretamente relacionada com a capacidade de absorção e retenção de calor, e foi precisamente por essa razão que se optou pela água, o único material com elevada capacidade térmica específica em relação à sua massa. Assim, qualquer reformulação futura da espessura ou da composição interna do sistema deverá ser avaliada em articulação com especialistas, de modo a garantir que se mantém o equilíbrio entre conforto térmico e segurança estrutural. Embora esta análise ultrapasse o âmbito da presente investigação, ela revela-se essencial para a viabilização técnica da proposta em contextos reais. Relativamente ao risco de formação de pontes térmicas (C2) através do sistema de deslizamento, essa possibilidade foi considerada, mas carece igualmente de validação empírica em protótipos reais.

### Questão 3 – Adequação dos materiais utilizados

Na questão 3, a avaliação da adequação dos materiais revelou uma perceção técnica dividida entre os especialistas: 50% atribuíram nota 2, expressando reservas claras quanto à viabilidade dos materiais escolhidos; 16,7% atribuíram nota 3, sinalizando alguma neutralidade; e 33,3% atribuíram nota 5, refletindo uma perceção muito positiva. Nenhuma das respostas indicou nota mínima (1), nem valores médios-altos (4), o que reforça a polarização na forma como a proposta foi recebida.

Os comentários associados (C3, C4, C5) identificaram várias preocupações: incompatibilidades técnicas e funcionais associadas à presença de água no interior das câmaras (C3), a perceção de fragilidade térmica e construtiva desse elemento (C4), e a sustentabilidade dos materiais utilizados na produção do sistema (C5). Relativamente à questão da manutenção (C3), reconhece-se que a presença permanente de água no interior dos módulos, associada a zonas com elevada exposição solar, pode favorecer o desenvolvimento de micro-organismos como limos ou bolores, também verificado na literatura. A estrutura do sistema não prevê a abertura dos módulos para limpeza interna, pelo que a durabilidade e a transparência da água deverão ser asseguradas através da incorporação de aditivos específicos, nomeadamente algicidas e bactericidas compatíveis com ambientes fechados e materiais poliméricos. A seleção desses aditivos deverá considerar tanto a sua eficácia como a sua estabilidade a longo prazo, sendo recomendável que, em fases futuras de

prototipagem, se realizem ensaios que avaliem o seu desempenho ao longo de ciclos térmicos e de exposição solar. Apesar desta limitação, considera-se que a abordagem preventiva adotada poderá garantir um desempenho estável e duradouro do sistema ao longo do tempo.

A percepção de fragilidade poderá estar associada ao uso de vidro e à presença de água no interior dos módulos. Contudo, importa sublinhar que o sistema foi concebido com materiais amplamente utilizados em contextos de elevada exigência técnica, como o vidro temperado laminado com PVB, resistente ao impacto e que não estilhaça e a fibra de vidro com resina epóxi, comum nas indústrias naval e automóvel. Estes materiais asseguram não só segurança estrutural como também elevada durabilidade, sendo complementados por vedação em silicone estrutural e revestimento interno em epóxi, para garantir a estanqueidade e a resistência à humidade ao longo do tempo. A crítica à presença de água no interior dos módulos considerada como pouco benéfica (C4) é pertinente, mas os dados obtidos nesta investigação demonstram que, em determinadas condições, a utilização da água como massa térmica pode representar um contributo relevante para o conforto térmico passivo, não só a estrutura consegue fornecer uma barreira extra contra a fuga do calor no inverno como permite colocar a habitação dentro do intervalo de conforto térmico no verão e inverno, como observado na questão 2.

A crítica relativa à sustentabilidade dos materiais (C5) também é muito importante. No entanto, importa clarificar que a seleção da fibra de vidro com resina epóxi resultou de um compromisso entre leveza estrutural, desempenho térmico e resistência mecânica, sendo a escolha mais equilibrada para garantir uma moldura fina e estável. Além disso, embora a reciclabilidade da fibra de vidro seja tradicionalmente limitada, têm vindo a ser desenvolvidas novas tecnologias que permitem a transformação de resíduos em novos produtos, contribuindo para a redução de resíduos e da necessidade de matéria-prima virgem. O reforço da durabilidade da estrutura também contribui positivamente, ao prolongar o ciclo de vida útil e reduzir a necessidade de substituição, o que está alinhado com os princípios da sustentabilidade. A escolha de fornecedores com práticas ambientalmente responsáveis, bem como o uso crescente de resinas à base de biomateriais ou de processos menos poluentes, representam caminhos promissores para o aperfeiçoamento futuro do sistema (Guia da Resina Epóxi, 2025).

#### Questão 4 – Solução construtiva do sistema Helie em termos técnicos e estruturais

A avaliação da solução construtiva revelou uma distribuição equilibrada entre os especialistas: 33,3% atribuíram nota 2, 33,3% nota 3 e 33,3% nota 4. A ausência de avaliações extremas (notas 1 ou 5) sugere uma percepção tecnicamente cautelosa, em que são reconhecidos aspetos positivos da proposta, mas também persistem reservas quanto à sua viabilidade prática e desempenho global. Entre os comentários recolhidos (C6, C7), surgem preocupações recorrentes com o peso da estrutura, o funcionamento do sistema de deslizamento, o risco de sobreaquecimento por efeito de lupa e a formação de micro-organismos devido à presença de água. Importa sublinhar que a maioria destas observações já foi analisada nas questões anteriores: o peso da estrutura e a presença de água foram aprofundadamente discutidos na Questão 2, onde se demonstrou que a espessura de 6 cm foi definida como compromisso ideal entre desempenho térmico e viabilidade estrutural, e que eventuais ajustamentos deverão ser acompanhados por especialistas. A questão da manutenção da água e da formação de microrganismos foi igualmente abordada na Questão 3, onde se propõe uma estratégia preventiva baseada na incorporação de aditivos algicidas e bactericidas.

Quanto ao risco de efeito lupa (C6), a escolha de vidros com tratamento de controlo solar e laminação com PVB visa reduzir significativamente a transmissão direta de radiação solar, mitigando o risco de sobreaquecimento localizado. Esta preocupação, no entanto, deverá ser validada em fases posteriores, através de testes térmicos.

A crítica sobre possíveis perdas térmicas devido ao afastamento entre o sistema e a parede original, necessário para permitir o seu deslizamento (C7), é igualmente pertinente. Esse espaço pode, de facto, favorecer a circulação de ar e comprometer o isolamento térmico desejado. No entanto, a dimensão real dessas perdas deverá ser avaliada em contexto experimental, através de ensaios térmicos e modelações específicas, permitindo assim determinar se a perda de desempenho é estrutural ou marginal.

#### Questão 5 – Obstáculos à aplicação do sistema

Relativamente à aplicabilidade prática do sistema Helie, 66,7% dos especialistas reconheceram a existência de obstáculos técnicos ou funcionais à sua implementação, enquanto os restantes 33,3% preferiram não responder ou indicaram não ter opinião formada. Esta distribuição revela que, apesar do potencial reconhecido à solução, persistem dúvidas significativas quanto à sua viabilidade no edificado existente.

Entre os comentários recolhidos (C8, C9, C10, C11), destaca-se a preocupação com a diversidade dimensional das janelas residenciais (C11), que poderá comprometer a aplicação eficiente dos módulos. De facto, a ausência de padronização nas aberturas construtivas torna inviável uma abordagem totalmente rígida ou modular. Neste contexto, consideram-se dois caminhos possíveis: por um lado, o desenvolvimento de módulos personalizados em fases posteriores do projeto; por outro, a necessidade de estudar se a não coincidência exata entre o módulo e o vão compromete efetivamente o desempenho térmico. Caso essas perdas se revelem marginais, a aplicação poderá manter-se viável, mesmo com ligeiras discrepâncias dimensionais. Assim, considera-se que o seu impacto poderá ser previsto mediante ensaios complementares e testes em situações reais.

No que respeita à adaptação ao espaço (C8), a modularidade do sistema permite diferentes configurações, oferecendo flexibilidade para responder a variações arquitetónicas. Os módulos podem ser instalados de forma individual ou combinada, lateralmente ou em continuidade, cobrindo uma ou ambas as folhas do vão, à esquerda ou à direita, consoante as necessidades do utilizador. Ainda assim, reconhece-se que esta flexibilidade pressupõe a existência de espaço livre nas paredes laterais adjacentes aos vãos, o que poderá constituir uma limitação em determinadas configurações habitacionais, condicionando a instalação plena do sistema.

C9 levantou preocupações quanto à possibilidade de existência de pontes térmicas, nomeadamente na ligação entre o sistema e a envolvente da habitação. De facto, zonas de transição entre materiais com diferentes condutividades térmicas ou interrupções no isolamento podem dar origem a percursos preferenciais de dissipação de calor, comprometendo o desempenho global do sistema (Moita, 2010). Esta é uma questão distinta das perdas térmicas globais (já discutidas na Questão 4), por se tratar de zonas localizadas de menor resistência térmica. No entanto, a estrutura Helie foi desenhada com revestimentos e vedações contínuas, precisamente para minimizar este tipo de descontinuidade. Ainda assim, recomenda-se que futuros protótipos sejam submetidos a ensaios específicos que permitam identificar e corrigir eventuais pontos críticos, assegurando a continuidade da barreira térmica ao longo de toda a instalação.

As restantes preocupações mencionadas, nomeadamente o peso da estrutura, o desempenho térmico global e a manutenção do sistema (C9, C10), foram já analisadas em profundidade nas questões anteriores, não sendo por isso retomadas aqui.

## Questão 6 – Melhorias propostas ao sistema

As sugestões apresentadas pelos especialistas abrangeram diferentes áreas de intervenção, desde a instalação e adaptação à estrutura construtiva, até à estética, funcionalidade e sustentabilidade dos materiais.

C12 sugeriu que fosse considerado o cenário de fixação em paredes falsas, antecipando limitações de instalação associadas a este tipo de solução construtiva. Esta observação é bastante pertinente, uma vez que as paredes falsas podem apresentar menor resistência mecânica. Embora o sistema tenha sido concebido para distribuir a maior parte do seu peso sobre rodas na base, os rolamentos laterais presos à parede da habitação, que evitam o desequilíbrio da estrutura, exercem alguma força sobre a parede. Importa, por isso, compreender se esse esforço, embora reduzido, é compatível com as características deste tipo de elemento construtivo. Assim, recomenda-se que, em fases futuras de desenvolvimento e implementação, seja realizada uma avaliação por um técnico, com vista a verificar se a instalação em paredes falsas é segura ou se poderá comprometer a integridade da estrutura envolvente.

C13 recomendou uma reestruturação completa do conceito do projeto, sugerindo que o sistema, tal como está concebido, poderá não responder de forma eficaz às necessidades identificadas. Ainda que se reconheça a importância de uma análise crítica do sistema, os dados recolhidos nesta investigação indicam que a solução proposta apresenta capacidade efetiva de modulação térmica passiva em cenários críticos de verão e inverno, com efeito barreira comparável ao de janelas com vidro duplo. Além disso, metade dos especialistas atribuíram nota 4 à pertinência da proposta e 16,7% nota 3, sinalizando uma perceção moderadamente positiva da sua utilidade prática (Questão 2). Assim, entende-se que, mesmo exigindo melhorias, a proposta apresenta uma base tecnicamente viável e potencial para evolução futura.

C14 sugeriu a utilização de materiais com elevada massa térmica de forma integral nas paredes, com o objetivo de aumentar a capacidade de armazenamento de calor e promover um maior atraso e redução da amplitude térmica diária. Esta estratégia, embora válida em termos conceptuais, apresenta limitações quando aplicada ao edificado existente. Por um lado, as paredes atuais já contribuem significativamente para a estabilização térmica, sendo incerta a eficácia da sobreposição de nova massa a superfícies que já cumprem essa função. Por outro, a eficácia da massa térmica está diretamente dependente da sua exposição ao sol, o que implicaria que cada habitação tivesse pelo menos uma parede com radiação solar direta, uma condição difícil de

garantir em contextos urbanos densos e heterogéneos. O sistema Helie, ao contrário, integra uma massa térmica concebida para estar diretamente exposta à radiação solar, garantindo assim o seu funcionamento eficaz enquanto elemento de acumulação e regulação térmica. No inverno, contribui ainda como barreira extra contra perdas de calor, e no verão, quando deslizado para o interior, atua absorvendo a radiação presente no espaço habitado, complementando estratégias já comuns entre os utilizadores, como o uso de estores e cortinas.

C15 e C16 recomendaram a disponibilização de diferentes padrões visuais para os módulos, de forma a aumentar a aceitação do sistema. Esta sugestão é considerada bastante pertinente, sobretudo do ponto de vista estético. De facto, a possibilidade de escolha entre vários padrões poderá aumentar a adaptabilidade da solução a diferentes estilos arquitetónicos e preferências individuais, promovendo uma melhor integração visual no espaço doméstico. Esta proposta será considerada em fases futuras de desenvolvimento. O C15 sugeriu ainda que o sistema pudesse funcionar com dobradiças, como alternativa às calhas. Esta possibilidade, no entanto, levanta várias limitações relevantes. Do ponto de vista térmico, ao abrir o módulo com dobradiças, a disposição das camadas funcionais inverter-se-ia, no verão, por exemplo, a camada de isolamento ficaria voltada para o interior e a camada de água ficaria exposta à parede, comprometendo o princípio de modulação térmica que sustenta o sistema. Para além disso, o peso da estrutura exige pontos de fixação robustos, que nem sempre são compatíveis com as caixilharias ou paredes existentes. Assim, a opção pelas calhas não é apenas funcional, mas também uma medida de precaução construtiva.

C17 sugeriu a utilização de materiais menos poluentes na produção do sistema. Embora esta questão já tenha sido amplamente discutida na Questão 3, reconhece-se a importância de continuar a explorar alternativas com menor impacto ambiental nas fases seguintes de desenvolvimento.

#### - Conclusões

A análise das respostas revelou uma perceção heterogénea, mas construtiva, sobre o sistema Helie. Embora o design passivo tenha sido unanimemente reconhecido como uma abordagem relevante para mitigar o desconforto térmico em Lisboa, a proposta concreta do sistema gerou uma diversidade de opiniões, oscilando entre uma avaliação moderadamente positiva e a identificação de obstáculos técnicos e funcionais relevantes.

As críticas levantadas incidiram sobre aspetos como o desempenho térmico, a viabilidade estrutural, a manutenção, a sustentabilidade dos materiais e a compatibilidade com o edificado existente. Estas observações são particularmente relevantes, na medida em que ajudam a antecipar limitações e a orientar o aperfeiçoamento técnico do sistema.

Importa, no entanto, sublinhar que muitas das limitações identificadas não podem ser integralmente avaliadas em ambiente teórico. Questões como a formação de pontes térmicas, o impacto do afastamento entre o sistema e a fachada, ou o comportamento da água ao longo do tempo exigem validação empírica, através de testes com protótipos e medições térmicas em contexto real. Estas variáveis dependem de fatores físicos, construtivos e contextuais que só podem ser aferidos com acompanhamento técnico especializado.

Ainda assim, algumas sugestões apresentadas pelos especialistas são passíveis de aplicação imediata. A possibilidade de disponibilizar diferentes padrões visuais para os módulos, por exemplo, constitui uma melhoria estética simples e de fácil implementação, que poderá contribuir para uma maior aceitação da solução, como indicado. Outras recomendações, como a adoção de materiais menos poluentes, apontam para caminhos promissores de desenvolvimento, mas exigem reformulações mais profundas e, por isso, deverão ser equacionadas em fases futuras do projeto. Neste sentido, entende-se que o sistema Helie, ainda que exija melhorias e reformulações pontuais, apresenta potencial de evolução. A reunião de comentários de especialistas permitiu não só validar algumas das premissas do projeto, como também orientar futuras etapas de aperfeiçoamento, reforçando a viabilidade prática da proposta e o seu contributo potencial para a arquitetura passiva em contexto urbano.

### 3.4.3 Estimativas de conforto

#### - Objetivo

A presente etapa metodológica teve como objetivo validar o desempenho térmico do artefacto em condições críticas de inverno e verão, aferindo a sua capacidade de garantir conforto térmico segundo os critérios definidos pela norma EN 16798:2014 (Categoria III). Paralelamente, pretendeu-se calcular a resistência e a transmitância térmica da estrutura, de modo a avaliar o seu potencial como barreira contra perdas de calor.

#### - Método de recolha de dados

Importa referir que a aplicação da EN 16798-1:2014 neste estudo teve carácter estimativo, não se baseando em medições reais, mas sim em cálculos térmicos de balanço energético. Esta adaptação justifica-se pela natureza conceptual da investigação, cujo objetivo foi testar a viabilidade do artefacto como solução passiva de conforto térmico.

Foram definidos dois cenários críticos de utilização: inverno (temperatura interior inicial de 10 °C) e verão (temperatura interior inicial de 30 °C).

O procedimento adotado seguiu quatro etapas principais:

- Caracterização da divisão e do artefacto: definição da área e volume do espaço de referência (20 m<sup>2</sup>, pé-direito de 2,6 m) e das propriedades do artefacto (área útil de cada módulo, volume de água armazenado, camadas de vidro e moldura). Foram ainda testadas diferentes espessuras da camada de água, com o objetivo de avaliar qual apresentava melhor desempenho térmico.
- Cálculo da resistência e transmitância térmica: Determinou-se a resistência térmica e respetiva transmitância de acordo com a norma ISO 6946:2017 (ISO, 2017).
- Estimativa da energia térmica transferida: Cálculo da energia acumulada (inverno) ou absorvida (verão) pelos painéis, considerando o volume de água constante e variações de temperatura representativas para cada estação. O procedimento baseou-se nos princípios descritos por Lamberts et al., (2014) e em Çengel & Boles (2015).
- Impacto no conforto térmico interior: Aplicação do balanço energético ao volume de ar da divisão, estimando-se a variação de temperatura final após a transferência de energia, conforme a EN 16798-2:2014 (CEN, 2014). Para maior realismo, foram introduzidas perdas de 70% e 50%.

#### - Validação do instrumento

Os cálculos foram acompanhados e validados por uma especialista na área da Engenharia Física.

#### - Estratégia de análise

A análise consistiu em comparar os valores de temperatura interior estimados com os limites de conforto definidos pela norma EN 16798-1:2014 (Categoria III). Esta comparação permitiu verificar se o artefacto, em cenários críticos de inverno e verão, seria capaz de garantir condições

de conforto dentro da margem de aceitação estabelecida (+4 °C e -5 °C face à temperatura operativa de referência). Adicionalmente, foram consideradas perdas térmicas (30% a 50%), de modo a avaliar a robustez dos resultados e a viabilidade prática do funcionamento passivo do sistema.

Adicionalmente, foram analisados os valores de resistência e transmitância térmica (U), de modo a aferir o potencial do artefacto como barreira à transferência de calor, comparando o seu desempenho com soluções convencionais de envidraçado.

- Resultados e discussão

Características habitação:

Área da habitação = 20 m<sup>2</sup>

Pé-direito (altura) = 2,6 m

Volume=área×Altura=20×2,6=52m<sup>3</sup>

1. Cenário de Inverno:

- Passo 1: Temperatura inicial da divisão

Assumiu-se uma temperatura crítica de 10 °C, correspondente ao pior cenário possível de inverno.

- Passo 2: Temperatura média exterior dos 7 dias anteriores, considerando a semana de 12 a 18 de Janeiro de 2025 (Meteostat, s.d.)

Dia 12 – 14.6 °C

Dia 13 - 12.1 °C

Dia 14 - 9.6 °C

Dia 15 – 9 °C

Dia 16 – 12.2 °C

Dia 17 - 10.6°C

Dia 18 - 9.6°C

Somando (CEN, 2014):

$\Theta_{rm} = (\Theta_{ed-1} + 0,8\Theta_{ed-2} + 0,6\Theta_{ed-3} + 0,5\Theta_{ed-4} + 0,4\Theta_{ed-5} + 0,3\Theta_{ed-6} + 0,2\Theta_{ed-7}) =$

$$= 14,6 + 9,68 + 5,76 + 4,5 + 4,88 + 3,18 + 1,92 = 44,52$$

Dividindo por 3,8 (CEN, 2014):

$$\theta_{rm} = \frac{44,52}{3,8} \approx 11,71^{\circ}C$$

- Passo 3: Cálculo da temperatura operativa de conforto ( $\theta_o$ )

Fórmula (CEN, 2014):

$$\theta_o = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8$$

Resultado:

$$\theta_o = 0,33 \cdot 11,71 + 18,8$$

$$\theta_o \approx 3,8643 + 18,8 = 22,66^{\circ}C$$

- Passo 4: Determinação do intervalo de conforto (Categoria III)

Limite inferior:

$$\theta_{inf} = 22,66 - 5 = 17,66^{\circ}C$$

Limite superior:

$$\theta_{sup} = 22,66 + 4 = 26,66^{\circ}C$$

- Passo 5: Cálculo da energia fornecida pelos painéis

Volume total de água:  $0,0637 \text{ m}^3 = 63,7 \text{ L}$  (ver anexo E)

Massa de água:  $m = 163,0 \text{ kg}$

Calor específico da água:  $c = 4180 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Variação térmica ( $\Delta\theta$ ): 2.49 (cálculo no anexo E)

Fórmula do calor sensível (Lamberts et al., 2014):  $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$

Resultado:  $Q = 163 \times 4180 \times 2.49 \approx 1697531 \text{ J}$

- Passo 6: Estimativa do aumento de temperatura no ar

$$m_{ar} = \rho \cdot V = 1,2 \cdot 52 = 62,4 \text{ kg}$$

$$\rho \text{ (densidade do ar)} = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volume da habitação} = 20 \text{ m}^2 \times 2,6 \text{ m} = 52 \text{ m}^3$$

$$\text{Calor específico do ar: } 1005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

Fórmula (Lamberts et al., 2014):  $\Delta\theta = Q / (m \times c)$

$$\text{Resultado: } \Delta\theta = 1697531 \text{ J} / (62,4 \times 1005) = 27,1^\circ \text{C}$$

- Considerando perdas de 50% e 70%:

Cenário A — 50% de aproveitamento

$$Q_{\text{útil}} = 0,50 \times 1\,697\,531 = 848\,765 \text{ J}$$

$$\Delta\theta = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{848\,765}{62,4 \cdot 1005} \approx 13,49^\circ \text{C}$$

$$T_{\text{final}} = 10 + 13,49 = 23,49^\circ \text{C}$$

Cenário B — 30% de aproveitamento

$$Q_{\text{útil}} = 0,30 \times 1\,697\,531 = 509\,259 \text{ J}$$

$$\Delta\theta = \frac{509\,259}{62,4 \cdot 1005} \approx 8,08^\circ \text{C}$$

$$T_{\text{final}} = 10 + 8,08 = 18,08^\circ \text{C}$$

Para avaliar o desempenho realista do sistema passivo no cenário de inverno, consideraram-se perdas energéticas associadas à transferência de calor da água aquecida para o ar interior da habitação. Foram simulados dois cenários críticos: com 50% e 70% de perdas, correspondentes a aproveitamentos de 50% e 30% da energia armazenada na água, respetivamente.

No cenário com 50% de aproveitamento, a energia útil foi de 848 765 J, resultando numa variação térmica do ar de 13,49 °C. Com uma temperatura inicial de 10 °C, o ambiente atingiria 23,49 °C,

valor dentro dos limites definidos para conforto térmico segundo a Categoria III da norma EN 16798 (17,66 °C a 26,66 °C).

Mesmo no cenário mais exigente, com apenas 30% de aproveitamento (509 259 J), a temperatura do ar aumentaria 8,08 °C, atingindo 18,08 °C, ainda ligeiramente acima do limite inferior da faixa de conforto. Este resultado evidencia que o sistema, apesar das perdas térmicas relevantes, consegue proporcionar um contributo térmico positivo e funcional no inverno, mantendo as condições mínimas de habitabilidade e conforto.

## 2. Cenário de verão:

- Passo 1: Temperatura inicial da divisão

Assumiu-se um cenário crítico de sobreaquecimento: 30 °C.

- Passo 2: Temperatura média exterior dos 7 dias anteriores, considerando a semana de 10 a 16 de Agosto de 2025 (Meteostat, s.d.)

Dia 10 – 26°C

Dia 11 – 22.6 °C

Dia 12 – 28.9 °C

Dia 13 – 25.6 °C

Dia 14 - 26 °C

Dia 15 - 24 °C

Dia 16 – 25 °C

Somando (CEN, 2014):

$$25 + 19,2 + 15,6 + 12,8 + 11,56 + 6,78 + 5,2 = 96,14$$

Dividir por 3,8 (CEN, 2014):

$$\theta_{rm} = \frac{96,14}{3,8} \approx 25,3 \text{ °C}$$

- Passo 3: Cálculo da temperatura operativa de conforto ( $\theta_o$ )(CEN, 2014)

$$\theta_o = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 = 0,33 \cdot 25,3 + 18,8 \approx 27,15 \text{ °C}$$

- Passo 4: Intervalo de conforto (Categoria III)

$$\text{Limite inferior: } \theta_o - 5 = 22,15 \text{ °C}$$

$$\text{Limite superior: } \theta_o + 4 = 31,15 \text{ °C}$$

- Passo 5: Cálculo da energia absorvida pelos painéis

- Volume de água: 27,16 l
- Massa: 163,0
- Calor específico da água: 4180 J/kg·K
- $\Delta\theta$ : 2,57 (cálculo no anexo E)

$$\text{Cálculo (Lamberts et.al, 2014): } Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 163 \times 4180 \times 2,57 \approx 1\,749\,600 \text{ J}$$

- Passo 6: Estimativa de arrefecimento do ar

- Massa de ar:  $m = \rho \cdot V = 1,2 \text{ kg/m}^3 \times 52 = 62,4 \text{ kg}$
- Calor específico do ar: 1005 J/kg·K

Fórmula (Lamberts et al., 2014):  $\Delta\theta = Q / (m \times c) = 1\,749\,600 / (62,4 \times 1005) \approx 27,8\text{ °C}$

Cenário A com 50% de aproveitamento:

$$\begin{aligned}Q_{\text{útil}} &= 0,5 \times 1\,749\,600 = 874\,800\text{ J} \\ \Delta\theta &= 874\,800 / (62,4 \times 1005) \approx 13,9\text{ °C} \\ T_{\text{final}} &= 30 - 13,9 \approx 16,1\text{ °C}\end{aligned}$$

Cenário B com 30% de aproveitamento:

$$\begin{aligned}Q_{\text{útil}} &= 0,3 \times 1\,749\,600 = 524\,880\text{ J} \\ \Delta\theta &= 524\,880 / (62,4 \times 1005) \approx 8,34\text{ °C} \\ T_{\text{final}} &= 30 - 8,34 \approx 21,66\text{ °C}\end{aligned}$$

Os resultados obtidos demonstram que o sistema permite uma redução significativa da temperatura do ar interior, partindo de um cenário crítico de sobreaquecimento (30 °C).

No cenário A, com 50% de aproveitamento da energia armazenada na água, a temperatura final estimada é de 16,1 °C, enquanto no cenário B, com 30% de aproveitamento, atinge-se uma temperatura de 21,66 °C.

Apesar de ligeiramente abaixo do limite inferior do intervalo de conforto para a Categoria III (22,15 °C a 31,15 °C), este resultado comprova que o artefacto tem capacidade de mitigar eficazmente o sobreaquecimento interior no verão, aproximando-se dos níveis de conforto estabelecidos pela norma.

3. Para o cálculo da transmitância:

O coeficiente de transmissão térmica global da envolvente opaca ( $U_{\text{total}}$ ) pode ser calculado pela seguinte expressão, de acordo com a norma ISO 6946:2017 (ISO, 2017):

$$U_{\text{total}} = (A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + \Psi \cdot L_p + \Sigma \chi k) / A_w$$

onde:

$A_g$  = área transparente/ativa (vidro+água)

$U_g$  = U “ao centro” do conjunto vidro–ar–vidro–água–vidro (sem bordas)

$A_f$  = área de caixilharia (fibra de vidro)

$U_f$  = U da caixilharia

$\Psi$  [W/m·K] = transmitância linear do perímetro (borda vidro/caixa, espaçador, juntas)

$L_p$  = comprimento do perímetro em contacto com o interior

$\chi_k$  [W/K] = transmitâncias pontuais (fixações, ancoragens)

- Dimensões do módulo porta

Dimensões externas:  $85 \times 70 \text{ cm} \rightarrow 5950 \text{ cm}^2 = 0,595 \text{ m}^2$

Zona transparente:  $75 \times 60 \text{ cm} \rightarrow 4500 \text{ cm}^2 = 0,45 \text{ m}^2$

Moldura (aro):  $0,145 \text{ m}^2 \rightarrow \approx 24\%$  do módulo

Perímetro: 3,10 m

Espessura média do aro: 5 cm

Portanto:

$A_g = 0,45 \text{ m}^2$  (vidro/água/vidro)

$A_f = 0,145 \text{ m}^2$  (moldura)

$A_w = 0,595 \text{ m}^2$  (total)

$L_p = 3,10 \text{ m}$  (perímetro em contacto com o interior)

$U_f$  típico para fibra de vidro  $\approx 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$

$A_f \cdot U_f = 0,145 \times 2,0 = 0,29$

Soma =  $0,972 + 0,29 + 0,186 = 1,448$

$U_{\text{total}} = 1,448 / 0,595 \approx 2,43 \text{ W/m}^2\text{K}$

- Resultados

Sem low-e:  $U_{\text{total}} \approx 2,43 \text{ W/m}^2\text{K}$

Com low-e ( $U_g \approx 1,71$ ):  $U_{\text{total}} \approx 2,10 \text{ W/m}^2\text{K}$

Sensibilidade útil (para  $U_f = 1,8 \rightarrow 2,2$  e  $\Psi = 0,04 \rightarrow 0,10$ ):

- Sem low-e: varia entre  $\approx 2,28 \rightarrow 2,69$  W/m<sup>2</sup>K

- Com low-e: varia entre  $\approx 1,94 \rightarrow 2,35$  W/m<sup>2</sup>K

A estrutura, com vidro *low-e* e moldura em fibra de vidro, apresenta um desempenho térmico global aceitável, de 2,10 W/m<sup>2</sup>·K, podendo variar entre 1,94 e 2,35 W/m<sup>2</sup>·K consoante a qualidade dos materiais e execução dos detalhes construtivos.

- Conclusões

A análise efetuada permitiu avaliar o desempenho térmico de um sistema passivo de climatização baseado na acumulação de calor em reservatórios de água integrados numa estrutura modular de fachada. Foram considerados dois cenários extremos, inverno e verão, simulando condições críticas de temperatura e radiação, com base em dados meteorológicos reais e metodologias normativas de conforto térmico (EN 16798-1:2014).

No cenário de inverno, mesmo com perdas energéticas elevadas (até 70%), o sistema demonstrou capacidade de aquecer o ar interior de forma eficaz, garantindo temperaturas dentro ou próximas da faixa de conforto (Categoria III). O aquecimento do ar a partir dos painéis revelou-se suficiente para manter condições habitáveis, mesmo partindo de uma temperatura inicial crítica de 10 °C.

No cenário de verão, os resultados confirmam a utilidade do sistema como meio de mitigação do sobreaquecimento, proporcionando reduções significativas da temperatura do ar. Com um aproveitamento de 30% da energia acumulada na água, obteve-se uma temperatura final de 21,66 °C, muito próxima do limite inferior de conforto (22,15 °C). Com 50% de aproveitamento, os valores situam-se claramente abaixo desse limite, evidenciando o forte potencial de arrefecimento do sistema.

Adicionalmente, os cálculos de transmitância térmica global (“U total”) demonstram que a solução construtiva utilizada, com vidro de controlo solar (low-e) e moldura em fibra de vidro, apresenta um desempenho térmico adequado, com valores entre 1,94 e 2,35 W/m<sup>2</sup>·K, com eficiência ligeiramente superior a janelas duplas: 2,7 e 4,0 W/m<sup>2</sup>·K (Moita, 2010).

Em síntese, a análise de dados valida a eficácia e a aplicabilidade do artefacto como uma solução passiva de alto desempenho. O sistema demonstrou ser consistentemente eficaz na modulação térmica (aquecimento e arrefecimento) e na contenção da fuga de calor, estabelecendo uma contribuição técnica e prática relevante, mesmo considerando os pressupostos mais conservadores da simulação.

#### - Limitações

Durante a construção dos instrumentos exploratórios, nomeadamente o *focus group* e o inquérito por questionário dirigido a especialistas, foram utilizados dados de desempenho térmico baseados em cálculos preliminares, que posteriormente se vieram a revelar imprecisos.

Os cálculos apresentados nesta secção foram, entretanto, revistos e atualizados com base em pressupostos mais realistas, refletindo de forma mais fidedigna o desempenho do sistema.

## IV. Produto

### 4.1 Conceito: painel modular “Helie”

A proposta consiste numa estrutura deslizante de painéis modulares, aplicada no interior das habitações como complemento à fenestração existente. Atua como um sistema passivo de regulação térmica. Cada painel integra uma moldura em fibra de vidro e três lâminas de vidro que delimitam duas câmaras internas: uma de ar e outra de água.

Durante o inverno, os painéis são posicionados em frente às janelas, funcionando como sistemas de captação, acumulação e redistribuição de calor (como prova de conceito, visitar anexo F). Ao longo do dia, a radiação solar incidente é absorvida e armazenada na câmara de água, cuja elevada capacidade térmica específica (c.  $4,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) permite acumular grandes quantidades de energia sem variações bruscas de temperatura (Moita, 2010). A câmara de ar, localizada entre a água e o exterior, possui condutividade muito baixa e reduz significativamente a transmitância global do painel, dificultando a saída do calor para o ambiente exterior e orientando o fluxo energético no sentido do espaço habitado. A moldura em fibra de vidro contribui para o mesmo efeito, graças à sua reduzida transmitância, que limita perdas laterais. Quando a temperatura exterior desce ao final do dia, estabelece-se um gradiente térmico entre a água aquecida e o ar interior mais frio, desencadeando uma transferência espontânea de calor para o espaço habitado.

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, a energia flui naturalmente da região de maior temperatura para a de menor temperatura, até ser atingido o equilíbrio térmico (Incropera et al., 2017). Assim, o calor acumulado ao longo do dia é libertado de forma progressiva durante a noite até ao início da manhã, coincidindo com os períodos de ocupação habitacional, como identificado no inquérito por questionário a habitantes da cidade de Lisboa, na secção 3.1.1. Para além deste mecanismo de acumulação, a presença da estrutura diante das janelas acrescenta uma barreira suplementar às trocas térmicas, diminuindo a vulnerabilidade destes vãos no inverno, uma das fragilidades mais recorrentes nas habitações do parque edificado lisboeta. As perfurações integradas nos módulos permitem ainda a entrada de radiação solar direta, que aquece massas térmicas no interior e reforça os ganhos solares.

Já durante o verão, os painéis deslizam lateralmente, posicionando-se junto às janelas fora do contacto com radiação direta. Nesta configuração, atuam como elementos de absorção do calor presente no interior, que é temporariamente armazenado na câmara de água. A ventilação cruzada, frequentemente utilizada pelos habitantes de Lisboa segundo também o inquérito por questionário, assegura a dissipação deste calor para o exterior. O contexto climático local, marcado pela prevalência das nortadas, favorece o processo: o ar mais fresco entra pelas aberturas a norte e atravessa o espaço, transportando o calor até sair pelas janelas a sul, onde se encontram os painéis. Contudo, reconhece-se que a elevada densidade urbanística da cidade pode limitar a eficácia da ventilação natural, devido à presença de obstáculos arquitetónicos que dificultam a circulação do ar. Para contornar esta limitação, a própria geometria dos módulos foi concebida com perfurações específicas, capazes de induzir convecção turbulenta e intensificar as trocas térmicas mesmo em condições de vento fraco ou parcialmente obstruído. Estas discontinuidades promovem a aceleração localizada do escoamento e a fragmentação do fluxo laminar, permitindo que o calor armazenado seja dissipado com maior eficiência (Incropera et al., 2017).

A alternância sazonal de funcionamento do sistema encontra-se representada na Figura 14, onde se ilustram as configurações dos módulos nos períodos de inverno e verão, bem como os respetivos mecanismos de atuação térmica.

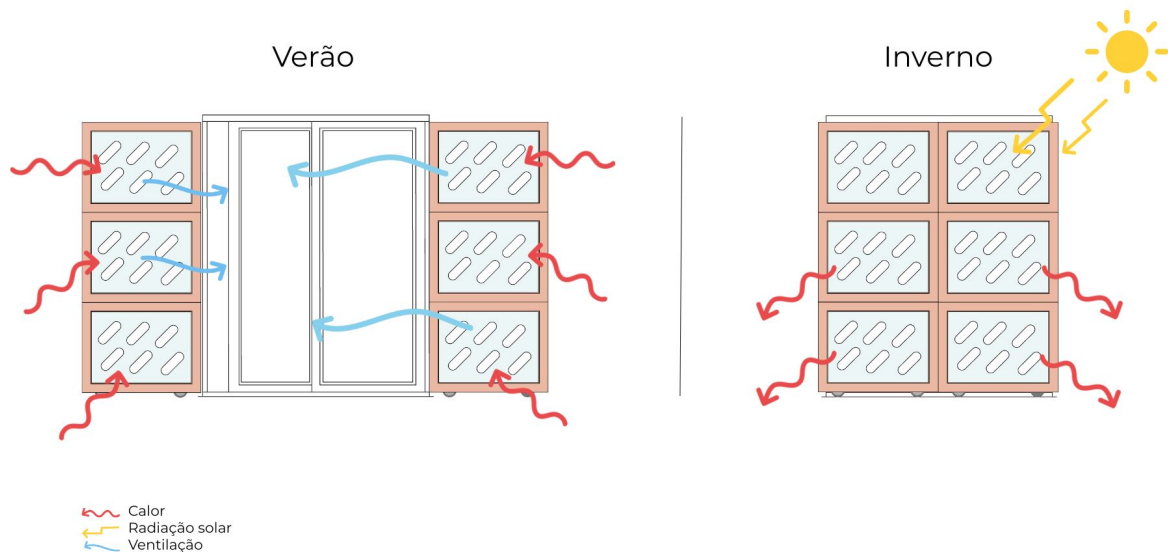


Figura 14: Funcionamento dual do sistema. Fonte: a autora.

O sistema apresenta, deste modo, um comportamento termoenergético dual: no inverno, atua simultaneamente como barreira adicional às perdas térmicas e como sistema de captação e acumulação de energia solar, que é posteriormente devolvida de forma desfasada ao interior; no verão, absorve o excesso de calor da habitação e facilita a sua expulsão através da ventilação natural. Para além do desempenho energético, o sistema foi desenhado com preocupação de integração arquitetónica, surgindo como uma extensão natural da habitação e conciliando eficiência térmica, conforto e coerência espacial.

#### 4.1.1 Módulo

O sistema é composto por um módulo base replicável, aplicado tanto ao nível de janelas como portas de correr, que mantém sempre o desenho construtivo, independentemente da variação dimensional. Cada módulo integra aberturas normalizadas que permitem a união vertical e horizontal através de conectores macho-fêmea, fixos com parafusos M5 em porcas rebite metálicas.

A circulação de água entre módulos é assegurada por conectores atravessadores centrais, responsáveis pela continuidade vertical do circuito. Estes elementos devem estar perfeitamente alinhados e à face, garantindo uma ligação estanque através da compressão de O-rings.

O enchimento e a drenagem do sistema ocorrem pelas aberturas laterais do último módulo inferior, onde podem ser instaladas válvulas apropriadas. Para que a água possa entrar ou sair do circuito, é necessário remover a tampa *flush* do último módulo superior, permitindo a entrada de ar. Este princípio, semelhante ao funcionamento de uma palhinha, assegura que o sistema permanece selado e estável enquanto a entrada de ar estiver fechada. Apenas com a remoção da tampa superior é possível iniciar o enchimento (expulsando o ar) ou permitir a drenagem controlada da estrutura. É importante também destacar que o ponto inferior do módulo base apresenta uma funcionalidade versátil, adaptando-se consoante a sua posição na estrutura. Quando colocado junto ao chão, pode integrar rodas embutidas que asseguram a mobilidade do sistema. Em alternativa, quando o mesmo módulo é utilizado numa posição intermédia ou superior, esse ponto pode ser equipado com um conector de encaixe, garantindo a continuidade vertical do circuito hídrico. Esta solução flexível permite que o mesmo elemento assuma diferentes funções, reforçando a lógica de utilização de um único módulo em toda a estrutura.

Todos os furos técnicos são pré-integrados, permitindo ao utilizador aplicar tampas, válvulas, rodas ou conectores conforme a configuração desejada. A Figura 15 ilustra estas possibilidades, destacando a flexibilidade funcional do módulo base consoante a sua posição na estrutura.

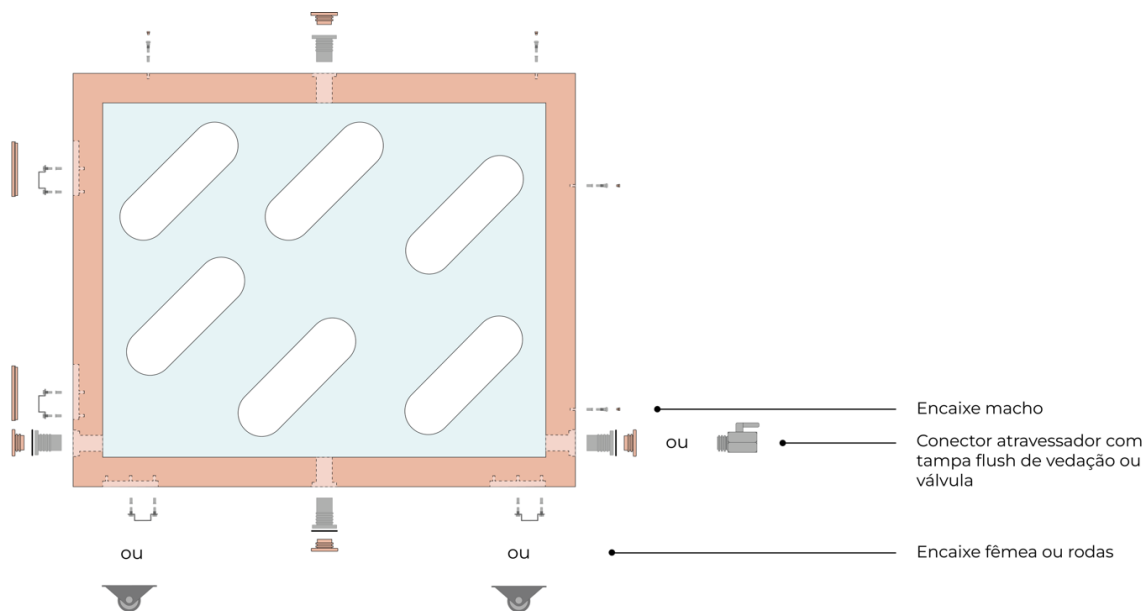


Figura 15: Componentes módulo. Fonte: a autora.

#### 4.1.1.1 Encaixe

Os módulos foram concebidos para permitir encaixe sequencial entre si, tanto na orientação vertical como horizontal, recorrendo a um sistema macho-fêmea. Este mecanismo inspira-se na lógica modular de sistemas como o LEGO®, onde cada unidade se liga à seguinte por continuidade de encaixe.

A ligação é realizada através de encaixes passantes do tipo fêmea, fixos à estrutura por parafusos M5 em insertos metálicos, compatíveis com o sistema Mod-eez® (KNAPP®). Estes elementos permitem a receção de um parafuso macho com cabeça de ombro, que desliza no interior do encaixe e garante a fixação entre módulos, permitindo uma união segura e reversível, que facilita a montagem e desmontagem sempre que necessário.

Nas ligações verticais, o encaixe integra ainda a função de vedação hidráulica: o conector atravessador inferior inclui um O-ring saliente que, ao ser comprimido pelo elemento superior do módulo seguinte, assegura a estanquidade da passagem de água. Desta forma, as uniões estruturais e hidráulicas são alcançadas num único gesto de encaixe, garantindo simultaneamente precisão de alinhamento e fiabilidade (Figura 16).

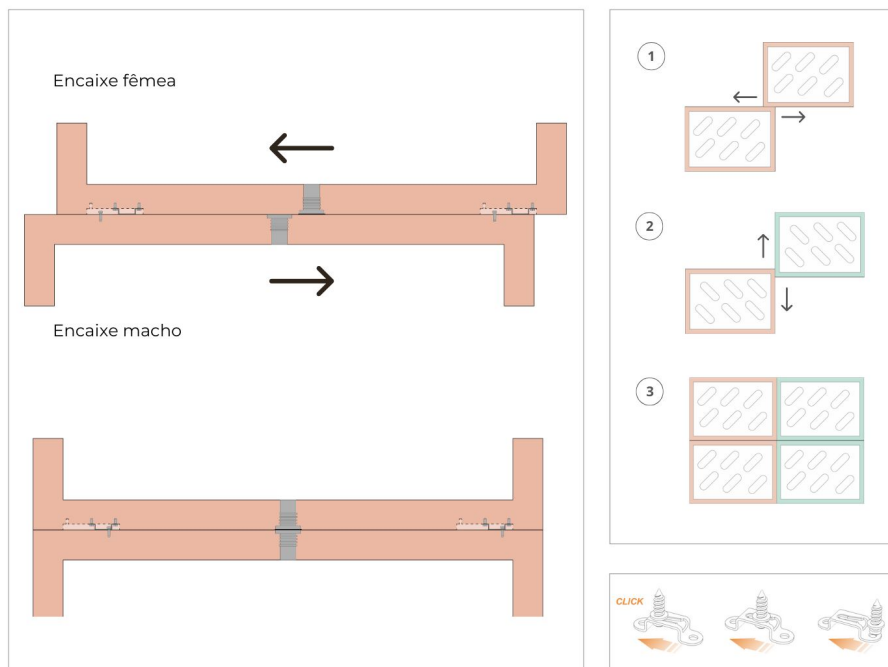


Figura 16: Encaixe modular. Adaptado de: KNAPP, 2025.

#### 4.1.1.2 Suporte regulável

Para assegurar o correto posicionamento dos módulos em frente às janelas, foi desenvolvido um suporte regulável telescópico em alumínio extrudido, material escolhido pela sua elevada resistência mecânica, baixo peso específico e comportamento anticorrosivo.

O sistema é composto por um encaixe macho-fêmea tubular, no qual o elemento macho desliza no interior da fêmea até à altura pretendida (0,80 m a 1,00 m, acompanhando os vãos de janela normalizados). O bloqueio é realizado através de furos passantes transversais e de um pino de segurança, semelhante ao utilizado em equipamentos médicos (como canadianas) ou de ginásio, garantindo robustez estrutural e operação intuitiva (Figura 17).



Figura 17: Suporte regulável: Fonte: a autora.

Além disso, o suporte é compatível com o mesmo sistema de encaixe modular macho-fêmea dos painéis, permitindo montagem e desmontagem rápida, sem necessidade de ferramentas especializadas.

#### 4.1.1.3 Sistema de deslize

Inspirado no princípio construtivo das *ghost doors*, o sistema de deslizamento foi desenvolvido de modo a manter todos os componentes mecânicos ocultos na parte posterior das molduras, assegurando uma integração discreta e um acabamento contínuo, como representado na Figura 18.

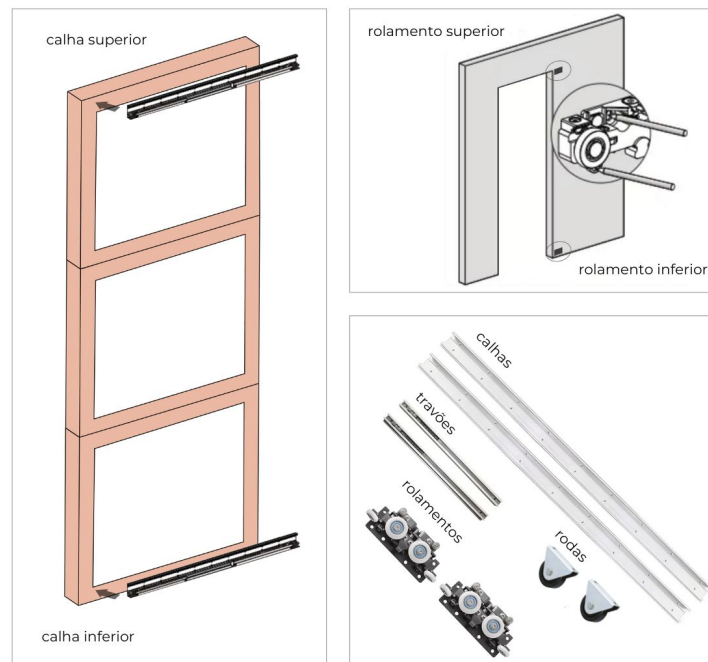


Figura 18: Sistema de deslize. Adaptado de: Tengyu, 2022.

A estrutura assenta num sistema de duas calhas: uma superior, aplicada na moldura do módulo superior, e outra inferior, aplicada na moldura do módulo inferior. Os rolamentos, fixos lateralmente à parede junto à janela, asseguram apenas a estabilidade e o correto alinhamento horizontal durante a movimentação dos painéis, enquanto o peso da estrutura é suportado por rodas industriais em borracha de alta resistência.

O sistema integra ainda um mecanismo de fecho suave (*soft closer*), que assegura um movimento controlado e silencioso na abertura e fecho, reforçando simultaneamente o conforto e a segurança na utilização.

## 4.2 Liberdade de composição

A modularidade do sistema permite múltiplas configurações laterais, adaptando-se ao espaço disponível e às preferências do utilizador. Os módulos podem ser aplicados individualmente ou combinados para cobrir uma ou ambas as folhas do vão, à esquerda, à direita ou em continuidade, garantindo flexibilidade e integração em diferentes contextos arquitetónicos, como ilustrado na Figura 19.

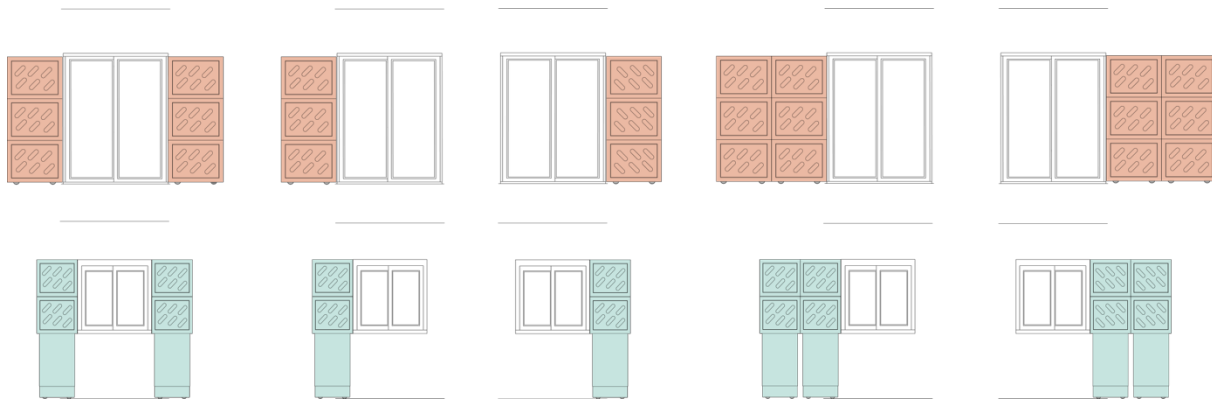


Figura 19: Liberdade de composição modular. Fonte: a autora.

## 4.3 Materiais

A seleção dos materiais que compõem o sistema Helie foi orientada por critérios de desempenho térmico, resistência mecânica, estanqueidade e durabilidade. Cada componente cumpre uma função específica na otimização do comportamento do conjunto, garantindo a sua eficiência energética e compatibilidade com o ambiente interior das habitações. Na figura 20, apresenta-se uma síntese dos principais elementos constituintes, com indicação dos materiais utilizados e respetivas funções.

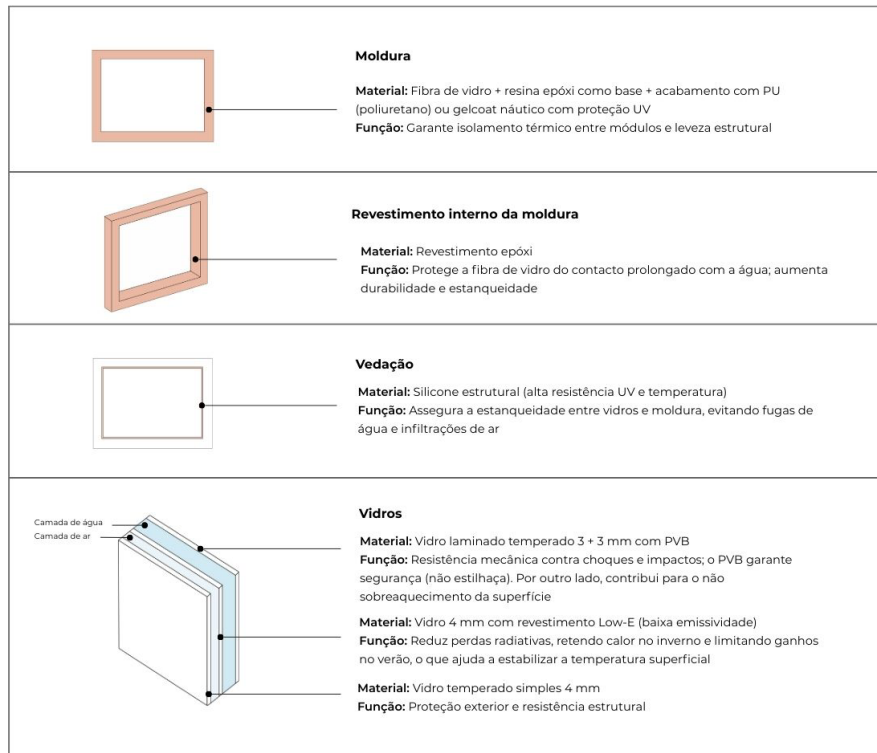


Figura 20: Materiais módulo. Fonte: a autora.

Em conjunto, os materiais seleccionados asseguram simultaneamente o desempenho térmico desejado e a robustez estrutural necessária à longevidade do sistema.

#### 4.4 Sistema Helie no espaço

A Figura 21 ilustra a colocação do sistema Helie em contexto habitacional.

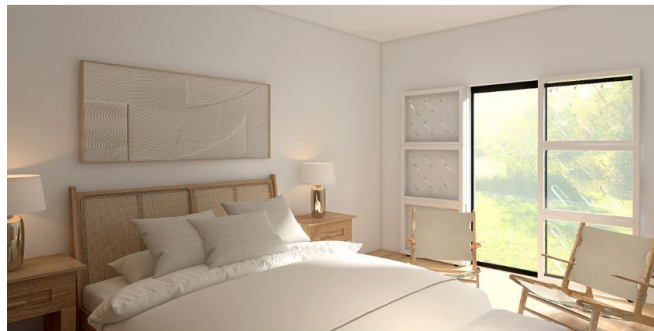
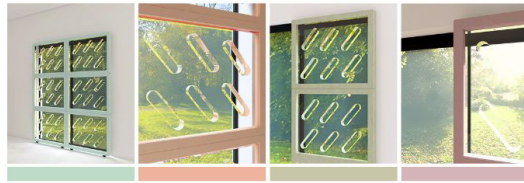


Figura 21: Sistema Helie no espaço. Fonte: a autora.

#### 4.5 Custo

A abordagem inicial para a análise de custos passou pela tentativa de recolha de orçamentos comerciais junto de fornecedores nacionais para os principais materiais do módulo. Perante a ausência de resposta, optou-se por utilizar preços referenciais de acesso público, de forma a garantir a transparência e a verificabilidade da análise.

Assim, os valores apresentados na tabela foram construídos a partir de fontes abertas e verificáveis. Para os elementos de vidro recorreu-se ao Gerador de Preços da CYPE (2025), enquanto a moldura projetada em fibra de vidro com resina epóxi, sem equivalente direto em retalho, foi aproximada por um perfil pultrudido em fibra de vidro ( $50 \times 50 \times 5$  mm), disponível em fornecedores nacionais. Os acessórios e ferragens correntes (parafusos, porcas rebite, o-rings, rodízios e passa-muros) foram orçados com base em catálogos de retalho (Leroy Merlin), a partir de kits cujos preços foram convertidos em valor unitário. Para os parafusos de ombro em inox, não comercializados em grandes superfícies, foi considerado o modelo Keystone 2442 da Digi-Key, assumindo o respetivo custo de referência.

Tabela 10: Custo módulo. Fonte: a autora.

Material	Quantidade	Descrição	Custo unit. (€)	Custo total (€)
Moldura				
Perfil pultrudido em fibra de vidro	3,10 ml	Secção $50 \times 50 \times 5$ mm (Alto.pt)	11,80 €/ml	36,58
Vidro				
Vidro laminado temperado	0,45 m <sup>2</sup>	3+3 mm PVB (CYPE)	51,55 €/m <sup>2</sup>	23,20
Vidro duplo Low-E	0,45 m <sup>2</sup>	4 mm + câmara de ar 6 mm + 4 mm Low-E (CYPE)	133,16 €/m <sup>2</sup>	59,92
Ferragens e Acessórios				
Passa-muros PVC	4 unid.	3/4" Leroy Merlin	5,29 €/unid.	21,16

<i>O-rings</i> de vedação	3 unid.	EPDM Ø25 mm (kit Leroy Merlin)	0,05 €/unid.	0,15
Encaixes tipo Mod-ez 4032	4 unid.	Conectores ocultos adaptados p/ M5 (KNAPP)	1,48 €/unid.	5,92
Rolamentos	2 unid.	Leroy Merlin, Ø50 mm, carga 165 kg	4,90 €/unid.	9,80
Parafusos M5 inox	8 unid.	Leroy Merlin, Ø5 mm, L=20 mm, kit 25 unid. (5,00 €)	0,20 €/unid.	1,60
Parafusos de ombro inox (low profile)	4 unid.	Keystone 2442, Digi-Key	1,89 €/unid.	7,56
Porcas rebite M5 inox	12 unid.	Leroy Merlin, kit 20 unid. (6,39 €)	0,32 €/unid.	3,84
Subtotal materiais				168,73 €

É importante sublinhar que o subtotal de materiais (168,73 € por módulo) não inclui custos adicionais, tais como:

- mão de obra,
- operações de corte e perfuração do vidro,
- vidro suplementar para preenchimento das laterais das perfurações,
- consumíveis de colagem e vedação (resinas epóxi e silicones estruturais).

Estes elementos foram apenas descritos como custos adicionais não quantificados, de forma a evitar a apresentação de valores arbitrários. Desta forma, o cálculo deve ser entendido como uma análise de custos referenciais, que permite estabelecer uma ordem de grandeza credível para a avaliação económica da solução, sem substituir um orçamento técnico-comercial definitivo.

Por fim, importa destacar que o valor apurado reflete um cenário de produção em pequena escala, cujos custos unitários de aquisição são mais elevados. Em contexto de produção industrial em série, seria expectável uma redução significativa dos custos, devido à economia de escala, à compra de materiais em maior volume e à otimização dos processos de fabrico e montagem. Assim, a estimativa aqui apresentada deve ser interpretada como um valor conservador.

#### 4.6 Desenho técnico

Apresentam-se na presente secção os desenhos técnicos do módulo porta nas Figuras 22 a 25 e do módulo janela na Figura 26.

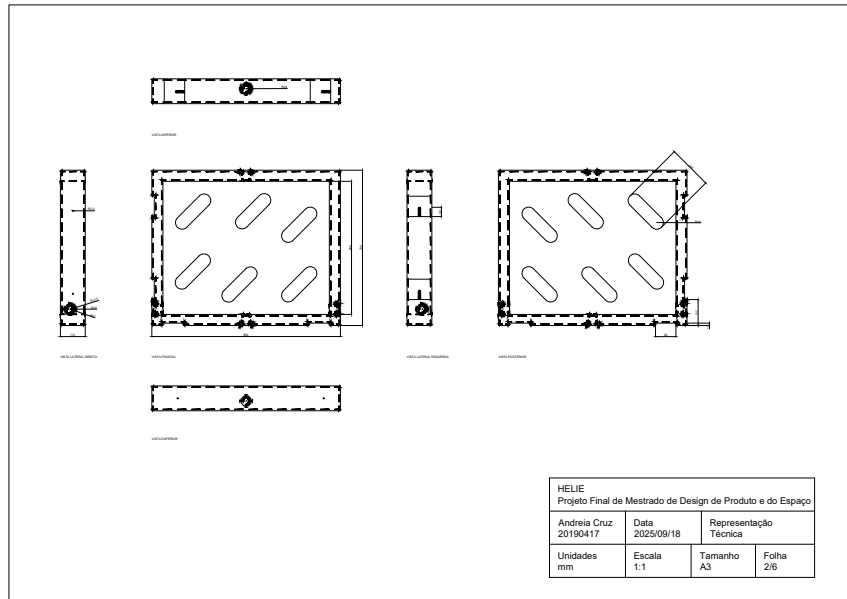


Figura 22: Representação técnica. Fonte: a autora.

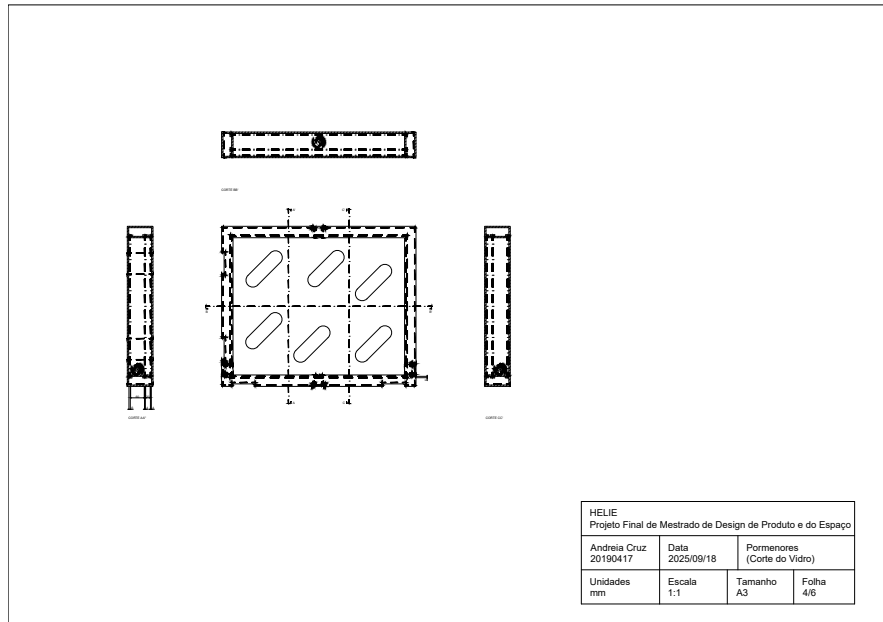


Figura 23: Pormenores (corte do vidro). Fonte: a autora.

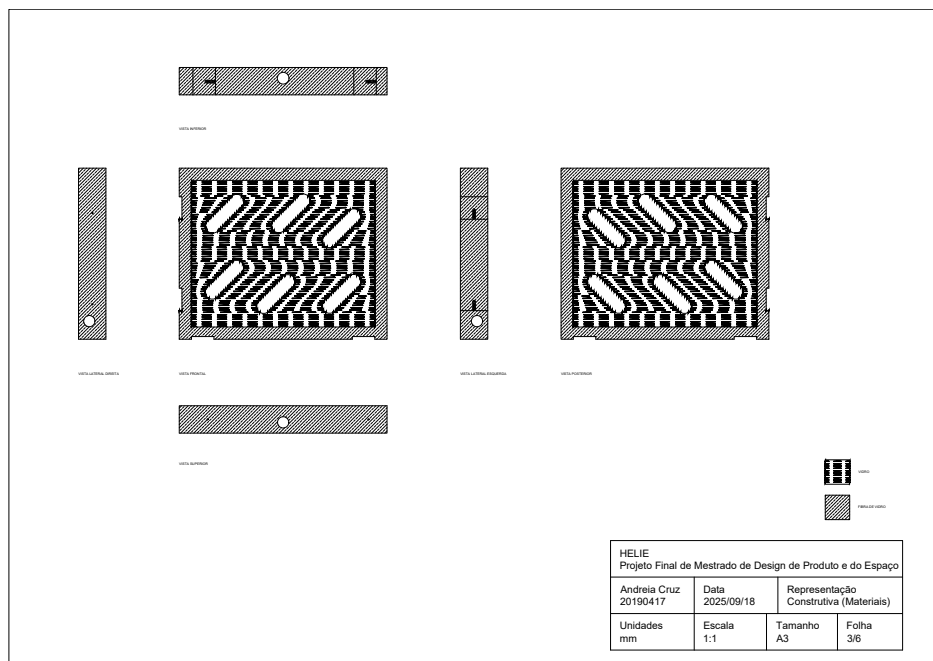


Figura 24: Representação construtiva (Materiais). Fonte: a autora.

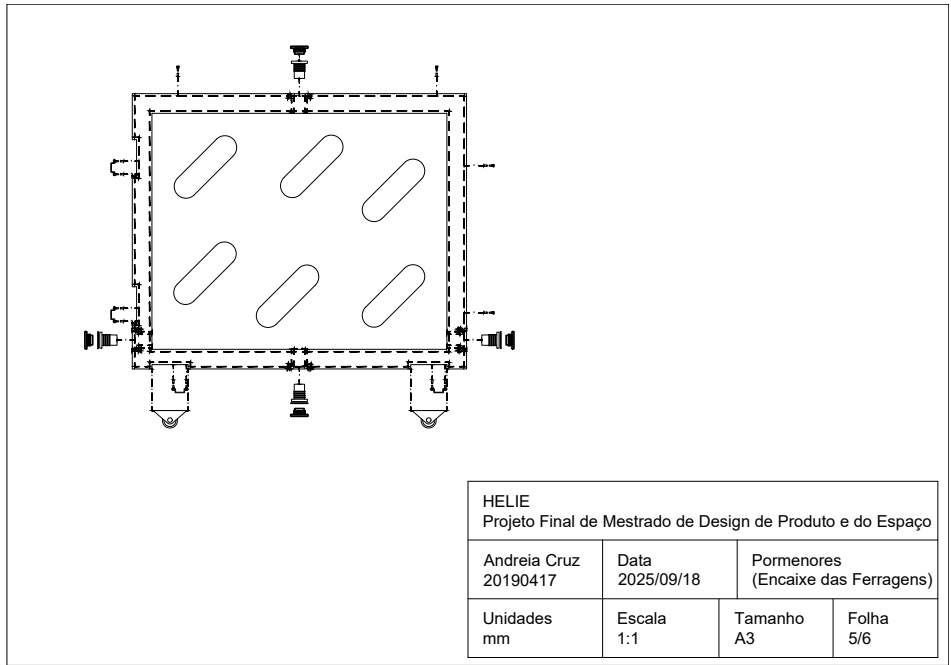


Figura 25: Pormenores (encaixe ferragens). Fonte: a autora.

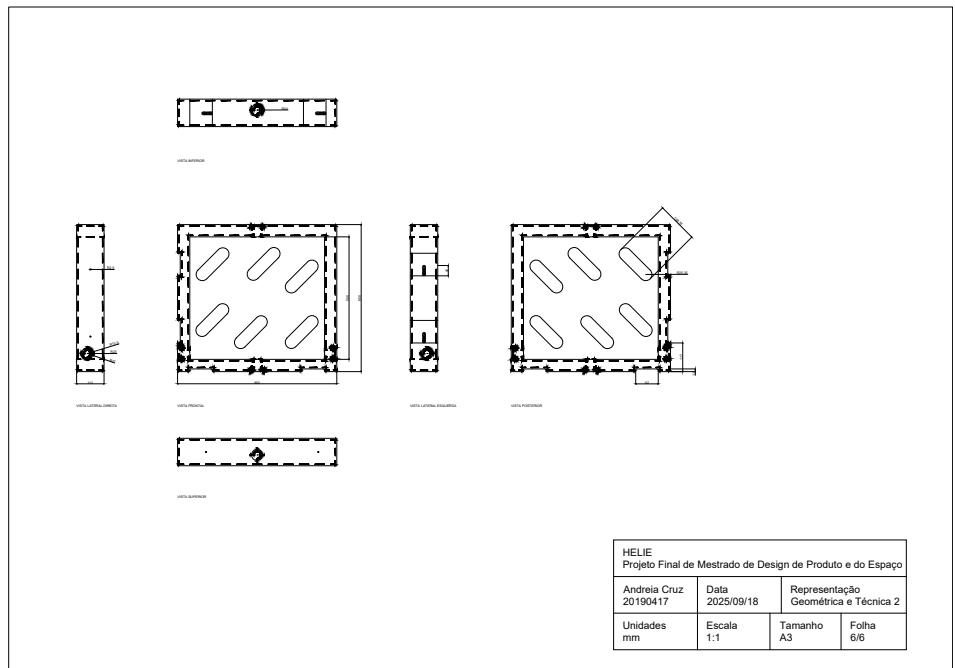


Figura 26: Representação geométrica e técnica módulo janela. Fonte: a autora.

## 4.7 Ergonomia

A introdução de uma análise ergonómica no presente projeto justifica-se pela relevância que os fatores humanos assumem na viabilidade técnica e funcional do sistema Helie. Embora se trate de uma solução predominantemente construtiva, a sua montagem, transporte e utilização envolvem esforço físico, manipulação de cargas e operações em altura, o que exige uma abordagem cuidadosa centrada na interação entre o utilizador e o sistema. Assim, a ergonomia é aqui considerada não como um complemento, mas como uma componente essencial para assegurar a segurança, a eficiência e a acessibilidade da proposta.

O projeto contempla o movimento horizontal dos módulos em relação à parede, através de calhas e rolamentos que asseguram o alinhamento e a estabilidade da estrutura. Apesar do peso total do sistema, as rodas industriais embutidas com rolamentos de baixa fricção reduzem significativamente o esforço de deslize dos painéis. Cálculos indicam que o esforço necessário varia entre 2 e 8 N, o que equivale a empurrar objetos ligeiros, como um smartphone (~200 g) ou meia garrafa de água (~800 g) (consultar Anexo G). Este desempenho ergonómico reduz substancialmente a carga física durante o uso quotidiano e promove maior acessibilidade para diferentes perfis de utilizador.

A conceção modular do sistema, composto por unidades independentes, foi pensada para facilitar o manuseamento e reduzir o esforço físico associado à instalação. Cada módulo tem um peso aproximado de 19,5 kg, o que, quando manipulado por duas pessoas, resulta numa carga individual de cerca de 9,75 kg. Segundo Dul e Weerdmeester (2008), o limite recomendado pelo *American National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)* para o levantamento manual ocasional, em condições ideais, é de 23 kg, assumindo que a carga é mantida próxima ao corpo, com distância horizontal inferior a 25 cm e dentro da zona de força situada entre 85 e 110 cm do solo. A abordagem adotada respeita estas condições, na medida em que as operações foram desenhadas para manter a carga próxima ao tronco, minimizar torções e promover posturas estáveis.

Embora o sistema tenha sido concebido para permitir a sua montagem por utilizadores informados, o projeto assume que a instalação ideal deverá ser realizada por profissionais qualificados, especialmente devido às exigências associadas ao trabalho em altura e ao manuseamento e encaixe de módulos com volume e peso consideráveis.

Ainda assim, o projeto também reconhece o risco de instabilidade durante a montagem inicial dos módulos, especialmente daquele que fica em contacto com o chão, que assenta sobre rolamentos. Para mitigar esse risco, recomenda-se a imobilização da base através de calços ou travões e, sempre que possível, a utilização de apoios laterais temporários durante a colocação dos seguintes módulos. Esta medida contribui para garantir a estabilidade da estrutura e evitar acidentes por tombamento ou deslocamento inesperado.

O processo de enchimento da estrutura implica operações em altura, uma vez que a abertura superior se localiza a cerca de dois metros do solo. Esta condição configura um cenário de trabalho em altura, exigindo o uso de equipamentos de apoio adequados, como escadotes ou andaimes móveis. O enchimento é realizado através de uma mangueira com válvula de controlo, ligada lateralmente ao último módulo inferior. Esta ligação permite o fluxo direto e controlado da água para o interior do circuito, eliminando a necessidade de levantamento manual de recipientes pesados.

Para que a água possa circular, é necessário remover previamente a tampa flush do último módulo superior, permitindo a entrada de ar no sistema. De acordo com o mesmo princípio, o esvaziamento é também realizado através da válvula lateral inferior, sendo possível optar por drenagem total ou faseada. O escoamento pode ocorrer por gravidade ou com o auxílio de uma bomba de água, utilizando canalização externa (mangueira), reduzindo o esforço físico e prevenindo riscos associados à presença de água no pavimento.

Em suma, a consideração da ergonomia neste projeto tornou-se especialmente relevante por se tratar de um sistema concebido para ser instalado e manuseado em ambiente doméstico. A natureza física das operações envolvidas exigiu uma atenção particular à forma como cada tarefa é executada, desde o transporte dos módulos até ao seu enchimento e movimentação, promovendo soluções ajustadas às capacidades do utilizador e à realidade do uso quotidiano.

## V. Conclusão

A presente investigação teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma solução de design passivo inovadora, adaptada ao contexto climático, construtivo e social da cidade de Lisboa, com vista à melhoria do conforto térmico e à redução da dependência de sistemas de climatização ativa em habitações existentes. A questão principal de investigação: “De que forma uma solução de design passivo inovadora, desenvolvida para o contexto climático e habitacional da cidade de Lisboa, pode melhorar o conforto térmico e contribuir para a eficiência energética em habitações existentes?”, foi respondida positivamente, com base em evidência recolhida ao longo das diferentes fases do processo metodológico.

O primeiro objetivo específico, centrado na caracterização do clima urbano e do parque habitacional lisboeta, permitiu identificar vulnerabilidades significativas ao nível da envolvente térmica, nomeadamente a insuficiência de isolamento e o fraco desempenho dos vãos envidraçados. Estes fatores comprometem simultaneamente a retenção de calor no inverno e a proteção contra ganhos térmicos excessivos no verão.

No segundo objetivo, foram analisadas estratégias de design passivo adequadas ao clima mediterrânico da cidade. Verificou-se que abordagens que conjugam elevada inércia térmica, sombreamento sazonal, ventilação natural e orientação solar otimizada revelam maior eficácia na promoção do conforto térmico. Estas premissas orientaram as decisões projetuais subjacentes ao desenvolvimento da solução proposta.

O terceiro objetivo visou compreender os comportamentos térmicos e as perceções de conforto dos residentes de Lisboa. Através da aplicação de inquéritos, identificou-se uma prática generalizada de estratégias passivas, bem como uma crescente preferência por soluções passivas em detrimento da climatização ativa, motivada por razões económicas e ambientais. Estes dados permitiram alinhar o desenvolvimento da solução com os hábitos reais dos utilizadores, complementando-os.

A validação da solução junto de utilizadores, especialistas e por meio de simulações térmicas deu cumprimento ao quarto objetivo. O *focus group* revelou uma forte aceitação social e gerou contributos relevantes para o aperfeiçoamento formal e funcional da proposta. Os especialistas destacaram melhorias importantes para a futura evolução do projeto. As simulações térmicas confirmaram a eficácia da solução em manter os espaços interiores dentro ou próximos dos limites

de conforto definidos pela norma EN 16798:2014, mesmo sob condições críticas de verão (30°C) e de inverno (10°C). Os valores de transmitância térmica obtidos (entre 1,94 e 2,35 W/m<sup>2</sup>·K) superaram o desempenho de janelas duplas convencionais, demonstrando uma notável capacidade de retenção térmica.

Com base nestes resultados, conclui-se que a solução desenvolvida contribui significativamente para a melhoria do conforto térmico e para a eficiência energética em habitações existentes da cidade de Lisboa.

Ainda assim, esta investigação responde diretamente à lacuna teórica identificada por Toroxel e Silva (2024), ao propor uma abordagem holística que contempla não apenas o desempenho energético, mas também a viabilidade económica, o conforto dos ocupantes, a durabilidade da solução e a sua compatibilidade com os hábitos dos utilizadores. A articulação destas dimensões permite uma contribuição teórica e prática robusta, propondo um modelo de intervenção replicável, eficaz e alinhado com as metas nacionais de descarbonização e transição energética.

## 5.1 Limitações e recomendações futuras

Este trabalho apresenta um conjunto de limitações que, embora esperadas face ao âmbito e aos recursos disponíveis, condicionaram parcialmente a abrangência e a precisão dos resultados obtidos. No entanto, estas mesmas limitações servem também de ponto de partida para recomendações futuras, orientadas para o aprofundamento e a validação empírica da solução proposta.

Uma das principais limitações reside no facto de o estudo se basear em estimativas teóricas, sem aferição prática do desempenho térmico da estrutura. Apesar de se terem considerado perdas até 70% para compensar incertezas, esta abordagem não substitui a experimentação em contexto real. Assim, recomenda-se que futuros trabalhos incluam medições empíricas do comportamento térmico da estrutura, especialmente tendo em conta a sua natureza dinâmica, de modo a verificar se ocorrem perdas significativas de eficiência decorrentes do movimento dos módulos ou da sua interação com os vãos.

De igual modo, a estimativa energética da estrutura foi realizada considerando superfícies planas, o que levou a uma simplificação da geometria real da proposta. Embora o design tenha integrado

reentrâncias com objetivos específicos, nomeadamente permitir a incidência de radiação solar direta nos meses de inverno e potenciar, no verão, a convecção do ar de forma turbulenta para favorecer a dissipação térmica, estas funcionalidades não foram objeto de quantificação no presente estudo. Como recomendação para investigações futuras, propõe-se a aferição destas geometrias, com o objetivo de estimar o seu real contributo para a acumulação e dissipação de calor ao longo do ano.

Outra limitação relevante está relacionada com a adaptação das medidas dos módulos aos vãos existentes, nomeadamente janelas e portas, que frequentemente apresentam dimensões variáveis. A utilização de módulos rígidos e padronizados foi apontada como limitação para cobrir todos os cenários de envidraçados. Como recomendação para trabalhos futuros, propõe-se a exploração de duas abordagens complementares: por um lado, a personalização dos módulos para os vãos que se afastem significativamente dos intervalos definidos. Por outro, a avaliação do impacto que a não correspondência exata entre módulos e vãos poderá ter na eficiência térmica da estrutura, aferindo se essas diferenças introduzem perdas relevantes de desempenho.

A ausência de um orçamento detalhado constitui também uma limitação, tendo levado à utilização de valores estimados para os componentes da estrutura. Como recomendação, sugere-se a elaboração de um estudo económico mais robusto, que inclua o cálculo do tempo de retorno do investimento (*payback time*), permitindo uma análise mais fundamentada da viabilidade financeira da solução.

Paralelamente, a aplicação de normas térmicas e de conforto foi realizada de forma teórica. Será relevante verificar, em contexto prático, se a implementação da estrutura permite efetivamente atingir os intervalos definidos para conforto térmico, contribuindo assim para a validação ou eventual reformulação do conceito.

Uma outra questão que carece de validação prática prende-se com a densidade e o peso da estrutura. A solução proposta assume uma determinada espessura da camada de água, baseada em princípios teóricos de acumulação térmica. No entanto, é necessário aferir, junto de especialistas e através de simulações estruturais, se o peso resultante é compatível com os elementos construtivos existentes. Caso não o seja, poderá ser necessário reduzir a espessura e integrar tecnologias complementares que mantenham a eficácia térmica sem comprometer a segurança.

Outra recomendação que decorre diretamente das limitações identificadas diz respeito à aplicabilidade da estrutura em paredes falsas. Embora grande parte do peso da estrutura recaia

sobre os rolamentos no piso, não foi realizada a quantificação da força exercida nos pontos de fixação às paredes, essencial para garantir a estabilidade e evitar o risco de tombamento. Assim, em investigações futuras e junto de especialistas, deverá ser considerada a análise dessas forças, de modo a assegurar a viabilidade estrutural da aplicação em diferentes tipos de suporte.

Além disso, recomenda-se a análise do efeito de lupa, considerando a presença de superfícies envidraçadas e a possibilidade de concentração de radiação solar, que pode representar um risco térmico e de segurança. Este aspeto não foi explorado no presente estudo, constituindo uma limitação que merece atenção futura.

Outra limitação particularmente relevante foi a ausência de aferição prática do aquecimento da estrutura em condições reais de exposição solar. Apesar de a solução integrar películas refletoras e múltiplas camadas com o objetivo de minimizar o aquecimento superficial, esta questão não foi verificada experimentalmente. Tendo em conta que se trata de uma preocupação manifestada por potenciais utilizadores, recomenda-se que futuros estudos incluam medições térmicas *in situ*, de modo a validar a eficácia dos materiais utilizados e a garantir o conforto dos ocupantes.

Já os intervalos de manutenção também devem ter de ser tidos em conta de modo a garantir durabilidade e eficácia ao longo do tempo.

Em conclusão, as limitações identificadas ao longo deste trabalho evidenciam a necessidade de aprofundamento em diversas áreas, nomeadamente através de medições práticas, análises estruturais e adaptações ao contexto real de aplicação. As recomendações propostas procuram precisamente responder a essas lacunas, apontando direções concretas para futuros desenvolvimentos e validações da solução estudada.

## Referências Bibliográficas

- Abbassi, F., Naili, N., & Dehmani, L. (2022). Optimum Trombe wall thickness in the Mediterranean Tunisian context: An energetic and economic study. *Energy Science & Engineering*, 10(9), 3426–3440.
- Adams, S., Becker, M., Krauss, D., & Gilman, C. (s.d.). *Not a dry subject: Optimizing water Trombe walls*. Universidade do Oregon. Recuperado de [https://www.academia.edu/32694754/NOT\\_A\\_DRY\\_SUBJECT\\_OPTIMIZING\\_WATER\\_TROMBE\\_WALLS](https://www.academia.edu/32694754/NOT_A_DRY_SUBJECT_OPTIMIZING_WATER_TROMBE_WALLS)
- ADENE. (2021). *Manual SCE: Manual técnico para a avaliação do desempenho energético dos edifícios* (Despacho n.º 6476-H/2021, de 1 de julho). Agência para a Energia.
- ADENE. (2023). *4.º relatório do Grupo de Coordenação da ELPRE*. Agência para a Energia. [https://www.adene.pt/wp-content/uploads/2024/03/4.o\\_Relatorio\\_Grupo\\_Coordenacao\\_ELPRE\\_Mai2023.pdf](https://www.adene.pt/wp-content/uploads/2024/03/4.o_Relatorio_Grupo_Coordenacao_ELPRE_Mai2023.pdf)
- ADENE. (s.d.). *Estatísticas da certificação energética dos edifícios*. Sistema de Certificação Energética. Acedido a 12 de Junho de 2025, a partir de <https://sce.pt/estatisticas/>
- ASHRAE. (2010). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Bainbridge, D. A., & Haggard, K. (2011). *Passive solar architecture: Heating, cooling, ventilation, daylighting, and more using natural flows*. Chelsea Green Publishing. <https://books.google.pt/books?id=gD687keMhLwC>
- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
- Câmara Municipal de Lisboa. (2023). *Carta Municipal de Habitação de Lisboa 2023–2032* (versão consolidada).

- CEN. (2014). *EN 16798-2 TR:2014 (E): Guideline for using indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings* (Draft 8). European Committee for Standardization.
- Chiras, D. D. (2002). *The solar house: Passive heating and cooling*. Chelsea Green Publishing. <https://books.google.pt/books?id=62jUAgAAQBAJ>
- Costa, J. G. (2007, 29 de maio). *A água como elemento termo-regulador na arquitectura – repensar a sustentabilidade: Mottanai*. Apresentação no Dossier 11 “:Encontros2”, Ordem dos Arquitectos — Secção Regional Sul.
- Creswell, J. W. (2009). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (3.<sup>a</sup> ed.). SAGE Publications.
- Da Casa Martín, F., Celis D’Amico, F., & Echeverría Valiente, E. (2019). *Metodología para elaborar una cartografía regional y aplicar estrategias bioclimáticas según la Carta de Givoni*. *Revista Hábitat Sustentable*, 9(2), 52–63.
- da Silva, M. A., Gasparella, G., & Carlo, J. C. (2024). Towards climate, bioclimatism, and building performance—A characterization of the Brazilian territory from 2008 to 2022. *Buildings*, 14(8), 2568.
- de Dear, R. J. & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549-561.
- de Dear, R. J., & Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104(1), 145–167.  
<https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
- Debnath, H., Aishe, I. J., & Rabab, R. F. (2024, dezembro). *Balancing energy efficiency and human comfort: Bioclimatic approaches for energy-efficient high-rise living in Bangladesh's urban context* [Conference paper]. ResearchGate.
- Design Council. (2025). *The double diamond*. Design Council.  
<https://www.designcouncil.org.uk/our-resources/the-double-diamond/>
- Diretiva (UE) 2024/1275 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de abril de 2024, relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). *Jornal Oficial da União Europeia*: L, 2024/1275, de 8/5/2024, p. 1–61. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L\\_202401275](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275)

- Dul, J., & Weerdmeester, B. (2001). *Ergonomics for beginners: A quick reference guide* (2nd ed.). Taylor & Francis.
- Durães, T. (2013). *Identificação do tipo e quantidade de PCM adequado ao clima de Lisboa para aplicação em edifícios de habitação multifamiliar* [Dissertação de mestrado, Universidade do Minho]. RepositóriUM.  
<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/31138>
- ÉMI, & Acciona. (2015). *Guide for bioclimatic design (WP 2.4 – Del 2.4.4, revised version)*. Concerto Communities in EU.
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>
- Florides, G. A., Kalogirou, S., Tassou, S., & Wrobel, L. C. (2002). Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. *Applied Energy*, 73(3), 299–328.
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11–23.
- Gonçalves, H., & Graça, J. M. (2004). *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal* [Carta de Givoni para Lisboa]. Lisboa: DGEG / IP-3E.
- Grupo Sosoares. (2022). *Catálogo técnico ST v04nov2022*.  
<https://www.grupososoares.pt/assets/uploads/catalogos/aluminio/51fbf-catalogo-tecnico-st-v04nov2022.pdf>
- Guimarães, E. T., Bragança, L., Almeida, M., & Mateus, R. (2015). *Analysis of Portuguese residential buildings' needs and proposed solutions*. Proceedings of EuroELECS 2015, Guimarães, Portugal. ISBN 978-989-96503-8-9.
- Hall, D. (Ed.). (2010). *Architectural graphic standards for residential construction* (2.<sup>a</sup> ed.). American Institute of Architects; John Wiley & Sons.
- Han, Y., Ele, Z. Y., Wu, S., Liu, Y., Lian, Y., Wang, C., Feng, J., & Zhou, Z. N. (2025). Melhorando a eficiência energética dos edifícios com otimização da massa térmica. *Avanços em Energia Aplicada*, 18, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2025.100224>

- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2008). Fundamentos de transferência de calor e de massa (E. M. Queiroz & F. L. P. Pessoa, Trads.; 6.<sup>a</sup> ed.). LTC. (Publicado originalmente em 2007)
- Instituto de Meteorologia, I.P. (s.d.). *Ficha climatológica 1971–2000: Lisboa/Geofísico (5350)*. Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior.
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 6946:2017 – Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation method*. ISO.
- IPMA. (2020). *Normais climatológicas 1991–2020*. Instituto Português do Mar e da Atmosfera. <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1991-2020/#535>
- Johra, H. (2021). *Thermal properties of building materials – Review and database* (Relatório Técnico N° 289). Aalborg University, Department of the Built Environment.
- Lamberts, R., Dutra, L., & Pereira, F. O. R. (2014). *Eficiência energética na arquitetura* (3.<sup>a</sup> ed.). Procel.
- Lechner, N. (2015). *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects* (4.<sup>a</sup> ed.). John Wiley & Sons.
- Lusa. (2025, 6 de maio). *Portugal com maior subida na UE de preços de eletricidade no 2.º semestre de 2024*. Jornal de Negócios. Acedida a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/detalhe/portugal-com-maior-subida-na-ue-de-precos-de-eletricidade-no-2-semester-de-2024>
- Martin, B., & Hanington, B. (2012). *Universal methods of design: 100 ways to research complex problems, develop innovative ideas, and design effective solutions*. Rockport Publishers.
- Matias, L., & Santos, C. P. dos. (2013, março). *Conforto térmico adaptativo no setor residencial em Portugal* [Conference paper]. 2º CIHEL – Conferência Internacional sobre Habitação no Espaço Lusófono. <https://doi.org/10.13140/2.1.4471.4881>
- Meteostat. (2025, agosto 16). *Estação 08535 – Lisboa Gago Coutinho (2025-08-10 a 2025-08-16)*. Meteostat. <https://meteostat.net/pt/station/08535?t=2025-08-10/2025-08-16>
- Meteostat. (2025, agosto 16). *Station 08535 – Lisboa Gago Coutinho (2025-08-10 to 2025-08-16)*. Meteostat.

- Meteostat. (2025, janeiro 18). *Station 08535 – Lisboa Gago Coutinho (2025-01-12 to 2025-01-18)*. Meteostat. <https://meteostat.net/en/station/08535?t=2025-01-12/2025-01-18>
- Moita, F. (2010). *Energia solar passiva* (2.<sup>a</sup> ed.). Argumentum.
- Mustaparta, O., Silva, S., & Leitão, D. (s.d.). *Potentialities of using PCM in residential buildings in Portugal*. In *High Performance Sustainable Building Solutions* (Cap. 3, pp. 229–336). University of Minho.
- Myroniuk, K., Furdas, Y., Zhelykh, V., Adamski, M., Gumen, O., Savin, V., & Mitoulis, S.-A. (2024). Passive ventilation of residential buildings using the Trombe wall. *Buildings*, 14(10), 3154.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2010). Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free running buildings in European standard EN 15251. *Building and Environment*, 45(1), 11–17.
- NTN. (s.d.). *Rolling bearings handbook* (Cat. No. 9012/E). NTN Corporation.
- Nwachukwu, N. P., & Okonkwo, W. I. (2008). Effect of an absorptive coating on solar energy storage in a Trombe wall system. *Energy and Buildings*, 40(3), 371–374.
- Ordem dos Arquitectos – Secção Regional Sul. (2016). *Reabilitação e conservação do património arquitectónico* (Cadernos Técnicos, Vol. 4). Edições Ordem dos Arquitectos.
- Patti, M., Musarella, C. M., & Spampinato, G. (2025). *A habitat-template approach to green wall design in Mediterranean cities*. *Buildings*, 15(8), 2557.
- Pedro, J. B. (2013). *Habitação em Portugal: evolução e tendências*. Instituto Nacional de Estatística (INE); Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- Portugal. (2006). *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril). *Diário da República*, 1.<sup>a</sup> série-A, n.º 67, 2468–2513.
- Privat, F. P., & Guerrieri, D. C. (2021). *Telhados e paredes verdes como alternativa para o conforto térmico: Uma abordagem através de revisão sistemática da literatura*. Anais do XLI Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 2021, 1–13.

- Reis, C., Lopes, A., Correia, E., & Fragoso, M. (2020). Local weather types by thermal periods: Deepening the knowledge about Lisbon's urban climate. *Atmosphere*, 11(8), 830.
- REN – Redes Energéticas Nacionais. (2025, 6 de janeiro). *Recorde de produção de renováveis abastece 71% do consumo de eletricidade em 2024*. Acedida a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://ren.pt/pt-pt/media/noticias/recorde-de-producao-de-renovaveis-abastece-71-do-consumo-de-eletricidade-em-2024>
- Sá, N. A. O. de. (2015). *Identificação do tipo e quantidade de PCM adequado ao clima Português* [Dissertação de mestrado, Universidade do Minho]. Universidade do Minho.
- Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., & Sulaiman, M. Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6340–6351.
- Sánchez, P. F., & Hanco, L. M. (2024). *Paredes de trombe com inserção de meio poroso e sua influência no conforto térmico em apartamentos em Cusco, Peru*. *Energia e Ambiente Construído*, 5(2), 194–210. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.09.003>
- Santos, O., Capitão, C., Fialho, M., Silva, E., Freitas, S., Clímaco, N., Raposo, C., Schmidt, L., & Horta, A. (2023). *Conforto térmico e saúde humana no concelho de Lisboa*. Lisboa E-Nova. Acedida a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://lisboaenova.org/relatorio-conforto-termico/>
- Shen, J., Lassue, S., Zalewski, L., & Huang, D. (2007). Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls. *Energy and Buildings*, 39(9), 962–974.
- Simões, N., Manaia, M., & Simões, I. (2021). Energy performance of solar and Trombe walls in Mediterranean climates. *Energy*, 234, 121197.
- Simón-Martín, M. de. (2015). *Characterisation of solar diffuse irradiance on vertical surfaces* [Dissertação de mestrado, University of Leon]. ResearchGate.
- Singh, H., & O'Brien, P. G. (2022). Semi-transparent water-based Trombe walls for passive air and water heating. *Buildings*, 12(10), 1632. <https://doi.org/10.3390/buildings12101632>

- Stein-Montalvo, L., Ding, L., Hultmark, M., Adriaenssens, S., & Bou-Zeid, E. (2024, fevereiro 14). Kirigami-inspired wind steering for natural ventilation. *arXiv, Preprint*, 1–24. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.01577>
- Toroxel, J. L., & Silva, S. M. (2024). A review of passive solar heating and cooling technologies based on bioclimatic and vernacular architecture. *Energies*, *17*(5), 1006.
- Vedralnam, A., Kalauni, K., Soares, N., Salazar, B., Ostertag, C. P., & Taylor, H. K. (2025). Phase change materials for climate-adaptive buildings: A review framed by tropical and Mediterranean climates. *Journal of Energy Storage*, *125*, 116938. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116938>
- Walsh, R., Kenny, P., & Brophy, V. (2006). *Thermal mass & sustainable building*. Irish Concrete Federation.
- Zhang, T., Wang, H., Ding, J., Tang, S., Yuan, D., & Rao, Y. (2022). Transient simulation of the thermal performance of a novel phase change material Trombe wall. *Coatings*, *12*(11), 1754.
- Ziarani, N. N., Cook, M., & O’Sullivan, P. D. (2023). *Experimental evaluation of airflow guiding components for wind-driven single-sided natural ventilation: A comparative study in a test chamber*. *Energy and Buildings*, *300*, 113627.
- Zubarev, K., & Zobnina, J. (2023). Métodos para alcançar a eficiência energética em edifícios e sua avaliação. *Web de Conferências E3S*, *389*(3)

# Anexos

## A. Inquérito por questionário a habitantes da cidade de lisboa

05/08/25, 18:41

Hábitos de climatização

### Hábitos de climatização

#### Bem-vindo(a)

O presente questionário faz parte de uma investigação desenvolvida para a Dissertação de Mestrado em Design do Produto e do Espaço, no IADE - Universidade Europeia. O estudo tem como objetivo analisar os hábitos de climatização e as perceções de conforto térmico nas habitações da cidade de Lisboa, com foco na sustentabilidade e eficiência energética.

Dirigido exclusivamente aos residentes da cidade de Lisboa, o questionário é anónimo e as respostas serão tratadas de forma confidencial.

Agradece-se a sua colaboração, essencial para o progresso desta investigação. O preenchimento demora cerca de 10 minutos.

Andreia Cruz

20190417@iade.pt

---

\* Indica uma pergunta obrigatória

**1. 1- Idade:** \*  
(Selecione apenas uma opção)

Marcar apenas uma oval.

- 18-24 anos  
 25-34 anos  
 35-44 anos  
 45-54 anos  
 55-64 anos  
 65 anos ou mais

**2. 2- Género:** \*  
(Selecione apenas uma opção)

Marcar apenas uma oval.

- Masculino  
 Feminino  
 Outro

**3. 3- Situação profissional:** \*  
(Selecione apenas uma opção)

Marcar apenas uma oval.

- Estudante – Regime diurno (não trabalha)  
 Estudante – Regime diurno (trabalha)  
 Estudante – Regime pós-laboral (não trabalha)  
 Estudante – Regime pós-laboral (trabalha)  
 Empregado(a) a tempo inteiro – Período diurno  
 Empregado(a) a tempo inteiro – Período noturno  
 Empregado(a) a tempo inteiro – Turnos rotativos  
 Empregado(a) a tempo parcial – Período diurno  
 Empregado(a) a tempo parcial – Período noturno  
 Empregado(a) a tempo parcial – Turnos rotativos  
 Desempregado(a)  
 Reformado(a)  
 Outra: \_\_\_\_\_

**4. 4- Tipo de habitação:** \*  
(Selecione apenas uma opção)

Marcar apenas uma oval.

- Apartamento  
 Moradia com jardim ou quintal  
 Moradia sem jardim ou quintal  
 Outra: \_\_\_\_\_

**5. 5- Freguesia de residência em Lisboa:** \*  
(Selecione apenas uma opção)

Marcar apenas uma oval.

- Ajuda  
 Alcântara  
 Alvalade  
 Areeiro  
 Arroios  
 Avenidas Novas  
 Beato  
 Belém  
 Benfica  
 Campo de Ourique  
 Campolide  
 Carnide  
 Estrela  
 Lumiar  
 Marvila  
 Misericórdia  
 Olivais  
 Parque das Nações  
 Penha de França  
 Santa Clara  
 Santa Maria Maior  
 Santo António  
 São Domingos de Benfica  
 São Vicente  
 Outra: \_\_\_\_\_

**6. 6- Quais das seguintes características estão presentes na sua habitação? \***

(Selecione todas as opções que se aplicam)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Isolamento térmico em paredes, telhados ou pisos  
 Paredes muiças (de pedra, tijolo ou materiais densos, comuns em construções antigas, sem isolamento térmico adicional)  
 Revestimentos reflexivos ou de cor clara em fachadas externas (ex.: tintas térmicas, paredes pintadas de branco, azulejos claros ou ladrilhos claros)  
 Janelas com vidro duplo, triplo ou quádruplo  
 Vegetação em fachadas ou telhados (ex.: jardins verticais, telhados verdes)  
 Telhados ou coberturas com superfícies claras ou reflexivas (ex.: telhas claras, revestimentos reflexivos ou pintados de branco)  
 Boa orientação solar (ex.: habitação orientada a sul)  
 Não sei/Não aplicável  
 Outra: \_\_\_\_\_

**7. 7- Que práticas naturais utiliza para refrescar a sua habitação durante o verão? \***  
(Selecione todas as opções que se aplicam)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Fechar cortinas, persianas ou estores (para bloquear a radiação solar)  
 Criar correntes de ar (abrindo janelas ou portas em lados opostos)  
 Aproveitar a ventilação noturna (deixar as janelas abertas durante a noite para arrefecer a habitação)  
 Usar toldos ou coberturas externas (fixas ou retráteis, para bloquear a radiação solar)  
 Não utilizo nenhum método  
 Outra: \_\_\_\_\_

8. **7.1- Com que frequência utiliza essas práticas?**  
(*Numa escala de 1 a 5, sendo 1 "Muito raramente" e 5 "Sempre". Seleccione apenas uma opção.*)  
**Nota:** Se respondeu "Não utilizo nenhum método" na questão 7, avance para a questão 8.

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Muit      Sempre

9. **7.2- Porque utiliza essas práticas?**  
(*Seleccione todas as opções que se aplicam*)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Custo-benefício (economia de energia)  
 Praticidade (fácil de implementar ou usar)  
 Sustentabilidade (redução do impacto ambiental)  
 Eficácia  
 Hábito  
 Outra: \_\_\_\_\_

10. **7.3- Quão eficazes considera essas práticas?**  
(*Numa escala de 1 a 5, sendo 1 "Nada eficazes" e 5 "Muito eficazes". Seleccione apenas uma opção.*)

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Nad      Muito eficazes

11. **8- Que equipamentos utiliza para refrescar a sua habitação no verão? \***  
(*Seleccione todas as opções que se aplicam*)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Ar-condicionado  
 Ventoinha  
 Climatizador evaporativo (climatizador a água)  
 Não utilizo nenhum método  
 Outra: \_\_\_\_\_

12. **8.1- Com que frequência utiliza esses equipamentos?**

(*Numa escala de 1 a 5, sendo 1 "Muito raramente" e 5 "Sempre". Seleccione apenas uma opção.*)

**Nota:** Se respondeu "Não utilizo nenhum método" na questão 8, avance para a questão 9.

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Muit      Sempre

13. **8.2- Porque utiliza esses equipamentos?**  
(*Seleccione todas as opções que se aplicam*)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Custo-benefício (economia de energia)  
 Praticidade (fácil de implementar ou usar)  
 Sustentabilidade (redução do impacto ambiental)  
 Eficácia  
 Hábito  
 Outra: \_\_\_\_\_

14. **8.3- Quão eficazes considera esses equipamentos?**  
(*Numa escala de 1 a 5, sendo 1 "Nada eficazes" e 5 "Muito eficazes". Seleccione apenas uma opção.*)

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Nad      Muito eficazes

15. **9- Que práticas naturais utiliza para aquecer a sua habitação durante o inverno? \***  
(*Seleccione todas as opções que se aplicam*)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Abrir as cortinas ou persianas durante o dia (para aproveitar a luz solar)  
 Fechar portas de divisão (para concentrar o calor)  
 Fechar janelas (para reduzir perdas térmicas)  
 Não utilizo nenhum método  
 Outra: \_\_\_\_\_

16. **9.1- Com que frequência utiliza essas práticas?**

(*Numa escala de 1 a 5, sendo 1 "Muito raramente" e 5 "Sempre". Seleccione apenas uma opção.*)

**Nota:** Se respondeu "Não utilizo nenhum método" na questão 9, avance para a questão 10.

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Muit      Sempre

17. **9.2- Porque utiliza essas práticas?**  
(*Seleccione todas as opções que se aplicam*)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Custo-benefício (economia de energia)  
 Praticidade (fácil de implementar ou usar)  
 Sustentabilidade (redução do impacto ambiental)  
 Eficácia  
 Hábito  
 Outra: \_\_\_\_\_

18. **9.3- Quão eficazes considera essas práticas?**

(*Numa escala de 1 a 5, sendo 1 "Nada eficazes" e 5 "Muito eficazes". Seleccione apenas uma opção.*)

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Nad      Muito eficazes

19. **10- Que equipamentos utiliza para aquecer a sua habitação no inverno? \***  
(Selecione todas as opções que se aplicam)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Ar-condicionado  
 Aquecedor elétrico  
 Aquecedor a gás  
 Aquecedor a óleo  
 Aquecedor central  
 Aquecimento a bioetanol  
 Lareira ou recuperador de calor  
 Bomba de calor  
 Aquecedor infravermelho  
 Salamandra a pellets  
 Acumulador de calor  
 Piso radiante  
 Não utilizo nenhum método  
 Outra: \_\_\_\_\_

20. **10.1- Com que frequência utiliza esses equipamentos?**

(Numa escala de 1 a 5, sendo 1 "Muito raramente" e 5 "Sempre". Selecione apenas uma opção.)

**Nota:** Se respondeu "Não utilizo nenhum método" na questão 10, avance para a questão 11.

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
 Muit      Sempre

21. **10.2- Porque utiliza esses equipamentos?**  
(Selecione todas as opções que se aplicam)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Custo-benefício (economia de energia)  
 Praticidade (fácil de implementar ou usar)  
 Sustentabilidade (redução do impacto ambiental)  
 Eficácia  
 Hábito  
 Outra: \_\_\_\_\_

22. **10.3- Quão eficazes considera esses equipamentos?**  
(Numa escala de 1 a 5, sendo 1 "Nada eficazes" e 5 "Muito eficazes". Selecione apenas uma opção.)

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
 Nad      Muito eficazes

23. **11- Nos últimos anos, notou alterações no clima de Lisboa? \***  
(Selecione todas as opções que se aplicam)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Sim, verões mais quentes  
 Sim, invernos mais frios  
 Sim, invernos mais quentes  
 Sim, maior variabilidade climática (ex.: mudanças periódicas ou inesperadas de temperatura)  
 Não percebi mudanças significativas  
 Outra: \_\_\_\_\_

24. **12- Essas alterações climáticas influenciaram os seus hábitos de climatização? \***  
(Selecione todas as opções que se aplicam)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Sim, agora utilizo mais práticas naturais (ex.: abrir janelas, fechar cortinas)  
 Sim, agora utilizo mais equipamentos (ex.: ar condicionado, aquecedores, lareira)  
 Sim, reduzi o uso de práticas naturais  
 Sim, reduzi o uso de equipamentos  
 Não, não notei alterações nos meus hábitos de climatização  
 Outra: \_\_\_\_\_

25. **13- Se os seus hábitos mudaram, quais foram os principais motivos?**  
(Selecione todas as opções que se aplicam)

Marcar tudo o que for aplicável.

- Questões climáticas (ex.: verões mais quentes, maior variabilidade climática).  
 Questões económicas (ex.: custos de energia)  
 Questões sociais (ex.: mudanças na dinâmica familiar ou estilo de vida)  
 Questões ambientais (ex.: preocupações com a sustentabilidade)  
 Questões de saúde (ex.: evitar desconforto térmico ou doenças relacionadas ao clima)  
 Outra: \_\_\_\_\_

**14- Por conforto térmico entende-se a sensação de bem-estar ou equilíbrio térmico, em que a pessoa não sente frio nem calor excessivo. Assim, numa escala de 1 a 5, sendo 1 "Muito desconfortável" e 5 "Muito confortável", como avalia o conforto térmico da sua habitação:**

26. **14.1- No verão: \***

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
 Muit      Muito confortável

27. **14.2- No inverno: \***

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
 Muit      Muito confortável

Obrigada

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pela Google.

Google Formulários



## C. Focus group

### C1. Apresentação

#### Design Passivo para a Melhoria do Conforto Térmico em Habitações Existentes: Uma Proposta para o Contexto Urbano de Lisboa

Lisboa enfrenta um desafio crítico no seu parque habitacional, onde a maioria dos edifícios é energeticamente ineficiente, traduzindo-se em desconforto térmico<sup>1</sup> e elevada dependência energética para os seus ocupantes. Entre 2014 e 2024, mais de metade dos certificados energéticos emitidos para edifícios existentes no concelho de Lisboa correspondem às classes D, E e F, revelando um desempenho energético entre razoável e muito fraco (ADENE, 2024) e onde mais de 60% da população reporta desconforto térmico tanto no inverno como no verão. Para compensar esta fragilidade, 58,9% dos lisboetas recorrem a equipamentos de climatização no verão e 74,7% no inverno, o que contribui para um aumento dos encargos energéticos das famílias, sobretudo em cenários de maior vulnerabilidade económica (Lisboa E-Nova, 2022).

A urgência de uma resposta a este cenário é reforçada pelos limitados avanços nas metas nacionais de eficiência energética. O Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) e a Estratégia Nacional de Longo Prazo para o Combate à Pobreza Energética (ELPPE) estabelecem objetivos ambiciosos, mas a renovação de edifícios atingiu apenas 16% face à meta de 70% e a redução do desconforto térmico não ultrapassa -0,54% quando o objetivo é -26% (ELPRE, 2024). Paralelamente, o consumo elétrico nacional atingiu um dos valores mais elevados de sempre em 2024, enquanto os preços registaram o aumento mais acentuado da União Europeia (Lusa, 2025; REN, 2025).

Perante este enquadramento, torna-se pertinente explorar soluções alternativas que contribuam para melhorar o conforto térmico das habitações, reduzindo simultaneamente a dependência de equipamentos de climatização. Neste contexto, o design passivo surge como uma resposta promissora, ao explorar as condições ambientais e as propriedades dos materiais para regular naturalmente a temperatura interior, sem consumo energético adicional. Desta forma, a presente investigação propõe o desenvolvimento de uma solução modular de design passivo, adaptada ao contexto específico de Lisboa, que contribua para a melhoria do conforto térmico das habitações, reduza a dependência de equipamentos e apoie o cumprimento das metas nacionais de eficiência energética e neutralidade carbónica.

<sup>1</sup> Por conforto térmico entende-se o estado de satisfação do indivíduo em relação ao ambiente térmico, caracterizado pela ausência de frio ou calor excessivo. O seu oposto, o desconforto térmico, ocorre quando há percepção de desequilíbrio, resultando em sensações de calor ou frio que comprometem o bem-estar (Lamberts et al., 2014).

#### Referências:

- ADENE. (s.d.). Estatísticas da certificação energética dos edifícios. Sistema de Certificação Energética. Acedido a 12 de Junho de 2025, a partir de <https://ice.pjestatisticas/>
- ADENE. (2025). 4.º relatório do Grupo de Coordenação do ELPPE. Agência para a Energia. [https://www.adene.pt/assuntos/relatorios/relatorio\\_4o\\_grupo\\_coordenacao\\_elppe\\_mai2025.pdf](https://www.adene.pt/assuntos/relatorios/relatorio_4o_grupo_coordenacao_elppe_mai2025.pdf)
- Lamberts, R., Duijn, L., & Pereira, F. O. R. (2014). Eficiência energética no arquitetura [1. ed.]. Procel.
- Lusa. (2025, 6 de maio). Portugal com maior subida na UE de preços de eletricidade no 2.º semestre de 2024. Jornal de Negócios. Acedida a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://www.jornaldenegocios.pt/more/noticias/portugal-com-maior-subida-na-ue-de-precos-de-eletricidade-no-2- semestre-de-2024>
- REN - Redes Energéticas Nacionais. (2025, 6 de janeiro). Recorde de produção de renováveis abastece 71% do consumo de eletricidade em 2024. Acedida a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://ren.pt/pt/media/noticias/record-de-producao-de-renovaveis-abastece-71-do-consumo-de-eletricidade-em-2024>
- Santos, O., Capito, C., Fialho, M., Silva, E., Freitas, S., Climaco, N., Raposo, C., Schmidt, L., & Horta, A. (2023). Conforto térmico e saúde humana no concelho de Lisboa. Lisboa E-Nova. Acedida a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://lisboenova.org/relatorio-conforto-termico/>



# A fenestração

Na presente investigação, a análise cruzada entre a literatura e os dados empíricos recolhidos permitiu identificar a fenestração como uma das principais fragilidades do desempenho térmico das habitações lisboetas. De acordo com Moita (2010), é nas janelas que ocorrem as maiores trocas térmicas da envolvente, devido à elevada condutividade do vidro e à deficiente estanquidade das caixilharias. Os dados da Lisboa E-Nova (2024) reforçam esta constatação, revelando que mais de um terço das habitações inquiridas apresenta ainda janelas de vidro simples, uma tipologia frequentemente associada a situações de desconforto térmico, sobretudo durante o inverno.

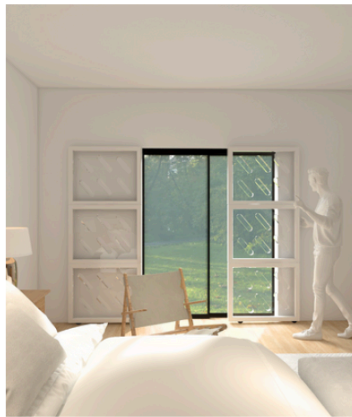
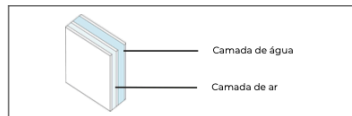
A título comparativo, e tendo por base o conceito de transmitância térmica, parâmetro que mede a quantidade de calor que atravessa um elemento da envolvente (quanto maior o valor, mais facilmente o calor atravessa esse elemento, permitindo perdas de calor no inverno e ganhos térmicos excessivos no verão, ambos prejudiciais ao conforto interior), uma parede não isolada pode apresentar valores entre 0,9 e 1,7  $W/m^2 \cdot K$ , enquanto uma janela de vidro simples pode ultrapassar os 6,0  $W/m^2 \cdot K$ . Mesmo as janelas de vidro duplo, já bastante representadas no parque habitacional lisboeta, mantêm valores entre 2,7 e 4,0  $W/m^2 \cdot K$ , superando largamente os cerca de 0,6  $W/m^2 \cdot K$  registados em paredes devidamente isoladas (Moita, 2010; Lamberts et al., 2014). Esta realidade confirma que, mesmo nas suas versões mais eficientes, as janelas continuam a representar um ponto crítico de transferência térmica indesejada, comprometendo a eficiência global da envolvente.

Os dados recolhidos no âmbito da presente investigação confirmam esta tendência: em habitações com isolamento e janelas duplas, e em habitações com paredes simples e janelas simples, onde os ocupantes adotavam estratégias semelhantes de regulação do conforto térmico, como a ventilação natural, o controlo da radiação solar ou a própria utilização de equipamentos de climatização, verificaram-se níveis de conforto significativamente distintos. As habitações com isolamento e janelas duplas revelaram maior capacidade para manter o conforto térmico interior. Em particular, observou-se que habitações com janelas de vidro duplo, mesmo quando inseridas em paredes não isoladas, apresentaram conforto térmico superior face a casos com janelas simples e ausência de isolamento, evidenciando o impacto positivo de intervenções na fenestração.

Desta forma, ao reduzir a transferência térmica indesejada, a atuação sobre as janelas aumenta significativamente a capacidade da habitação conservar o calor gerado no inverno e limitar a entrada de calor no verão. Esta melhoria permite que o esforço aplicado pelos ocupantes na regulação do conforto, através de estratégias passivas ou apoio pontual de equipamentos, resulte de forma mais eficaz em conforto térmico percebido, independentemente da estação do ano.

## Referências:

- Lamberts, R., Dutra, L., & Pereira, F. O. R. (2014). *Eficiência energética na arquitetura* (3.ª ed.). Procel.
- Moita, F. (2010). *Energia solar passiva* (2.ª ed.). Argumentum.
- Santos, O., Capitão, C., Fialho, M., Silva, E., Freitas, S., Climaco, N., Raposo, C., Schmidt, L., & Horta, A. (2023). *Conforto térmico e saúde humana no conceito de Lisboa E-Nova*. Acedida a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://lisboanovaa.org/belatorio-conferencia-termeica/>



# Painel Modular - Helie

É neste seguimento que surge a proposta desenvolvida no âmbito desta investigação: uma estrutura deslizante composta por painéis modulares, concebida para ser colocada no interior das habitações, em frente às janelas. Cada painel integra uma moldura em fibra de vidro e três lâminas de vidro que delimitam duas câmaras internas: uma de ar e outra de água, com desempenhos complementares.

No **inverno**, os painéis são posicionados diante das janelas, funcionando como captadores e acumuladores de energia solar. A câmara de água armazena o calor ao longo do dia e liberta-o de forma progressiva durante a noite, quando o ar interior se encontra mais frio. Este processo ocorre naturalmente, de acordo com a segunda lei da termodinâmica: a energia flui sempre da zona mais quente, neste caso a água aquecida, para a mais fria, o espaço habitado, até ser atingido o equilíbrio térmico (Incropera et al., 2017). Em paralelo, a câmara de ar atua como barreira de baixa condutividade, dificultando a saída de calor para o exterior, enquanto a moldura em fibra de vidro limita as perdas laterais. As aberturas integradas nos módulos permitem ainda a entrada controlada de radiação solar direta, reforçando o aquecimento de massas térmicas no interior da habitação. Ainda assim, como a estrutura se encontra posicionada em frente às janelas durante o inverno, consegue atuar como uma barreira térmica extra, dificultando a saída de calor do espaço habitado para o exterior e reforçando a eficiência do conjunto.

No **verão**, os painéis deslizam lateralmente, evitando a incidência direta de radiação solar e atuando como elementos de absorção do calor presente no interior da habitação. Esse calor é temporariamente armazenado na câmara de água e depois dissipado para o exterior através da ventilação cruzada, prática comum entre os habitantes de Lisboa. Este processo é favorecido pela entrada de ar fresco pelas aberturas a norte e pela sua expulsão pelas janelas a sul, onde se encontram os painéis. No entanto, reconhece-se que a elevada densidade urbana pode limitar a eficácia da ventilação natural. Para mitigar esta limitação, as mesmas aberturas que no inverno facilitavam a entrada de radiação solar assumem, no verão, uma função distinta: favorecer a indução de convecção turbulenta e intensificar as trocas térmicas, permitindo dissipar o calor mesmo em condições de vento fraco ou parcialmente obstruído.

Deste modo, o sistema apresenta um comportamento dual: no inverno, funciona como captador, acumulador e redistribuidor de calor, ao mesmo tempo que acrescenta uma barreira térmica suplementar; no verão, atua como elemento de mitigação do calor interior, favorecendo a sua dissipação.

## Referências:

- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2008). *Fundamentos de transferência de calor e de massa* (E. M. Queiroz & F. L. P. Pessoa, Trans; 6.ª ed.). LTC. (Publicado originalmente em 2007)

## Eficiência do sistema

Considere-se uma divisão com 20 m<sup>2</sup> e pé-direito de 2,6 m onde se pretende avaliar se 6 painéis passivos é suficiente para garantir níveis adequados de conforto térmico.

Para o **inverno**, considere-se um cenário crítico de 10°C de temperatura interior inicial. De acordo com a norma EN 16798, utilizada para avaliação da eficácia do artefacto proposto na promoção do conforto térmico, para uma temperatura média exterior de 11 °C nos sete dias anteriores, a temperatura operativa de conforto situa-se nos 22,43 °C, sendo admissível um intervalo entre 17,43 °C e 26,43 °C (Categoria III).

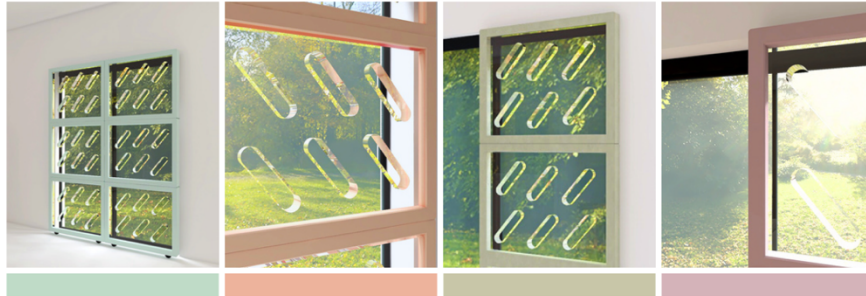
Em condições reais de exposição solar, estimou-se que os seis painéis, num cenário conservador, são capazes de fornecer cerca de 1 434 682 J de energia passiva ao longo de três horas. Considerando perdas térmicas entre 30% e 50%, a temperatura final da divisão é estimada entre 16,7 °C e 21,2 °C. Estes valores permitem concluir que o sistema atinge ou se aproxima dos limites inferiores do intervalo de conforto estabelecido, evidenciando a sua capacidade de atuação em regime de aquecimento passivo.

No caso de **verão**, considere-se um cenário de sobreaquecimento, com uma temperatura interior inicial de 30 °C. Para uma temperatura exterior média de 26 °C, a temperatura operativa de conforto é de 27,38 °C, com intervalo aceitável entre 22,38 °C e 31,38 °C.

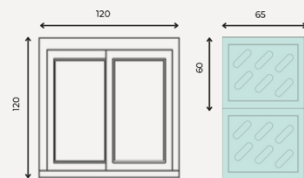
Com os painéis posicionados fora da incidência solar direta, o sistema atua como massa térmica de arrefecimento, absorvendo calor do ar interior. Estima-se que um aumento de apenas 1,5 °C na temperatura da água dos painéis, por contacto com o ar quente da divisão, permite a absorção de cerca de 1 024 733 J. Considerando perdas entre 30% e 50%, a temperatura final da divisão varia entre 25,2 °C e 22,0 °C, posicionando-se em ambos os casos dentro do intervalo de conforto.

Com uma transmitância de 2,10 W/m<sup>2</sup>·K, inferior à de muitas janelas de vidro duplo em uso, a estrutura acrescenta uma camada suplementar de proteção térmica sobre os vãos existentes, contribuindo para a redução das perdas de calor no inverno.

Conclui-se, portanto, que o artefacto apresenta um desempenho térmico eficaz em ambos os regimes sazonais, contribuindo para a melhoria das condições interiores de forma passiva, podendo contribuir para a redução a necessidade de consumo energético associado ao aquecimento e arrefecimento do espaço.

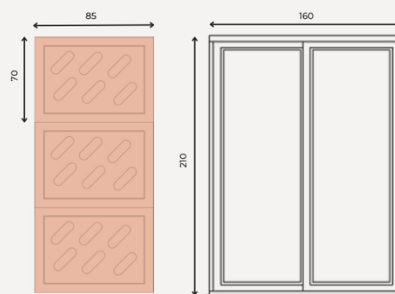


### Módulo janela

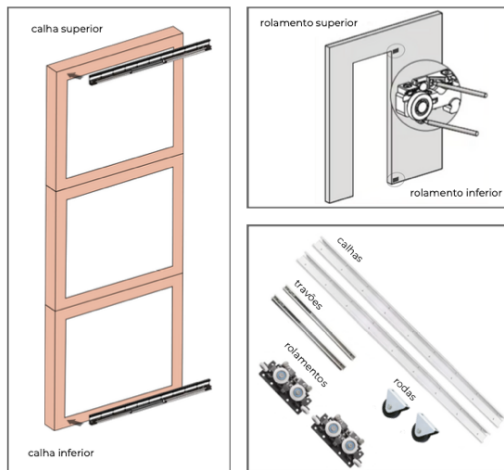


Unidade: cm

### Módulo porta



O sistema é composto por dois módulos: um destinado a janelas e outro a portas de correr. Ambos apresentam dimensões compatíveis com os limites superiores das medidas padrão de vãos envidraçados em habitações existentes, assegurando a adaptabilidade à maioria das situações no edificado residencial.

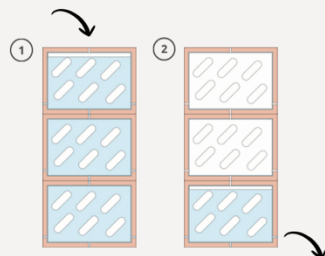


## Sistema de deslize

Inspirado no princípio construtivo das ghost doors, o sistema de deslizamento foi desenvolvido de modo a manter todos os componentes mecânicos ocultos na parte posterior das molduras, assegurando uma integração discreta e um acabamento contínuo.

A estrutura assenta num sistema de duas calhas: uma superior, aplicada na moldura do módulo superior, e outra inferior, aplicada na moldura do módulo inferior. Os rolamentos, fixos lateralmente à parede junto à janela, asseguram apenas a estabilidade e o correto alinhamento horizontal durante a movimentação dos painéis, enquanto o peso da estrutura é suportado por rodas industriais em borracha de alta resistência, embutidas no módulo inferior e com capacidade de carga superior a 200 kg, em linha com soluções como as fornecidas pela marca Sugatsune®. Apesar deste peso elevado, as rodas inferiores reduzem o esforço de manuseamento para apenas 2-8 N, o que equivale a empurrar objetos muito leves, desde um smartphone (=200 g) até meia garrafa de água (=800 g).

O sistema integra ainda um mecanismo de fecho suave (soft closer), que assegura um movimento controlado e silencioso na abertura e fecho, reforçando simultaneamente o conforto e a segurança na utilização.



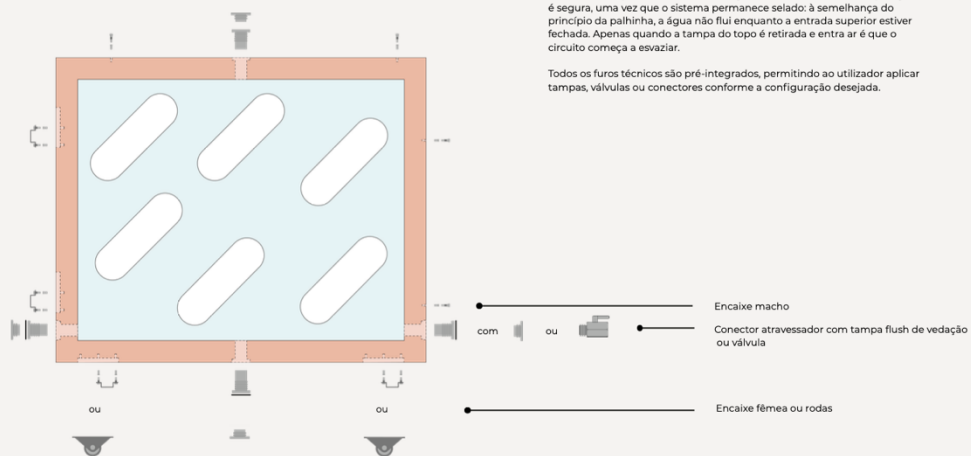
## Módulo único

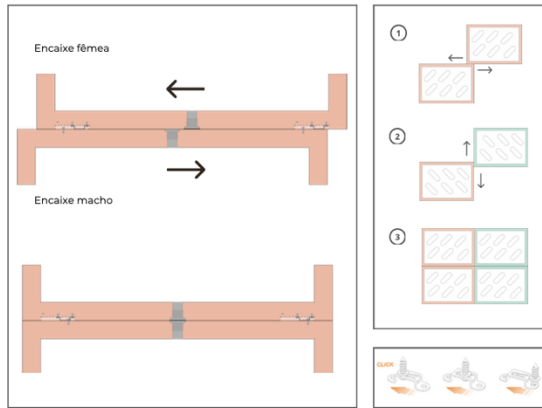
O sistema é composto por um módulo base, aplicável tanto em janelas como em portas de correr, que mantém sempre o mesmo desenho construtivo, independentemente da variação dimensional. Cada módulo integra aberturas normalizadas que permitem a união vertical e horizontal através de conectores macho-fêmea, fixos com parafusos M5 em inserts metálicos.

A circulação de água é assegurada pelos conectores atravessadores centrais, responsáveis pela continuidade vertical entre módulos. Estes elementos devem estar perfeitamente alinhados e à face, garantindo a ligação estanque através da compressão de O-rings. No último módulo superior, o conector atravessador recebe uma válvula para enchimento e, após o preenchimento do circuito, é encerrado com tampa flush. A base permanece sempre selada, assegurando o fecho inferior do sistema.

As aberturas laterais desempenham a função de drenagem. Nestes pontos, as tampas flush podem ser substituídas por válvulas de esvaziamento, permitindo uma drenagem faseada ou total. Esta operação é segura, uma vez que o sistema permanece selado: à semelhança do princípio da palhinha, a água não flui enquanto a entrada superior estiver fechada. Apenas quando a tampa do topo é retirada e entra ar é que o circuito começa a esvaziar.

Todos os furos técnicos são pré-integrados, permitindo ao utilizador aplicar tampas, válvulas ou conectores conforme a configuração desejada.



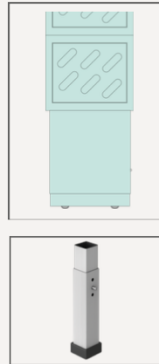


## Encaixe entre módulos

Os módulos foram concebidos para permitir encaixe sequencial entre si, tanto na orientação vertical como horizontal, recorrendo a um sistema macho-fêmea. Este mecanismo inspira-se na lógica modular de sistemas como o LEGO®, onde cada unidade se liga à seguinte por continuidade de encaixe.

A ligação é realizada através de encaixes passantes do tipo fêmea, fixos à estrutura por parafusos M5 em insertos metálicos, compatíveis com o sistema Mod-ez® (KNAUF®). Estes elementos permitem a receção de um parafuso macho com cabeça de ombro, que desliza no interior do encaixe e garante a fixação entre módulos, permitindo uma união segura e reversível, que facilita a montagem e desmontagem sempre que necessário.

Nas ligações verticais, o encaixe integra ainda a função de vedação hidráulica: o passa-muros inferior inclui um O-ring saliente que, ao ser comprimido pelo elemento superior do módulo seguinte, assegura a estanquidade da passagem de água. Desta forma, a união estrutural e hidráulica são alcançadas num único gesto de encaixe, garantindo simultaneamente precisão de alinhamento e fiabilidade.

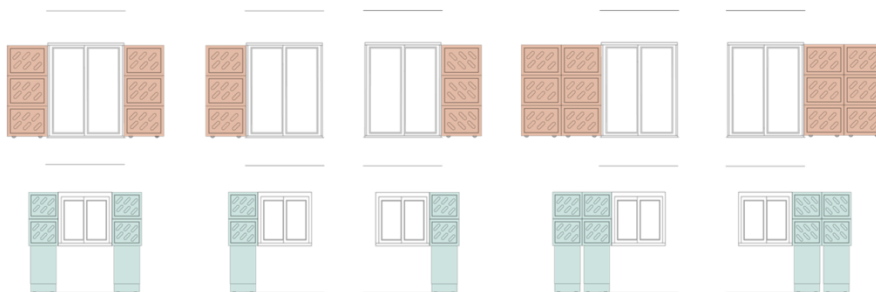


## Suporte regulável

Para assegurar o correto posicionamento dos módulos em frente às janelas, foi desenvolvido um suporte regulável telescópico em alumínio extrudido, material escolhido pela sua elevada resistência mecânica, baixo peso específico e comportamento anticorrosivo.

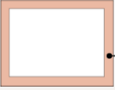
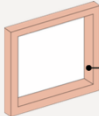

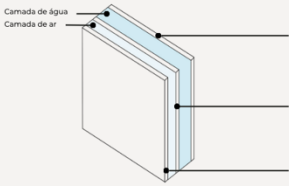
O sistema é composto por um encaixe macho-fêmea tubular, no qual o elemento macho desliza no interior da fêmea até à altura pretendida (0,80 m a 1,00 m, acompanhando os vãos de janela normalizados). O bloqueio é realizado através de furos passantes transversais e de um pino de segurança, semelhante ao utilizado em equipamentos médicos (como canadianas) ou de ginásio, garantindo robustez estrutural e operação intuitiva.

Além disso, o suporte é compatível com o mesmo sistema de encaixe modular macho-fêmea dos painéis, permitindo montagem e desmontagem rápida, sem necessidade de ferramentas especializadas.



## Liberdade de composição

A modularidade do sistema permite múltiplas configurações laterais, adaptando-se ao espaço disponível e às preferências do utilizador. Os módulos podem ser aplicados individualmente ou combinados para cobrir uma ou ambas as folhas do vão, à esquerda, à direita ou em continuidade, garantindo flexibilidade e integração em diferentes contextos arquitetónicos.

	<p><b>Moldura</b></p> <p><b>Material:</b> Fibra de vidro + resina epóxi como base + acabamento com PU (poliuretano) ou gelcoat náutico com proteção UV</p> <p><b>Função:</b> Garante isolamento térmico entre módulos e leveza estrutural</p>
	<p><b>Revestimento interno da moldura</b></p> <p><b>Material:</b> Revestimento epóxi</p> <p><b>Função:</b> Protege a fibra de vidro do contacto prolongado com a água; aumenta durabilidade e estanqueidade</p>
	<p><b>Vedação</b></p> <p><b>Material:</b> Silicone estrutural (alta resistência UV e temperatura)</p> <p><b>Função:</b> Assegura a estanqueidade entre vidros e moldura, evitando fugas de água e infiltrações de ar</p>
 <p>Camada de água</p> <p>Camada de ar</p>	<p><b>Vidros</b></p> <p><b>Material:</b> Vidro 4 mm</p> <p><b>Material:</b> Vidro 4 mm</p> <p><b>Material:</b> Vidro 4 mm</p>

## Materiais



- Cada módulo apresenta um peso aproximado de 79,5 kg quando vazio, valor que se enquadra nos limites definidos pela norma ISO 11228-1:2003. Contudo, devido ao seu volume e à necessidade de um encaixe preciso durante a instalação, recomenda-se que a movimentação seja realizada por dois operadores.
- Durante a montagem, recomenda-se a utilização de apoios temporários que assegurem a estabilidade dos módulos em altura e facilitem o seu posicionamento correto, garantindo simultaneamente maior segurança no processo de instalação.
- Apesar de possível por operadores informados, a instalação por profissionais qualificados é recomendada para assegurar segurança, alinhamento e durabilidade do sistema.



- A estrutura pode ser preenchida através de uma válvula, recorrendo a mangueira para facilitar o processo.



- A água é tratada com conservantes antifúngicos e algicidas para evitar o crescimento de microrganismos, permitindo intervalos de manutenção mais longos. Esta operação pode ser executada tanto pelo utilizador como por uma equipa especializada.

## Ergonomia



## C2. Registo fotográfico

Na figura encontra-se registada a sessão de *focus group* com os cinco participantes.



## D. Inquérito por questionário a especialistas

### D1. Questionário

## "Helie" - Painel Modular

Prezado especialista,

O presente questionário integra a investigação desenvolvida no âmbito da minha Dissertação de Mestrado em Design do Produto e do Espaço, no IADE – Universidade Europeia. O estudo incide sobre o desenvolvimento de um artefacto modular de climatização passiva para habitações na cidade de Lisboa, com o objetivo de contribuir para a melhoria do conforto térmico de forma eficiente e sustentável.

Para contextualizar o presente questionário, encontra-se disponível através do seguinte link uma breve apresentação do sistema Helie, onde se descrevem a problemática abordada, o conceito desenvolvido e o seu funcionamento: <https://drive.google.com/file/>

A sua participação é fundamental para a validação e aperfeiçoamento do conceito proposto. Todas as respostas serão tratadas com a máxima confidencialidade e utilizadas exclusivamente para fins académicos.

Agradeço, desde já, a sua disponibilidade e colaboração.

Andreia Cruz

20190417@iade.pt

---

\* Indica uma pergunta obrigatória

1. 1- Considera relevante a integração da área científica do design passivo como estratégia central para responder ao problema de conforto térmico identificado nas habitações da cidade de Lisboa? \*

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Nad      Muito relevante

2. 1.1 - Se atribuiu uma nota inferior a 3, por favor justifique.

---

---

---

---

---

3. 2- Como avalia a pertinência do sistema "Helie" enquanto proposta para mitigar \* o problema de conforto térmico nas habitações da cidade de Lisboa?

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Nad      Muito pertinente

4. 2.1- Se atribuiu uma nota inferior a 3, por favor justifique.

---

---

---

---

---

5. 3- Que adequação atribui aos materiais propostos para os painéis modulares? \*

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Nad      Muito adequados

6. 3.1- Se atribuiu uma nota inferior a 3, por favor justifique.

---

---

---

---

---

7. 4- Como avalia a solução construtiva do sistema "Helie" em termos técnicos e estruturais? \*

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5  
Muit      Muito satisfatória

8. 4.1- Se atribuiu uma nota inferior a 3, por favor justifique.

---

---

---

---

---

9. 5- Na sua opinião, considera que existem obstáculos técnicos ou práticos à aplicação deste sistema? \*

Marcar apenas uma oval.

Sim  
 Não  
 Não sei/Prefiro não responder

10. 5.1- Se respondeu "Sim" na questão anterior, quais seriam esses obstáculos?

---

---

---

---

---

11. 6- Que recomendações adicionais faria para o aperfeiçoamento do sistema?

---

---

---

---

---

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pela Google.

Google Formulários

## D2. Apresentação

### Design Passivo para a Melhoria do Conforto Térmico em Habitações Existentes: Uma Proposta para o Contexto Urbano de Lisboa

Lisboa enfrenta um desafio crítico no seu parque habitacional, onde a maioria dos edifícios é energeticamente ineficiente, traduzindo-se em desconforto térmico<sup>1</sup> e elevada dependência energética para os seus ocupantes. Entre 2014 e 2024, mais de metade dos certificados energéticos emitidos para edifícios existentes no concelho de Lisboa correspondem às classes D, E e F, revelando um desempenho energético entre razoável e muito fraco (ADENE, 2024) e onde mais de 60% da população reporta desconforto térmico tanto no inverno como no verão. Para compensar esta fragilidade, 58,9% dos lisboetas recorrem a equipamentos de climatização no verão e 74,7% no inverno, o que contribui para um aumento dos encargos energéticos das famílias, sobretudo em cenários de maior vulnerabilidade económica (Lisboa E-Nova, 2022).

A urgência de uma resposta a este cenário é reforçada pelos limitados avanços nas metas nacionais de eficiência energética. O Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) e a Estratégia Nacional de Longo Prazo para o Combate à Pobreza Energética (ELPPE) estabelecem objetivos ambiciosos, mas a renovação de edifícios atingiu apenas 16% face à meta de 70% e a redução do desconforto térmico não ultrapassa -0,54% quando o objetivo é -26% (ELPRE, 2024). Paralelamente, o consumo elétrico nacional atingiu um dos valores mais elevados de sempre em 2024, enquanto os preços registaram o aumento mais acentuado da União Europeia (Lusa, 2025; REN, 2025).

Perante este enquadramento, torna-se pertinente explorar soluções alternativas que contribuam para melhorar o conforto térmico das habitações, reduzindo simultaneamente a dependência de equipamentos de climatização. Neste contexto, o design passivo surge como uma resposta promissora, ao explorar as condições ambientais e as propriedades dos materiais para regular naturalmente a temperatura interior, sem consumo energético adicional. Desta forma, a presente investigação propõe o desenvolvimento de uma solução modular de design passivo, adaptada ao contexto específico de Lisboa, que contribua para a melhoria do conforto térmico das habitações, reduza a dependência de equipamentos e apoie o cumprimento das metas nacionais de eficiência energética e neutralidade carbónica.

<sup>1</sup> Por conforto térmico entende-se o estado de satisfação do indivíduo em relação ao ambiente térmico, caracterizado pela ausência de frio ou calor excessivo. O seu oposto, o desconforto térmico, ocorre quando há percepção de desequilíbrio, resultando em sensações de calor ou frio que comprometem o bem-estar (Lamberts et al., 2014).

#### Referências

- ADENE. (s.d.). Estatísticas da certificação energética dos edifícios. Sistema de Certificação Energética. Acessado a 12 de Junho de 2025, a partir de <https://ico.psestatisticas/>
- ADENE. (2023). 4.º relatório do Grupo de Coordenação do ELPPE. Agência para a Energia. <https://www.adene.pt/observatorio/relatorios/2023/4to-relatorio-grupo-coordenacao-elppe-mai-2023.pdf>
- Lamberts, R., Druis, L., & Pereira, F. O. B. (2014). Eficiência energética na arquitetura (1.ª ed.). Procel.
- Lusa. (2025, 6 de maio). Portugal com maior subida na UE de preços de eletricidade no 2.º semestre de 2024. Jornal de Negócios. Acessado a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://www.jornaldenegocios.pt/mercado/energia/portugal-com-maior-subida-na-ue-de-precos-de-eletricidade-no-2-semester-de-2024>
- REN - Redes Energéticas Nacionais. (2025, 6 de janeiro). Recorde de produção de renováveis abatece 71% do consumo de eletricidade em 2024. Acessado a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://ren.pt/pt/medios/afiliados/recorde-de-producao-de-renovaveis-abatece-71-do-consumo-de-eletricidade-em-2024>
- Santos, O., Castiella, C., Falhué, M., Silva, E., Freitas, S., Clímaco, N., Raposo, C., Schmitt, L., & Horta, A. (2023). Conforto térmico e saúde humana no concelho de Lisboa. Lisboa E-Nova. Acessado a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://lisboanova.org/relatorio-conforto-termico/>



## A fenestração

Na presente investigação, a análise cruzada entre a literatura e os dados empíricos recolhidos permitiu identificar a fenestração como uma das principais fragilidades do desempenho térmico das habitações lisboetas. De acordo com Moita (2010), é nas janelas que ocorrem as maiores trocas térmicas da envolvente, devido à elevada condutividade do vidro e à deficiente estanqueidade das caixilharias. Os dados da Lisboa E-Nova (2024) reforçam esta constatação, revelando que mais de um terço das habitações inquiridas apresenta ainda janelas de vidro simples, uma tipologia frequentemente associada a situações de desconforto térmico, sobretudo durante o inverno.

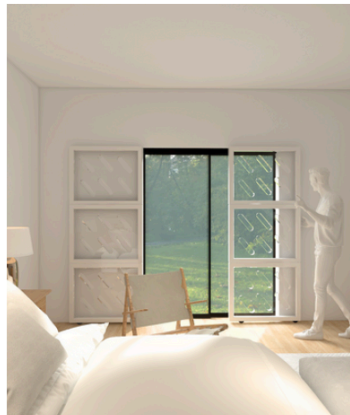
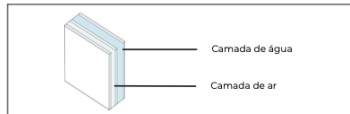
A título comparativo, e tendo por base o conceito de transmitância térmica, parâmetro que mede a quantidade de calor que atravessa um elemento da envolvente (quanto maior o valor, mais facilmente o calor atravessa esse elemento, permitindo perdas de calor no inverno e ganhos térmicos excessivos no verão, ambos prejudiciais ao conforto interior), uma parede não isolada pode apresentar valores entre 0,9 e 1,7  $W/m^2 \cdot K$ , enquanto uma janela de vidro simples pode ultrapassar os 6,0  $W/m^2 \cdot K$ . Mesmo as janelas de vidro duplo, já bastante representadas no parque habitacional lisboeta, mantêm valores entre 2,7 e 4,0  $W/m^2 \cdot K$ , superando largamente os cerca de 0,6  $W/m^2 \cdot K$  registados em paredes devidamente isoladas (Moita, 2010; Lamberts et al., 2014). Esta realidade confirma que, mesmo nas suas versões mais eficientes, as janelas continuam a representar um ponto crítico de transferência térmica indesejada, comprometendo a eficiência global da envolvente.

Os dados recolhidos no âmbito da presente investigação confirmam esta tendência: em habitações com isolamento e janelas duplas, e em habitações com paredes simples e janelas simples, onde os ocupantes adotavam estratégias semelhantes de regulação do conforto térmico, como a ventilação natural, o controlo da radiação solar ou a própria utilização de equipamentos de climatização, verificaram-se níveis de conforto significativamente distintos. As habitações com isolamento e janelas duplas revelaram maior capacidade para manter o conforto térmico interior. Em particular, observou-se que habitações com janelas de vidro duplo, mesmo quando inseridas em paredes não isoladas, apresentaram conforto térmico superior face a casos com janelas simples e ausência de isolamento, evidenciando o impacto positivo de intervenções na fenestração.

Destá forma, ao reduzir a transferência térmica indesejada, a atuação sobre as janelas aumenta significativamente a capacidade da habitação conservar o calor gerado no inverno e limitar a entrada de calor no verão. Esta melhoria permite que o esforço aplicado pelos ocupantes na regulação do conforto, através de estratégias passivas ou apoio pontual de equipamentos, resulte de forma mais eficaz em conforto térmico percebido, independentemente da estação do ano.

### Referências:

- Lamberts, R., Dutra, L., & Pereira, F. O. R. (2014). *Eficiência energética na arquitetura* (3.ª ed.). Procel.
- Moita, F. (2010). *Energia solar passiva* (2.ª ed.). Argumentum.
- Santos, O., Caprião, C., Fialho, M., Silva, E., Freitas, S., Climaco, N., Raposo, C., Schmidt, L., & Horta, A. (2023). *Conforto térmico e saúde humana no concelho de Lisboa: Lisboa E-Nova*. Acedida a 16 de Junho, 2025, a partir de <https://lisboavenova.org/pt/interior/conforto-termico/>



## Painel Modular - Helie

É neste seguimento que surge a proposta desenvolvida no âmbito desta investigação: uma estrutura deslizante composta por painéis modulares, concebida para ser colocada no interior das habitações, em frente às janelas. Cada painel integra uma moldura em fibra de vidro e três lâminas de vidro que delimitam duas câmaras internas: uma de ar e outra de água, com desempenhos complementares.

No **inverno**, os painéis são posicionados diante das janelas, funcionando como captadores e acumuladores de energia solar. A câmara de água armazena o calor ao longo do dia e liberta-o de forma progressiva durante a noite, quando o ar interior se encontra mais frio. Este processo ocorre naturalmente, de acordo com a segunda lei da termodinâmica: a energia flui sempre da zona mais quente, neste caso a água aquecida, para a mais fria, o espaço habitado, até ser atingido o equilíbrio térmico (Incropera et al., 2017). Em paralelo, a câmara de ar atua como barreira de baixa condutividade, dificultando a saída de calor para o exterior, enquanto a moldura em fibra de vidro limita as perdas laterais. As aberturas integradas nos módulos permitem ainda a entrada controlada de radiação solar direta, reforçando o aquecimento de massas térmicas no interior da habitação. Ainda assim, como a estrutura se encontra posicionada em frente às janelas durante o inverno, consegue atuar como uma barreira térmica extra, dificultando a saída de calor do espaço habitado para o exterior e reforçando a eficiência do conjunto.

No **verão**, os painéis deslizam lateralmente, evitando a incidência direta de radiação solar e atuando como elementos de absorção do calor presente no interior da habitação. Esse calor é temporariamente armazenado na câmara de água e depois dissipado para o exterior através da ventilação cruzada, prática comum entre os habitantes de Lisboa. Este processo é favorecido pela entrada de ar fresco pelas aberturas a norte e pela sua expulsão pelas janelas a sul, onde se encontram os painéis. No entanto, reconhece-se que a elevada densidade urbana pode limitar a eficácia da ventilação natural. Para mitigar esta limitação, as mesmas aberturas que no inverno facilitavam a entrada de radiação solar assumem, no verão, uma função distinta: favorecer a indução de convecção turbulenta e intensificar as trocas térmicas, permitindo dissipar o calor mesmo em condições de vento fraco ou parcialmente obstruído.

Deste modo, o sistema apresenta um comportamento dual: no inverno, funciona como captador, acumulador e redistribuidor de calor, ao mesmo tempo que acrescenta uma barreira térmica suplementar; no verão, atua como elemento de mitigação do calor interior, favorecendo a sua dissipação.

### Referências:

- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2008). *Fundamentos de transferência de calor e de massa* (E. M. Queiroz & F. L. P. Pessoa, Trad.; 6.ª ed.). LTC. (Publicado originalmente em 2007)

## Eficiência do sistema

Considere-se uma divisão com 20 m<sup>2</sup> e pé-direito de 2,6 m onde se pretende avaliar se 6 painéis passivos é suficiente para garantir níveis adequados de conforto térmico.

Para o **inverno**, considere-se um cenário crítico de 10°C de temperatura interior inicial. De acordo com a norma EN 16798, utilizada para avaliação da eficácia do artefacto proposto na promoção do conforto térmico, para uma temperatura média exterior de 11 °C nos sete dias anteriores, a temperatura operativa de conforto situa-se nos 22,43 °C, sendo admissível um intervalo entre 17,43 °C e 26,43 °C (Categoria III).

Em condições reais de exposição solar, estimou-se que os seis painéis, num cenário conservador, são capazes de fornecer cerca de 1 434 682 J de energia passiva ao longo de três horas. Considerando perdas térmicas entre 30% e 50%, a temperatura final da divisão é estimada entre 16,7 °C e 21,2 °C. Estes valores permitem concluir que o sistema atinge ou se aproxima dos limites inferiores do intervalo de conforto estabelecido, evidenciando a sua capacidade de atuação em regime de aquecimento passivo.

No caso de **verão**, considere-se um cenário de sobreaquecimento, com uma temperatura interior inicial de 30 °C. Para uma temperatura exterior média de 26 °C, a temperatura operativa de conforto é de 27,38 °C, com intervalo aceitável entre 22,38 °C e 31,38 °C.

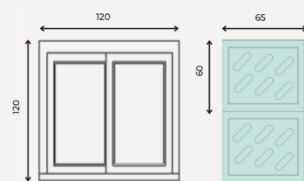
Com os painéis posicionados fora da incidência solar direta, o sistema atua como massa térmica de arrefecimento, absorvendo calor do ar interior. Estima-se que um aumento de apenas 1,5 °C na temperatura da água dos painéis, por contacto com o ar quente da divisão, permite a absorção de cerca de 1 024 733 J. Considerando perdas entre 30% e 50%, a temperatura final da divisão varia entre 25,2 °C e 22,0 °C, posicionando-se em ambos os casos dentro do intervalo de conforto.

Com uma transmitância de 2,10 W/m<sup>2</sup>-K, inferior à de muitas janelas de vidro duplo em uso, a estrutura acrescenta uma camada suplementar de proteção térmica sobre os vãos existentes, contribuindo para a redução das perdas de calor no inverno.

Conclui-se, portanto, que o artefacto apresenta um desempenho térmico eficaz em ambos os regimes sazonais, contribuindo para a melhoria das condições interiores de forma passiva, podendo contribuir para a redução a necessidade de consumo energético associado ao aquecimento e arrefecimento do espaço.

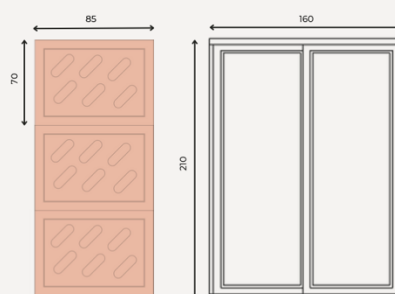


### Módulo janela

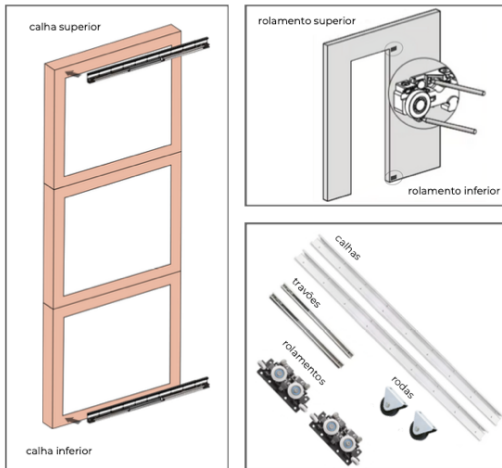


Unidade: cm

### Módulo porta



O sistema é composto por dois módulos: um destinado a janelas e outro a portas de correr. Ambos apresentam dimensões compatíveis com os limites superiores das medidas padrão de vãos envidraçados em habitações existentes, assegurando a adaptabilidade à maioria das situações no edifício residencial.

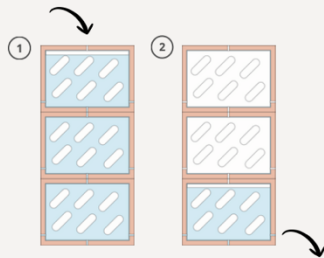


## Sistema de deslize

Inspirado no princípio construtivo das ghost doors, o sistema de deslizamento foi desenvolvido de modo a manter todos os componentes mecânicos ocultos na parte posterior das molduras, assegurando uma integração discreta e um acabamento contínuo.

A estrutura assenta num sistema de duas calhas: uma superior, aplicada na moldura do módulo superior, e outra inferior, aplicada na moldura do módulo inferior. Os rolamentos, fixos lateralmente à parede junto à janela, asseguram apenas a estabilidade e o correto alinhamento horizontal durante a movimentação dos painéis, enquanto o peso da estrutura é suportado por rodas industriais em borracha de alta resistência, embutidas no módulo inferior e com capacidade de carga superior a 200 kg, em linha com soluções como as fornecidas pela marca Sugatsune®. Apesar deste peso elevado, as rodas inferiores reduzem o esforço de manuseamento para apenas 2-8 N, o que equivale a empurrar objetos muito leves, desde um smartphone (=200 g) até meia garrafa de água (=800 g).

O sistema integra ainda um mecanismo de fecho suave (soft closer), que assegura um movimento controlado e silencioso na abertura e fecho, reforçando simultaneamente o conforto e a segurança na utilização.



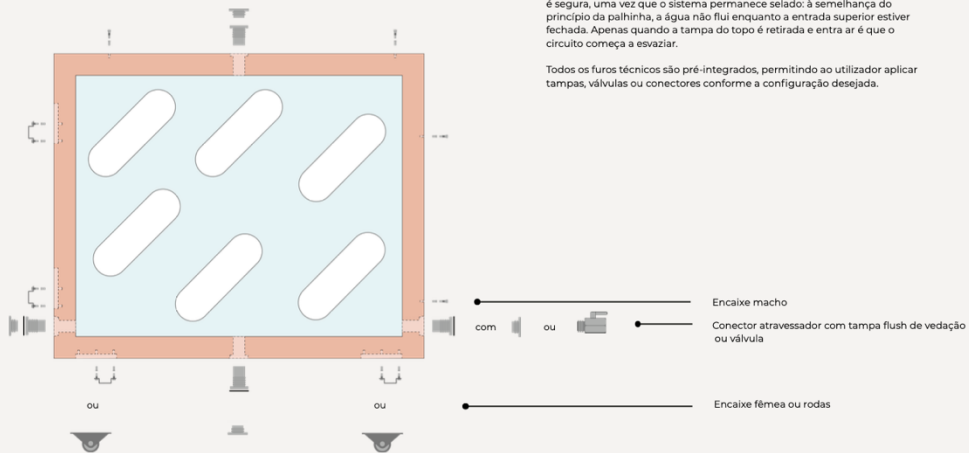
## Módulo único

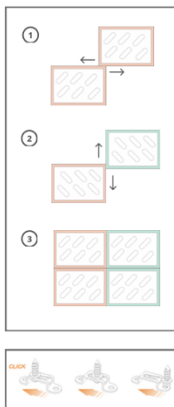
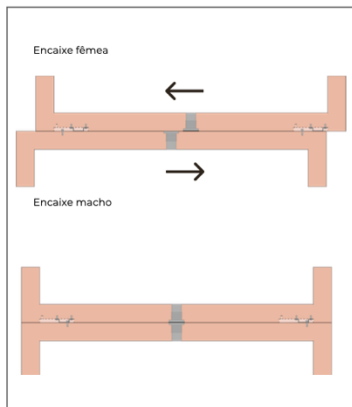
O sistema é composto por um módulo base, aplicável tanto em janelas como em portas de correr, que mantém sempre o mesmo desenho construtivo, independentemente da variação dimensional. Cada módulo integra aberturas normalizadas que permitem a união vertical e horizontal através de conectores macho-fêmea, fixos com parafusos M5 em insertos metálicos.

A circulação de água é assegurada pelos conectores atravessadores centrais, responsáveis pela continuidade vertical entre módulos. Estes elementos devem estar perfeitamente alinhados e à face, garantindo a ligação estanque através da compressão de O-rings. No último módulo superior, o conector atravessador recebe uma válvula para enchimento e, após o preenchimento do circuito, é encerrado com tampa flush. A base permanece sempre selada, assegurando o fecho inferior do sistema.

As aberturas laterais desempenham a função de drenagem. Nestes pontos, as tampas flush podem ser substituídas por válvulas de esvaziamento, permitindo uma drenagem faseada ou total. Esta operação é segura, uma vez que o sistema permanece selado: à semelhança do princípio da palhinha, a água não flui enquanto a entrada superior estiver fechada. Apenas quando a tampa do topo é retirada e entra ar é que o circuito começa a esvaziar.

Todos os furos técnicos são pré-integrados, permitindo ao utilizador aplicar tampas, válvulas ou conectores conforme a configuração desejada.



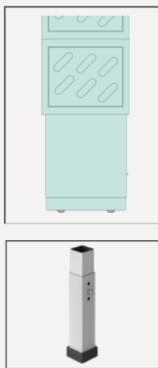


## Encaixe entre módulos

Os módulos foram concebidos para permitir encaixe sequencial entre si, tanto na orientação vertical como horizontal, recorrendo a um sistema macho-fêmea. Este mecanismo inspira-se na lógica modular de sistemas como o LEGO®, onde cada unidade se liga à seguinte por continuidade de encaixe.

A ligação é realizada através de encaixes passantes do tipo fêmea, fixos à estrutura por parafusos M5 em insertos metálicos, compatíveis com o sistema Mod-vez® (KNAPP®). Estes elementos permitem a receção de um parafuso macho com cabeça de ombro, que desliza no interior do encaixe e garante a fixação entre módulos, permitindo uma união segura e reversível, que facilita a montagem e desmontagem sempre que necessário.

Nas ligações verticais, o encaixe integra ainda a função de vedação hidráulica: o passa-muros inferior inclui um O-ring saliente que, ao ser comprimido pelo elemento superior do módulo seguinte, assegura a estanquidade da passagem de água. Desta forma, a união estrutural e hidráulica são alcançadas num único gesto de encaixe, garantindo simultaneamente precisão de alinhamento e fiabilidade.

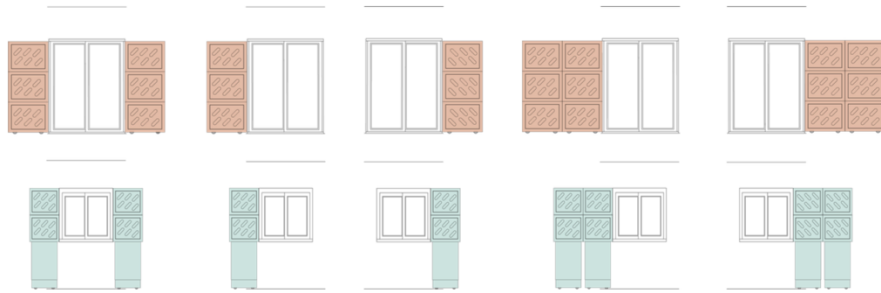


## Suporte regulável

Para assegurar o correto posicionamento dos módulos em frente às janelas, foi desenvolvido um suporte regulável telescópico em alumínio extrudido, material escolhido pela sua elevada resistência mecânica, baixo peso específico e comportamento anticorrosivo.

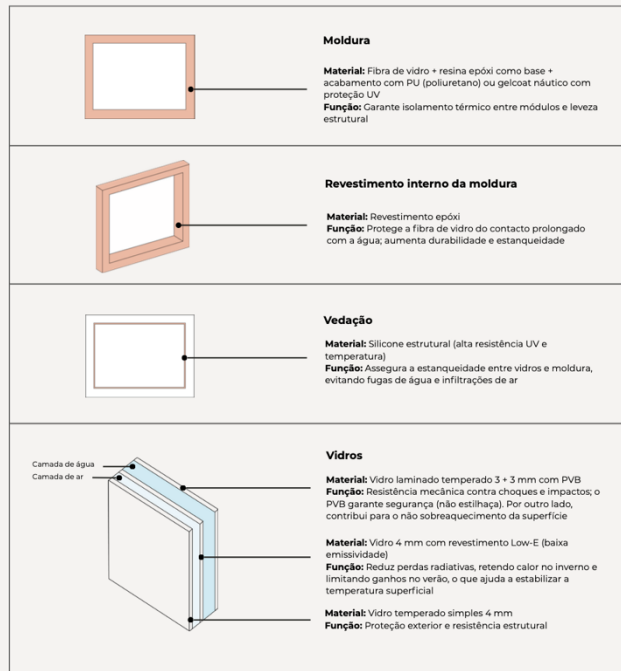
O sistema é composto por um encaixe macho-fêmea tubular, no qual o elemento macho desliza no interior da fêmea até à altura pretendida (0,80 m a 1,00 m, acompanhando os vãos de janela normalizados). O bloqueio é realizado através de furos passantes transversais e de um pino de segurança, semelhante ao utilizado em equipamentos médicos (como canadianas) ou de ginásio, garantindo robustez estrutural e operação intuitiva.

Além disso, o suporte é compatível com o mesmo sistema de encaixe modular macho-fêmea dos painéis, permitindo montagem e desmontagem rápida, sem necessidade de ferramentas especializadas.

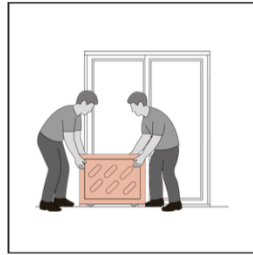


## Liberdade de composição

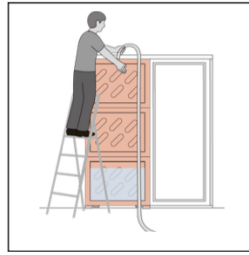
A modularidade do sistema permite múltiplas configurações laterais, adaptando-se ao espaço disponível e às preferências do utilizador. Os módulos podem ser aplicados individualmente ou combinados para cobrir uma ou ambas as folhas do vão, à esquerda, à direita ou em continuidade, garantindo flexibilidade e integração em diferentes contextos arquitetónicos.



## Materiais



- Cada módulo apresenta um peso aproximado de 19,5 kg quando vazio, valor que se enquadra nos limites definidos pela norma ISO 11228-1:2003. Contudo, devido ao seu volume e à necessidade de um encaixe preciso durante a instalação, recomenda-se que a movimentação seja realizada por dois operadores.
- Durante a montagem, recomenda-se a utilização de apoios temporários que assegurem a estabilidade dos módulos em altura e facilitem o posicionamento correto, garantindo simultaneamente maior segurança no processo de instalação.
- Apesar de possível por operadores informados, a instalação por profissionais qualificados é recomendada para assegurar segurança, alinhamento e durabilidade do sistema.



- A estrutura pode ser preenchida através de uma válvula, recorrendo a mangueira para facilitar o processo.



- A água é tratada com conservantes antifúngicos e algicidas para evitar o crescimento de microrganismos, permitindo intervalos de manutenção mais longos. A reaplicação de aditivos pode ser feita através da abertura superior em intervalos de 1-2 anos. O esvaziamento total da estrutura só se torna necessário em períodos mais longos (4-5 anos), podendo ser realizada com auxílio de uma bomba de vácuo. Esta operação pode ser executada tanto pelo utilizador como por uma equipa especializada.

## Ergonomia



D3. Tabela comentários:

Questão	Resultados quantitativos	Comentários (C1, C2, ...)
<p>1- Considera relevante a integração da área científica do design passivo como estratégia central para responder ao problema de conforto térmico identificado nas habitações da cidade de Lisboa?</p>	<p>100% dos inquiridos consideraram relevante; 0% nota 1; 0% nota 2; 16,7% nota 3; 33,3% nota 4; 50% nota 5.</p>	<p><i>(sem comentários)</i></p>
<p>2- Como avalia a pertinência do sistema “Helie” enquanto proposta para mitigar o problema de conforto térmico nas habitações da cidade de Lisboa?</p>	<p>0% nota 1; 33,3% nota 2; 16,7% nota 3; 50% nota 4; 0% nota 5.</p>	<p>C1: “O sistema sendo aplicado ao nível de janelas e portas, terá uma eficiência reduzida, porque são estruturas dinâmicas e que têm de ser abertas várias vezes. Estas serão sempre zonas de perda ou aumento de temperatura. Aliás, existem janelas e portas de pvc, duplo vidro e triplo que são completamente herméticas e mesmo assim as habitações são ineficientes em termos energéticos. O problema existe ao nível das construções e dos materiais, quer nos pavimentos, quer nas paredes.”</p> <p>C2: “O sistema, devido à composição com camada de água, pode não ser eficiente do ponto de vista de isolamento: deverá ter comportamento menos eficiente do que vidro duplo ou triplo, para além de questões relacionadas com peso e outros</p>

		<p>problemas internos. O sistema de deslizamento também poderá não ser tão eficiente, por facilitar a existência de pontes térmicas.”</p>
<p>3- Que adequação atribui aos materiais propostos para os painéis modulares?</p>	<p>0% nota 1; 50% nota 2; 16,7% nota 3; 0% nota 4; 33,3% nota 5.</p>	<p>C3: “As tipologias de materiais trazem incompatibilidades técnicas e funcionais, como por exemplo a utilização de vidros com câmaras com água n seu interior. Em zonas com claridade, rapidamente os materiais ficarão com limos e bolores e a limpeza interna do sistema que se propõe, torna-se difícil.”</p> <p>C4: “A componente de introduzir água no sistema parece muito frágil e pouco benéfica. A utilização de fibra de vidro com resina parece interessante por ser bom isolante, mas deve ter em atenção ao aspeto custo/benefício.”</p> <p>C5: “O sistema parece incluir na sua produção materiais pouco sustentáveis.”</p>
<p>4- Como avalia a solução construtiva do sistema "Helie" em termos técnicos e estruturais?</p>	<p>0% nota 1; 33,3% nota 2; 33,3% nota 3; 33,3% nota 4; 0% nota 5</p>	<p>C6: “Excessivo peso sobre as estruturas habitacionais e para o funcionamento. Perigo por promover efeito lupa, redução dos espaços pela implementação de mais subportas e janelas.Criação de micro-organismos devido aos ambientes com água.”</p> <p>C7: “O sistema com calhas de correr pode aumentar o risco de perdas térmicas (devido aos espaços/calhas para permitir</p>

		deslizar). Foi pensada vedação, mas poderá ser insuficiente.”
5- Na sua opinião, considera que existem obstáculos técnicos ou práticos à aplicação deste sistema?	66,7% responderam “Sim”; 33,3% responderam “Não sei/Prefiro não responder”.	C8: “Dimensões e adaptação ao espaço.” C9: “Possibilidade de existência de pontes térmicas que resultassem num pior isolamento; sistema com água pesado e pouco interessante do ponto funcional e de manutenção (face aos benefícios).” C10: “As janelas residenciais têm medidas sempre distintas e, portanto, a sincronização dimensional destes módulos com as janelas (necessária para maximização da entrega de luz e eficiência do sistema, seria dificilmente compaginável com tamanhos rígidos do painel...”
6- Que recomendações adicionais faria para o aperfeiçoamento do sistema?	6 respostas abertas.	C11: “Integração no interior da parede (falsa).” C12: “Reestruturar o conceito do projeto.” C13: “uso de materiais com massa térmica de forma integral nas paredes, de modo a ter grande capacidade térmica e permitir melhor atraso e redução de amplitude térmica diária, portadas de batente para reduzir fugas; sistema com portadas exteriores para barreira solar direta (de radiação) e redução de ganhos no verão.”

		<p>C14: “Rever a geometria das texturas (ou distanciadores) para evitar que pareçam um blister de medicamentos. Uma solução inconspícua ou a existência de vários desenhos alternativas aumentaria a aceitação do sistema. Um sistema de calha para afastar os painéis da janela deveria ser apenas uma das opções disponíveis (não descartando a possibilidade de este também poder funcionar como portadas com dobradiças agarradas à janela).”</p> <p>C15: “disponibilizar mais padrões daria ao utilizador a possibilidade de escolher o mais adequado à sua habitação.”</p> <p>C16: “Utilização de materiais menos poluentes na sua produção.”</p>
--	--	---

E. Contas base para cálculo das estimativas

- Para a determinação da espessura da camada de água ideal:

Espessura (cm)	Volume Total (L)	Massa de Água (kg)	$\Delta T$ ar Inverno (50%)	$T_{final}$ Inverno (°C)	$\Delta T$ Verão (50%)	$T_{final}$ Verão (°C)
1	4.53	27.2	2.25 °C	12.25 °C	2.32 °C	27.68 °C
2	9.06	54.3	4.50 °C	14.50 °C	4.65 °C	25.35 °C
3	13.58	81.5	6.75 °C	16.75 °C	6.97 °C	23.03 °C
4	18.11	108.6	9.00 °C	19.00 °C	9.30 °C	20.70 °C

5	22.63	135.8	11.25 °C	21.25 °C	11.62 °C	18.38 °C
6	27.16	163.0	13.49 °C	23.49 °C	13.9 °C	16.1 °C
7	31.68	190.1	15.74 °C	25.74 °C	16.23 °C	13.77 °C
8	36.21	217.3	17.99 °C	27.99 °C	18.56 °C	11.44 °C
9	40.74	244.4	20.24 °C	30.24 °C	20.88 °C	9.12 °C
10	45.26	271.6	22.49 °C	32.49 °C	23.21 °C	6.79 °C

A espessura de 6 cm da câmara de água foi selecionada por representar um equilíbrio adequado entre desempenho térmico e viabilidade construtiva. Esta espessura permite uma massa de água suficiente para proporcionar ganhos térmicos significativos tanto no inverno (com uma subida de temperatura até 23,5 °C) como no verão (com arrefecimento até cerca de 16,1 °C), mesmo considerando perdas energéticas.

Espessuras superiores trariam ganhos marginais em eficiência, mas com penalização do peso total do sistema, dificultando a sua instalação, manutenção e integração em fachadas convencionais. Por outro lado, espessuras inferiores comprometeriam o desempenho térmico em cenários críticos. Assim, os 6 cm surgem como a solução mais equilibrada entre eficácia e aplicabilidade prática.

- Para o  $\Delta\theta$  da água no inverno:

Área envidraçada por módulo:  $A = 0,450 \text{ m}^2 \rightarrow$  área total  $A_6 = 6 \times 0,450 = 2,700 \text{ m}^2$

Volume de água por módulo:  $V = A \cdot e = 0,450 \cdot 0,06 = 0,027 \text{ m}^3 = 27,16 \text{ L}$

Massa de água por módulo:  $m \approx 27,16 \text{ kg} \rightarrow$  massa total  $m_6 \approx 6 \times 27,16 = 163,0 \text{ kg}$

Calor específico da água:  $c = 4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Vidro solar-control (low-e):  $g = 0,35$

Tem-se que:

$$Q_{solar} = SHGC \times I \times A_{solar} \times t$$

$$\Delta\theta_{\acute{a}gua} = \frac{Q_{solar}}{m_{\acute{a}gua} \times c_{\acute{a}gua}}$$

Com valores:

$$SHGC \approx 0.35 \text{ (com low - e)}$$

$$I = 500 \text{ W/m}^2$$

$$A_{solar} = 2,700 \text{ m}^2$$

$$t = 1h = 3600s$$

$$m_{\acute{a}gua} = 163.2 \text{ Kg}$$

$$c_{\acute{a}gua} = 4180 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

Vem:

$$Q_{solar} = SHGC \times I \times A_{solar} \times t =$$

$$= 0.35 \times 500 \times 2,7 \times 3600 = 1701000 \text{ J}$$

Logo

$$\Delta\theta_{\acute{a}gua} = \frac{Q_{solar}}{m_{\acute{a}gua} \times c_{\acute{a}gua}}$$

$$\Delta\theta_{\acute{a}gua} = \frac{1701000}{163,2 \cdot 4180} = 2,49 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Para o  $\Delta\theta$  da água no verão:

No cenário de verão, aplicou-se o coeficiente  $\eta_{colec\c{a}o}$  para representar a eficiência do sistema na absorção da radiação solar. Este fator já considera perdas por reflexão, convecção e radiação, permitindo estimar apenas o calor efetivamente absorvido pela água. Desta forma, a variação térmica calculada reflete uma condição mais realista do desempenho do sistema.

Foi considerado o valor de  $500 \text{ W/m}^2$  para a irradiância solar incidente na fachada sul durante o verão. Este valor representa uma estimativa realista e otimista para superfícies verticais em condições de céu limpo e elevada refletância, com base nos dados experimentais apresentados por Simón-Martín et al. (2015), no âmbito do estudo da irradiância difusa em diferentes orientações e inclinações.

Tem-se que:

$$Q_{solar} = g_{ef} \times A_{solar} \times \left( \sum I_{POA}(t) \Delta t \right)$$

$I_{POA}$  = irradiância no plano da fachada

$A_{solar}$  = área efetiva do módulo

$g_{ef}$  = SHGC efetivo de verão

Regra prática para  $g_{ef}$ :

Com low-e/controlo solar + incidência oblíqua/sombreamento: 0,45.

$$\Delta\theta_{\acute{a}gua} = \frac{Q_{solar} \times \eta_{colec\tilde{a}o}}{m_{\acute{a}gua} \times c_{\acute{a}gua}}$$

$\eta_{colec\tilde{a}o}$  = eficiência durante o carregamento que compensa perdas por convecção ou radiação enquanto a água aquece

Sugere-se usar 0.4-0.8, em que 0.4 é conservador, 0.6 típico e 0.8 otimista

Supondo então:

Fachada exposta 2h= 7200 s

$$I_{POA} = 500 \text{ W/m}^2 \text{ (ver\~{a}o)}$$

Energia por  $m^2 = 500 \times 2 \times 3600 = 3,6 \text{ MJ/m}^2$

$$A_{solar} = 2,7m^2$$

$$g_{ef} = 0.45 \text{ (vidro de controlo)}$$

$$\eta_{colec\tilde{a}o} = 0.5$$

$$m_{\acute{a}gua} = 163.2 \text{ Kg}$$

$$c_{\acute{a}gua} = 4180$$

Vem

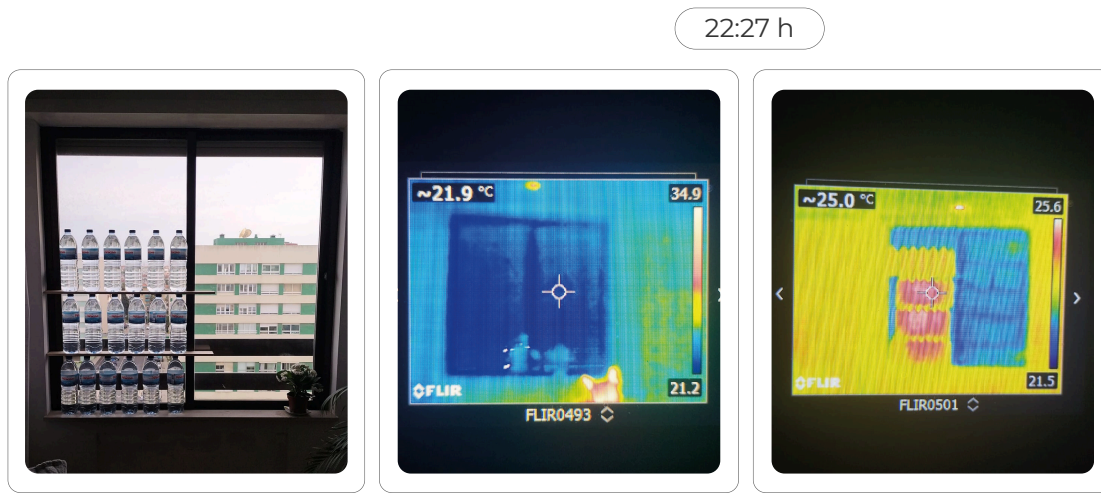
$$Q_{solar} = 0.45 \times 2,7 \times 3600000 \approx 4374000 \text{ J}$$

$$\Delta\theta_{\acute{a}gua} = \frac{Q_{solar} \times \eta_{colec\tilde{a}o}}{m_{\acute{a}gua} \times c_{\acute{a}gua}} = \frac{4374000 \times 0.5}{163.2 \times 4180} \approx 3,25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Se usarmos  $\eta_{colec\tilde{a}o} = 0.4$  (o que é possível, mais conservador) dá 2,57

## F. Prova de Conceito – Ensaio experimental

Realizou-se um ensaio experimental preliminar com recurso a uma câmara térmica, utilizando garrafas de 1,5 L de água colocadas junto a uma janela exposta ao sol por forma a simular a acumulação térmica do sistema proposto. As imagens captadas às 22:27h mostraram que a estrutura com as garrafas ainda retinha calor: as zonas amarelas indicavam já alguma dissipação térmica, enquanto os tons vermelhos evidenciavam que parte do calor continuava armazenado. Em contraste, a imagem da janela sem o sistema surgia em tons azuis, revelando ausência de calor acumulado ou a dissipar. O teste confirmou, de forma simples, a capacidade de acumulação e dissipação térmica da água.



## G. Cálculo da força de deslize do sistema

Este anexo apresenta o cálculo da força necessária para deslizar uma porta com 200 kg, apoiada em rolos com rolamentos. A estimativa da resistência ao movimento baseia-se nos coeficientes de atrito dinâmico indicados na Tabela 11.1 do *NTN Rolling Bearings Handbook* (NTN Corporation, s.d., p. 55), bem como nas fórmulas de transferência de energia mecânica descritas por Çengel e Boles (2015).

### 1) Força Normal (Peso)

A massa da porta é de 200 kg. Aplicando a aceleração da gravidade ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ), obtém-se a força normal:

$$N = m \times g = 200 \times 9,81 = 1962 \text{ N}$$

### 2) Modelo de Resistência ao Rolamento

A força de deslize é calculada como:

$$F = \mu \times N$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito dinâmico (adimensional). Foram utilizados os intervalos da Tabela 11.1 para rolamentos radiais, uma vez que a porta exerce carga perpendicular ao eixo da roda.

### 3) Resultados por Tipo de Rolamento Radial (NTN, Tabela 11.1)

Tabela 11: Valores forças médias para os respectivos rolamentos. Adaptado de: NTN Corporation (s.d., p. 55).

Tipo de Rolamento	$\mu$ (mín–máx)	Força (mín–máx) [N]	Força (mín–máx) [kgf]	Força média [N]
Self-aligning ball	0.0008–0.0012	1.57–2.35	0.16–0.24	1.96
Deep groove ball	0.0010–0.0015	1.96–2.94	0.20–0.30	2.45
Angular contact ball	0.0012–0.0018	2.35–3.53	0.24–0.36	2.94

Cylindrical roller	0.0010–0.0020	1.96–3.92	0.20–0.40	2.94
Tapered roller	0.0017–0.0025	3.34–4.91	0.34–0.50	4.13
Needle roller	0.0020–0.0030	3.92–5.89	0.40–0.60	4.91
Self-aligning roller	0.0020–0.0040	3.92–7.85	0.40–0.80	5.89

Intervalo global (rolamentos radiais): 1,6–7,9 N (0,16–0,80 kgf).

#### 4) Comparação Intuitiva

Para contextualizar a ordem de grandeza da força:

- 2 N (0,2 kgf)  $\approx$  peso de um smartphone
- 4 N (0,4 kgf)  $\approx$  peso de uma maçã
- 6–8 N (0,6–0,8 kgf)  $\approx$  meia garrafa de água

Conclui-se que o esforço manual é muito baixo e ergonómico.

#### 5) Considerações Finais

A força calculada não considera o pico de atrito estático (arranque), nem resistências adicionais (desalinhamento, vedantes, mecanismos de fecho). Assume-se calha nivelada e rolamentos em bom estado. Caso a calha esteja inclinada, deve ser somado o termo adicional  $W \cdot \sin(\theta)$ .