



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Simulações de conforto térmico de uma edificação histórica utilizando os softwares Rhinceros 3D e Grasshopper – caso de estudo do Museu Nacional Grão Vasco

Gustavo Bonfim Jodas

Dissertação

Mestrado em Engenharia da Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida
Professora Doutora Paola Regina Dalcanal

Dezembro de 2024



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Simulações de conforto térmico de uma edificação histórica utilizando os softwares Rhinoceros 3D e Grasshopper – caso de estudo do Museu Nacional Grão Vasco

Gustavo Bonfim Jodas

Dissertação

Mestrado em Engenharia da Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida
Professora Doutora Paola Regina Dalcanal

Dezembro de 2024

**Simulações de conforto térmico de uma edificação histórica
utilizando os softwares Rhinoceros 3D e Grasshopper – caso de
estudo do Museu Nacional Grão Vasco**

Gustavo Bonfim Jodas

Dissertação

Mestrado em Engenharia da Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sobre a orientação de

Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida

Professora Doutora Paola Regina Dalcanal

Dezembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer muito a minha família por estar sempre presente do meu lado e me ajudar chegar até aqui. Nomeadamente a minha avó Leonice, meu irmão João, minha bisavó Maria, minha mãe Sueli, minha irmã Maria Fernanda, minha tia Sandra e meu primo Samuel. Todos sempre me incentivaram e deram todo o apoio para conseguir chegar onde estou hoje.

Aos meus amigos e colegas Nicolly, Jorge, Gabriela, José, Laura, Miguel, Juliane, Francesca, Catarina, Valentina e todos os que tive contato durante a universidade tanto no Brasil como em Portugal, Ouroeste, Pato Branco e Viseu e que mesmo que de uma pequena maneira, mudaram minha trajetória a tornando mais proveitosa.

Gostaria de agradecer a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) por me tornar uma melhor pessoa e um profissional, em especial aos professores Gustavo Lacerda, Paola Regina Dalcanal, Elizângela Siliprandi e Murilo Cesar Lucas que contribuíram muito para a minha formação e desenvolvimento.

Ademais tenho muito a agradecer ao Instituto Politécnico de Viseu (IPV) pelo acolhimento e todo o apoio prestado, principalmente pelo professor Dr. Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida que sempre auxiliou durante todo este percurso da dissertação.

Muito obrigado a todos que tiveram comigo nessa jornada!!!

RESUMO

A conservação de edificações históricas é fundamental para preservar a cultura entre gerações. Nos novos edifícios, o uso de software de simulação tornou-se comum, permitindo projetos mais eficientes em termos energéticos e de conforto para os utilizadores. No entanto, para edifícios existentes, esses programas ainda não são amplamente utilizados, apesar da crescente necessidade de reabilitação.

Foi caracterizado o desempenho atual do edifício e analisados cenários de intervenções de reabilitação, designadamente a substituição dos envidraçados originais (vidro simples incolor) por vidro simples laminado e vidro duplo de baixa emissividade. O vidro duplo de baixa emissividade apresentou o melhor desempenho, reduzindo a temperatura média interna e diminuindo significativamente os períodos de desconforto térmico por sobreaquecimento durante o período de verão, contribuindo tanto para o conforto dos ocupantes, quanto para a preservação do acervo.

Outro aspeto analisado no modelo foi o impacto da estratégia de ventilação, através de alterações no parâmetro de Renovações Por Hora (RPH). Testaram-se três cenários: 1 RPH constante ao longo do dia, 2 RPH constantes ao longo do dia e, por fim, um cenário com variação entre 1 e 2 RPH ao longo do dia. O cenário com 2 RPH constantes apresentou a maior redução da temperatura média interna e uma considerável redução no período de desconforto por sobreaquecimento. O impacto da ventilação na simulação mostrou ter um maior impacto do que a troca dos envidraçados. Ainda assim também foram simuladas combinações dos diferentes envidraçados com os cenários de ventilação.

Por fim, comparam-se os valores obtidos nas simulações com os limites de temperatura indicados para a conservação dos acervos do museu estabelecidos pela norma da ASHRAE (2017). Tanto nas simulações como nas medições reais verificou-se que, no período analisado (junho a setembro), as temperaturas excederam os limites recomendados pela norma em mais de 60% do tempo, tanto para a situação inicial como após as propostas de intervenção.

Palavras-chave: Conforto térmico; Simulações computacionais; Edifício histórico.

ABSTRACT

The conservation of historic buildings is crucial to preserving culture across generations. In new buildings, the use of simulation software has become common, allowing for more energy-efficient designs that enhance user comfort. However, for existing buildings, these programs are still not widely used, despite the growing need for rehabilitation.

The current performance of the building was characterized, and rehabilitation intervention scenarios were analyzed, specifically the replacement of the original glazing (colorless single-glass) with laminated single glass and low-emissivity double glazing. The low-emissivity double glazing performed the best, reducing the average internal temperature and significantly decreasing periods of thermal discomfort due to overheating during the summer, contributing both to occupant comfort and the preservation of the collection.

Another aspect analyzed in the model was the impact of the ventilation strategy, through changes in the Air Changes per Hour (ACH) parameter. Three scenarios were tested: 1 ACH constant throughout the day, 2 ACH constant throughout the day, and finally, a scenario with a variation between 1 and 2 ACH throughout the day. The scenario with a constant 2 ACH showed the greatest reduction in average internal temperature and a significant decrease in the period of overheating discomfort. The impact of ventilation in the simulation proved to have a greater effect than the glazing replacement. Nonetheless, combinations of different glazing types with ventilation scenarios were also simulated.

Finally, the values obtained in the simulations were compared with the temperature limits set for the preservation of museum collections according to the ASHRAE (2017) standard. Both the simulations and real measurements showed that, during the analyzed period (June to September), the temperatures exceeded the recommended limits by the standard for more than 60% of the time, both in the initial situation and after the proposed interventions.

Keywords: Thermal comfort; Computational simulations; Historical building.

Sumário

ÍNDICE DE TABELAS / QUADROS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE SIGLAS / ABREVIATURAS.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos da investigação.....	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. Património histórico.....	5
2.2. Conforto térmico.....	6
2.2.1. Simulações de conforto térmico.....	7
2.2.2. Método adaptativo para a avaliação do conforto térmico.....	8
2.3. Vãos envidraçados.....	10
2.4. Influência solar.....	11
2.5. Ventilação.....	13
2.6. Considerações sobre o desempenho dos museus.....	14
2.6.1 Enquadramento.....	14
2.6.2 Conservação de acervos de museus.....	14
3. ESTRATÉGIA DE MODELAÇÃO.....	18
3.1. Estudo de caso – Museu Nacional Grão Vasco.....	18
3.2. Programas informáticos.....	21
3.2.1. Rhinoceros 3D.....	21
3.2.2. Grasshopper.....	22
3.2.3. Ladybug tools.....	25
• Ladybug.....	26
• HoneyBee.....	27
3.3. Abordagem metodológica.....	29
4. CRIAÇÃO DO MODELO.....	32
4.1. Modelação da geometria.....	32
4.2. Caracterização dos materiais.....	35
4.3. Ganhos internos e ventilação.....	40
4.4. Criação do <i>HB Model</i>	45
4.5. Importação dos dados climáticos.....	47
4.6. Obtenção dos resultados.....	49

4.7.	Medição das condições ambientais interiores.....	50
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
5.1.	Comparação temperatura interna medida e simulada.....	52
5.2.	Simulações da temperatura interna após a troca dos envidraçados	55
5.3.	Impacto da troca de envidraçados no conforto térmico	59
5.4.	Análise do impacto da ventilação no modelo.....	62
5.5.	Comparativo com métricas para conservação dos acervos.....	68
6.	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

ÍNDICE DE TABELAS / QUADROS

Tabela 1: Limites para categorias da norma EN16798-2 (Adaptado de EN16798-2, 2019).....	10
Tabela 2: Especificações de parâmetros de temperatura e humidade relativa para museus, galerias de arte, bibliotecas e arquivos (ASHRAE, 2017).....	16
Tabela 3: Consequências de valores muito altos ou muito baixos de temperatura e humidade relativa (Adaptado de Ferreira, 2015).....	17
Tabela 4: Valores de densidade e calor específico para os elementos (Adaptado de Santos e Matias, 2006 e Mendonça, 2005).....	36
Tabela 5: Características dos vidros utilizados no modelo (Adaptado de Sorgato et al., 2014).....	38
Tabela 6: Comparação dos valores médios de temperatura da simulação inicial com a medição real.....	54
Tabela 7: Dados obtidos comparando as soluções de envidraçados.....	58
Tabela 8: Comparação dos valores de desconforto com soluções de envidraçados.....	61
Tabela 9: Comparação dos valores médios de temperatura com soluções diferentes de envidraçados e ventilação.....	62
Tabela 10: Comparação dos valores de desconforto com a utilização do VS e alteração na ventilação.....	64
Tabela 11: Comparação dos valores de desconforto com a utilização do VSL e alteração na ventilação.....	67
Tabela 12: Comparação dos valores de desconforto com a utilização do VDBE e alteração na ventilação.....	67
Tabela 13: Valores do risco de sobreaquecimento para a situação medida e as simuladas.....	69
Tabela 14: Reduções do risco de sobreaquecimento para as simulações realizadas.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico do modelo adaptativo para a análise de conforto térmico (EN 16798-2, 2019)..	9
Figura 2: Mapa da radiação direta em Portugal (Solargis, 2024).....	12
Figura 3: Localização do Museu Nacional Grão Vasco (Google Maps, 2024).....	20
Figura 4: Imagens do Museu Nacional Grão Vasco.....	20
Figura 5: Parte aberta no meio da edificação (Google Maps, 2024).....	21
Figura 6: Interface do software Rhinoceros 3D.....	22
Figura 7: Ilustração de programação tradicional x programação visual.....	23
Figura 8: Interface do Grasshopper.....	23
Figura 9: Estrutura dos elementos do Grasshopper (Adaptado de Bazafkan, 2017).....	24
Figura 10: Criação de pisos paramétricos (adaptado de Machado, 2018).....	25
Figura 11: Ferramentas do Ladybug (Ladybug Tools, 2024).....	26
Figura 12: Exemplos de aplicação do Ladybug (adaptado de Bazafkan, 2017).....	27
Figura 13: Potencialidades do Ladybug (Ladybug Tools, 2024).....	27
Figura 14: Exemplos de aplicação do Honeybee (adaptado de Bazafkan, 2017).....	29
Figura 15: Ferramentas do HoneyBee (Ladybug Tools, 2024).....	29
Figura 16: Fluxograma para a criação do HB Model.....	31
Figura 17: Nuvem de pontos do Museu Nacional Grão Vasco.....	32
Figura 18: Importação da nuvem de pontos diretamente para o Rhinoceros 3D.....	33
Figura 19: Colocação da nuvem de pontos no Revit com modelação da envolvente e vãos.....	33
Figura 20: Ilustração de um “Room” do modelo geométrico.....	34
Figura 21: Geometria do Museu Nacional Grão Vasco no Rhinoceros 3D.....	34
Figura 22: Localização dos “Rooms” do modelo considerando seu sentido geográfico.....	35
Figura 23: Parametrização da envolvente de granito.....	37
Figura 24: Parametrização do piso em betão.....	37
Figura 25: Criação do telhado utilizado no modelo.....	38

Figura 26: Parametrização do (a) vidro simples incolor, (b) vidro simples laminado e (c) vidro duplo de baixa emissividade utilizada no modelo.....	39
Figura 27: Criação do modelo de construção do museu.....	40
Figura 28: Porcentagens horárias para a ocupação de pessoas.....	41
Figura 29: Criação do programa de ocupação de pessoas.....	41
Figura 30: Porcentagens horárias para a iluminação.....	42
Figura 31: Criação do programa de iluminação.....	42
Figura 32: Porcentagens horárias para equipamentos elétricos.....	43
Figura 33: Criação do programa dos equipamentos elétricos.....	43
Figura 34: Criação de programa de ventilação para (a) 1 RPH constante, (b) 2 RPH constante, (c) 1 e 2 RPH variando durante o dia.....	44
Figura 35: Criação dos “Rooms”.....	45
Figura 36: Funcionalidades para resolver problemas de intersecção dos “Rooms”.....	46
Figura 37: Aplicação de portas e janelas no modelo.....	46
Figura 38: Ferramenta para pesquisar os dados climáticos das localidades.....	47
Figura 39: Mapa das localidades com dados climáticos disponíveis (Ladybug Tools, 2024).....	47
Figura 40: Escolha da localidade do caso de estudo (Ladybug Tools, 2024).....	48
Figura 41: Aplicação da URL da localidade para baixar os dados climáticos.....	48
Figura 42: Importação do ficheiro EPW local e respetivos parâmetros climáticos.....	49
Figura 43: Passos para a simulação do modelo.....	50
Figura 44: Criação da simulação.....	50
Figura 45: Localização dos sensores.....	51
Figura 46: Variação da temperatura exterior a partir do fiheiro climático e medida no local.....	52
Figura 47: Variação da temperatura no Room 3 x Sensor 1.....	53
Figura 48: Variação da temperatura no Room 12 x Sensor 2.....	53
Figura 49: Variação da temperatura no Room 8 x Sensor 3.....	54
Figura 50: Variação da temperatura no Room 5 x Sensor 4.....	54

Figura 51: Variação da temperatura no Room 12 para analisando (a) todo o período e (b) apenas um dia.....	56
Figura 52: (a) comparação entre a temperatura de vidro simples x vidro simples laminado; (b) comparação entre vidro simples e vidro duplo de baixa emissividade.....	57
Figura 53: Temperatura operativa do “Room” 12 com vidro simples para o período analisado....	59
Figura 54: Conforto adaptativo do Room 12 com (a) vidro simples incolor, (b) vidro laminado simples e (c) vidro duplo de baixa emissividade.....	60
Figura 55: Conforto adaptativo do Room 12 com (a) vidro simples e 2 RPH (b) vidro simples e 1/2 RPH.....	63
Figura 56: Conforto adaptativo do Room 12 com (a) vidro simples laminado e 2 RPH (b) vidro simples laminado e 1/2 RPH.....	65
Figura 57: Conforto adaptativo do Room 12 com (a) vidro duplo de baixa emissividade e 2 RPH (b) vidro duplo de baixa emissividade e 1/2 RPH.....	66
Figura 58: Comparação dos cenários de envidraçados para a conservação do acervo durante todo o período.....	68
Figura 59: Comparação dos cenários de envidraçados para a conservação do acervo em um dia..	69
Figura 60: Comparação dos cenários de ventilação para a conservação do acervo com (a) VS, (b) VSL e (c) VDBE.....	71

LISTA DE SIGLAS / ABREVIATURAS

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

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

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado

CO₂ – Dióxido de carbono

RPH – Renovações por Hora

UE – União Europeia

VDBE – Vidro Duplo de Baixa Emissividade

VS – Vidro Simples Incolor

VSL – Vidro Simples Laminado

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As exigências crescentes na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) estão cada vez mais relacionadas com o impacto do setor no meio envolvente e com as condições de conforto proporcionadas aos usuários da edificação. Nesse sentido, os profissionais da AEC que projetam os edifícios estão adotando práticas que, por vezes, vão além das prescrições regulamentares, visando estabelecer critérios e parâmetros para construções energeticamente eficientes e confortáveis (Machado, 2018).

Segundo Artola et al. (2016), na União Europeia (UE), o setor da AEC é responsável por cerca de 40% do consumo de energia primária, 55% do consumo de eletricidade e 36% das emissões de dióxido de carbono (CO₂). De acordo com os dados da Direção-Geral de Energia e Geologia (DGES), o setor de edifícios é responsável pelo consumo de aproximadamente 40% da energia final na Europa e 30% em Portugal. Ainda assim, para a entidade, esse consumo pode ser reduzido até 50% através de medidas de eficiência energética que, na prática, resultaria numa diminuição anual de emissões em torno de 400 milhões de toneladas de CO₂.

Para as edificações já existentes, que muitas vezes não foram projetadas tendo em conta as exigências das legislações atualmente vigentes na procura de uma construção mais eficiente e confortável térmica e energeticamente, a sua preservação e garantia de longevidade requer uma abordagem específica, que pode ser particularmente complexa no caso dos edifícios classificados ou reconhecidos como património histórico e cultural. Dessa maneira, é importante que se criem condições e soluções para a devida proteção do legado, ao mesmo tempo que se promove a eficiência energética e o conforto nestes espaços, garantindo que as futuras gerações tenham acesso a uma herança histórica conservada, com o objetivo de enriquecer sua compreensão da história da humanidade (Mendes, 2019).

Para a conceção de novos edifícios podem ser utilizados programas computacionais que avaliam a eficiência energética e o conforto térmico, permitindo uma análise global da construção, quer na fase do projeto, quer na construção. Estas ferramentas permitem ter em conta aspetos como a importância das características construtivas da envolvente dos edifícios, a eficiência dos sistemas de climatização e iluminação e o

impacto das práticas de uso do edifício, entre outros. Estes parâmetros podem resultar de imposições de regulamentações governamentais, normas técnicas e códigos de construção voltados para edifícios eficientes, juntamente com campanhas educativas direcionadas tanto aos profissionais da construção civil quanto aos usuários dos edifícios.

A utilização de programas e softwares não se deve limitar aos edifícios novos. Cada vez mais é necessário que haja investimentos em projetos de reabilitação do edificado existente. Segundo Rocha (2009), a reabilitação é um processo de modernização das edificações, com o objetivo de torná-las contemporâneas, com a ideia de valorizar o edifício existente e melhorar suas características e condições de utilização, face às exigências e expectativas atuais dos utilizadores.

No caso específico dos museus portugueses, segundo Ferreira (2015), muitos se encontram em edifícios antigos, apresentando assim mais particularidades face aos mais novos. Nestes espaços, para além das análises termo-energéticas buscando o melhor conforto das pessoas e do espaço em geral, é ainda mais fundamental garantir a preservação e conservação das peças de arte, fortemente dependentes de um elevado controlo e garantia de estabilidade dos parâmetros ambientais como a temperatura e a humidade relativa.

Essa dissertação tem como principal objetivo contribuir para uma compreensão da utilização e do potencial de ferramentas de modelação e simulação para que se possa obter uma análise de conforto de edifícios existentes, apoiando-se num caso de estudo de um edifício classificado como património histórico, mais especificamente o do Museu Nacional Grão Vasco, localizado na cidade de Viseu. O trabalho inclui a avaliação através de simulação das condições atuais de funcionamento e desempenho e ainda a análise de propostas de melhoria através do seu impacto no aumento da conservação tanto da edificação como das obras de artes, buscando uma maior longevidade, conforto e eficiência.

1.2 Objetivos da investigação

O objetivo principal deste estudo é a análise do comportamento do conforto térmico para uma edificação existente que apresenta um legado histórico e cultural, nomeadamente para o Museu Nacional Grão Vasco, utilizando-se ferramentas atuais de simulação.

Assim, para a análise do edifício são utilizadas ferramentas de modelação tridimensional, de análise termo energética e de conforto, ligadas através de programação visual. Pretende-se que este trabalho contribua para a demonstração e disseminação junto dos profissionais da indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) de um procedimento que permite não só compreender a importância do estudo das edificações, mas também analisar o impacto de diversos fatores e cenários que influenciam a construção, num contexto de edifícios históricos com valor patrimonial.

Para isso são feitas simulações para que se obtenha dados da situação atual do edifício, conforme suas características geométricas, propriedades dos materiais presentes nos elementos do mesmo, sistemas e modos de operação, e características do clima local. São ainda realizadas comparações com dados obtidos a partir de medições realizadas no interior do edifício para a obtenção de uma melhor análise e propor algumas possíveis soluções para mitigar os problemas detetados, com enfoque no conforto térmico do espaço numa lógica de conservação do acervo do museu.

Para além disso, outro objetivo não menos importante é o compartilhamento de conhecimento acerca do software utilizado, visando explorar as potencialidades e limitações destas ferramentas, abordando conceitos que influenciam o comportamento térmico dos edifícios, como a sua geometria, a orientação das fachadas, o impacto dos envidraçados, os ganhos internos, e a ventilação, entre outros.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação apresenta 6 capítulos. No primeiro é feita uma introdução, com uma abordagem geral da problemática envolvida e com a presença dos objetivos e da estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é realizada a revisão da literatura, em que se comporta diversos subcapítulos. O objetivo deste é trazer pesquisas e dados previamente estudados acerca do assunto que será discutido na dissertação, como a definição de património histórico, evolução da preocupação com a conservação dos acervos em museus e as metodologias e conceitos para a análise do conforto térmico.

Para o capítulo 3 reserva-se a demonstração a metodologia abordada para a dissertação, com a explicação dos softwares, programas utilizados no caso de estudo e a consequente abordagem metodológica.

No capítulo 4 é apresentada a caracterização da edificação com os parâmetros admitidos para a criação do modelo no software utilizado, abordando a criação geométrica, da caracterização dos materiais e dos programas energéticos, importação dos dados climáticos e as ferramentas utilizadas para a obtenção dos resultados.

O capítulo 5 apresenta uma discussão das simulações e comparações de dados, buscando comparar os dados de temperatura reais obtidos em campo com os dados do software, também comparar o comportamento da mesma com os diversos cenários propostos, nomeadamente as trocas dos envidraçados e a alteração de parâmetro da ventilação, trazer uma abordagem para a análise de conforto das pessoas e, finalizando, verificar a influência da temperatura na conservação do acervo do museu.

A finalização da dissertação é abordada no capítulo 6, trazendo um panorama geral do que foi apresentado e as conclusões e ensinamentos retirados com o caso de estudo e possibilidades de trabalhos futuros e melhorias pertinentes a serem desenvolvidas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Património histórico

A identidade cultural de um país mostra-se na criação e preservação de elementos materiais e imateriais produzidos pela sociedade ao longo do tempo, sendo eles expressões duradouras da história da nação (Consini, Martins & Japur, 2020). O património histórico é um bem muito valioso para a sociedade, fazendo parte de sua cultura e identidade e, dessa forma, necessita de ser preservado. Ele carrega uma essência crucial da humanidade pois representa as ações humanas ao longo da história, havendo uma materialização dessa trajetória ao longo do tempo. Os prédios e edifícios históricos representam um dos legados mais significativos de Portugal sendo que, para além do próprio valor do edifício, eles geralmente possuem um conjunto de móveis historicamente e artisticamente valiosos, que vão além do seu valor económico, sendo especialmente importantes pelo seu valor simbólico cultural que representam (Machado & Magalhães, 2016).

Segundo Virgolino (2000) a conservação do património é considerada um modo de defesa global do ambiente, incluindo preocupações com os espaços naturais e com os coletivos, que foram desenhados pelo ser humano ao longo da história. Ainda assim, a preservação do património remete para a manutenção de uma identidade, que, segundo Cruz (1993), é um processo de identificações históricas que conferem sentido a um determinado grupo, resultando num sentimento de pertença. Ademais, a documentação histórica arquitetónica é um instrumento fundamental para a realização de ações no património (Groetelaars, 2015). Segundo Rodrigues e Agostinho (2020), o património cultural passou mudanças de significados ao longo do tempo, resultado de várias reflexões que desenvolveram o olhar para a importância da conservação dos mesmos.

Em Portugal, uma das primeiras legislações acerca da proteção de monumentos nacionais foi emitida pelo rei D. João V, que governou Portugal entre 1706 à 1750, que em 20 de agosto de 1721 estabeleceu que ninguém poderia demolir ou destruir qualquer edifício que demonstrasse antiguidade, mesmo que estivesse parcialmente em ruínas (Silva, 1988). Após isso, o rei D. Fernando II ordenou a restauração de algumas antigas estruturas, como as Sés de Lisboa e Coimbra e os conventos da Batalha, Tomar e Mafra, além da Torre de Belém, demonstrando já uma preocupação com esse tipo de edificação com carácter histórico.

Após este período, há o marco inicial para o inventário dos monumentos portugueses, remontando a uma Portaria de 10 de dezembro de 1880, em que se estabelecem critérios de classificação dos imóveis, e, à definição de monumentos nacionais, em 1901 e, posteriormente, a divulgação da sua lista inicial no ano de 1907. Com isso, até à promulgação da Lei nº 13/85, de 6 de Julho, conhecida como Lei do Património Cultural Português, a preservação e conservação dos bens culturais e naturais do país não apresentava uma normativa definida, sendo muitas vezes um conteúdo genérico e ambíguo (Rodrigues & Lima, 1992). É importante mencionar a criação da Direcção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais, em 1929, assim como leis que abordaram questões específicas, como o património artístico e arqueológico em 1932, as atribuições dos concelhos sobre o património cultural no ano de 1949, a definição e classificação de reservas e parques naturais em 1976, entre outras regulamentações até o início da década de 1980 (Virgolino, 2000).

2.2. Conforto térmico

O conforto térmico refere-se ao estado de satisfação que as pessoas possuem com o ambiente térmico no qual estão inseridas, sendo, portanto, uma sensação subjetiva variando para cada pessoa. Dessa forma, quando se procura criar um ambiente confortável para um grupo, a estratégia é proporcionar uma sensação de bem-estar para o maior número possível de pessoas do mesmo grupo (Ruas, 1999). Segundo Humphreys (1976), a temperatura em que as pessoas se sentem confortáveis também varia em função da temperatura média exterior do local de estudo, tornando a análise ainda mais complexa.

Para determinar que uma pessoa se encontra em conforto térmico é necessário que esta se encontre num ambiente em que esteja em neutralidade térmica, ou seja, o balanço térmico deve ser próximo de zero. Nesta situação, a pessoa não prefere um ambiente nem mais quente nem mais frio, e apresenta uma temperatura superficial da pele e um nível de secreção de suor em um limite correspondente à atividade exercida no momento e não sente nenhum desconforto localizado.

Para a análise do conforto térmico de um indivíduo é necessário considerar alguns fatores, nomeadamente a taxa metabólica das pessoas no ambiente, a quantidade de vestuário e respetiva resistência térmica, a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a velocidade do ar e a humidade relativa (Germiniani, 2023; Pinto, 2006).

Yang et al. (2014) ainda aponta que alguns fatores adicionais como a cultura, religião, educação e experiência podem condicionar a análise de conforto térmico. Um bom exemplo é um caso de estudo em que pessoas com um contato mais regular com espaços exteriores, em que há uma maior influência da ventilação natural, torna-as mais tolerantes às variações da temperatura, em comparação com pessoas que ficam constantemente em ambientes climatizados (Kuchen et al, 2011).

Lorsch e Abdou (1994) refere que, para se atingir um certo grau de conforto térmico, é normalmente utilizado o condicionamento artificial da temperatura. No entanto essa abordagem entra em conflito com as questões de sustentabilidade, sobretudo as preocupações sobre consumo sustentável de energia e conservação de recursos.

2.2.1. Simulações de conforto térmico

Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2017), a simulação computacional das edificações tem como finalidade a criação de um modelo virtual para prever os consumos, analisar as soluções térmicas e energéticas, prever índices de conforto térmico, verificar as emissões de gás carbônico e até calcular o período de retorno de um determinado investimento ao longo da vida útil da construção.

Segundo Santos (2012), para as simulações térmicas nos softwares, como por exemplo o Energy Plus, as informações a serem inseridas na simulação incluem a modelação geométrica da edificação, tipo de construção e atividade, características dos materiais, presença de sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), ganhos internos devido à presença de pessoas e/ou equipamentos e os dados climáticos do local.

Um fator muito importante para se levar em consideração nas análises de conforto térmico é efeito dos ganhos internos que, de acordo com Pinto (2004), podem ser definidos como:

“Os ganhos térmicos internos correspondem ao calor libertados pelos ocupantes, eletrodomésticos, iluminação e todas as fontes de calor situadas no interior, excetuando os equipamentos de aquecimento, fogão esquentador e aparelhos a gás ligados a condutas de evacuação. Os ganhos térmicos internos correspondem a um valor médio ao longo das 24 horas do dia e de toda a estação de aquecimento”

Dessa forma, é essencial a definição de ganhos internos para uma análise mais precisa do modelo e com uma melhor representação da realidade.

Segundo Siqueira et al. (2005), para a avaliação do desempenho térmico e energético da edificação é fundamental se ter acesso a alguns dados climáticos como por exemplo: a temperatura do ar exterior, a humidade relativa do ar, a direção e a velocidade do vento e a radiação solar, sendo importante que se tenha valores horários para esses dados.

O conceito de temperatura operativa é muito utilizado pela comunidade científica nas análises de conforto térmico. A temperatura operativa, segundo a ISO 7730 (2005), é a temperatura uniforme em um ambiente, podendo ser determinada a partir da temperatura do ar, da temperatura radiante média e da velocidade do ar.

Para Ruas (2002) a avaliação do conforto térmico é uma ferramenta importante que, ao ser utilizada em conjunto com programas de simulação de desempenho térmico, permite que se ajuste melhor o projeto dos edifícios ao clima local e às atividades desempenhadas, identificando e solucionando problemas decorrentes do projeto, da construção ou da manutenção do edifício. Ainda segundo Gonçalves, Moura & Kuniochi (2015), as simulações computacionais de conforto para as edificações são melhores adaptadas quando estão inseridas em um contexto climático em que o programa de simulação utiliza um ficheiro climático específico do local em que se encontra a construção.

Dessa maneira a simulação de conforto de uma edificação é uma forma de se representar a realidade com a simplificação de um modelo, reduzindo a uma menor quantidade de elementos representada e permitindo analisar o comportamento através de mudança nas variáveis (Lopes, 2020).

2.2.2. Método adaptativo para a avaliação do conforto térmico

Para este estudo será utilizado o modelo adaptativo da norma europeia EN 16798-2 (2019), que é baseado em resultados obtidos em estudos de campo em que foram correlacionados dados das condições ambientais com as votações da percepção média das pessoas presentes nesse ambiente de estudo, levando assim em consideração eventuais adaptações do indivíduo a esse ambiente. Para isso é avaliada a relação entre a temperatura operativa de conforto e a temperatura exterior média mensal. Dessa maneira, o modelo propõe uma faixa de temperaturas operativas aceitáveis, em que pode haver ajustes fisiológicos dos indivíduos, como por exemplo o aumento da atividade do mesmo, ajustes de vestuário ou até mesmo abertura de janelas.

Pela norma é estabelecido os limites da temperatura operativa interior em função da temperatura média exterior ponderada de forma exponencial. Este modelo é aplicado para locais em que os utilizadores apresentam um nível de metabolismo de 1,0 e 1,3 met, têm a capacidade de abrir as janelas e onde não existe sistemas AVAC.

Para calcular o conforto térmico, utiliza-se a média da temperatura do ar medida durante um determinado período. Conforme essa média, estabelece-se uma faixa de temperatura operativa aceitável, com limites superior e inferior, de modo a garantir o conforto térmico de cerca de 80% a 90% dos utilizadores.

Na Figura 1 mostra-se a representação gráfica do modelo adaptativo da norma europeia utilizada com os limites de temperatura operativa aceitáveis (EN 16798-2, 2019).

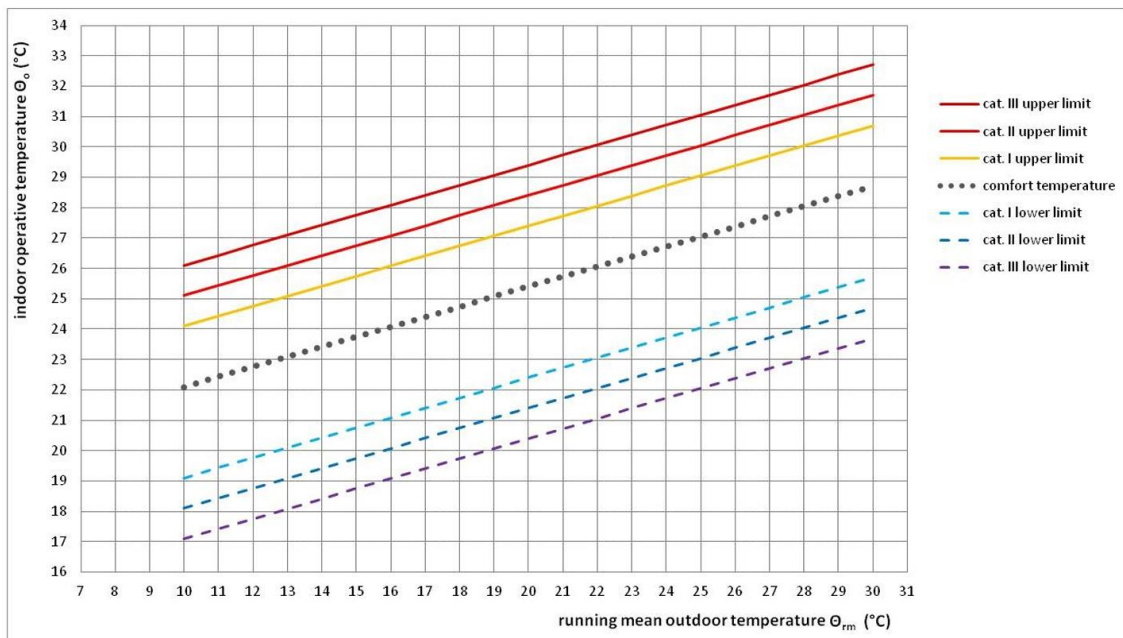


Figura 1: Gráfico do modelo adaptativo para a análise de conforto térmico (EN 16798-2, 2019)

Ainda a norma estabelece três categorias (I, II e III) para os edifícios, correspondendolhes limites de aceitabilidade distintos, nomeadamente:

- I. Nível alto de expectativa. Recomendada para locais em que os ocupantes são considerados mais sensíveis e necessitam de um maior cuidado;
- II. Nível normal de expectativa. Recomendado para edifícios novos e que passaram por processos de reabilitação;

III. Nível de expectativa aceitável e moderado. Recomendado para edifícios existentes.

Na tabela 1 é apresentado cada uma das categorias aplicáveis e a respetiva equação.

Categoria I	Limite Superior: $\theta_{i\text{ sup}} = 0,33\theta_{\text{rm}} + 18,8 + 2$
	Limite Inferior: $\theta_{i\text{ inf}} = 0,33\theta_{\text{rm}} + 18,8 - 3$
Categoria II	Limite Superior: $\theta_{i\text{ sup}} = 0,33\theta_{\text{rm}} + 18,8 + 3$
	Limite Inferior: $\theta_{i\text{ inf}} = 0,33\theta_{\text{rm}} + 18,8 - 4$
Categoria III	Limite Superior: $\theta_{i\text{ sup}} = 0,33\theta_{\text{rm}} + 18,8 + 4$
	Limite Inferior: $\theta_{i\text{ inf}} = 0,33\theta_{\text{rm}} + 18,8 - 5$

Tabela 1: Limites para categorias da norma EN16798-2 (Adaptado de EN16798-2, 2019)

Sendo:

θ_i = valor máximo da temperatura operativa interior (°C)

θ_{rm} = média das temperaturas exteriores exponencialmente ponderadas (°C)

Neste trabalho, foi utilizada a categoria III como referência para os limites superior e inferior da zona de conforto por se tratar de um edifício existente.

2.3. Vãos envidraçados

As aberturas nas construções exercem vários papéis, regulam a passagem de luz, com impacto no conforto visual e nos ganho térmicos, e contribuem para a ventilação, desempenhando assim um papel importante no balanço térmico e conseqüentemente no consumo de energia. Esses elementos são habitualmente caracterizados por uma baixa inércia e isolamento térmico quando comparados com as superfícies opacas da edificação (Pinto, 2006).

Sorgato et al. (2014, como citado em Li e Lam 2000) realizou simulações energéticas em edifícios comerciais, verificando que o maior gasto de energia elétrica era com aparelho de ar-condicionado para arrefecimento nas situações em que os ganhos solares têm um papel fundamental para o aquecimento do ambiente.

Segundo Gonçalves e Graça (2004), a posição relativa da fachada do edifício tem um papel muito importante para os ganhos solares. No inverno é importante que haja a melhor captação dos ganhos solares para que se aqueça os edifícios. Já no verão é

importante a redução desses ganhos solares para diminuir as necessidades de arrefecimento e garantir um melhor conforto térmico.

As janelas e envidraçados são a parte transparente da envoltória do edifício e, dessa forma, apresentam-se como um contacto mais direto com o meio externo, permitindo a entrada de iluminação e ventilação. Segundo Machado (2014), os vãos envidraçados correspondem a uma grande parte do balanço térmico do edifício, sendo responsáveis por grande parte de perdas térmicas nos períodos mais frios e, nos meses mais quentes, podem contribuir para situações de sobreaquecimento. Comparando-se a componente opaca da envolvente com a translúcida, é na segunda que ocorrem as principais trocas térmicas e de iluminação.

Tipicamente, em contexto de reabilitação, a intervenção nos vãos envidraçados deve ter como propósito a redução do consumo energético e a melhoria das condições de conforto térmico e qualidade de ar (DGEG, 2004).

2.4. Influência solar

Segundo Machado (2018), a radiação solar exerce um papel crucial no conforto térmico dos edifícios. Durante o ano, a influência solar apresenta uma alteração no seu papel. Nos períodos mais frios, como o outono e o inverno, ela é uma fonte valiosa de calor, contribuindo para a subida da temperatura interna da edificação. Por outro lado, na primavera e no verão, é preciso controlá-la para evitar o sobreaquecimento dos ambientes internos.

Para Pereira e Souza (2008), em locais quentes, o uso de dispositivos de proteção solar é fundamental para melhorar o desempenho térmico das edificações, procurando-se desta forma impedir o aumento indesejado da temperatura interna causado pela transmissão direta de calor. Mesmo em dias com temperatura externa moderada, a radiação solar pode gerar um excesso de calor nos ambientes expostos ao sol.

Ao longo do ano, o sol possui uma trajetória diferente, sendo que o ângulo de altura do mesmo é mais alto no solstício de verão, ocorrendo no dia 21 de junho, no Hemisfério Norte. Neste dia, o nascer do sol ocorre próximo da orientação nordeste e o por do sol na orientação noroeste. A menor altura solar ocorre no solstício de

inverno, no dia 21 de dezembro, no Hemisfério Norte, em que o sol nasce próximo da orientação sudeste e põe-se próximo da orientação sudoeste.

Para Santos (2012) a incidência solar afeta diversos fatores na edificação como o conforto visual, iluminação natural e a disponibilidade de luz natural. O autor refere ainda que, para os programas de análise de iluminação, como por exemplo o Daylight e o Radiance, os dados de entrada são a localização do edifício, a geometria e posição dos mesmos, presença das aberturas e sua orientação, a transmissão luminosa dos elementos translúcidos e a refletância das superfícies do edifício.

Couto (2019) refere que a radiação solar que incide nas superfícies das cidades e das edificações é a maior responsável pelos ganhos de calor. Um importante dado a se analisar na avaliação da influência solar é a radiação direta. Este parâmetro avalia a quantidade de radiação que atravessa a atmosfera e atinge diretamente a superfície. Existem várias bases de dados onde estão disponíveis valores da radiação direta em vários pontos do planeta, como por exemplo o website Solargis. Na Figura 6 mostra-se a radiação direta média em Portugal obtida na referida base de dados.



Figura 2: Mapa da radiação direta em Portugal (Solargis, 2024)

Uma questão importante é a orientação das fachadas e as suas vantagens e desvantagens nos períodos de aquecimento (inverno) e de arrefecimento (verão). A fachada norte, no inverno não recebe radiação solar direta, enquanto que no verão recebe apenas uma pequena parte, no início da manhã e no fim da tarde. Por outro lado, a fachada sul recebe grandes quantidades de energia solar no inverno e no verão, no entanto é mais passível de controle no verão através de proteções solares horizontais devidamente dimensionadas. A fachada este recebe pouca radiação solar na estação de arrefecimento no período da manhã enquanto no verão recebe a luz e radiação durante longas horas da manhã. Por último, a fachada oeste recebe pouca luz e radiação solar no período da tarde durante a estação de arrefecimento e pode ser bastante problemática no verão, uma vez que o sol incide durante longas horas no período da tarde.

2.5. Ventilação

A ventilação, segundo Donida (2002), é um processo de renovação de ar que ocorre num ambiente capaz de controlar a temperatura e a humidade, alterando a qualidade do ar. Ainda segundo o autor, a ventilação tem importante influência no desempenho térmico dos espaços, podendo contribuir para o arrefecimento do ambiente e facilitar as trocas térmicas, removendo o excesso de calor. Ainda segundo Sousa e Rodrigues (2012) a ventilação natural é um dos recursos mais eficazes para a obtenção do conforto ambiental e eficiência energética nas edificações, desde que o sistema de ventilação seja devidamente projetado e dimensionado e a sua operação seja condizente com a utilização do edifício e com o clima exterior.

Existem dois tipos de ventilação, segundo Donida (2002). O primeiro é a ventilação natural, que pode ocorrer pela diferença de temperatura interior e exterior, a qual origina uma diferença de pressões, que provoca um deslocamento da massa de ar da zona de maior pressão para a de menor pressão. Para que a ventilação natural seja eficiente são necessárias condições climáticas adequadas e dispositivos de ventilação eficiente e controláveis. A outra forma de ventilação possível é a mecânica. Nesse caso, utilizam-se equipamentos mecânicos para produzir as diferenças de pressão necessárias à movimentação do ar.

Um fator importante a se levar em conta na ventilação natural é o posicionamento dos vãos em lados opostos da edificação permitindo, com isso, uma ventilação cruzada, que pode ser significativamente mais eficiente.

2.6. Considerações sobre o desempenho dos museus

2.6.1 Enquadramento

Segundo a Lei nº 47/2004 de 19 de agosto, em seu artigo 3º, a definição de museu é a seguinte: “Museu é uma instituição de carácter permanente, com ou sem personalidade jurídica, sem fins lucrativos, dotada de uma estrutura organizacional que lhe permite: a) Garantir um destino unitário a um conjunto de bens culturais e valorizá-los através da investigação, incorporação, inventário, documentação, conservação, interpretação, exposição e divulgação, com objetivos científicos, educativos e lúdicos; b) Facultar acesso regular ao público e fomentar a democratização da cultura, a promoção da pessoa e o desenvolvimento da sociedade”. Ferreira (2015) aponta que os museus são instituições de carácter permanente, cujo objetivo é a garantia da conservação de um conjunto de bens culturais, controlando o acesso ao público com a finalidade de promover a disseminação da cultura e da sociedade.

Segundo Mendes (2019), os museus podem estar localizados numa ampla gama de edifícios, que vão desde estruturas históricas com vários séculos de existência, até edifícios comuns que foram ou não adaptados e, até mesmo, construções específicas para essa finalidade. Entre as tipologias de museus há, como no caso de estudo deste trabalho, os museus nacionais que representam a identidade cultural de um país e comportam coleções nacionais de grande importância e valor. Essa tipologia de museu geralmente está localizada em edifícios históricos de grande relevância arquitetónica.

Como normalmente essas construções foram realizadas em séculos passados, com a utilização de materiais e tecnologias diferentes dos disponíveis atualmente, é muito provável que não haja um desempenho adequado para as necessidades de conforto das obras de arte (e dos visitantes), nem para a eficiência energética da edificação em si.

2.6.2 Conservação de acervos de museus

Segundo Ferreira (2015) desde a antiguidade são expressas preocupações acerca das condições climatológicas dos museus, com o objetivo da garantia das condições de

salubridade dos locais em que se armazenavam as obras. Após a revolução industrial, com o surgimento dos sistemas de aquecimento, arrefecimento e humidificação, começou-se a produzir um ambiente mais propício para a preservação dessas peças de arte.

Em 1934, segundo Ferreira (2015, como citado em Macintyre et al., 1934) publicaram-se valores recomendados de temperatura e humidade relativa para galerias de pintura em madeira: 16 °C e 55 à 60%, respetivamente. Em 1942, Ferreira (2015, como citado em Rawlins, 1942) refere que, baseado nos estudos anteriormente feitos em 1934, foram definidos valores para a conservação das obras, sugerindo-se que a temperatura fosse na faixa dos 16 °C e a humidade relativa em 60%, sendo esta segunda variável a mais importante.

No ano de 1967, na *Contributions to the London Conference on Museum Climatology*, realizada em Londres, foi abordado o tema para que se discutisse a importância dos parâmetros climatológicos nos museus. Desde então, segundo Byrro Ribeiro e Lomardo (2014), vários encontros de profissionais da área foram acontecendo para melhor estudar e compreender a conservação dos bens museológicos e sua relação com as componentes climatológicas.

Em 1978 é publicado o livro “The Museum Environment”, pelo autor Garry Thomson, trazendo duas classes de classificações para museus. A primeira forma trazida diz respeito a conservação de museus nacionais antigos ou novos. Para a segunda classe o autor coloca apenas uma maneira de que se evitasse riscos com a mínima alteração no museu. Dessa forma, para a classe 1 é importante manter a temperatura entre 19 ± 1 °C na estação de aquecimento e 24 ± 1 °C na estação de arrefecimento, com a humidade relativa entre 50 e 55% ($\pm 5\%$). Para a classe 2, a temperatura não possui valores recomendados desde que mantenha a constância na humidade relativa e esta variando de 40 até 70% (Ferreira, 2015 como citado em Thomson, 1986).

No ano de 1994 houveram mais trabalhos acerca deste tema, apresentados no Congresso de Otava do Instituto Internacional de Conservação, referindo-se um intervalo de 30 até 60 % para a humidade relativa, em que a mais alta minimiza os danos físicos das obras enquanto que a mais baixa minimiza as reações químicas (Ferreira, 2015 como citado em Erhardt e Mecklenburg, 1994).

Em 2008 e 2010 houve outras discussões neste âmbito, sendo elas a *Climate Change and Museum Collection* e a *The Way Forward in Environmental Guidelines*,

respectivamente. Segundo Bratasz (2013), com essas discussões buscava-se uma gestão dos ambientes internos dos museus de forma responsável e eficiente, especialmente em termos de redução do consumo de energia e emissões de carbono, mas ao mesmo tempo mantendo altos padrões de cuidado com as coleções, em função da crescente ideia de museu sustentável.

A organização americana *ASHRAE* propõe valores limite de referência para a temperatura e humidade relativa especificamente para museus. A norma apresenta valores de referência com as flutuações possíveis e os riscos das mesmas para as coleções. Na Tabela 2 são apresentados os valores de referência constantes na norma.

Tipo	Valores de Referência ou Média Anual	Flutuações Máximas e Gradientes em Espaços Controlados			Riscos e Benefícios para as Coleções
		Classe de Controlo	Pequenas Flutuações	Ajustes sazonais dos valores de referência	
Museus em geral, Galerias de Arte, Bibliotecas e Arquivos Salas de consulta e leitura, salas para armazenamento de coleções quimicamente estáveis em particular se forem mecanicamente vulneráveis	50 % HR (ou a média anual histórica para as coleções permanentes) Temperatura: um valor entre 15 e 25 °C Nota: Nas salas destinadas a exposições temporárias deve ser possível o valor solicitado pela entidade que empresta, tipicamente 50 %, 21 °C mas por vezes 55 ou 60 %.	AA Controle de precisão, sem correção sazonal	±5 % HR, ±2 °C	HR sem alteração. T 5 °C acima do valor de referência e 5 °C abaixo	Nenhum risco de degradação mecânica para a maior parte dos artefactos e da pintura. Alguns metais e minerais poderão degradar-se se um valor da HR de 50 % exceder um valor crítico. Objetos quimicamente instáveis estarão inutilizáveis dentro de décadas.
		A Controle de precisão, alguns fatores ou alterações sazonais mas não os dois	As ±5 % HR, ±2 °C	Aumentar ou reduzir a HR 10 %, aumentar a T 5 °C ou reduzi-la 10 °C	Risco reduzido de degradação mecânica para artefactos muito sensíveis, nenhum risco para a maior parte dos artefactos, pintura, fotografias e livros. Objetos quimicamente instáveis estarão inutilizáveis dentro de décadas.
			A ±10 % HR, ±2 °C	HR sem alteração; aumentar a T 5 °C ou reduzi-la 10 °C	
		B Controle de precisão de alguns fatores mais um ajuste da temperatura de inverno	±10 % HR, ±5 °C	Mais 10 %, menos 10 % HR; mais 10 °C mas não acima de 30 °C	Risco moderado de degradação mecânica em objetos muito sensíveis, risco muito pequeno para a maior parte da pintura e da fotografia, alguns livros e artefactos e risco praticamente nulo para muitos artefactos e a maior parte dos livros. Os objetos quimicamente instáveis ficarão inutilizados dentro de décadas, menos se estiverem regularmente a 30 °C, mas os períodos frios do inverno duplicam a sua vida.
		C Evitar os extremos mais perigosos	HR mantida entre 25 % e 75 % durante todo o ano, temperatura raramente acima dos 30 °C, normalmente inferior a 25 °C		Risco elevado de degradação mecânica para artefactos muito vulneráveis, risco moderado para a maior parte da pintura e da fotografia e alguns artefactos e alguns livros e um pequeno risco para muitos artefactos e a maior parte dos livros. Os objetos quimicamente instáveis ficarão inutilizados dentro de décadas, menos se estiverem regularmente a 30 °C, mas os períodos frios do inverno duplicam a sua vida.
D Evitar a humidade	HR mantida de forma segura a um valor inferior a 75 %		Risco elevado de deterioração mecânica brusca ou acumulada para os objetos de arte e pinturas devido á fratura por humidade relativa demasiado baixa, mas são evitadas as deformações provocadas por humidade elevada especialmente nos embutidos, pintura, papel e fotografias. Os objetos quimicamente instáveis ficarão inutilizados dentro de décadas, menos se estiverem regularmente a 30 °C, mas os períodos frios do inverno duplicam a sua vida.		

Tabela 2: Especificações de parâmetros de temperatura e humidade relativa para museus, galerias de arte, bibliotecas e arquivos (ASHRAE, 2017)

Em Portugal, pelo Decreto-Lei n°16/1993, o estado é responsável por garantir as condições adequadas de conservação dos bens vinculados aos museus, e este deve reportar as ações de conservação prestadas e conservar as obras seguindo a regulamentação nacional.

Dessa maneira, Ferreira (2015, como citado em d'AMBROSIO e d'AGOSTINO, 2006) aponta as possíveis deteriorações que podem ocorrer com valores muito altos ou baixos dos parâmetros temperatura e humidade relativa e suas bruscas variações. A Tabela 3 sintetiza essas informações.

Parâmetros	Classificação do valor	Deterioração possível
Temperatura	Valores muito altos ou muito baixos	Maior deterioração, diminuição da resistência
	Variações bruscas	Fraturas, dobras, deformações
Humidade relativa	Valores muito altos ou muito baixos	Bolores, corrosão, diminuição da resistência
	Variações bruscas	Fraturas, dobras, deformações

Tabela 3: Consequências de valores muito altos ou muito baixos de temperatura e humidade relativa (Adaptado de Ferreira, 2015)

Em síntese, o desafio é, muitas vezes, compatibilizar as questões arquitetónicas associadas aos museus que estão estabelecidos em edifícios históricos, com uma aproximação aos valores de referência da temperatura e humidade interna, mantendo-se as preocupações de carácter energético e de sustentabilidade.

A ideia principal é que a edificação e todas as obras que essa comporta passem a trabalhar como um sistema ambientalmente integrado, tendo como foco a diminuição de custos energéticos (Byrro Ribeiro e Lomardo, 2014).

3. ESTRATÉGIA DE MODELAÇÃO

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi selecionado um estudo de caso para uma simulação do desempenho térmico atual do edifício e após a aplicação de cenários de reabilitação. O caso de estudo é o edifício do Museu Nacional Grão Vasco, localizado no centro histórico da cidade de Viseu. Dessa forma, foi utilizado o software Rhinoceros 3D para a modelação geométrica da edificação. Para as restantes características e propriedades do museu necessárias para o modelo térmico foi utilizada a ferramenta Grasshopper, que é um plug-in presente no próprio software Rhinoceros 3D. A combinação destes softwares - modelação geométrica no Rhinoceros 3D e modelação térmica no Grasshopper - permite explorar e tirar proveito de uma grande variedade de ferramentas de modelação e de tratamento dos resultados, já pré-definidos e integrados nos programas. Para tal, deve ser ainda utilizado o plug-in do Grasshopper denominado Ladybug Tools, que permite analisar diversos cenários em termos de radiação, iluminação, eficiência energética, conforto térmico, entre outros. Dessa forma, de seguida, após uma descrição do caso de estudo, apresenta-se uma explicação breve de cada software e plug-in utilizado e o processo de trabalho seguido para as modelações e simulações.

3.1. Estudo de caso – Museu Nacional Grão Vasco

O edifício selecionado como estudo de caso é o Museu Nacional Grão Vasco, localizado no centro histórico de Viseu. Classificado na categoria de Museu Nacional de Portugal desde 2015, a edificação é um local único e emblemático da cidade de Viseu, com 108 anos de história.

O início da história da edificação deu-se com a construção do Paço dos Três Escalões. Inicialmente planeado como um seminário ou colégio para a formação do clero, foi construído onde antes estava situada a residência episcopal da cidade. As obras começaram em 6 de junho de 1593 e prolongaram-se até à primeira metade do século XVII. As informações concretas são limitadas, mas sabe-se que por volta de 1630 houve alguns trabalhos de acabamento. No século XVIII, entre 1720 e 1741, período no qual o piso superior do Claustro da Catedral também foi construído, foi incluído um novo piso ao Paço dos Três Escalões.

A estrutura de granito destaca-se pela sua extensão e imponente, tornando-se única na região. Externamente apresenta uma grandiosidade e singularidade, enquanto

internamente possui longos corredores, onde ainda se encontram vários elementos originais. Ainda assim, na parte interna houve várias obras de adaptação devido à degradação desses espaços. Somente em 1938 é que as coleções museológicas finalmente ocuparam essas galerias.

O início efetivo da história do Museu Nacional Grão Vasco deu-se devido a um processo de transferência dos tesouros da Catedral da cidade de Viseu para o local do museu. A partir de um decreto de 16 de março de 1916, criou-se o Museu de Grão Vasco.

Entre 2001 e 2003, o arquiteto Eduardo Souto Moura desenvolveu um profundo projeto de intervenção na edificação devido às dificuldades para a preservação adequada das coleções e à falta de infraestruturas básicas para o funcionamento adequado do museu. Com isso, houve uma libertação de vários elementos do interior do edifício, preservando-se todo o espaço exterior.

Dentro do museu, a coleção principal é constituída por um conjunto de pinturas de retábulo, geralmente com uma estrutura de madeira ou mármore, originalmente provenientes da Catedral da cidade, de outras igrejas da região e de depósitos de outros museus, da autoria de Vasco Fernandes (c. 1475-1542), reconhecido como Grão Vasco, e alguns colaboradores e contemporâneos. Segundo Mateus (2017) o acervo atual do Museu Nacional Grão Vasco inclui pintura, escultura, ourivesaria e marfins, do Românico ao Barroco, peças de arqueologia, coleção de pinturas portuguesas dos séculos XIX e XX, exemplares de faiança portuguesa, porcelana oriental e mobiliário.

Na Figura 3 apresenta-se uma vista aérea com a localização do edifício e algumas imagens do estado atual do edifício.

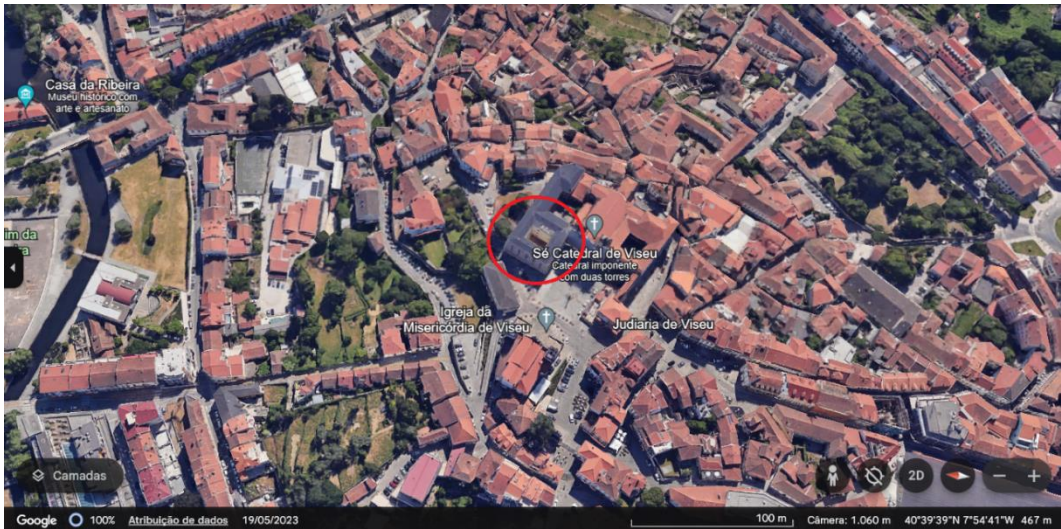


Figura 3: Localização do Museu Nacional Grão Vasco (Google Maps, 2024)



Figura 4: Imagens do Museu Nacional Grão Vasco

O museu apresenta um formato retangular com três pisos, caracterizado por uma grande quantidade de vãos envidraçados. No interior é possível encontrar um espaço aberto, como pode observar-se na Figura 5. É ainda possível observar que o museu apresenta uma cobertura inclinada, com uma coloração escura, resultante do mais recente processo de reabilitação do edifício.

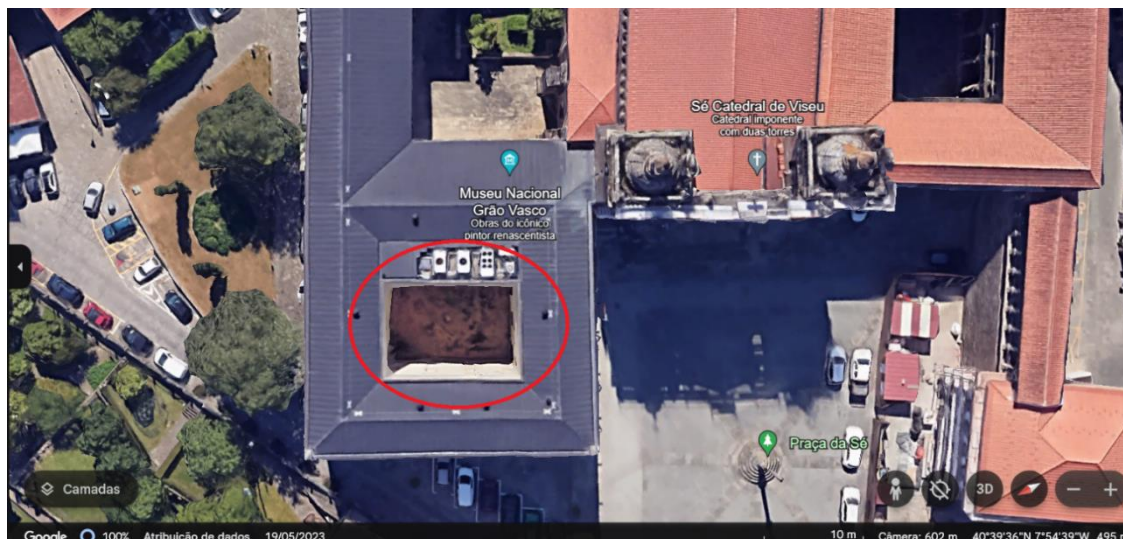


Figura 5: Parte aberta no meio da edificação (Google Maps, 2024)

3.2. Programas informáticos

3.2.1. Rhinoceros 3D

O Rhinoceros 3D é um programa de modelação dimensional que utiliza a tecnologia conhecida como “Non Uniform Rational Basis Spline” (NURBS). Essa tecnologia envolve a representação de curvas e superfícies e podem ser encontradas, por exemplo, imagens obtidas de satélites. O software foi desenvolvido pela Robert McNeel & associates, sendo que inicialmente era apenas um plug-in para o AutoCad (software desenvolvido pela Autodesk).

Neste trabalho foi utilizada a versão 8 do programa, cuja interface gráfica inicial pode ser vista na Figura 6. É possível observar quatro janelas de visualização as quais mostram as vistas superior, frontal, direita e em perspetiva. Para melhor visualização, é possível colocar apenas uma janela de visualização na interface. Na aba esquerda estão disponíveis comandos de desenho e edição, como a criação de superfícies, curvas, sólidos, entre outros. Na aba direita há funções de edição, como, por exemplo, a atribuição de layers para que se possam realizar diferenciações entre elementos, como ocorre em outros softwares como o AutoCad da Autodesk.

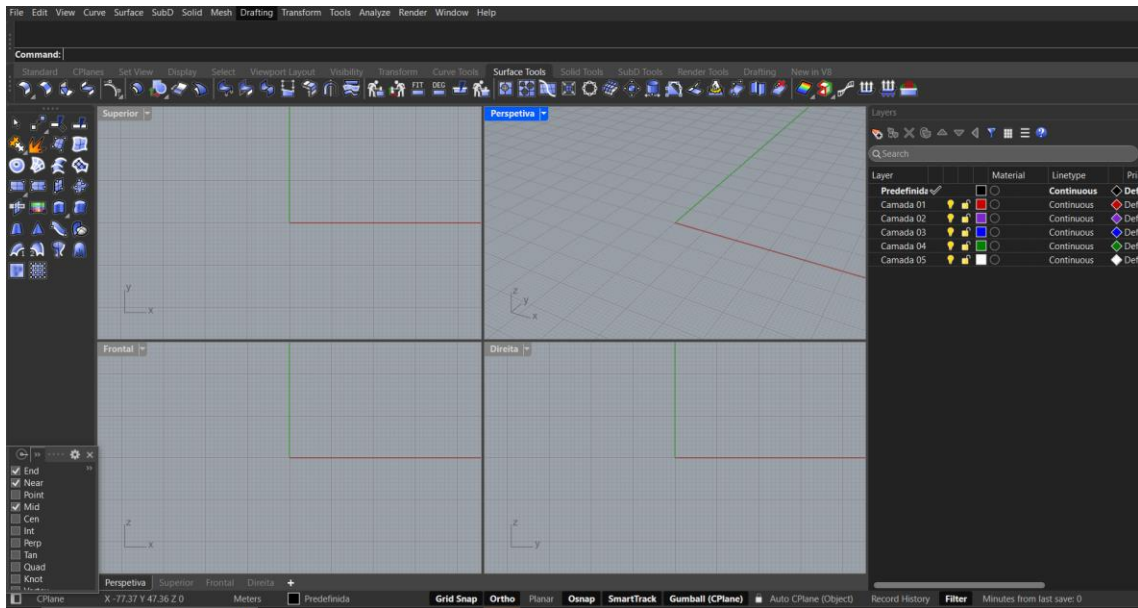


Figura 6: Interface do software Rhinoceros 3D

3.2.2. Grasshopper

O Grasshopper é um método de se utilizar a programação visual que já está presente no Rhinoceros 3D. Foi desenvolvido em 2014 na Robert McNeel & Associates. O Grasshopper está disponível como plug-in no Rhinoceros 3D. Por ser uma forma de programação visual, permite uma maior interatividade com o usuário e ajudando na interpretação do script que o programa está a desenvolver e/ou a executar. Apesar da relativa facilidade com que se pode começar a trabalhar com esta ferramenta, é fundamental ter noções básicas de programação, para que se consiga entender os tipos de dados, suas ligações, inputs e outputs e toda a estrutura do algoritmo que está a ser desenvolvido.

Na Figura 7 pode-se observar a diferença entre uma programação considerada tradicional com a utilização de código escrito (à esquerda) e um exemplo de programação visual no Grasshopper (à direita).

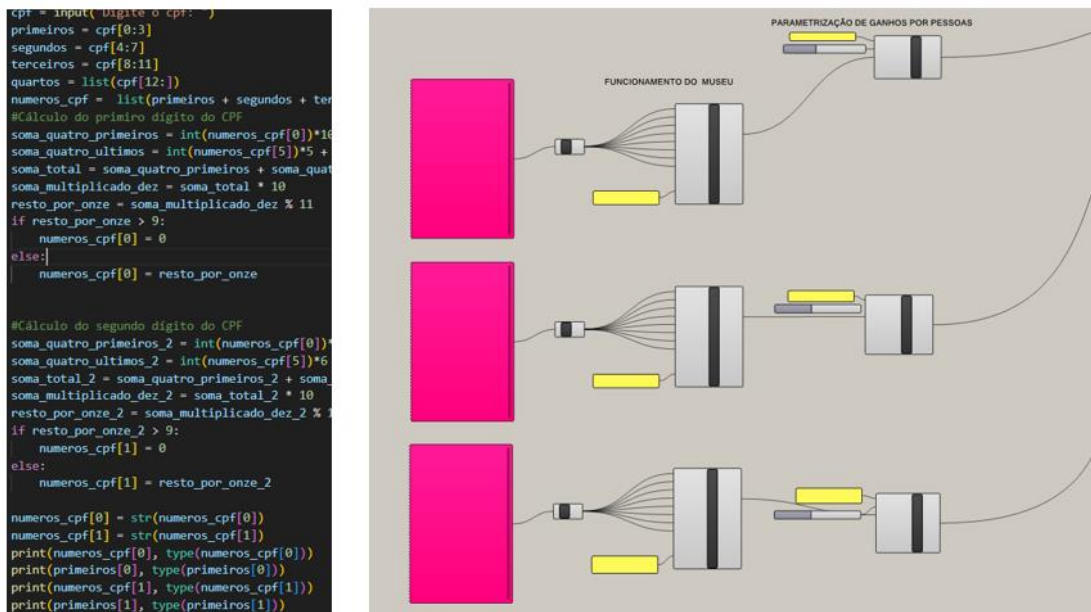


Figura 7: Ilustração de programação tradicional x programação visual

Para iniciar o programa é necessário abrir o Rhinoceros 3D e, na aba de comando, digitar “Grasshopper”. Ao abrir o Grasshopper, surge a interface inicial da aplicação, onde pode ser iniciado o desenvolvimento do programa (Figura 8).

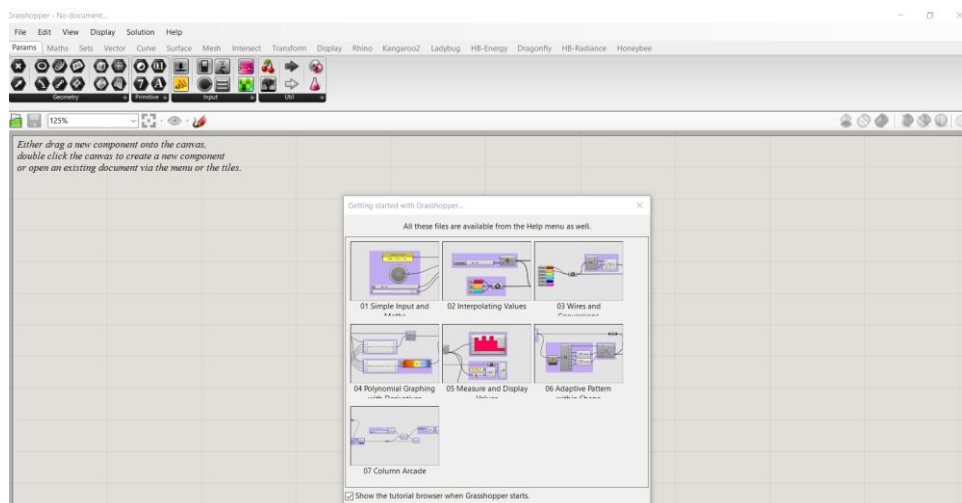


Figura 8: Interface do Grasshopper

O programa disponibiliza uma série de abas com diferentes funcionalidades, que podem ser aumentadas através da instalação de aplicações externas, como é o caso da Ladybug Tools, que foi utilizada neste estudo.

Em termos de funcionamento, o software apresenta “nós”, que armazenam as informações e que são ligados por “fios”. Para cada nó existem duas possibilidades

em termos de tipos de dados: os parâmetros que armazenam os dados e os componentes que executam as ações. Os dados podem ser obtidos a partir de diversas fontes, como por exemplo um ficheiro presente no computador, da internet ou do próprio grasshopper. Os fios são as ferramentas de transporte desses dados entre os nós. Os dados no Grasshopper (inputs) apresentam diversas formas como: números, texto, informações de bancos de dados, formas geométricas, entre outras (Bazafkan, 2017).

Uma das grandes vantagens do Grasshopper é tratar-se de um modelo paramétrico, em que qualquer mudança realizada é capaz de interferir automaticamente em todo o modelo, que é automaticamente atualizado, trazendo uma maior facilidade para possíveis alterações que possam ocorrer durante o processo de criação.

A Figura 9 representa esquematicamente a estrutura de funcionamento do Grasshopper.

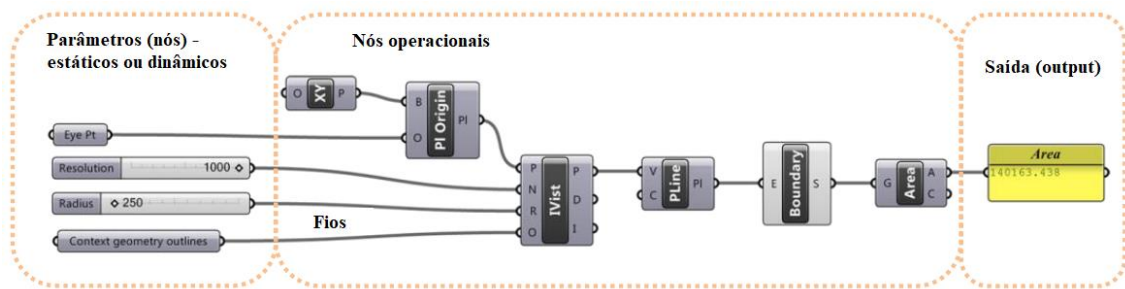


Figura 9: Estrutura dos elementos do Grasshopper (Adaptado de Bazafkan, 2017)

A ligação do Grasshopper com modelos desenvolvidos no Rhinoceros 3D é bastante simples e intuitiva, permitindo importar planos, pontos, curvas, superfícies, sólidos e malhas. Outra funcionalidade possível é a criação de geometrias parametrizadas diretamente no Grasshopper com visualização no Rhinoceros 3D. Um exemplo ilustrativo dessa possibilidade pode ser visto no estudo de Machado (2018), que fez uma programação para a criação de pisos paramétricos no Grasshopper e os mesmos são exibidos diretamente no Rhinoceros 3D (Figura 10).

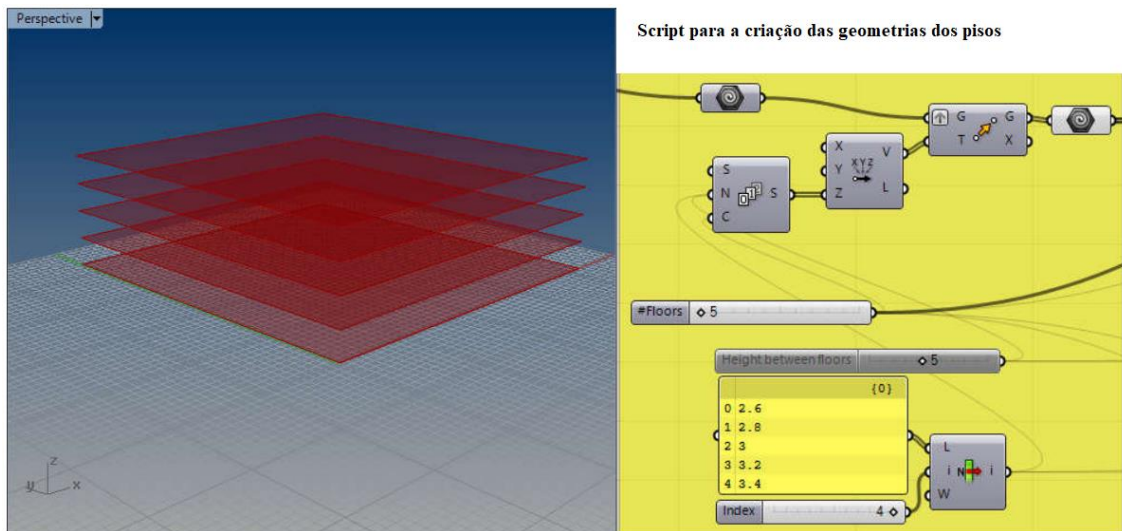


Figura 10: Criação de pisos paramétricos (adaptado de Machado, 2018)

Como referido anteriormente, para além das funcionalidades padrão do Grasshopper, é importante destacar a possibilidade de baixar plug-ins específicos para diferentes análises, como foi o caso desse estudo, no qual foi utilizado o Ladybug Tools. Segundo Parente et al. (2008) ferramentas como o Grasshopper e sua integração com o EnergyPlus através de plug-ins como o Ladybug têm contribuído para a difusão entra a comunidade técnica da importância e relevância dos estudos de simulação térmica e energética.

3.2.3. Ladybug tools

O Ladybug Tools é um plug-in que se pode vincular ao Grasshopper com o objetivo de facilitar a análise de variáveis ambientais, nomeadamente através de análises energéticas, de radiação e de conforto térmico, entre outras. Adicionalmente, com a utilização da ferramenta é possível criar visualizações interativas e personalizadas para cada tipo de projeto.

Alguns exemplos de funcionalidades da ferramenta são a avaliação do conforto térmico em espaços, a análise da radiação para que se possa otimizar a orientação das fachadas dos edifícios e o tamanho das janelas, estudos de sombreamento, estudos de risco de condensações e a estimativa da energia gerada por sistemas de energia renovável como a solar.

O plug-in disponibiliza diferentes tipos de ferramentas específicas para cada funcionalidade desejada. Na Figura 11 mostram-se as ferramentas que fazem parte do

pacote do Ladybug Tools, sendo que neste caso de estudo apenas foram utilizadas a Ladybug e a Honeybee, os quais serão aprofundados posteriormente.

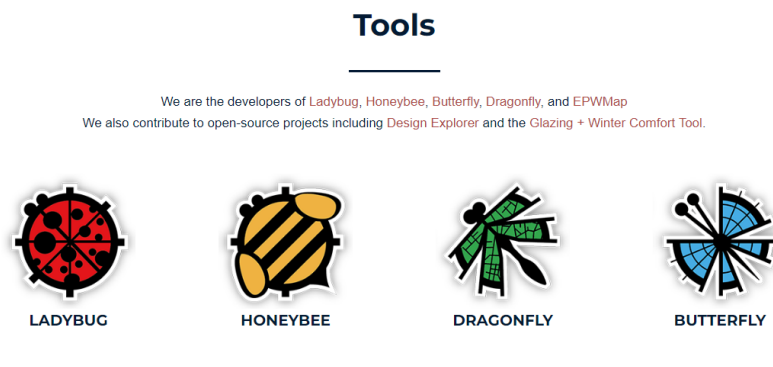


Figura 11: Ferramentas do Ladybug (Ladybug Tools, 2024)

- **Ladybug**

A Ladybug é a ferramenta principal do pacote e trabalha com a importação de arquivos de dados climáticos do EnergyPlusWeather (EPW), trazendo-o para o ambiente do Grasshopper. Com esta informação é possível, desde logo, obter avaliações iniciais sobre o projeto como a radiação solar disponível, estudo de sombreamento, entre outros. A ferramenta Ladybug não inclui cálculo a partir de simulações e é mais utilizada para decisões pré-projeto (Bazafkan, 2017). Uma aba muito importante presente na ferramenta é a parte de visualização dos dados, apresentando, por exemplo, a possibilidade de visualização da informação em diagramas psicométricos ou nos gráficos de avaliação de conforto pelo método adaptativo. A Figura 12 apresenta uma representação esquemática da integração das ferramentas e a metodologia de utilização do Ladybug, com possíveis resultados a serem atingidos.

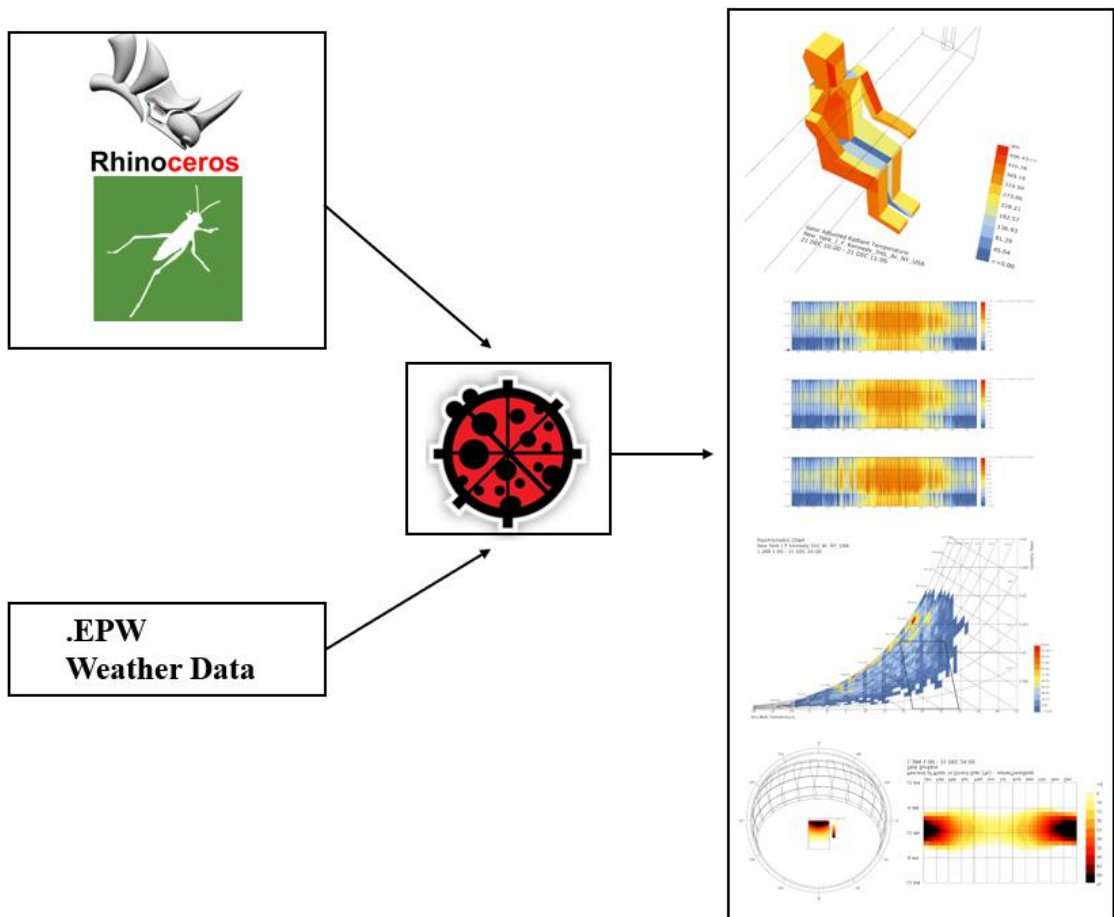


Figura 12: Exemplos de aplicação do Ladybug (adaptado de Bazafkan, 2017)

Além dos exemplos apresentados anteriormente, a ferramenta apresenta, em seu website, uma listagem de diversas potencialidades que podem ser exploradas e que estão sintetizadas na Figura 13.



Figura 13: Potencialidades do Ladybug (Ladybug Tools, 2024)

- **HoneyBee**

O Honeybee é um plug-in que permite realizar análises detalhadas sobre o comportamento térmico e energético das edificações. Estas simulações são realizadas

a partir de uma ligação externa com o EnergyPlus/OpenStudio. Esta ligação é feita internamente no ambiente do Grasshoper, não sendo necessário sair do programa. Outro fator importante é a conexão entre o Ladybug e o Honeybee, possuindo funcionalidades complementares, sendo que para a simulação no Honeybee é necessária a informação carregada no Ladybug.

No Honeybee estão disponíveis três abas: Honeybee, HB-Radiance e HB-Energy. Cada uma possui funcionalidades distintas, mas que são integradas e complementares em vários aspectos.

Dentro do Honeybee é possível avaliar o desempenho térmico e energético da edificação, podendo ser avaliado o impacto de fatores como a influência e posicionamento solar, sombreamento, ventilação, entre outros. Dessa forma é possível gerar simulações de luz do dia utilizando o HB-Radiance e modelos de energia utilizando diversas plataformas como o EnergyPlus, OpenStudio e Daysim na aba HB-Energy.

Bazafkan (2017) refere que o Ladybug e o Honeybee podem ser integrados em algumas partes. Um exemplo é a utilização de dados climáticos importados com o Ladybug para as análises energéticas do HoneyBee, além da presença das ferramentas de visualização como gráficos, por exemplo, estarem presentes no Ladybug.

A Figura 14 apresenta uma representação esquemática da metodologia de utilização do Honeybee para cada uma de suas potencialidades.

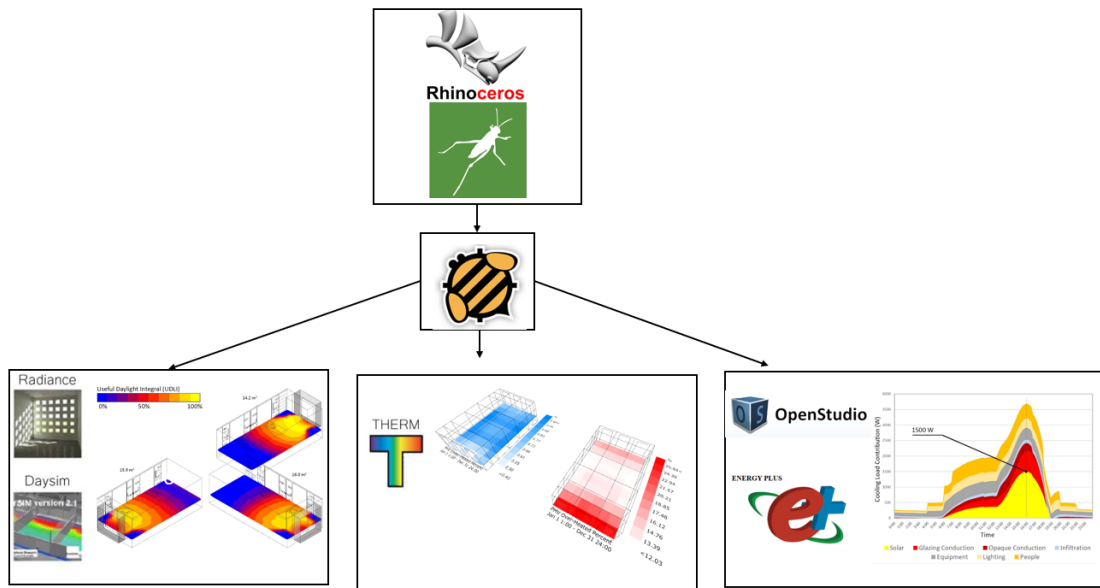


Figura 14: Exemplos de aplicação do Honeybee (adaptado de Bazafkan, 2017)

A figura 15 traz as diversas potencialidades que podem ser exploradas com a ferramenta.



Figura 15: Ferramentas do HoneyBee (Ladybug Tools, 2024)

3.3. Abordagem metodológica

O Rhinoceros 3D foi o software escolhido para este estudo principalmente por disponibilizar um plug-in denominado Grasshopper que inclui módulos específicos dedicados à simulação térmica de edifícios, designadamente o LadyBug Tools. Este último apresenta diversas ferramentas para análises tanto térmicas como energéticas,

tornando-o particularmente interessante para trabalhos relacionados com a caracterização e melhoria do desempenho de edifícios existentes.

Para o início da realização dos trabalhos foi necessária a modelação geométrica da edificação do caso de estudo. Nesta fase inicial obteve-se uma nuvem de pontos, resultado de um levantamento fotogramétrico no local de estudo.

Posteriormente à modelação da geometria, é necessário associar às geometrias do sólido a sua função na edificação (paredes, pisos, coberturas, janelas e portas) e definir os materiais presentes em cada elemento e as suas características térmicas. Este passo é essencial para que a simulação decorra com a máxima representação da realidade. Para associar a geometria foram utilizadas as próprias funcionalidades do Grasshopper, que permite a conexão com a geometria do Rhinoceros. Para a caracterização dos materiais foi utilizado o plug-in Ladybug Tools no software Grasshopper, que apresenta “nós” específicos para a criação de cada elemento, como paredes, pisos ou coberturas.

Após esta fase, é necessário realizar a ligação dos nós para criar o modelo de simulação. Nesta fase é essencial perceber o comportamento dos nós, o tipo de dado que está sendo inserido em cada um dos mesmos e também as unidades dos parâmetros. Feito isso é importado o ficheiro climático a partir do próprio Ladybug Tools.

Com o modelo de simulação finalizado e o ficheiro climático devidamente importado, são realizadas simulações térmicas no período pretendido, com o objetivo de obter as temperaturas internas nas diferentes zonas do museu. Os resultados dessas simulações permitem uma análise detalhada dos desempenhos térmicos dos espaços internos, considerando tanto os aspectos de conforto térmico para os ocupantes, quanto os requisitos específicos para a preservação do acervo museológico.

A Figura 16 apresenta uma síntese gráfica do fluxo de trabalho que foi utilizado neste caso de estudo para a criação do modelo, desde a nuvem de pontos até ao modelo final do edifício.

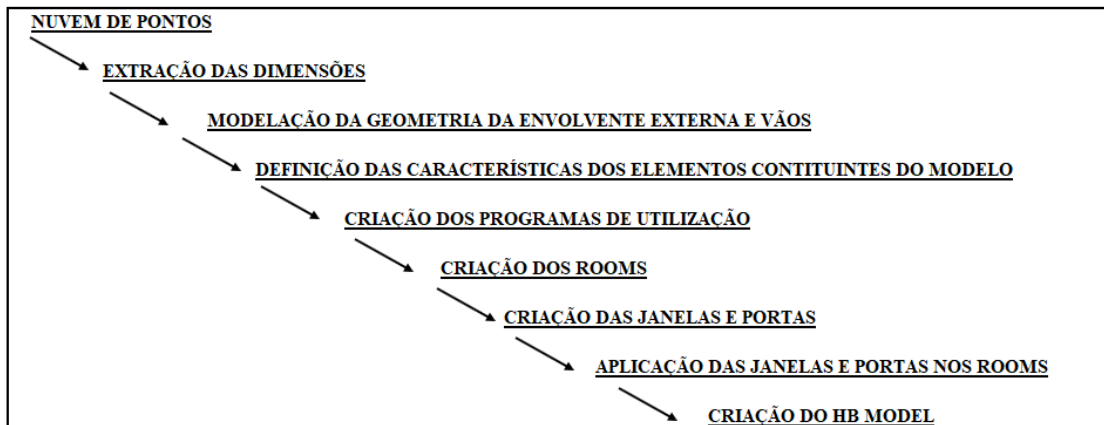


Figura 16: Fluxograma com etapas necessárias para a criação do modelo de simulação

4. CRIAÇÃO DO MODELO

4.1. Modelação da geometria

Para a modelação da geometria no Rhinoceros 3D foram utilizados dados obtidos de estudos anteriormente realizados no museu. Nesse estudo foi realizado um levantamento fotogramétrico do exterior dos edifícios da Sé catedral e do Museu Nacional Grão Vasco. Desse levantamento resultou um modelo de nuvem de pontos dos edifícios, conforme é possível observar na Figura 17. É necessário destacar que não foi um estudo publicado em que apenas se obtiveram os dados.



Figura 17: Nuvem de pontos do Museu Nacional Grão Vasco

Para uma primeira tentativa de testar a interoperabilidade entre as ferramentas, foi realizada a importação da nuvem de pontos diretamente para o Rhinoceros 3D, com o objetivo de se realizar a modelação geométrica diretamente no software. No entanto, o resultado da importação dessa nuvem de pontos revelou algumas dificuldades que condicionaram a modelação da geometria, uma vez que os pontos perderam o atributo da cor, ficando todos com a cor preta. Desta forma, perde-se a noção de muitos detalhes e do próprio posicionamento dos elementos. A Figura 18 mostra o resultado da importação direta da nuvem de pontos.

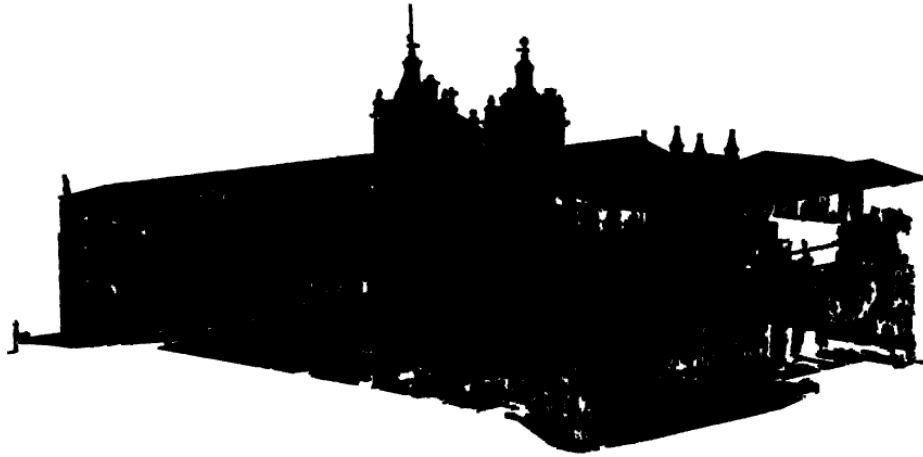


Figura 18: Importação da nuvem de pontos diretamente para o Rhinoceros 3D

Para contornar este problema, adotou-se uma estratégia alternativa, importando e vinculando a nuvem de pontos no software Revit da Autodesk. A partir desse programa, foram então extraídas as dimensões geométricas e o posicionamento das aberturas. Na Figura 19, mostra-se o modelo importado no Revit, sendo possível observar a sobreposição da parede proveniente da nuvem de pontos e a parede com as janelas já modeladas no programa.



Figura 19: Colocação da nuvem de pontos no Revit com modelação da envolvente e vãos

Após a obtenção dos dados da edificação, procedeu-se à construção do modelo geométrico no Rhinoceros 3D. A modelação foi realizada utilizando objetos sólidos, com a ferramenta “Box: Corner to Corner, Height”, na qual se especificam dois pontos para as extremidades opostas e um valor para a altura. Este método de modelação foi

escolhido devido à configuração do museu, que possui uma área aberta no seu interior e três pisos. Desta forma, o modelo criado é constituído por 12 elementos sólidos, distribuídos pelos 3 pisos e pelas 4 orientações da edificação. A Figura 20 mostra o modelo geométrico, com destaque para um dos sólidos criados.

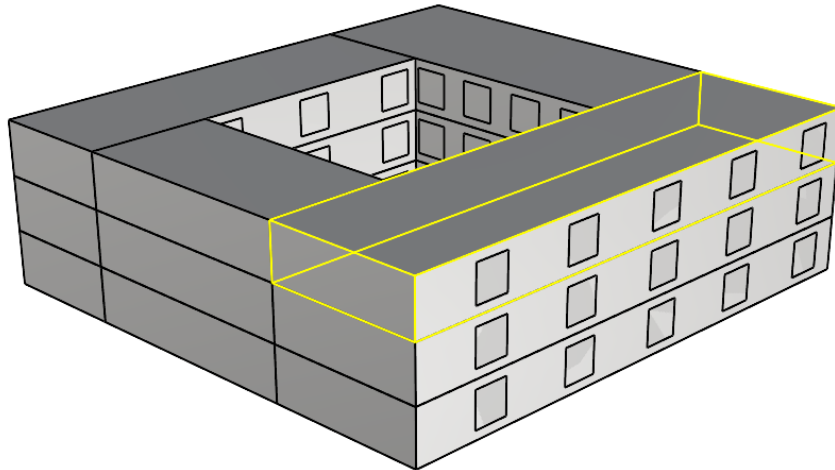


Figura 20: Ilustração de um “Room” do modelo geométrico

Relativamente aos vãos envidraçados e aberturas, a opção de modelação passou para criação de superfícies nas faces dos objetos sólidos. A Figura 21 ilustra o modelo completo, já com todas as superfícies correspondentes aos vãos. Para a geometria é importante ressaltar que posteriormente os elementos modelados como sólidos serão correlacionados, no Grasshopper, com a sua respetiva função na edificação (paredes, pisos, cobertura, janelas e portas).

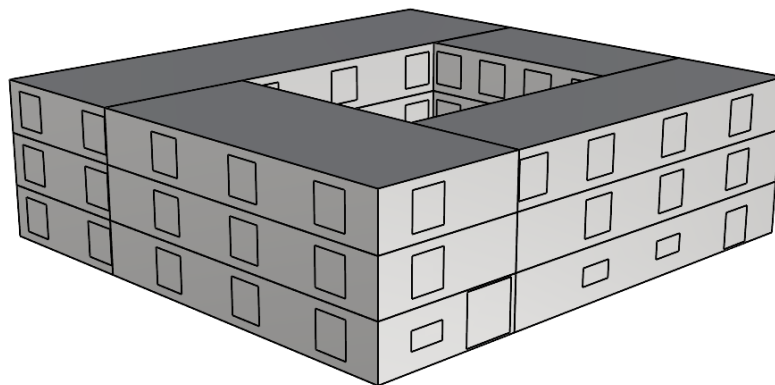


Figura 21: Geometria do Museu Nacional Grão Vasco no Rhinoceros 3D

Uma vez que a geometria da edificação foi modelada no próprio Rhinoceros 3D, não foi considerada uma parametrização das suas dimensões, ou seja, não é possível alterar as suas dimensões simplesmente através da entrada de dados no Grasshopper. No entanto, dado que este estudo se centra num edifício histórico com relevância considerável e, conseqüentemente, exige preocupações com a preservação dos seus aspetos arquitetónicos, qualquer intervenção profunda, como alterações na posição e dimensão de elementos, fechamento de aberturas ou a instalação de elementos de sombreamento (como brises e palas), é pouco expectável, senão mesmo impossível. Assim, a parametrização da geometria teria pouco interesse prático.

Como referido anteriormente, a Figura 22 ilustra a localização de cada um dos 12 compartimentos no modelo, indicando a respetiva designação. Os compartimentos são distribuídos da seguinte forma: 1 a 3 na fachada noroeste, 4 a 6 na fachada sudeste, 7 a 9 na fachada sudoeste e 10 a 12 na fachada nordeste.

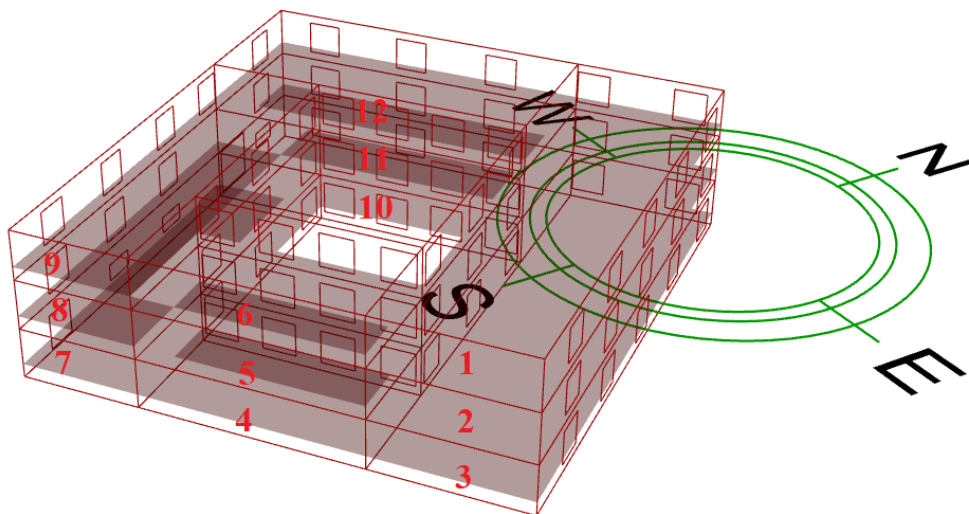


Figura 22: Localização dos “Rooms” do modelo considerando seu sentido geográfico

4.2. Caracterização dos materiais

Para as análises e simulações do modelo, é fundamental definir os materiais presentes nas soluções construtivas, incluindo as suas propriedades (condutibilidade térmica, densidade e calor específico). A caracterização rigorosa dos materiais é essencial para melhorar o rigor e a fiabilidade dos resultados. Para o modelo do edifício, foram parametrizados os materiais das paredes, pisos, cobertura e janelas. Para a definição

dos valores de base das propriedades, foi consultado o material denominado de ITE 50, um estudo feito por Santos & Matias (2006), e o relatório publicado por Mendonça (2005). Estes documentos apresentam tabelas com valores de referência para a condutibilidade térmica, densidade e calor específico de materiais habitualmente utilizados na construção, incluindo os necessários para as simulações realizadas.

Dessa forma, na Tabela 4 apresentam-se os valores obtidos tanto no ITE 50 como nos estudos de Mendonça (2005) para o granito e para o betão, que foram utilizados na modelação das paredes e dos pisos da edificação.

Elemento	Material	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Condutibilidade Térmica (W/m.K)
Parede externa	Granito	2600	650	3
Piso	Betão	2450	940	1.75

Tabela 4: Valores de densidade e calor específico para os elementos (Adaptado de Santos e Matias, 2006 e Mendonça, 2005)

De seguida, é necessário criar os objetos da parede de granito no Grasshopper. Como referido, a modelação foi realizada de forma parametrizada através da ferramenta “HB Opaque Material”. Esse objeto permite inserir e parametrizar os parâmetros da espessura (m), condutibilidade térmica (W/mK), densidade (kg/m³), calor específico (J/kgK) e rugosidade. A Figura 23 mostra o objeto “HB Opaque Material” usado para a modelação da parede de granito e os respetivos parâmetros de entrada e a Figura 24 mostra a mesma informação para o piso de betão.

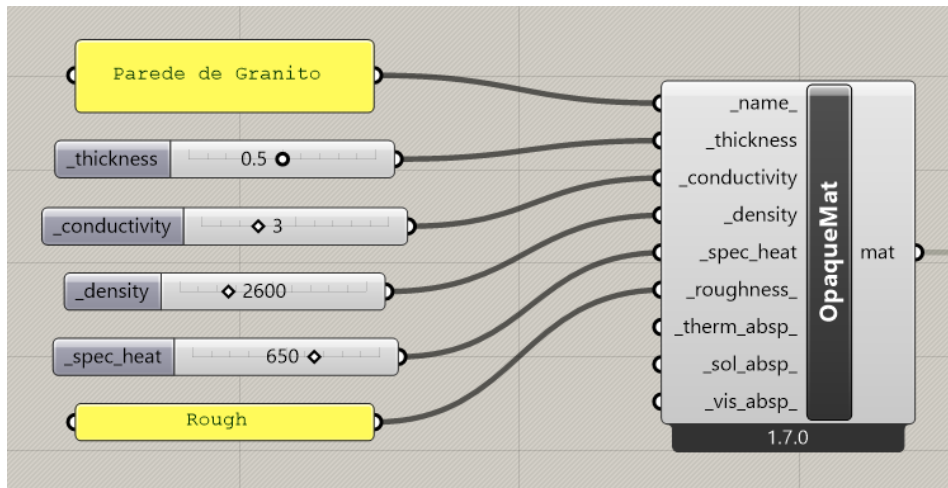


Figura 23: Parametrização da envolvente de granito

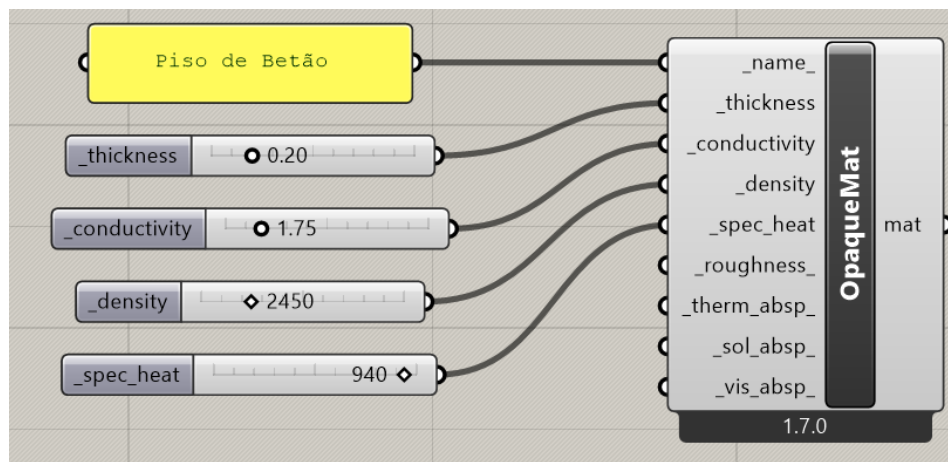


Figura 24: Parametrização do piso em betão

Para a cobertura, o Ladybug Tools oferece uma biblioteca variada de materiais e soluções construtivas com características adequadas para as simulações pretendidas. Assim, foi selecionado um tipo de telhado metálico para a aplicação no edifício de entre as várias opções disponíveis na biblioteca. Para o telhado escolhido, foi utilizado a ferramenta “HB Deconstruct Material” para obter as propriedades do mesmo. Foi verificado que a cobertura escolhida tem uma condutibilidade térmica (U) igual a 0.92 W/m².K. O processo de modelação dessa escolha é mostrado na Figura 25.

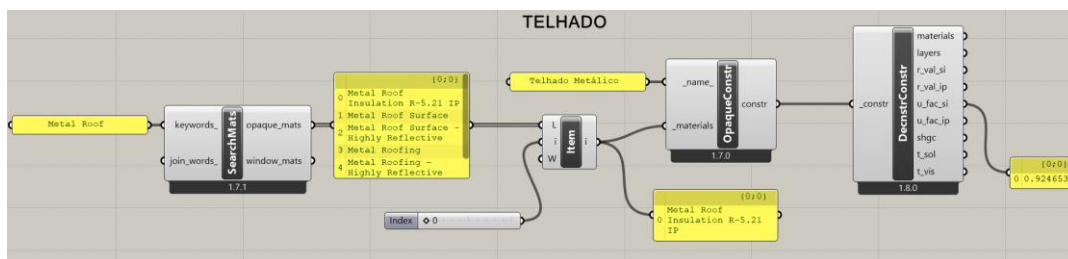


Figura 25: Criação do telhado utilizado no modelo

Para os vãos envidraçados utilizou-se o objeto “HB Window Material”, que requer a definição das características dos vidros, nomeadamente a sua condutibilidade térmica (W/m^2K), fator solar e a transmitância visível. Este objeto é posteriormente ligado ao objeto “HB Window Construction”, o qual, posteriormente, é aplicada no modelo de construção.

Foram realizadas simulações com três tipos de vidro, cujas propriedades foram definidas a partir da informação disponível no estudo desenvolvido por Sorgato et al. (2014): vidro simples incolor (situação inicial) e vidros simples laminado e duplo de baixa emissividade (situações de melhoria). As propriedades dos três tipos de vidro estão sintetizadas na Tabela 5.

Parâmetro	Vidro Simples Incolor	Vidro Simples Laminado	Vidro Duplo Baixo Emissivo
Condutibilidade térmica ($W/m^2.K$)	5,8	5,72	1,7
Fator solar (%)	0,82	0,45	0,19
Transmitância (%)	0,13	0,32	0,29

Tabela 5: Características dos vidros utilizados no modelo (Adaptado de Sorgato et al., 2014)

Na Figura 26, é apresentado, a título de exemplo, o fluxo de criação do material dos vidros para a simulação inicial. Para as soluções com a troca para vidro simples laminado e para vidro duplo de baixa emissividade, o fluxo é idêntico, tirando-se partido da parametrização das propriedades, ajustando-as para os respetivos valores, conforme indicado na Tabela 5.

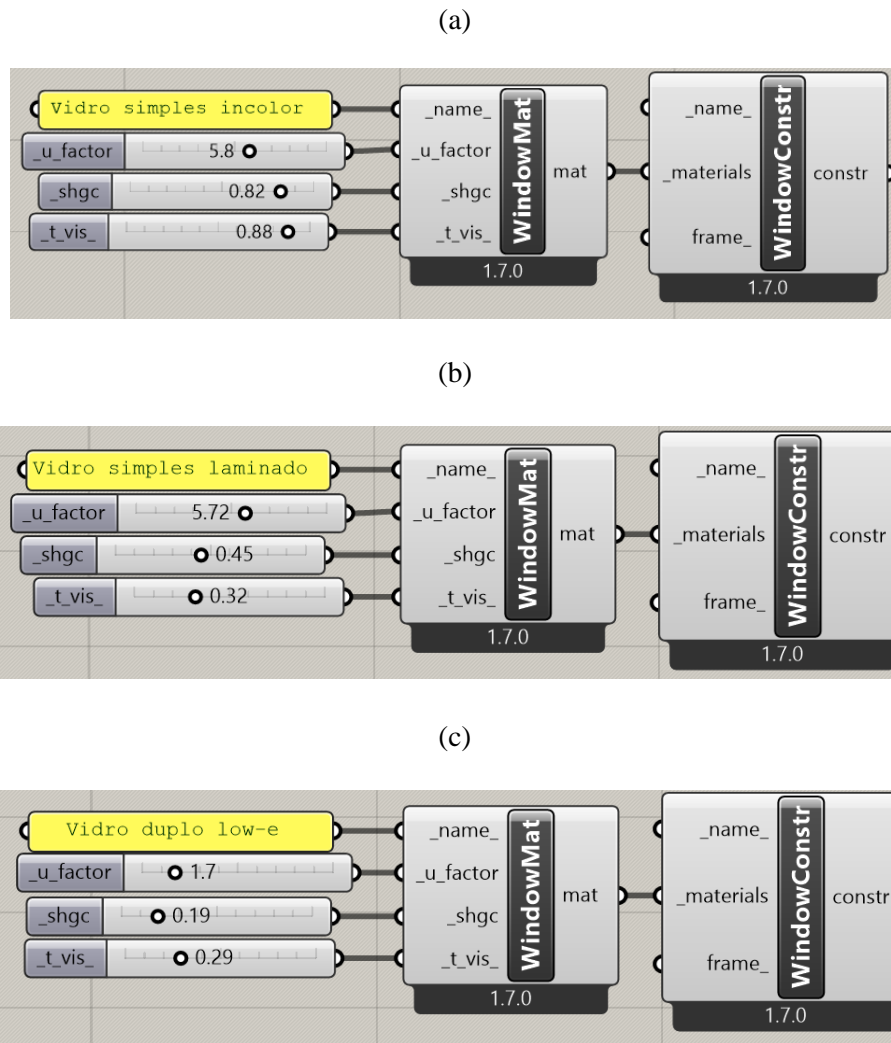


Figura 26: Parametrização do (a) vidro simples incolor, (b) vidro simples laminado e (c) vidro duplo de baixa emissividade utilizada no modelo

Com todas as características e materiais inseridos, é possível gerar os “subsets” interior e exterior e, após isso, colocar no modelo de construção com a ferramenta “Construction Set”, que será aplicado aos “Rooms” do modelo (Figura 27).

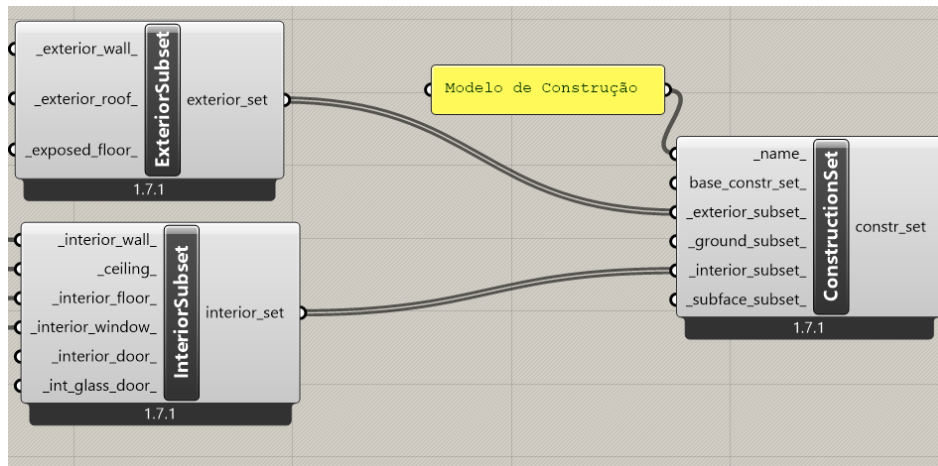


Figura 27: Criação do modelo de construção do museu

4.3. Ganhos internos e ventilação

Após a definição do modelo geométrico e da criação dos elementos construtivos e respectivos materiais, é necessário caracterizar a utilização do edifício, que deve considerar os horários de funcionamento e os ganhos internos associados. Para tal, foi consultado como referência o Decreto-Lei 79/2006, de 4 de abril, que, no seu anexo XV, apresenta um regulamento com padrões de referência de ganhos internos para diferentes tipos de utilização, para utilização na simulação energética de edifícios. Este regulamento fornece valores base e perfis tipo de utilização aplicáveis a edifícios destinados a museus e galerias. Estes valores e perfis servem como ponto de partida para as análises, definindo-se os ganhos internos resultantes da ocupação, iluminação e dos equipamentos elétricos. Para cada um destes grupos, é ainda estabelecido um perfil diário tipo de utilização, através da respetiva percentagem horária em relação ao valor de referência. Para a definição dos valores, foram considerados os ganhos internos para o cenário de ocupação em um dia de domingo ou feriado, período em que se verifica uma maior utilização do espaço, e este foi aplicado a todos os dias da semana.

Para a modelação dos ganhos internos, foi utilizado o objeto “Gene Pool” disponível no Grasshopper. Após definir as percentagens para cada hora, esta informação foi aplicada como input no objeto “HB Constant Schedule” para estabelecer o horário de funcionamento de cada parâmetro relacionado com os ganhos internos, mantendo-se esses horários constantes ao longo do período analisado na simulação. Na Figura 28, é apresentado o perfil de ocupação tipo estabelecido no Decreto-Lei mencionado.

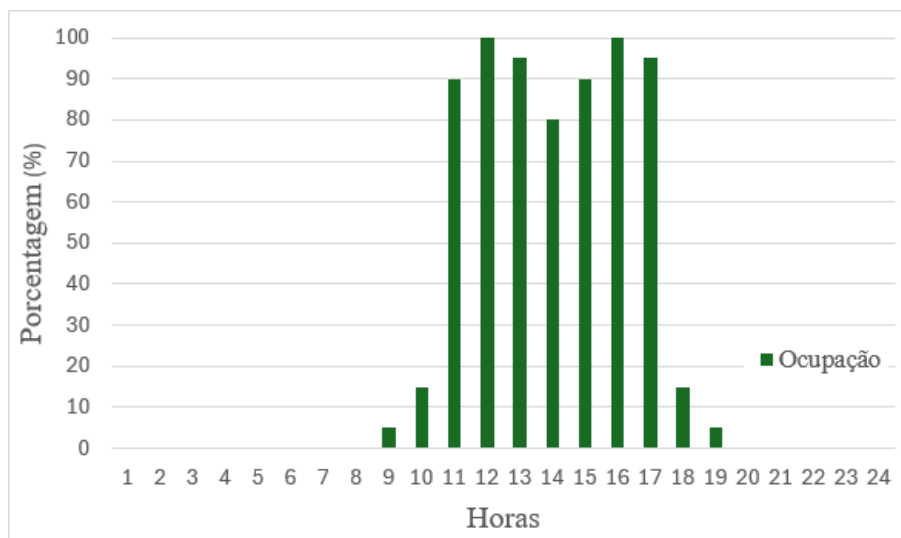


Figura 28: Porcentagens horárias para a ocupação de pessoas

De acordo com Decreto-Lei 79/2006, este perfil é aplicado a museus considerando um valor de densidade de ocupação de referência de 40 m²/pessoa. Como no software é colocada a quantidade de pessoas por m², é necessário converter esse o valor para 0,025 pessoas/m². Dessa forma, no software, foram colocados todos esses valores e perfis de ocupação, seguindo-se o fluxo apresentado no Figura 29.

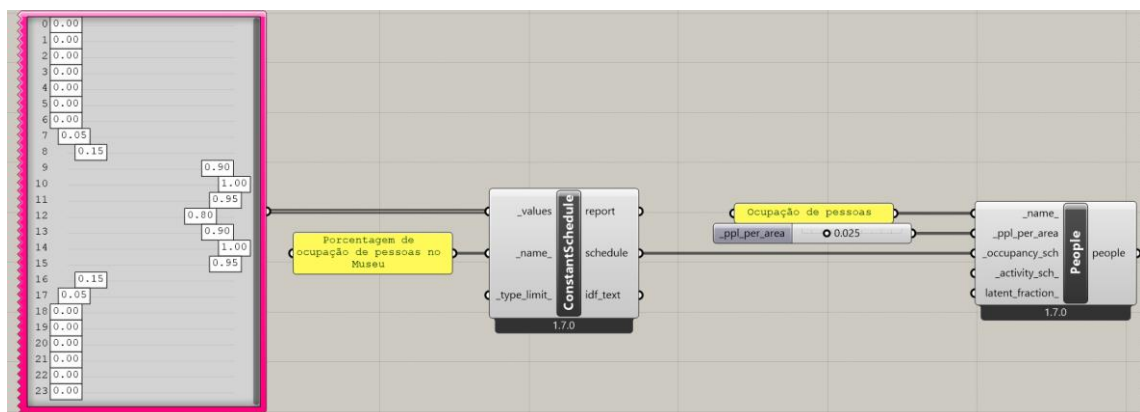


Figura 29: Criação do programa de ocupação de pessoas

Para a iluminação foi criado, da mesma forma, um funcionamento também com base no Decreto-Lei 79/2006. No caso da iluminação, o regulamento refere um valor base de referência de 15 W/m². O perfil diário de utilização da iluminação está apresentado na Figura 30 e o fluxo de modelação na Figura 31.

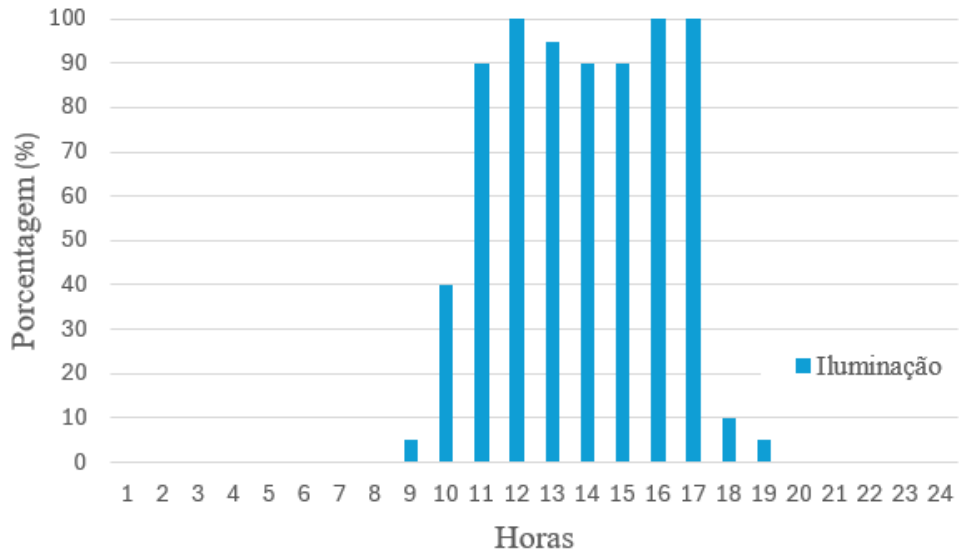


Figura 30: Porcentagens horárias para a iluminação

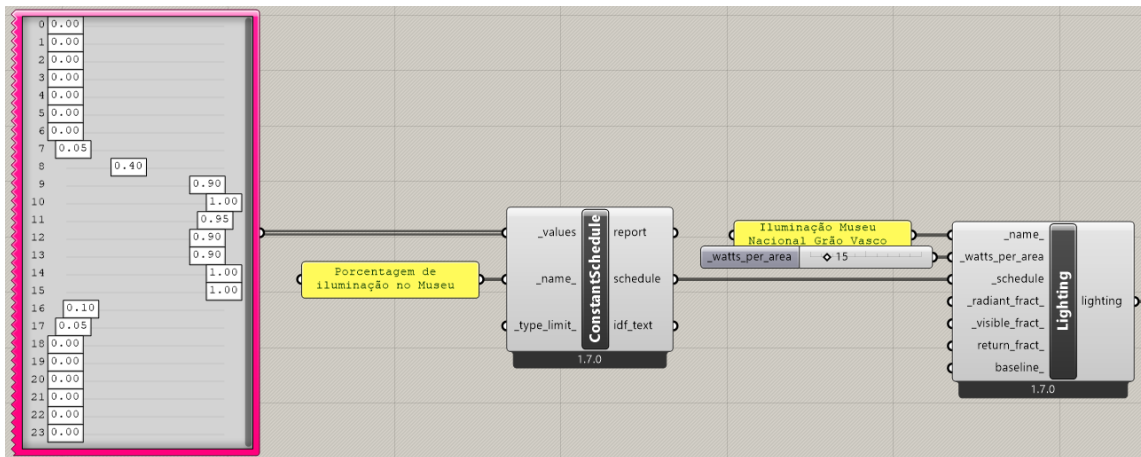


Figura 31: Criação do programa de iluminação

Da mesma forma que para a ocupação e para a iluminação, também foi feito o mesmo para os ganhos internos resultantes da utilização de equipamentos elétricos. As Figuras 32 e 33 mostram, respetivamente, o perfil diário de utilização e o fluxo de modelação onde se pode verificar que o valor de referência para esta grupo de ganhos é de 2 W/m².

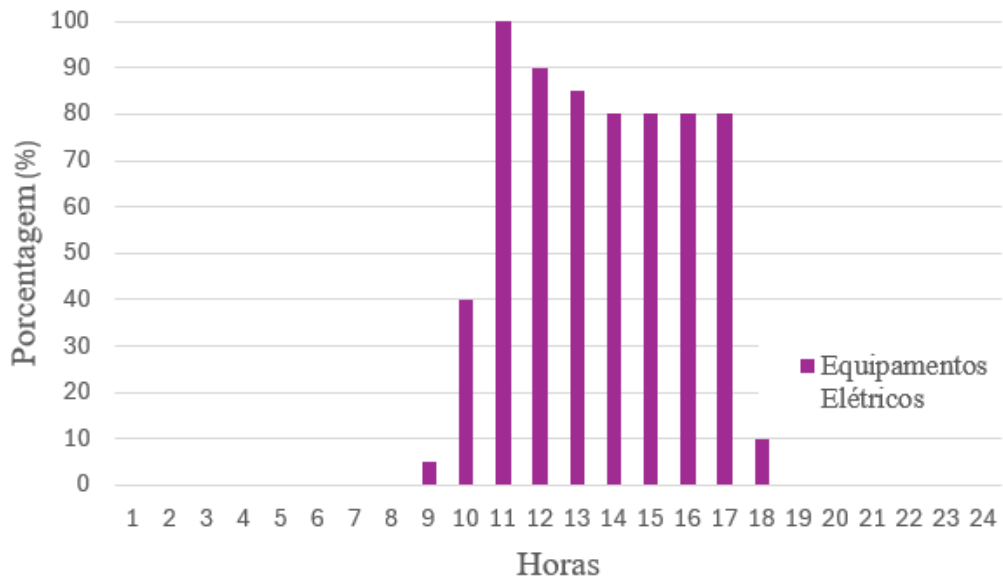


Figura 32: Porcentagens horárias para equipamentos elétricos

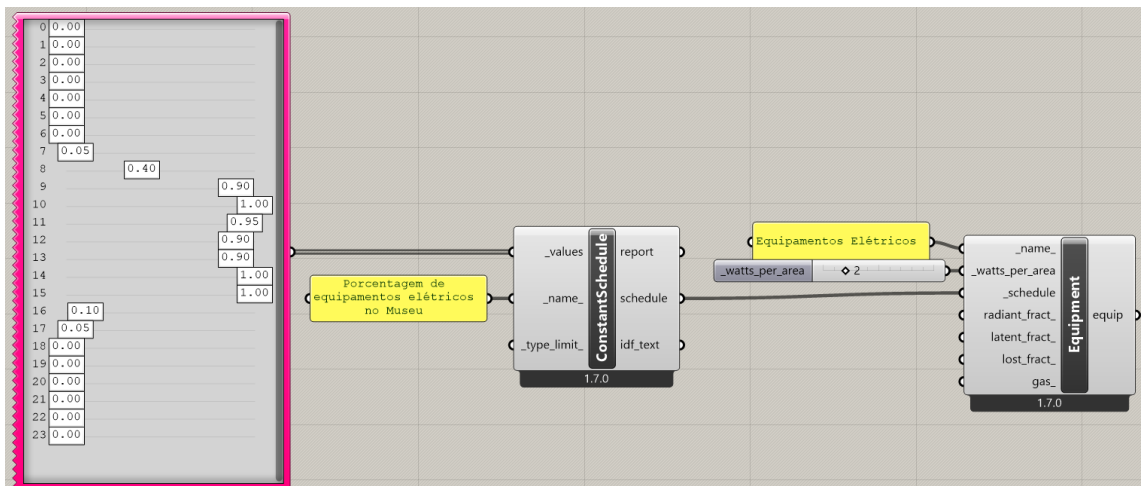
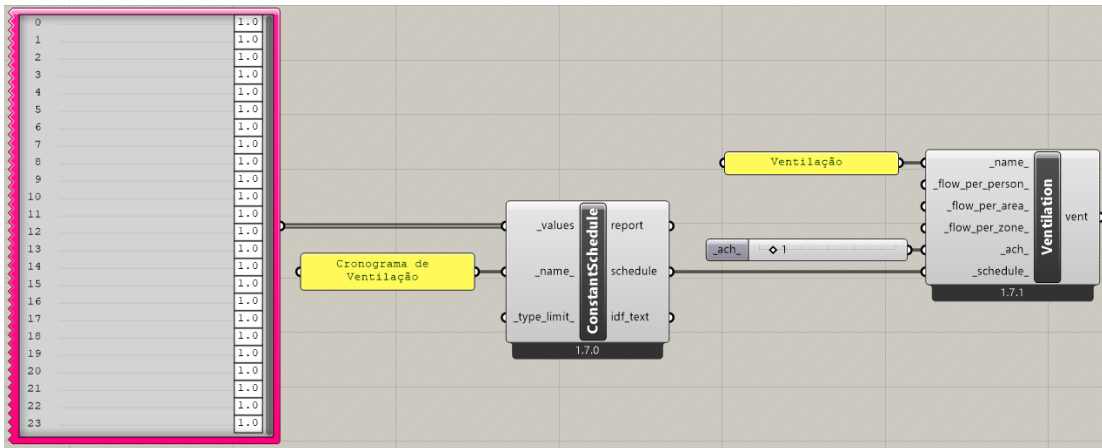


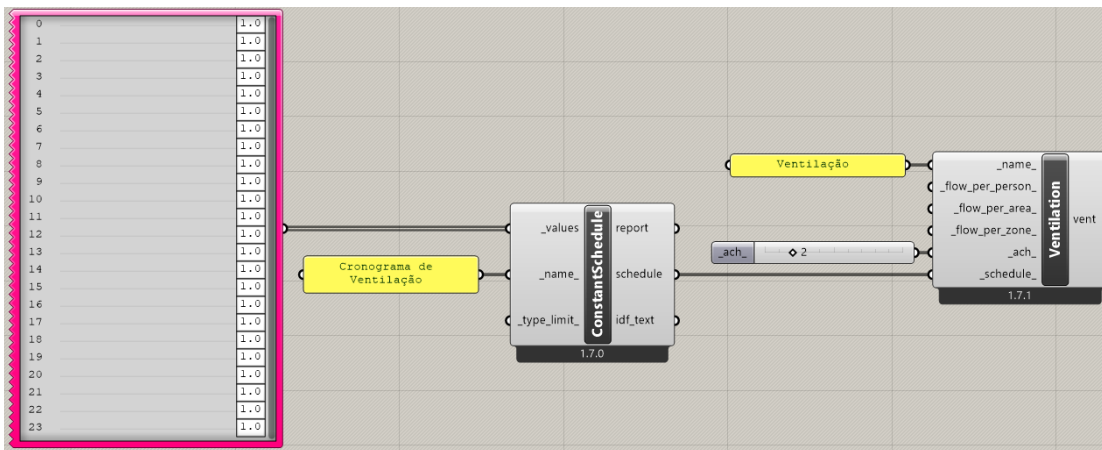
Figura 33: Criação do programa dos equipamentos elétricos

Para concluir a definição do programa de utilização do museu, foi estabelecido um valor de ventilação de 1 renovação por hora (RPH) para a situação inicial, mantendo-se constante ao longo de todas as horas do dia. Além disso, para as simulações abordadas na seção de resultados, foi também testada a alteração do valor de RPH para duas possibilidades. Para o primeiro caso, foi mudado o RPH para 2 e seu valor mantido constante ao longo do dia. Para a segunda hipótese, foi considerado o valor de 1 RPH mantido das 07:00 às 19:00 horas, e o valor foi elevado para 2 RPH durante o período restante do dia e noite. A Figura 34 traz os três casos colocados no programa.

(a)



(b)



(c)

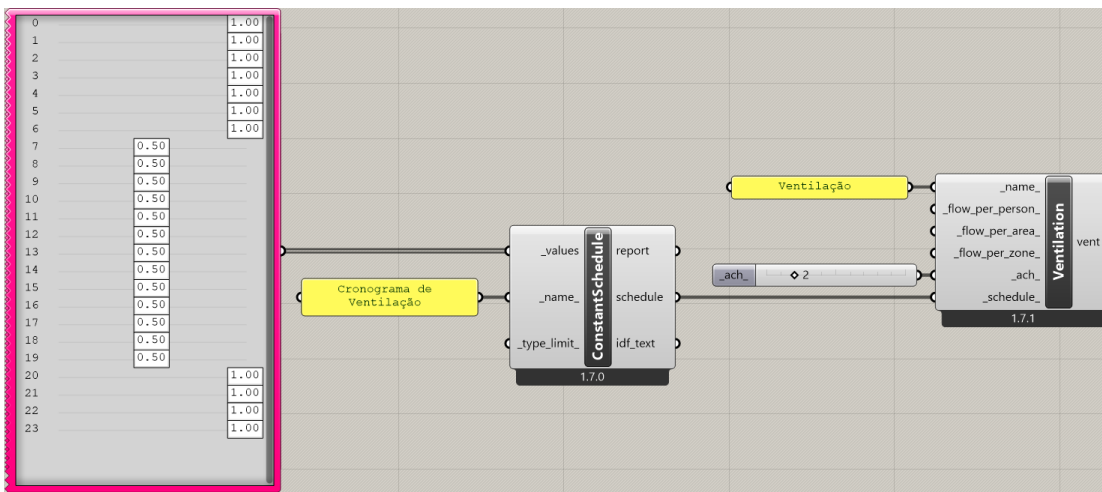


Figura 34: Criação de programa de ventilação para (a) 1 RPH constante, (b) 2 RPH constante, (c) 1 e 2 RPH variando durante o dia

4.4. Criação do *HB Model*

Antes de iniciar as análises e simulações, foi necessário criar um modelo HoneyBee, ou seja, compilar toda a informação introduzida na modelação no software adequado para a realização das análises. Primeiramente, no Grasshopper, foi criado um elemento denominado “Brep” para seleccionar e inserir todos os sólidos geométricos previamente modelados no Rhinoceros 3D. Em seguida, foi criado um “HB Room” utilizando a ferramenta “Room from Solid”. Com este procedimento, foram inseridas as geometrias, os conjuntos de construções, os programas de funcionamento (ganhos internos e ventilação). Também foi necessário especificar se os compartimentos do modelo dispõem de sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento, o que não se aplica a este estudo, uma vez que se pretende avaliar as condições de conforto térmico com o edifício funcionando em regime livre. Nesse sentido, definiu-se o parâmetro “conditioned_” como “False”. A Figura 35 ilustra o fluxo de criação dos compartimentos.

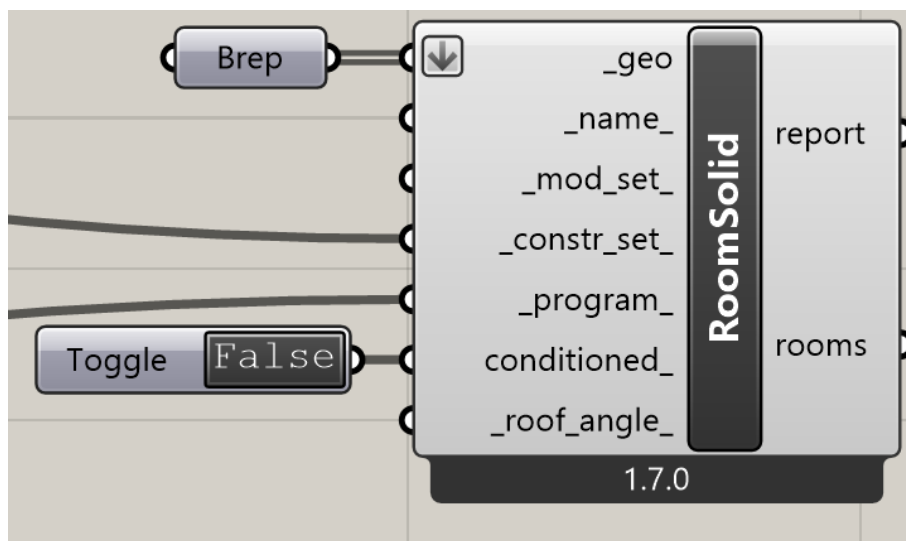


Figura 35: Criação dos “Rooms”

Após a criação dos 12 sólidos, todas as paredes são tratadas como externas e independentes, situação que não reflete a realidade. Assim, para assegurar que a intersecção entre os sólidos seja corretamente identificada e que a adjacência seja classificada de forma adequada, é necessário utilizar duas ferramentas específicas. Essas ferramentas permitem alterar a classificação das paredes externas para paredes internas ou, em algumas situações no caso de estudo, definir o ar como o elemento que preenche os espaços entre as paredes, quando não existem paredes internas. As

ferramentas utilizadas para este processo são a “HB Intersect Solids” e a “HB Solve Adjacency”, representadas na Figura 36.

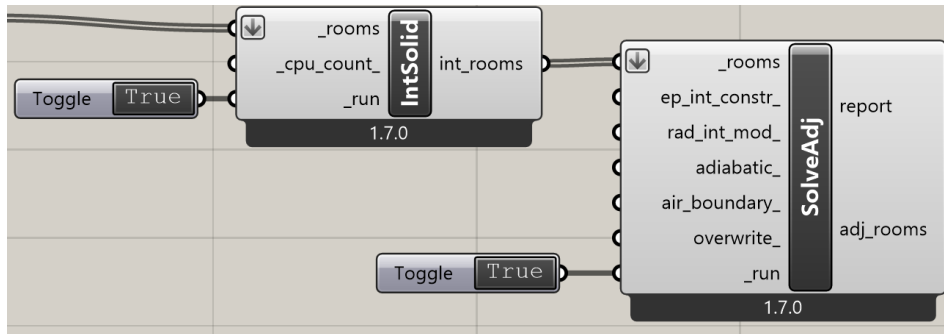


Figura 36: Funcionalidades para resolver problemas de intersecção dos “Rooms”

Simultaneamente, foi introduzido nos “Rooms” as janelas e portas previamente modelados no Rhinoceros 3D. Para as janelas foi utilizada a ferramenta de “Aperture” em que foi inserida a superfície e colocado um “Toggle” com o valor true na operabilidade, ou seja, indicando ao programa que esta janela permite ventilação. Para as portas do modelo há uma ferramenta “Door” em que se associa a respetiva superfície para este tipo de abertura.

Após esta fase, com os “Rooms” criados anteriormente e os respetivos vãos envidraçados e portas também já definidos, toda a informação é ligada na ferramenta “HB Model” para a criação do modelo final que será utilizado para as simulações. O processo descrito acima é visível na Figura 37.

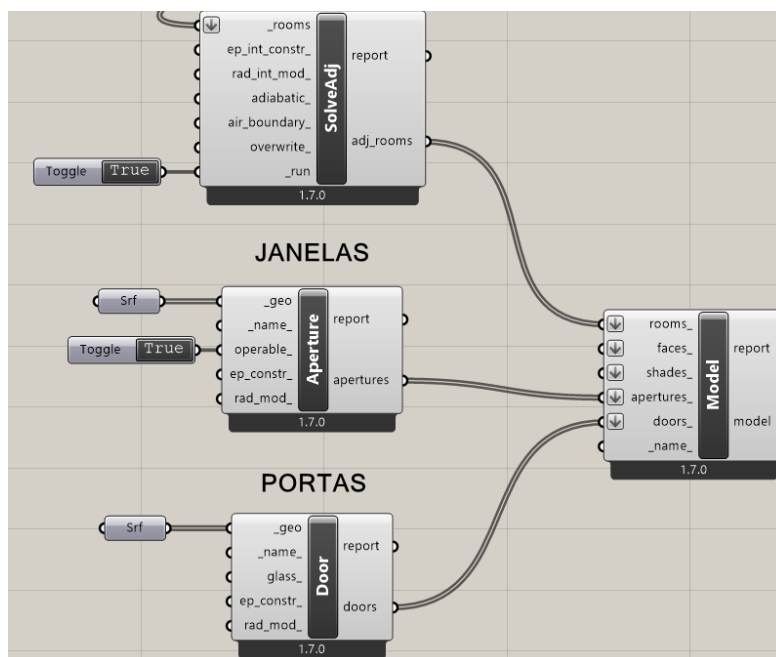


Figura 37: Aplicação de portas e janelas no modelo

Grasshopper. Esta URL é então adicionada sob a forma de elemento de texto, no caso um “Panel”, e ligada na ferramenta de “Download EPW”, para que, aquando da simulação, o programa faça o download dos dados climáticos do local. As Figuras 40 e 41 demonstram estas etapas.

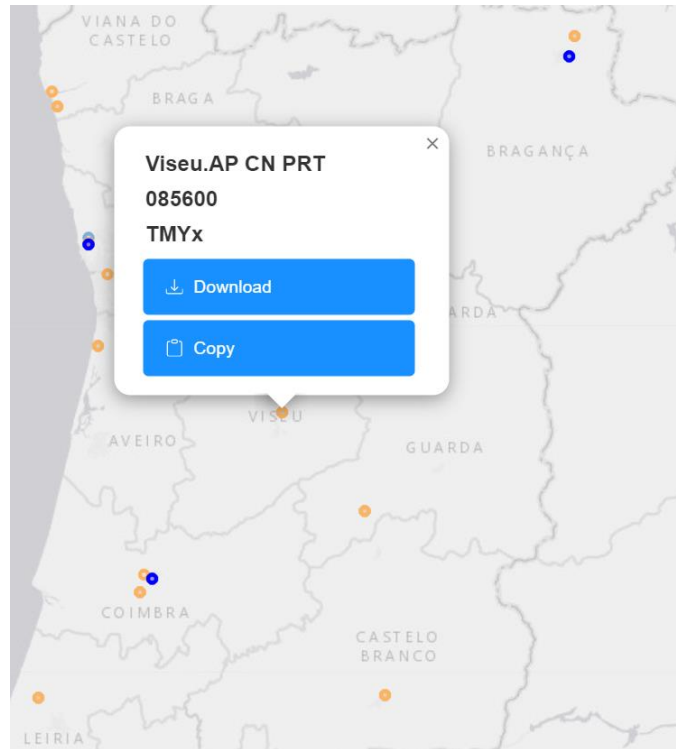


Figura 40: Escolha da localidade do caso de estudo (Ladybug Tools, 2024)

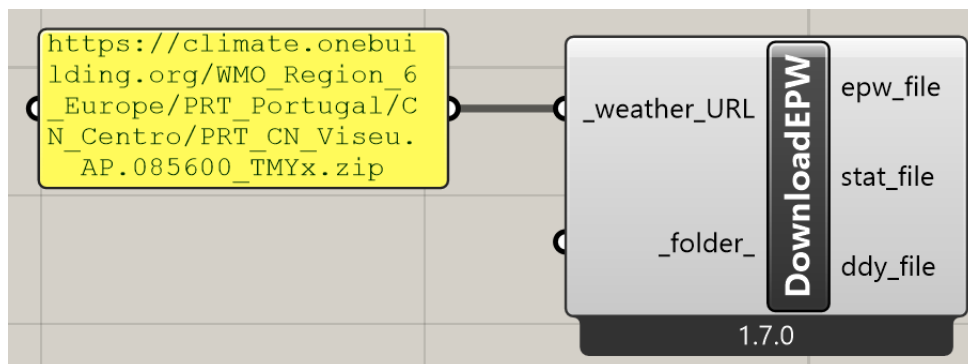


Figura 41: Aplicação da URL da localidade para baixar os dados climáticos

Após o download dos dados EPW, esta informação é importada através da funcionalidade “Import EPW”, permitindo ao utilizador ter acesso desde logo a toda a informação climática do local, como, por exemplo, a temperatura de bulbo seco, a velocidade do vento, humidade relativa, entre outros dados climáticos, conforme apresentado na Figura 42.

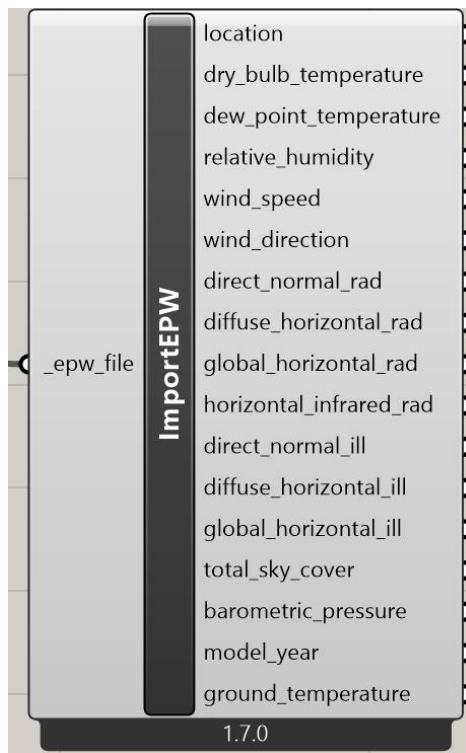


Figura 42: Importação do ficheiro EPW local e respetivos parâmetros climáticos

4.6. Obtenção dos resultados

Com o modelo criado e os dados climáticos associados, foram utilizadas as ferramentas disponíveis no Ladybug Tools para obter os resultados desejados. Inicialmente, foi definido o período de análise pretendido para a simulação. Para tal foi utilizado como base de análise um período da época de verão para o qual se tinham disponíveis dados de temperatura medidos em várias salas do museu. A informação relacionada com esta medição está detalhada na próxima secção deste documento (4.7). O intervalo selecionado para a análise corresponde a um período de verão em que o museu se encontra com condições bastante desfavoráveis associadas ao sobreaquecimento. Assim, foi estabelecido o intervalo de análise desde do dia 26 de junho, às 11 horas da manhã, até ao dia 12 de setembro, às 09 horas da manhã, totalizando-se 1896 horas de análise.

Por fim, foi necessário definir os parâmetros de output da simulação. Uma vez que o objetivo do estudo é avaliar as condições de conforto, na ferramenta “Simulation Output”, foram selecionadas apenas as métricas associadas ao conforto térmico. Em paralelo, na ferramenta “Simulation Parameter”, foram inseridos o período de análise definido anteriormente e indicada a orientação do edifício.

A Figura 43 apresenta os objetos e fluxos necessários para a definição do período de análise e das condições de simulação no Grasshopper.

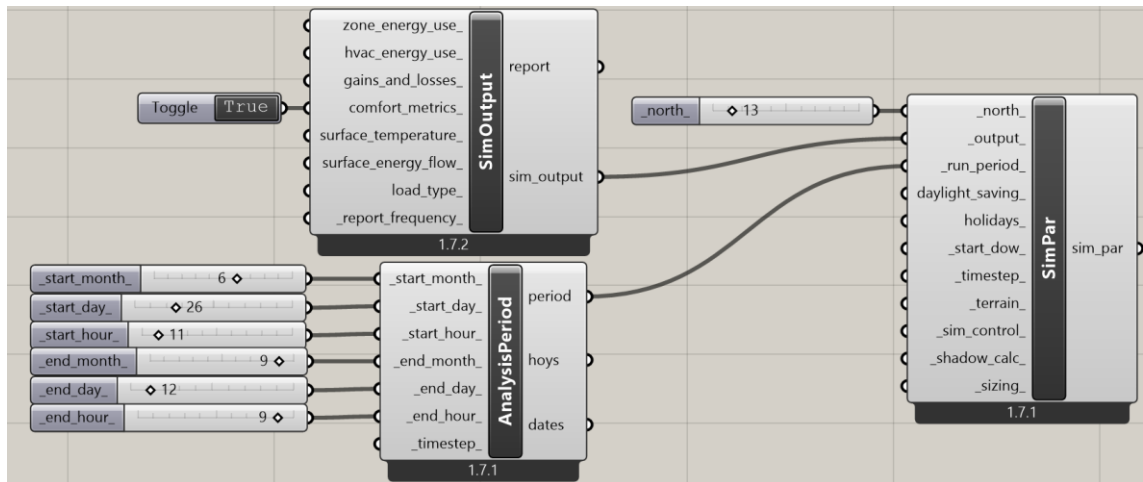


Figura 43: Passos para a simulação do modelo

Nesta fase é ainda necessário ligar a informação relativa aos dados climáticos (.EPW) e o parâmetro de simulação definido acima na ferramenta “HB Model to OSM”. Como resultado da simulação, o programa permite extrair a informação em diferentes formatos, tais como sql, html, idf, entre outras, como pode ser observado na Figura 44.

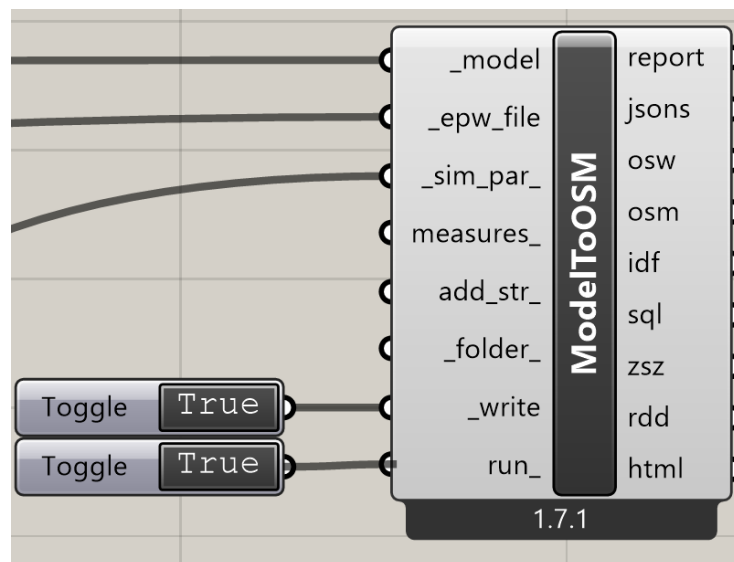


Figura 44: Criação da simulação

4.7. Medição das condições ambientais interiores

Para que se pudesse avaliar os resultados obtidos nas simulações térmicas da edificação, mais precisamente da temperatura interior em diferentes pontos do museu, foram utilizados dados medidos de temperatura no museu. Esta informação estava disponível a

partir de um estudo realizado anteriormente no edifício, em que se realizou uma monitorização contínua das condições ambientais interiores, recorrendo a sensores portáteis de temperatura e umidade relativa. Desta forma, foram utilizados os valores horários de temperatura do ar interior em quatro salas do museu, cada uma com uma orientação diferente, acompanhando as orientações das fachadas do edifício, tal como apresentado na seção 4.1. O período de análise considerado para o estudo foi entre junho e setembro, em que há elevado risco de sobreaquecimento no museu.

Na Figura 45 é apresentada a localização dos sensores em cada uma das orientações da fachada, com uma numeração correspondente para cada um dos compartimentos do museu que, posteriormente, serão comparados com os “Rooms” correspondentes. Ainda assim é necessário trazer que não há sensores para todos os “Rooms” que foram definidos no modelo e, desta forma, o estudo se focará apenas nos que apresentam sensores para que haja a comparação devida.

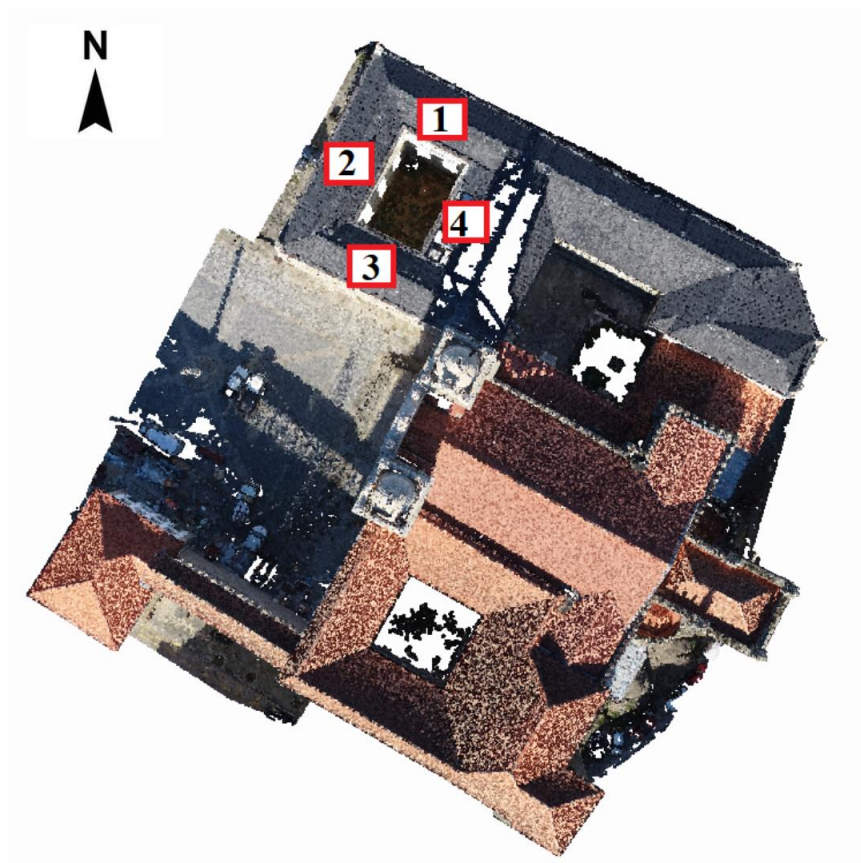


Figura 45: Localização dos sensores

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Comparação temperatura interna medida e simulada

A primeira análise que foi realizada consistiu na comparação dos valores de temperatura medida e simulada, considerando o período de análise referido na secção 4.6., ou seja, no período compreendido entre o dia 26 de junho às 11 horas da manhã e o dia 12 de setembro às 09 horas da manhã, totalizando 1896 horas. Devido a algumas falhas pontuais no registo horário dos sensores utilizados para as medições no local, o número total de horas analisado acabou por ser reduzido para 1.871 horas, retirando-se os valores das horas em que não se obteve dados.

Os dados climáticos utilizados na simulação não são os reais do período de medição. Assim, para garantir alguma consistência e comparabilidade dos resultados, foi efetuada uma comparação entre as temperaturas exteriores medidas durante o período de monitorização e as temperaturas exteriores obtidas a partir do ficheiro climático (.EPW), obtido diretamente pelo Ladybug Tools. O objetivo desta análise é perceber se apresentam algum grau de similaridade e, conseqüentemente, se o modelo está a responder de forma adequada, não se esperando, obviamente, uma semelhança total entre os registos mas sim que apresentem a mesma ordem de grandeza. A Figura 46 ilustra o comportamento de ambas as séries de dados relativas à temperatura exterior.

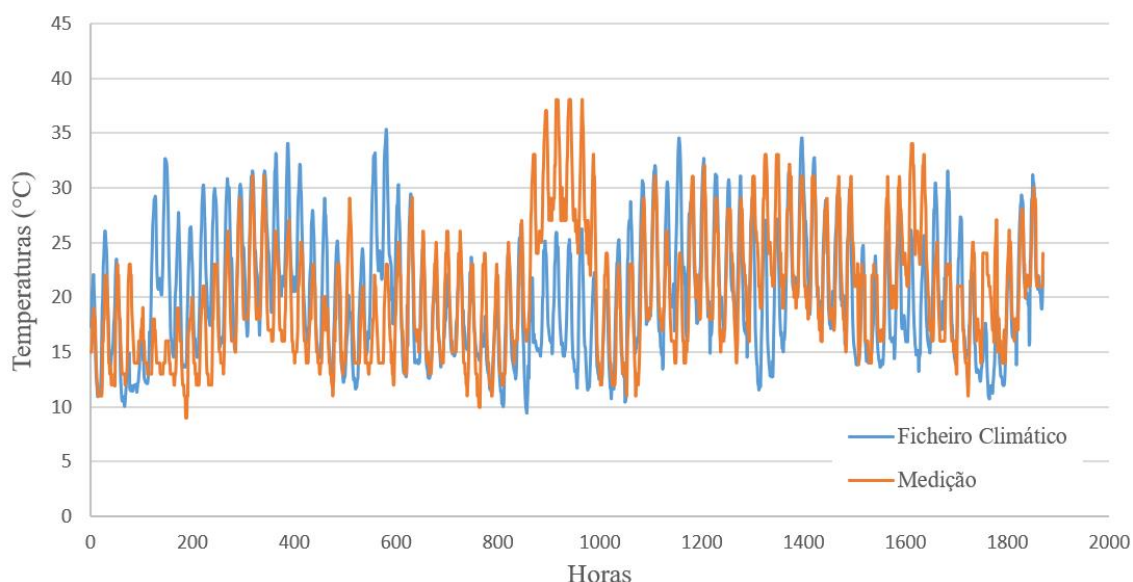


Figura 46: Variação da temperatura exterior a partir do ficheiro climático e medida no local

Analisando os resultados, percebe-se que, exceto alguns picos localizados, as temperaturas exibem um certo grau de semelhança. A média das temperaturas medidas

no local foi de 20,29 °C, enquanto que a média das temperaturas obtidas pelo software foi de 20,04 °C, revelando uma pequena diferença de temperatura na ordem de 0,25 °C. Estes resultados mostram que as séries são comparáveis e que, desta forma, os registos de temperatura interior medidos podem ser utilizados para aferir a validade do modelo de simulação criado.

Após a comparação das temperaturas externas, foi realizada uma análise comparativa entre quatro zonas, cada uma correspondente a um lado de orientação das fachadas. É importante destacar que a denominação dos “Rooms” está apresentada na secção 4.1 e a localização e denominação dos sensores são descritas na secção 4.7. Nas Figuras 47, 48, 49 e 50 são apresentados os gráficos com os dados de temperatura interior simulada referentes a cada um dos “Rooms” e o respetivo valor da temperatura medida pelo sensor no local.

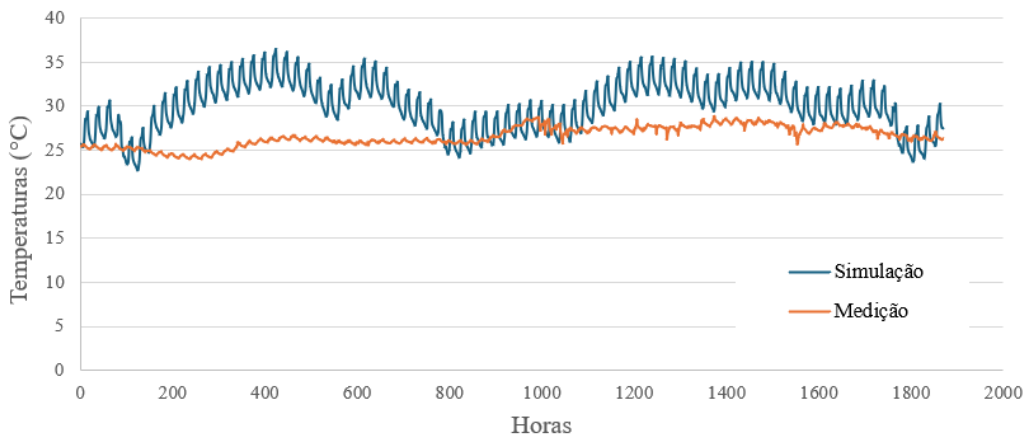


Figura 47: Variação da temperatura no Room 3 x Sensor 1

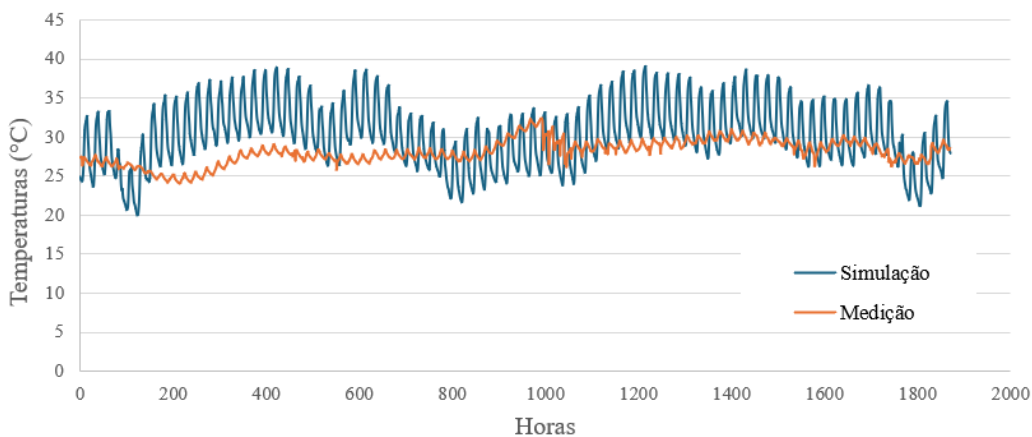


Figura 48: Variação da temperatura no Room 12 x Sensor 2

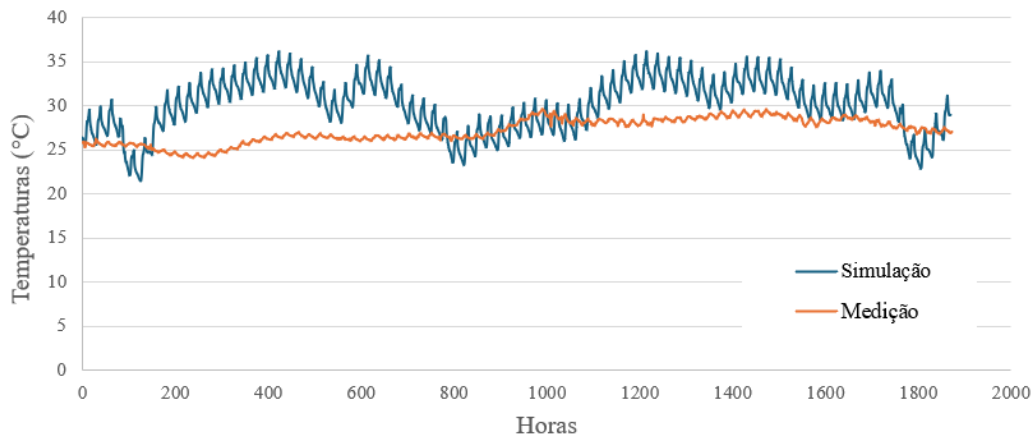


Figura 49: Variação da temperatura no Room 8 x Sensor 3

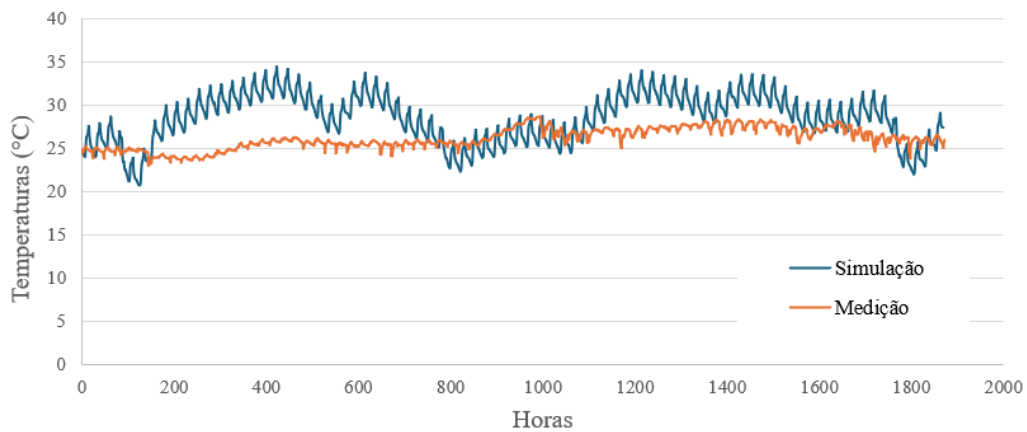


Figura 50: Variação da temperatura no Room 5 x Sensor 4

Na Tabela 6 é mostrado as temperaturas médias para as zonas em comparação com a medida e a respetiva diferença.

Zona	Temperatura média simulada (°C)	Temperatura média medida (°C)	Diferença (°C)
Room 3	30,24	26,61	3,63
Room 12	30,39	28,11	2,35
Room 8	30,25	27,2	3,05
Room 5	28,76	26,13	2,63

Tabela 6: Comparação dos valores médios de temperatura da simulação inicial com a medição real

A análise do modelo revela que, para o período analisado, a simulação resultou em temperaturas superiores às observadas em campo, com uma diferença entre 2,3 e 3,6°C. Apesar desta discrepância, as condições de sobreaquecimento no museu durante este período permanecem evidentes em todos os casos. Adicionalmente, a simulação mostra uma amplitude de variação de temperatura mais acentuada em comparação com as medições, que se mantêm numa relativa constância. Essa característica da presença de picos de temperatura pode ser uma consequência do modelo utilizado na simulação. Em termos gerais, o modelo parece ter dificuldade em modelar o efeito da inércia térmica do edifício, tornando-o muito mais sensível aos estímulos exteriores do que o verificado nas medições. O fato de a dimensão dos compartimentos do museu ser elevada também pode ajudar a explicar este fenômeno, uma vez que os sensores estavam colocados em zonas protegidas e, portanto, menos sensíveis a variações provocadas, por exemplo, pelo efeito dos ganhos solares. Outro ponto que pode ser evidenciado é o fato de o software sobrevalorizar os ganhos internos, os quais estariam presentes apenas no período de funcionamento do museu. Eventualmente, uma maior discretização e detalhe das zonas térmicas poderia ajudar a melhorar o modelo.

De qualquer forma, considera-se que a ordem de grandeza dos resultados é equivalente e suficiente para os objetivos deste trabalho. Assim, dado o problema de sobreaquecimento identificado no museu, foi primeiramente proposta a substituição dos envidraçados, com base nos parâmetros estabelecidos na secção 4.2, e, posteriormente, a alteração nas condições de ventilação do museu.

5.2. Simulações da temperatura interna após a troca dos envidraçados

Primeiramente, para tentar perceber o efeito da alteração dos envidraçados no comportamento do museu, foi realizada a troca dos envidraçados de vidro simples incolor (VS) para um vidro simples laminado (VSL) e, posteriormente, do VS para um vidro duplo de baixa emissividade (VDBE). Em termos de análise, foi escolhido o “Room” 12 para avaliar o impacto das trocas. A escolha desse compartimento do museu se deu pois, como é possível ver na Tabela 5, na secção 5.1, apresenta uma maior temperatura média, indicando o pior cenário para a análise do sobreaquecimento. A Figura 51 mostra a variação de temperatura interior para cada uma das situações, para todo o período simulado e para um dia típico.

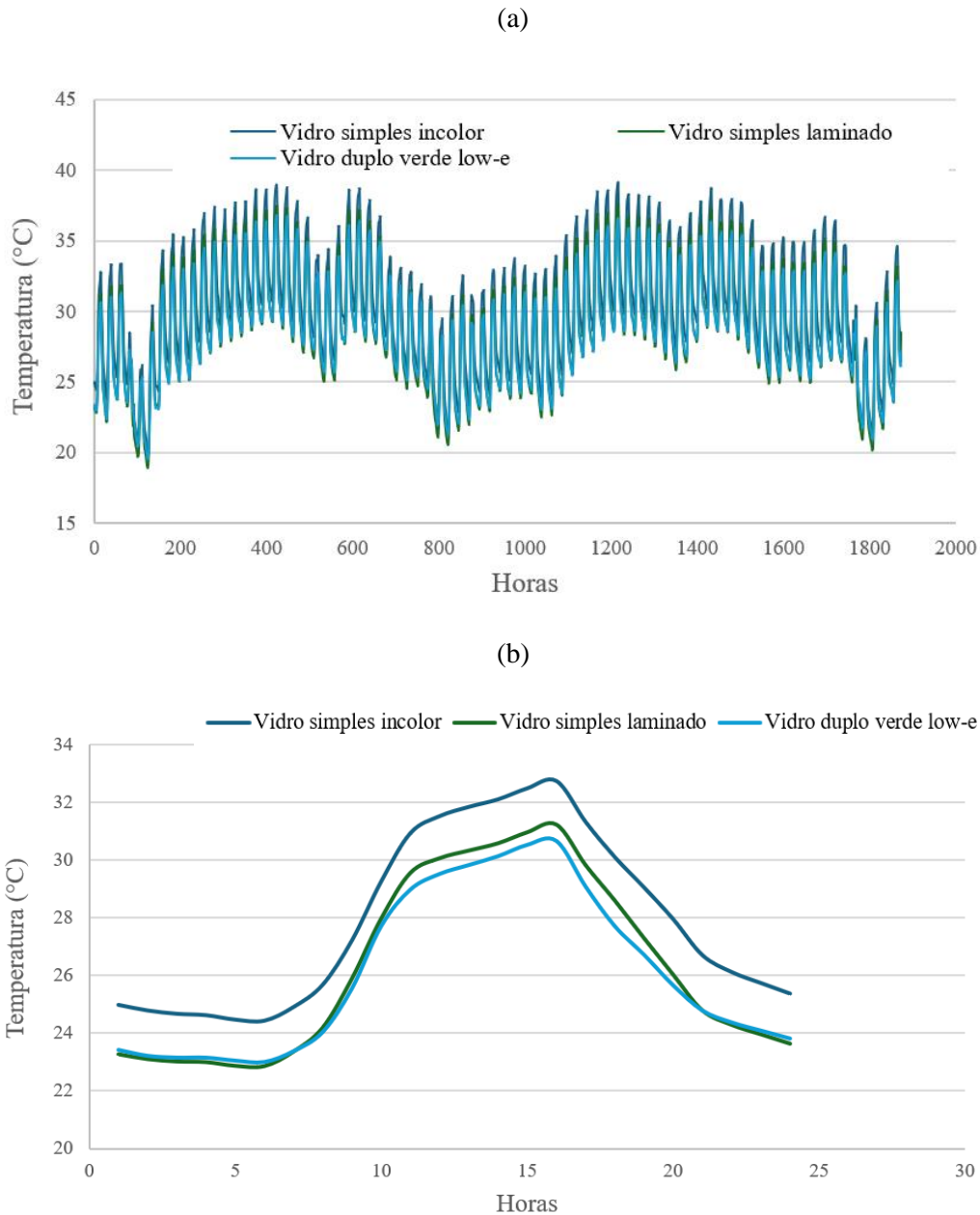


Figura 51: Variação da temperatura no Room 12 para analisando (a) todo o período e (b) apenas um dia.

Os resultados mostram que, para o vidro simples incolor (VS) inicialmente simulado, há uma maior variabilidade na temperatura, resultando nos picos observados nos gráficos. O vidro simples laminado (VSL) traz uma pequena diminuição nos picos do gráfico, sendo que, para o vidro duplo de baixa emissividade (VDBE), há uma maior redução na amplitude das variações de temperatura. Para melhor detalhar e contabilizar as diferenças na temperatura resultantes da substituição dos vidros, foram calculadas as diferenças de temperatura entre a situação inicial e cada uma das alternativas propostas. A Figura 52 mostra essas diferenças ao longo do período de análise.

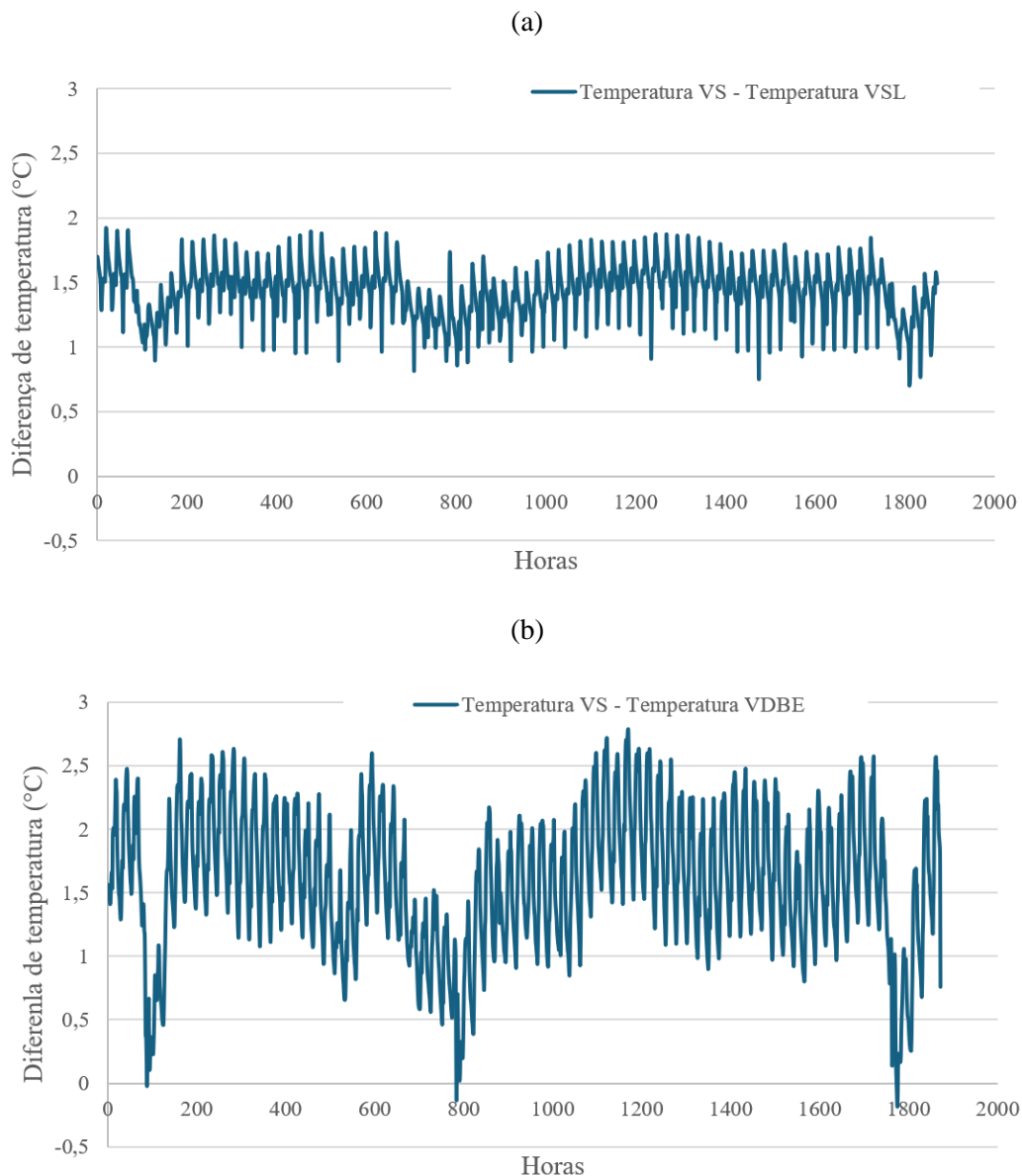


Figura 52: (a) comparação entre a temperatura de vidro simples x vidro simples laminado;
 (b) comparação entre vidro simples e vidro duplo de baixa emissividade

Observando-se os gráficos da Figuras 51 e 52 são expostos os dados com a temperatura média de cada solução, a diferença entre as médias das possibilidades de troca de envidraçados se comparados com a média da situação inicial, verificando reduções na ordem de $1,5^{\circ}\text{C}$. Também é verificado a maior temperatura observada em cada uma das simulações durante o período e a maior diferença entre o VS e as outras hipóteses para um mesmo horário (Tabela 7).

Room 12	Temperatura média (°C)	Diferença entre as médias (°C)	Maior diferença para um mesmo horário (°C)	Maior temperatura observada no período(°C)
Vidro simples (VS)	30,39	----	----	39,13
Vidro simples incolor (VSL)	28,96	-1,43	1,92	37,55
Vidro duplo baixo emissivo (VDBE)	28,79	-1,6	2,79	36,8

Tabela 7: Dados obtidos comparando as soluções de envidraçados

Outro dado observado foi a porcentagem em que a diferença entre a temperatura observada na simulação do VS ficou mais que 1°C acima das outras. Para o VSL, o resultado se verificou para 97% das amostras, enquanto que para o VDBE foi verificado para 87%. Entretanto, ao se observar os pontos em que essa diferença está acima de 1,5°C, para o VSL se verifica em 40% do tempo, enquanto que para o VDBE fica em 57%.

Ainda para o Room 12, foi utilizada a funcionalidade do HB-Energy, em que é possível a obtenção de um mapa térmico do ambiente. Com esta ferramenta, é possível uma melhor visualização do comportamento térmico do espaço, pois é possível observar a temperatura média em cada ponto do compartimento. Na Figura 53, é possível perceber que as janelas situadas na parte central do museu são as áreas com maior incidência solar, resultando em temperaturas mais elevadas na sua proximidade, enaltecendo diferenças nas temperaturas na ordem de 2°C. Em contraste, o lado oposto, apesar de possuir duas janelas adicionais, apresenta uma menor incidência solar.

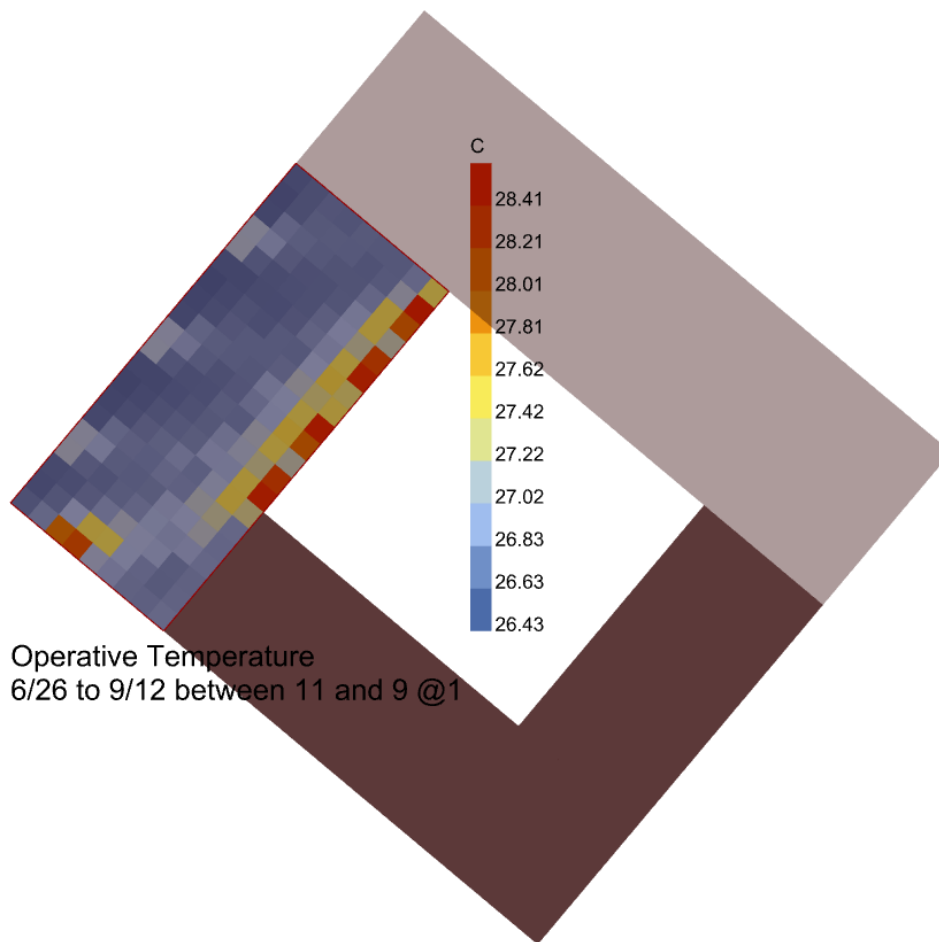


Figura 53: Temperatura operativa do “Room” 12 com vidro simples para o período analisado

5.3. Impacto da troca de envidraçados no conforto térmico

Para a análise de conforto do usuário foi utilizada a categoria III do modelo adaptivo da EN 16798-2 (2019) referido no item 2.2.2. do referencial teórico.

A análise de conforto centrou-se no compartimento Room 12. Nas Figuras 54 é possível observar os resultados da avaliação do conforto térmico através do modelo adaptativo, com a utilização da temperatura operativa na situação inicial (vidro simples incolor), com vidro simples laminado e com vidro de baixa emissividade, respetivamente.

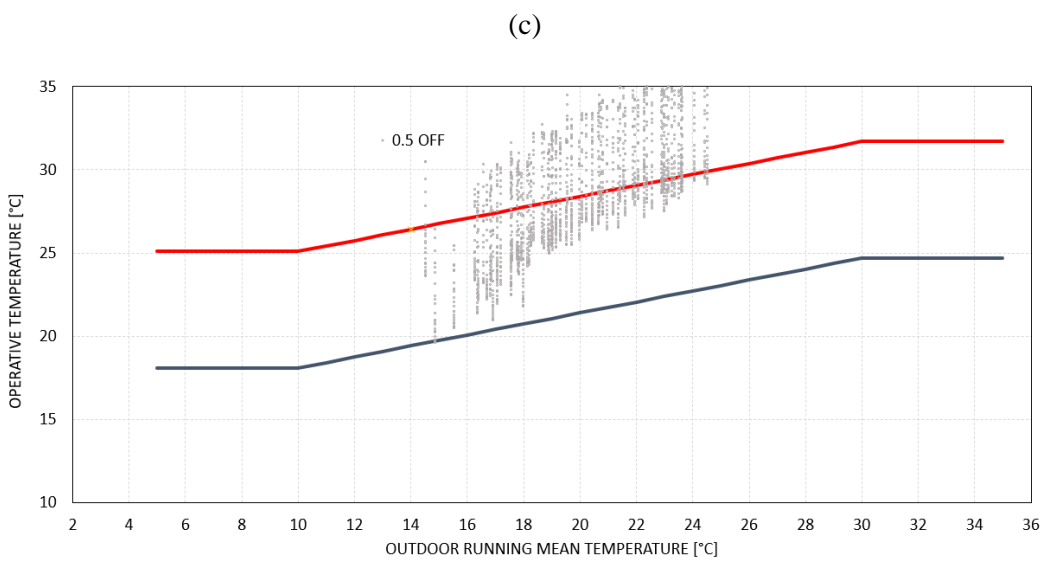
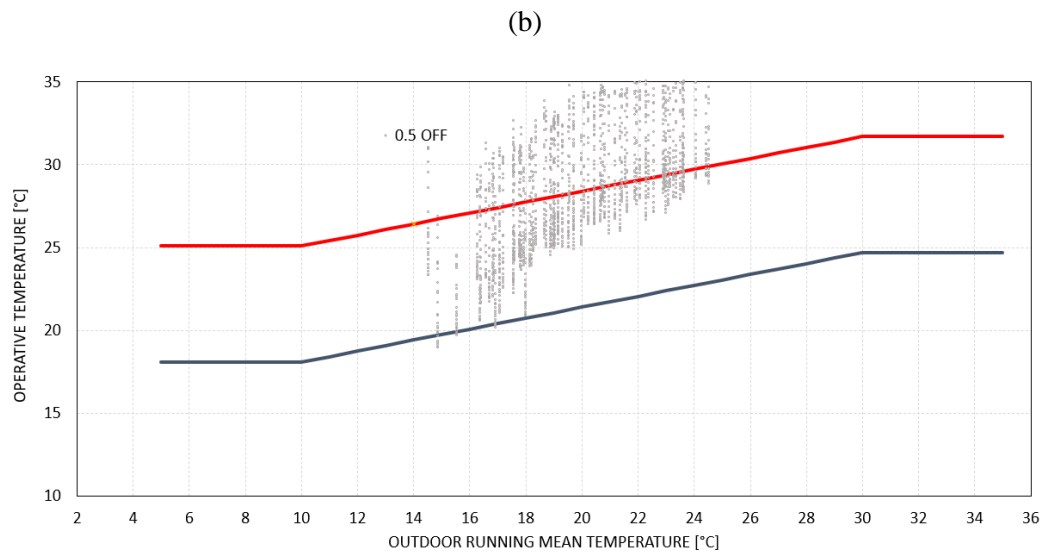
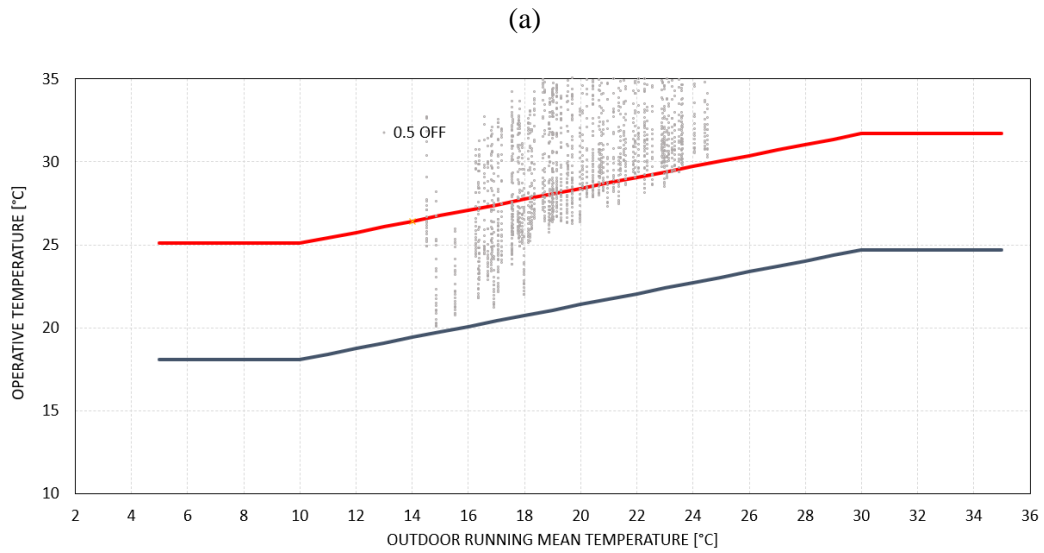


Figura 54: Conforto adaptativo do Room 12 com (a) vidro simples incolor, (b) vidro laminado simples e (c) vidro duplo de baixa emissividade

Na Tabela 8 é mostrada a porcentagem de desconforto para o calor e a temperatura média de desconforto para cada uma das simulações.

Room 12	Temperatura média de desconforto (°C)	Porcentagem de desconforto (%)
Vidro simples incolor	32,89	56,17
Vidro simples laminado	32,38	39,34
Vidro duplo baixo emissivo	31,99	36,34

Tabela 8: Comparação dos valores de desconforto com soluções de envidraçados

Observando os resultados de conforto, é visto que, com a solução da troca de envidraçados, há uma significativa diminuição no desconforto para o calor, chegando até quase 20% com a troca do VS para o VDBE. Entretanto, nos períodos em que se verifica o desconforto térmico, é visto que a temperatura ainda se mantém consideravelmente elevada, ultrapassando os 31°C em todos os casos.

Pelos dados, é possível dizer que a troca dos envidraçados é uma possível solução para diminuir o período de ocorrência de sobreaquecimento do museu; no entanto, apenas essa medida não resultará na solução definitiva do problema evidenciado.

Ainda assim, para o caso inicial simulado (vidro simples incolor), foi verificado o máximo período de tempo seguido em que o museu esteve em situação de desconforto térmico para o calor, tendo o valor de 44 horas seguidas nessa situação.

Outra análise realizada para o vidro simples incolor foi a verificação da média da temperatura de conforto térmico e a média das diferenças das temperaturas entre a zona que estava em conforto térmico e o limite em que passaria para o desconforto térmico. Os resultados mostraram que a média da temperatura em conforto térmico é de 26,76°C e a média da diferença entre a temperatura simulada e o limite para o desconforto é de 2,26°C.

5.4. Análise do impacto da ventilação no modelo

Outra análise realizada focou na variação da temperatura em função do impacto da ventilação no espaço, particularmente através da alteração do parâmetro de renovações por hora (RPH), mantendo-se o vidro simples para as simulações deste impacto. Inicialmente, foi considerado um valor de RPH de 1 constante para todas as horas do dia. Em seguida, foi simulada uma situação com RPH também constante, com um valor de 2. Finalmente, para uma última hipótese, foi considerado que o RPH possui o valor de 1 entre as 07:00 e as 19:00, e de 2 nos horários restantes. Na Tabela 7, são apresentados os valores médios das temperaturas do “Room” 12 para as três situações de envidraçados e com a variação do parâmetro ventilação.

Ventilação	Vidro simples incolor	Vidro simples laminado	Vidro duplo baixo emissivo
1 RPH	30,39	28,96	28,79
½ RPH	28,13	28,13	28,13
2 RPH	27,96	27,87	27,89

Tabela 9: Comparação dos valores médios de temperatura com soluções diferentes de envidraçados e ventilação

Pela Tabela 9, é possível perceber que, para a situação de 2 RPH, a temperatura média foi menor, com uma redução, em média, de até 2,43°C comparado com o caso de 1 RPH do vidro simples. Com isso, essa proposta de renovação seria melhor indicada para reduzir a temperatura média local sem a alteração dos envidraçados. Outro fator perceptível foi que o impacto da ventilação na temperatura se mostrou mais significativo que a troca dos envidraçados, visto que a diferença entre os vidros para o mesmo valor de RPH se mostra com mínimas diferenças, na casa dos decimais dos graus.

Para os valores de temperatura obtidos foi também feito o conforto adaptativo para a situação de vidro simples com 2 RPH e com ½ RPH, respetivamente (Figura 55).

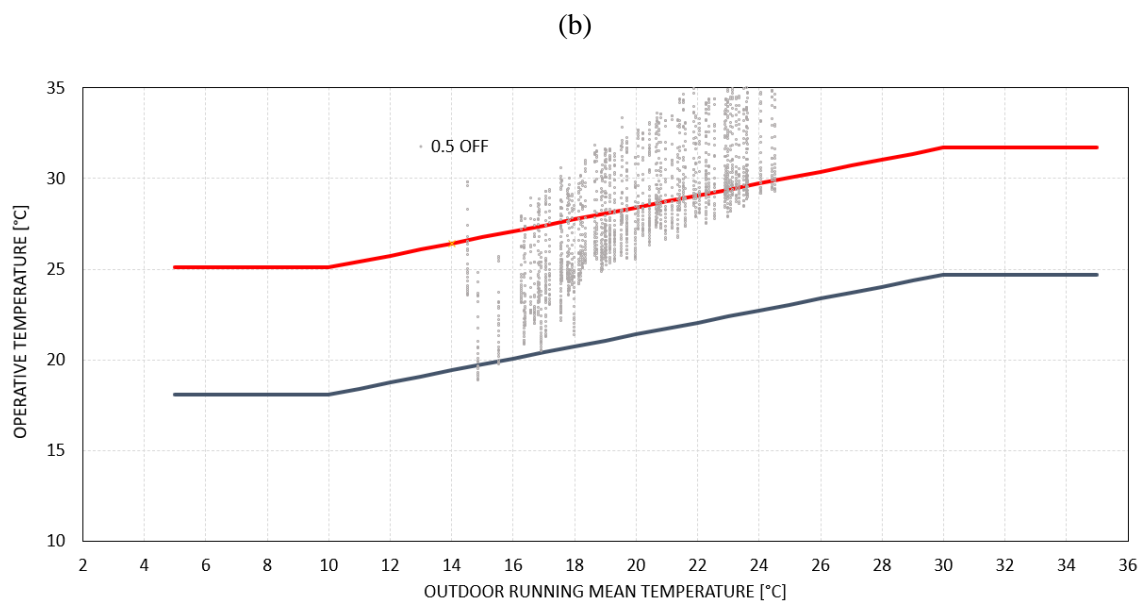
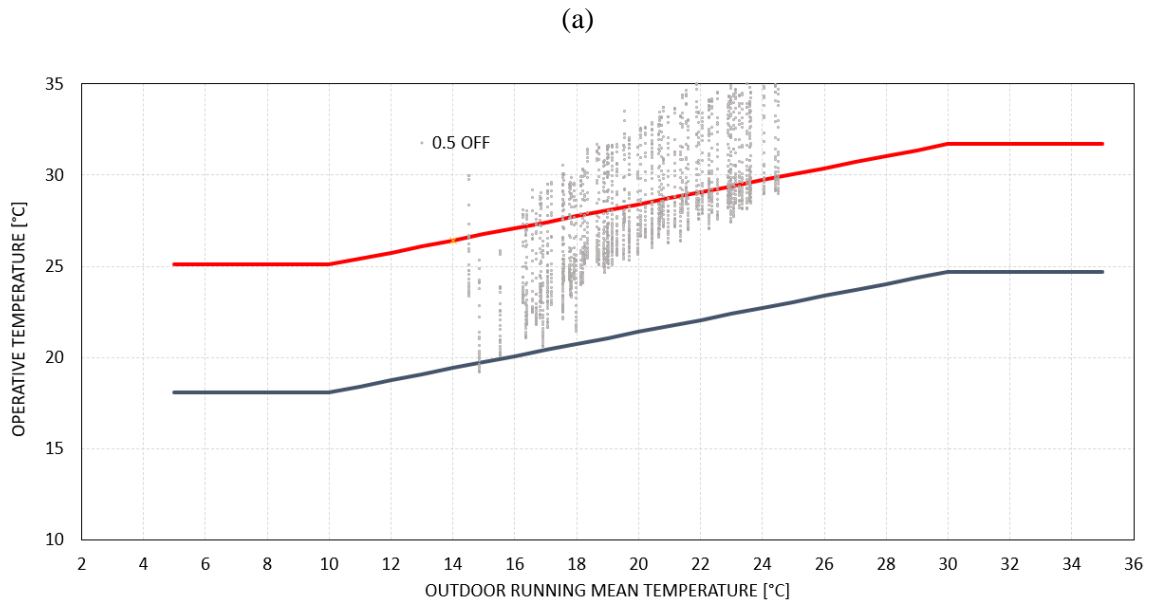


Figura 55: Conforto adaptativo do Room 12 com (a) vidro simples e 2 RPH (b) vidro simples e 1/2 RPH

Na tabela 10 são mostrados os parâmetros observados com a utilização do VS e a variação das renovações por hora.

Vidro simples incolor	Porcentagem de desconforto para o sobreaquecimento (%)	Temperatura média de desconforto (°C)
1 RPH (situação inicial)	57,24	33,1
½ RPH	30,79	31,72
2 RPH	29,94	31,73

Tabela 10: Comparação dos valores de desconforto com a utilização do VS e alteração na ventilação

Ademais foi analisada a situação de conforto alterando-se a ventilação e utilizando os envidraçados VSL e VDBE (Figuras 56 e 57, respetivamente).

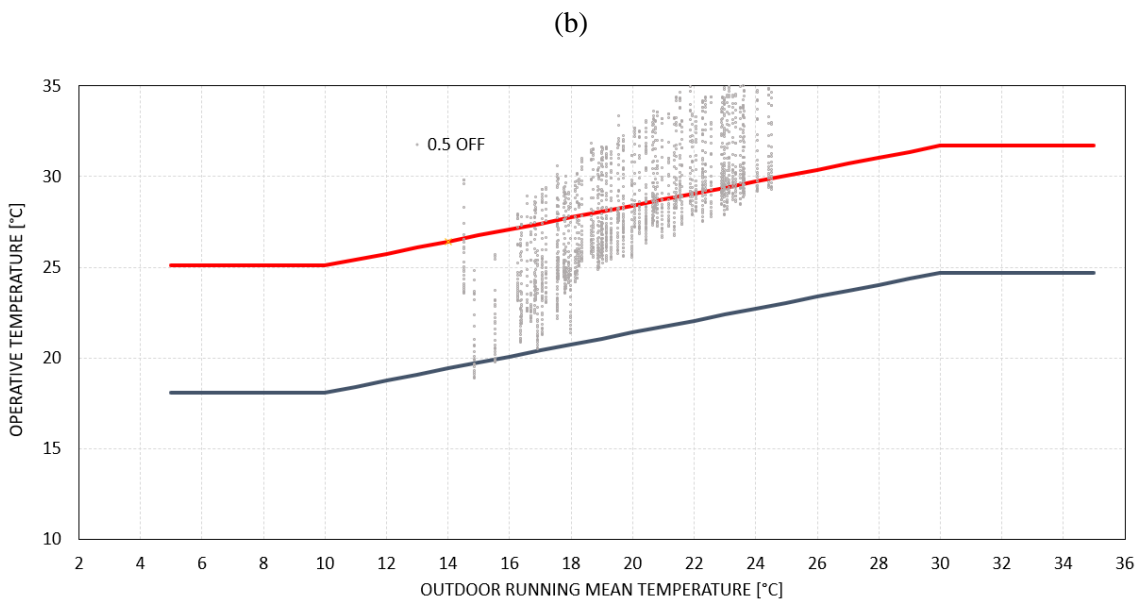
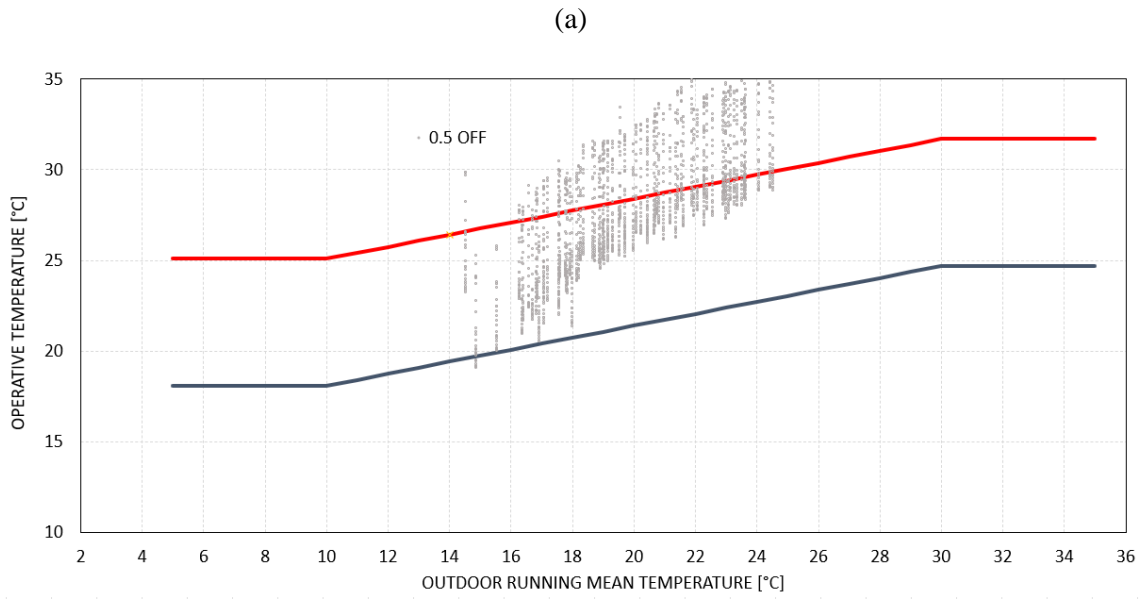


Figura 56: Conforto adaptativo do Room 12 com (a) vidro simples laminado e 2 RPH (b) vidro simples laminado e 1/2 RPH

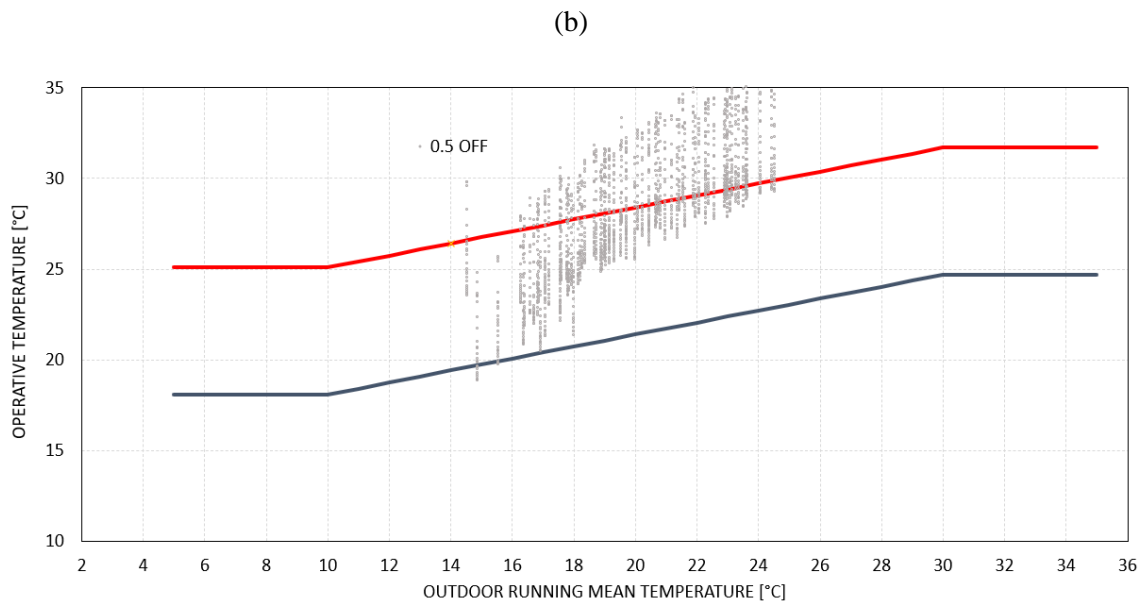
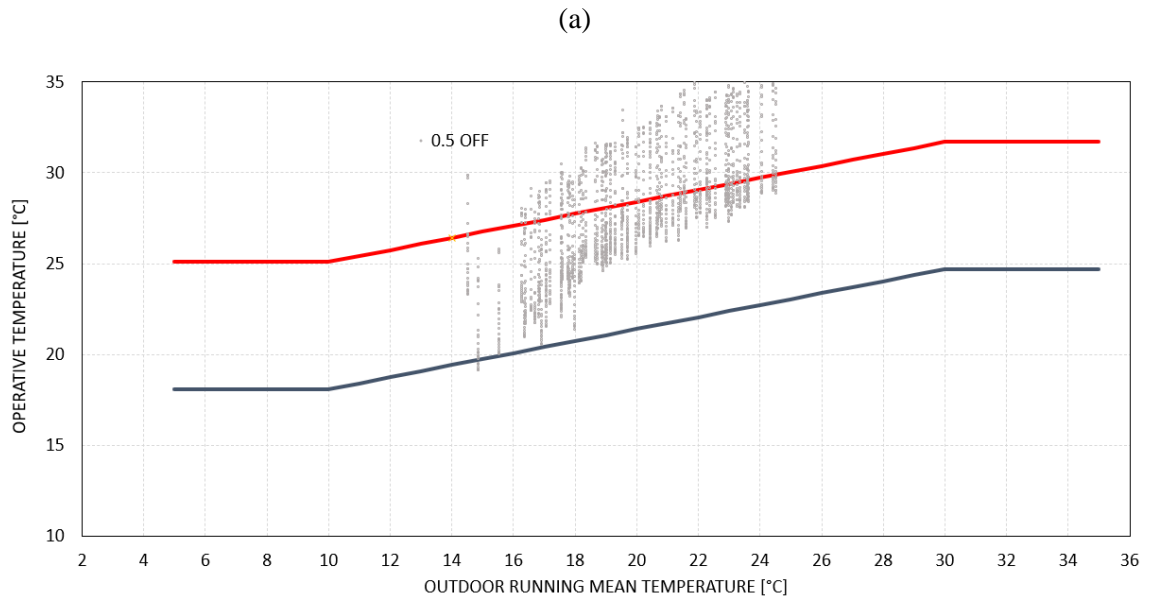


Figura 57: Conforto adaptativo do Room 12 com (a) vidro duplo de baixa emissividade e 2 RPH (b) vidro duplo de baixa emissividade e 1/2 RPH

As tabelas 11 e 12 apresenta os dados relativos ao VSL e VDBE, respetivamente.

Vidro simples laminado	Porcentagem de desconforto para o sobreaquecimento (%)	Temperatura média de desconforto (°C)
1 RPH (situação inicial)	40,57	32,79
½ RPH	30,79	31,72
2 RPH	28,49	31,71

Tabela 11: Comparação dos valores de desconforto com a utilização do VSL e alteração na ventilação

Vidro duplo baixo emissivo	Porcentagem de desconforto para o sobreaquecimento (%)	Temperatura média de desconforto (°C)
1 RPH (situação inicial)	38,48	32,35
½ RPH	30,79	31,72
2 RPH	28,59	31,72

Tabela 12: Comparação dos valores de desconforto com a utilização do VDBE e alteração na ventilação

Observando-se os dados das tabelas 10, 11 e 12 é possível observar que apenas com a alteração do parâmetro ventilação de 1 RPH para ½ RPH, a diminuição da porcentagem de desconforto se mostra expressiva em todos os casos, independente do enviraçado escolhido. Mesmo com a manutenção do envidraçado da situação inicial (VS), a alteração da ventilação apresenta um impacto maior no modelo se comparado com a troca de envidraçado, visto a pouca diferença entre a porcentagem de desconforto observada para 2 RPH, por exemplo.

Com esses dados é possível perceber que o impacto da ventilação na simulação mostra-se predominante em relação ao tipo de envidraçado escolhido, tendo um maior impacto nos resultados obtidos.

5.5. Comparativo com métricas para conservação dos acervos

Para a conservação dos acervos, conforme a Tabela 1 da ASHRAE referenciada no Capítulo 2, é necessário manter uma temperatura, em média, entre 15 e 25°C, podendo variar mais ou menos 2°C. Dessa maneira, foi analisado para o compartimento “Room” 12 a variação de temperatura e sua verificação com base no intervalo anteriormente destacado, utilizando 1 RPH e com a variação dos envidraçados (Figura 58).

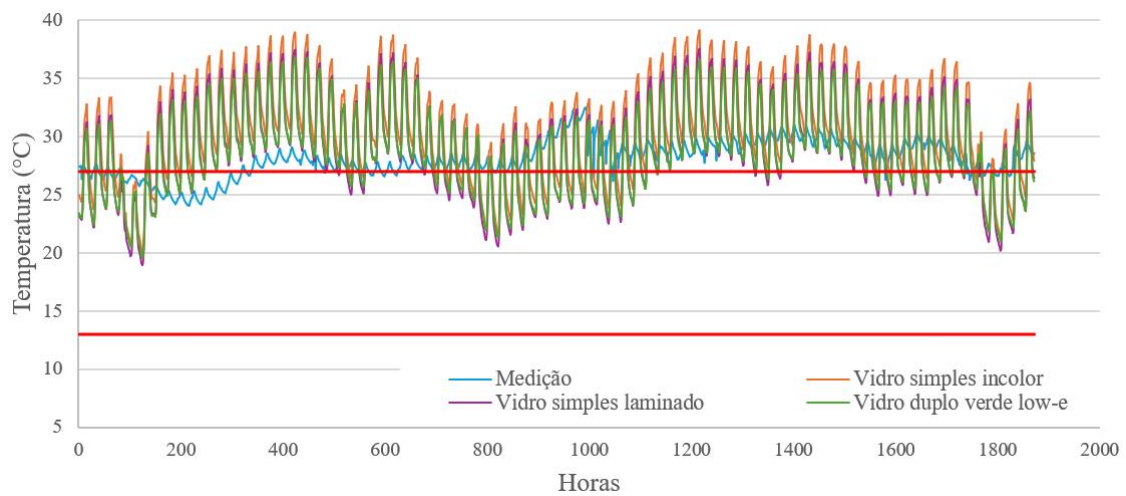


Figura 58: Comparação dos cenários de envidraçados para a conservação do acervo durante todo o período

Ainda para perceber o comportamento das temperaturas ao longo de um dia foi realizada uma análise gráfica também de 24 horas para avaliar o comportamento frente aos limites de 13 e 27 °C (Figura 59).

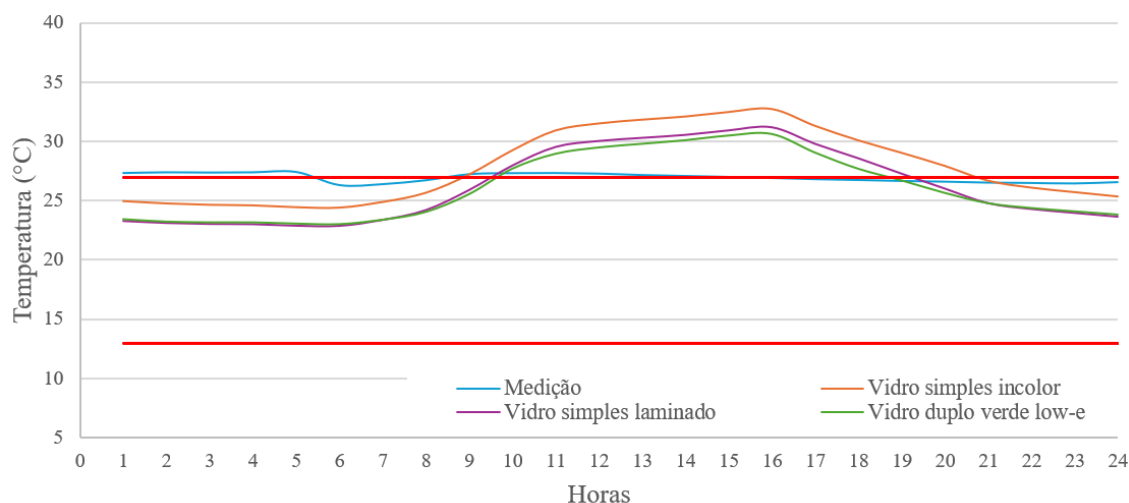


Figura 59: Comparação dos cenários de envidraçados para a conservação do acervo em um dia

Com base nos dados, é visível que as obras de arte estão expostas a condições extremas de calor durante quase todo o período analisado, independentemente da situação, o que pode levar a degradações significativas. Ainda, para a análise diária, é percebido que os piores cenários acontecem entre as 09 e as 19 horas.

A tabela 13 apresenta os dados acerca da porcentagem do tempo em que as peças encontram-se em sobreaquecimento e da média das diferenças entre a temperatura simulada com o limite superior.

	Risco de sobreaquecimento das obras de arte (%)	Diferença entre a temperatura simulada e o limite superior (°C)
Medição real	79,01	1,7
Vidro simples incolor	78,74	4,86
Vidro simples laminado	67,31	4,09
Vidro duplo baixo emissivo	68,11	3,69

Tabela 13: Valores do risco de sobreaquecimento para a situação medida e as simuladas

Em todos os casos, ainda é perceptível que há muitos valores acima dos limites, o que se mostra um risco para a conservação dos acervos. O melhor caso observado foi ao se

aumentar o valor de renovações do ar para 2 RPH e se utilizando o vidro simples laminado. Apesar dessa melhoria, a porcentagem de situações de sobreaquecimento continua a ser bastante elevada. Ainda assim, mesmo que a porcentagem do risco de sobreaquecimento seja menor nas simulações, em comparação com o caso medido, é nítido que a simulação apresenta maiores picos, evidenciados pela diferença de quase 5°C do VS comparado com o limite de 27°C.

Também foi realizada a mesma análise para a variação da ventilação com a alteração da renovação por hora para cada um dos envidraçados, apresentada na Figura 60.

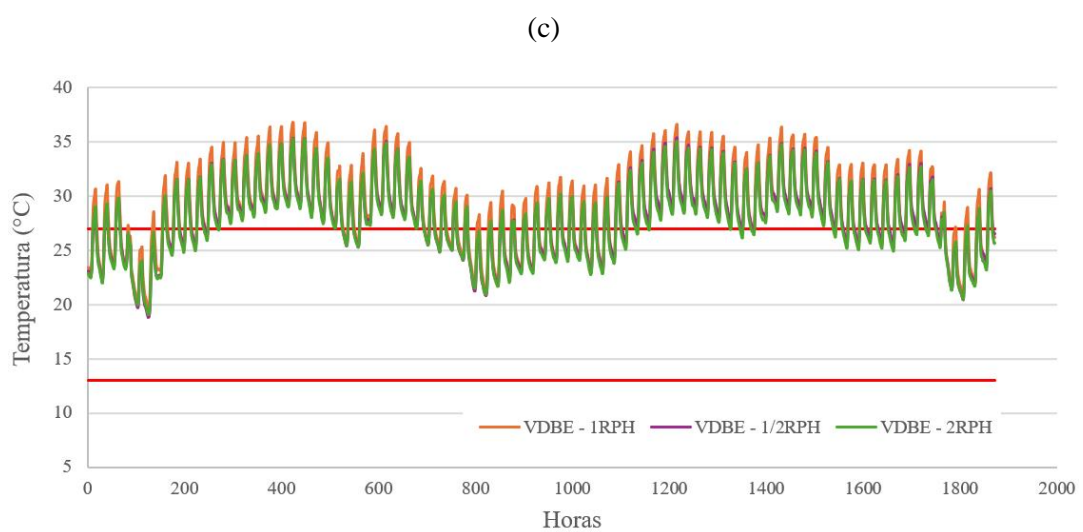
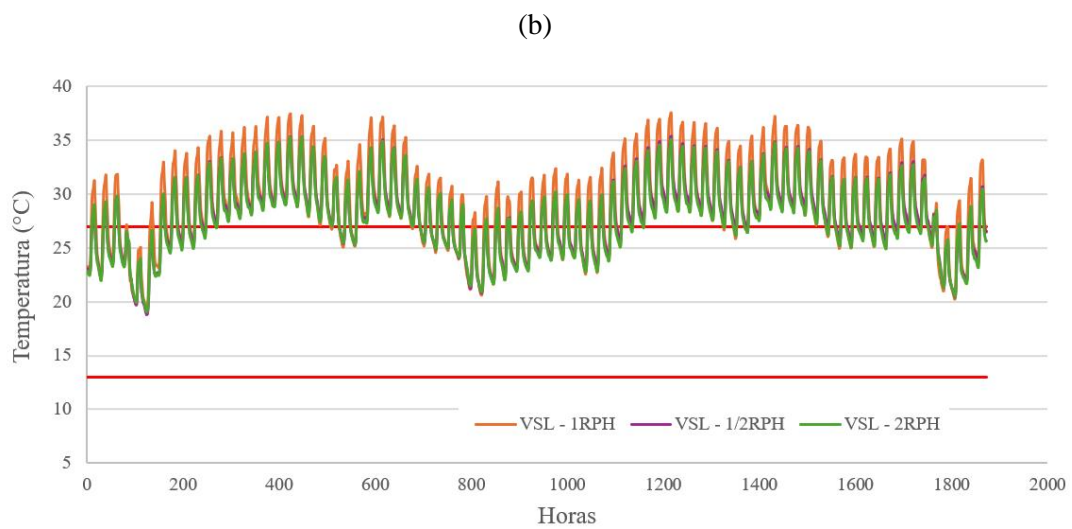
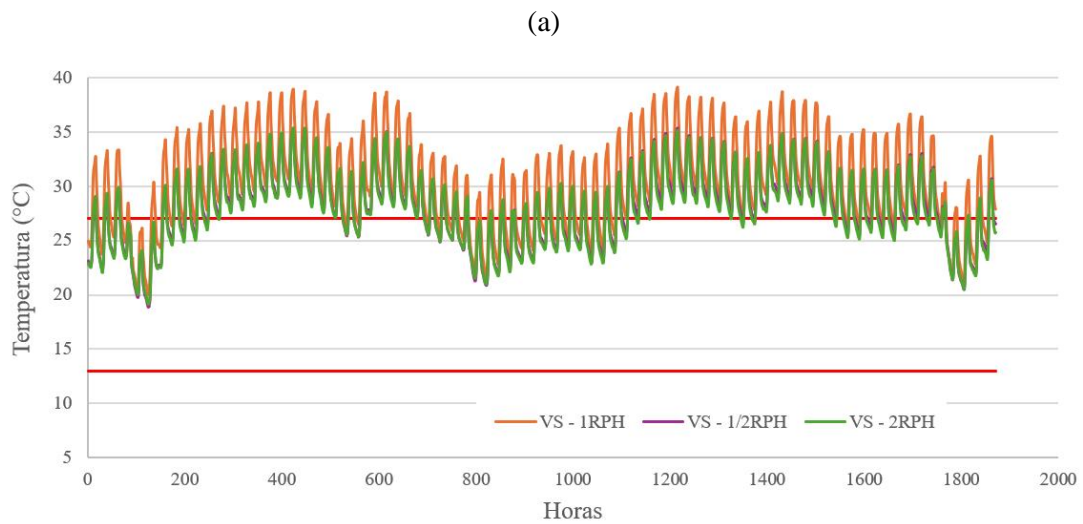


Figura 60: Comparação dos cenários de ventilação para a conservação do acervo com (a) VS, (b) VSL e (c) VDBE

A tabela 14 apresenta os dados de redução do risco de sobreaquecimento para cada caso prevendo o aumento de renovações por hora de 1 RPH para 2 RPH em cada caso de envidraçado.

	Redução do risco de sobreaquecimento para as obras de arte (%)
Vidro simples incolor	-16,55
Vidro simples laminado	-5,86
Vidro duplo baixo emissivo	-6,26

Tabela 14: Reduções do risco de sobreaquecimento para as simulações realizadas

Entretanto, mesmo com as reduções evidenciadas, ainda há muitos valores acima dos limites, o que se mostra um risco para a conservação dos acervos. O melhor caso observado foi ao se aumentar o valor de renovações do ar para 2 RPH, utilizando o vidro simples laminado. Apesar dessa melhoria, a porcentagem de situações de sobreaquecimento continua a ser bastante elevada.

6. CONCLUSÃO

A conservação das edificações históricas é um aspecto pertinente e importante a ser abordado para que haja uma transmissão da cultura de geração para geração. As edificações classificadas como patrimônio histórico, como é o caso do Museu Nacional Grão Vasco, são extremamente fundamentais por conterem traços do passado, não apenas em sua arquitetura, mas também na presença de obras de arte, possuindo um imensurável valor para a sociedade.

Neste estudo, foi realizada uma análise para verificar a variação da temperatura no museu durante o período mais quente do ano, especificamente entre junho e setembro, quando as temperaturas são elevadas, o que pode ocasionar problemas tanto de desconforto térmico para os frequentadores do museu quanto relacionados à conservação das obras de arte e coleções presentes. Dessa forma, foram obtidas as temperaturas reais medidas nesse período, por meio de sensores, e comparadas com as simulações geradas pelo modelo, criado a partir das geometrias e características extraídas de uma nuvem de pontos.

Para o estudo, foi utilizado o software Rhinoceros 3D em conjunto com o Grasshopper e as funcionalidades da ferramenta Ladybug Tools, que permitem realizar análises térmicas e energéticas. Dessa maneira, o objetivo foi tentar representar da forma mais fiel possível a edificação existente, com as características de seus materiais, ganhos internos e programas de uso, a fim de obter um modelo confiável para análise.

Em uma primeira análise, foi comparada a temperatura real obtida com a temperatura simulada para o caso inicial, em que o edifício possuía envidraçado de vidro simples incolor e uma ventilação constante de 1 renovação por hora. Os resultados mostraram grande similaridade entre a medição real e as temperaturas obtidas a partir do ficheiro climático, trazendo uma confiabilidade do modelo. Além disso, foi realizada uma avaliação para cada um dos quatro lados do museu, analisando um compartimento de cada vez e comparando-o com o sensor de medição correspondente, com o objetivo de verificar a similaridade entre as zonas e focar no estudo da região com maior sobreaquecimento.

Após isso, foi proposta a substituição dos envidraçados de vidro simples incolor da situação inicial, começando com a instalação de vidro simples laminado e, em uma segunda intervenção, o vidro duplo de baixa emissividade. Os resultados mostraram uma redução média das temperaturas entre 1,4 e 1,6 °C, respectivamente, para cada tipo de

substituição. Além disso, observou-se que as reduções permanecem constantes, superando 1°C durante praticamente todo o período analisado.

Após a troca do envidraçados e a respetiva análise das temperaturas foi realizado o estudo de conforto térmico com base na norma EN 16798-2 (2019), utilizando-se a categoria III da mesma, para edifícios existentes. Os resultados mostraram que a troca dos envidraçados resultou em uma diminuição no desconforto para o sobreaquecimento na ordem dos 20%.

Além da troca dos envidraçados, foi simulado a alteração no parâmetro ventilação do modelo, representado pelas renovações por hora (RPH). Em uma primeira análise foi verificada a redução nas temperaturas médias com essa mudança, na ordem de até 2,5°C. Ainda assim, na análise de conforto térmico para a mudança de envidraçados somada com a alteração da ventilação foi percebido que a segunda apresenta um impacto significativamente maior na simulação, em que mesmo para o caso inicial do vidro simples incolor, a redução se mostrou significativa e próxima aos outros envidraçados para um mesmo valor de renovações por hora, variando entre 1 e 2 RPH ou mantendo-se 2 RPH constante durante todo o dia.

Concluindo, os resultados do estudo evidenciaram o impacto das temperaturas de sobreaquecimento nas obras de arte do museu, que possuem grande valor histórico e exigem um cuidado e controle rigorosos. Em todos os casos, independentemente do tipo de envidraçado e/ou da alteração na ventilação, o período analisado no estudo revelou-se bastante arriscado para que as obras se mantivessem dentro dos limites estabelecidos pela norma da ASHRAE. Isso foi perceptível mesmo no cenário menos desfavorável, com vidro simples laminado (VSL) e 2 RPH, em que as obras apresentaram sobreaquecimento em quase 62% do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI). (2017a). Guia 1 – Processo de projeto BIM. Brasília. (Coletânea guias BIM ABDI-MDIC).

Artola, I. K. Rademaekers, R. Williams, and J. Yearwood, “Boosting Building Renovation: What potential and value for Europe?,” Oct. 2016. [Online]. Available: <http://www.europarl.europa.eu/studies>

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2013). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE 55: 2013.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2017). ASHRAE Handbook. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2018). Standard 209: Energy simulation aided design for buildings except low-rise. Atlanta, GA: ASHRAE.

Bazafkan, E. (2017). Assessment of usability and usefulness of new building performance simulation tools in the architectural design process (Dissertação de mestrado, MSc. Building Science and Technology).

Bratasz, Ł. (2013). Allowable microclimatic variations in museums and historic buildings: Reviewing the guidelines. In International Scientific Workshop, Heritage Science and Sustainable Development for the Preservation of Art and Cultural Assets - On the Way to the GREEN Museum. Rathgen-Forschungslabor, Berlin.

Byrro Ribeiro, M., & Lomardo, L. L. B. (2014). Parâmetros Ambientais de Conservação dos Acervos Museológicos Aplicados na Arquitetura de Museus. In Processos de Musealização. Um Seminário de Investigação Internacional | Atas do Seminário.

CEN. (2019). EN 16798-2:2019. Desempenho energético dos edifícios - Ventilação para edifícios - Parte 2: Interpretação dos requisitos da EN 16798-1 - Parâmetros ambientais interiores para o design e avaliação do desempenho energético dos edifícios, abordando a qualidade do ar interior, ambiente térmico, iluminação e acústica (Módulo M1-6). Comité Europeu de Normalização: Bruxelas, Bélgica.

Coelho, D. A. S. (2014). Avaliação do conforto térmico em salas de aula (Tese de mestrado). Instituto Politécnico de Viseu.

Consoni, G.B.; Martins, P.E.R.; Japur, L.M.D. Realidade Aumentada aplicada ao património histórico-arquitetónico: projeto de aplicativo para visualização dos prédios históricos da UFRGS, Revista do Instituto Histórico e Geográfico do Rio Grande do Sul. n. 157 (abr. 2020), p. 63-78, RS.

Couto, L. S. B. (2019). ALTA II: uma alternativa aos métodos de medição de refletância solar para telhas cerâmicas e de fibrocimento (Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo). <https://doi.org/10.11606/D.102.2020.tde-12032020-143525>

CRUZ, R. D. «Experiencias de la Identidad». In Revista Internacional de Filosofía Política, nº 2, pp. 63-74, 1993.

Direção-Geral de Energia e Geologia. (s.d.). Eficiência Energética em Edifícios. Recuperado de <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/edificios/>

DGEG (2004). Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais. Direção Geral de Energia e Geologia.

Donida, M. M. (2002). Avaliação da ventilação e insolação em edificações na região de Bauru - SP (Master's thesis). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Ferreira, C. S. F. M. (2015). Inércia higroscópica em museus instalados em edifícios antigos: Utilização de técnicas passivas no controlo da humidade relativa interior (Tese de doutoramento). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, PRODEC – Programa Doutoral em Engenharia Civil.

Germiniani, L. F. (2023). Análise da perceção de conforto térmico em alojamentos universitários (Tese de mestrado). Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Departamento de Engenharia Civil, Viseu.

Gonçalves, H., & Graça, M. (2004). "Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal (DGGE / IP)". Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P.

Gonçalves, J. C. S., Moura, N. C. da S., & Kuniuchi, É. M. U. (2015). Avaliação de desempenho, simulação computacional e o projeto arquitetónico. In Edifício Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos.

Governo de Portugal. (1993). Decreto-Lei n.º 16/1993, de 23 de janeiro. Diário da República. Disponível em <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/16-1993-584777>.

Groetelaars, N. J. Criação de Modelos BIM a partir de “nuvens de pontos”: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

Hensen, J. L. M., & Lamberts, R. (2018). Building performance simulation: Challenges and opportunities. In J. L. M. Hensen & R. Lamberts (Eds.), Building simulation for design and operation (2nd ed.). Routledge (Taylor and Francis).

Humphreys, M.A. (1976). Field Studies of Thermal Comfort compared and Applied. Building Service Engineer, v-44, 5-27. Watford.

International Organization for Standardization. (2005). Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005)

Kuchen, E., Fisch, M. N., Gonzalo, G. E. & Nozica, N. G. (2011), Predição do índice de conforto térmico em edifícios de escritório na Alemanha, Ambiente Construído, V.11, n.º 3, pp. 39-53.

Ladybug Tools. (acesso 05/2024). EPW Map. Ladybug Tools. <https://www.ladybug.tools/EPWmap/>

Lopes, A. F. O. (2020). Da Simulação ao Projeto: Avaliação de conforto térmico em ambiente escolar padronizado (Dissertação de mestrado). Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Lorsch, H. G., & Abdou, O. A. (1994). The impact of the building indoor environment on occupant productivity - Part 2: Effects of temperature. ASHRAE Transactions, 100 (Part 2).

Machado, A. P. V. (2018). Design Generativo aplicado à Conceção de Edifícios para Otimização do Desempenho Energético. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia.

Machado, M. do R.N.P.C., Magalhães, R. A. T. P. de, A humanidade do património histórico – O caso da Rota do Românico no Norte de Portugal, Fórum Internacional sobre Património Arquitetónico, 2016.

Machado, R. (2014). Reabilitação de Edifícios visando a Eficiência Energética. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.

Mateus, J. M. G. (2017). O Museu Nacional Grão Vasco e o Centro Histórico de Viseu: Um roteiro para o Desenvolvimento Sustentável (Dissertação de mestrado, Escola Superior de Turismo e Tecnologia do Mar, Instituto Politécnico de Leiria).

Mendes, M. C. F. (2019). Museus e Sustentabilidade Ambiental. Cadernos de Sociomuseologia #13-2019 (vol 57).

Mendonça, P. (2005). Habitar sob uma segunda pele. Guimarães: Universidade do Minho.

Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. (2006). Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril. Diário da República, I Série-A, N.º 67, 4 de Abril.

Museu Nacional Grão Vasco. (18/02/2023). Recuperado de <http://www.museunacionalgraovasco.gov.pt/?p=234>

Parente, J. M. N., Rangel, B., Martins, J. P., & Pinheiro, L. T. (2008). Algoritmos evolutivos integrados à simulação termoenergética em arquitetura: uma análise de 20 anos de publicações. Em Livro de Atas, Sustentabilidade na Construção.

Pereira, I. M., & Souza, R. V. G. (2008). Proteção solar em edificações residenciais e comerciais - Desenvolvimento de metodologia. Em XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), Fortaleza. ISBN: 978-85-89478-27-4.

Pinto, A. (2006). Características térmicas de vãos envidraçados: Análise de aspectos específicos de conforto térmico (Relatório 110/2006 - NCI). Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Departamento de Edifícios. Núcleo de Componentes e Instalações, Lisboa, Portugal. Estudo integrado no Plano de Investigação Programada do LNEC.

Pinto, A. (2004). Regulamentação térmica de edifícios – térmica de edifícios – cálculo dos ganhos térmicos úteis. In Actas do Congresso Nacional da Construção

Rocha, C. R. S. R. Parque Escolar – avaliação da adaptabilidade das soluções construtivas de reabilitação às exigências actuais. 2009. 163p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Rodrigues, J. V.; Lima, M. R. P. de, "Património Urbano. Perspectiva Jurídico Positiva", *Economia e Sociologia*, 53, 5-27 (1992).

Rodrigues, R. L.; Agostinho, C. J. Documentação digital do património arquitetónico: a igreja Nossa Senhora Mãe dos Homens - Coqueiro Seco/AL. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v.15, n.1, p.26-41, jan.2020. <http://dx.doi.org/10.116/gtp.v14i1.152125>.

Ruas, A. C. (2002). Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificadas e sua aplicação num software (Dissertação de doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

Santos, C. A. P. dos, Matias, L., (2006). Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

Santos, L. S. (2012). Requisitos de iluminação natural nos sistemas de avaliação de edifícios e impactos energéticos em edificações comerciais no Brasil. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.

Silva, J. C. da, "Política, Conservação e Restauo", *Aedificiorum*, 1, 23 (1988).

Parte superior do formulário

Siqueira, T. C. P. A., Akutsu, M., Lopes, J. I. E., & Souza, H. A. (2005). Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações. *REM: R. Esc. Minas*, Ouro Preto, 58(2), 133-138.

Solargis (2019). Solar resource maps of World. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>. Acesso a 13 de maio de 2024.

Sorgato, M. J., Melo, A. P., Marinoski, D. L., & Lamberts, R. (2014). Análise comparativa entre os resultados de simulações termoenergéticas de edificações sob diferentes condições de entrada das propriedades dos vidros. In XV Encontro Nacional

de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), 2014, Maceió, Alagoas.
<http://doi.org/10.17012/entac2014.33>

Souza, H. A. de, & Rodrigues, L. S. (2012). Ventilação natural como estratégia para o conforto térmico em edificações. REM: R. Esc. Minas, 65(2), 189-194.

Virgolino, J.F. Património e Identidade Nacional. Universidade de Évora, P-7000 Évora, Portugal, 2000.

Yang, L., Yan, H. & Lam, J. C. (2014), Thermal comfort and building energy consumption implications – A review, Applied Energy, 115, pp.164-173.

