



**Débora
Pons Fiorentin**

**Análise de Eficiência Energética em Edifícios
Modulares Leves**



**Débora
Pons Fiorentin**

Análise de Eficiência Energética em Edifícios Modulares Leves

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e sob a coorientação científica do Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof.^a Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Primeiramente agradeço aos meus pais por serem a minha base para conclusão desta e todas as etapas da minha vida.

Ao meu namorado, Antônio Augusto, pela paciência e companheirismo durante este longo percurso.

Ao meu orientador Nelson Martins por toda dedicação e conhecimento transmitido, ao meu coorientador pela apreciação e importantes sugestões conferidas a este trabalho.

palavras-chave

BRICKITSMART; Construção Leve Modular; Eficiência Energética; Inércia Térmica; Parede de Água; Simulação Dinâmica.

resumo

Estima-se que as edificações sejam responsáveis por 40% do consumo energético na União Europeia. Este cenário demonstra a importância de serem estudadas alternativas de eficiência energética dos sistemas da edificação.

À vista disso, este projeto centrou-se em avaliar a eficiência energética de um sistema construtivo do tipo modular leve, com ênfase na obtenção do conforto higrotérmico dos usuários. O objetivo geral desta dissertação é identificar e avaliar o impacto da baixa inércia térmica associada ao modelo construtivo BRICKITSMART, sem que isto implique estrangulamentos ao conceito original do sistema de ser uma construção do tipo *“Do It Yourself”*.

Realizou-se um estudo de revisão bibliográfica que contextualiza o problema de baixa inércia térmica associado a este tipo de construção, e identificaram-se os parâmetros essenciais que foram implementados na análise do desempenho térmico deste sistema construtivo.

A análise centrou-se no estudo de 1 modelo, 12 condições de utilização e 10 alternativas para o aumento da inércia térmica, totalizando 120 cenários. A alternativa passiva estudada consiste na integração de bolsas de água nos elementos construtivos usando uma tecnologia do tipo Bag-in-Box®.

Para a realização deste estudo recorreu-se à simulação dinâmica com auxílio do programa DesignBuilder versão V6.1.7.007, em que foram realizadas simulações anuais do balanço energético da edificação, com uma discretização de cálculo sub-horária. Obtiveram-se resultados de consumo energético para aquecimento e arrefecimento, bem como o perfil detalhado dos fluxos de calor pela envolvente ao longo do ano.

O estudo permitiu concluir que é possível a garantia do conforto térmico dos usuários, mesmo em edificações de baixa inércia térmica, mas para isto é necessário um alto custo de climatização ativa, seja pela potência necessária, seja pelo consumo associado. As alternativas de inércia térmica permitiram a redução do consumo energético anual de até 29%. Ainda se identificaram diminuição da potência dos equipamentos de AVAC ou mesmo períodos em que não era necessário a climatização ativa ser acionada. Sendo ainda possível identificar os intervalos de temperatura de conforto térmico associadas à cada tipologia estudada. Finalmente, em como fecho do estudo foi possível definir recomendações relativamente à quantidade e localização dos elementos inerciais, em função do clima e da natureza das cargas internas.

keywords

BRICKITSMART; Modular Lightweight Construction; Energy Efficiency; Thermal Inertia; Water Wall; Dynamic Simulation.

abstract

Energy demand from buildings is nearly 40% of the energy consumption in the European Union. This scenario illustrates the importance of studying energy efficiency alternatives of building systems.

Thereby this project aims to evaluate the energy efficiency of a light modular construction, focusing on obtaining hygrothermal comfort. The general objective of this dissertation is to identify and evaluate the impact of low thermal inertia, related to the constructive model BRICKITSMART, without implying any constraints to the original concept of the system as a "Do It Yourself" construction.

A literature review study was carried out and it contextualizes the problem of low thermal inertia associated with this type of construction. And were identified the parameters that were implemented in the analysis of the thermal performance of this construction system.

The analysis was made studying 1 model, 12 different profiles, with 10 alternatives for each, for increased thermal inertia, totaling 120 scenarios. The passive alternative studied is the implementation of water bags in the building elements, with the Bag-in-Box® technology.

To perform the analysis, dynamic simulation was used with the software DesignBuilder, version V6.1.7.007, in which annual simulations of the energy balance of the building were carried out using a specified sub-hourly calculation. Results of energy consumption for heating and cooling were obtained, as well as the detailed profile of heat flows.

The developed study allowed to conclude that it is possible to achieve users thermal comfort, even in low thermal inertia buildings, but with a high cost associated with the air conditioning system, due to the equipment power or the associated consumption. Thermal inertia alternatives allowed the annual energetic consumption to be reduced by up to 29%. It was also identified a decrease in the power of HVAC equipment, and periods that air conditioning system was not needed to turn on. In addition, it was possible to identify the thermal comfort temperature intervals associated with each typology studied. Finally, to conclude the study it was able to define advices regarding the quantity and location of the inertial elements, due to the weather and internal loads.

Índice Geral

Índice Geral	xiii
Índice de Equações	xv
Índice de Figuras	xvi
Índice de Tabelas	xvii
Lista de Siglas	xviii
1. Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivo Geral do Trabalho	2
1.3 Revisão Bibliográfica	2
1.3.1 Sistema construtivo modular	2
1.3.2 Conforto térmico	5
1.3.3 Inércia térmica	7
1.3.4 Simulação dinâmica	10
1.3.5 Caracterização bioclimática	11
1.3.6 Estratégias de inércia térmica	13
1.4 Síntese do capítulo	16
1.5 Contributo do Trabalho	17
1.6 Estrutura da Dissertação	17
2. Metodologias de modelação e modelo de referência	19
2.1 Sumário	19
2.2 Modelo construtivo	19
2.2.1 Primeira análise de modelação	19
2.2.2 Modelo construtivo final	21
2.3 Alternativas de otimização	29
2.3.1 Materiais utilizados e propriedades	30
2.4 Síntese do capítulo	30
3. Caso de estudo	31
3.1 Sumário	31
3.2 Critérios para análise	31
3.3 Modelos para análise	31
3.4 Metodologia do projeto	34
3.4.1 Afinação do sistema de climatização	35
3.4.2 Validação do limite do índice de PMV	36

3.4.3	Temperatura de conforto.....	38
3.5	Síntese do capítulo	38
4.	Análise e discussão dos resultados.....	39
4.1	Sumário	39
4.2	Estudo paramétrico – exposição dos resultados	39
4.3	Análise do estudo paramétrico	42
4.3.1	Volume de água	42
4.3.2	Fluxos de calor.....	44
4.4	Temperatura de <i>setpoint</i>	58
4.5	Síntese do capítulo	60
5.	Conclusões e trabalho futuro.....	61
5.1	Trabalhos futuros.....	62
	Referências	63
	Apêndice A – Resultados dos estudos paramétricos	A
	Apêndice B – Análise de incerteza da temperatura de <i>output</i>	B

Índice de Equações

Equação 1	22
Equação 2	22
Equação 3	25

Índice de Figuras

Figura 1 – Módulo habitacional construído com BRICKITSMART	5
Figura 2 – Esquema dos fluxos de calor em uma zona única	8
Figura 3 – Normais climatológicas para Lisboa	11
Figura 4 – Radiação solar ao longo do ano	12
Figura 5 – Paredes de água	13
Figura 6 – O ciclo de um PCM	15
Figura 7 – Tipologia do estudo preliminar	20
Figura 8 – Bloco BRICKITSMART	21
Figura 9 – Orientação solar do modelo de referência	23
Figura 10 – Camadas do sistema construtivo BRICKITSMART	24
Figura 11 – Camadas da envoltória em Helsínquia	24
Figura 12 – Perfil de utilização	28
Figura 13 – Sacos Bag-in-Box®	30
Figura 14 – Camadas do Sistema construtivo com água em Lisboa	32
Figura 15 – Camadas do Sistema construtivo com água em Helsínquia	32
Figura 16 – Esquema da nomenclatura dos modelos	33
Figura 17 – Exemplo ilustrativo das Bag-in-Box® no pavimento	34
Figura 18 – Ecrã do DesignBuilder	35
Figura 19 – Índice PMV horário para LERB0	37
Figura 20 – Índice PMV horário para LERB3	37
Figura 21 – Exemplo de estudo paramétrico	39
Figura 22 – Consumo energético anual para Lisboa, Escritório, Estendido	40
Figura 23 – Consumo energético anual para Helsínquia, Dormitório, Reduzido ..	41
Figura 24 – Consumo energético anual para Lisboa, Ginásio, Reduzido	41
Figura 25 – Semana de verão para LEEB0 sem climatização ativa	44
Figura 26 – Semana de verão para LEEB3 sem climatização ativa	45
Figura 27 – Semana de verão para LEEB3 com climatização ativa	46
Figura 28 – Semana de inverno HGRB0	47
Figura 29 – Semana de inverno HGRB2	47
Figura 30 – Semana de inverno LGEB0	48
Figura 31 – Semana de inverno LGEB3	48
Figura 32 – Semana de verão LGEB0	49
Figura 33 – Semana de verão LGEB3	49
Figura 34 – Semana de verão HGRB0	50
Figura 35 – Semana de verão HGRB3	50
Figura 36 – Sistema de AVAC, inverno, LEEB3	51
Figura 37 – Sistema de AVAC, verão, LEEB3	52
Figura 38 – Semana de inverno HEEF3	52
Figura 39 – Semana de inverno HEEB3	53
Figura 40 – Semana de inverno HERB0	53
Figura 41 – Semana de inverno HERB3	54
Figura 42 – Cargas térmicas HDRB0	55
Figura 43 – Semana de verão HDRB0	55
Figura 44 – Semana de verão HDRB3	56
Figura 45 – Semana de inverno LDEB0	57
Figura 46 – Semana de inverno LDEB3	57

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Fatores de influência na eficiência energética de edificações	7
Tabela 2 – Temperatura de bolbo seco em Lisboa	12
Tabela 3 – Temperatura e precipitação média para Helsínquia	12
Tabela 4 – Propriedades térmicas dos vidros	23
Tabela 5 – Propriedades térmicas do MDF e XPS	25
Tabela 6 – Classe de inércia térmica	25
Tabela 7 – Perfil de ocupação	26
Tabela 8 – Taxa metabólica e índice de vestuário de cada atividade	27
Tabela 9 – Densidade de potência	27
Tabela 10 – Valores do caudal de ar novo	29
Tabela 11 – Estudo do <i>setback</i>	35
Tabela 12 – Redução do consumo energético para o Escritório	43
Tabela 13 – Redução do consumo energético para o Dormitório universitário	43
Tabela 14 – Redução do consumo energético para o Ginásio	44
Tabela 15 – Temperaturas de <i>output</i> , verão, modelos sem inércia térmica	58
Tabela 16 – Temperaturas de <i>output</i> , inverno, modelos sem inércia térmica	59
Tabela 17 – Comparação das temperaturas médias de <i>output</i>	60

Lista de Siglas

AET	Armazenamento de energia térmica
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar-condicionado
CLO	Resistência térmica do vestuário
COP	<i>Coefficient of performance</i>
CTF	<i>Conduction Transfer Function</i> - Função de Transferência por Condução
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
DIY	<i>Do It Yourself</i> – Faça você mesmo
FD	<i>Finite difference</i> – Diferenças Finitas
HPL	<i>High Pressure Laminate</i>
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
LED	<i>Light-emitting diode</i>
LSF	<i>Light Steel Frame</i>
MDF	<i>Medium-density fiberboard</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PCM	<i>Phase Change Material</i> – Material de mudança de fase
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> – Voto médio estimado
XPS	Poliestireno extrudido

1. Introdução

1.1 Contextualização

Os edifícios dos sectores de serviços e residencial representam, aproximadamente, 40% do consumo energético e 36% das emissões de CO_{2eq}. na União Europeia. Se aplicadas medidas de eficiência energética nos edifícios existentes é possível uma redução de 5 a 6% no consumo energético e de 5% nas emissões de CO_{2eq} (EUROPEAN UNION, 2019). De acordo com DGEG (2017), em Portugal, o balanço energético para os edifícios é de 16,4% para o sector doméstico e 12,2% para os serviços. Conforme MATTEIS, *et al* (2017), tendo em vista este cenário, o sector da construção está a impulsionar o desenvolvimento de novas tecnologias que visam maiores desempenhos energéticos, relacionando o complexo equilíbrio entre as tendências de projeto, as novas tecnologias e os materiais disponíveis, bem como aliar a sustentabilidade das edificações com aspetos económicos e sociais. Já LEAL (2015) relata que com a constituição da directiva europeia 2010/31/EU, que rege os critérios de desempenho mínimo, espera-se um maior desenvolvimento de soluções passiva para as edificações, nomeadamente para o sector residencial.

A relevância do consumo energético no sector dos edifícios torna essencial que sejam estudadas não apenas as características termodinâmicas dos elementos construtivos, mas também a sustentabilidade da edificação, até porque os parâmetros benéficos em uma estação do ano podem não ser adequados em outra (PACHECO, ORDÓÑEZ, MARTÍNEZ, 2012).

O desempenho energético dos edifícios pode ser analisado através da utilização de aplicações informáticas (*softwares*) de modelação que avaliam o desempenho energético a partir de dados de entrada, como por exemplo as características da envolvente da edificação, do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado (AVAC) e das cargas internas (SADINENI, MADALA, BOEHM, 2011).

As casas de baixo consumo energético são construídas com o intuito de minimizar os gastos energéticos, mas, ainda assim, necessitam de algum tipo de sistema de climatização. As edificações passivas são projetadas incorporando tecnologias que possibilitem o consumo energético (quase) nulo (LEAL, 2015).

A envolvente é o conjunto de elementos da superfície de uma edificação, sendo um complexo sistema formado pelas paredes externas, pavimento, fenestrações e cobertura. Cada sistema de envolvente deve compreender diferentes características para atender às exigências das normas para o conforto térmico interior. Entretanto, as normas indicam níveis mínimos a serem cumpridos, sendo necessário realizar um sistema otimizado para atender ao conforto térmico dos usuários (CIUTINA, *et al.*, 2019).

Conforme FAN e XIA (2017) além dos parâmetros que agregam valor à eficiência energética das envolventes das construções, há um atraso entre as novas tecnologias estudadas nas aplicações de simulação computacional e a resposta do mercado a essas tecnologias.

O sector da construção civil causa severos impactos ambientais e por isso é necessário que sejam desenvolvidos projetos que valorizem a eficiência energética e a redução de custos. A construção modular aliada à sustentabilidade objetiva uma construção que atenda as exigências de eficiência energética, redução de custos de construção e minimização de impactos ambientais (FREITAS, 2014).

A compreensão da inércia térmica é muito relacionada à massa da edificação. É definido que quanto maior for a densidade do material, maior será a capacidade térmica resultante, entretanto essa premissa nem sempre representa a real inércia térmica de uma edificação (LONG, *et al*, 2017).

De acordo com GOULART (2004) os edifícios leves têm pouca massa nos seus componentes, ou seja, uma fraca inércia térmica. Isto traduz em uma edificação que responde mais rapidamente às alterações de temperatura externa. ASCIONE (2019) complementa que com o aumento da capacidade térmica de uma edificação há uma estabilização da temperatura interna. Edifícios com maior inércia térmica demonstram menor flutuação da temperatura interna e conseqüente aumento do conforto térmico dos usuários. Portanto, segundo CIUTINA *et al* (2019) os estudos de eficiência energética de uma edificação devem considerar a capacidade térmica do sistema e o consumo energético global associado.

1.2 Objetivo Geral do Trabalho

Centrando-se no alcance da melhor eficiência energética e do conforto higrotérmico para os ocupantes de edificações modulares, o principal objetivo dessa dissertação de mestrado é identificar e avaliar o impacto e minimizar os efeitos da baixa inércia térmica associada ao sistema construtivo modular leve, BRICKITSMART, sem desvirtuar o conceito original subjacente ao projeto, nomeadamente ser uma construção do tipo “*Do It Yourself*” (DIY).

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 Sistema construtivo modular

Nos países europeus, a construção pré-fabricada foi desenvolvida de acordo com a cultura e as técnicas de construção de cada região. No Reino Unido o desenvolvimento em larga escala é associado com o aumento da procura de residências após a Primeira Guerra Mundial (LU, 2007). Em Portugal a construção pré-fabricada, em madeira, data do início do século XX, período em que ocorreu o êxodo rural e como efeito a falta de alojamentos. As famílias necessitavam de

habitações de rápida execução e baixo custo, e a solução encontrada foi a pré-fabricação de habitações em madeira (PIRES, 2013).

O desenvolvimento do mercado da construção exige soluções que proporcionem maior controlo e velocidade na execução da edificação e que minimizem os impactos ambientais (COSTA, 2013). Destarte, a pré-fabricação torna-se atrativa, pois é um sistema construtivo que pode ser mais económico e de muito mais rápida execução (MOLAVI, BARRAL, 2016).

COSTA (2013) caracteriza o sistema pré-fabricado como um conjunto de técnicas em que a produção dos elementos construtivos é realizada fora do local de implantação definitivo e, posteriormente, é apenas montado em obra. E LACEY *et al* (2018) complementam que os componentes destas edificações devem ser os mais leves possíveis, visto que pode haver necessidade de transporte por longas distâncias.

TAVARES, LACERDA E NUNES (2019) explicam que esta forma de construção pode estar centrada na pré-fabricação de componentes (janelas, portas, equipamentos), estrutura, painéis de fechamento ou módulos e construção em módulos que compõem todo o edifício. LACEY *et al* (2018) destacam o aço, o concreto e a madeira como os materiais mais tradicionais para este tipo de construção, em consequência disso houve um crescimento no uso de estruturas pré-fabricadas do tipo sanduíche.

Um dos tipos da construção pré-fabricada é a de módulos, em que um módulo pode ser definido como uma medida standardizada das dimensões dos elementos construtivos de forma a regularizar as proporções de uma composição arquitetónica (MAYOR, 2012). Este processo de construção contempla a ligação dos módulos entre si no local da construção, em que cerca de 80 a 95% do processo construtivo é realizado em fábrica, ou fora do local da construção (COSTA, 2013). LEAL (2015) destaca que este tipo de sistema pode minimizar os erros de construção, comparativamente com sistemas construtivos tradicionais.

De acordo com LU (2007) o sistema de fechamento em painéis consiste na instalação de painéis em estrutura já pronta da edificação. Este sistema contempla também a pré-fabricação de todos os componentes do fechamento da edificação, geralmente sendo um painel já acabado com revestimento, isolamento, acabamentos internos, portas e janelas.

As construções do tipo Light Steel Frame (LSF) utilizam como material de estruturação principal elementos de aço perfilados. O fechamento do sistema é constituído por placas de gesso cartonado e OSB, sendo os isolantes mais usados o poliestireno expandido e a lã de rocha, podendo alternar o acabamento externo (RAMOS, 2018). Para atingir a resistência térmica necessária, pode-se variar o tipo e a espessura do isolamento térmico (CIUTINA, *et al.*, 2019). RAMOS (2018) salienta que o sistema LSF apresenta algumas deficiências, como a ocorrência de pontes térmicas e consequente aumento do risco de focos de humidade no interior devido à condensação em locais menos isolados da envolvente. Adicionalmente, a

baixa inércia térmica desse sistema conduz a problemas relacionados com a oscilação de temperaturas diárias, resultando em desconforto térmico ou consumo energético associado à climatização bastante mais elevados do que seria expectável. Ainda CIUTINA *et al* (2019) enfatiza que as camadas externas podem ser revestidas com diversos materiais, para que o aspeto arquitetónico também seja satisfatório.

Dos derivados de madeira, os aglomerados de partículas, lamelados colados e placas OSB são os mais utilizados. Tais elementos são utilizados em forma de placas que conferem estabilidade e resistência mecânica para a estrutura (PIRES, 2013). De acordo com RAMOS (2018) as placas OSB são muito utilizadas para fechamento em sistemas construtivos modulares por possuírem baixo coeficiente de condutibilidade térmica.

A velocidade de execução da obra, menor ocorrência de erros construtivos, maior produtividade, menor desperdício de matérias-primas são algumas das vantagens associadas às construções modulares (RAMOS, 2018). MOLAVI e BARRAL (2016) destacam a redução do cronograma da obra, pois pode-se realizar a produção em fábrica concomitantemente com a execução da obra, garantindo economia com a mão-de-obra, melhores condições de trabalho e segurança dos trabalhadores. E FREITAS (2014) complementa que isto ocorre porque a construção modular obriga que haja maior cuidado na fase de projeto e produção dos elementos construtivos.

Algumas desvantagens associadas com as construções pré-fabricadas são a limitação do tamanho dos módulos e peso dos componentes, por limitação de transporte e montagem das estruturas. Destaca-se a necessidade do desenvolvimento de sistemas leves que englobem a robustez da edificação (LACEY, *et al.*, 2018).

O sistema construtivo BRICKITSMART, desenvolvido em parceria entre a Universidade de Aveiro e a empresa Dreamdomus, procura alinhar todas as vantagens de um sistema modular leve em um único sistema. Este método construtivo foi desenvolvido para ser de fácil fabricação, transporte e instalação. Possui desenho modular inovador que dispensa o uso de ferramentas específicas, além de estar adequado a atender ao conceito *Do It Yourself*. Os blocos têm um formato que permite o fácil encaixe e também a desmontagem do módulo habitacional que tem dimensão padrão de 3,0 x 3,0 x 2,5 m. A edificação construída com este sistema pode ser de módulo único ou em vários módulos habitacionais construídos em sequência como demonstra a Figura 1. (BRICKITSMART, 2020).



Figura 1 – Módulo habitacional construído com BRICKITSMART

Fonte: Universidade de Aveiro, 2020

1.3.2 Conforto térmico

O conforto térmico é de difícil definição, pois são diversos os parâmetros que influenciam a sua percepção, podendo ser fisiológicos e psicológicos, isto é, diferencia-se de pessoa para pessoa. De acordo com a ASHRAE (2010) “*O conforto térmico é o estado de espírito que expressa a satisfação com o ambiente térmico*”. LAMBERTS, DUTRA E PEREIRA (1997) evidenciam que a sensação de conforto é também relacionada com variáveis do ambiente como a temperatura, humidade relativa do ar e velocidade do ar; variáveis físicas referem-se ao ganho ou perda de calor através das atividades metabólicas; variáveis de vestuário em que a menor troca de calor com o ambiente acontecerá em vestuários com maior resistência térmica.

Os modelos de troca de calor do corpo humano com o ambiente são baseados na teoria de transferência de calor. A partir de estudos em câmaras climatizadas, realizados pelo dinamarquês Povl Ole Fanger, desenvolveu-se a equação analítica de conforto térmico de *Fanger*, atualmente utilizada pelas mais reconhecidas normas de conforto térmico, tal como a ISO 7730 (LAMBERTS, *et al.*, 2016).

De acordo com ALMEIDA (2010) a sensação de conforto térmico está associada ao estado de neutralidade térmica do corpo humano com o ambiente. Este equilíbrio é atingido quando a taxa de produção de calor pelo ser humano é igualada à taxa de calor cedida ao ambiente por meio de processos de condução, pelo contato direto do corpo humano com o ambiente, convecção e radiação, pela exposição ao ar exterior, bem como processos de respiração e transpiração. INNOVA (2002) explica que a temperatura normal do corpo, também conhecida como normotermia, está entre 34 e 37°C. Assim, quando a temperatura corporal excede os 37°C o hipotálamo inicia a função de resfriamento do corpo. Os sensores da pele iniciam a defesa ao frio quando a temperatura cai abaixo de 34°C.

A abordagem analítica para análise do conforto térmico é baseada no estudo em câmaras climatizadas em que diversos fatores ambientais são ajustados. Baseia-se na premissa de que para cada taxa metabólica as variáveis fisiológicas são a temperatura média da pele e a quantidade de calor perdida pela transpiração e respiração. À vista disso Fanger desenvolveu a equação do balanço térmico (ALMEIDA, 2010).

Na sequência do seu trabalho, Fanger desenvolveu a escala de sensação de conforto térmico, obtida pela equação do PMV, voto médio estimado, em que a escala varia de -3 (muito frio) e +3 (muito calor) e 0 (zero) significa sensação termicamente neutra. No entanto, mesmo que o índice PMV seja 0 haverá uma certa percentagem de indivíduos que não estará em sensação termicamente neutra, visto que a sensação de conforto varia de pessoa para pessoa (INNOVA, 2002).

Para se obter o conforto térmico em ambientes internos deve-se realizar uma análise do desempenho térmico da edificação, fazendo com que o ambiente seja termicamente confortável ao usuário. Para tal é necessário conhecer as características e parâmetros relativos à edificação para evitar desperdícios de energia. Assim, a eficiência energética é uma condição intrínseca ao potencial da edificação para fornecer conforto aos usuários, sendo um edifício considerado mais energeticamente eficiente que um semelhante quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia (LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 1997). Salienta-se que a eficiência energética também se relaciona com os princípios de racionalização de recursos energéticos de novas edificações e daquelas que necessitem de obras de reabilitação (COSTA, 2014).

Segundo RADHI (2008) os elementos da envolvente determinam as condições climáticas interiores, e podem ter influência positiva para alguns aspectos e negativas para outros, portanto, é necessário que a edificação seja analisada como um todo. MANIOGLU e YILMAZ (2006) destacam que as temperaturas internas do ar e da superfície da parede mudam de acordo com a variação de fluxos térmicos trocados pela envoltória. Essa variação está relacionada com o coeficiente de transferência de calor, a inércia térmica e o período de operação do sistema de climatização.

As paredes, que constituem a envoltória, devem promover o conforto térmico e acústico para os usuários, sendo a resistência térmica o parâmetro que mais influencia nos resultados de consumo energético (SADINENI, MADALA, BOEHM, 2011). A maior área da envolvente é relacionada com as paredes e cobertura, sendo assim, responsáveis pela maior troca de energia entre o interior e exterior da edificação (LEAL, 2015). As trocas térmicas pela cobertura podem representar até 60% do total das trocas energéticas da envoltória. As soluções de isolamento da cobertura podem minimizar as cargas de aquecimento e arrefecimento (SADINENI, MADALA, BOEHM, 2011).

ASTE, ANGELOTTI, BUZZETTI (2009) atestaram que paredes com elevada inércia térmica têm grande influência na redução das cargas para aquecimento e arrefecimento, mas se as medidas passivas forem associadas com outras medidas de redução de consumo energético há um aumento mais significativo na eficiência energética da edificação.

KIBERT (2008) resume alguns dos fatores que devem ser considerados durante o desenvolvimento de um projeto passivo, listados na Tabela 1. O autor define projeto passivo como o projeto dos sistemas, especificamente aquecimento, arrefecimento, iluminação, que beneficiam dos recursos naturais presentes no local da construção. Em complemento MANIOGLU e YILMAZ, (2006) também salientam que para controlar a troca de calor pela envoltória é necessário que sejam aplicadas as características otimizadas de cada fator que interfere na edificação.

Tabela 1 – Fatores de influência na eficiência energética de edificações

Fator	Aplicação
Condições meteorológicas	Angulação solar, insolação solar, velocidade e direção do vento, temperatura e humidade do ar ao longo do ano
Localização geográfica	Terreno, vegetação, condições do solo, lençol freático, microclima, influência de prédios vizinhos
Fator de forma	Razão entre comprimento e altura da edificação
Orientação solar	Maior área de fachada para orientação Leste-Oeste, configuração geométrica das zonas térmicas, área envidraçada
Inércia da edificação	Potencial de armazenamento de energia dos materiais, fenestração, cor dos elementos da fachada
Tipologia da edificação	Rotina de ocupação e operação
Aproveitamento da luz solar	Fenestração, brises, claraboias, persianas internas e externas
Envoltória do edifício	Geometria, isolamento, fenestração, portas, infiltração de ar, ventilação, sombreamento, inércia, cor
Cargas internas	Iluminação, equipamentos, eletrodomésticos, pessoas
Estratégia de ventilação	Potencial de ventilação cruzada, rotinas de ventilação, potencial de efeito chaminé

Fonte: Adaptado de KIBERT, 2008

1.3.3 Inércia térmica

Em uma condição dinâmica, a envoltória da edificação pode absorver, armazenar e liberar calor dependendo da diferença de temperatura do ar interior e exterior. A quantidade de calor que pode ser armazenada depende da densidade (ρ) e do calor específico (c) do material, enquanto que a taxa de troca de calor é condicionada pela condutividade térmica (λ) (VERBEKEA, AUDENAERTA, 2018). Quanto maior for o produto de $\rho c \lambda$, maior será a capacidade de armazenamento

de calor do material. (GOULART, 2004). As trocas térmicas da edificação estão relacionadas com a inércia térmica que pode ser definida como “*time lag*” ou fator de decréscimo, sendo este um dos parâmetros mais importantes para o desempenho térmico do edifício (MARTINHO, 2018). O Diário da República, Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013 caracteriza a inércia térmica em função da capacidade de armazenamento de calor de cada fração autónoma.

RAMOS (2018) define a inércia térmica como a capacidade de um edifício absorver calor nos períodos mais quentes, e liberá-lo em períodos mais frios, limitando, deste modo, a amplitude térmica no interior do edifício. Este parâmetro é diretamente influenciado pela massa térmica dos elementos construtivos que o compõe. Conforme VARELA (2015) projetos de sistemas passivos que beneficiam da radiação solar devem considerar a superfície envidraçada da edificação e a massa térmica para absorver, armazenar e distribuir o calor.

A transferência de calor pela envoltória inicia-se no período diurno quando a temperatura do ar exterior aumenta e uma parte do calor é absorvido pela parede. A temperatura da envoltória aumenta de acordo com as propriedades térmicas dos materiais constituintes e das condições de fronteira. O fluxo de calor atravessa a envoltória até a superfície interna da edificação. No período noturno há uma inversão do fluxo de calor, pela diminuição da temperatura exterior e ausência de radiação solar (GOULART, 2004). Edificações com elevada massa térmica reagem mais lentamente quando em situações de aumento ou decréscimo repentino de temperatura ambiente externa (VERBEKEA, AUDENAERTA, 2018). O seu efeito sobre a amplitude térmica interior é influenciado pelo isolamento térmico da envolvente e pelos ganhos térmicos, ou seja, ganhos solares e internos, os primeiros condicionados pelo clima e pela envolvente envidraçada, os segundos pelo perfil de ocupação (RAMOS, 2018). A Figura 2 ilustra um esquema dos fluxos de calor para uma zona única em uma edificação.

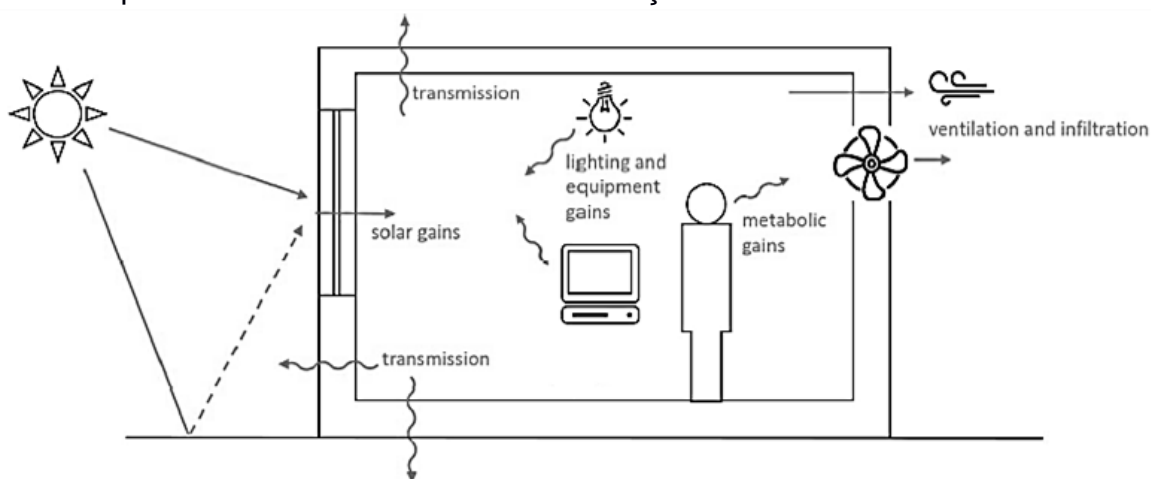


Figura 2 – Esquema dos fluxos de calor em uma zona única

Fonte: VERBEKEA, AUDENAERTA, 2018

Segundo AVILA (2018) a amplitude térmica está relacionada com a razão entre a temperatura interna e externa e as características termofísicas dos materiais

que constituem a envoltória da edificação. O aumento da condutividade térmica dos elementos da envoltória aumenta o fluxo de calor, diminuindo o tempo de transferência de calor pela envoltória. Enquanto que utilizando paredes mais espessas e materiais com menor condutividade térmica há o aumento da resistência térmica do material e diminuição da amplitude térmica interior.

A inércia térmica interna de uma edificação pode ser classificada, consoante ao Diário da República, Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, em fraca, média ou alta de acordo com a massa superficial útil e a área da superfície do pavimento, sendo que a massa superficial útil depende do posicionamento do elemento analisado na edificação, isolamento térmico e revestimento final. As propriedades térmicas dos materiais construtivos influenciam diretamente na capacidade de armazenamento de calor da parede (WANG, TIAN, DING, 2013).

Com o intuito alcançar o conforto térmico interior aliado à eficiência energética iniciou-se o uso de isolantes térmicos em edificações, para dificultar a transmissão de energia térmica entre o interior e exterior da edificação (GRADE, 2013). O aumento da inércia térmica também pode contribuir para este mesmo propósito pois quando a edificação tem elevada inércia térmica assiste-se a uma diminuição da amplitude térmica interna dado o atraso no fluxo de calor (PROJETEEE, 2019). LONG, *et al* (2017) destacam que quando a temperatura externa no período diurno é muito elevada há um rápido aumento da temperatura do ar interior quando a capacidade de armazenamento de calor e a inércia térmica são baixas.

De acordo com AVILA (2018) a inércia térmica é uma característica permanente do projeto de um edifício, contudo as características operacionais de uma edificação podem requisitar diferentes inércias térmicas. Assim, combinar a inércia térmica com soluções de armazenamento de energia térmica (AET) pode acarretar em grandes benefícios para a redução na demanda de energia e aumento do conforto térmico. AL-ALBI, MODH ISA, ISMAIL (2020) explicam o AET que consiste na captura, armazenamento e descarga da energia térmica disponível, pode ser utilizado para melhorar a troca térmica e a eficiência energética do edifício, assim como reduzir o consumo energético de sistemas de climatização que utilizam energia térmica.

O elemento de armazenamento térmico deve ser colocado entre a superfície que recebe a radiação solar e o espaço a ser aquecido. Desta forma o calor armazenado é cedido ao ambiente a ser aquecido por condução e convecção, o que gera um atraso na transmissão térmica pelo efeito da inércia térmica (VARELA, 2015). O armazenamento de energia térmica em materiais pode ocorrer de três formas, através de calor sensível, calor latente e termoquímico (AL-ALBI, MODH ISA, ISMAIL, 2020).

O AET por calor sensível, armazena energia por aumento de temperatura e necessita de materiais com muita massa, ou seja, materiais densos. O armazenamento por calor latente utiliza a mudança de fase enquanto fenómeno

físico que por norma é associado a elevadas trocas de calor (ZHANG, *et al.*, 2007). Portanto, os materiais de mudança de fase (PCM) podem fornecer um aumento na capacidade de armazenamento de calor, beneficiando os sistemas construtivos de baixa inércia, visto que um dos maiores problemas destes sistemas construtivos é a grande variação de temperatura pelo sobreaquecimento devido falta de massa térmica (KALNÆS, JELLE, 2015). Além de que a carga para arrefecimento e aquecimento diminui com o decréscimo da diferença entre a temperatura de conforto e a temperatura interior (ZHANG, *et al.*, 2007). Consequentemente os equipamentos para arrefecimento e aquecimento serão de menor potência (KALNÆS, JELLE, 2015). VERBEKEA e AUDENAERTA (2018) destacam que em estações intermediárias, isto é, com climas mais amenos, é possível atingir as condições de conforto sem a necessidade de climatização ativa.

A água e o gelo são meios de armazenamento utilizados para aquecimento e arrefecimento, respetivamente (AL-ALBI, MODH ISA, ISMAIL, 2020). As paredes de água também são uma solução passiva para o conforto térmico das edificações, visto que a água apresenta uma capacidade térmica superior a outros materiais mais comuns da construção civil (PROJETEEE, 2019).

1.3.4 Simulação dinâmica

Os projetos de avaliação do desempenho de uma edificação podem ser realizados por métodos estáticos, segundo parâmetros descritos em regulamentos e normas, ou a partir de análises dinâmicas pelo uso de programas de simulação computacional. As análises dinâmicas têm resultados mais precisos, pois são baseadas em um número muito maior de variáveis, além disso também são analisados de forma dinâmica, ou seja, os parâmetros de cálculo como ventilação e orientação solar podem ser analisados para cada dia e hora do ano, possibilitando, por exemplo, a variação da intensidade e incidência solar na edificação. Enquanto no método estático estes parâmetros são baseados em valores médios, aproximações dos valores reais (RODRIGUES, 2012).

Existem diversos programas de simulação computacional disponíveis para avaliação do desempenho térmico e energético das edificações, citam-se: EnergyGauge, DesignBuilder, EnergyPlus™, eQUEST, TRNSYS, IDA ICE, Integrated Environmental Solutions, TRACE 700. O adequado projeto de um edifício sustentável requer a utilização correta de uma determinada ferramenta de simulação (ASCIONE, *et al.*, 2019).

O *software* DesignBuilder, desenvolvido no Reino Unido, fornece recursos de simulação avançados para diferentes aplicabilidades no estudo energético de edificações. Este programa é uma interface de design que opera com os algoritmos do EnergyPlus™, garantindo acesso ao código-fonte e a todas as informações de entrada e saída do programa. Adicionalmente, o DesignBuilder conta com extensivo banco de dados, tais como informações de dados meteorológicos e materiais de

construção, possibilitando a análise do edifício sob condições operacionais reais. O método de cálculo utilizado pelo programa para calcular as cargas de aquecimento e arrefecimento é aprovado pela ASHRAE. Ainda é possível que as análises sejam realizadas em nível de edificação, zona, sistema ou planta do edifício (DESIGNBUILDER, 2020).

1.3.5 Caracterização bioclimática

O clima em que a edificação está construída, a rotina de ocupação, a forma geométrica e a orientação influenciam diretamente no desempenho térmico de um edifício (RAMOS, 2018). A classificação climática reúne diversas informações referentes a temperatura, precipitação, radiação solar e vento com o intuito de identificar os diferentes climas em zonas. A classificação utilizada é a de Köppen-Geiger, em que se relaciona o clima com a vegetação. Por um código de letras é estabelecido os tipos climáticos, a distribuição sazonal de precipitação e as características de temperatura (EXPOSTI, 2020).

Os parâmetros climáticos para Portugal na estação de aquecimento e arrefecimento são baseados no zoneamento climático descritos no diário da República, Despacho (extrato) n.º15793-F/2013. As simulações dinâmicas serão realizadas para as localidades de Lisboa (Portugal) e Helsínquia (Finlândia).

O IPMA descreve, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial, as normais climatológicas como os valores médios dos parâmetros climáticos em uma escala temporal de 30 anos, iniciada no primeiro ano de cada década. O IPMA disponibiliza as normais para a estação de Lisboa, conforme ilustra a Figura 3, com valores médios e extremos para a temperatura do ar e precipitação. Segundo a classificação de Köppen-Geiger Lisboa está classificada como Csa, ou seja, clima temperado com verão quente e seco (IPMA, 2020).

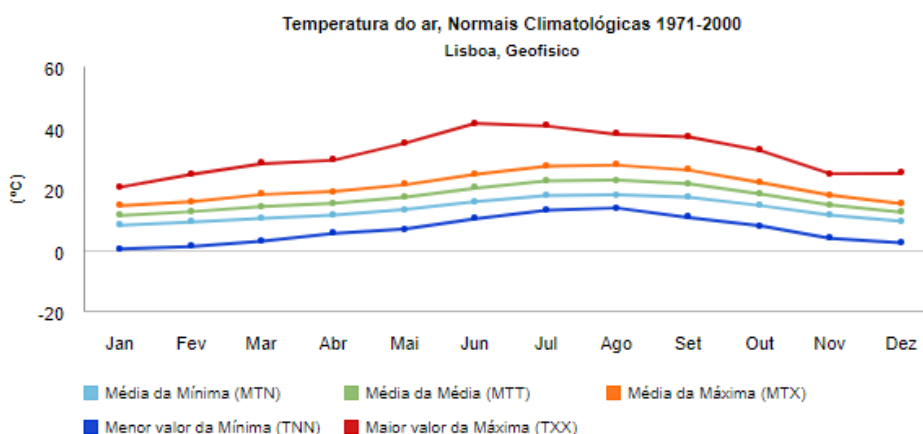


Figura 3 – Normais climatológicas para Lisboa

Fonte: IPMA, 2020

Pelo arquivo climático do DesignBuilder V6.1.7.007 a Tabela 2 expõe a temperatura média mensal para a cidade de Lisboa.

Tabela 2 – Temperatura de bulbo seco em Lisboa

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura Bulbo Seco (°C)	10,62	11,48	12,84	14,64	17,34	20,07	22,35	22,56	21,25	17,78	13,60	11,00

Fonte: DesignBuilder, 2020

A radiação solar ao longo do ano para a cidade de Lisboa ilustrada na Figura 4 indica que a orientação sul é a que demonstra maior ganho solar. Assim, o maior contributo de ganhos solares na estação de aquecimento é garantido pela fachada sul, no entanto, para a estação de arrefecimento pode ser inconveniente a utilização de superfície envidraçada nesta orientação (GONÇALVES, GRAÇA, 2004).

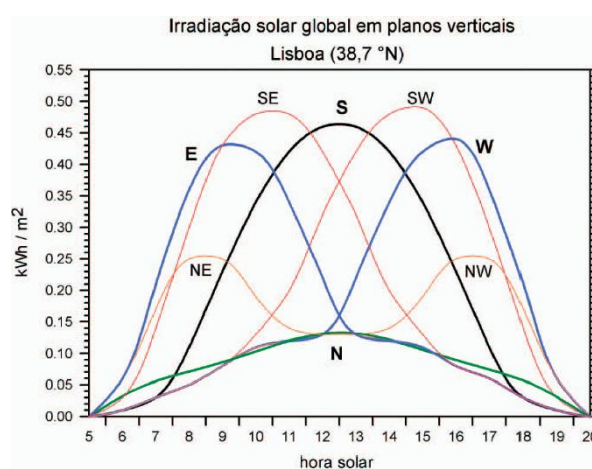


Figura 4 – Radiação solar ao longo do ano
Fonte: GONÇALVES, GRAÇA, 2004

O clima de Helsínquia é definido com a classificação de Dfb, isto é, clima continental húmido. A região tem alto índice de pluviosidade, com variação entre 33 mm em fevereiro e 78 mm em agosto (CLIMA-DATA, 2020). De acordo com o arquivo climático do banco de dados do DesignBuilder V6.1.7.007 as temperaturas externas estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Temperatura e precipitação média para Helsínquia

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura Bulbo Seco (°C)	-3,86	-5,67	-1,00	3,67	9,86	14,01	16,70	15,75	10,24	5,86	-1,26	-2,97
Chuva (mm)	44	33	33	37	36	47	72	78	71	72	70	57

Fonte: climate-data, 2020; DesignBuilder, 2020

1.3.6 Estratégias de inércia térmica

Como descrito no subcapítulo 1.3.3, a inércia térmica é utilizada para minimizar as trocas térmicas do interior da edificação com o ambiente exterior. Para tal são utilizadas diversas estratégias passivas, que tradicionalmente associam-se ao calor sensível. Sendo necessário verificar as soluções construtivas para a estação de aquecimento e arrefecimento da edificação como um todo (VERBEKEA, AUDENAERTA, 2018).

GONÇALVES, GRAÇA (2004) destacam a coluna de água como uma estratégia de sistema passivo, projetada como uma parede de armazenamento de calor. No projeto Casa Solar, uma edificação construída na cidade do Porto para estudos de desempenho energético, foram instaladas colunas de água junto aos vãos envidraçados para máxima captação da energia solar. A água foi depositada em colunas de fibra de vidro pintadas de cor escura.

O sistema de parede de água permite que sejam utilizados diferentes tipos de reservatórios (GONÇALVES, GRAÇA, 2004). Segundo PROJETEEE (2019) tais reservatórios podem ser garrafas, containers, tambores, tubos, colunas verticais, desde que o recipiente não seja um isolante térmico, para que as suas propriedades de troca de calor sejam preservadas. A Figura 5 ilustra um exemplo de parede de água.

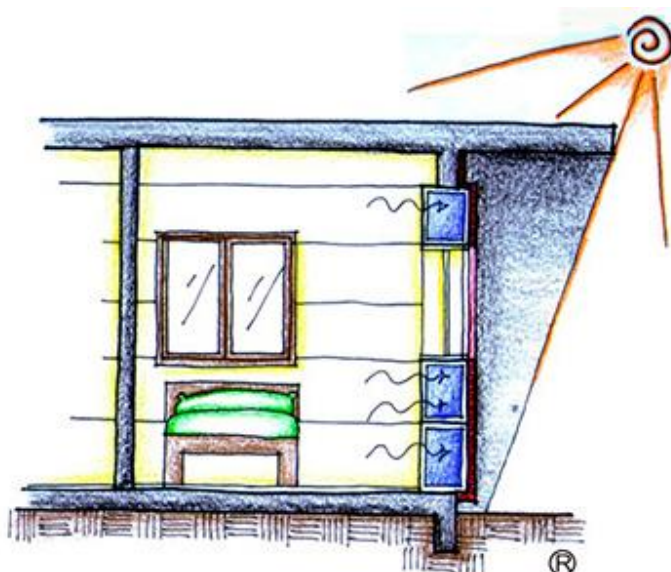


Figura 5 – Paredes de água
Fonte: PROJETEEE, 2019

WANG, TIAN, DING, (2013), simularam uma edificação solar passiva, situada no norte da China, com um sistema de parede de armazenamento térmico com água. As paredes de água foram simuladas nas partições internas da casa, posicionadas de forma a receberem radiação solar, e tal sistema foi comparado com o método construtivo tradicional. Realizada a comparação, foram obtidos

resultados positivos quanto ao desempenho térmico da edificação, aumentando as horas de conforto térmico dos usuários e reduzindo em 8,6% o consumo energético anual para aquecimento e arrefecimento. Segundo AVILA (2018) há décadas as paredes solares são utilizadas como estratégia passiva para o aquecimento das edificações. Entretanto esta solução implica no aumento de massa e volume da construção.

AVILA (2018) desenvolveu um estudo com a introdução de uma camada de água entre uma parede dupla. Os resultados identificaram que quanto menor a espessura da parede exterior, maior a quantidade de energia térmica possível de ser absorvida pela camada de água e transferido para a camada interior.

Nos edifícios, o armazenamento de energia térmica pode ser obtido tanto por calor sensível quanto latente. Durante séculos a tecnologia passiva para armazenamento de energia era baseada no calor sensível, mas um volume muito maior de material era necessário para armazenar a mesma quantidade de energia se comparado com as estratégias de calor latente, que utilizam de materiais mais leves como os PCMs (KUZNIK, VIRGONE, 2009). Isto porque as características dos PCMs os tornam inerentemente adequados para a redução do consumo energético e emissões de CO_{2eq}. no setor das edificações (DARKWA, O'CALLAGHAN, TETLOW, 2005). Tais características restringem as flutuações de temperatura no interior do edifício e, em um cenário de aquecimento solar passivo podem aumentar a capacidade térmica dos edifícios, mantendo a sensação de conforto térmico durante um período mais prolongado (ZHANG, *et al.*, 2007). A aplicação de PCM em edificações leves tem efeito de isolamento térmico e aumenta o desempenho térmico e a capacidade de armazenamento de calor da envoltória. LONG, *et al* (2017). Além de que a carga para arrefecimento e aquecimento diminui com o decréscimo da diferença entre a temperatura de conforto e a temperatura interior (ZHANG, *et al.*, 2007). Consequentemente os equipamentos para arrefecimento e aquecimento serão de menor potência (KALNÆS, JELLE, 2015).

MARTINHO (2018) expõe que os materiais de mudança de fase são assim designados porque o princípio associado a eles é o que de quando a temperatura aumenta o material muda da fase sólida para líquida, em uma reação endotérmica, ou seja, o material retém o calor. Quando a temperatura diminui, o material libera calor solidificando-se. Esta capacidade de armazenar e liberar calor latente ocorre em faixas específicas de temperatura. A sequência de um ciclo de PCM pode ser observada na Figura 6.



Figura 6 – O ciclo de um PCM
 Fonte: BASF The chemical company, 2006

Os PCMs podem ser aplicados em diversos materiais da construção civil de diferentes formas: por meio direto, pela incorporação ou imersão; ou por meio indireto, através de encapsulação dos materiais de mudança de fase (CUI, *et al.*, 2015). Ainda são classificados em inorgânicos (sais metálicos ou hidratados), orgânicos (parafinas e não parafinas) e misturas eutéticas (mistura de dois ou mais componentes para formar cristais compostos) (COSTA, 2014).

Segundo KALNÆS e JELLE (2015) para aplicações em construção é importante que o PCM e seu sistema de encapsulação possam suportar diversos ciclos sem demonstrar sinais de degradação, para não diminuir a capacidade de armazenar calor latente e alterar a temperatura de fusão. AL-ALBI, MODH ISA, ISMAIL (2020) explicam que a camada de PCM é geralmente posicionada mais próxima à superfície interna da envolvente.

Os PCMs devem ser corretamente aplicados às condições climáticas porque esse material necessita de completa “descarga” durante um ciclo, ou seja, o material de mudança de fase deve ser completamente solidificado para que a efetividade do sistema não seja prejudicada. Este requisito torna os PCMs mais aplicáveis a sítios em que a variação diária de temperatura é maior (KALNÆS, JELLE, 2015). A correta seleção da temperatura de fusão do PCM é enfatizada pela necessidade de o material completar um ciclo para que seja mais efetiva a redução do pico de fluxo de calor. Ainda pode-se utilizar um sistema de sombreamento para evitar que o material ganhe calor durante a sua solidificação, garantindo que o ciclo de “descarga” seja completado (ARIVAZHAGAN, *et al.*, 2020).

CUI *et al* (2015) ressaltam que o correto posicionamento dos PCMs afeta o desempenho térmico do sistema, bem como as propriedades destes materiais. A dificuldade em completar um ciclo de carga e descarga está associada a baixa condutividade térmica, especialmente para os materiais orgânicos, exigindo técnicas de aprimoramento para melhorar as taxas de transferência de calor.

Os sistemas modulares leves podem ser aglomerados com diferentes PCMs para aumentar a capacidade de armazenamento de calor latente (SADINENI, MADALA, BOEHM, 2011). Ou seja, o objetivo principal de incorporar materiais de mudança de fase em sistemas modulares leves é aumentar a massa térmica deste modelo construtivo (MARTINHO, 2018). COSTA (2014) atestou em seu projeto que a aplicação de PCMs em envoltórias de inércia forte não resulta em melhoras significativas do ponto de vista do conforto térmico e não traz benefícios em relação a aplicação de um isolante térmico, tanto para a estação de aquecimento quanto para arrefecimento.

Este tipo de material é incorporado, principalmente, em paredes de gesso e betão, pela parte interior da construção, contudo melhores resultados operativos são encontrados quando os PCMs estão associados aos materiais mais porosos. Estudos de performance térmica através da aplicação de PCM, com temperatura de fusão de 27 °C, de parafina com matriz polimérica em pavimentos de concreto resultaram em atraso térmico e aumento da capacidade de armazenamento de calor (ARIVAZHAGAN, *et al.*, 2020).

Também existem estudos que aplicam PCMs em isolamentos fibrosos associados a sistemas construtivos leves de paredes de madeira. MARTINHO (2018) indica um estudo que alcançou a redução de calor na hora de pico de, aproximadamente, 21 a 37%, em condições de verão e dependendo da localidade de projeto, com adição de 30% em massa de PCM ao isolante.

A aplicação de PCMs em isolamentos do tipo espuma apresenta algumas limitações, tais como a rigidez e estrutura da espuma. As espumas de poliuretano (PU) podem ter as suas propriedades térmicas melhoradas pela aplicação, mais comumente, de MicroPCMs (MicroC18, MicroC19 e MicroC20), pois são os PCMs que apresentam melhores resultados neste tipo de isolantes (VALENTE, 2012).

Na escolha do PCM mais adequado para determinada aplicação as propriedades térmicas são as mais importantes, destacando-se, como já citado, a temperatura de fusão do material. Estudos indicam que a temperatura de fusão deve estar próxima a temperatura média de operação de um espaço, não diferindo mais de 3°C (MARTINHO, 2018). Para a construção civil a média de temperatura varia de 19 a 28°C para PCMs orgânicos e de 25 a 35°C para PCMs inorgânicos (CUI, *et al.*, 2015).

1.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo são apresentados sistemas de construção do tipo pré-fabricado, que tem por característica a fraca inércia térmica. Em consequência, estas edificações têm maiores cargas de aquecimento e arrefecimento para garantir o conforto térmico dos usuários. Os estudos referentes a este tema consideram a manutenção do conforto higrotérmico através do calor latente e sensível, empregando novos materiais e estratégias para que a eficiência energética seja

maximizada. Desta forma, este trabalho foca em relacionar a influência da inércia térmica com a obtenção do conforto térmico dos usuários pela aplicação de camadas de água na envoltória.

1.5 Contributo do Trabalho

O presente trabalho tem como principal contributo propor novas soluções que minimizem os efeitos da baixa inércia térmica em edificações do tipo modular leve baseada em blocos leves de material isolante do tipo “*Do It Yourself*”, sem que isso interfira no conceito intrínseco a este tipo de edificação. Para tal, é utilizado o programa DesignBuilder/EnergyPlus na realização das simulações computacionais do balanço energético considerando diferentes estratégias de aumento da inércia térmica, visando a eficiência energética e conforto higrotérmico dos usuários.

Tem-se como objetivos específicos:

Desenvolver o modelo computacional do módulo habitável no *software* DesignBuilder;

Propor e avaliar soluções integráveis ao conceito original sem o desvirtuar, tendo em vista mensurar o impacto da inércia térmica no conforto térmico e desempenho da edificação;

Realizar um estudo paramétrico com diferentes soluções construtivas, nomeadamente o uso da tecnologia Bag-in-Box®, para o aumento da inércia térmica com o objetivo de identificar qual a estratégia que melhor se adapta a cada tipo de utilização/clima considerados.

1.6 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado encontra-se organizada em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz a contextualização do tema proposto e a referência bibliográfica, a partir de trabalhos que abordem a temática desta pesquisa e que incluem os conceitos pertinentes ao tema e uma breve apresentação das estratégias de controlo da inércia térmica.

O segundo capítulo determina a metodologia de modelação utilizada nesta pesquisa. Descreve o modelo construtivo, desenvolvido com base no sistema modular BRICKITSMART, bem como a descrição das estratégias de otimização do modelo e materiais utilizados.

As alternativas de projeto são apresentadas no terceiro capítulo em que são descritos os critérios para a análise das simulações, os diferentes modelos analisados e apresenta-se a metodologia para a simulação computacional.

No quarto capítulo, expõem-se os resultados do estudo paramétrico, com análise da influência das estratégias de inércia térmica no desempenho energético do módulo habitacional. Na sequência são expostas as temperaturas de *setpoint* que garantem o conforto higrotérmico dos usuários.

Por fim, no quinto capítulo, a conclusão é desenvolvida e sugere-se a continuidade de estudos avaliativos sobre o tema proposto neste trabalho.

2. Metodologias de modelação e modelo de referência

2.1 Sumário

O método para o estudo de caso foi baseado na revisão bibliográfica e em resultados de estudos anteriores referente ao tema em análise, bem como na adequação dos estudos ao objetivo deste projeto. Para a análise dos resultados recorreu-se às técnicas de simulação computacional em regime transitório, utilizando o programa EnergyPlus™ através da interface gráfica do DesignBuilder.

O ponto de partida foi o desenvolvimento dos modelos de simulação que tem por objetivo a avaliação do impacto da inércia térmica da envoltória desta tipologia de edificação. Inicialmente foi projetado o modelo de referência que serviu como base para implementação das alternativas de inércia térmica. Em concordância com as propriedades térmicas e características geométricas do sistema construtivo este modelo de referência foi desenvolvido no programa DesignBuilder. Para a modelação do caso de referência foi necessário definir as propriedades dos materiais, a geometria da edificação, a localização, os dados climáticos, a rotina de ocupação, as atividades a que a edificação é destinada, as infiltrações e o método de cálculo.

Seguidamente, foram criados modelos com a mesma tipologia da edificação referência, acrescentando-se as estratégias passivas, como, por exemplo, substituindo parte do isolamento de XPS por sacos de água do tipo Bag-in-Box®.

Após a definição de todos os campos do programa DesignBuilder foi possível proceder à simulação dos modelos propostos com o intuito de determinar a influência da inércia térmica no conforto higrotérmico dos usuários e a eficiência energética da edificação.

2.2 Modelo construtivo

Os módulos habitáveis projetados para o estudo de caso deste trabalho foram baseados no sistema construtivo modular leve BRICKITSMART. Tal sistema é projetado para atender ao conceito *Do It Yourself*, aliando fácil transporte e instalação a uma edificação que possua bom desempenho térmico ao proporcionar o conforto aos usuários. Este sistema consiste em placas isolantes de XPS de alta densidade, revestimento interno e externo em placas MDF, painéis compactados de fibras de madeira, de cor clara. Para garantir a estanqueidade do módulo há guias e ligações estruturais construídas em madeira do tipo Pinho.

2.2.1 Primeira análise de modelação

Os primeiros estudos de desenvolvimento do módulo habitacional com o sistema construtivo BRICKITSMART consideraram a versão antiga do sistema. Em

que o revestimento interno era constituído por placas de OSB, painéis de fibra de madeira compactados, e acabamento externo em placas fenólicas HPL, que garantiam a estanqueidade do módulo. As guias estruturais eram construídas em madeira do tipo Pinho.

A tipologia do estudo preliminar, demonstrada na Figura 7, tem as dimensões internas de 5,0 x 5,0 x 2,5 m, vão de porta de 2,0 x 1,0 m e três janelas de 1,0 x 1,0 m. A mesma espessura de isolamento e propriedades dos vidros das aberturas foram inicialmente consideradas para os climas de Lisboa e Helsínquia. Ainda, o sistema de AVAC havia sido definido como único para ambos os climas.

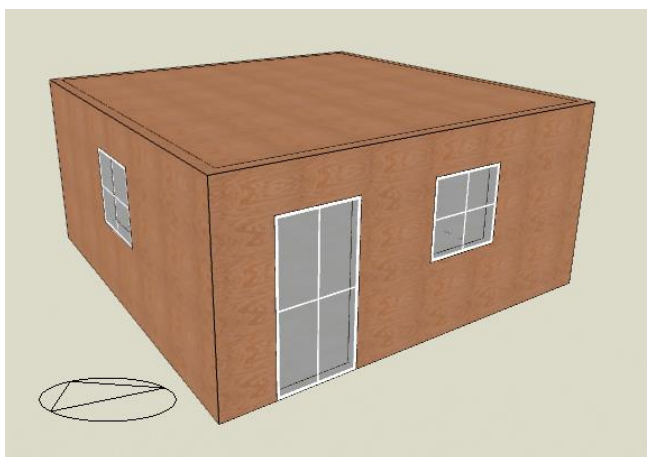


Figura 7 – Tipologia do estudo preliminar

Inicialmente foram consideradas as propriedades de materiais do banco de dados do DesignBuilder para a definição das camadas da envoltória e fenestração de vidro duplo. Havia sido consideradas dois perfis de atividades, escritório e ginásio, já previstos nos *templates* do software. Este modelo construtivo foi desenvolvido com a proposta de ser uma edificação anexa à uma principal, desta forma não é considerada como edificação de uso permanente. Foi projetado o uso da edificação com o perfil de utilização, independente da atividade realizada, em dois horários distintos.

Neste estudo preliminar se percebeu que havia necessidade de ajustar a proporcionalidade de isolamento para cada localização, isto é, se identificou que deveria ser ajustado o número de blocos, aumento da espessura total, para a envoltória de Helsínquia e alterar as propriedades dos envidraçados conforme o cálculo de proporcionalidade de isolamento entre os dois climas.

Adicionalmente foi adaptado o sistema de AVAC de Lisboa para a realidade climática de Helsínquia. A bomba de calor utilizada para Lisboa não era adequada ao clima de frio extremo, portanto, para Helsínquia, foi selecionada uma bomba de calor geotérmica.

2.2.2 Modelo construtivo final

No decorrer dos estudos preliminares desta dissertação de mestrado o modelo construtivo BRICKITSMART foi aprimorado para a atual versão. Por isso, foram alteradas a tipologia da edificação e os materiais constituintes para que o modelo simulado no DesignBuilder tenha as mesmas propriedades térmicas do bloco atual. A Figura 8 ilustra um modelo 3D do bloco usado no sistema BRICKITSMART.

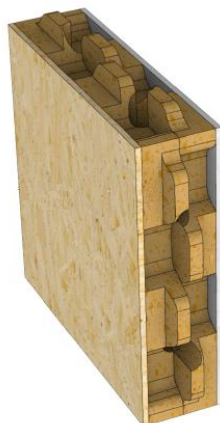


Figura 8 – Bloco BRICKITSMART

O modelo de referência é composto por um único andar, pois não é previsto a sobreposição vertical deste sistema construtivo. Cada bloco possui 560 x 560 x 136 mm com o sistema de encaixe, sendo 500 x 500 mm de vão útil, ou seja, as dimensões da edificação devem ser consideradas como múltiplos de 500 mm. A espessura da envoltória é de 136 mm, entretanto pode ser aumentada, se desejado, procedendo a montagem dos blocos em sequência.

O tamanho dos blocos também limita a dimensão dos vãos de portas e janelas que devem ser múltiplas das medidas dos blocos. O mesmo bloco é utilizado para a construção das paredes, pavimento e cobertura, que deve ser do tipo plana. Portanto, o sistema construtivo permite que sejam construídos módulos com formato limitado ao paralelepípedo. Tais módulos habitáveis podem ser conectados entre si para formar uma edificação de maior área.

O projeto do modelo de referência respeita as características geométricas permitidas pelo sistema construtivo. O dimensionamento da edificação foi considerado com base no modelo em escala real a ser construído na Universidade de Aveiro para futuros estudos de comportamento térmico do sistema construtivo. A tipologia a ser estudada neste trabalho tem as dimensões internas de 3,0 x 3,0 x 2,5 m, vão de porta com 2,5 x 1,0 m e vão de janela de 1,0 x 1,0 m. O módulo não assenta diretamente sobre o solo, pois foi necessário considerar um desvão de 10 cm entre o pavimento e o solo para a instalação sanitária.

Por conseguinte, o modelo de referência para este estudo de caso adotará esta tipologia para as análises tanto em Lisboa quanto em Helsínquia, a alterar a proporcionalidade do isolamento para as duas situações bioclimáticas. Pelas dimensões e função a que o sistema construtivo é destinado, não são consideradas repartições internas na edificação.

Para ajustar a proporcionalidade do isolamento de Helsínquia em relação ao módulo a ser construído na Universidade de Aveiro foi igualado o fluxo de calor de Lisboa e Helsínquia, conforme as Equações 1 e 2.

$$\text{Fluxo de calor} = \frac{(T_{int} - \bar{T}_{ext})}{R_t} \quad \text{Equação 1}$$

$$\left(\frac{T_{int} - \bar{T}_{ext}}{R_t}\right)_{LISBOA} = \left(\frac{T_{int} - \bar{T}_{ext}}{R_t}\right)_{HELSÍNQUIA} \quad \text{Equação 2}$$

A temperatura interior (T_{int}) deve ser a temperatura de conforto para o período de aquecimento, definido como 20°C para ambas as cidades no estudo da proporcionalidade. A temperatura média exterior (\bar{T}_{ext}) representa a média das temperaturas no período de aquecimento, calculada a partir dos dados das Tabelas 2 e 3. O valor da resistência térmica (R_t) não foi atribuído para que pudesse ser o parâmetro a identificar o aumento da espessura da envoltória, conforme resultado da Equação 2.

$$\left(\frac{T_{int} - \bar{T}_{ext}}{R_t}\right)_{LISBOA} = \left(\frac{T_{int} - \bar{T}_{ext}}{R_t}\right)_{HELSÍNQUIA}$$

$$\frac{20 - 11,49}{R_{tL}} = \frac{20 - (-0,75)}{R_{tH}}$$

$$\frac{8,51}{R_{tL}} = \frac{20,75}{R_{tH}}$$

$$R_{tH} = 2,43R_{tL}$$

O resultado da proporcionalidade indica que se deve aumentar a espessura em 2,43 vezes. Como o aumento é conseguido sobrepondo blocos inteiros será simulada uma edificação com sobreposição de três blocos, portanto a espessura final da envoltória em Helsínquia será de 408 mm. Salienta-se que a envoltória envidraçada também deve ser ajustada ao bioclima local. Este ajuste será feito pela seleção de um vidro com maior resistência térmica, sem alterar a dimensão dos vãos de porta e janela.

Aberturas:

A edificação projetada para este estudo prevê a instalação de uma porta na fachada Sul e de uma janela a Oeste. As aberturas da edificação, porta e janela, terão a mesma composição de materiais. Os vidros são duplos e incolores com as características do Saint-Gobain Glass (SGG) ClimaPlus 4S. Com intuito de ajustar as propriedades térmicas das aberturas para a situação de Helsínquia foi selecionado o vidro de isolamento térmico reforçado SGG PLANITHERM® XN do mesmo fabricante do vidro de Lisboa. As propriedades térmicas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades térmicas dos vidros

	Lisboa	Helsínquia
Transmissão luminosa [%]	71	74
Factor solar [%]	42	56
Coeficiente de transmissão térmica (U) [W/(m ² ·K)]	1,1	0,5

Fonte: Saint-Gobain, 2020

A caixilharia para as aberturas é de madeira e sem quadrículas. O sistema de proteção solar é assegurado pela instalação de um estore em rolo de cor clara pelo interior das aberturas. O sistema de sombreamento controla os ganhos solares e é programado para fechar quando a temperatura interior da edificação exceder os 22°C durante o período ocupado.

Orientação geográfica:

O alçado principal é orientado a Sul, para maior aproveitamento dos ganhos solares pelos vãos envidraçados. A Figura 9 ilustra a orientação da edificação e posicionamento das aberturas.

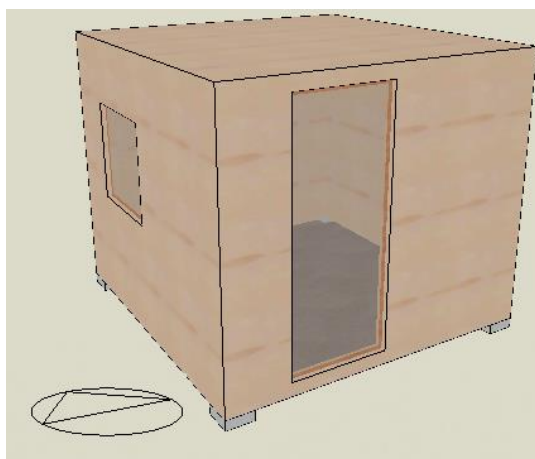


Figura 9 – Orientação solar do modelo de referência

Envolvente:

O mesmo bloco é utilizado para a construção das paredes, cobertura e pavimento. O módulo é composto por três camadas, conforme ilustra a Figura 10, que não está em escala. Em Lisboa a envoltória é composta por apenas um bloco.

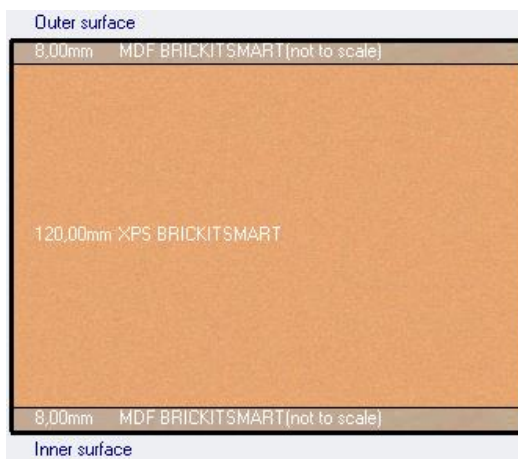


Figura 10 – Camadas do sistema construtivo BRICKITSMART

Já para a edificação em Helsínquia serão utilizados três blocos sobrepostos, ilustrado na Figura 11. A envoltória é composta por nove camadas, em que a placa de MDF de um bloco é acoplada ao módulo seguinte.

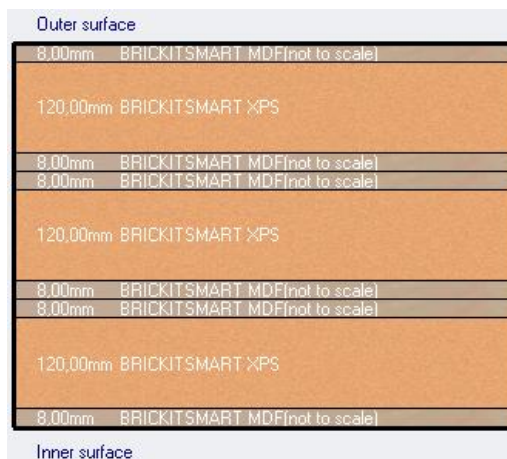


Figura 11 – Camadas da envoltória em Helsínquia

O bloco do modelo construtivo BRICKITSMART é composto por revestimento externo e interno de 8 mm em MDF de cor clara no interior e exterior e por uma camada de 120 mm de isolante de alta densidade do tipo XPS, totalizando 136 mm de espessura.

No input do DesignBuilder é possível a definição das propriedades de cada material, portanto foram inseridos os parâmetros do MDF de alta densidade Compact Plus e do XPS de alta densidade Topox SL, conforme dados da Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades térmicas do MDF e XPS

	MDF	XPS
Condutividade térmica (W/m·K)	0,19	0,037
Calor específico (J/kg·K)	1700	1400
Densidade (kg/m ³)	1100	35

Fonte: SOMAPIL, 2020; MACROFAL, 2020

A inércia térmica, objeto de avaliação neste projeto, está associada com os elementos construtivos da edificação, neste módulo habitacional referem-se a envolvente da edificação. A quantificação da inércia térmica (I_t) pode ser definida pela aplicação da Equação 3 presente no Diário da República, Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013.

$$I_t = \frac{\sum_i \cdot M_{S_i} \cdot r \cdot S_i}{A_p} \quad \text{Equação 3}$$

A massa superficial útil (M_{S_i}) altera-se de acordo com o posicionamento do elemento construtivo na edificação. O edifício em estudo tem todos os elementos distinguidos como envolvente exterior. O fator de redução da massa superficial (r) relaciona-se com a resistência térmica do revestimento superficial interior. A inércia térmica também depende da área da superfície interior do elemento (S_i) e da área útil do pavimento (A_p).

O resultado da Equação 3 permite classificar a inércia térmica de acordo com a Tabela 6 em fraca, média ou forte.

Tabela 6 – Classe de inércia térmica

Classe de inércia	$I_t \left(\frac{kg}{m^2} \right)$
Fraca	$I_t < 150$
Média	$150 \leq I_t \leq 400$
Forte	$I_t > 400$

Fonte: Diário da República, Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013

O módulo de referência deste projeto tem a massa superficial útil de 8,8 kg/m² e fator de redução de 1,0 que são definidos de acordo com a norma e propriedades térmicas do MDF. Para o cálculo da área da superfície interior deve-se subtrair a área das fenestrações, quando houver.

$$I_t = \frac{(8,8 \cdot 1,0 \cdot 27) + (8,8 \cdot 1,0 \cdot 9) + (8,8 \cdot 1,0 \cdot 9)}{9}$$

$$I_t = 44 \frac{kg}{m^2}$$

O resultado da equação 3 demonstra que a inércia térmica do módulo habitacional em estudo é de 44 kg/m², portanto o edifício é classificado com inércia térmica fraca.

Perfil de utilização:

As definições de parâmetros de utilização influenciam no balanço energético da edificação a nível de ganhos internos. O sistema construtivo BRICKITSMART é projetado para atender a diversas finalidades, portanto serão estudadas três opções de utilização do módulo. Tais atividades serão simuladas com a mesma tipologia. Importa destacar que as atividades selecionadas se distinguem quanto às cargas térmicas interiores. Assim, são realizadas as análises para as situações de Escritório, Dormitório universitário e Ginásio. Correspondendo, respetivamente, a uma taxa metabólica média, baixa e alta.

É previsto a utilização do módulo por 2 ocupantes, resultando em uma taxa de ocupação na edificação de 0,2222 ocupantes/m², para os cálculos no DesignBuilder. A iluminação será de LED com controlo linear/off para garantir iluminância de 350 lux a uma distância de 750 mm do piso com controlo automático para desligar quando a iluminação natural assegurar a iluminância desejada no plano de trabalho, durante os períodos ocupados. Quando não há ocupação a iluminação permanece sempre desligada.

Foram definidos dois perfis de ocupação para cada atividade: estendido e reduzido, conforme horários listados na Tabela 7. O conceito deste sistema construtivo é de utilização anexa à uma edificação existente ou esporádica. Desta forma, para o escritório e ginásio, de perfil horário estendido, se pode considerar destinados à *home office*. Enquanto o perfil reduzido se refere a um horário pós-laboral. O terceiro perfil, dormitório universitário, considera horários típicos da vida académica de estudantes universitários. O horário estendido retrata um dia em que o estudante sai pela manhã para as aulas e retorna ao dormitório no final da tarde. E o perfil reduzido reflete o horário noturno característico.

Tabela 7 – Perfil de ocupação

Atividade	Perfil de ocupação	Horário
Escritório	Estendido	09:00 - 18:00
	Reduzido	20:00 - 24:00
Ginásio	Estendido	08:00 - 22:00
	Reduzido	20:00 - 24:00
Dormitório	Estendido	16:00 - 09:00
	Reduzido	20:00 - 08:00

Para cada perfil foi necessário alterar o cronograma de aquecimento e arrefecimento conforme o perfil de ocupação. Adicionalmente definiu-se que o sistema de AVAC se liga apenas quando há ocupação na edificação.

Cada atividade representa uma taxa metabólica que determina a quantidade de ganho de calor por ocupante da edificação. Para além disso, é associado, para cada atividade, um índice de vestuário (clo) para o inverno e verão. Tais valores são extraídos do DESIGNBUILDER (2020) que utiliza tabelas com valores para cada tipo de vestuário. Para a estação de aquecimento no Escritório, ambos os horários, e Dormitório universitário estendido foi definido o valor típico de vestuário para o inverno. Já para o Dormitório universitário de horário reduzido, em perfil de utilização noturno, foi considerado um vestuário mais pesado. Para o Ginásio foi calculado a soma de vestuários típicos desta atividade no inverno. Na estação de arrefecimento foi calculada a soma dos vestuários para o Escritório e Dormitório universitário, enquanto para o Ginásio foi definido um vestuário leve para o verão. Os valores para o índice de vestuário são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Taxa metabólica e índice de vestuário de cada atividade

Atividade	Perfil de ocupação	Taxa metabólica [W/pessoa]	Clo inverno	Clo verão
Escritório	Estendido, Reduzido	123	1,0	0,5
Ginásio	Estendido, Reduzido	300	0,6	0,3
Dormitório	Estendido	100	1,5	1,0
	Reduzido	81	2,0	1,5

Também foram considerados os equipamentos utilizados em cada atividade. Para tal é necessário calcular a densidade de potência associada aos equipamentos, demonstrado na Tabela 9. No Escritório foi definido que os dois ocupantes estariam a utilizar um computador portátil cada, com 90 W, e uma impressora de 45 W (EFLUL, 2020). Para o Dormitório universitário foi definido que os ocupantes não estariam a utilizar o computador portátil simultaneamente, mas poderiam estar a carregar dois telemóveis de 6,5 W cada. No período reduzido do Dormitório universitário foi considerado apenas o carregamento de dois telemóveis. No Ginásio foi considerado como aparelho eletrónico apenas a aparelhagem de som com 40 W (YAMAHA, 2020).

Tabela 9 – Densidade de potência

Atividade	Perfil de ocupação	Densidade de potência [W/m ²]
Escritório	Estendido, Reduzido	25,00
Ginásio	Estendido, Reduzido	4,44
Dormitório	Estendido	11,44
	Reduzido	1,44

Conforme ilustra o exemplo da Figura 12 os dados referentes ao perfil de utilização são inseridos em *Model Data* (Dados do modelo) na aba de *Activity* (Atividade). É de se destacar que os mesmos parâmetros da edificação e perfil de utilização serão adotados para as cidades de Lisboa e Helsínquia, com exceção da proporcionalidade do isolamento e ativação do sistema de AVAC.

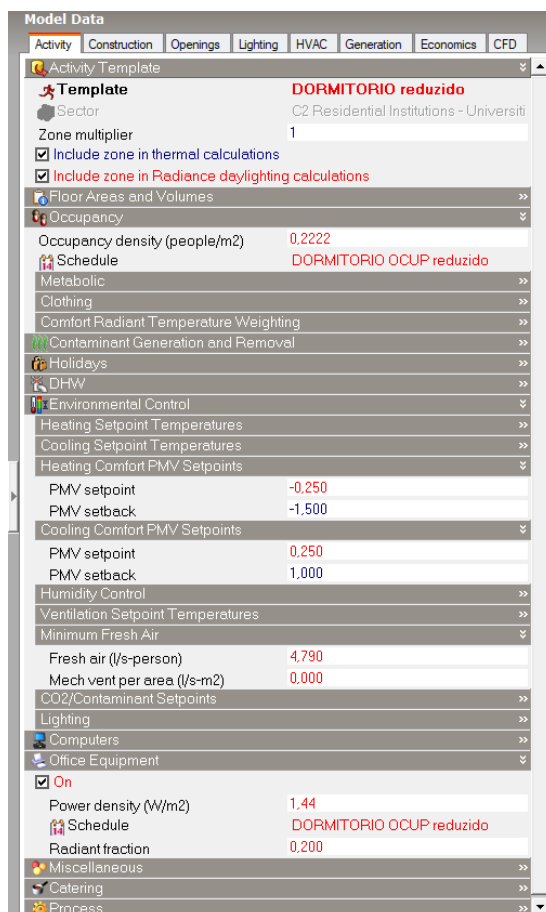


Figura 12 – Perfil de utilização

Sistema de AVAC:

Para a avaliação da influência da inércia térmica do sistema construtivo BRICKITSMART foram adotados sistemas passivos na envoltória da edificação, entretanto para que seja garantido o conforto térmico dos usuários foi necessário prever um sistema de climatização ativa. O sistema de AVAC do módulo habitacional foi definido de acordo com os padrões do programa DesignBuilder, que calcula as necessidades de arrefecimento e aquecimento do módulo habitacional. E foi necessário modificar algumas características para minimizar a influência deste sistema ativo de climatização nos resultados do projeto. Para assegurar que toda a carga elétrica seja convertida em carga térmica adotou-se o valor de 1,0 para o coeficiente de performance (COP) de arrefecimento e aquecimento. Este valor de COP foi definido tanto para o sistema de climatização de Lisboa quanto para o de Helsínquia.

O coeficiente de performance expressa a eficiência energética de um sistema. O valor do COP é obtido pelo rácio entre o calor fornecido ou removido pelo sistema e o trabalho exigido pelo sistema, portanto o COP igual a 1,0 corresponde a uma situação em que 1 kW de eletricidade é convertido em 1 kW térmico (DESIGNING BUILDINGS, 2016).

A fim de garantir um caudal mínimo de 20 m³/h/ocupante/met foi previsto um sistema de ventilação mecânica. No software DesignBuilder é possível a definição do valor do caudal de ar novo em l/s por pessoa. Conforme expõe o DESIGNBUILDER (2020) deve-se selecionar a opção do fluxo de ar infiltrado, esta opção define que o caudal inserido no *software* é multiplicado pelo número de ocupantes. Entretanto, não há opção que calcule o fluxo de ar em função da taxa metabólica. A Tabela 10 apresenta os valores dos caudais de ar novo a serem inseridos no modelo de acordo com a taxa metabólica de cada atividade e perfil de ocupação.

Tabela 10 – Valores do caudal de ar novo

Atividade	Perfil de ocupação	Caudal de ar novo [(l/s/pessoa)·met]
Escritório	Estendido, Reduzido	7,27
Ginásio	Estendido, Reduzido	17,74
Dormitório	Estendido	5,91
	Reduzido	4,79

Adicionalmente foi definido que o sistema de AVAC será controlado de modo a garantir que o PMV esteja dentro do intervalo de -0,25 e +0,25. Se destaca que o sistema não será controlado pelo *setpoint* de temperatura. Para que o sistema opere desta forma é necessário definir um sistema de AVAC detalhado e a opção de cálculo para aquecimento e arrefecimento do modelo de Conforto de Fanger (*4-Fanger Comfort*). Ainda deve-se definir os *setpoints* de conforto de PMV para a situação de aquecimento (-0,25) e arrefecimento (+0,25) na aba de *activity*. Os valores de índice de PMV definidos são mais rigorosos do que os requisitos de conforto térmico da ISO 7730:2005, apresentados pelo suporte do DesignBuilder (2020), nos limites de -0,50 e +0,50.

2.3 Alternativas de otimização

A partir dos estudos analisados no capítulo anterior, referente à aplicação de água para aumento da inércia térmica da edificação, foram desenvolvidas as alternativas ao modelo de referência para análise da influência desta estratégia passiva para o conforto higrotérmico dos usuários. As mesmas estratégias serão adotadas para ambos os bioclimas em estudo.

2.3.1 Materiais utilizados e propriedades

O armazenamento da camada de água no modelo construtivo modular proposto é baseado na tecnologia Smurfit Kappa Bag-in-Box®. Tal sistema é uma bolsa flexível de fechamento hermético para garantir a total estanqueidade do líquido dentro dela. Existem no mercado uma ampla variedade dessas bolsas, com diversas capacidades, fechamento, formatos e películas. As camadas dos sacos podem ser metálicas ou transparentes, conforme ilustra a Figura 13. Os sacos podem ter múltiplas capas de EVOH (*Ethylene vinyl alcohol*), PET MET (*Metalized Polyester*), PE (*Polyethylene*) e Nylon, sendo fabricadas de acordo com o produto a ser acondicionado (SMURFIT KAPPA, 2020).



Figura 13 – Sacos Bag-in-Box®
Fonte: Smurfit Kappa, 2020

A escolha deste sistema de armazenamento de água é devido a possibilidade de os sacos serem cheios após a instalação dos blocos. Desta forma, não há o acréscimo do peso da água aos blocos do modelo, mantendo-se a leveza do material durante a construção do módulo habitacional. Os sacos Bag-in-Box® serão posicionados na parte mais interna da envoltória, portanto entre a camada de XPS e de MDF.

2.4 Síntese do capítulo

A edificação projetada em sistema modular leve deve atender às exigências de eficiência energética e respeitar o conforto térmico dos usuários em simultâneo. Para tal o desenvolvimento do modelo de referência considerou o módulo habitacional em escala real a ser construído na Universidade de Aveiro e as características dos materiais projetados para estes módulos.

A metodologia para o desenvolvimento do modelo de referência e das alternativas para o aumento da eficiência energética considera uma nova proposta do uso de sacos Bag-in-Box® preenchidos de água para minimizar o efeito da inércia térmica fraca.

3. Caso de estudo

3.1 Sumário

Este capítulo apresenta as alternativas de projeto a serem analisadas com intuito de se verificar a influência da inércia térmica do sistema construtivo. A partir do modelo habitacional de referência e das alternativas propostas foi desenvolvida uma nomenclatura que servirá de guia para identificação dos modelos na apresentação dos resultados.

É exposta a metodologia do projeto com ilustrações dos modelos construtivos, identificação dos parâmetros a serem modificados e apresentação dos dados de saída do programa.

3.2 Critérios para análise

Quanto maior for o resultado das necessidades de aquecimento, mais fria será a edificação na estação de aquecimento, o contrário se aplica para a estação de arrefecimento, isto é, haverá maior consumo energético para atingir a temperatura de conforto (COELHO, 2011). Tendo isto posto, foi definido o método de simulação anual que utiliza dados climáticos típicos da região selecionada para o estudo. Os resultados das simulações são apresentados em forma gráfica e em tabelas que podem ser exportadas para outras extensões tais como .xlsx.

As necessidades energéticas foram comparadas quanto ao consumo energético necessário para o aquecimento e arrefecimento da edificação no período de um ano. A análise do conforto higrotérmico dos usuários é baseada no índice PMV nos limites de -0,25 a +0,25, respetivamente nos períodos de aquecimento e arrefecimento. Para que a edificação seja aquecida ou resfriada de acordo com os *setpoints* de PMV definidos no programa é selecionada a opção de sistema de AVAC detalhado. Desta forma foi analisada a temperatura do ar interior necessária para que o conforto dos usuários estivesse dentro do limite estabelecido.

Os parâmetros analisados estão de acordo com os apresentados na nomenclatura desenvolvida para este estudo, exposta na Figura 16, em que são comparadas alternativas passivas a fim de identificar o impacto da inércia térmica ao sistema construtivo.

3.3 Modelos para análise

A edificação referência foi modelada no programa DesignBuilder V6.1.7.007, e, a partir desta, foram adotadas diferentes combinações de soluções na envoltória para minimizar o efeito da fraca inércia térmica com a implementação das

Bag-in-Box®. Ressalta-se que as mesmas alternativas passivas para a envoltória foram adotadas para as cidades de Lisboa e Helsínquia.

A envoltória da edificação em Lisboa, com a implementação das Bag-in-Box® tem quatro camadas, ilustradas na Figura 14, mantendo o revestimento externo e interno tal como o modelo de referência. A espessura de XPS foi reduzida de acordo com a espessura relativa de água das diferentes dimensões dos sacos de água.



Figura 14 – Camadas do Sistema construtivo com água em Lisboa

A Figura 15 demonstra as 10 camadas da envoltória em Helsínquia com a implementação das Bag-in-Box®. As mesmas espessuras de água utilizadas em Lisboa foram aplicadas em Helsínquia.

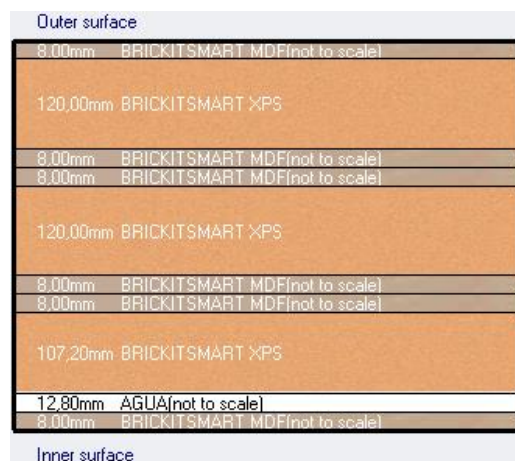


Figura 15 – Camadas do Sistema construtivo com água em Helsínquia

Foi desenvolvida uma nomenclatura a fim de identificar as diferentes modelagens utilizadas nas simulações, visto que há combinações entre localização, atividade tipo, perfil de ocupação, posição dos sacos de água e dimensão das Bag-in-Box® (espessura relativa da camada de água). A

nomenclatura desenvolvida atribui letras ou números para cada variável, na sequência da esquerda para a direita no esquema apresentado na Figura 16.

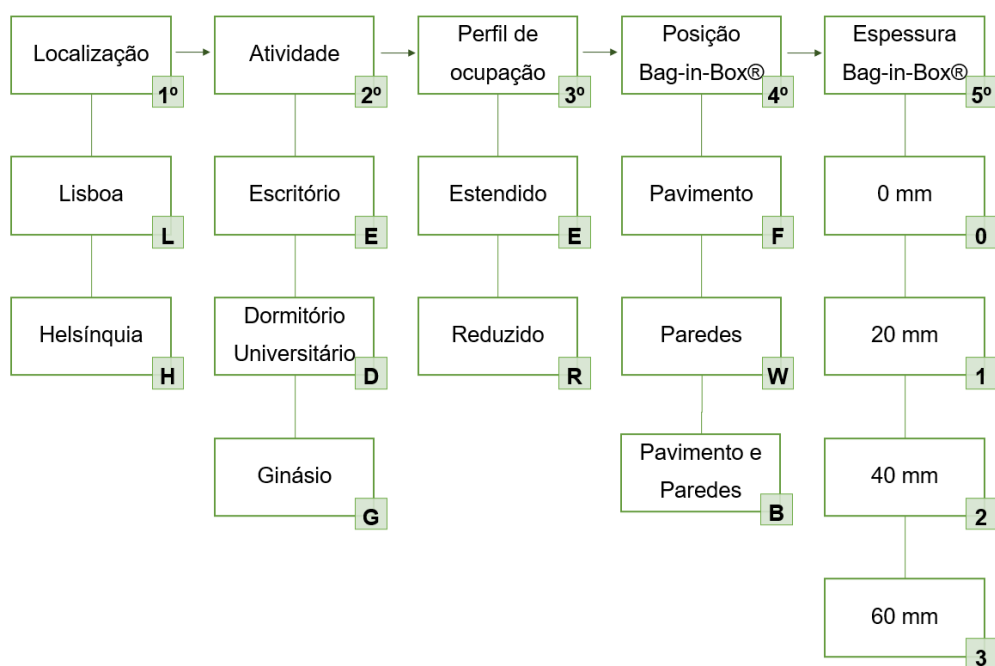


Figura 16 – Esquema da nomenclatura dos modelos

Por exemplo, para a edificação sem utilização das bolsas de água, situada em Lisboa, destinada a Escritório com ocupação estendida a nomenclatura é LEEB0. E a nomenclatura para a edificação em Helsínquia, com a mesma atividade e ocupação é HEEB0. Já para uma modelagem de Helsínquia, Ginásio de ocupação reduzida com Bag-in-Box® de 60 mm na parede a nomenclatura é HGRW3. Destaca-se que serão analisadas um total de 12 combinações sem inserção de elemento inercial. E, para cada um destes modelos, nove combinações de espessura e posição de Bag-in-Box®, totalizando 120 cenários.

Devido ao formato dos módulos BRICKITSMART e o modelo estrutural proposto, as bolsas de água devem ter um espaçamento entre si. A instalação das bolsas é ilustrada na Figura 17, em que é possível observar a instalação de uma única Bag-in-Box® em cada placa do sistema construtivo. O bloco tem dimensão de 500 x 500 mm, portanto os sacos de água devem ter 400 x 400 mm, tanto nas paredes quanto no pavimento.

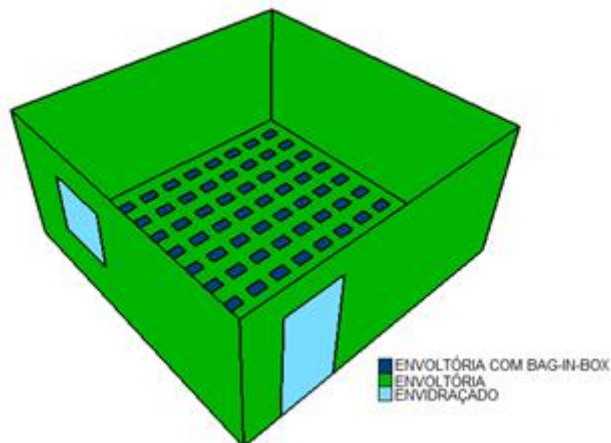


Figura 17 – Exemplo ilustrativo das Bag-in-Box® no pavimento

Para a simulação dos modelos habitacionais foi utilizada uma camada de água equivalente ao volume das Bag-in-Box® no pavimento e nas paredes. Por exemplo, para a instalação de bolsas de água de 0,060 m de espessura a camada de água correspondente é de 0,0384 m dado que são instaladas Bag-in-Box® com dimensão de 0,4 x 0,4 m, resultando em um volume de água de 0,3456 m³ distribuídos em 9 m² de pavimento, ou seja, uma camada de água de 0,0384 m.

3.4 Metodologia do projeto

A modelação da edificação sem elemento de inércia considerou as propriedades físicas e limitações espaciais do sistema construtivo BRICKITSMART, assim, desenvolveu-se uma edificação modelo a ser utilizada nos climas de Lisboa e Helsínquia. Tal edificação considera as características originais do sistema, sem aplicação de qualquer alternativa passiva para a eficiência energética do modelo. Inicialmente se considerou que o sistema de AVAC tem o mesmo horário de funcionamento da ocupação da edificação.

A Figura 18 ilustra o ecrã do programa DesignBuilder na área em que é possível a alteração dos materiais construtivos do modelo a ser projetado. Visualiza-se também as abas para definição das demais características do sistema, tais como a atividade e o sistema de AVAC, que são necessárias para que as análises do projeto possam ser desenvolvidas.

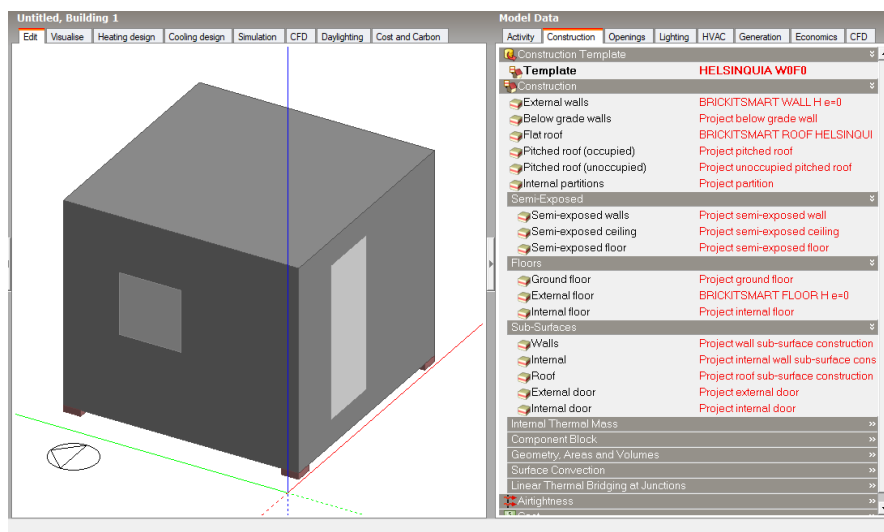


Figura 18 – Ecrã do DesignBuilder

3.4.1 Ajusta do sistema de climatizaço

Para avaliar se os modelos sem o elemento de inércia garantem o conforto térmico dentro dos limites estabelecidos nas horas de ocupaço foram realizadas as simulaço anuais apenas para os períodos ocupados. Este estudo identificou que seria necessária uma ajusta do sistema de AVAC para garantir o conforto dos usuários quando a edificaço comea a ser ocupada, pois havia um atraso entre a garantia do conforto térmico e o início da ocupaço. Desta forma procedeu-se com o afinamento do sistema de climatizaço para estudar qual a melhor soluço que garanta o conforto térmico.

Foram realizadas análises a nível horário para duas alternativas do sistema de climatizaço. Avaliou-se o efeito da utilizaço da pré-climatizaço e de *setback* ativo. A primeira alternativa determina que o sistema de AVAC será acionado algum tempo antes do período de ocupaço. Enquanto definir um valor de *setback* implica que o controlo do índice PMV será por um valor mais amplo, isto é, fora dos limites de 0,25 e -0,25 durante todas as horas em que não há ocupaço.

O estudo do *setback* considerou três combinaço para aquecimento e arrefecimento. A Tabela 11 apresenta os valores de *setback* simulados para cada localizaço e estaço de aquecimento e arrefecimento. Os valores são diferentes para cada bioclima, pois as necessidades de climatizaço são muito diferentes.

Tabela 11 – Estudo do *setback*

Localizaço	Helsínquia		Lisboa	
	Aquecimento	Arrefecimento	Aquecimento	Arrefecimento
1º combinaço	-1,5	1,0	-1,0	1,5
2º combinaço	-1,0	1,5	-1,5	1,0
3º combinaço	-0,8	1,5	-1,5	0,8

O resultado de cada simulação foi comparado quanto ao consumo energético total e o índice PMV dentro dos limites esperados. Em Helsínquia, todos os modelos garantiam o conforto em uma das três combinações de *setback*, a exceção do modelo HGRB0 que necessitou de um valor de *setback* mais próximo ao *setpoint*, em -0,40 para aquecimento e 0,40 para arrefecimento. Já para Lisboa dois modelos, LERB0 e LGRB0, não obtiveram o conforto nos limites estabelecidos. Entretanto não foram analisadas outras combinações de *setback*.

Após esta avaliação os valores dos consumos energéticos foram comparados com os resultados de pré-climatização. Analisaram-se a ativação do sistema de AVAC uma ou duas horas antes do período de ocupação.

O estudo de pré-climatização demonstrou que todos os modelos, a exceção do HGRB0, para Helsínquia, têm conforto térmico garantido a níveis de PMV com uma hora de pré-climatização. A pré-climatização de Lisboa obteve resultado semelhante ao de Helsínquia, todos os modelos garantem conforto térmico com uma hora de ativação do sistema de climatização antes do início da ocupação. Apenas o modelo LEEB0 não garantiu o conforto com o AVAC a ser ligado uma hora antes do período de ocupação.

A afinação do sistema de AVAC validou a pré-climatização como melhor alternativa de climatização para os 12 modelos iniciais, sem elemento de inércia. Por conseguinte, os modelos serão simulados com a ativação do sistema de aquecimento e arrefecimento uma hora antes de iniciar a ocupação. Há dois modelos, um para cada situação bioclimática, que terão valores diferentes para a pré-climatização. O modelo HGRB0 deve ser climatizado oito horas antes da ocupação enquanto o modelo LEEB0 será climatizado duas horas antes.

Os resultados dos estudos preliminares estão calculados com o método de cálculo Função de Transferência por Condução (CTF), entretanto foi necessário alterar o método de cálculo para Diferenças Finitas (FD) para fins de comparação com outros estudos de eficiência energética do sistema construtivo BRICKITSMART que estão a ser desenvolvidos em paralelo a esta dissertação. Para além disso é importante realçar que ambos os métodos são amplamente utilizados em simulações de desempenho de edifícios. De acordo com MAZZARELLA e PASINI (2015) o método CTF é mais utilizado, em modelações de sistemas lineares, por ser simulado mais rapidamente que o método de diferenças finitas. Entretanto destaca-se que o método FD é mais preciso que o CTF em intervalos de tempo mais curtos.

3.4.2 Validação do limite do índice de PMV

A análise de adequação do PMV ao limite estabelecido baseou-se em simulações anuais para as horas de ocupação, visto que o conforto térmico é assegurado apenas neste período. Para garantir que o PMV se mantém dentro do

intervalo pré-determinado foi verificado o resultado horário para cada dia do ano. A Figura 19 ilustra o resultado da simulação para o modelo LERB0 em que as médias horárias do índice PMV estão dentro do intervalo de -0,25 e 0,25. Ainda se verificam as temperaturas exteriores (*Outside Dry-Bulb*) e temperatura do ar interior (*air temperature*) que assegura a sensação de conforto higrotérmico dos usuários.

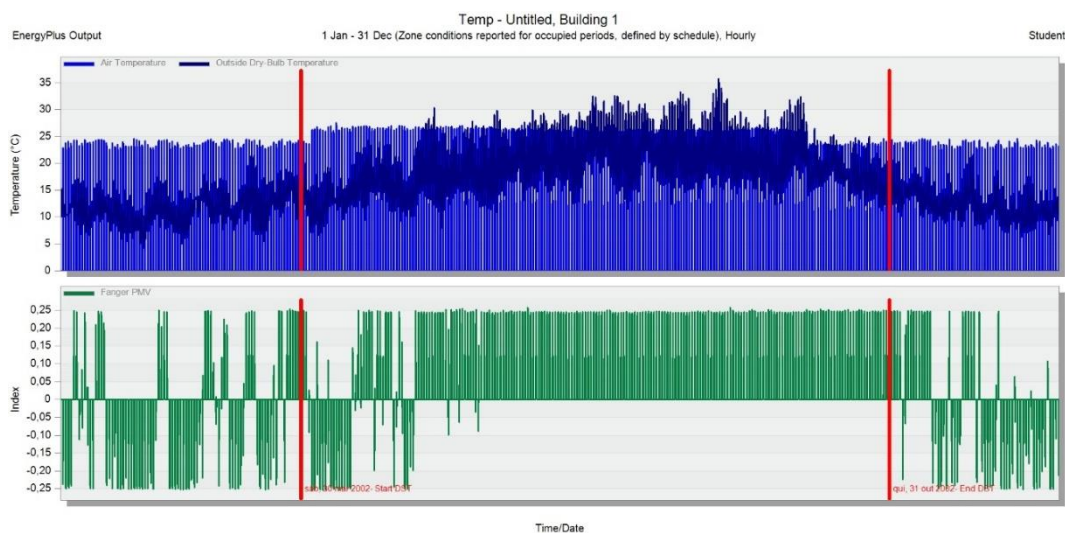


Figura 19 – Índice PMV horário para LERB0

A análise do PMV nos limites estabelecidos também foi realizada para os casos de maior inércia térmica. O resultado horário anual do modelo LERB3 é apresentado na Figura 20.

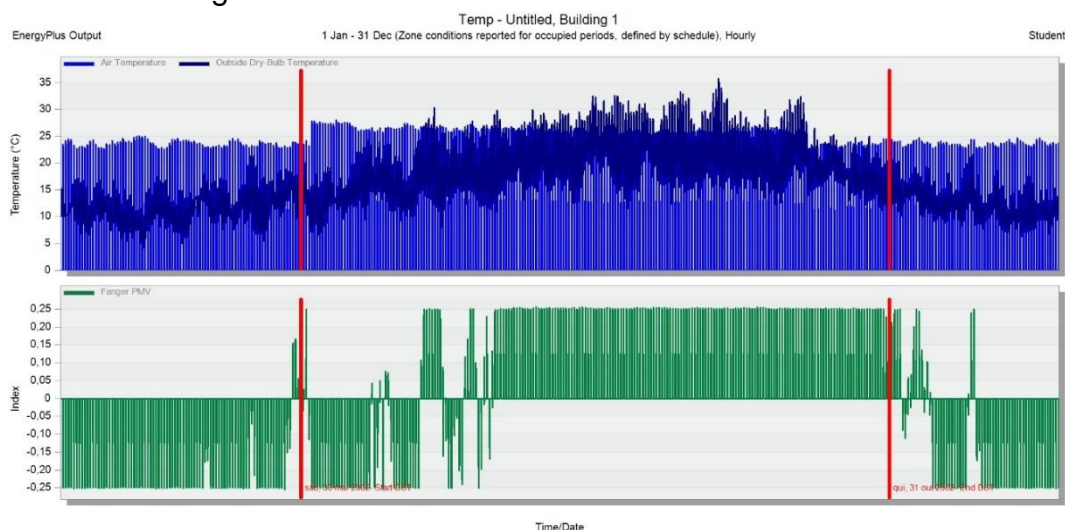


Figura 20 – Índice PMV horário para LERB3

Salienta-se que quando a variação da temperatura externa é de, aproximadamente, 1,5 graus em menos de uma hora o sistema de AVAC não

mantém o PMV no intervalo de -0,25 e 0,25. Isto ocorre mesmo nos modelos com maior volume de água, porque o módulo habitacional ainda é um edifício de inércia térmica baixa, com rápida resposta às condições ambientais externas.

3.4.3 Temperatura de conforto

A sensação de conforto térmico pelo índice de PMV no intervalo de -0,25 e 0,25 é atingida em função de temperaturas variáveis. Contudo os equipamentos de medição atuais são capazes de medir a temperatura, mas não o índice de PMV.

Posto isto posto, foi analisado como *output* a temperatura do ar interior necessária para garantir o conforto dos usuários. Esta temperatura seria o *setpoint* em uma simulação em que o sistema de climatização é controlado por temperatura.

3.5 Síntese do capítulo

Os critérios de análise dos dados de saída do programa consideram as necessidades de aquecimento e arrefecimento de cada alternativa a fim de realizar a comparação dos resultados e identificar a influência da inércia térmica neste tipo de sistema construtivo. Para tal foi necessário o desenvolvimento de uma nomenclatura para identificação dos modelos e metodologia de projeto a ser desenvolvido no DesignBuilder.

4. Análise e discussão dos resultados

4.1 Sumário

Neste capítulo expõem-se os resultados das simulações dinâmicas com diferentes estratégias passivas, englobando as soluções que utilizam das Bag-in-Box® para armazenamento de energia térmica. Bem como o percentual final de redução de consumo energético e as necessidades de consumo para aquecimento e arrefecimento da edificação. Também são apresentados os resultados relativos ao conforto higrotérmico dos usuários, expressos na temperatura de ar interior necessária para assegurar o limite estabelecido do índice PMV. Os resultados das simulações são apresentados separadamente para cada atividade tipo e condição bioclimática, nomeadamente, para o clima de Lisboa, Portugal, e Helsínquia, Finlândia.

4.2 Estudo paramétrico – exposição dos resultados

O estudo paramétrico foi realizado com o auxílio da ferramenta *Parametric*, destacada na Figura 21 que apresenta um exemplo de estudo paramétrico de um dos cenários deste projeto. Com este tipo de simulação é possível selecionar as variáveis de *output*, que são apresentadas na tabela de resultado, e os modelos analisados durante a simulação paramétrica.

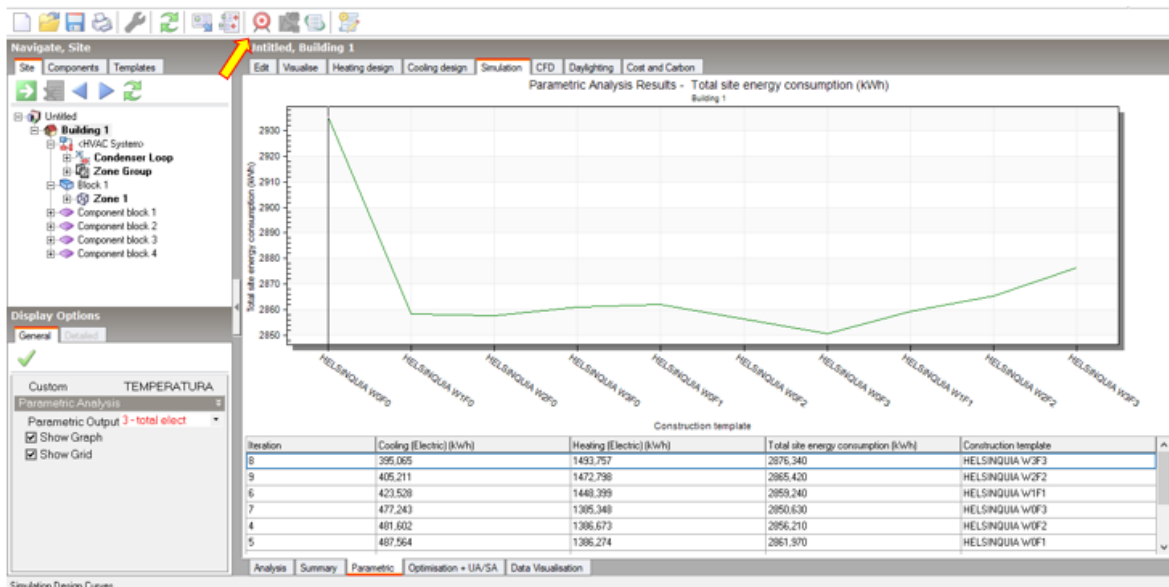


Figura 21 – Exemplo de estudo paramétrico

Foram realizados 12 estudos paramétricos, com 10 dez opções de inércia térmica em cada simulação, totalizando 120 cenários. Os resultados expostos nesta secção serão um exemplo gráfico para cada atividade analisada. Os demais resultados serão expostos em formato de tabela no Apêndice A.

As variáveis de saída correspondem à energia elétrica de arrefecimento, aquecimento e total. Em que a energia total corresponde ao somatório da energia elétrica para aquecimento, arrefecimento, eletricidade dos equipamentos, sistemas de ventilação, iluminação.

O gráfico resultante da simulação paramétrica para Lisboa, Escritório, estendido é exposto na Figura 22.

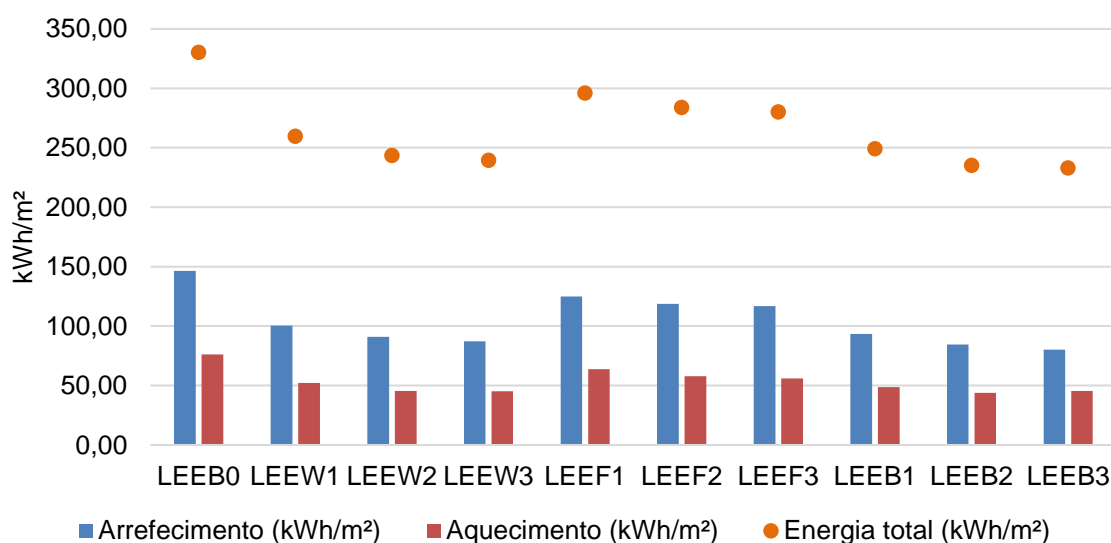


Figura 22 – Consumo energético anual para Lisboa, Escritório, Estendido

Os valores (kWh/m²), em forma de tabela, dos consumos energéticos da situação de Lisboa, atividade de escritório e horário estendido são apresentados no Apêndice A. É possível perceber, pela análise do gráfico, que há uma redução no consumo energético com a implementação das Bag-in-Box®.

A Figura 23 expõe o gráfico do estudo paramétrico para Helsínquia, atividade de Dormitório universitário a ser utilizado em horário reduzido. Se destaca que em Helsínquia há maior necessidade de aquecimento do que arrefecimento do espaço, devido ao clima local. Pela análise de consumo energético total nota-se que o aumento da espessura da camada de água é benéfico para a redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento.

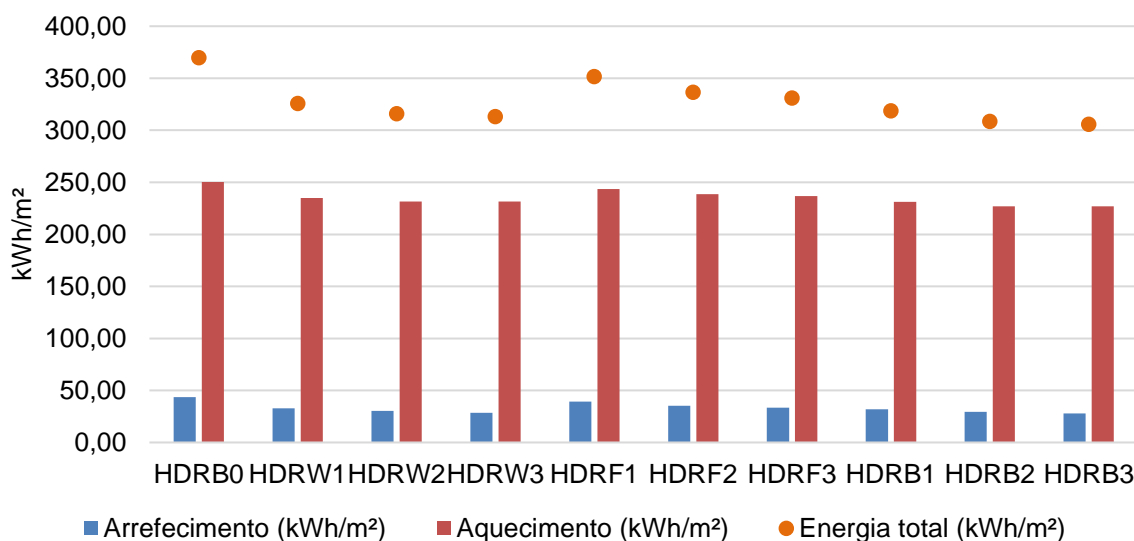


Figura 23 – Consumo energético anual para Helsínquia, Dormitório, Reduzido

A terceira atividade estudada é de alto metabolismo, identificada como Ginásio. Para esta situação em Lisboa com horário reduzido o consumo energético de aquecimento é próximo ao nulo, conforme expõe a Figura 24.

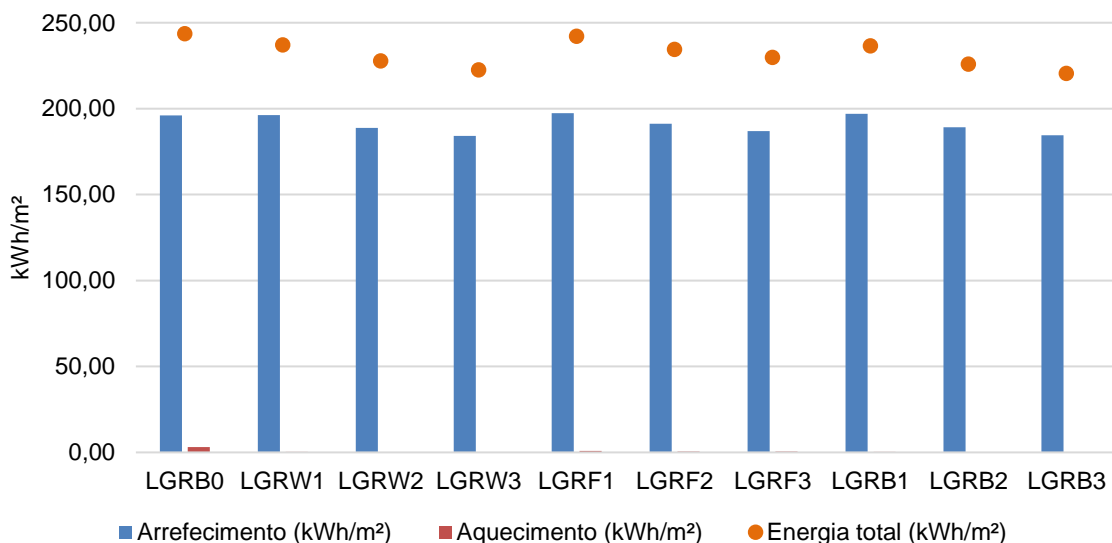


Figura 24 – Consumo energético anual para Lisboa, Ginásio, Reduzido

Os resultados iniciais para a tipologia de Ginásio indicaram que havia uma parcela muito elevada no consumo elétrico total que estava relacionada com o sistema de ventilação mecânica. A investigação destes resultados apontou que o alto consumo relacionava-se às temperaturas de conforto térmico dos módulos habitacionais destinados à atividade tipo de Ginásio próximas aos 14°C.

Para manter a temperatura de conforto é necessária uma troca de calor que neutralize as cargas térmicas totais. Isto implica que para atingir a temperatura de conforto pela carga térmica, seja necessário que a diferença entre a temperatura de conforto e a temperatura de insuflação do ar seja mais elevada. O valor padrão utilizado nas primeiras análises para o ar de insuflação foi de 14°C muito próximo à temperatura de conforto, o que resultava em valores totais de ventilação mecânica muito elevados. Uma das soluções para contornar o problema foi a definição de uma temperatura de insuflação de ar de 10°C, mais baixa do que a temperatura de conforto. Assim, o sistema de AVAC tem condições de trocar calor com o espaço de forma a neutralizar a carga térmica.

Após esta alteração verificou-se que os consumos elétricos associados com a ventilação mecânica são muito menores. Tendo isto posto, as simulações apenas para a atividade tipo de Ginásio foram realizadas com a temperatura de ar de insuflação de 10°C.

4.3 Análise do estudo paramétrico

Neste subcapítulo é analisado o impacto do desempenho energético em função da alternativa proposta para o conforto térmico.

4.3.1 Volume de água

A mesma espessura de água é utilizada concomitantemente no pavimento e nas paredes, mas o volume difere pela metragem quadrada de cada elemento da envolvente. Os volumes de água (W1, F1, B1) referem-se a camada de água de 12,8 mm; os volumes (W2, F2, B2) tem camada de água de 25,6 mm; e os volumes (W3, F3, B3) correspondem a espessura de 38,4 mm. Da espessura 1 para a espessura 2 é dobrado o volume de água. E da espessura 1 para a espessura 3 é triplicado o volume. A camada de água mais espessa indica o aumento da capacidade de armazenamento de calor e inércia térmica.

Esta análise indica o impacto do volume total de água no percentual de redução, ou aumento, do consumo energético anual. O intuito é perceber se compensa colocar as Bag-in-Box® na parede e no pavimento do sistema BRICKITSMART.

A atividade de Escritório tem média carga térmica interna e os resultados de redução do consumo elétrico anual são apresentados na Tabela 12. Os resultados da influência do volume de água indicam que, para Lisboa em horário estendido a redução de consumo é muito superior aos três demais casos. Isto pode estar relacionado ao clima mais ameno e a maiores horas de ocupação do módulo habitacional.

Ainda, em Lisboa e Helsínquia, dobrar a camada de água significa ter um aumento do desempenho energético em relação a espessura 1. Mas triplicar a

camada de água já não tem impacto significativo no consumo energético. A parede tem maior relevância percentual nos resultados e a instalação das bolsas de água no pavimento e parede juntos não compensa.

A segunda atividade analisada é a de Dormitório universitário, o resultado da redução do consumo elétrico é apresentado na Tabela 13. A edificação destinada a Dormitório universitário é caracterizada por baixas cargas térmicas internas, pois as atividades realizadas são de estudo, relaxamento e de dormir. Ainda se evidencia que a melhor estratégia para a redução do consumo elétrico é a instalação do elemento inercial nas paredes.

É visto que mesmo com o aumento das reduções ao instalar os sacos de água simultaneamente no pavimento e parede, os ganhos não são significativos, isto é, pode não justificar o investimento. Em termos percentuais de redução do consumo energético, este é o perfil que apresenta maior constância nas duas localizações e horários de ocupação.

Tabela 12 – Redução do consumo energético para o Escritório

Posição da Bag-in-Box®	Nomenclatura	Volume de água (m³)	Redução do consumo elétrico			
			Lisboa		Helsínquia	
			Estendido	Reduzido	Estendido	Reduzido
Parede	W1	0,4608	21%	5%	3%	2%
	W2	0,9216	26%	7%	3%	4%
	W3	1,3824	27%	7%	3%	4%
Pavimento	F1	0,1152	10%	3%	2%	0%
	F2	0,2304	14%	6%	3%	2%
	F3	0,3456	15%	8%	3%	3%
Parede e Pavimento	B1	0,5760	25%	6%	3%	3%
	B2	1,1520	29%	7%	2%	4%
	B3	1,7280	29%	6%	2%	5%

Tabela 13 – Redução do consumo energético para o Dormitório universitário

Posição da Bag-in-Box®	Nomenclatura	Volume de água (m³)	Redução do consumo elétrico			
			Lisboa		Helsínquia	
			Estendido	Reduzido	Estendido	Reduzido
Parede	W1	0,4608	18%	12%	16%	12%
	W2	0,9216	21%	14%	19%	15%
	W3	1,3824	21%	12%	19%	15%
Pavimento	F1	0,1152	10%	6%	11%	5%
	F2	0,2304	14%	9%	14%	9%
	F3	0,3456	15%	9%	14%	10%
Parede e Pavimento	B1	0,5760	20%	14%	18%	14%
	B2	1,1520	22%	14%	20%	17%
	B3	1,7280	22%	11%	21%	17%

A Tabela 14 expõe o resultado da influência do volume de água para a situação de Ginásio, cenário de cargas internas elevadas. Semelhante aos outros cenários, as paredes com Bag-in-Box® têm maior relevância percentual na redução do consumo energético anual.

Tabela 14 – Redução do consumo energético para o Ginásio

Posição da Bag-in-Box®	Nomenclatura	Volume de água (m³)	Redução do consumo elétrico			
			Lisboa		Helsínquia	
			Estendido	Reduzido	Estendido	Reduzido
Parede	W1	0,4608	5%	3%	2%	12%
	W2	0,9216	6%	6%	3%	14%
	W3	1,3824	6%	9%	3%	15%
Pavimento	F1	0,1152	3%	1%	4%	8%
	F2	0,2304	4%	4%	2%	10%
	F3	0,3456	5%	6%	2%	10%
Parede e Pavimento	B1	0,5760	6%	3%	3%	15%
	B2	1,1520	7%	7%	4%	16%
	B3	1,7280	7%	10%	4%	15%

4.3.2 Fluxos de calor

É importante entender como a inércia térmica da edificação se comporta sem o sistema de climatização ativo. Para tal foi realizada uma simulação para a semana de verão, em Lisboa. A Figura 25 demonstra o balanço energético para o modelo LEEB0 sem qualquer climatização ativa.

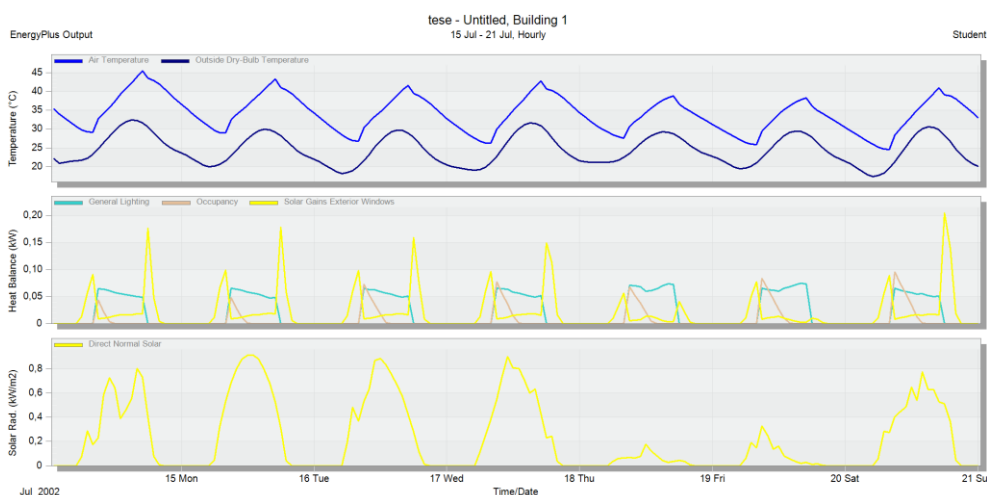


Figura 25 – Semana de verão para LEEB0 sem climatização ativa

O modelo LEEB0 responde rapidamente às condições ambientais exteriores. A temperatura interna é muito influenciada pelos ganhos solares e pela

curva da temperatura de bolbo seco. A análise do gráfico de temperatura demonstra que, no verão, os ganhos externos são somados aos internos e há temperaturas do ar interior próximas aos 45°C, mesmo que a temperatura externa seja menor que 35°C.

O maior volume de água possível em um módulo habitacional é inserido ao modelo LEEB3, ou seja, esta é a alternativa de maior inércia térmica. A Figura 26 expõe a mesma simulação de semana de verão sem climatização ativa. Com a inserção do elemento inercial há um atraso nos fluxos de calor, em relação ao módulo sem sacos de água. Desta forma, a amplitude térmica do modelo é menor, pois a envoltória acumula calor e o libera mais lentamente. Isto é visto pelas temperaturas máximas e mínimas em intervalo menor que o modelo LEEB0. A temperatura máxima não ultrapassa os 40°C, enquanto temperatura mínima não acompanha a curva da temperatura de bolbo seco, não sendo inferior a 30°C.

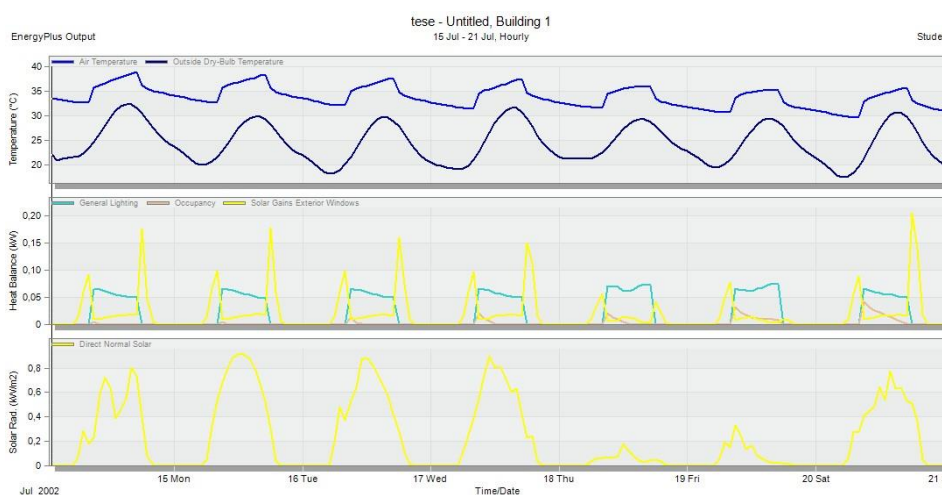


Figura 26 – Semana de verão para LEEB3 sem climatização ativa

A Figura 27 expõe os fluxos de calor de uma semana de verão para o modelo LEEB3 com sistema de climatização ativo. Nota-se que a amplitude térmica é ainda menor, e a temperatura do ar interior é inferior à temperatura de bolbo seco. É possível perceber que o módulo continua a responder às condições ambientais exteriores, mas de forma mais gradual.

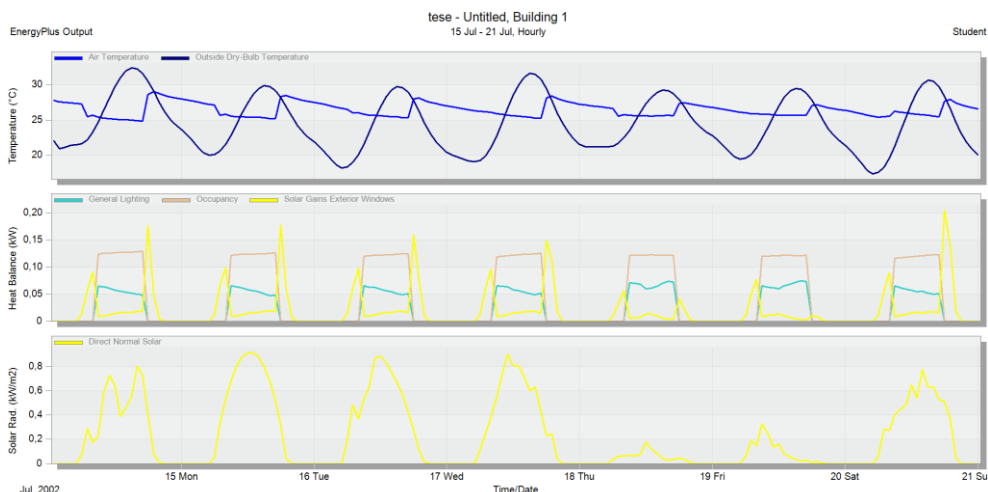


Figura 27 – Semana de verão para LEEB3 com climatização ativa

Este resultado demonstra que o módulo habitacional necessita de climatização ativa, pois apenas o efeito da inércia térmica não é suficiente para garantir o conforto higrotérmico dos usuários.

Tendo isto posto, neste tópico serão analisadas as três utilizações (Ginásio, Escritório, Dormitório universitário) separadamente, em semanas de inverno e verão, porque diferem quanto as cargas térmicas internas.

A análise dos fluxos de calor, para o Ginásio, do modelo HGRB0 para uma semana de inverno, em regime horário, permitiu a identificação de uma limitação do DesignBuilder quando a simulação é realizada com a opção cálculo por conforto de Fanger. A temperatura mínima de termostato é de 12,8°C e a máxima é de 40°C. Esta limitação, neste cenário, pode ser benéfica para evitar condensações nas paredes.

Isto significa que a temperatura do ar interior, nos períodos não ocupados, seria inferior a 12,8°C e, por isso, o aquecimento é ligado automaticamente para garantir a temperatura mínima. Isto pode ser observado na Figura 28 na curva de aquecimento da zona (*zone heating*).



Figura 28 – Semana de inverno HGRB0

A Figura 29, demonstra o perfil de fluxos de calor da semana de inverno para HGRB2, por ser este o volume de água associado ao menor consumo energético anual.

Em alguns momentos, no modelo HGRB0, o aquecimento é desligado em períodos não ocupados, pois os ganhos solares implicam em uma rápida resposta da temperatura interior que excede os 12,8°C. Já no modelo HGRB2 isto não ocorre, a climatização está sempre ligada nesta semana. Mesmo assim, a inércia térmica influencia no consumo elétrico para o aquecimento anual, com reduções médias de 12%.

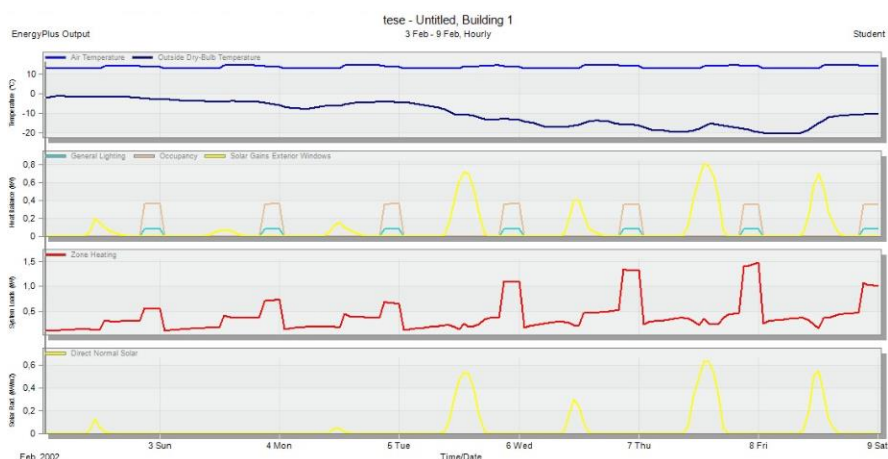


Figura 29 – Semana de inverno HGRB2

A temperatura de conforto é baixa independentemente de o Ginásio ser de horário reduzido ou estendido. Para exemplificação é exposto o caso do Ginásio estendido em Lisboa. O modelo LGEB0, sem elemento inercial, também tem ocorrências de temperaturas interiores de 12,8°C na semana de inverno, conforme as curvas de climatização da Figura 30, em que o aquecimento é acionado.

Entretanto, pela alta taxa metabólica, também para este cenário, a temperatura média de conforto térmico é ainda baixa. Isto implica que seja necessário arrefecer o espaço mesmo no inverno.

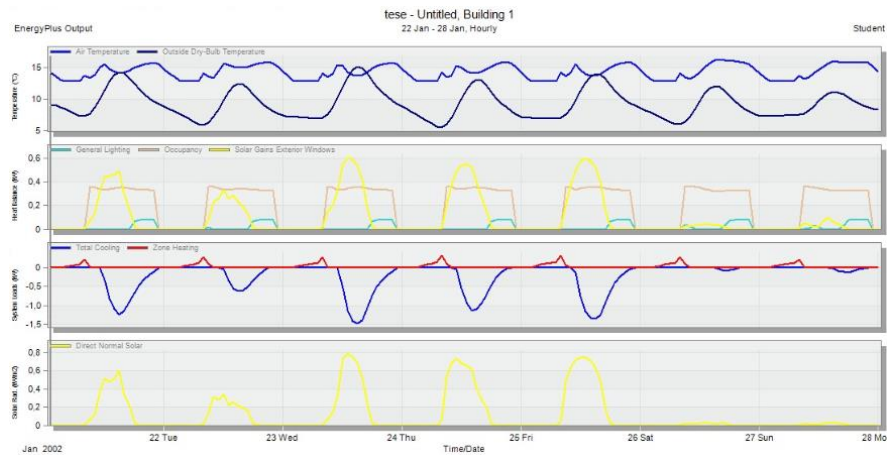


Figura 30 – Semana de inverno LGEBO

O clima de Lisboa, no inverno, é mais ameno com temperaturas mais elevadas e com maior incidência solar. Assim, o efeito da inércia térmica, para o cenário de Ginásio, é mais benéfico para este bioclima. A amplitude térmica do modelo LGEBO3, apresentado na Figura 31, é menor que LGEBO. Ainda, as temperaturas, com a implementação da camada de água são sempre superiores a 12,8°C, não há cargas de aquecimento. Além disso, por haver uma resposta mais devagar aos ganhos solares os picos de potência de arrefecimento são menores.

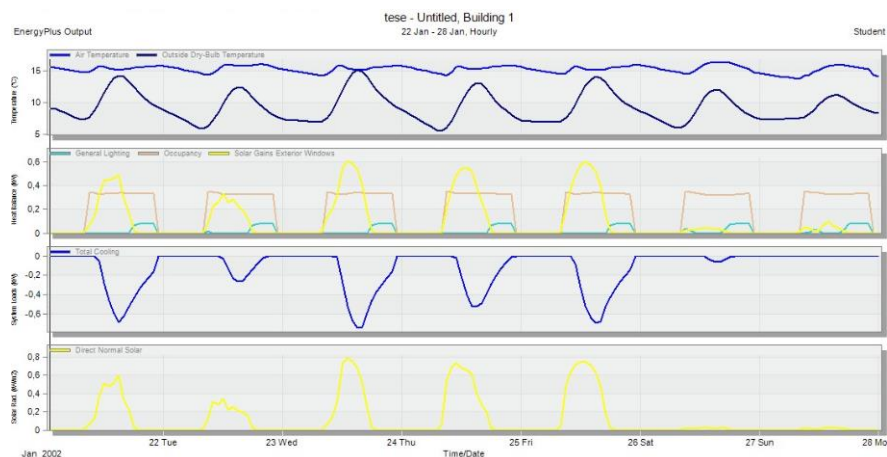


Figura 31 – Semana de inverno LGEBO3

No verão, por ser uma edificação caracterizada por cargas internas elevadas e com o acúmulo dos ganhos solares, o impacto da inércia térmica é menos

acentuado. Nos casos do Ginásio de horário estendido para Lisboa e Helsínquia há uma melhora na amplitude térmica, mas não é significativa. Isto pode ser observado pela comparação do perfil de fluxo de calor na semana de verão para os modelos LGEB0 e LGEB3 expostos nas Figuras 32 e 33, respetivamente.

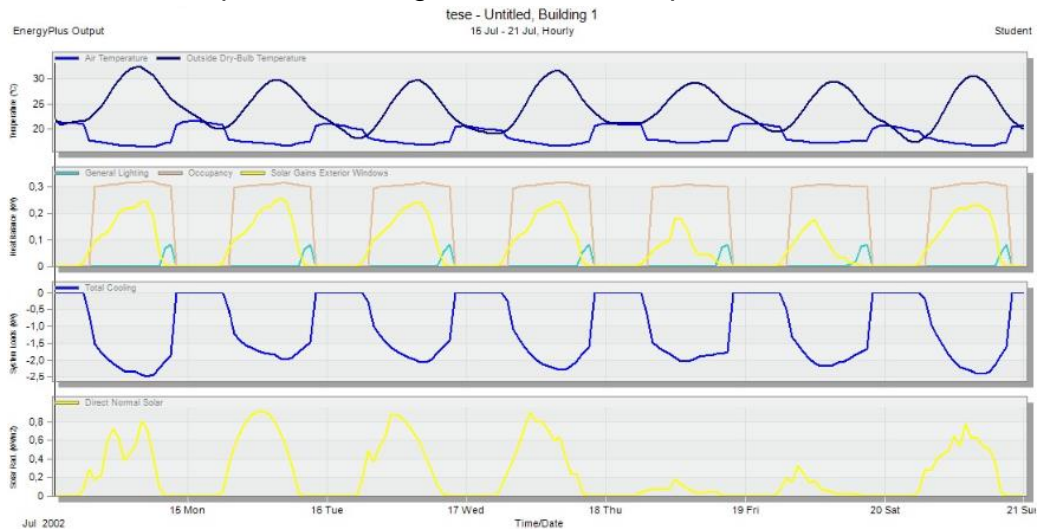


Figura 32 – Semana de verão LGEB0

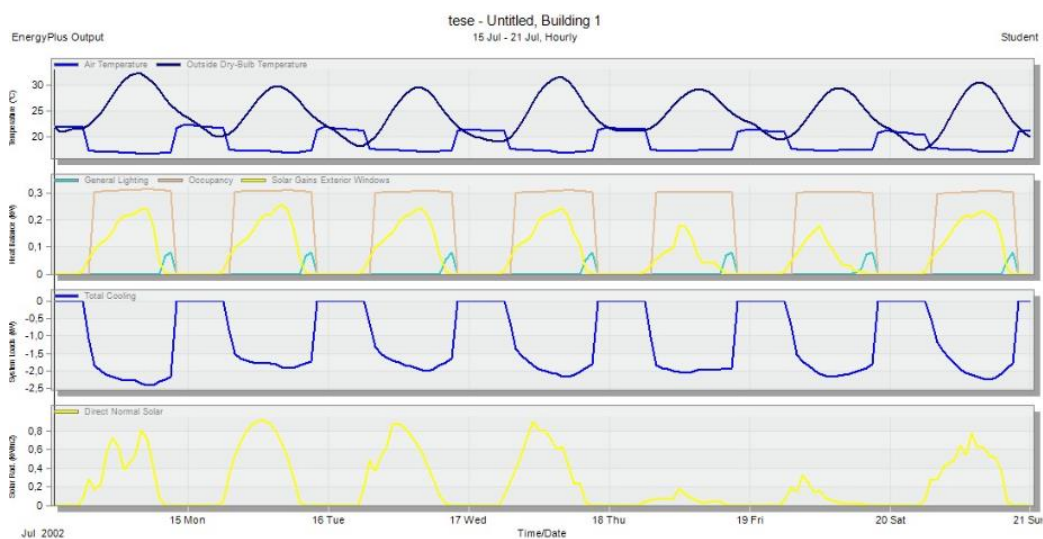


Figura 33 – Semana de verão LGEB3

Já para o horário reduzido há uma diminuição da potência máxima do equipamento de climatização, para arrefecimento do módulo, que é um pouco mais relevante. Isto ocorre porque a inércia térmica atrasa os ganhos de calor pela envoltória e a resposta da temperatura interna é, também, mais lenta.

Isto pode ser visto para a situação de Helsínquia, em que a potência para arrefecimento durante a pré-climatização é reduzida quando aplicada a alternativa

de aumento da inércia térmica. A Figura 34 demonstra o fluxo de calor para o modelo sem inércia, HGRB0, e a Figura 35 apresenta o modelo HGRB3.



Figura 34 – Semana de verão HGRB0

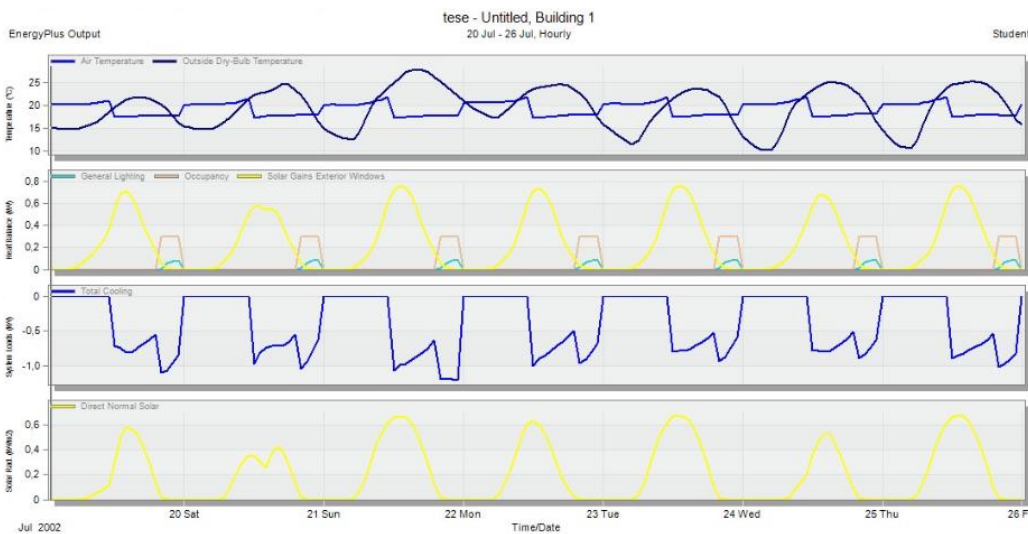


Figura 35 – Semana de verão HGRB3

Devido ao valor das taxas metabólicas altas, 300W/m^2 , a temperatura de conforto é sempre baixa, para ambas as localizações. Esta taxa metabólica corresponde a 3,19 met, isto pode ser equiparado, conforme expõe MARQUES (2014) a uma atividade física de intensidade moderada, tal como dançar devagar ou caminhar lento. Pela análise dos resultados, implementar as bolsas de água na envoltória da edificação tem maior impacto, para a redução de consumo energético total, nos perfis de horário reduzido para a edificação destinada a Ginásio.

O estudo do volume de água total para a redução do consumo energético anual para os modelos de atividade tipo de Escritório resultou em uma maior influência da instalação das Bag-in-Box® para o cenário de Lisboa com horário estendido. A simulação realizada com a opção de cálculo de conforto de Fanger, a controlar o sistema pelo *setpoint* de PMV, possibilitou identificar períodos em que o sistema de AVAC pode ser desligado e o conforto térmico dos usuários ainda é garantido. A Figura 36 exemplifica um período, na semana de inverno, em que o AVAC é automaticamente desligado no modelo LEEB3. Isto ocorre, pois a edificação beneficia-se do horário de ocupação ser também o de maior radiação solar, a inércia térmica permite que a edificação acumule calor e mantenha o espaço aquecido.

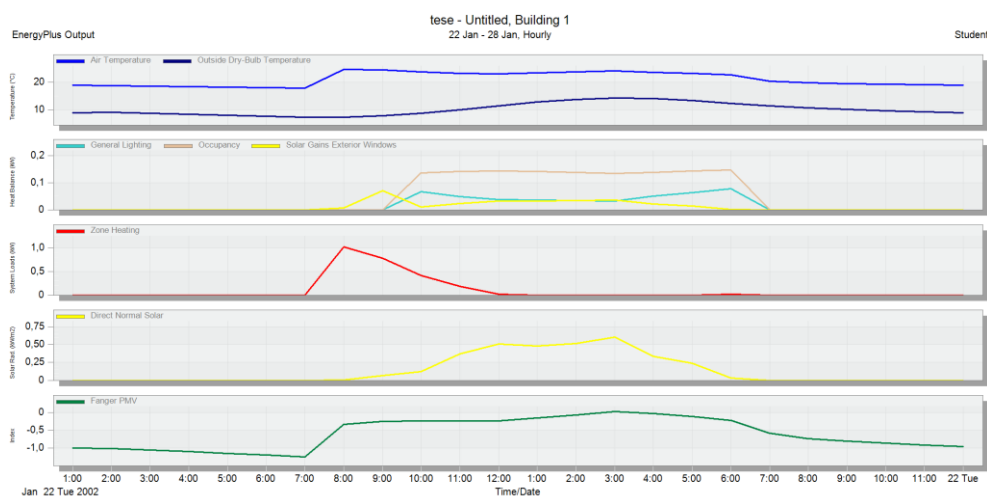


Figura 36 – Sistema de AVAC, inverno, LEEB3

O sistema de sombreamento é projetado para ser ativado quando as temperaturas internas excedem os 22°C, durante o período de ocupação. Neste cenário, se a temperatura de operação do sistema fosse maior, a edificação poderia se beneficiar ainda mais dos ganhos solares para auxiliar no aquecimento da zona. Todavia, os ganhos solares podem não ser benéficos na estação de arrefecimento. O mesmo modelo LEEB3, para a semana de verão, tem diminuição dos ganhos solares pelos envidraçados quando o sistema de sombreamento é ativado. A Figura 37 expõe o perfil da radiação solar e respetivos ganhos solares pelos envidraçados para um dia da semana de verão do modelo LEEB3.

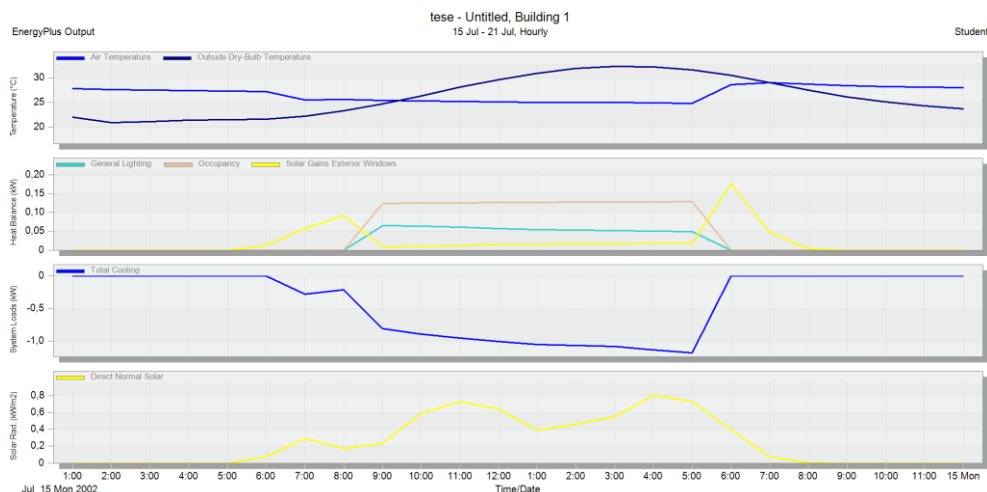


Figura 37 – Sistema de AVAC, verão, LEEB3

Garantir a estabilidade do sistema de AVAC, com equipamentos de menor potência, pode ser mais relevante para os custos de climatização da edificação do que a redução percentual dos consumos energéticos. O Escritório de horário estendido, localizado em Helsínquia, tem menor consumo energético total quando as soluções de inércia térmica são aplicadas com a maior espessura apenas no pavimento. No entanto, pela análise das temperaturas internas e fluxos de calor do modelo HEEF3, exposto na Figura 38, e comparados com o modelo HEEB3, Figura 39, nota-se que há maior estabilidade no modelo de maior inércia térmica.

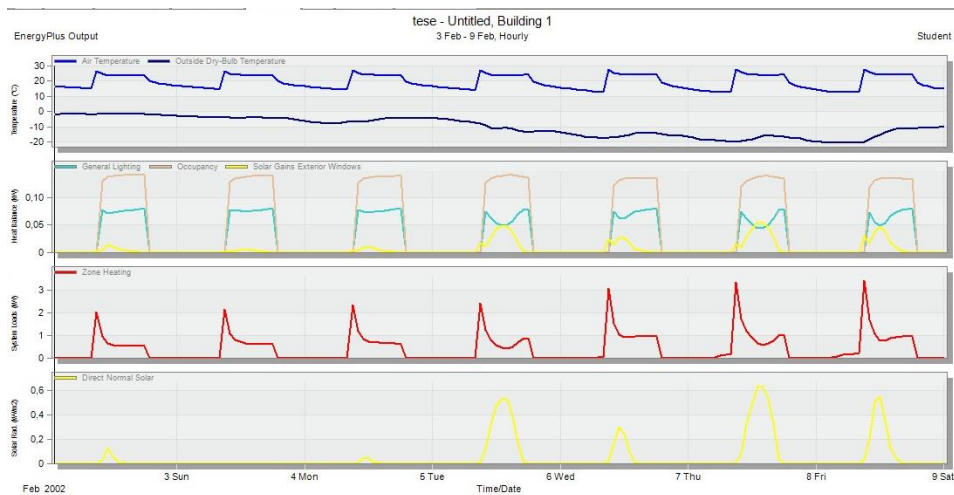


Figura 38 – Semana de inverno HEEF3

Salienta-se que no modelo com Bag-in-Box® apenas no pavimento, HEEF3, há períodos em que a edificação responde rapidamente às condições climáticas exteriores e a temperatura interna é próxima dos 12,8°C e o aquecimento é acionado.



Figura 39 – Semana de inverno HEEB3

No Escritório com horário reduzido há aumento do consumo de aquecimento, tanto para o clima de Helsínquia quanto para Lisboa. A Figura 40 retrata o balanço energético para uma semana de inverno em Helsínquia em que os picos de potência de aquecimento são de 3 kW. Pela falta de inércia térmica, a edificação não acumula o calor para liberá-lo durante o período noturno.

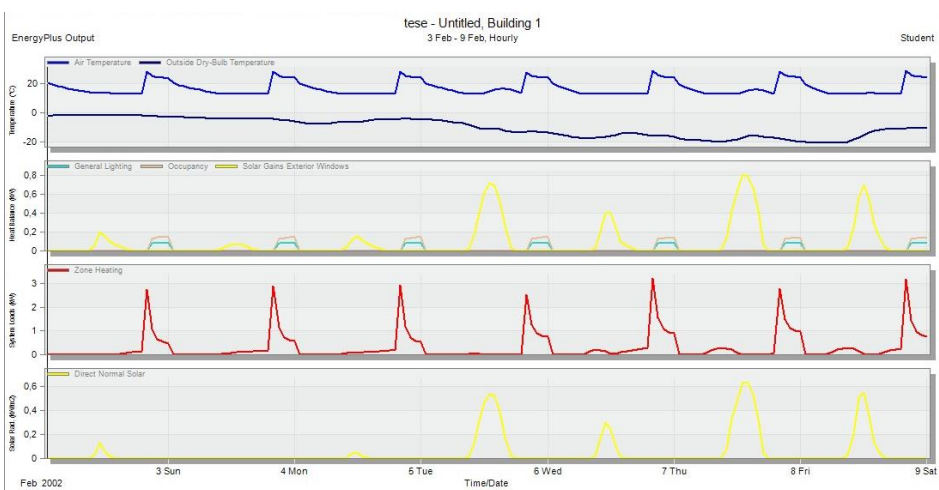


Figura 40 – Semana de inverno HERB0

Já para o modelo HERB3 o pico da potência de aquecimento é de 2,5 kW e o sistema opera de forma mais constante, conforme expõe a Figura 41. O consumo energético pode ser maior, mas o custo do arranque do equipamento de AVAC é superior no modelo sem inércia térmica.

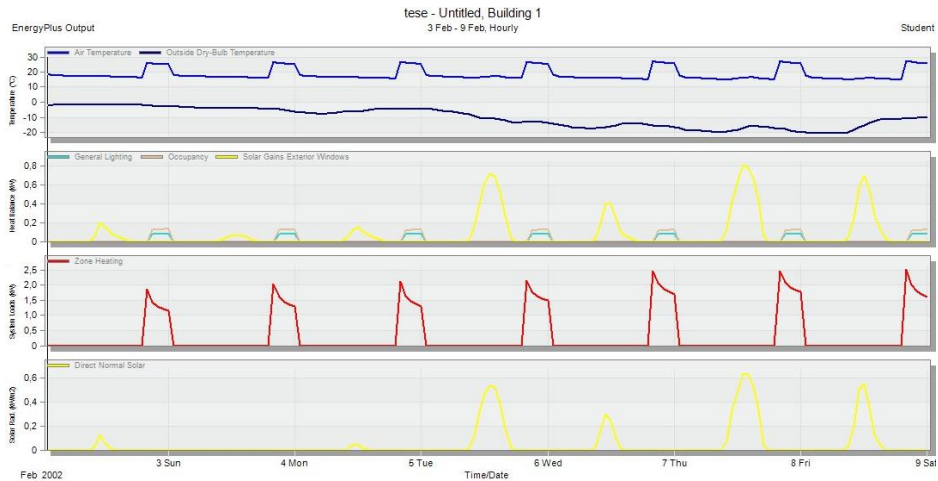


Figura 41 – Semana de inverno HERB3

Os primeiros estudos para o Dormitório universitário consideraram valores para o índice de vestuário (Iclo) apenas para o vestuário dos ocupantes, 0,5 clo para o verão e 1,0 clo ou 1,5 clo para o inverno. Porém estes refletiram em temperaturas de ar interior, para o conforto, muito elevadas, próximas dos 30°C. O Iclo se refere à resistência à troca de calor entre a superfície da pele e ao ambiente. LIN e DENG (2008) estudaram a influência da cama e roupa de cama no índice de clo e identificaram que este índice é muito superior aos valores que estavam a ser considerados. O índice de vestuário para uma pessoa de pijamas curtos, cama e um edredão de verão, com 80% do corpo coberto, é 3,18.

O limite de valor para o clo no DesignBuilder é de 2,0, portanto, este foi o valor máximo utilizado para o índice de vestuário no Dormitório universitário reduzido no período de inverno. Para o verão o valor determinado é de 1,5. E para o Dormitório universitário com período estendido o índice de clo é menor, pois não se considera que o ocupante permaneça deitado durante todo o período de ocupação. Com esta alteração as temperaturas de conforto para, no máximo, 26°C.

A análise do volume de água no consumo energético anual identificou que a maior influência nas cargas de climatização é devido às paredes da envoltória. A Figura 42 apresenta o resultado mensal dos ganhos de carga térmica para o modelo HDRB0, em que as perdas pela envoltória são mais acentuadas no período de aquecimento.

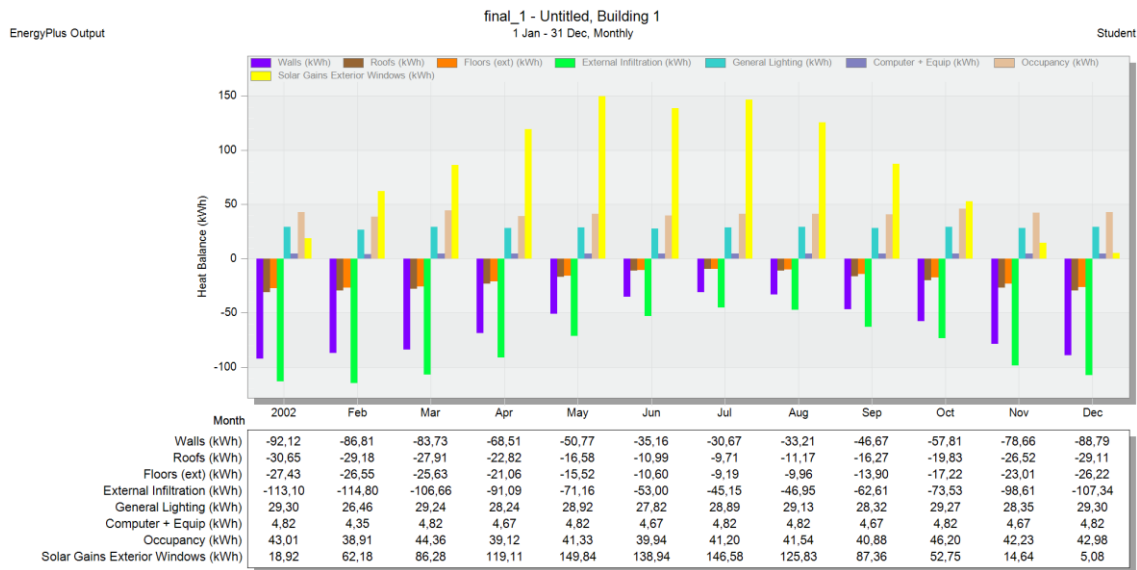


Figura 42 – Cargas térmicas HDRB0

A situação de Dormitório universitário com horário reduzido tem redução nas cargas de aquecimento e arrefecimento com a inserção das bolsas de água. O melhor modelo, para este cenário, em consumos de aquecimento e arrefecimento é o de maior inércia térmica. O modelo sem alternativas de aumento de inércia térmica, HDRB0, exposto na Figura 43, tem picos de arrefecimento de 2,5 kW.

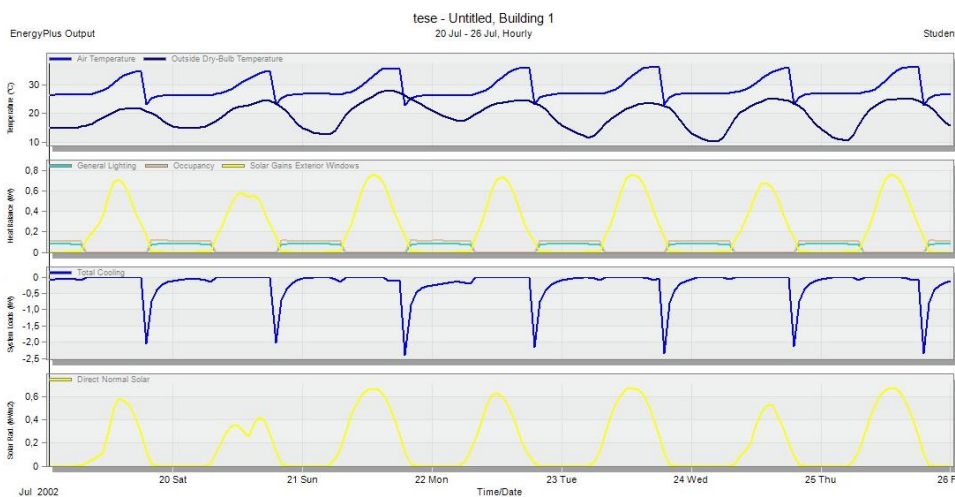


Figura 43 – Semana de verão HDRB0

Enquanto para o modelo HDRB3, Figura 44, os picos diminuem para 0,6 kW. Esta redução é devida, como anteriormente referido para outros modelos deste projeto, ao retardamento do fluxo de calor pelas envoltórias. Ainda, é possível verificar que o controlo do estore de sombreamento a fechar quando a temperatura interior excede os 22°C é benéfico para este cenário na estação de arrefecimento.

Destaca-se que a iluminação da zona é acionada quando o sistema de sombreamento está fechado, assim há cargas térmicas internas adicionais no espaço ocupado.

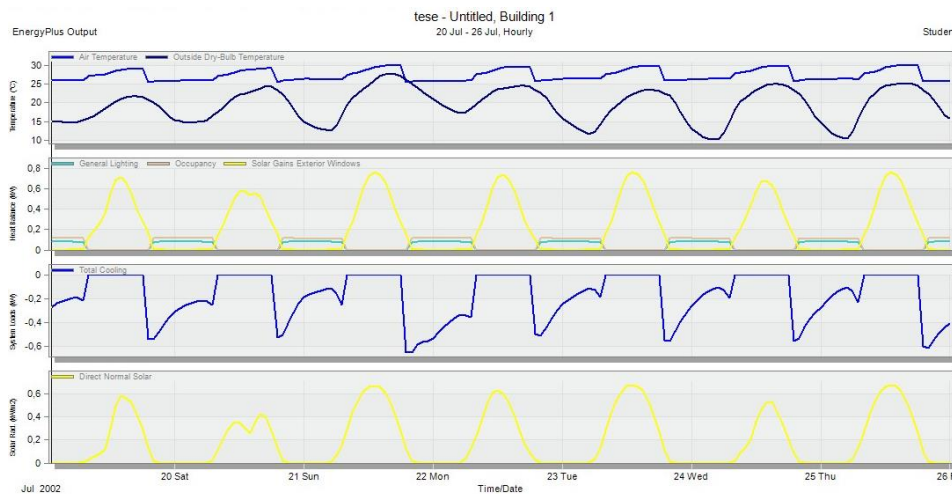


Figura 44 – Semana de verão HDRB3

Em Lisboa, para o horário estendido de Dormitório universitário, os consumos elétricos de arrefecimento também estão sempre a ser diminuídos com o aumento do volume de água. Entretanto, isto não ocorre para o consumo elétrico de aquecimento.

A Figura 45 apresenta o perfil de fluxo de calor para uma semana de inverno do modelo LDEB0. Pela rápida resposta aos ganhos solares e à temperatura exterior, o modelo tem instabilidade no sistema de climatização e necessita de cargas de arrefecimento antes e logo no início da ocupação da edificação, para que o conforto térmico seja atingido. Logo após é acionado o sistema de aquecimento.

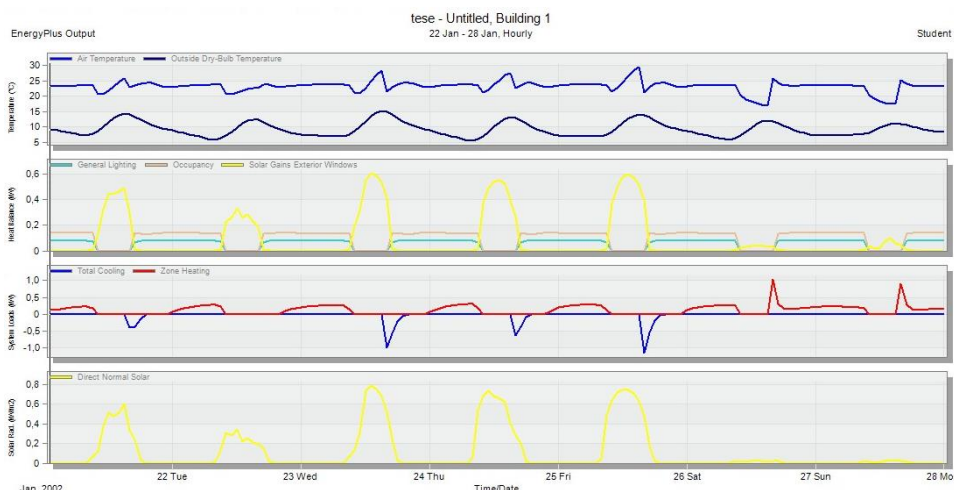


Figura 45 – Semana de inverno LDEB0

Com a implementação das bolsas de água há uma maior estabilidade do sistema de climatização que apenas necessita de ligar o aquecimento da zona. A Figura 46 demonstra o perfil do fluxo de calor para o modelo LDEB3. Ainda é perceptível que o sistema de aquecimento se liga por vezes, após o início da ocupação, visto que a edificação conseguiu acumular calor e o liberar gradualmente para o interior, garantindo, assim, o conforto dos usuários sem a necessidade de pré-climatizar o espaço.

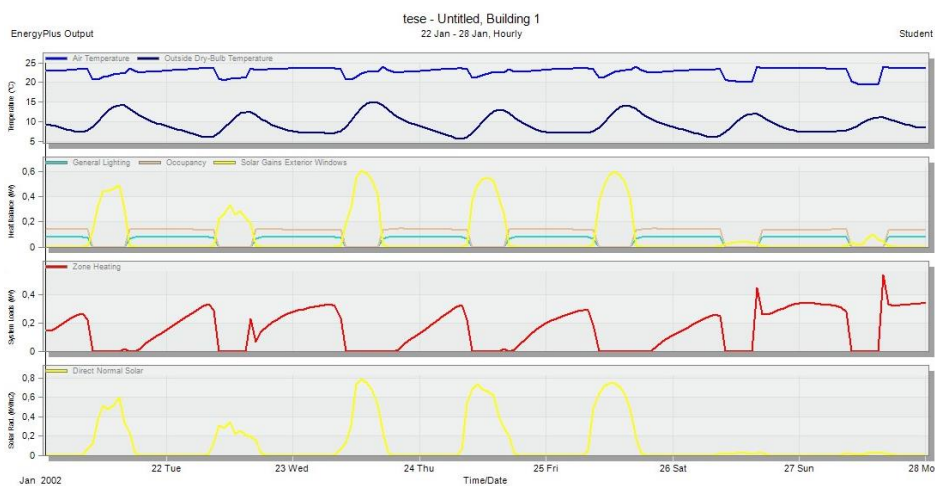


Figura 46 – Semana de inverno LDEB3

4.4 Temperatura de *setpoint*

A análise controlada pela opção de cálculo de Controlo de Fanger permitiu identificar que, para garantir o conforto térmico, é necessário que se tenham temperaturas de ar interior variáveis durante o período de ocupação.

A Tabela 15 expõe os resultados das temperaturas do ar interior de *output* para o verão. As médias da temperatura e análise de incerteza, com intervalo de confiança de 95%, foram calculadas com a amostra de uma semana de verão apenas nos períodos ocupados, pois estas são as temperaturas de interesse para o conforto dos usuários.

Tabela 15 – Temperaturas de *output*, verão, modelos sem inércia térmica

Modelo	Temp. média (°C)	Desvio padrão	Intervalo de confiança		Limite superior (°C)	Limite inferior (°C)
			Absoluto	%		
HGRB0	18,2	0,16	0,06	0,33%	18,3	18,2
HGEB0	17,5	0,47	0,09	0,53%	17,6	17,4
LGRB0	17,2	0,65	0,24	1,40%	17,4	16,9
LGEB0	17,3	0,39	0,08	0,44%	17,4	17,2
HEEB0	25,9	0,35	0,09	0,33%	26,0	25,9
HERB0	25,6	0,47	0,17	0,68%	25,8	25,4
LEEB0	25,5	0,55	0,14	0,53%	25,6	25,4
LERB0	25,4	0,45	0,17	0,66%	25,6	25,3
HDEB0	25,7	0,49	0,09	0,35%	25,8	25,6
HDRB0	26,4	0,44	0,09	0,36%	26,5	26,4
LDEB0	25,4	0,53	0,10	0,38%	25,5	25,3
LDRB0	26,2	0,42	0,09	0,34%	26,3	26,1

A maior incerteza das temperaturas é relacionada com o cenário de menor amostra, período de ocupação de apenas quatro horas. Ainda, se ressalta que o intervalo de conforto térmico, índice PMV, definido para todos os cenários é sempre o mesmo, de -0,25 a 0,25. Assim, nota-se que, para cada atividade tipo o intervalo de temperaturas difere. Visto que as cargas térmicas variam muito entre as atividades analisadas e a temperatura do ar interior influencia as trocas de calor sensível.

A análise de temperatura do ar interior média de *output* para a semana de inverno é demonstrada na Tabela 16. O intervalo de confiança para a estação de aquecimento é maior, pois as temperaturas internas têm maior amplitude térmica neste período.

Tabela 16 – Temperaturas de *output*, inverno, modelos sem inércia térmica

Modelo	Temp. média (°C)	Desvio padrão	Intervalo de confiança		Limite superior (°C)	Limite inferior (°C)
			Absoluto	%		
HGRB0	13,8	0,30	0,11	0,79%	13,9	13,7
HGEB0	13,4	0,44	0,09	0,66%	13,5	13,3
LGRB0	15,5	0,58	0,22	1,39%	15,8	15,3
LGEB0	14,9	0,88	0,17	1,16%	15,1	14,8
HEEB0	23,6	0,65	0,16	0,68%	23,8	23,5
HERB0	24,4	0,68	0,25	1,04%	24,6	24,1
LEEB0	23,5	0,57	0,14	0,60%	23,6	23,3
LERB0	23,2	0,48	0,18	0,76%	23,4	23,0
HDEB0	24,1	0,33	0,06	0,25%	24,1	24,0
HDRB0	26,0	0,50	0,11	0,41%	26,2	25,9
LDEB0	23,5	0,35	0,06	0,27%	23,6	23,4
LDRB0	25,2	0,35	0,08	0,30%	25,2	25,1

Destaca-se que mesmo em climas mais extremos, como Helsínquia, a temperatura de conforto não difere muito em relação às temperaturas para Lisboa, clima mais ameno.

Este valor de temperatura resultante pode ser utilizado como *setpoint* para o sistema de arrefecimento e aquecimento em uma simulação a ser controlada pela temperatura.

As temperaturas de conforto dos modelos com inércia térmica, não diferiram significativamente em relação aos cenários sem aplicação dos sacos de água. A análise de incerteza para os modelos com aplicação de Bag-in-Box® concomitantemente no pavimento e paredes com espessura 3 é apresentado no Apêndice B. A Tabela 17 sintetiza as médias das temperaturas do ar interior que asseguram o conforto térmico dos usuários.

Tabela 17 – Comparação das temperaturas médias de *output*

Modelo	Temperatura média (°C)			
	Verão		Inverno	
	B0	B3	B0	B3
HGR	18,2	17,8	13,8	14,0
HGE	17,5	17,6	13,4	13,7
LGR	17,2	16,1	15,5	15,7
LGE	17,3	17,2	14,9	15,4
HEE	25,9	26,0	23,6	24,5
HER	25,6	25,0	24,4	25,7
LEE	25,5	25,5	23,5	23,6
LER	25,4	25,1	23,2	24,0
HDE	25,7	25,5	24,1	24,2
HDR	26,4	26,1	26,0	26,4
LDE	25,4	25,1	23,5	23,3
LDR	26,2	25,7	25,2	25,4

4.5 Síntese do capítulo

A análise do desempenho energético e do conforto higrotérmico dos usuários leva em consideração diversos fatores. Este projeto teve como controlo das simulações o índice de Voto Médio Estimado (PMV) em um intervalo de -0,25 a 0,25 mais rigoroso do que o limite de conforto térmico indicado por normas técnicas, tais como a ISO 7730:2005.

Os resultados demonstram que o conforto térmico pode ser assegurado com o sistema construtivo BRICKITSMART, mesmo sem aplicação de estratégias de inércia térmica. Este conforto é assegurado com equipamentos de maior potência, o que pode resultar em maiores custos associados ao sistema de climatização.

Ainda, foi realizado um estudo a nível horário para uma semana de projeto de inverno e verão que apontou as características de cargas térmicas, ganhos e perdas pela envoltória que implicam nos resultados de fluxo de calor em cada cenário comparativamente com e sem estratégia de inércia térmica.

A temperatura do ar interior, temperatura operativa (*setpoint*) para o sistema de AVAC também foi analisada, em intervalos de confiança de 95%. O estudo indicou que cada atividade é abrangida por um intervalo de temperaturas, independente do clima ser mais rigoroso ou ameno.

5. Conclusões e trabalho futuro

O sistema construtivo modular leve tem por característica uma fraca inércia térmica. Assim, ao realizar uma simulação dinâmica sem climatização ativa percebeu-se que essa particularidade proporciona um problema para a garantia do conforto térmico dos usuários. Com o intuito de melhorar o desempenho térmico desta tipologia de edificação foi avaliado o impacto da implementação de bolsas de água do tipo Bag-in-Box® na envoltória da edificação. Recorrendo-se à simulação dinâmica foram analisadas 12 condições de utilização, com 10 alternativas de espessura de camada de água, totalizando 120 cenários.

As três alternativas de atividade tipo diferem-se muito quanto às cargas térmicas internas. Em todos os modelos verificou-se que é possível garantir o conforto higrotérmico dos usuários, mesmo a altos custos de climatização ativa. A influência da localização geográfica dos modelos é notória na comparação das necessidades de aquecimento e arrefecimento, entretanto nas temperaturas de conforto não houve alteração significativa.

A análise do impacto do volume de água total na redução do consumo energético identificou que a instalação das Bag-in-Box® nas paredes tem maior influência no desempenho da edificação do que a instalação apenas no pavimento. Para além disso, a aplicação das bolsas simultaneamente no pavimento e parede não tem grande aumento percentual na eficiência energética da edificação. Isto implica que pode ser mais vantajoso a aplicação das bolsas apenas nas paredes. A maior redução percentual está associada à atividade de carga térmica interna média, na localização de Lisboa de horário estendido, que atingiu 29% de redução de consumo elétrico anual do sistema de climatização. Entretanto, esta tipologia, Escritório, foi a que apresentou a menor redução percentual de apenas 2%, também no horário estendido em Helsínquia. Desta forma, é possível perceber que por mais que as tipologias alterem diretamente os consumos energéticos os demais critérios de avaliação também devem ser levados em consideração.

Verificou-se também que duplicar o volume de água, da espessura 1 (20 mm) para a espessura 2 (40 mm), tem efeito significativo na redução do consumo energético anual para climatização da edificação. Entretanto o aumento desta camada de água para a espessura 3 (60 mm) não tem melhoria significativa se comparados aos ganhos com a espessura 2, atingindo resultados que variaram de 1 a 3%.

É de se destacar que o estudo apenas da redução percentual do consumo energético anual para aquecimento e arrefecimento podem não demonstrar o real efeito da inércia térmica para o conforto dos usuários e desempenho térmico da edificação. Ao aplicar as estratégias de inércia térmica seria espectável que o consumo energético referente à climatização do módulo habitacional tivesse uma redução. Entretanto, isto não aconteceu para todos os casos, pois foi identificado que em alguns modelos a potência de arranque do sistema de climatização era

menor e mais constante durante toda a ocupação, gerando aumento no consumo elétrico.

O estudo demonstrou que o sistema construtivo BRICKITSMART tem melhor desempenho térmico e energético quando as cargas internas são mais baixas. O Dormitório universitário, caracterizado por atividade de menor metabolismo, é a tipologia que mais se beneficiou do aumento da inércia térmica. E o que apresenta reduções mais constantes, em todos os modelos, no consumo elétrico para climatizar o espaço.

Enquanto o Ginásio, representado por cargas internas mais elevadas, teve o pior desempenho térmico geral. As taxas metabólicas elevadas, para este tipo de construção, requerem as maiores cargas para aquecimento e arrefecimento.

No que diz respeito às temperaturas de *output* para o conforto térmico dos usuários nota-se que as cargas térmicas internas têm grande influência no intervalo das temperaturas de conforto. O cenário de Ginásio resultou nas menores temperaturas internas, a variar de 13 a 16°C no inverno e de 16 a 18°C para o verão. Já a tipologia de Dormitório universitário teve as temperaturas mais elevadas, de 24 a 26°C para a estação de aquecimento e de 25 a 26°C na estação de arrefecimento.

5.1 Trabalhos futuros

Para os trabalhos futuros é interessante que sejam avaliados os custos associados às potências do sistema de climatização. Assim pode-se perceber o impacto económico da redução, ou aumento, do consumo elétrico para climatizar o espaço com a potência do sistema de AVAC.

Pode ser pertinente um estudo da influência das características termofísicas dos materiais, tal como a resistência térmica da camada superficial interna. A analisar qual seria o impacto de diminuir e aumentar o valor da resistência no desempenho térmico.

Referências

AL-ALBI, Z. A., MODH ISA, M. H., ISMAIL, M. Phase Change Materials (PCMs) and their optimum position on building walls. *Sustainability*, Vol. 12, pp 1294, 2020.

ALMEIDA, H. S. Dissertação de mestrado – Análise do conforto térmico de edifícios utilizando as abordagens analítica e adaptativa. Instituto superior técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

ARIVAZHAGAN R., et al. Review on performance assessment of phase change materials in buildings for thermal management through passive approach. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 22, Part 3, pp 419 – 431, 2020.

ASCIONE, F., *et al.* Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones. *Energy*, Vol. 174, pp 359 – 374, 2019.

American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers – ANSI/ ASHRAE Standard 55, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy Atlanta, USA, 2010.

ASTE, N. ANGELOTTI, A. BUZZETTI, M. The influence of external walls thermal inertia on the energy performance os well insulated buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 41, pp 1181 – 1187, 2009.

AVILA, J. Dissertação de mestrado – Modelagem de paredes térmicas compostas. Faculdade de engenharia mecânica da Universidade Estadual de Campinas, 2018.

BASF The chemical company. Micronal® PCM Wallboard™, 2006.

BRICKITSMART. Disponível online: <https://brickitsmart.com/> [Acessado em 24 de novembro de 2020].

CIUTINA, A., et al. Heat transfer vs environmental impact of modern façade system. *CLIMA*, 2019.

CLIMATE-DATA. Clima Helsínquia. Disponível em <https://pt.climate-data.org>. [Acessado em 03 de fevereiro de 2020].

COELHO, P. M. R. Dissertação de mestrado – Análise do RCCTE no contexto da regulamentação europeia. Faculdade de ciência tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.

COSTA, D. P. F. Dissertação de mestrado – Impacto de PCMs no desempenho térmico de edifícios em pedra do Séc. XX. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, 2014.

COSTA, J. A. Dissertação de mestrado – Construção prefabricada – análise da utilização da prefabricação nas várias etapas do processo construtivo. Departamento de engenharia civil da Universidade do Porto, 2013.

CUI, Y., *et al.* Review of phase change materials integrated in building walls for energy savings. *Procedia Engineering*, Vol 121, pp 763 – 770, 2015.

DARKWA, K., O'CALLAGHAN, P.W., TETLOW, D. Phase-change drywalls in a passive-solar building. *Applied Energy* Vol. 83, pp 425 – 435, 2005.

DESIGNBUILDER – DesignBuilder software Ltd. Disponível online: <https://designbuilder.co.uk/> [Acessado em 20 de maio de 2020].

DESIGNING BUILDINGS LTD – Coefficient of Performance CoP, 2016. Disponível online: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Coefficient_of_Performance_CoP. [Acessado em 10 de julho de 2020].

DGEG – Direcção-Geral de Energia e Geologia. Balanço energético para os edifícios de 2017. Disponível online em: <https://www.dgeg.gov.pt/>. [Acessado em 20 de outubro de 2019].

DIÁRIO DA REPÚBLICA - DESPACHO 15793 – F/2013. Decreto de Lei n.º 118/2013 relativo ao desempenho energético dos edifícios.

DIÁRIO DA REPÚBLICA - DESPACHO 15793 – K/2013. Decreto de Lei n.º 118/2013 relativo ao desempenho energético dos edifícios.

EFLUL - Empresa Força e Luz de Urussanga Ltda. Disponível online em: <http://www.eflul.com.br/>. [Acessado em 8 de outubro de 2020].

EUROPEAN UNION. Disponível online: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/overview>. [Acessado em 19 de outubro de 2019].

EXPOSTI, K. D. Classificação climática de Köppen-Geiger. Disponível online: <https://www.infoescola.com/geografia/classificacao-climatica-de-koppen-geiger/>. [Acessado em 03 de fevereiro de 2020].

FAN, Y., XIA, X. A multi-objective optimization model for energy-efficiency building envelope retrofitting plan with rooftop PV system installation and maintenance. *Applied Energy* Vol. 189, pp 327 – 335, 2017.

FREITAS, F. M. C. Dissertação de mestrado – Construção modular sustentável – propostas de um projeto tipo. Instituto politécnico de Viana do Castelo, 2014.

GONÇALVES, H. GRAÇA, J. M. Conceitos bioclimáticos para os edifícios em

Portugal. DGGE, Lisboa, 2004.

GOULART, S. V. G. Thesis of Doctor of Philosophy – Thermal inertia and natural ventilation: Optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil. Architectural Association School of Architecture of the Open University, 2004.

GRADE, P. S. Dissertação de mestrado – Materiais de mudança de fase em revestimentos. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

INNOVA – Air Tech Instruments. Thermal Comfort, 2002.

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Normais climatológicas. Disponível em <https://www.ipma.pt/>. [Acessado em 03 de fevereiro de 2020].

KALNÆS S. E., JELLE B. P. Phase change materials and products for building applications. *Energy and Buildings*, Vol. 94, pp 150 – 176, 2015.

KIBERT, C. J. Sustainable construction: Green Building Design and Delivery. John Wiley & Sons, 2008

KUZNIK, F., VIRGONE, J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied Energy*, Vol. 86, pp 2038 – 2046, 2009.

LACEY, A. W., et al.. Structural response of modular buildings – An overview. *Journal of Building Engineering*, Vol. 16, pp 45 – 56, 2018.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência energética na arquitetura. São Paulo: PW Editores, 1997.

LAMBERTS, R., *et al.* Conforto e Stress térmico. Centro tecnológico – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

LEAL, R. A. Dissertação de Mestrado – Construção modular em LSF – Estudo do comportamento térmico passivo. Faculdade de ciências e tecnologia da universidade de Coimbra, 2015.

LIN, Z., DENG, S. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics. *Building and Environment*, Vol. 43, pp 905 – 916, 2008.

LONG, X. et al. Thermal performance improvement of lightweight buildings integrated with phase change material: An experimental and simulation study. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, pp 1 – 8, 2017.

LU, N. Dissertation - Investigation of Designers' and General Contractors'

Perceptions of Offsite Construction Techniques in the United States Construction Industry. Clemson University, 2007.

MACROFAL. Ficha técnica de propriedades. Disponível online em: <https://macrofal.pt/pdf/Ficha%20tecnica%20Topox%20SL.pdf> [Acessado em 06 de outubro de 2020].

MANIOGLU, G., YILMAZ, Z. Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort. *Energy and Buildings*, Vol. 38, pp 266 – 272, 2006.

MARQUES, M. Dissertação de Mestrado – Análise comparativa de indicadores metabólicos e do dispêndio energético em dois modelos de aulas de grupo em academias: ginástica aeróbica e ginástica localizada. Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, 2014.

MARTINHO, J. C. Dissertação de Mestrado – Review on thermal energy storage with PCM: Applications for building materials. Faculdade de engenharia da universidade do Porto, 2018.

MATTEIS, V., et al. Nanomaterials and smart nanodevices for modular dry constructions: The project “Easy House”. *Procedia Engineering* Vol. 180, pp 704 – 714, 2017.

MAYOR, W. R. S. Monografia – Sistema construtivo modular. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

MAZZARELLA, L., PASINI, M. CTF vs FD based numerical methods: accuracy, stability and computational time’s comparison. *Energy Procedia*, Vol. 78, pp 2620 – 2625, 2015.

MOLAVI, J., BARRAL, D. L. International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction: A construction procurement method to achieve sustainability in modular construction. *Procedia Engineering*, Vol. 145, pp 1362 – 1369, 2016.

PACHECO, R., ORDÓÑEZ, J., MARTÍNEZ, G. Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp 3559 – 3573, 2012.

PIRES, F. G. A. R. D. Dissertação de mestrado – Sistemas construtivos modulares em madeira. Departamento de engenharia civil da universidade e Aveiro, 2013.

PROJETEEE – Projetando edificações energeticamente eficientes. Disponível em <http://projeteee.mma.gov.br>. [Acessado em 25 de novembro de 2019].

RADHI, H. A systematic methodology for optimising the energy performance of

buildings in Bahrain. *Energy and Building*, Vol. 40, pp 1297 – 1303, 2008.

RAMOS, R. J. H. Dissertação de Mestrado. Desempenho térmico e energético de edifícios de habitação com estrutura metálica leve. Faculdade de ciências e tecnologia da Universidade de Coimbra, 2018.

RODRIGUES, P. M. G. Dissertação de Mestrado – Análise dinâmica do comportamento térmico de edifícios. Universidade de Aveiro, 2012.

SADINENI, S. B., MADALA, S., BOEHM, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp 3617 – 3631, 2011.

SAINT-GOBAIN. Saint-Gobain Building Glass. Disponível online em: <https://pt.saint-gobain-building-glass.com/> [Acessado em 15 de outubro de 2020].

SMURFIT KAPPA. Bag-in-Box®, 2020. Disponível em: <https://www.smurfitkappa.com/> [Acessado em 10 de novembro de 2019].

SOMAPIL. Somapil – Madeiras do mundo. Ficha técnica de propriedades disponível em: <http://www.somapil.com/pt/placas/mdf/mdf-de-alta-densidade> [Acessado em 06 de outubro de 2020].

UNIVERSIDADE DE AVEIRO. Disponível online em: <https://www.ua.pt/pt/noticias/9/64487> [Acessado em 24 de novembro de 2020].

TAVARES, V., LACERDA, N., FREIRE, F. Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The “Moby” case study. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 212, pp 1044 – 1053, 2019.

VALENTE, A. R. P. Dissertação de Mestrado – Desenvolvimento de poliuretanos com desempenho térmico inovador. Departamento de Química da Universidade de Aveiro, 2012.

VARELA, G. F. S. Dissertação de Mestrado – Estudo paramétrico do comportamento térmico de edifícios solares passivos usando PCMs. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, 2015.

VERBEKEA, S., AUDENAERTA, A. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp 2300 – 2318, 2018.

WANG, W. TIAN, Z. DING, Y. Investigation on the influencing factors of energy consumption and thermal comfort for a passive solar house with water thermal storage wall. *Energy and Buildings*, Vol. 64, pp. 218 – 223, 2013.

YAMAHA. Disponível online em: <https://europe.yamaha.com/>. [Acessado em 08

de outubro de 2020].

ZHANG, Y., et al. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 2197 – 2209, 2007.

Apêndice A – Resultados dos estudos paramétricos

Resultado do estudo paramétrico para Lisboa, Escritório, Estendido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
LEEB0	146,49	76,13	330,36
LEEW1	100,42	52,17	259,92
LEEW2	90,94	45,45	243,65
LEEW3	87,24	45,15	239,71
LEEF1	124,77	63,71	296,06
LEEF2	118,63	57,83	283,97
LEEF3	116,83	56,03	280,40
LEEB1	93,34	48,62	249,22
LEEB2	84,39	43,84	235,43
LEEB3	80,33	45,44	233,05

Resultado do estudo paramétrico para Lisboa, Escritório, Reduzido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
LERB0	56,06	12,58	127,61
LERW1	43,18	22,00	121,29
LERW2	37,17	26,42	118,42
LERW3	33,94	30,05	118,51
LERF1	50,22	15,32	123,79
LERF2	45,37	16,90	119,67
LERF3	42,67	17,95	117,70
LERB1	41,35	23,93	120,16
LERB2	35,24	29,23	118,18
LERB3	31,78	34,09	119,32

Resultado do estudo paramétrico para Helsínquia, Escritório, Estendido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
HEEB0	62,11	154,01	326,15
HEEW1	48,59	159,29	317,59
HEEW2	46,46	161,31	317,50
HEEW3	45,49	162,68	317,87
HEEF1	54,17	154,03	318,00
HEEF2	53,51	154,07	317,36
HEEF3	53,03	153,93	316,74
HEEB1	47,06	160,93	317,69
HEEB2	45,02	163,64	318,38
HEEB3	43,90	165,97	319,59

Resultado do estudo paramétrico para Helsínquia, Escritório, Reduzido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
HERB0	42,23	144,60	245,89
HERW1	37,24	147,80	240,62
HERW2	34,41	148,24	237,08
HERW3	32,57	148,87	235,49
HERF1	40,82	145,43	244,88
HERF2	38,48	144,42	240,56
HERF3	37,14	144,22	238,72
HERB1	36,71	147,79	239,08
HERB2	33,86	148,47	235,90
HERB3	31,86	149,21	234,28

Resultado do estudo paramétrico para Lisboa, Dormitório U., Estendido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
LDEB0	135,30	30,47	334,64
LDEW1	105,29	30,92	274,09
LDEW2	97,10	32,65	264,43
LDEW3	92,62	36,91	263,56
LDEF1	119,64	32,02	300,64
LDEF2	112,86	31,48	289,45
LDEF3	109,57	32,14	286,10
LDEB1	101,57	30,18	267,49
LDEB2	93,47	33,21	259,99
LDEB3	88,25	39,49	260,28

Resultado do estudo paramétrico para Lisboa, Dormitório U., Reduzido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
LDRB0	44,51	69,58	190,48
LDRW1	35,66	70,85	168,10
LDRW2	30,77	77,32	164,64
LDRW3	28,04	84,52	167,87
LDRF1	41,20	65,43	179,82
LDRF2	37,16	67,27	173,69
LDRF3	34,80	69,71	172,47
LDRB1	34,26	72,49	164,46
LDRB2	29,48	80,24	163,24
LDRB3	26,54	89,57	168,63

Resultado do estudo paramétrico para Helsínquia, Dormitório U., Estendido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
HDEB0	94,17	220,63	486,59
HDEW1	66,36	200,18	407,11
HDEW2	61,71	196,98	395,63
HDEW3	59,82	197,79	393,64
HDEF1	75,84	208,67	433,49
HDEF2	70,51	204,06	418,62
HDEF3	69,32	204,62	416,82
HDEB1	63,30	196,25	396,61
HDEB2	59,40	193,73	387,60
HDEB3	57,44	194,68	385,66

Resultado do estudo paramétrico para Helsínquia, Dormitório U., Reduzido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
HDRB0	43,69	250,31	369,77
HDRW1	32,88	234,92	325,65
HDRW2	30,21	231,50	315,70
HDRW3	28,64	231,44	312,97
HDRF1	39,20	243,52	351,47
HDRF2	35,11	238,54	336,41
HDRF3	33,33	236,83	330,98
HDRB1	31,89	231,27	318,46
HDRB2	29,44	227,05	308,38
HDRB3	27,80	227,04	305,81

Resultado do estudo paramétrico para Lisboa, Ginásio, Estendido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
LGEB0	520,08	7,26	578,49
LGEW1	496,78	0,54	547,07
LGEW2	493,91	0,25	543,85
LGEW3	494,71	0,20	544,97
LGEF1	506,98	2,62	559,76
LGEF2	502,51	1,48	553,77
LGEF3	501,47	1,22	552,42
LGEB1	492,92	0,31	542,70
LGEB2	488,98	0,13	538,35
LGEB3	489,50	0,10	539,30

Resultado do estudo paramétrico para Lisboa, Ginásio, Reduzido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
LGRB0	196,09	3,04	243,53
LGRW1	196,16	0,31	236,97
LGRW2	188,79	0,19	227,71
LGRW3	184,22	0,17	222,56
LGRF1	197,36	0,93	242,02
LGRF2	191,18	0,55	234,51
LGRF3	186,89	0,45	229,76
LGRB1	197,08	0,23	236,49
LGRB2	189,18	0,14	225,81
LGRB3	184,47	0,12	220,38

Resultado do estudo paramétrico para Helsínquia, Ginásio, Estendido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
HGEB0	189,42	129,32	373,05
HGEW1	185,87	127,23	365,68
HGEW2	183,24	127,47	363,08
HGEW3	182,32	128,56	363,30
HGEF1	180,84	125,04	358,69
HGEF2	188,30	126,37	366,75
HGEF3	187,24	126,08	365,31
HGEB1	183,66	125,86	361,15
HGEB2	180,50	125,62	357,14
HGEB3	179,46	126,94	357,41

Resultado do estudo paramétrico para Helsínquia, Ginásio, Reduzido

Modelo	Arrefecimento (kWh/m ²)	Aquecimento (kWh/m ²)	Energia total (kWh/m ²)
HGRB0	120,43	116,66	265,49
HGRW1	106,32	102,42	232,72
HGRW2	104,27	101,86	229,60
HGRW3	101,24	101,66	226,39
HGRF1	110,90	107,37	243,91
HGRF2	108,60	106,29	240,24
HGRF3	107,87	106,63	239,93
HGRB1	104,58	99,31	226,96
HGRB2	102,57	98,98	224,17
HGRB3	101,58	100,48	224,64

Apêndice B – Análise de incerteza da temperatura de *output*

Temperaturas de *output* para o verão, modelos com maior inércia térmica

Modelo	Temp. média (°C)	Desvio padrão	Intervalo de confiança		Limite superior (°C)	Limite inferior (°C)
			Absoluto	%		
HGRB3	17,8	0,14	0,05	0,29%	17,9	17,7
HGEB3	17,6	0,21	0,04	0,24%	17,6	17,6
LGRB3	16,1	0,35	0,13	0,81%	16,3	16,0
LGEB3	17,2	0,22	0,04	0,26%	17,2	17,2
HEEB3	26,0	0,12	0,03	0,12%	26,1	26,0
HERB3	25,0	0,15	0,05	0,22%	25,1	25,0
LEEB3	25,5	0,27	0,07	0,26%	25,6	25,5
LERB3	25,1	0,36	0,13	0,53%	25,2	24,9
HDEB3	25,5	0,26	0,05	0,18%	25,5	25,4
HDRB3	26,1	0,25	0,05	0,20%	26,1	26,0
LDEB3	25,1	0,24	0,04	0,17%	25,2	25,1
LDRB3	25,7	0,23	0,05	0,19%	25,8	25,7

Temperaturas de *output* para o inverno, modelos com maior inércia térmica

Modelo	Temp. média (°C)	Desvio padrão	Intervalo de confiança		Limite superior (°C)	Limite inferior (°C)
			Absoluto	%		
HGRB3	14,0	0,19	0,07	0,51%	14,0	13,9
HGEB3	13,7	0,26	0,05	0,37%	13,7	13,6
LGRB3	15,7	0,37	0,14	0,88%	15,8	15,6
LGEB3	15,4	0,46	0,09	0,59%	15,5	15,4
HEEB3	24,5	0,41	0,10	0,41%	24,6	24,4
HERB3	25,7	0,42	0,16	0,61%	25,8	25,5
LEEB3	23,6	0,44	0,11	0,46%	23,7	23,5
LERB3	24,0	0,43	0,16	0,67%	24,1	23,8
HDEB3	24,2	0,23	0,04	0,17%	24,3	24,2
HDRB3	26,4	0,33	0,07	0,27%	26,5	26,4
LDEB3	23,3	0,33	0,06	0,25%	23,4	23,3
LDRB3	25,4	0,29	0,06	0,25%	25,4	25,3