



UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Modelação computacional e validação de soluções
solares passivas para a melhoria do conforto
térmico de uma edificação pré-fabricada.**

Karol Bot

Orientação: Doutor Pedro André dos Santos Ribeiro
Horta

Mestrado em Engenharia da Energia Solar
Dissertação

Évora, 2015



UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Modelação computacional e validação de soluções
solares passivas para a melhoria do conforto
térmico de uma edificação pré-fabricada.**

Karol Bot

Orientação: Doutor Pedro André dos Santos Ribeiro
Horta

Mestrado em Engenharia da Energia Solar
Dissertação

Évora, 2015

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grata.

Ao Doutor Pedro Horta, tanto como meu orientador como também professor durante o decorrer da componente curricular do mestrado. Agradeço pelos ensinamentos, pelo apoio nos últimos três anos, pela imensa atenção com as correções durante o desenvolvimento da dissertação e por ter acreditado em mim enquanto orientanda. Agradeço tanto pelo meu desenvolvimento acadêmico quanto pessoal.

Ao coordenador de curso, Doutor António Heitor Reis, por ter me recebido tão bem, pelos ensinamentos enquanto meu professor, por ter acreditado em mim e por estar sempre disponível à me auxiliar quando necessário.

Ao Afonso e à Andreia, por terem permitido que eu utilizasse para a validação do meu modelo computacional, os dados de medições que coletaram em seus trabalhos.

À minha família, à qual amo muito, pelo carinho, paciência, ajuda e incentivo.

Aos meus pais, por todo o amor que sempre recebi, pelo apoio constante, incentivo, amizade e paciência demonstrada e muita ajuda na superação dos obstáculos que ao longo desta caminhada foram surgindo. Amo muito vocês!

Obrigada em especial à minha mãe, Claudia, pelo apoio incondicional durante todo o meu percurso acadêmico. Obrigada por acreditar em mim e por ter estado sempre presente e me apoiando principalmente nos momentos difíceis (que não foram poucos). À você dedico este trabalho.

Ao meu namorado, Fábio, por estar sempre presente, mesmo quando estávamos longe. Por ter sempre me apoiado e me incentivado em todos os momentos, ter sido paciente, tolerante e por ter compreendido esta fase em minha vida. Amo-te!

Ao meu irmão, Leonardo, e ao meu primo-irmão, Matheus, por serem meus companheiros e também pelas risadas, que tornaram a minha caminhada mais leve.

À todos que sempre confiaram em mim e incentivaram-me, e de alguma forma auxiliaram-me nesta caminhada.

Resumo

As estratégias solares passivas aplicadas à uma edificação permitem que esta apresente um consumo de energia mais eficiente, reduzindo a dependência à recursos advindos de fontes de energia não renováveis para o condicionamento do ar interior e promovendo a sustentabilidade no setor residencial. Desta forma, é interessante quantificar o potencial de redução de necessidades de consumo de energia para o aquecimento e arrefecimento, e para isso nesta dissertação utilizou-se o software *Energyplus* para realizar a simulação energética do estudo de caso. Tendo como estudo de caso uma edificação da Universidade de Évora, localizada em Mitra, recolheram-se dados referentes à arquitetura, aos elementos da envoltória, aos padrões de utilização, as cargas térmicas e ao ambiente em que está inserida e inseriram-se estes dados no software *Energyplus*, com o objetivo de realizar a modelação térmica. Os resultados apresentados pelo software foram validados com medições experimentais realizadas na edificação, com o intuito de calibração do modelo. Em seguida realizou-se a modelações térmicas das estratégias solares passivas aplicadas à configuração original, nomeadamente a utilização do sombreamento e do sistema de tubos enterrados, e comparou-se estes resultados com os resultados obtidos para a configuração original da edificação.

Abstract

Computer modeling and validation of passive solar solutions to improve the thermal comfort of a prefabricated building.

Passive solar strategies applied to a building allow a more efficient use of energy, reducing heat and cooling requirements and hence the dependence on resources from non-renewable sources of energy, thus promoting sustainability in the residential sector. This work aims at quantifying the potential of different passive strategies for reducing energy needs for heating and cooling. For this purpose the software EnergyPlus was used to model the energy performance of a case study: a modular building at the University of Évora. Data on the architecture, the elements of the envelope, the use of standards, the thermal loads and the environmental conditions was collected and used in the software, in order to accomplish the thermal modeling. The results presented by the software have been validated with experimental measurements performed in the building, in order to calibrate the model. Then the passive solar strategies were applied to the original configuration on the thermal modeling, including the use of shading and buried pipes system, and these results were compared with the results obtained for the original configuration of the building.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Lista de gráficos	vi
Lista de tabelas.....	viii
Lista de figuras.....	x
1. Introdução	1
1.1 Contexto e política energética portuguesa	1
1.2. Contexto e política energética brasileira	3
1.3. A energia e os edifícios	4
1.4. Objetivos, organização e justificação	6
2. Edifícios solares passivos e arquitetura bioclimática	8
2.1 O recurso solar passivo	10
2.2 Estratégias bioclimáticas.....	11
2.2.1. Controle de ganhos diretos.....	12
2.2.2. Aquecimento passivo	15
2.2.3. Arrefecimento passivo	19
2.2.4 Materiais da envolvente	23
3. Estudo de caso	28
3.1. Características da edificação	28
3.2. Localização e clima.....	34
3.3. Modelagem computacional	35
3.3.1. Validação experimental	37
3.3.2. Modelo referência	51
3.3.3. Modelo sombreado por palas.....	62
3.3.4. Modelo sombreado por persianas.....	67
3.3.5. Modelo com ventilação por tubos enterrados.....	71
3.3.6. Modelo com ar insuflado do exterior	78
3.3.7. Modelo com estratégias combinadas (Ar insuflado + Sombreamento por palas).	79

3.3.8. Modelo com estratégias combinadas (Ar insuflado + Sombreamento por persianas).....	81
4. Análise de resultados.....	83
5. Conclusões.....	86
Referências	89

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Validação do modelo com ocupação - Gabinete 1.....	39
Gráfico 2. Validação do modelo com ocupação - Gabinete 2.....	40
Gráfico 3. Validação do modelo com ocupação - Gabinete 3.....	41
Gráfico 4. Validação do modelo com ocupação - Sala técnica.....	42
Gráfico 5. Validação do modelo com ocupação - Sala de reuniões.....	43
Gráfico 6. Validação do modelo com ocupação - Cozinha.....	44
Gráfico 7. Validação do modelo com ocupação - Casa de banho.....	45
Gráfico 8. Validação do modelo sem ocupação - Gabinete 1.....	46
Gráfico 9. Validação do modelo sem ocupação - Gabinete 2.....	47
Gráfico 10. Validação do modelo sem ocupação - Gabinete 3.....	47
Gráfico 11. Validação do modelo sem ocupação - Sala técnica.....	48
Gráfico 12. Validação do modelo sem ocupação - Sala de reuniões.....	48
Gráfico 13. Validação do modelo sem ocupação - Cozinha.....	49
Gráfico 14. Validação do modelo sem ocupação - Casa de banho.....	50
Gráfico 15. Temperaturas no Gabinete 1 para o modelo referência, dias de inverno.....	55
Gráfico 16. Temperaturas no Gabinete 1 para o modelo referência, dias de verão.....	55
Gráfico 17. Temperaturas no Gabinete 2 para o modelo referência, dias de inverno.....	56
Gráfico 18. Temperaturas no Gabinete 2 para o modelo referência, dias de verão.....	56
Gráfico 19. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo referência, dias de inverno.....	57
Gráfico 20. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo referência, dias de verão.....	57
Gráfico 21. Temperaturas na Sala técnica para o modelo referência, dias de inverno.....	58
Gráfico 22. Temperaturas na casa de banho para o modelo referência, dias de verão.....	58
Gráfico 23. Temperaturas na Sala de reuniões para o modelo referência, dias de inverno.....	59
Gráfico 24. Temperaturas na Sala de reuniões para o modelo referência, dias de inverno.....	59
Gráfico 25. Temperaturas na Cozinha para o modelo referência, dias de inverno.....	60
Gráfico 26. Temperaturas na Cozinha para o modelo referência, dias de inverno.....	60
Gráfico 27. Temperaturas na Casa de banho para o modelo referência, dias de inverno.....	61
Gráfico 28. Temperaturas na Casa de banho para o modelo referência, dias de verão.....	61
Gráfico 29. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por palas, dias de inverno.....	64
Gráfico 30. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por palas, dias de verão.....	64

Gráfico 31. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo para diferentes orientações, dias de verão.....	66
Gráfico 32. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas, dias de inverno.....	68
Gráfico 33. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas, dias de verão.....	68
Gráfico 34. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas, dias de inverno.....	70
Gráfico 35. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas, dias de verão.....	70
Gráfico 36. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados com profundidade de 2m, dias de inverno.....	73
Gráfico 37. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à 2m, dias de verão.....	74
Gráfico 38. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à profundidade de 1m, dias de inverno.....	75
Gráfico 39. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à profundidade de 1m, dias de verão.....	75
Gráfico 40. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à profundidade de 0,5m, dias de inverno.....	76
Gráfico 41. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à profundidade de 0,5m, dias de verão.....	77
Gráfico 42. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo com ar insuflado do exterior.....	78
Gráfico 43. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo com estratégias combinadas (ar insuflado + sombreamento por palas).....	80
Gráfico 44. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo com estratégias combinadas (ar insuflado + sombreamento por persianas).....	81
Gráfico 45. Percentual de diferenças de necessidades de aquecimento e arrefecimento em relação ao modelo referência.....	85

Lista de Tabelas

Tabela 1. Definição dos materiais das paredes externas.....	30
Tabela 2. Definição dos materiais das paredes internas.....	32
Tabela 3. Definição dos materiais do piso flutuante.....	32
Tabela 4. Definição dos materiais do piso cerâmico.....	32
Tabela 5. Definição dos materiais do teto.....	32
Tabela 6. Definição dos materiais do telhado.....	32
Tabela 7. Definição dos materiais das janelas.....	32
Tabela 8. Definição dos materiais da porta exterior.....	32
Tabela 9. Definição dos materiais das portas internas.....	32
Tabela 10. Definição das zonas térmicas.....	33
Tabela 11. Definição da iluminação por zona térmica.....	33
Tabela 12. Definição dos equipamentos por zona térmica.....	34
Tabela 13. Taxa de renovação de ar por hora por zona térmica.....	38
Tabela 14. Perfis de utilização do Gabinete 1.....	38
Tabela 15. Perfis de utilização do Gabinete 2.....	39
Tabela 16. Perfis de utilização do Gabinete 3.....	40
Tabela 17. Perfis de utilização da sala técnica.....	41
Tabela 18. Perfis de utilização da sala de reuniões.....	42
Tabela 19. Perfis de utilização da Cozinha.....	43
Tabela 20. Perfis de utilização da Casa de banho.....	44
Tabela 21. Perfis de utilização da edificação para o dia 23/12/2014.....	46
Tabela 22. Padrão de utilização da iluminação.....	52
Tabela 23. Padrão de utilização dos equipamentos.....	53
Tabela 24. Padrão de ocupação.....	54
Tabela 25. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo referência.....	62
Tabela 26. Configuração das palas por janela.....	63
Tabela 27. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo sombreado por palas.....	66
Tabela 28. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo sombreado por persianas operadas em função da radiação incidente.....	69
Tabela 29. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas.....	71

Tabela 30. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com ventilação por tubos enterrados à 2m.....	74
Tabela 31. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com ventilação por tubos enterrados à 1m.....	76
Tabela 32. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com ventilação por tubos enterrados à 0,5m.....	77
Tabela 33. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com ar insuflado do exterior.....	79
Tabela 34. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com estratégias combinadas.....	80
Tabela 35. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com estratégias combinadas.....	82
Tabela 36. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento dos modelos.....	83
Tabela 37. Diferença percentual das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento em relação ao modelo referência.....	84

Lista de figuras

Figura 1. Exemplo do uso da concepção espacial	9
Figura 2. Controle de ganhos térmicos nas fachadas sul.....	12
Figura 3. Azimute (sudeste ou sudoeste), altura solar e distância zenital.....	13
Figura 4. Influência da vegetação no desempenho térmico de fachadas.....	15
Figura 5. Posicionamento das aberturas da parede de Trombe para as diferentes estações do ano.....	17
Figura 6. Exemplo de parede de Trombe construída.....	18
Figura 7. Ventilação transversal	21
Figura 8. Ventilação simples, uso de bandeiras para direcionamento do vento	21
Figura 9. Exemplo de sistemas verticais (esquerda) e horizontais (direita).....	22
Figura 10. Sistema de arrefecimento evaporativo.....	23
Figura 11. Trocas de calor através de superfícies transparentes ou translúcidas.....	25
Figura 12. Trocas de calor através de paredes opacas	26
Figura 13. Exemplo de curvas de variação de temperatura externa e interna de um ambiente.....	26
Figura 13. Vista lateral da edificação.....	29
Figura 14. Planta baixa da edificação.....	29
Figura 16. Modelo da edificação em perspectiva.....	30
Figura 17. Normais climatológicas para a região de Évora	34
Figura 18. Anomalias na temperatura do ar e normais climatológicas.....	35
Figura 19. Caracterização das fachadas e aberturas.....	63
Figura 20. Projeção em 3D das palas de proteção solar.....	64
Figura 22. Projeção em 3D do modelo com ventilação por tubos enterrados.....	72

1. INTRODUÇÃO

É notável, defronte ao cenário energético mundial e à grande utilização de fontes não renováveis como base da matriz energética, o impulso atual que o setor residencial toma em direção à criação de novos projetos e projetos de reabilitação que visam tornar as edificações mais sustentáveis e bioclimáticas. Uma edificação pode ser definida como bioclimática se as estratégias definidas para promover um consumo de energia mais eficiente são advindas do clima e do recurso solar passivo [1]. Exemplo destas estratégias seriam a adequada orientação da edificação em função da sua localização, o devido uso do sombreamento para controlar perdas e ganhos térmicos e da ventilação natural, e o arrefecimento geotérmico.

A proposta da dissertação que se segue passa por realizar um estudo acerca dos recursos solares passivos aplicáveis às edificações, e complementa-se com o estudo de caso de uma edificação localizada na cidade de Évora, Portugal, que tem por finalidade abrigar novos gabinetes para a Universidade de Évora. Para o desenvolvimento do estudo de caso, determina-se um modelo de referência para a edificação e em seguida propõe-se estratégias que fazem o uso do recurso solar passivo para tornar o seu desempenho térmico mais eficiente, sem qualquer alteração da volumetria proposta em projeto. A modelação computacional do desempenho térmico de cada modelo, tanto do caso referência quanto dos modelos alternativos, é realizada por meio do software *Energyplus* [2]. O modelo foi validado com dados de medições experimentais [3], tendo-se verificado posteriormente algumas lacunas no registro de perfis de utilização, e também dados do clima para a localidade [4]. Estes dados de monitorização foram utilizados uma vez que a construção da casa a que se refere o estudo de caso foi realizada após o meu período de estadia em Portugal.

1.1 Contexto e política energética portuguesa

Nos últimos anos, a sustentabilidade ambiental vem sido um tema recorrente. Desde meados do século XX, quando o tema começa a ter importância em debates nos países desenvolvidos, é crescente a preocupação da população em geral com a eficiência energética. Para reforçar este fenómeno, o aumento significativo na tarifa da energia evidencia a necessidade de medidas energéticas. Em termos de mercado energético do setor residencial, o petróleo, a eletricidade e o gás natural são as fontes energéticas mais comumente utilizadas. A

emissão de gases poluentes, tais como o monóxido de carbono e o formaldeído, podem causar malefícios para a saúde privada e pública, desencadeando ou agravando doenças respiratórias, entre outras [5]. O setor residencial está entre os setores que mais consomem recursos naturais, e o grande desafio ainda continua sendo diminuir a utilização de energia e água. Neste contexto, a promoção da eficiência energética nas edificações surge como uma necessidade eminente, tanto no projeto de novas edificações quanto na reabilitação de edifícios antigos.

Em 1997, é aprovado, no âmbito da Organização das Nações Unidas, o Protocolo de Quioto. Este protocolo surgiu como um importante instrumento jurídico internacional no que toca ao controle das emissões de gases com efeito estufa, e seu primeiro comprometimento iniciava-se em 2008 e findava-se em 2012. Aos países que aderiram ao tratado, foram impostos níveis de redução de gases de efeito estufa. A União Europeia constituiu uma das signatárias do protocolo, comprometendo-se a reduzir em 8% as suas emissões de gases com efeito estufa, em relação aos níveis existentes no ano de 1990, considerado o ano de referência. As taxas de redução impostas aos países membros da União Europeia foram diferentes, e a Portugal coube limitar o aumento de emissões destes gases em 27%, de acordo com o tratado de partilha de responsabilidades [6].

Com o objetivo de quantificar os esforços necessários a Portugal, surgiu o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), no qual estabeleceu-se políticas e medidas necessárias em diversos setores, assim como os instrumentos necessários para o cumprimento dos mesmos [7].

A análise dos dados inventariados mais recentes demonstra que, em 2012, o valor nacional de emissões dos gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC, PFC e SF_6), excluindo o sector florestal e alterações de uso do solo, correspondeu a cerca de 68,8 Mt CO_2e , o que representa um aumento de 13,1% face a 1990 [8]. Pode inferir-se, então, que Portugal se encontra em linha de cumprimento com os objetivos traçados para o período 2008-2012, em termos de limitação de emissões de gases de efeito estufa estabelecida no âmbito do Protocolo de Quioto para o período 2008-2012 (27% no aumento das emissões face a 1990, o que corresponde a 76,4 Mt CO_2e). O cumprimento da meta só pode ser aferido após o processo de revisão do inventário de emissões que decorre no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (CQNUAC), até final de 2014 [8].

No presente, a redução de emissões destes gases surge como uma das principais linhas de orientação da política energética, ressaltando a valorização dos recursos energéticos renováveis e conseqüentemente uma redução da dependência externa.

Para a política energética nacional, visando a redução das emissões nocivas, são fundamentais os seguintes vetores:

- Introdução e consolidação do gás natural como fonte energética;
- Valorização e implementação de fontes de energia renovável, introduzindo novas tecnologias;
- Utilização racional da energia em todos os segmentos consumidores;
- Regulamentação da utilização da energia em edificações, transporte e grandes consumidores industriais;
- Reforma fiscal dos combustíveis através da introdução de componentes ecológicos, etc.

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 118/2013 , de 20 de agosto, aprovou o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços. Estas regulamentações definem a metodologia de determinação da classe de desempenho energético para a tipologia de pré-certificados e certificados de Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), assim como os requisitos de comportamento técnico e de eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos e edifícios sujeitos a grandes intervenções [9].

1.2. Contexto e política energética brasileira

Fazendo-se um paralelo com a realidade energética brasileira, de acordo com as premissas e diretrizes básicas do Plano Nacional de Eficiência Energética [10], o Brasil evoluiu bastante em eficiência energética nos últimos anos, tanto na legislação, capacitação e conhecimentos acumulados, quanto na consciência da necessidade desta eficiência em diversos setores. No Brasil a retomada do planejamento do setor de energia ensejou a elaboração do Plano Nacional de Energia 2030 (PNE2030), que incorpora a Eficiência Energética (EE) em seus estudos e menciona a elaboração futura de um Plano Nacional de

Eficiência Energética (PNEf). Ainda de acordo com a mesma fonte, o Brasil possui, há pelo menos duas décadas, programas de eficiência energética reconhecidos internacionalmente: o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e Gás Natural (CONPET) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) [10].

Ao se comparar a realidade atual com o cenário de 25 anos atrás, quando o PROCEL foi instituído, não é difícil reconhecer como a situação evoluiu e que diversas barreiras foram removidas. Com efeito, hoje são ofertadas no mercado inúmeras tecnologias eficientes, a preços bastante atrativos [10].

O incremento do PROCEL induziu a criação do subprograma Procel Edifica e, como resultado, observou-se uma significativa redução do consumo de energia nas edificações, em especial no setor residencial. Conforme este subprograma, estima-se um potencial de redução de consumo de aproximadamente 30% com implementação de ações de eficiência energética nos sistemas de iluminação, ar condicionado e intervenções arquitetônicas na envoltória no que diz respeito às edificações existentes. Já para as novas edificações, este percentual eleva-se para 50% [10].

Em suma, de acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética do Brasil, melhor que implementar programas de eficiência, é fazê-lo de forma eficiente. Assim sendo, o Brasil procura enxergar o que cada país tem de melhor e também valer-se de Acordos Internacionais para a troca de experiência na área [10].

1.3. A energia e os edifícios

O setor dos edifícios (doméstico e de serviços) é um dos grandes setores consumidores na União Europeia, representando um grande potencial na redução dos gases de efeito estufa ligados à energia. Sendo assim, a Diretiva 2010/31/EU de 19 de maio de 2010 foi implantada pelo Parlamento Europeu e do Conselho, relativa ao desempenho energético dos edifícios [11,12]. Esta diretiva aponta novos desafios dirigidos, sobretudo, aos novos edifícios, tais como a instalação de equipamentos que usam tecnologias por via ativa como as energias renováveis, em que obtém destaque os painéis solares térmicos e fotovoltaicos. Ainda dentro desta diretiva, destacam-se novos critérios para a concepção de edificações que devem ser cumpridos de acordo com as condições climáticas locais. A mesma diretiva aprova, da mesma

forma, ações relativas a renovação de edifícios existentes de forma a combater os desperdícios energéticos.

Um dos principais objetivos para Portugal é reduzir a dependência energética através da diversificação das fontes primárias de energia e do aumento da eficiência energética [13]. A mesma fonte aponta, relativo à dados de 2011, que o consumo de energia final foi maior no setor dos transportes (35,8%), seguido pelo setor da indústria (33,7%), setor doméstico (16,6%), setor de serviços (11,3%) e agricultura e pescas (2,6%). Sendo assim, é possível notar que o setor de serviços e residencial somam 27,9% do consumo total de energia e é uma área onde há a necessidade de intervenção, de forma a alcançar os objetivos fixados pela União Europeia. As principais medidas de eficiência energética no setor doméstico e de serviços são a instalação de painéis solares térmicos, a melhoria do desempenho térmico e a colocação de vidros duplos de elevada eficiência, por exemplo [13].

É importante compreender a interação do sol, como fonte de calor, com as edificações, tanto em termos energéticos quanto em sua atuação assumindo diferenciadas posições na abóbada celeste ao longo do ano. Entendendo as variáveis que influenciam nas trocas de calor ou na iluminação natural da edificação, por exemplo, é possível projetar utilizando-se da perspectiva bioclimática.

As variáveis climáticas que mais possuem influência sobre as edificações, em termos de transferência de calor, são a temperatura do ar exterior e a radiação solar [1]. A temperatura do ar, variável responsável pelas trocas de calor que acontecem na envolvente, determina o estabelecimento de fluxos energéticos entre a edificação e o ambiente que a cerca. Durante o inverno, os fluxos ocorrem fundamentalmente do interior da edificação para o exterior, tratando-se neste caso de perdas térmicas, enquanto que no Verão o sentido do fluxo tem tendência a inverter-se e estar-se-á numa situação de ganhos térmicos.

As perdas térmicas do interior da edificação, no inverno, constituem a principal razão para a diminuição da temperatura interior e um dos fatores que mais merecem atenção durante o projeto [1]. A redução das perdas constitui uma das medidas mais eficazes quando a intenção é melhorar o conforto térmico durante esta época do ano, e as medidas normalmente adotadas resultam na utilização de soluções de isolamento térmico nos elementos opacos, e utilização de vidros duplos nos vãos envidraçados. Em contrapartida, durante a situação de ganhos térmicos no por troca de calor, no período de verão, é necessário também atentar para o uso de medidas como o isolamento térmico e a ventilação natural, por exemplo. A radiação solar é outra variável com um papel determinante no conforto térmico de qualquer edifício,

pois durante o inverno, é uma importante fonte de calor, ao passo que no verão deve ser evitada [1].

1.4. Objetivos, organização e justificação

Utilizar de formas naturais para a obtenção de conforto térmico dos ocupantes de uma edificação é um dos principais objetivos do projetista, quando visa-se o uso racional de energias elétrica para a iluminação, ou de energia destinada ao condicionamento da temperatura do ar interior, por exemplo. O conforto térmico está relacionado com fatores pessoais, como a atividade metabólica de cada indivíduo ou o vestuário, e também com fatores ambientais, tais como a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a velocidade e a umidade relativa do ar. Os fatores pessoais são dependentes dos utilizadores, porém os fatores ambientais podem ser condicionados quando é priorizada a qualidade e a forma da envolvente do edifício.

Justifica-se esta pesquisa, de carácter qualitativo e exploratório, quando atenta-se para o fato de que o edifício deve ser adaptado às características do clima em que está inserido. A implementação de regulamentos mais exigentes tem vindo a promover a adoção das estratégias solares, tanto em fase de projeto quanto em projetos de reabilitação. Com a utilização destas estratégias, é possível otimizar o desempenho térmico da edificação. Sendo assim, a presente dissertação possui quatro objetivos principais, distribuídos em seis capítulos.

O primeiro objetivo foca conceituar os principais recursos passivos utilizados pela arquitetura bioclimática, isto é, a arquitetura que utiliza de recursos presentes no ambiente em que a edificação estará inserida, tais como a radiação solar e a ventilação natural, prezando a eficiência energética.

O segundo objetivo aborda a modelação computacional, por meio do programa *EnergyPlus* [2], da situação de referência de um projeto arquitetónico proposto pela Universidade de Évora, analisando seu desempenho térmico. A edificação estará situada na localidade de Mitra, Distrito de Évora, Portugal, e possui a finalidade de abrigar gabinetes da Universidade de Évora. A validação da modelação computacional é realizada comparando-se os resultados simulados com medidas de temperatura efetuadas nas diferentes zonas climáticas da edificação.

O terceiro objetivo consiste no estudo e na modelação computacional de soluções propostas, utilizando estratégias solares passivas, com o intuito de promover a diminuição das necessidades energéticas para o aquecimento e arrefecimento da edificação. As soluções propostas aspiram controlar a temperatura interior através de ganhos diretos e indiretos, ventilação natural, orientação da edificação e soluções construtivas.

O quarto objetivo passa por analisar os resultados obtidos ao longo do trabalho, assim como apresentar as conclusões finais em relação a análise do desempenho térmico da configuração original e dos modelos alternativos propostos.

2. EDIFÍCIOS SOLARES PASSIVOS E ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA

A arquitetura que aborda o clima como uma variável importante no processo de projeto, considerando as interações do Sol com a edificação como um papel fundamental, é conhecida pelo termo "Arquitetura Bioclimática" [1]. Por sua vez, as estratégias que tem em atenção esta interação com o clima são denominadas "Estratégias Bioclimáticas". Estas estratégias são um conjunto de regras ou medidas destinadas a influenciar a forma dos edifícios e seus processos, sistemas e elementos construtivos. Quando as estratégias bioclimáticas escolhidas são corretas e economicamente viáveis, o edifício tem mais chances de atingir as condições necessárias para o conforto térmico, diminuindo os consumos energéticos destinados aos mesmos fins.

O projeto deverá começar por criteriosa escolha do local de implantação e da orientação da edificação, sendo esta escolha a mais propícia para os ganhos solares, na medida do que é permitido pelas características físicas do terreno em que será construída [1]. Na primeira etapa, é necessário o reconhecimento do clima em questão, e posteriormente determina-se as estratégias bioclimáticas que servirão para otimizar o desempenho térmico e energético da edificação.

A localização da edificação designa as condições térmicas a que esta está submetida, isto é, as situações microclimáticas criadas na região, e suas respectivas variações térmicas. O local em que a edificação será construída tem o poder de facilitar ou dificultar o conforto térmico, assim como determinar o dispêndio de energia. A latitude de uma região, em conjunto com a época do ano, determinará o ângulo de incidência dos raios solares em relação ao plano do horizonte do local. Quanto maior for a latitude de um local, menor será a quantidade de radiação solar recebida e, assim, as temperaturas do ar têm a tendência de serem menos elevadas [14].

A não uniformidade de distribuição de massas de terra e mar ao longo dos paralelos é um fator que contribui significativamente para a variação de temperatura nas diferentes regiões da Terra, e causa um fenómeno denominado *Continentalidade* [15]. Sendo o calor específico da água cerca de duas vezes o calor específico médio da terra, a água necessita de quase o dobro de energia térmica que a terra para a mesma elevação de temperatura [15]. Ao se resfriar, assim sendo, a água também perde grande quantidade de energia. A grande camada de ar úmido que paira sobre os oceanos tem a capacidade de receber e reter calor, fazendo com que os oceanos sejam mais frescos no verão e mais quentes no inverno em

relação ao continente, em uma mesma latitude. Neste sentido, uma região no hemisfério norte localizada na mesma latitude que uma no hemisfério sul - observando que o hemisfério norte possui menos mares que o hemisfério sul - terá invernos mais frios e verões mais quentes, em valores médios.

A arquitetura da construção condiciona as perdas térmicas. As perdas térmicas são diminuídas, por exemplo, em função da menor quantidade de saliências e reentrâncias e também em função da menor superfície exterior [14]. É possível assumir que a relação da área exterior e o volume do edifício (coeficiente de forma), varia em função da geometria do edifício. Durante a concepção do projeto da edificação, é importante o conhecimento do vento dominante, assim como a intensidade e frequência, pois são fatores relevantes para o efeito de dispersão térmica e aerodinâmica nos edifícios. A fachada virada a norte deve ter apenas a fenestração necessária e, se possível, deve ser utilizado terreno, talude ou aterro para aumentar a proteção térmica. A fachada orientada para o sul deve possuir janelas grandes, de modo a permitir ganhos diretos durante o inverno.

Na concepção espacial, deverão ser observadas algumas regras, tais como localizar a norte as divisões secundárias da casa, como garagens e armazéns, criando assim zonas intermediárias (também conhecidas como zonas de tampão), para as divisões com mais exigências térmicas, como salas e quartos, localizadas a sul. A sul também devem localizar-se os locais de ganhos indiretos (estufas). Outro fator a ser respeitado é a distância mínima entre as edificações, para que a exposição solar adequada não seja prejudicada. A Figura 1 apresenta um exemplo de concepção espacial.

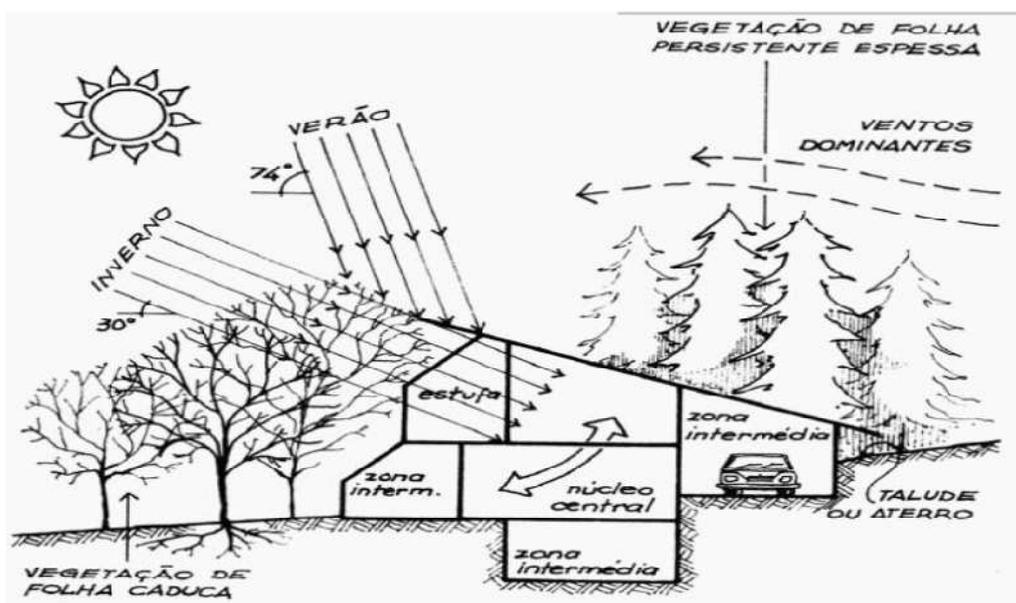


Figura 1. Exemplo do uso da concepção espacial, (in [14]).

2.1. O recurso solar passivo

As principais variáveis de conforto térmico são a temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação solar incidente. Estas variáveis possuem estreita relação com fatores como o regime de chuvas, a vegetação, a permeabilidade do solo, a topografia, entre outras características locais. A arquitetura deve oferecer condições térmicas, como uma de suas funções, adequadas ao conforto térmico humano no interior da edificação, independente das condições climáticas externas [15].

O homem é um ser homeotérmico, seu organismo é mantido a uma temperatura interna constante, na ordem de 37°, com limites muito estreitos - entre 36,1 e 37,2°C -, sendo 32° o limite inferior e 42° o limite superior para sobrevivência, em estado de enfermidade. A manutenção da temperatura interna do organismo se faz por intermédio do seu aparelho termorregulador, que reduz os ganhos ou o aumento das perdas de calor através de alguns mecanismos de controle. A termorregulação, ainda que sendo um meio natural de controle de perdas de calor pelo organismo, representa um esforço extra e, conseqüentemente, uma queda de potencialidade de trabalho. O conforto térmico para o organismo humano é alcançado quando perde para o ambiente, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, o calor produzido pelo metabolismo compatível com sua atividade [15].

Os principais fatores envolvidos no processo de análise de conforto térmico, quanto ao estudo de dados climáticos dos meses a serem calculados, a adoção do melhor partido

arquitetônico em função das características climáticas da região, a determinação dos materiais adequados e a avaliação da temperatura interna máxima resultante [15]. Estes fatores são listados a seguir:

A) Dados climáticos relativos ao mês em estudo

- temperatura do ar média mensal;
- temperatura média mensal das máximas;
- umidade relativa do ar, média mensal;
- radiação solar direta para céu limpo, para as diversas orientações;
- porcentagem média de nebulosidade;
- direção e velocidade dos ventos;
- caracterização do clima local;
- latitude;
- altitude.

B) Adoção do partido arquitetônico em função das características climáticas

- forma mais apropriada;
- orientação e dimensionamento das aberturas;
- localização dos diversos blocos no espaço físico;
- determinação da sombra projetada das edificações;
- determinação das máscaras produzidas por obstruções externas às aberturas;
- indicação de elementos externos de projeção da radiação solar (construções, vegetação, etc.).

C) Determinação dos materiais adequados

- inércia desejada;
- atraso térmico desejado;
- coeficiente global de transmissão térmica de cada material;
- cor externa e interna.

D) Avaliação da temperatura interna máxima resultante

- cálculo da temperatura interna máxima para as diversas alternativas de projeto;
- comparação da temperatura interna máxima obtida com os índices de conforto;
- verificação de alternativas possíveis dentro dos limites da climatização natural.

2.2. Estratégias bioclimáticas

As estratégias caracterizam-se como sendo as medidas adotadas pela arquitetura para que seja atingida uma maior eficiência térmica e energética na edificação. É possível empregá-las em conjunto, pois podem ser complementares umas às outras. Quando a edificação apresenta o desempenho térmico adequado, promovendo o conforto dos usuários, há economia de energia nos aparelhos de condicionamento de ar, por exemplo. As estratégias passivas podem ser divididas em estratégias de controle de ganhos diretos - que favorece tanto o aquecimento quanto o arrefecimento, conforme a situação -, estratégias de aquecimento e estratégias de arrefecimento.

2.2.1. Controle de ganhos diretos

Sempre que possível, a face de maiores dimensões do edifício deve ser a orientada para Sul, no caso de Portugal, de modo a obter maior superfície exposta à radiação solar. Desta forma é possível maximizar os ganhos térmicos durante o período de Inverno [14]. Durante o verão é possível reduzir a superfície exposta diretamente a radiação solar, devido ao uso de palas de proteção solar, pois neste período do ano é grande a altura solar. Pode-se observar na Figura 2 o controle dos ganhos térmicos relativamente a altura solar nos períodos de Inverno e Verão, por meio de uma pala de proteção solar.

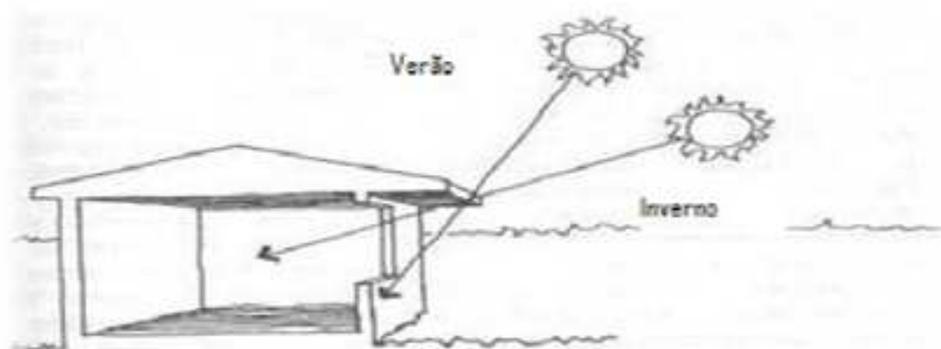


Figura 2. Controle de ganhos térmicos nas fachadas sul (in [16]).

A localização da posição do sol é feita através de dois ângulos: a altura solar e o azimute. O azimute é o ângulo formado pelo plano vertical do sol com o sul ou o norte, conforme o meridiano local. Já a altura solar é o ângulo formado pelo sol e o horizonte visual em um determinado local. A distância zenital, por sua vez, é ângulo medido sobre o círculo vertical do astro, com origem no zênite e extremidade no astro [16]. Para este local, a distância zenital e a altura solares são complementares, isto é: (Distância Zenital+Altura Solar=90°).

A altura solar varia de acordo com a latitude e a época do ano. Para certa latitude tem-se que no solstício de Verão o sol assume a posição mais alta do ano, e no solstício de Inverno a posição mais baixa. No de Inverno, os raios solares possuem incidência mais inclinada, o que origina temperaturas mais baixas. Nos equinócios de 21 de Março/Octubre, quando a declinação do sol é 0° ao meio dia solar, a distância zenital é sempre igual a latitude do lugar [14].

A altura solar deve ser considerada no dimensionamento das palas. No Verão, as palas devem proteger as aberturas da incidência direta dos raios solares, e no Inverno elas devem permitir a passagem pelas aberturas, de forma a se obter ganhos térmicos. No dimensionamento também deve-se considerar todas as características climáticas da envolvente, tal como topografia, latitude, proximidade de grandes massas de água e vegetação, para que atue no período correto.

A radiação solar é um dos mais importantes contribuintes para o ganho térmico em edifícios [17]. Na escala da edificação, a transferência de calor por radiação pode ser dividida em cinco partes principais: radiação solar direta (onda curta), radiação solar difusa (onda curta), radiação solar refletida pelo solo e pelo entorno (onda curta), radiação térmica emitida

pelo solo aquecido e pelo céu (onda longa) e radiação térmica emitida pelo edifício (onda longa).

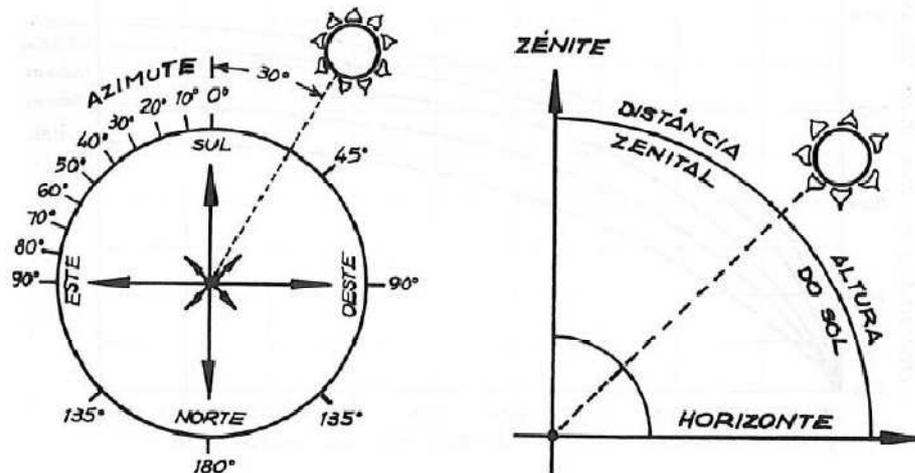


Figura 3. Azimute (sudeste ou sudoeste), altura solar e distância zenital, (in [14]).

A irradiância solar que incidirá sobre a superfície da edificação depende de tanto da época do ano quanto da hora do dia, das condições atmosféricas, da latitude do local e do ângulo dos raios solares com a superfície de incidência. É medida em W/m^2 , e quando refere-se à uma determinada superfície por um determinado período de tempo está a referir-se a Radiação Global [Wh/m^2]. A intensidade global é máxima com o céu limpo (para o qual se adota 90% da radiação ser direta e apenas 10% ser difusa).

Embora o aquecimento por meio da passagem da radiação solar ser um ponto positivo durante as estações frias, é responsável por indesejáveis ganhos térmicos durante as estações quentes. O sombreamento das aberturas envidraçadas é um ótimo recurso para evitar estes ganhos térmicos e, quando bem planejadas, reduzem a energia necessária para o arrefecimento em até 15% [18]. Estes dispositivos mostram-se mais eficazes quando instalados no exterior da edificação, pois bloqueiam a transferência de calor para dentro da edificação, e podem consistir em vegetação, elementos rígidos da paisagem ou proteções solares externas instaladas nos edifícios, tais como palas de proteção solar.

As palas são elementos instalados de forma estratégica na edificação, e cuja função é impedir a passagem da radiação solar indesejada durante alguns períodos do ano. Podem ser representados de diversas formas, sendo estas dimensionadas adequadamente fazendo-se o uso de uma carta solar da localidade em questão, e de diversos materiais, que variam de paredes de concreto a persianas. No contexto atual, estes sistemas tendem a ser bastante

eficazes, pois a tecnologia permite até que mecanismos de controle acompanhem a trajetória do sol, otimizando a configuração das persianas, principalmente de persianas externas.

A vegetação pode ser utilizada para equilibrar as condições climáticas extremas. O tipo de vegetação, a quantidade, a densidade da folhagem, o débito de evaporação e o posicionamento no terreno são fatores que definitivamente influenciam o clima [14]. Como exemplo da importância da vegetação no conforto de uma edificação, o autor cita as plantas de folhas caducas, que promovem sombreamento no verão e transparência no inverno, sendo assim utilizadas como reguladoras da quantidade de radiação solar anual nas fachadas. É possível observar o efeito produzido pela vegetação na Figura 4. As plantas de folhas persistentes podem formar uma barreira protetora aos ventos dominantes, ao passo que as plantas trepadeiras fornecem às fachadas proteção térmica, acústica, vantagens estéticas, de impermeabilidade e de renovação do ar do ambiente. Já nas coberturas, o recurso à vegetação pode reduzir substancialmente as amplitudes térmicas do edifício, pois é onde se dão as perdas térmicas por irradiação.



Figura 4. Influência da vegetação no desempenho térmico de fachadas, (in [14]).

Nos grandes centros urbanos, a diminuição das áreas cobertas por vegetação, aliada a proximidade entre edifícios, ao tráfego intenso de veículos e somada a poluição do ar, nota-se a redução das amplitudes térmicas, dada pela proteção dos edifícios a ventos dominantes desde que se cumpra uma disposição adequada de zonas verdes, de modo a baixar a temperatura por evapotranspiração das plantas, no verão. Neste contexto, surge o termo "Ilha de calor", que sugere a existência de uma cidade quente rodeada por zonas mais frescas. Dentro da própria cidade acabam por existir espaços verdes, que se caracterizam por serem zonas mais frescas, e locais de alta densidade de construção e tráfego intenso, que se torna as zonas mais quentes.

2.2.2. Aquecimento passivo

Os sistemas de aquecimento passivos são aqueles que fazem parte da estrutura construtiva do edifício e que funcionam como acumuladores de energia solar [19]. Estes sistemas podem ser diretos ou indiretos, e também isolados. Os primeiros ocorrem quando o ambiente interior é aquecido diretamente pelo sol, através de vãos envidraçados ou aberturas na envolvente. Já nos segundos a massa térmica que absorverá a energia solar é um espaço "estufa" intermediário. No ganho indireto este calor é transferido de imediato ou não para a zona a aquecer. Algumas vezes a parede é pintada de cor escura, aumentando assim a captação térmica. Nos sistemas de ganhos isolados, a captação da radiação solar e o armazenamento da energia térmica não se encontra nas áreas ocupadas do edifício, e sim em locais próprios e que operam independentemente das restantes áreas. São representados pelas estufas e pelos coletores de ar.

A seguir são descritas brevemente as principais estratégias de aquecimento passivo aplicáveis à uma edificação.

a) Vãos envidraçados

O ambiente interior é aquecido diretamente pelo sol, através de vãos envidraçados que devem ser orientados de preferência para sul, no caso de Portugal. As paredes devem ser dotadas de grande inércia térmica. A inércia térmica refere-se ao fato de armazenar calor dentro da estrutura da edificação, funcionando como um dissipador de calor, evitando a oscilação e os picos durante o dia, e dissipando o calor mais tarde. A inércia térmica é a capacidade de uma edificação de armazenar e liberar calor [20]. Uma edificação com pouca inércia segue muito próxima a variação da temperatura externa, e supondo uma inércia infinita, a temperatura permaneceria constante. Sendo assim, a necessidade de grande inércia térmica aumenta quanto maior for a variação da temperatura externa, radiação solar ou ganhos de calor. A razão entre o calor absorvido e o calor armazenado nos materiais da edificação dependem da capacidade térmica do material que compõe a envoltória. A capacidade térmica por unidade de superfície é o produto da densidade pela espessura e pelo calor específico dos seus componentes.

Os materiais de elevada inércia térmica permitem naturalmente a utilização do sistema de ganho direto, sendo necessário apenas que os vãos envidraçados bem orientados, para que

assim possam captar as radiações solares. Durante o dia, as massas térmicas da construção funcionam como acumuladores de calor. Já durante a noite este calor é libertado, atenuando assim a amplitude térmica no interior do edifício. O envolvente do edifício deverá ser dotado de isolamento adequado para que possa minimizar as perdas durante o período noturno.

b) Paredes e coluna de água

O sistema de funcionamento é idêntico ao da Parede de Trombe, porém o material a ser armazenado é água, em contentores, ao invés de um material construtivo normal de betão, pedra e argamassa [1].

c) Parede de Trombe

Este sistema é composto por um envidraçado devidamente orientado para a incidência dos raios solares, e na face interior há uma parede de grande massa térmica. A separação entre o vidro e a parede deve ser entre 5 e 10 cm. A superfície exterior da parede pode ser pintada de cor escura para aumentar a captação da radiação solar. No espaço entre o vidro e a parede cria-se um sistema com efeito estufa, com temperaturas elevadas. O ar aquecido pode ser imediatamente transferido para o espaço interior a ser aquecido, caso se pretenda. Quando utiliza-se este método, a energia térmica é transferida para o interior e utilizada de imediato, devendo a energia acumulada na parede ser reduzida, para não criar situações de sobreaquecimento, indesejadas no Verão [21]. O modelo de funcionamento pode ser observado na Figura 5 e Figura 6.



Figura 5. Posicionamento das aberturas da parede de Trombe para as diferentes estações do ano (in[21]).



Figura 6. Exemplo de parede de Trombe construída (in[22]).

d) Estufas

É um sistema de ganhos isolados, onde são utilizados os efeitos de ganho direto e indireto. A energia solar armazenada nas estufas é transmitida aos espaços adjacentes por condução através das paredes divisórias comuns e por convecção no caso de existirem orifícios que permitam a circulação entre ambos os espaços [1]. No projeto deste tipo de sistema, deve ser considerada a "desativação" do mesmo durante o período de Verão, por meio de utilização de sombreamentos por vegetação de folha caduca, por exemplo.

e) Coletores de ar

São sistemas constituídos por uma superfície de vidro exterior e uma outra absorvedora interior, sem qualquer capacidade de armazenamento térmico [1]. O funcionamento é por termosifão. São utilizadas para ventilação dos espaços interiores adjacentes ao longo do ano. Durante o Inverno, o ar é aquecido e insuflado no espaço adjacente por convecção natural, permitindo o aquecimento direto do espaço. Durante o verão, o sistema permite que o calor seja extraído do interior para o exterior, sempre que for desejável.

2.2.3. Arrefecimento passivo

Este tipo de sistema utiliza as fontes frias existentes para diminuição da temperatura no interior da edificação. É vantajoso pois pode reduzir ou mesmo eliminar a necessidade de um sistema de climatização convencional. As soluções devem atenuar os ganhos de calor e utilizar meios de dissipação de calor. O arrefecimento de forma passiva deve ser considerado nas soluções arquitetônicas da edificação quando ainda em projeto, localizando de forma adequada as zonas envidraçadas, escolhendo de forma racional os materiais e dimensionando propriamente as palas para o sombreamento.

As coberturas são as superfícies que mais recebem radiação solar durante o Verão, razão pela qual devem ser tratadas com bastante atenção, aplicando isolamentos térmicos e métodos de ventilação para a dispersão do calor. As cores claras, com ou sem características refletantes, auxiliam a diminuição da captação da radiação solar, contribuindo para o equilíbrio energético da edificação durante o verão.

a) Ventilação natural

A ventilação natural é o fluxo de ar gerado intencionalmente através de janelas abertas, portas e outras penetrações no envoltório da edificação. A promoção do conforto térmico dos habitantes se dá ou através do efeito fisiológico direto - ao abrir as janelas e permitir que a alta velocidade do ar aumente a taxa de evaporação na superfície da pele e reforçando a sensação de resfriamento - ou de maneira indireta, através da ventilação noturna [23]. Quando a edificação é ventilada apenas a noite, é promovida a refrigeração da massa interna da edificação que durante o dia seguinte diminui a taxa de aumento da temperatura interna.

Como benefícios gerados por ventilar a casa naturalmente, é possível citar a captação de ar fresco em quartos e sala de estar, a remoção de odores, o arejamento durante as atividades domésticas, a remoção do ar antigo e a condensação, além da diminuição de consumo de energia em edificações com ar condicionado. Para que os benefícios sejam atingidos, no entanto, é necessário considerar alguns fatores. A concentração de poluentes do ar exterior deve ser inferior à do ar interior e deve estar dentro dos valores admissíveis, a temperatura no exterior deve estar dentro dos limites de conforto e não deve provocar

desconforto térmico, e também não devem surgir problemas ambientais e sociais, tais como o ruído ou a perda de privacidade.

Portugal é um país com grandes amplitudes térmicas diárias. Em algumas localidades, no período de verão, as temperaturas podem reduzir em até 20°C durante o período noturno. Utilizando-se da ventilação natural, é possível dispersar durante a noite a energia térmica acumulada ao decorrer do dia. A ventilação natural usualmente é promovida através da diferença de pressão entre um lado e outro da janela, porta ou chaminé, ou ainda pela diferença de temperatura entre exterior-interior. O controle da qualidade do ar e o conforto térmico dos usuários da edificação são fortemente promovidos pela ventilação natural, pois gera renovação de ar e diluição dos poluentes.

A forma mais usual de ventilação natural consiste na infiltração de ar por meio da permeabilidade da sua envolvente que garante um fluxo de ventilação base, e pela existência de janelas que podem ser abertas para aumentar o fluxo de ventilação quando for necessário [24]. A solução, que oferece baixo custo porém não permite controle sobre o sistema, enfrentou as melhorias nos processos construtivos que levaram a edificações mais estanques. As aberturas a serem colocadas na envolvente para promover a ventilação natural de base são usualmente grelhas.

A disposição das aberturas divide-se entre duas grandes categorias [25]:

- Ventilação transversal
- Ventilação simples.

A ventilação transversal, também conhecida como ventilação cruzada, é bastante eficiente na dispersão de cargas térmicas. Ela depende da forma que o edifício assume e das características do ambiente em que está inserido. Ela ocorre quando o ar penetra no interior por uma fachada e abandona o mesmo por uma fachada diferente. A Figura 7 apresenta um exemplo de ventilação transversal

A ventilação simples, ou unilateral, é uma estratégia localizada, para quando se pretende ventilar apenas um compartimento ou para os casos onde a edificação possui somente uma fachada disponível para a colocação das aberturas. Quando a diferença entre a temperatura interior e exterior é pequena ou quando o vento apresenta uma velocidade muito baixa, o fluxo de ar torna-se muito pequeno, tornando a estratégia pouco eficaz para o arrefecimento. Para quando aumentar sua eficácia deve-se afastar as aberturas, assim como

aplicar bandeiras para direcionamento dos ventos. A Figura 8 apresenta uma ilustração de ventilação simples com aplicação de bandeiras.

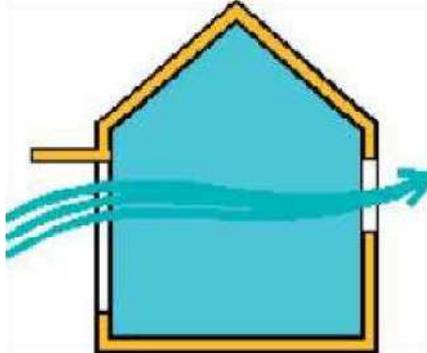


Figura 7. Ventilação transversal, (in [1]).

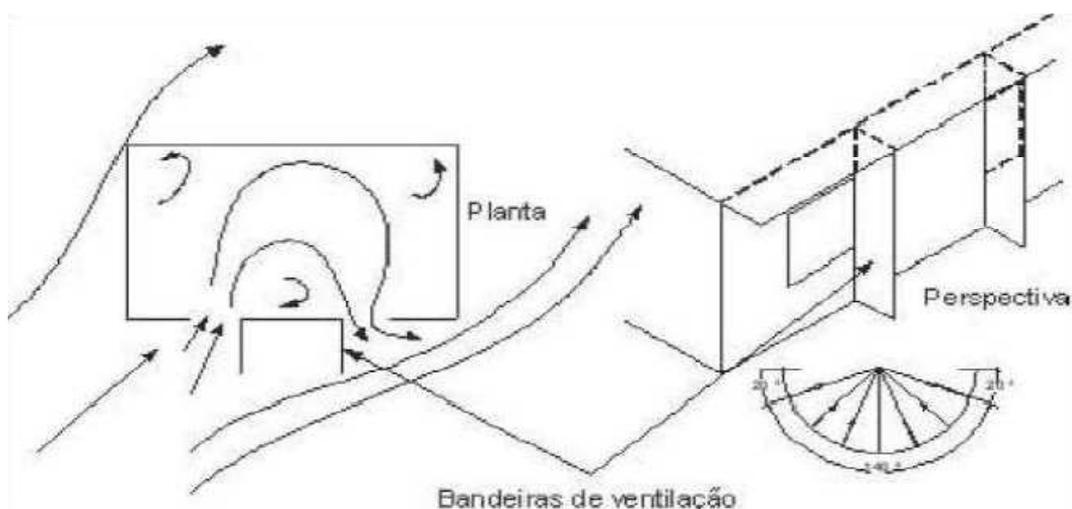


Figura 8. Ventilação simples, uso de bandeiras para direcionamento do vento, (in [1]).

b) Arrefecimento geotérmico

O uso do solo como massa inercial para condicionamento térmico de edificações por contato é uma prática antiga, porém, seu uso como trocador de calor através de dutos enterrados, para ventilação natural de edificações é recente. A prática consiste em enterrar dutos a profundidades usuais entre 0,5m e 1,5m - com extensões e diâmetros variáveis - por onde o ar circula do exterior para o interior dos ambientes, através da ação do vento externo e da convecção natural (Figura 9). Durante o trajeto, o ar troca calor com o solo e ingressa no ambiente a temperaturas mais amenas [26].

No Verão, os valores referentes à temperatura do solo se encontram inferiores às do exterior. A pouca profundidade, a temperatura do solo não apresenta variações ao longo do ano. Através do sistema de tubos enterrados, é possível promover ventilação natural e diminuir as variações de temperatura no interior da habitação. Este tipo de sistema utiliza-se de uma rede de condutas enterradas que interliga o interior do edifício ao solo. As propriedades dos materiais das condutas, a superfície das condutas em contato com o solo e a quantidade de ar circulante são fatores que se relacionam com a eficiência do sistema.

A circulação do fluido pode ser aberta ou fechada, ao passo que os dutos podem estar dispostos na horizontal ou na vertical. A escolha da melhor hipótese leva em consideração a disponibilidade de espaço do local. Para os dutos verticais, existe a necessidade de escavações mais profundas, porém prejudica-se menos a cobertura do solo. Comumente possuem custos mais elevados, que associam-se ao melhor rendimento, comparando-se aos tubos horizontais. Todavia, o sistema horizontal é o projeto mais popular, onde tubos de plástico especiais são enterrados em linhas com profundidades que variam de 1 m a 2 m. É indicado, também, o uso de tubos especiais de polietileno, com ligação a fusão [26].

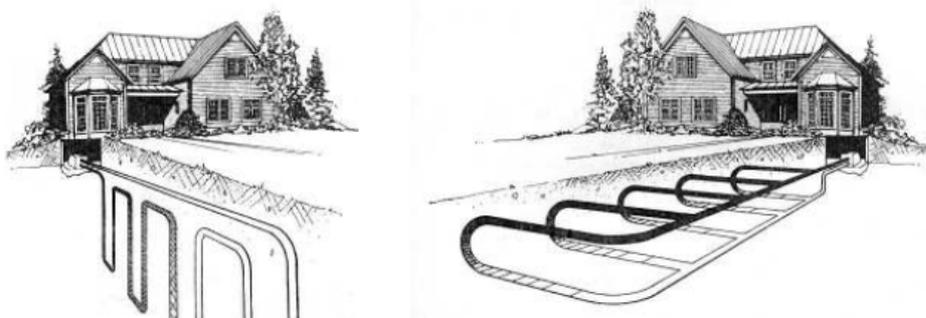


Figura 9. Exemplo de sistemas verticais (esquerda) e horizontais (direita), (in [27]).

O sistema fechado utiliza-se de um fluido constantemente pressurizado através dos tubos enquanto o sistema está em operação, trocando calor com o solo porém sem ser disperso no exterior ou no interior. Utilizar-se do sistema fechado permite a utilização de fluidos com características térmicas mais propícias e que executem trocas térmicas mais eficientes com o solo.

O sistema aberto que se utiliza de ar como fluido pode capturar e inflar o ar dentro da própria edificação, ou captar o ar do exterior e inseri-lo no interior [28]. O primeiro modelo é bastante utilizado em estufas, porém o segundo modelo auxilia na renovação do ar e é conhecido como ventilação pelo subsolo.

O uso do ar é o mais popular, podendo ser utilizado em uma vasta gama de situações. A eficiência do sistema depende basicamente das características do tubo (material e diâmetro), da configuração do sistema (distância entre eixos, comprimento, profundidade, inclinação e velocidade de circulação do fluido) e das características do solo na região, tais como a difusidade térmica, umidade e tipo de cobertura.

c) Arrefecimento evaporativo

Junto à construção, executam-se pequenos lagos ou fontes, que devem ser estrategicamente posicionados na entrada do percurso que o ar efetua para ventilar o edifício. Na Figura 10 é possível observar o arrefecimento evaporativo. No sistema de roof-sprayin, a água é aplicada na cobertura por um sistema de rega por aspersão [1]. O arrefecimento se dá por contato direto da laje, produzido pela evaporação da água, fazendo com que exista uma zona de ar fresco que desce por convecção em direção ao solo, sendo canalizado naturalmente para o interior do edifício.

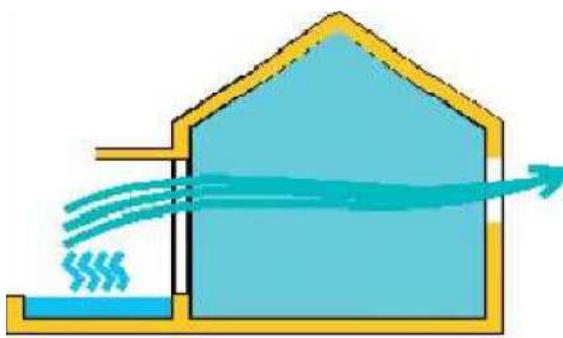


Figura 10. Sistema de arrefecimento evaporativo, (in [1]).

Há também a opção do uso de plantas. Este recurso dá-se pela aplicação de "cortinas" de plantas trepadeiras, juntamente às paredes do edifício, que causam a queda de temperatura através da sua transpiração. Em contrapartida, a utilização deste recurso pode levar ao aumento da umidade local, podendo diminuir o conforto térmico.

2.2.4. Materiais da envolvente

A envolvente de uma edificação tem como objetivo, além de funcionar em alguns casos como elemento portante, de proporcionar vedação ao sistema. O envelope da edificação

é o parâmetro mais importante no condicionamento passivo, e consideram que a envoltória é o principal determinante do clima interno, responsável pelos fluxos de calor em seu interior e, desta forma, fator determinante no seu desempenho térmico [29].

Nos edifícios as perdas e os ganhos de calor pela cobertura assumem por vezes um papel particularmente importante, nomeadamente nos casos em que aquele elemento construtivo possui uma percentagem de área elevada relativamente aos restantes elementos construtivos. É pois um dos elementos da envolvente a ter mais cuidado a fim de evitar situações de desconforto assinaláveis [5].

A condição essencial para a transmissão de calor é que os corpos possuam diferentes temperaturas. O corpo com maior temperatura cede parte da sua energia térmica para o corpo com menor temperatura, que ao assimilar esta energia térmica tenderá a aumentar a sua temperatura até que ambos estejam em equilíbrio térmico. No caso de paredes e coberturas, o sentido do fluxo se dará em função das diferenças de temperatura interna e externa. O fluxo de calor dependerá da transmitância térmica, da diferença de temperatura e também da radiação solar incidente na superfície.

O Sol incide sobre a envoltória da edificação e representa um certo ganho de calor, que será função da intensidade da radiação incidente e das características térmicas dos parâmetros do edifício. Os elementos da edificação, quando expostos aos raios solares, diretos ou difusos, ambos radiação de alta temperatura, podem ser identificados como opacos ou transparentes ou translúcidos.

No caso de uma parede opaca exposta a radiação e sujeita a determinada diferença de temperatura entre os ambientes que separa [14], os mecanismos de trocas podem ser esquematizados de acordo com a Figura 11. Já sobre as paredes transparentes ou translúcidas expostas à incidência da radiação solar e sujeitas a uma determinada diferença de temperatura entre os ambientes que separa, esquematiza-se o mecanismo de troca segundo a Figura 12. A intensidade do fluxo térmico (q) que atravessa a parede deve incorporar, em comparação com as opacas, a parcela que penetra por transparência. Desta forma, a energia radiante absorvida se transforma em energia térmica e a energia refletida não sofre modificação alguma [14].

A inércia térmica associa-se ao amortecimento e ao atraso da onda de calor, devido ao aquecimento ou resfriamento dos materiais. A inércia térmica depende das características térmicas da envolvente e dos componentes construtivos internos. O amortecimento e o atraso, combinados, compõem a inércia térmica, a qual é função da densidade, da condutibilidade e da capacidade calorífica da parede. O calor específico é o fator que representa a capacidade

calorífica, e se mede pela quantidade de calor necessária para fazer elevar de uma unidade de temperatura, a sua unidade de massa ($J/kg^{\circ}C$) [15].

Os mesmos autores acrescentam que o peso e a espessura de uma parede definem se sua inércia térmica é maior ou menor, porém os revestimentos desempenham papel importante, pois os isolantes reduzem as trocas de calor com a parede e reduzem a inércia, por exemplo. O amortecimento e o atraso serão tanto maiores quanto maior for a inércia térmica da construção. É possível observar na Figura 13, a seguir, um exemplo de curvas de variação de temperatura externa e interna de um recinto, sem considerar os ganhos de calor solar, somente as trocas relativas à diferença de temperatura, que demanda ganhos durante as horas em que a temperatura externa é maior que a temperatura interna e perdas de calor, ao passo que a temperatura interna é maior que a temperatura externa.

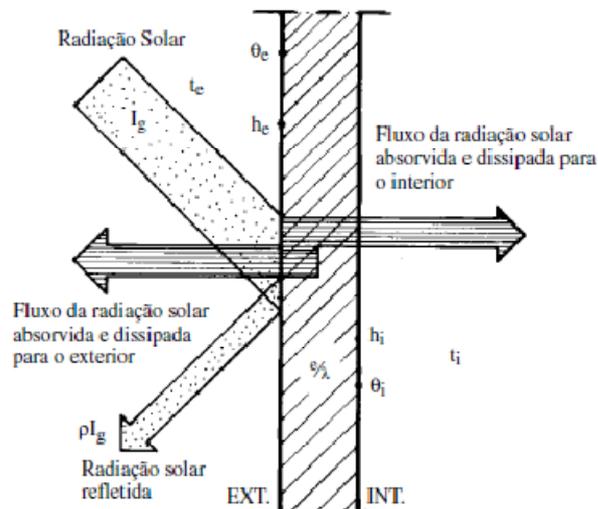


Figura 11. Trocas de calor através de paredes opacas, (in [15]).

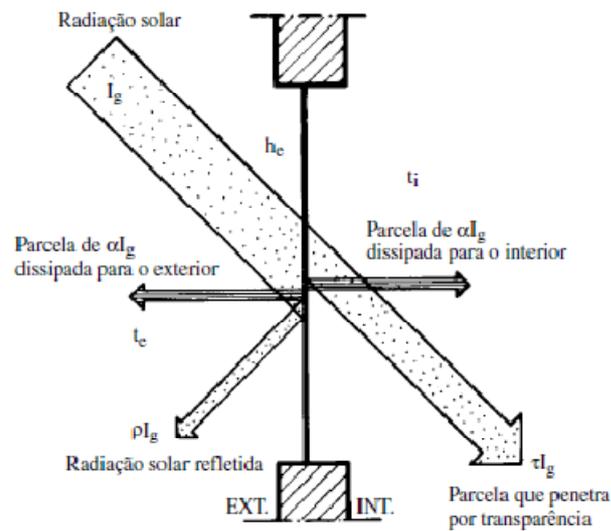


Figura 12. Trocas de calor através de superfícies transparentes ou translúcidas, (in [15]).

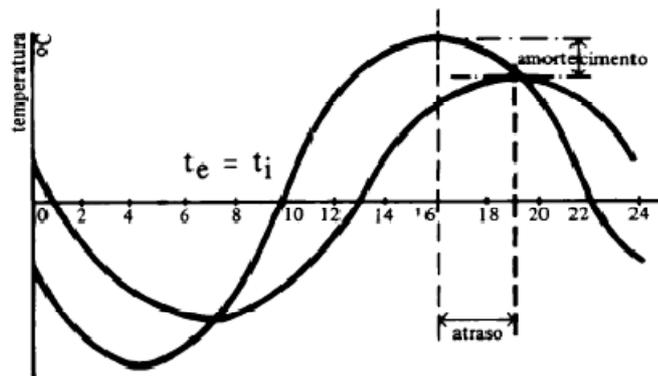


Figura 13. Exemplo de curvas de variação de temperatura externa e interna de um ambiente, (in [15]).

Outros fatores a serem considerados são a transmitância, a capacidade térmica e o atraso térmico. A transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor (U) é definida como o inverso da resistência térmica total. A resistência térmica total apresenta-se como sendo o somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente. Ou seja, está relacionada à permissão da passagem de energia. Relaciona-se, também, à espessura e à condutividade térmica dos seus materiais constituintes.

Já a capacidade térmica é a quantidade de calor que um corpo necessita perder ou absorver para que a sua temperatura sofra uma variação unitária. Por sua vez, o atraso térmico

indica o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo.

Outro fator que influencia a transferência de calor são as pontes térmicas. Ponte térmica é o termo vulgarmente utilizado para designar fenómenos localizados de transferência de calor na envolvente de um edifício, cuja consequência é uma redução das características de isolamento térmico desses locais relativamente à zona corrente [30]. A ponte térmica é toda a parte da envolvente de um edifício onde não é possível admitir a hipótese de unidireccionalidade do fluxo de calor e, por conseguinte, deixa de ser válida a abordagem de cálculo convencionalmente usada em térmica de edifícios, que toma a resistência térmica dos elementos uniforme na sua área.

Em termos de fenómeno físico, nas zonas de pontes térmicas as linhas do fluxo de calor deixam de ser rectilíneas, aspecto característico de um processo unidireccional, e tomam as direcções em que a resistência oferecida à passagem de calor é menor [30]. Esta particularidade transforma a transmissão de calor nessas zonas num processo bidimensional ou mesmo tridimensional. Em termos práticos, as pontes térmicas têm como efeito um acréscimo das trocas de calor através da envolvente, relativamente a uma situação base que não contemple esse efeito, levando ao aumento dos consumos energéticos de um edifício e a uma distribuição heterogénea de temperaturas nos paramentos.

3. ESTUDO DE CASO

No Capítulo 3 são apresentadas as informações de caracterização do estudo de caso, validação do modelo, características do modelo referência e modelos relativos às diferentes estratégias estudadas. A edificação em estudo localiza-se em Mitra, Évora, Portugal, e possui como finalidade abrigar novos gabinetes para a Universidade de Évora. Possui uma área útil de $96m^2$, sendo 12m o comprimento da fachada frontal e 8m o da fachada a lateral. É formada por sete cômodos, sendo eles três gabinetes, uma sala técnica, uma sala de reuniões, uma cozinha e uma casa de banho.

3.1. Características da edificação

A arquitetura da casa pré-fabricada em estudo possui formato retangular e é composta por sete cômodos, sendo eles três gabinetes, uma sala técnica, uma sala de reuniões, uma cozinha e uma casa de banho. A arquitetura proposta para a edificação é apresentada em vista lateral pela Figura 14 e em planta baixa pela Figura 15. Nela, é possível observar as cotas e a disposição dos cômodos. Ressalta-se aqui que o deck com toldo em frente à fachada principal não pertence a área interna.

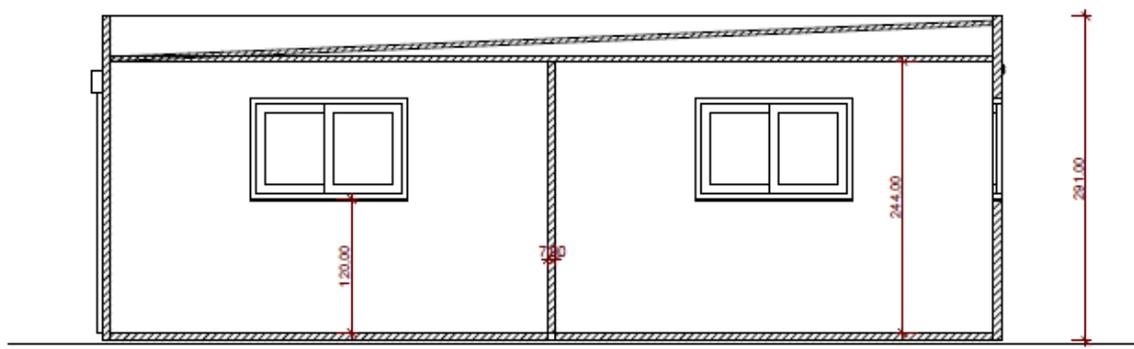


Figura 14. Vista lateral da edificação.

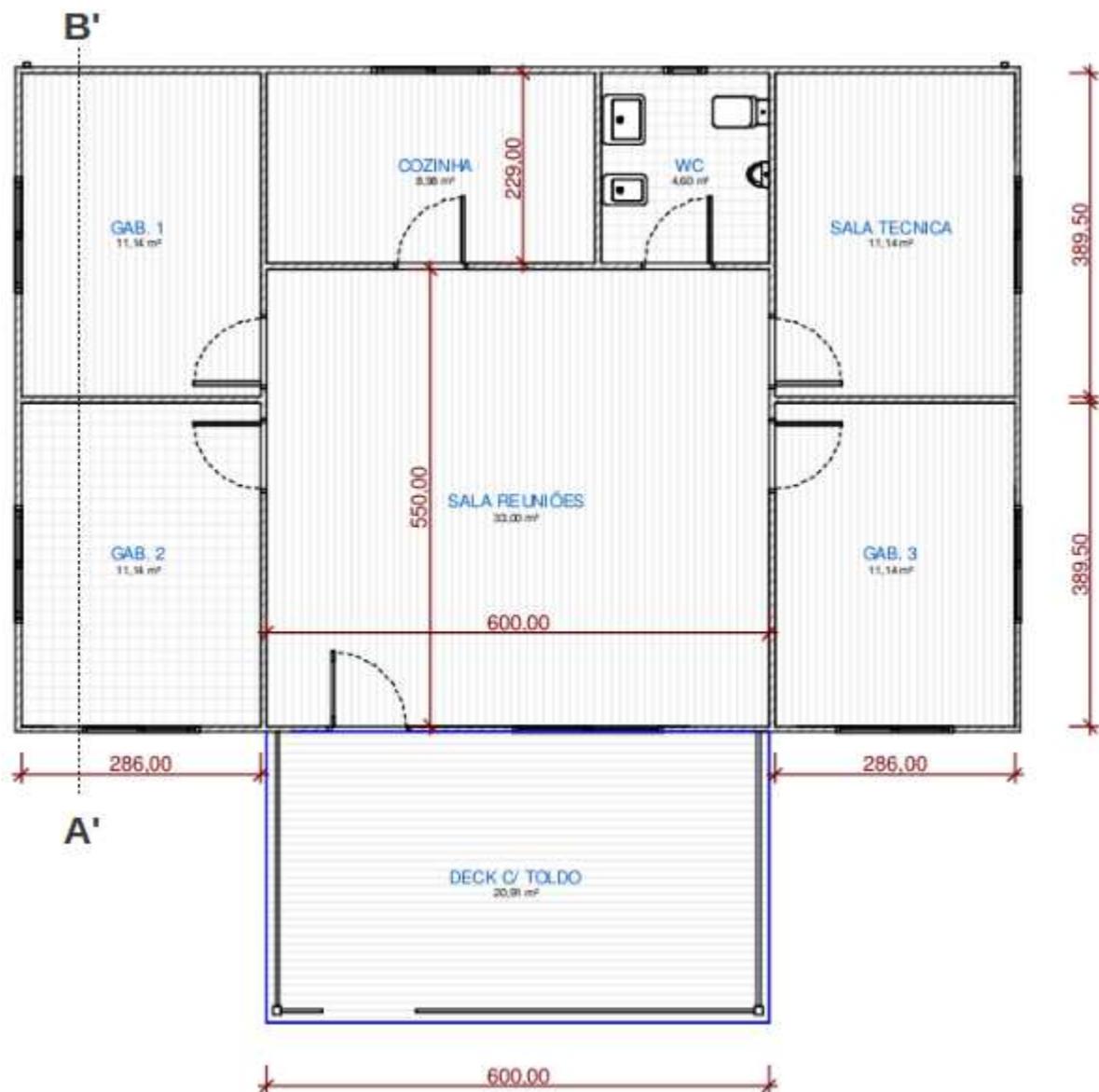


Figura 15. Planta baixa da edificação.

Para o efeito de modelação da edificação, determinou-se sete zonas térmicas, cada uma representando um dos seguintes ambientes: gabinete 1, gabinete 2, gabinete 3, sala técnica, sala de reuniões, cozinha e casa de banho. A Figura 16 apresenta perspectivas do modelo.

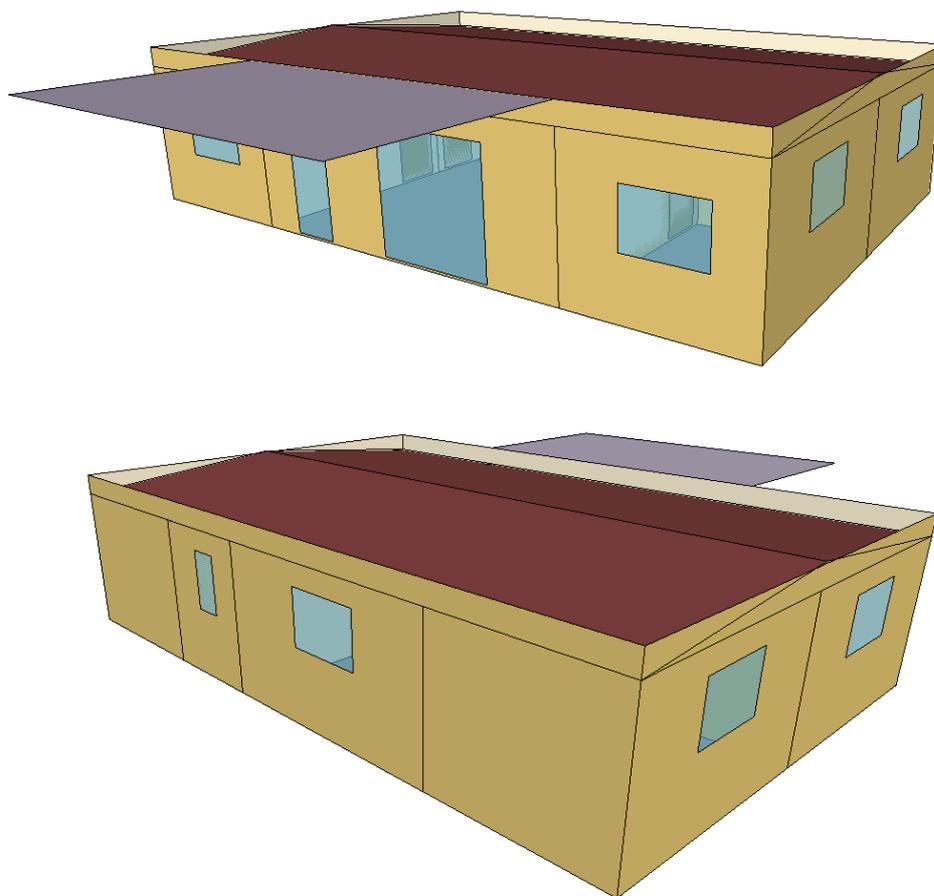


Figura 16. Modelo da edificação em perspectiva.

Os elementos construtivos da edificação e suas características são descritos nas tabelas abaixo (descrição por camadas constituintes, de fora para dentro).

Tabela 1. Definição dos materiais das paredes externas.

Elemento	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/m-K]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kg-K]
Paredes externas	Reboco acrílico	0,012	0,2	1150	1500
	Placa de Zinco	0,000625	110	7140	388
	Placa de poliuretano	0,040	0,029	40	1674
	Placa de Zinco	0,000625	110	7140	388
	Caixa de ar	0,030	-	0,16	-
	MDF hidrofugo	0,012	0,18	800	1600
	Reboco acrílico	0,012	0,2	1150	1500

Tabela 2. Definição dos materiais das paredes internas.

Elemento	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/m-K]	Densidade [kg/m3]	Calor específico [J/kg-K]
Paredes internas	Reboco acrílico	0,006	0,2	1150	1500
	MDF hidrofugo	0,012	0,18	800	1600
	Caixa de ar	0,050	-	0,16	-
	MDF hidrofugo	0,012	0,18	800	1600
	Reboco acrílico	0,006	0,2	1150	1500

Tabela 3. Definição dos materiais do piso flutuante.

Elemento	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/m-K]	Densidade [kg/m3]	Calor específico [J/kg-K]
Piso flutuante	Pavimento flutuante	0,010	0,18	860	800
	Aglomerado de madeira	0,018	0,04	860	200
	Placa de zinco	0,000625	110	7140	388
	Placa de poliuretano	0,040	0,029	40	1674
	Placa de zinco	0,000625	110	7140	388

Tabela 4. Definição dos materiais do piso cerâmico.

Elemento	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/m-K]	Densidade [kg/m3]	Calor específico [J/kg-K]
Piso cerâmico	Pavimento cerâmico	0,012	0,6	1650	840
	Aglomerado de madeira	0,018	0,04	860	200
	Placa de zinco	0,000625	110	7140	388
	Placa de poliuretano	0,040	0,029	40	1674
	Placa de zinco	0,000625	110	7140	388

Tabela 5. Definição dos materiais do teto.

Elemento	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/m-K]	Densidade [kg/m3]	Calor específico [J/kg-K]
Teto	Placa de zinco	0,000625	110	7140	388
	Placa de poliuretano	0,040	0,029	40	1674
	Placa de zinco	0,000625	110	7140	388

Tabela 6. Definição dos materiais do telhado.

Elemento	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/m-K]	Densidade [kg/m3]	Calor específico [J/kg-K]
Telhado	Placa de zinco	0,000625	110	7140	388
	Placa de poliuretano	0,040	0,029	40	1674
	Placa de zinco	0,000625	110	7140	388

Tabela 7. Definição dos materiais das janelas.

Elemento	Material	Espessura [m]	Transmitância
Janelas	Vidro	0,006	0,775
	Ar	0,003	-
	Vidro	0,006	0,775

Tabela 8. Definição dos materiais da porta exterior.

Elemento	Material	Espessura [m]	Transmitância
Porta exterior	Vidro	0,012	0,217

Tabela 9. Definição dos materiais das portas internas.

Elemento	Material	Espessura [m]	Condutividade [W/m-K]	Densidade [kg/m3]	Calor específico [J/kg-K]
Portas interiores	Madeira	0,036	0,15	608	1630

Zonas térmicas

Optou-se por definir as zonas térmicas por cômodo, sendo elas especificadas na Tabela 10, quanto à sua área, e pé direito médio. O zona térmica denominada "telhado", entre o telhado e o teto, é uma zona térmica que corresponde à uma caixa de ar, onde não há ventilação.

Tabela 10. Definição das zonas térmicas.

Piso	Zona térmica	Área [m²]	Pé direito médio [m]
0	Gabinete 1	11,68	2,09
	Gabinete 2	11,68	2,90
	Gabinete 3	11,68	2,90
	Sala técnica	11,68	2,90
	Sala de reuniões	33,93	2,90
	Cozinha	9,93	2,90
	Casa de banho	4,48	2,90
-	Telhado	96,00	0,25
Total pisos		95,06	

Iluminação

A potência utilizada para iluminação e seu respectivo tipo são descritos pela Tabela 11.

Tabela 11. Definição da iluminação por zona térmica.

Piso	Zona térmica	Potência [W]	Tipo de iluminação
0	Gabinete 1	100	Fluorescente
	Gabinete 2	100	Fluorescente
	Gabinete 3	100	Fluorescente
	Sala técnica	100	Fluorescente
	Sala de reuniões	200	Fluorescente
	Cozinha	100	Fluorescente
	Casa de banho	100	Fluorescente
Total pisos		800	

Equipamentos

A potência utilizada pelos equipamentos nas zonas em que eles existem são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12. Definição dos equipamentos por zona térmica.

Piso	Zona Térmica	Potência instalada - equipamentos [W]
0	Gabinete 1	200
	Gabinete 2	200
	Gabinete 3	200
	Sala técnica	400
	Cozinha	2500

3.2. Localização e clima

O projeto da casa pré-moldada que abrigará os gabinetes da Universidade de Évora refere-se a localidade de Mitra, com latitude 38°32'26" e longitude 08°00'01", na sub-região do Alentejo Central, em Portugal. A cidade de Évora possui uma altitude média de 240m. A casa possui fachada principal orientada a Sudoeste, especificamente a 220° do Norte.

O Instituto Português do Mar e da Atmosfera apresenta, para a cidade de Évora (considerando-se altitude de 309m), as normais climatológicas apresentadas na Figura 17. O período de funcionamento da recolha de dados é do ano de 1941 até os dias atuais.

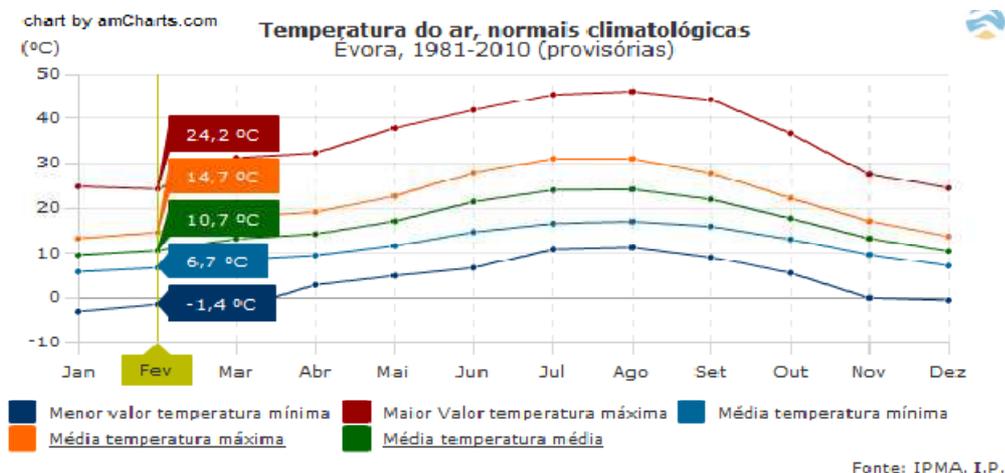


Figura 17. Normais climatológicas para a região de Évora, (in [31]).

O IPMA também apresenta, para a região de Évora o registro de anomalias na temperatura do ar e nas normais climatológicas (Figura 18).

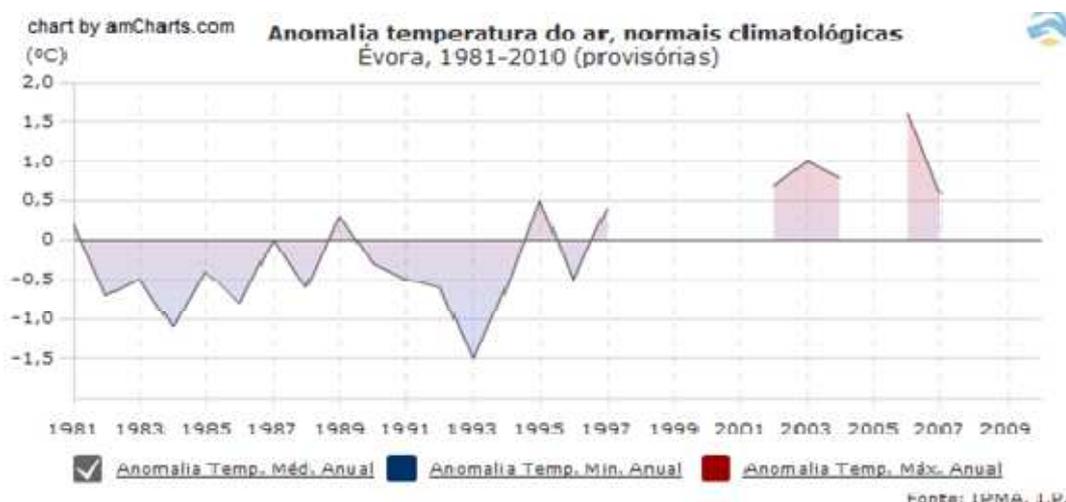


Figura 18. Anomalias na temperatura do ar e normais climatológicas, (in [31]).

O distrito de Évora é classificado, em relação ao Zoneamento Climático, como pertencente à zona climática de inverno I1, com número de graus-dias de aquecimento (°C.dias) igual a 1390 e duração da estação de aquecimento de 5,7 meses. Quanto a zona climática de verão, é classificado como V3, sendo a temperatura externa de projeto de 35°C e a amplitude térmica de 17°C. O termo "graus-dias de aquecimento" refere-se à um número que caracteriza a severidade de um clima durante a estação de aquecimento e é igual ao somatório das diferenças positivas registradas entre uma dada temperatura de base (20°C) e a temperatura do ar exterior durante a estação de aquecimento. Já a estação de aquecimento é o período do ano com início no primeiro decêndio posterior a 1 de Outubro em que, para cada localidade, a temperatura média diária é inferior a 15°C e com termo no último decêndio anterior a 31 de Maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15°C [32].

O clima da região de Évora, segundo a classificação de Köppen de 1936, é Csa, clima temperado com Verão quente e seco nas regiões interiores do vale do Douro (parte do distrito de Bragança), assim como nas regiões a sul do sistema montanhoso Montejunto-Estrela (exceto no litoral oeste do Alentejo e Algarve). [33].

3.3. Modelagem computacional

As ferramentas computacionais para simulação são desenvolvidas com o intuito de facilitar a análise e a avaliação de projeto quanto ao comportamento energético, térmico, acústico, de iluminação, entre outros. Elas tornam-se cada vez mais importante e vem ganhando espaço em vários países. O Departamento de Energia dos Estados Unidos tem disponível na internet uma lista de 347 programas de simulação de edificações, para análise de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edifícios [2].

Para as simulações computacionais realizadas no desenvolvimento da presente dissertação, utilizou-se o programa *EnergyPlus* [2]. O *EnergyPlus* foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, com o objetivo principal de estimar trocas térmicas, níveis de iluminação, aquecimento e resfriamento, ventilação natural, usos de água, sistemas fotovoltaicos, índices de conforto térmico, entre outros. É possível adaptar o programa a diferentes climas, a partir de arquivos climáticos com dados horários. Como resultado, obtêm-se uma vasta gama de dados calculados, tais como temperaturas internas, temperaturas superficiais, fluxo de calor pelos componentes do edifício, ganhos internos de calor, trocas de ar, consumos energéticos, etc.

Este tipo de ferramenta ainda é pouco utilizada pelos profissionais devido a complexidade dos fenômenos envolvendo o comportamento térmico dos edifícios, que implica em uma grande quantidade de dados de entrada na simulação, o que requer conhecimentos multidisciplinares por parte dos usuários [34]. Porém, embora não sejam pequenas as dificuldades, as simulações tem sido de grande valia nas pesquisas termo-energéticas.

Primeiramente, desenvolveu-se o modelo para validação experimental. Este modelo foi elaborado com o intuito de comparar seus resultados com as medidas de temperatura realizadas no local de estudo de caso, a título de validação dos *inputs* inseridos no programa. Uma vez validado os dados de *inputs* utilizados para a elaboração da simulação, foi desenvolvido um modelo referência, que retrata a situação real da edificação. Após o modelo referência, determinou-se as estratégias solares passivas a serem inseridas no modelo da edificação, nomeadamente o sombreamento por meio de palas (para diferentes orientações da edificação) e persianas, o sistema de ventilação por tubos enterrados (em diferentes profundidades e materiais) e o sistema de insuflador de ar externo para o interior da casa, durante o verão. Por meio da análise das necessidades de aquecimento e arrefecimento

geradas por cada uma das estratégias, combinou-se as estratégias com melhor performance para a definição de um modelo final. Para ilustrar o impacto da utilização das estratégias, é apresentado um gráfico da flutuação de temperatura de um gabinete orientado à sul, onde há maior incidência de radiação solar, nomeadamente o Gabinete 3.

3.3.1. Validação experimental

Para garantir que os resultados obtidos pela modelagem computacional representem efetivamente o comportamento térmico da edificação, é essencial que o modelo de simulação seja corretamente calibrado [35]. Para tal, inseriu-se no modelo de validação o padrão de utilização (ocupação, iluminação e equipamentos) registrado na edificação para os dias considerados, e modificou-se o arquivo climático referente à cidade de Évora com os dados registrados de radiação e temperatura. Os resultados obtidos para o modelo por meio do software Energyplus foram comparados com medições de temperatura realizadas no interior das zonas térmicas em que se realiza o estudo de caso [35]. Utilizou-se para a comparação apenas as medições realizadas para o dia 19 de dezembro de 2014 para o dia com ocupação e 23 de dezembro de 2014 para o dia sem ocupação, dada a insuficiência de registros. Todavia, um maior período de tempo de medições é aconselhável quando pretende-se validar um modelo computacional, proporcionando maior confiabilidade.

Os equipamentos utilizados para a realização das medições foram multímetro, sondas e piranômetro. Suas especificações são apresentadas a seguir:

- *Multímetro*: Agilent 34980A, com precisão de 0,004% [36];
- *Sondas*: PT100 calibradas com banho termostático, com precisão de 0,05°C [37];
- *Piranômetro*: Hukseflux SR20, com precisão de 1,2% [38].

Para validar a simulação computacional, utilizou-se o arquivo climático que contém os valores referentes ao Ano Climático de Referência (TRY - *Test Reference Year*) para a cidade de Évora [39], inserindo dados horários obtidos na localidade de Mitra para o período desejado. Os dados modificados no arquivo climático são, nomeadamente, a temperatura de bulbo seco, radiação global horizontal, radiação direta normal. Apesar de não possuir registros horários para a umidade relativa do ar e para a velocidade do vento, conferiu-se que os valores

propostos pelo TRY são bastante similares às médias diárias registradas para a localidade de Mitra para o período em questão [40]. Substitui-se no arquivo climático os valores referentes aos dias 18, 19, 20, 21, 22 e 23 de dezembro de 2014. Ressalta-se que, para o software Energyplus, a hora zero corresponde ao intervalo entre 00:00:01h e 01:00:00h, a hora um corresponde ao intervalo entre 01:00:01h e 02:00:00h, e assim sucessivamente.

Ressalta-se aqui que, durante a realização das medições experimentais na edificação, não existia forma de medir a taxa de renovação de ar, sendo os valores a seguir apresentados os que traduzem os resultados mais próximos aos experimentais. Os valores de renovação de ar por hora apresentados estão de acordo com a infiltração esperada para as caixilharias, sendo que também não foi possível registrar as infiltrações de ar entre zonas térmicas, o que também representa uma variável não controlada na validação experimental. As taxas de renovação de ar por hora utilizadas para a simulação de cada zona térmica são descritas na Tabela 13.

Tabela 13. Taxa de renovação de ar por hora por zona térmica.

Taxa de renovação de ar por hora [h⁻¹]	
Gabinete 1	1,5
Gabinete 2	1,5
Gabinete 3	1,5
Sala técnica	1,5
Sala de reuniões	1,5
Cozinha	1,1
Casa de banho	1,1

Para calibrar o modelo computacional em relação às medições horárias de temperatura interior das zonas térmicas, variou-se as taxas de renovação de ar por hora no interior da edificação, fixando-as nos valores já apresentados na Tabela 13. As taxas de renovação de ar definidas para o modelo atendem à taxa de renovação de ar mínima de 0,6 trocas por hora [9]. Considerando a precisão das sondas utilizadas, pode haver variação na temperatura medida de até 0,05°C.

a) Validação do modelo com ocupação

Para a validação do modelo em um dia com ocupação, utilizou-se os registros do padrão de utilização quanto aos equipamentos, à iluminação, às pessoas que utilizavam cada zona térmica e a posição das persianas ao longo do dia.

Para o Gabinete 1, o perfil de utilização registrado foi o apresentado pela Tabela 14.

Tabela 14. Perfis de utilização do Gabinete 1.

Perfis de utilização					
Período (h)	Ocupação	Equipamentos	Iluminação	Persianas	Portas internas
00:00 à 23:00	Sem ocupação	Sem equipamentos	Sem iluminação	Fechadas	Fechadas

Nesta zona térmica (Gráfico 1), a maior diferença de temperatura entre a temperatura medida e a temperatura simulada foi de 1,18 °C, sendo a temperatura simulada maior que a medida. A menor diferença foi de 0°C, quando as linhas do gráfico se encontram. A média da diferença entre as temperaturas foi de 0,35°C ao longo do dia.

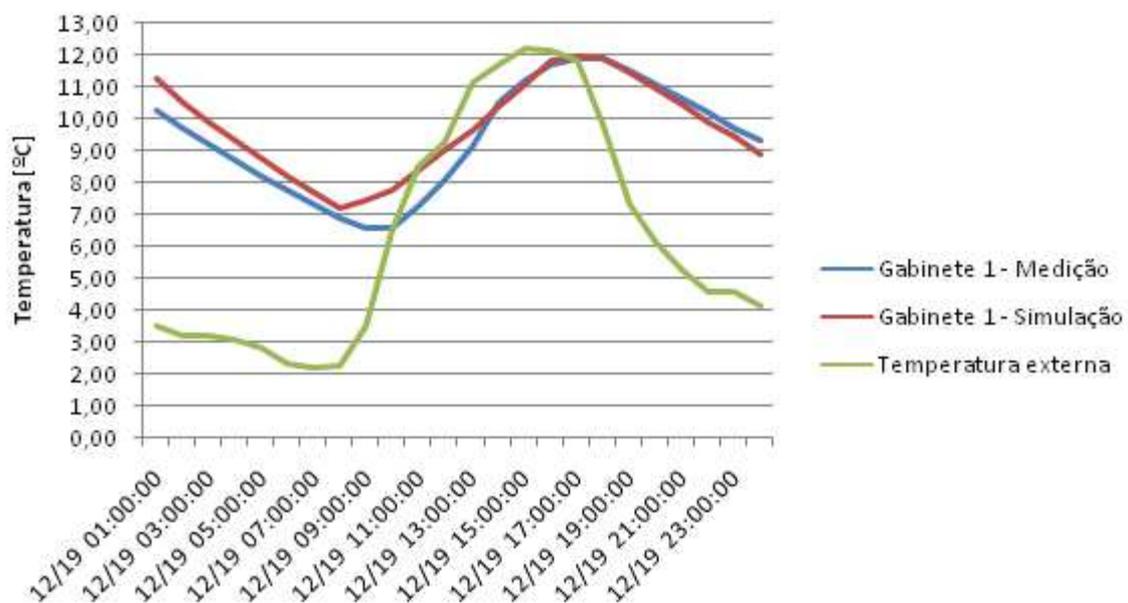


Gráfico 1. Validação do modelo com ocupação - Gabinete 1.

Para o gabinete 2, o perfil de utilização registrado é apresentado pela Tabela 15.

Tabela 15. Perfis de utilização do Gabinete 2.

Perfis de utilização					
Período (h)	Ocupação	Equipamentos	Iluminação	Persianas	Portas internas
00:00 à 01:00	Sem ocupação	Sem equipamentos	Sem iluminação	Fechada	Fechadas

01:00 às 14:00	Sem ocupação	Dois computadores	Sem iluminação	Fechada	Fechadas
14:00 às 16:00	Uma pessoa	Três computadores	Lâmpada ligada	Aberta	Fechadas
16:00 às 00:00	Sem ocupação	Sem equipamentos	Sem iluminação	Sem registro	Fechadas

Para o gabinete 2, a maior diferença de temperatura entre a temperatura medida e a temperatura simulada foi de 1,7°C, ao passo que a menor diferença foi de 0,23°C. A média entre as diferenças de temperatura foi de 1,03°C. É possível observar o comportamento da temperatura ao longo do dia, no gabinete 2, no Gráfico 2.

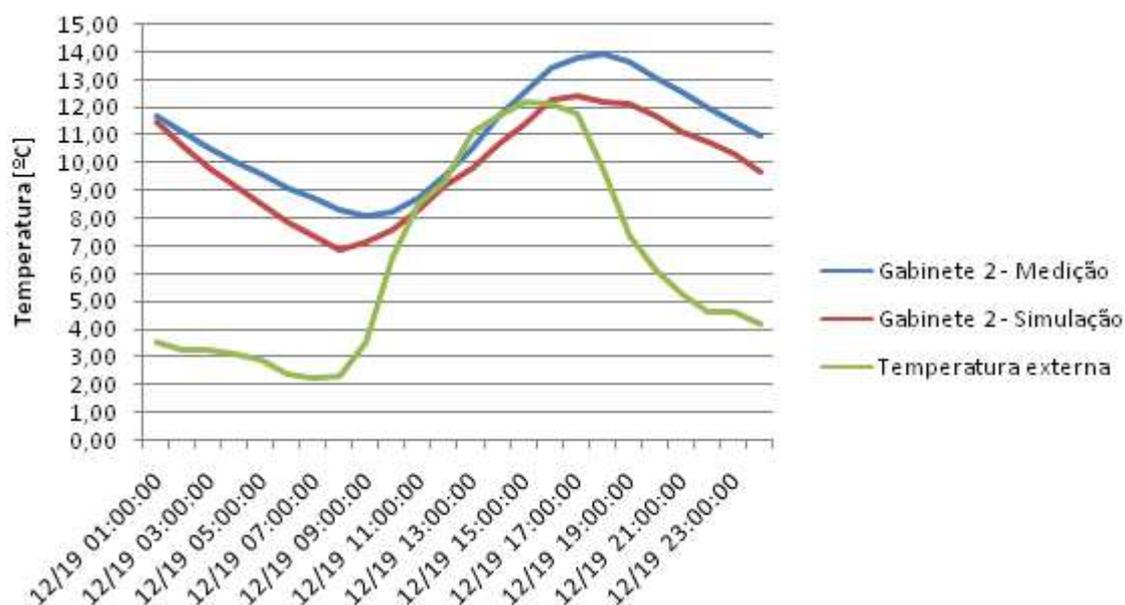


Gráfico 2. Validação do modelo com ocupação - Gabinete 2.

O gabinete 3 é a zona térmica que apresentou maior movimentação de pessoas ao longo do dia. A ocupação registrada foi de duas pessoas, entre às 9h e às 16h, todavia existiram outras pessoas entrando e saindo do gabinete ao longo do dia. O seu perfil de ocupação é apresentado pela Tabela 16.

Tabela 16. Perfis de utilização do Gabinete 3.

Perfis de utilização					
Período (h)	Ocupação	Equipamentos	Iluminação	Persianas	Portas internas

00:00 à 09:00	Sem ocupação	Sem registros	Sem iluminação	Fechadas	Fechadas
09:00 às 16:00	Dois pessoas	Dois computadores	Lâmpada ligada	Abertas	Fechadas
16:00 às 00:00h	Sem ocupação	Sem registros	Sem iluminação	Fechadas	Fechadas

A maior diferença de temperatura entre as temperaturas do modelo e simuladas foi de 2,57°C, e a menor foi de 0,44°C. A média da variação entre as duas temperaturas foi de 1,68°C. A temperatura simulada, por todo o período do dia, é superior à temperatura medida (Gráfico 3), indicando que possivelmente a utilização de equipamentos e de iluminação foi feita de forma diferente à assumida devido à falta de registros.

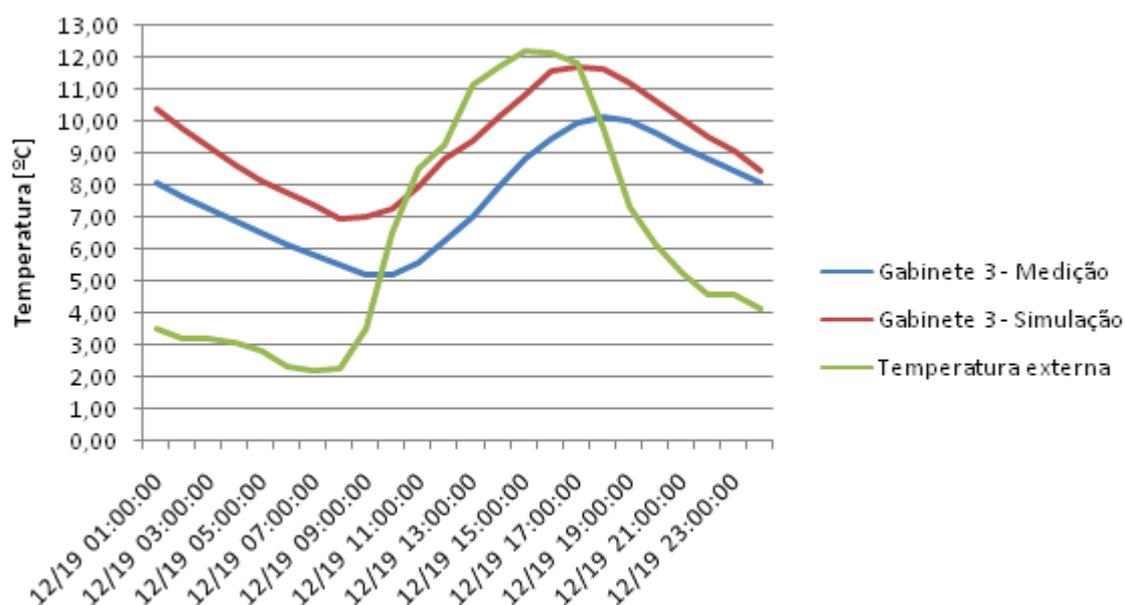


Gráfico 3. Validação do modelo com ocupação - Gabinete 3.

A sala técnica, durante o dia 19/12/2015, não foi ocupada. Também não foram utilizados equipamentos e iluminação neste dia e a persiana permaneceu fechada. A Tabela 17 apresenta seu perfil de utilização.

Tabela 17. Perfis de utilização da sala técnica.

Perfis de utilização					
Período (h)	Ocupação	Equipamentos	Iluminação	Persianas	Portas internas
00:00 à 23:00	Sem ocupação	Sem equipamentos	Sem iluminação	Fechadas	Fechadas

A maior diferença de temperatura entre as temperaturas medidas e simuladas foi de 2,61°C, ao passo que a menor diferença de temperatura foi de 0,02°C. A média entre as diferenças foi de 0,74°C. Os resultados para esta zona térmica são apresentados pelo Gráfico 4.

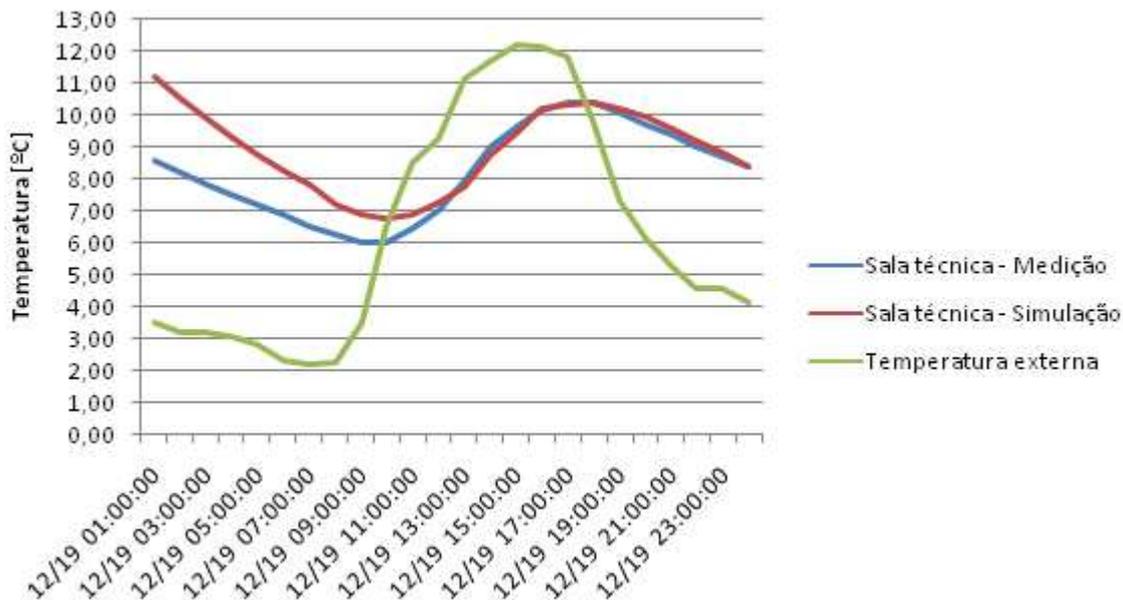


Gráfico 4. Validação do modelo com ocupação - Sala técnica.

Para a sala de reuniões apenas constam registros em relação à utilização da persiana, que permanece completamente aberta entre às 9h e às 16h, e parcialmente fechadas à partir das 16h. Não existem registros que referem-se à ocupação e ao uso de equipamentos, portanto assumiu-se que não houve ocupação permanente e que também não existiram equipamentos ligados ao longo do dia. Todavia, como a sala de reuniões é a zona térmica central de acesso, existiram movimentações ao longo do dia, razão pela qual a temperatura medida é superior à simulada no período de utilização dos gabinetes.

A Tabela 18 apresenta o perfil de utilização registrado.

Tabela 18. Perfis de utilização da sala de reuniões.

Perfis de utilização					
Período (h)	Ocupação	Equipamentos	Iluminação	Persianas	Portas internas
00:00 à 09:00	Sem registros	Sem registros	Sem registros	Fechadas	Fechadas

09:00 às 16:00	Sem registros	Sem registros	Sem registros	Parcialmente abertas	Fechadas
09:00 às 23:00	Sem registros	Sem registros	Sem registros	Fechadas	Fechadas

Para esta zona térmica, a qual possui o comportamento das temperaturas ao longo do dia apresentados pelo Gráfico 5, a maior diferença que ocorre entre as temperaturas medidas e simuladas é de 1,98°C, ao passo que a menor é de 0,01°C. A média entre as diferenças de temperatura para a sala de reuniões é de 0,64°C.

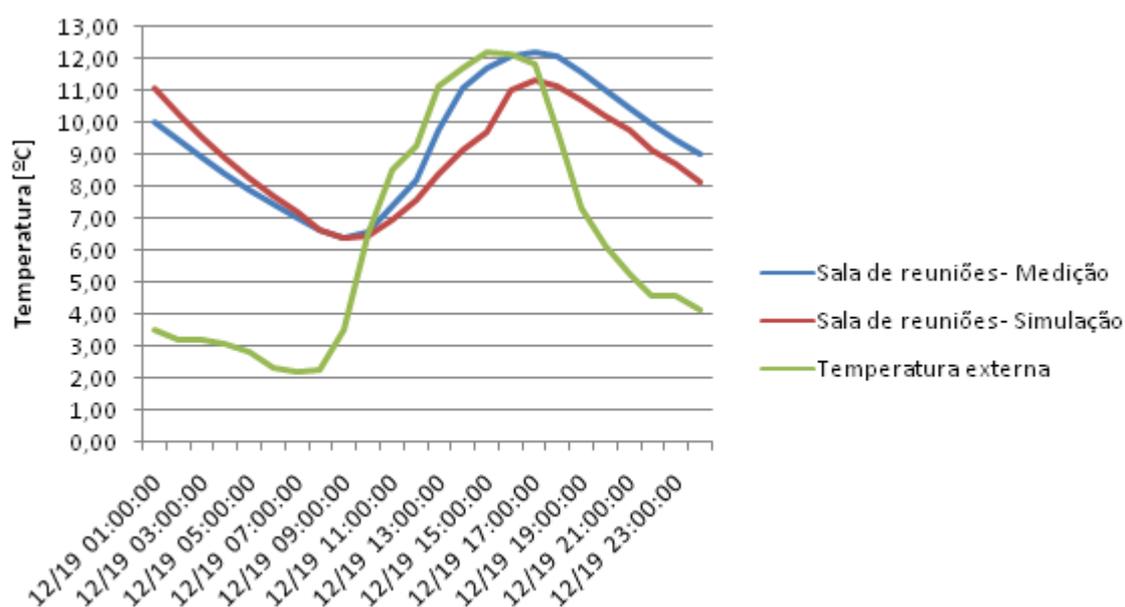


Gráfico 5. Validação do modelo com ocupação - Sala de reuniões.

Para a cozinha, não há registros de utilização, iluminação ou equipamentos em uso, assim como não se sabe se estiveram ou não em modo *stand by*. Assumiu-se que o refrigerador funcionou ao longo do dia. A Tabela 19 apresenta o perfil de utilização da cozinha.

Tabela 19. Perfis de utilização da Cozinha.

Perfis de utilização					
Período (h)	Ocupação	Equipamentos	Iluminação	Persianas	Portas internas
00:00 à 23:00	Sem ocupação	Refrigerador	Sem iluminação	Fechadas	Fechadas

A maior diferença entre as temperaturas medidas e simuladas foi de 2,31°C, e a menor foi de 0,68°C. A média entre estas diferenças de temperatura foi de 1,35°C.

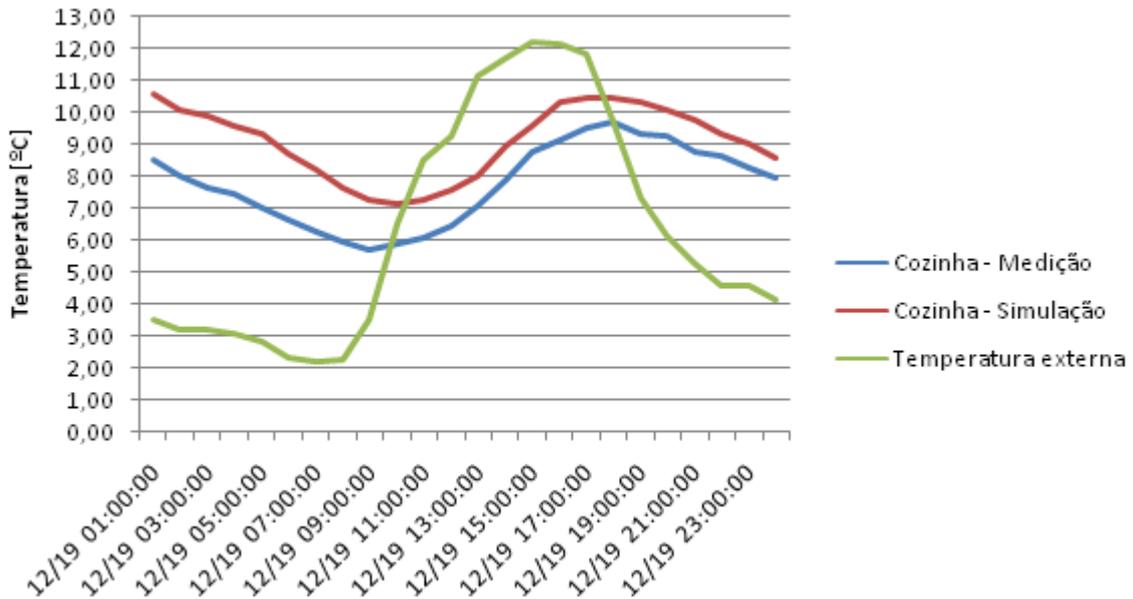


Gráfico 6. Validação do modelo com ocupação - Cozinha.

Para a casa de banho também não há registros em relação à ocupação, iluminação e utilização de equipamentos. Para efeito de simulação, assumiu-se que não houve ocupação ao longo do dia, assim como a iluminação não foi acionada. Contudo, é provável que tenha existido ocupações por um curto período nesta zona térmica e também que a ocupação das zonas ao redor interfiram na temperatura interna. A Tabela 20 apresenta o perfil de utilização.

Tabela 20. Perfis de utilização da Casa de banho.

Perfis de utilização					
Período (h)	Ocupação	Equipamentos	Iluminação	Persianas	Portas internas
00:00 à 23:00	Sem ocupação	Sem equipamentos	Sem iluminação	Não existe	Fechadas

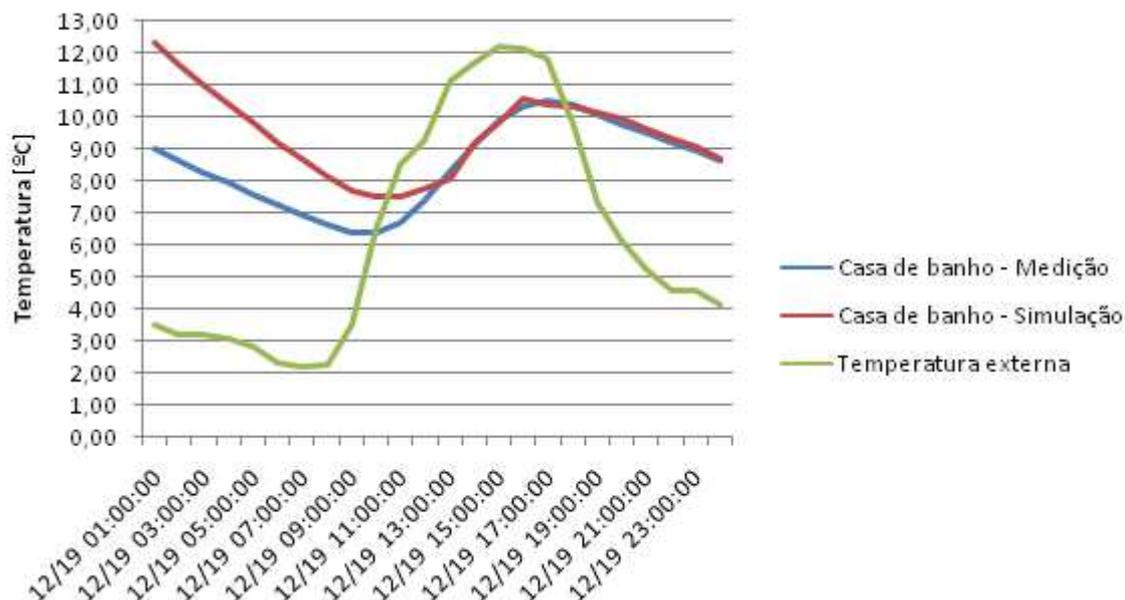


Gráfico 7. Validação do modelo com ocupação - Casa de banho.

Ressalta-se aqui, novamente, que para a validação das simulações foram realizadas alterações no arquivo climático de Évora. Por não existirem dados de radiação global horizontal, radiação difusa horizontal, radiação direta normal e temperatura de bulbo seco relativos à um período anterior ao dia 19/12/2014, utilizou-se os valores já presentes no arquivo do ano climático de referência (TRY) [39]. Os valores do ano climático de referência para o dia 18/12 são relativamente superiores aos medidos para o dia 19/12/2014, o que fez com que o programa computasse esta diferença e gerasse um atraso térmico nos elementos da edificação, o que justifica o defasamento inicial de todos os gráficos de validação para o dia 19/12/2014.

b) Validação do modelo sem ocupação

Os gráficos que se seguem apresentam a variação da temperatura da zona térmica ao longo do dia 23/12. No modelo sem ocupação, considerou-se que não existiu qualquer tipo de atividade no interior da edificação. Também não se utilizou a iluminação e nem equipamentos nos gabinetes. Manteve-se os equipamentos da cozinha com 0,2 de fração de ocupação. No dia 23 de dezembro a edificação apresentou o perfil de utilização apresentado pela Tabela 21.

Tabela 21. Perfis de utilização da edificação para o dia 23/12/2014.

Perfis de utilização					
Período (h)	Ocupação	Equipamentos	Vidros	Persianas	Portas internas
00:00 à 23:00	Sem ocupação	Sem equipamentos	Fechados	Parcialmente abertas	Fechadas

Para o Gabinete 1 (Gráfico 8) a maior diferença de temperatura, de 1,17°C, ocorreu entre 12h e 13h, sendo o valor medido maior que o simulado. A menor diferença é de 0,01 °C, entre 3h e 4h. A média diária das diferenças entre a temperatura medida e simulada ao longo do dia foi de 0,5°C.

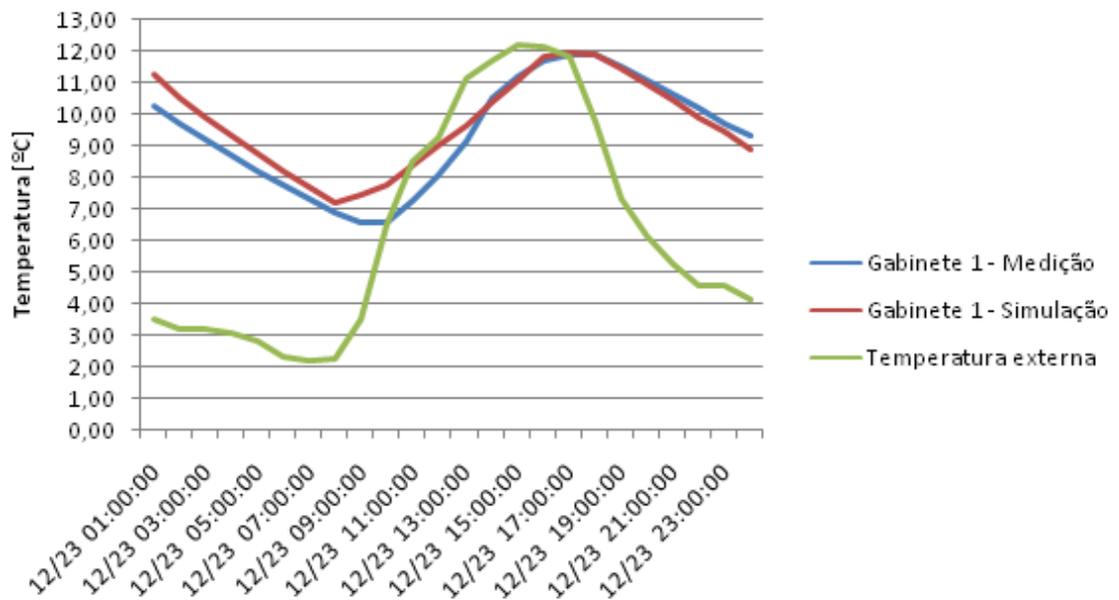


Gráfico 8. Validação do modelo sem ocupação - Gabinete 1.

Para o Gabinete 2 (Gráfico 9), ocorrem dois períodos do dia em que há uma maior diferença entre as temperaturas medidas e simuladas. A maior diferença, de 2,36°C, ocorre no intervalo entre às 23h e as 0h. A segunda diferença notável, entre as 8h e 9h, é de 2,19°C. A menor diferença é de 0,53°C, entre 0h e 1h, ao passo que a média diária é de 1,52°C. Nota-se que por todo o período a temperatura simulada permanece abaixo da temperatura medida.

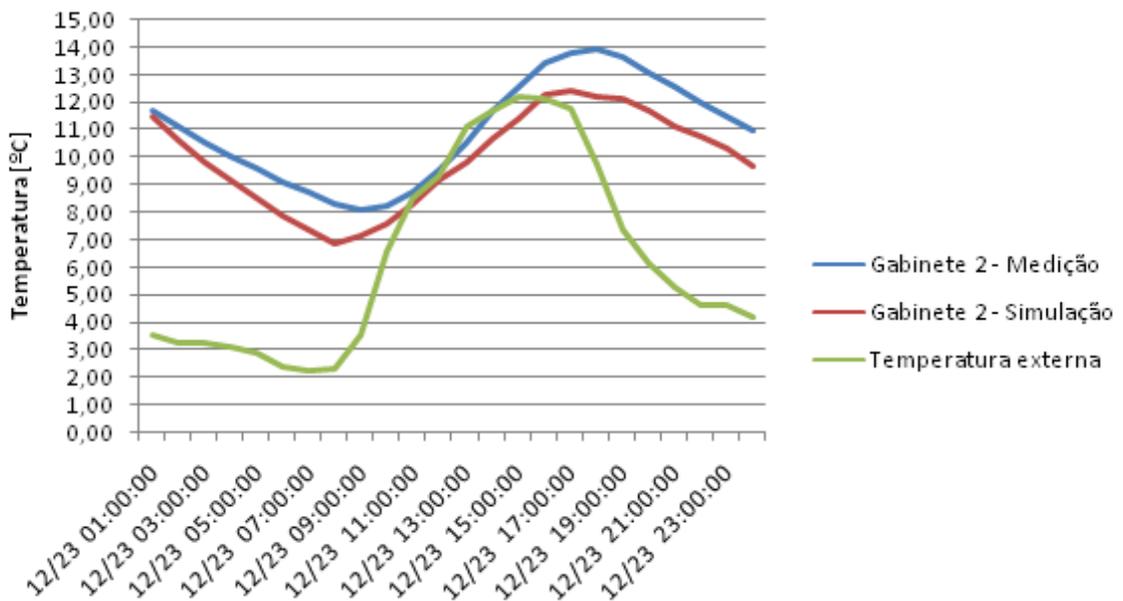


Gráfico 9. Validação do modelo sem ocupação- Gabinete 2.

O Gabinete 3 (Gráfico 10) é a zona térmica que apresenta maior diferença entre os valores de temperatura medida e simulada, sendo que a temperatura simulada permanece superior à medida durante todo o dia. A maior diferença é de 2,76°C, entre 0h e 1h, e a menor é de 0,5°C no intervalo compreendido entre as 23h e à 0h. A média entre as diferenças diárias é de 1,45°C.

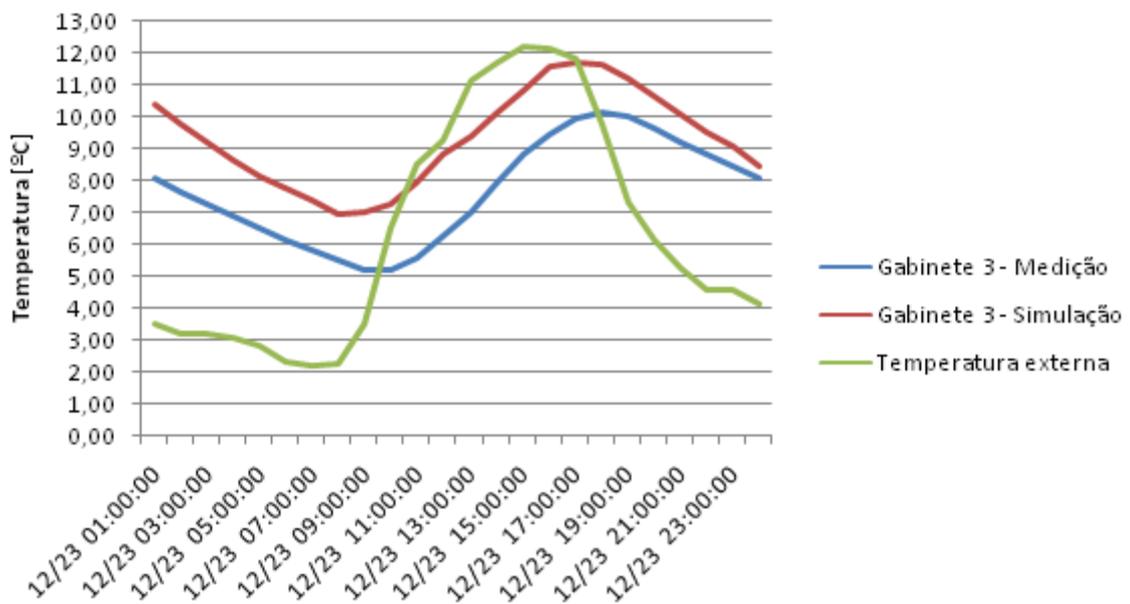


Gráfico 10. Validação do modelo sem ocupação - Gabinete 3.

Para a sala técnica (Gráfico 11), o valor da temperatura simulada apresenta uma diferença máxima de 1,9°C em relação à temperatura medida. A mínima é de 0,09°C e a média é de 0,66°C.

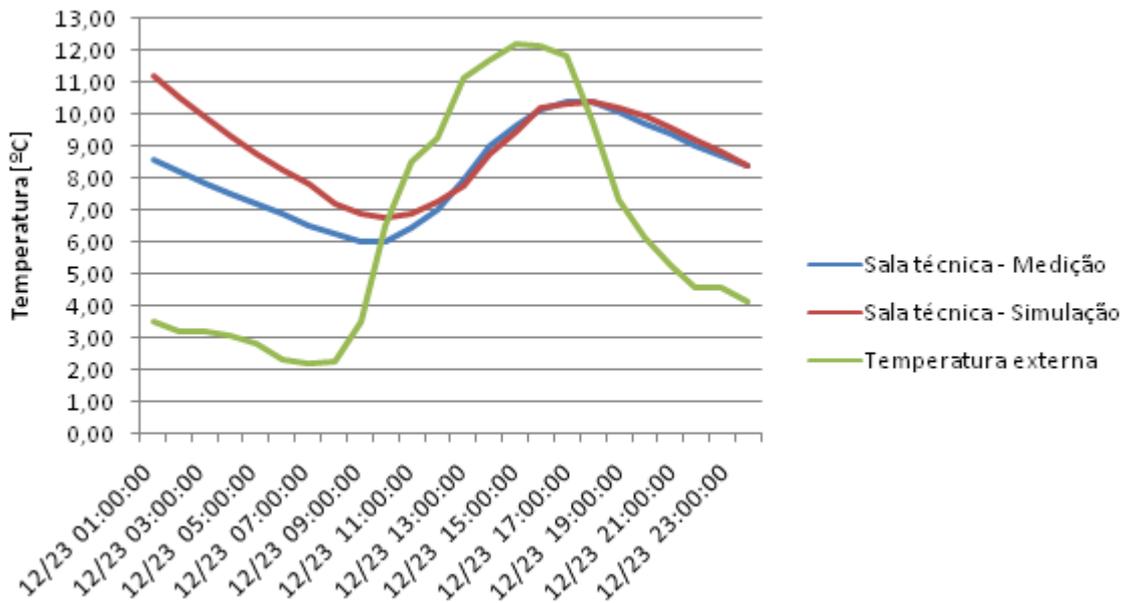


Gráfico 11. Validação do modelo sem ocupação - Sala técnica.

Na sala de reuniões (Gráfico 12) a diferença máxima é de 0,91°C, sendo a temperatura simulada maior que a medida. Este valor ocorre às 16h e às 17h. A variação mínima é de 0,03°C, e a média diária das diferenças entre a temperatura simulada e medida é 0,43°C.

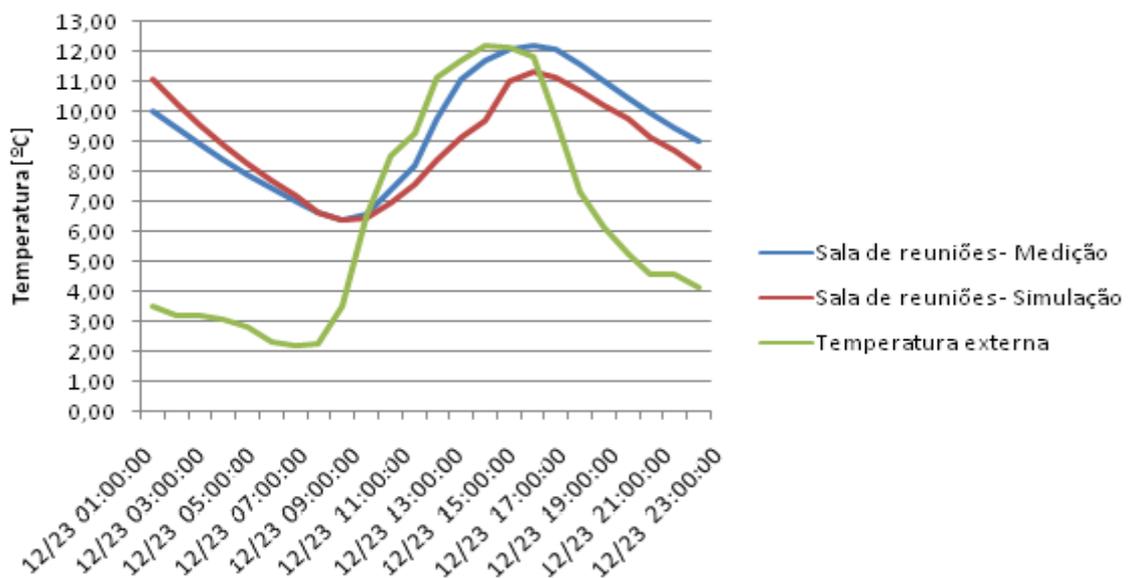


Gráfico 12. Validação do modelo sem ocupação - Sala de reuniões.

Na cozinha (Gráfico 13), os valores de temperatura simulados permanecem acima dos valores medidos durante todos os períodos do dia, apresentando uma diferença máxima de 2,45°C entre a 0h e à 1h. A menor diferença, de 0,67°C, ocorre entre às 9h e às 10h. A média diária das diferenças horárias para esta zona térmica é de 1,35°C.

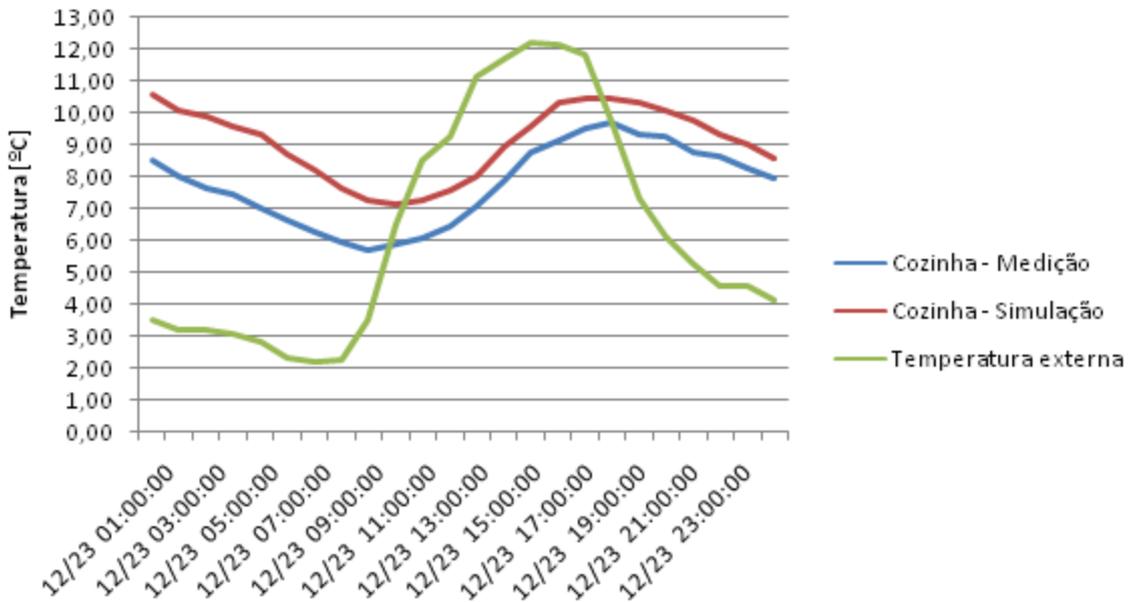


Gráfico 13. Validação do modelo sem ocupação - Cozinha.

A casa de banho (Gráfico 14), última zona térmica analisada, apresenta uma diferença máxima de 2,26°C, sendo a temperatura simulada maior que a temperatura medida, entre à 0h e à 1h. A menor diferença é de 0°C, entre às 14h e às 15h. A média diária das diferenças horárias é de 0,76°C.

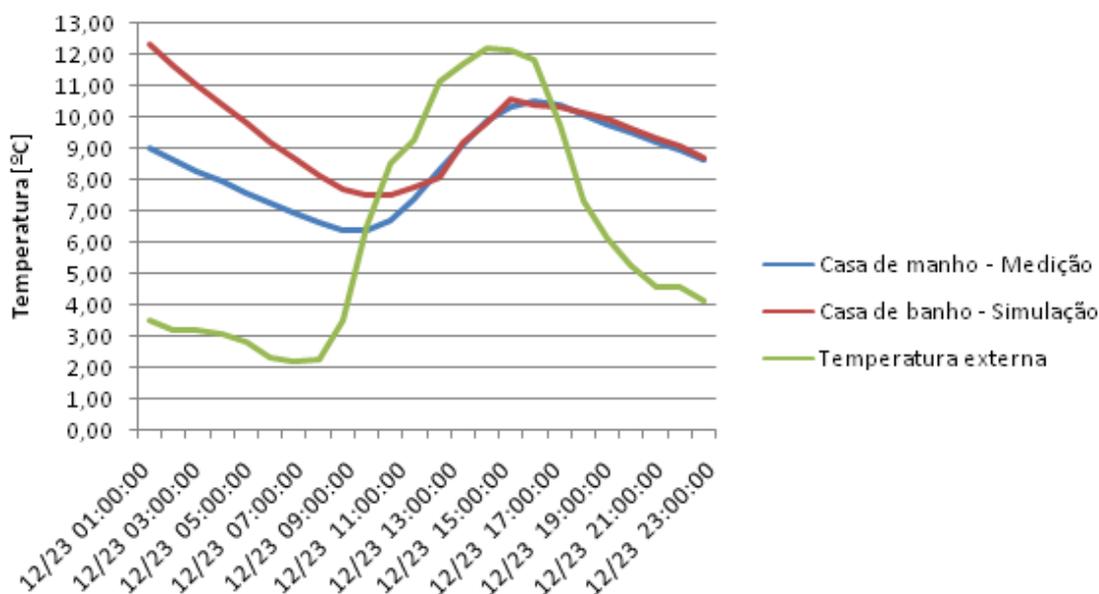


Gráfico 14. Validação do modelo sem ocupação - Casa de banho.

Sendo assim, é possível notar que a zona térmica que apresenta maior diferença de temperaturas medidas e simuladas é o Gabinete 3, com 2,76°C, sendo superior a temperatura simulada. Todavia, sua média diária de diferenças horárias de temperatura ainda é inferior a média do Gabinete 2. Em contrapartida, a zona térmica em que melhor o modelo computacional se ajusta às temperaturas medidas no local é a sala de reuniões, apresentado uma diferença máxima de 0,91°C. A média diária das diferenças horárias entre as temperaturas medidas e simuladas para a edificação como um todo é de 0,95°C.

Considerou-se, então, o modelo validado, apesar de algumas dificuldades relacionadas à falta de registros de ocupação e também à falta de meios de registro de variáveis importantes relacionadas com infiltrações e trocas de ar entre zonas. A causa da imprecisão dos resultados é um fator complexo de ser determinado claramente, contudo pode dar-se principalmente por diferenças de pressão [41], pois cada abertura implica em diferentes ângulos de vento, sendo difícil uma previsão precisa, fazendo com que a taxa de renovação de ar não apresente comportamento tão constante ao longo do dia. Outro fator que pode ter influenciado nos resultados é o sombreamento ao longo do período, causado pela posição das persianas. Soma-se a isto, ainda, o fato de que o programa gera um resultado médio de temperatura para todo o ambiente da zona térmica, ao passo que os termômetros utilizados para o registro de dados tornam-se fontes "pontuais" de dados, estando as informações restritas àquele ponto onde se encontra o aparelho. Apesar das dificuldades encontradas, as

diferenças registradas não são muito significativas e os resultados se apresentam em fase com os medidos, o que indica a adequabilidade do modelo.

3.3.2. Modelo referência

O modelo referência é o modelo que efetivamente representa a edificação, utilizado para efeito de comparação com outros modelos nos quais as estratégias solares passivas estão inseridas. Para simular este modelo, utilizou-se o arquivo climático que contém os valores do TRY (*Test Reference Year* - Ano climático de referência) [39] para a cidade de Évora, sem alterações (como foi o caso do arquivo climático utilizado para a validação do modelo). Definiu-se que as persianas estariam abertas todo o tempo, com o intuito de avaliar o impacto do sombreamento no desempenho térmico dos ambientes internos da edificação em um modelo futuro. Contudo, manteve-se o toldo instalado na fachada principal. Em nenhum dos modelos há alteração da volumetria e dos elementos da envolvente da edificação.

No modelo referência utilizou-se um padrão de utilização com ocupação, pois os ganhos internos através de iluminação, ocupação e equipamentos de vários tipos são frequentemente elementos significantes no balanço térmico das zonas [41]. Os ganhos térmicos totais são resultados de ganho convectivo, radiante e latente em várias proporções. Os ganhos convectivos são adições instantâneas de calor para a zona térmica, já os ganhos radiantes são distribuídos nas superfícies das zonas, onde são primeiro absorvidos e depois libertados. Os ganhos latentes, por sua vez, precisam ser manuseados por meio de ventilação e condicionamento de ar [41].

O padrão de utilização adotado para a ocupação, iluminação e utilização dos equipamentos é descrito por fração da utilização de pico para cada intervalo de tempo. Os valores de pico para iluminação e equipamentos foram apresentados anteriormente na Tabela 11 e Tabela 12. Os ganhos térmicos provenientes da iluminação são divididos pelo programa entre a porção visível e a porção térmica [42]. Por exemplo, na eletricidade destinada a iluminação incandescente típica 10% é convertido em radiação visível, 80% em radiação térmica e 10% em ganhos convectivos. Em contraste, na iluminação fluorescente típica, a eletricidade é convertida em 20% de radiação visível, 20% em radiação térmica e em 60% de ganhos convectivos [42]. Os ganhos térmicos provenientes da ocupação da zona térmica são devidos ao calor gerado pelo corpo humano pela taxa metabólica. Este calor é dissipado pela

superfície do corpo e pelo trato respiratório por uma combinação de radiação, convecção e evaporação.

Para as zonas térmicas pouco utilizadas, nomeadamente a sala técnica, a cozinha e a casa de banho, o padrão de utilização da iluminação é definido pelas Tabelas 22 (final de semana) e 16 (dias de semana). Aos finais de semana não há ocupação da edificação, razão pela qual não há utilização da iluminação. Já durante os dias de semana, a utilização da iluminação varia de acordo com a necessidade ao longo do dia e com a ocupação.

Tabela 22. Padrão de utilização da iluminação

Padrão de utilização da Iluminação				
Hora (h)	Final de semana		Segunda à sexta-feira	
	Zonas pouco utilizadas	Zonas muito utilizadas	Zonas pouco utilizadas	Zonas muito utilizadas
00:01 às 06:00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:01 às 07:00	0,00	0,00	0,00	0,00
07:01 às 08:00	0,00	0,00	0,10	0,30
08:01 às 09:00	0,00	0,00	0,30	0,75
09:01 às 10:00	0,00	0,00	0,40	0,85
10:01 às 12:00	0,00	0,00	0,50	1,00
12:01 às 13:00	0,00	0,00	0,20	0,50
13:01 às 14:00	0,00	0,00	0,40	0,85
14:01 às 15:00	0,00	0,00	0,45	0,95
15:01 às 16:00	0,00	0,00	0,50	1,00
16:01 às 17:00	0,00	0,00	0,40	0,95
17:01 às 18:00	0,00	0,00	0,30	0,75
18:01 às 19:00	0,00	0,00	0,20	0,30
19:01 às 20:00	0,00	0,00	0,00	0,00
20:01 às 00:00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quanto aos equipamentos, dividiu-se em dois padrões de utilização: um padrão de utilização para os equipamentos da cozinha e outro padrão de utilização para os equipamentos dos gabinetes (Tabela 23).

Tabela 23. Padrão de utilização dos equipamentos

Padrão de utilização dos equipamentos				
Hora (h)	Final de semana		Segunda à sexta-feira	
	Cozinha	Gabinetes	Cozinha	Gabinetes
00:01 às 06:00	0,20	0,00	0,20	0,00
06:01 às 07:00	0,20	0,00	0,20	0,00
07:01 às 08:00	0,20	0,00	0,20	0,70
08:01 às 09:00	0,20	0,00	0,20	0,85
09:01 às 10:00	0,20	0,00	0,20	0,95
10:01 às 12:00	0,20	0,00	0,20	1,00
12:01 às 13:00	0,20	0,00	1,00	0,40
13:01 às 14:00	0,20	0,00	0,20	0,70
14:01 às 15:00	0,20	0,00	0,20	0,95
15:01 às 16:00	0,20	0,00	0,20	1,00
16:01 às 17:00	0,20	0,00	0,20	0,90
17:01 às 18:00	0,20	0,00	0,20	0,70
18:01 às 19:00	0,20	0,00	0,20	0,40
19:01 às 20:00	0,20	0,00	0,20	0,00
20:01 às 00:00	0,20	0,00	0,20	0,00

A ocupação foi definida somente para as zonas ocupadas, e sua fração de utilização é definida pelas Tabela 24. O valor de pico considerado é de duas pessoas.

Tabela 24. Padrão de ocupação.

Padrão de ocupação		
Hora (h)	Final de semana	Segunda-feira à sexta-feira
00:01 às 06:00	0,00	0,00
06:01 às 07:00	0,00	0,00
07:01 às 08:00	0,00	0,10
08:01 às 09:00	0,00	0,50
09:01 às 10:00	0,00	0,90
10:01 às 12:00	0,00	1,00
12:01 às 13:00	0,00	0,50
13:01 às 14:00	0,00	0,70
14:01 às 15:00	0,00	0,70
15:01 às 16:00	0,00	1,00
16:01 às 17:00	0,00	0,80
17:01 às 18:00	0,00	0,50
18:01 às 19:00	0,00	0,10
19:01 às 20:00	0,00	0,00
20:01 às 00:00	0,00	0,00

Para ilustrar a flutuação da temperatura ao longo do dia, é apresentado para cada zona térmica um gráfico referente à três dias da estação de aquecimento e três dias da estação de arrefecimento. Em todos os gráficos que se seguem referentes às temperaturas dos modelos, a zona de conforto térmico é demarcada por um quadro verde.

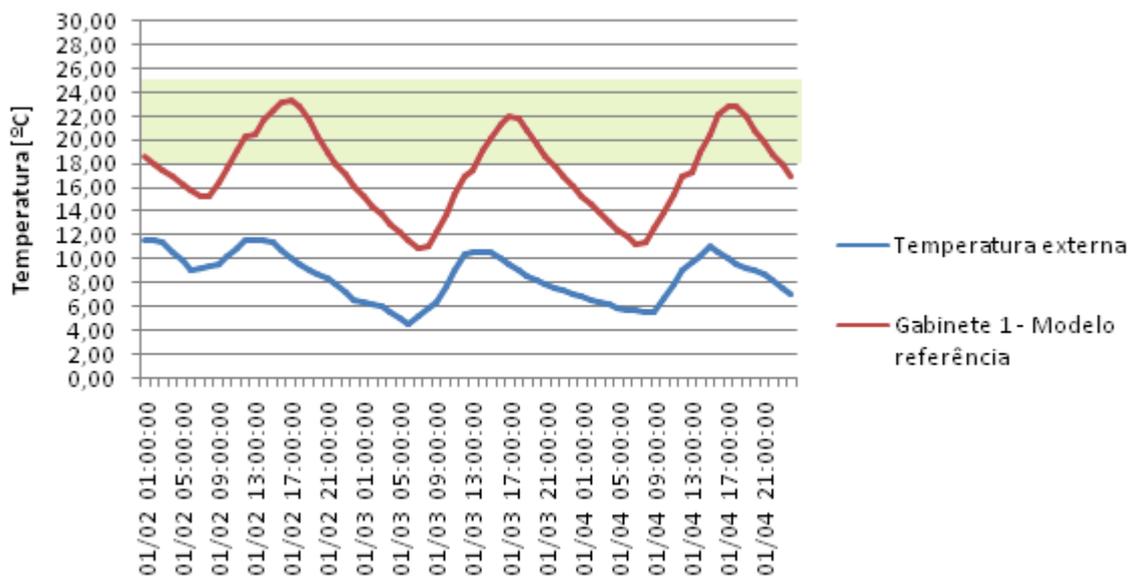


Gráfico 15. Temperaturas no Gabinete 1 para o modelo referência, dias de inverno.

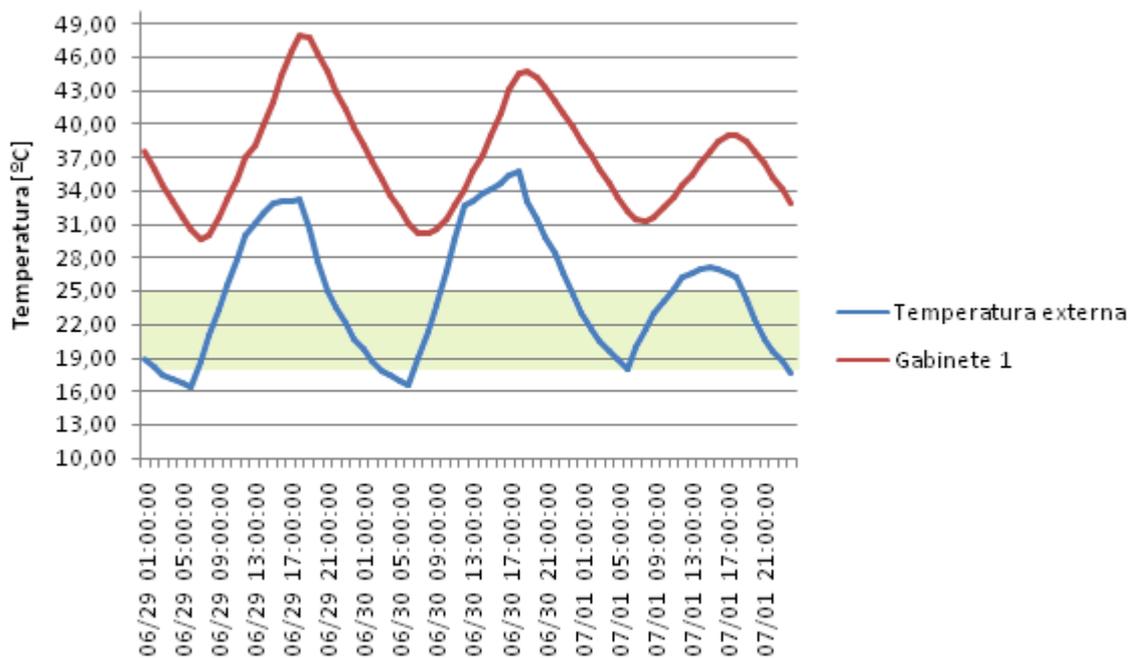


Gráfico 16. Temperaturas no Gabinete 1 para o modelo referência, dias de verão.

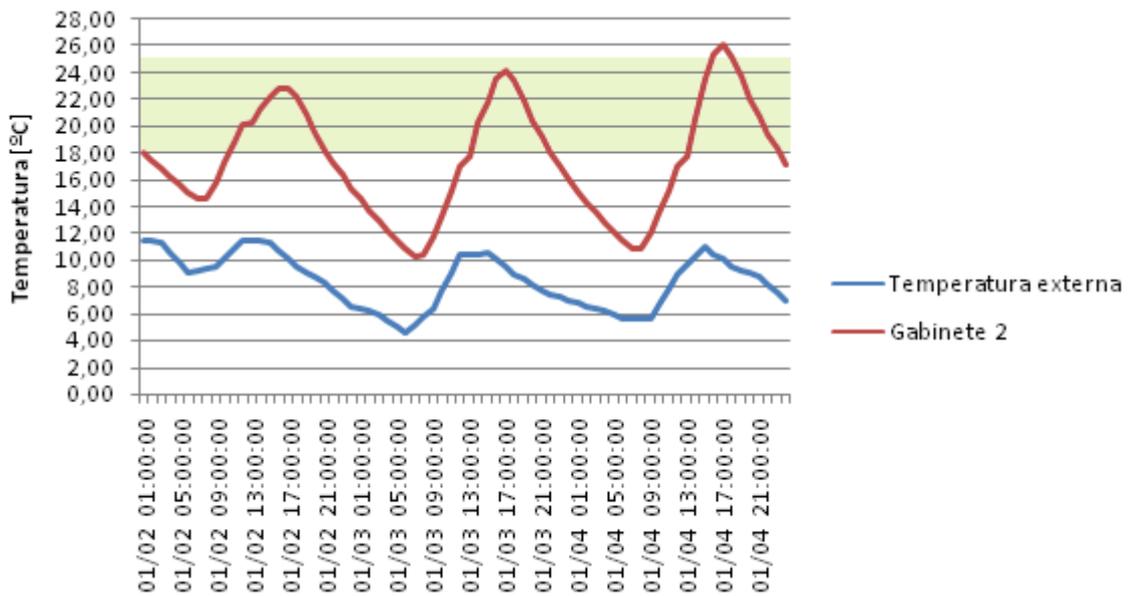


Gráfico 17. Temperaturas no Gabinete 2 para o modelo referência, dias de inverno.

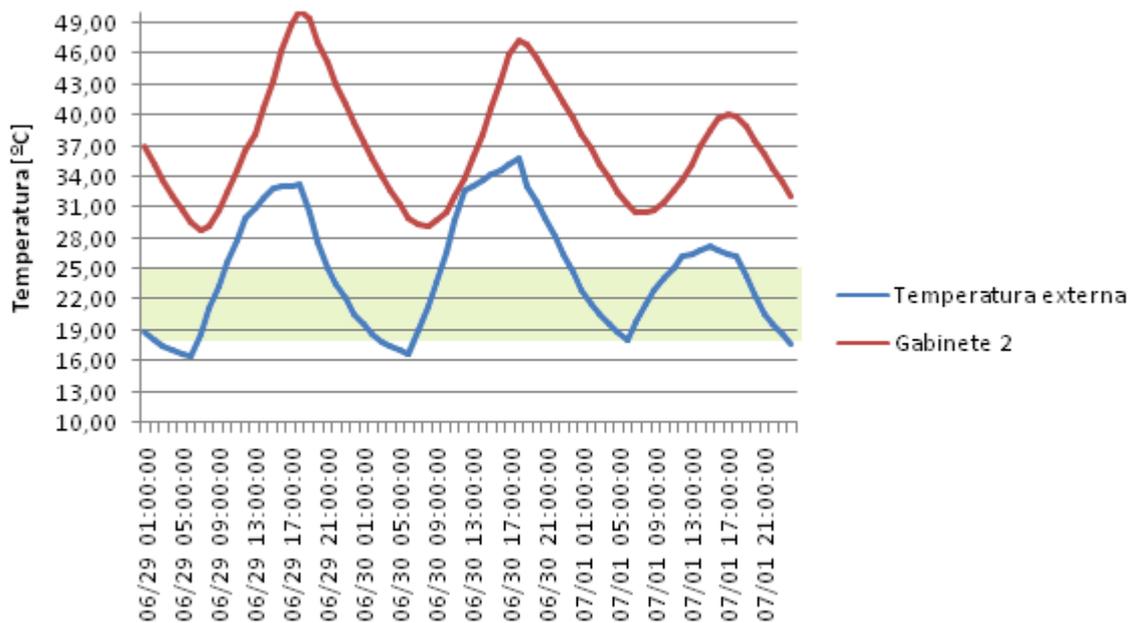


Gráfico 18. Temperaturas no Gabinete 2 para o modelo referência, dias de verão.

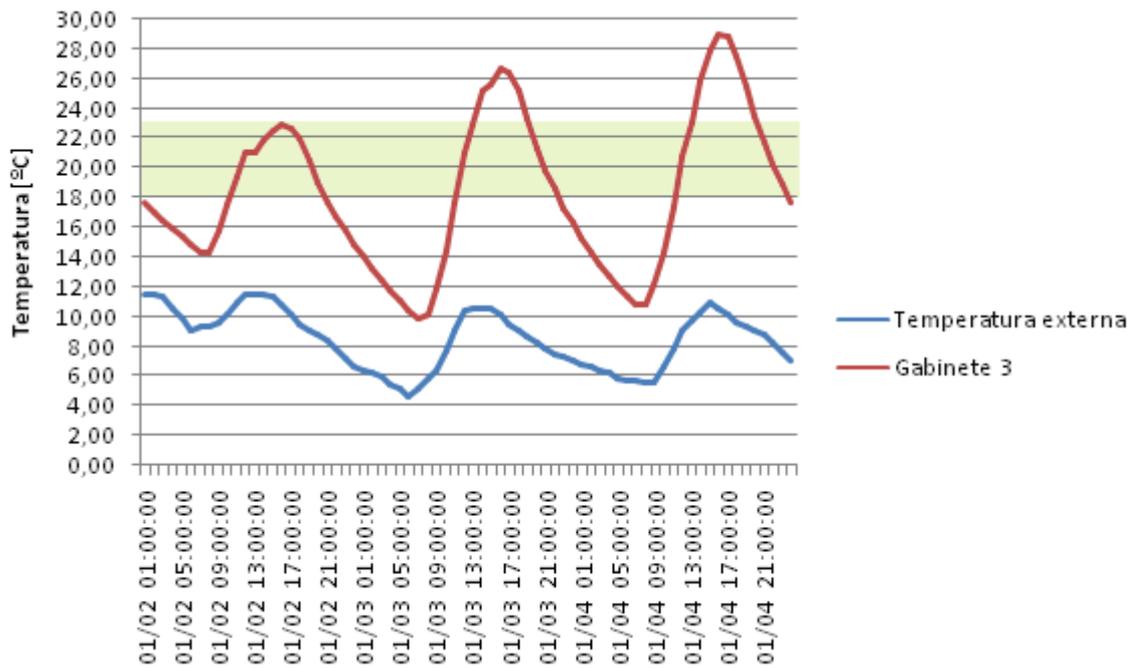


Gráfico 19. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo referência, dias de inverno.

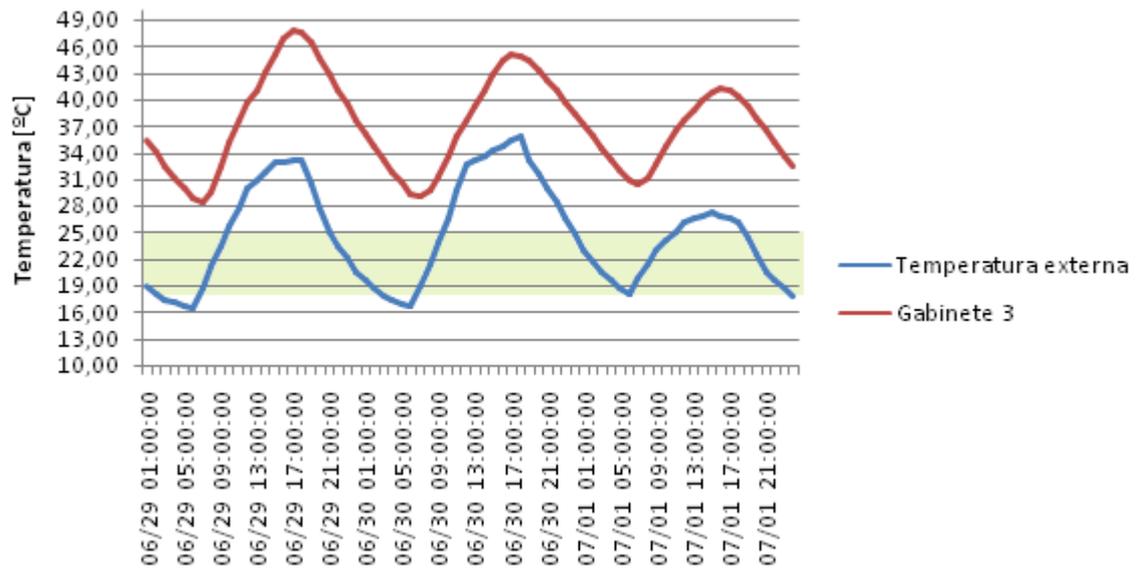


Gráfico 20. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo referência, dias de verão.

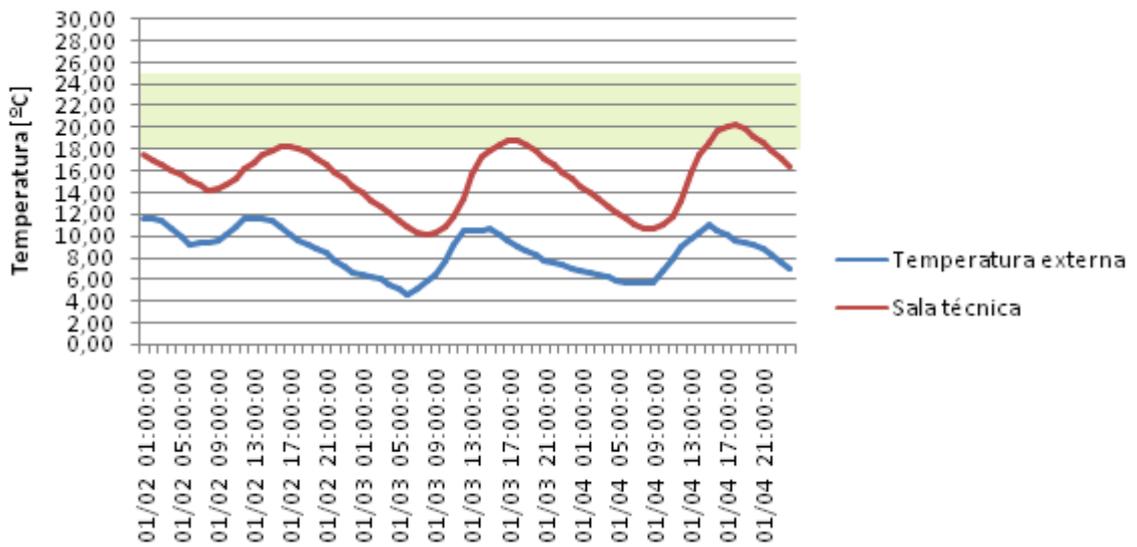


Gráfico 21. Temperaturas na Sala técnica para o modelo referência, dias de inverno.

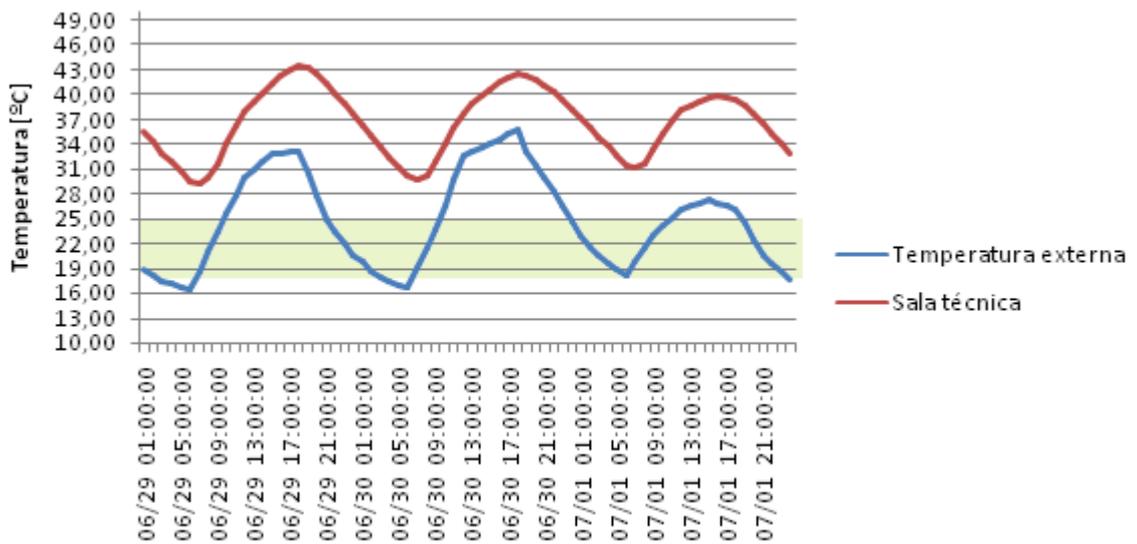


Gráfico 22. Temperaturas na Sala técnica para o modelo referência, dias de verão.

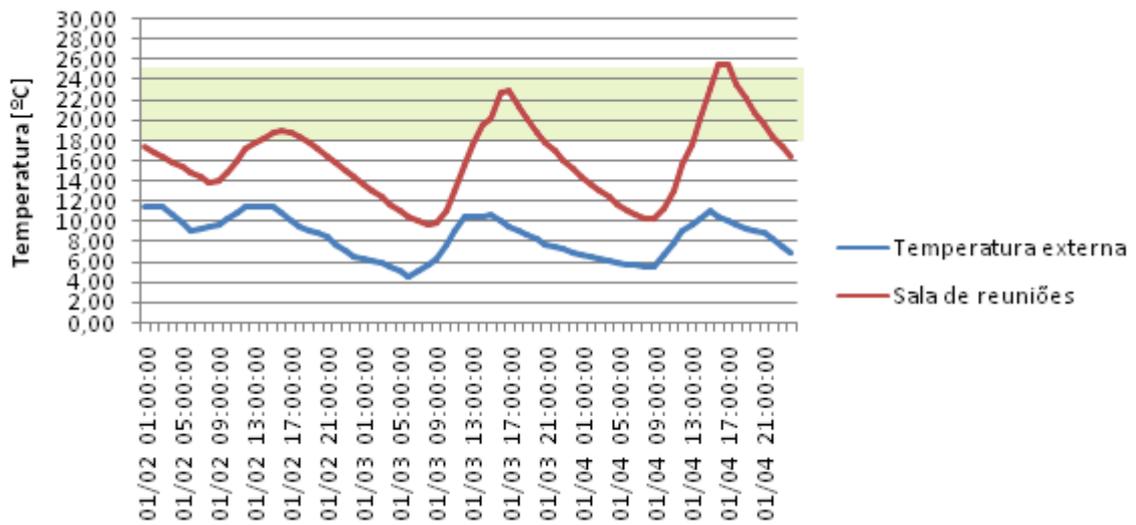


Gráfico 23. Temperaturas na Sala de reuniões para o modelo referência, dias de inverno.

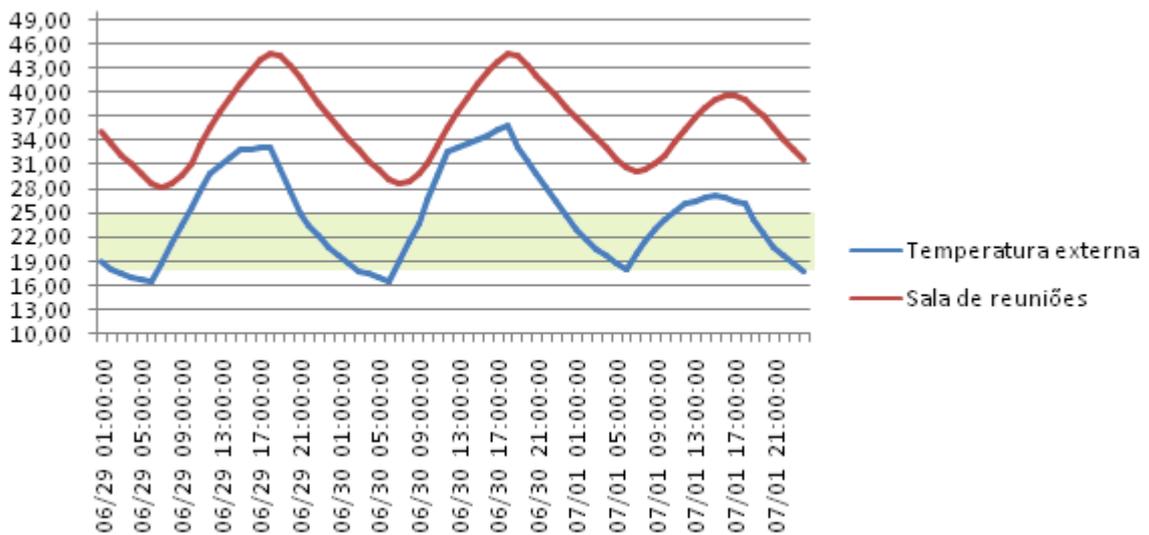


Gráfico 24. Temperaturas na Sala de reuniões para o modelo referência, dias de verão.

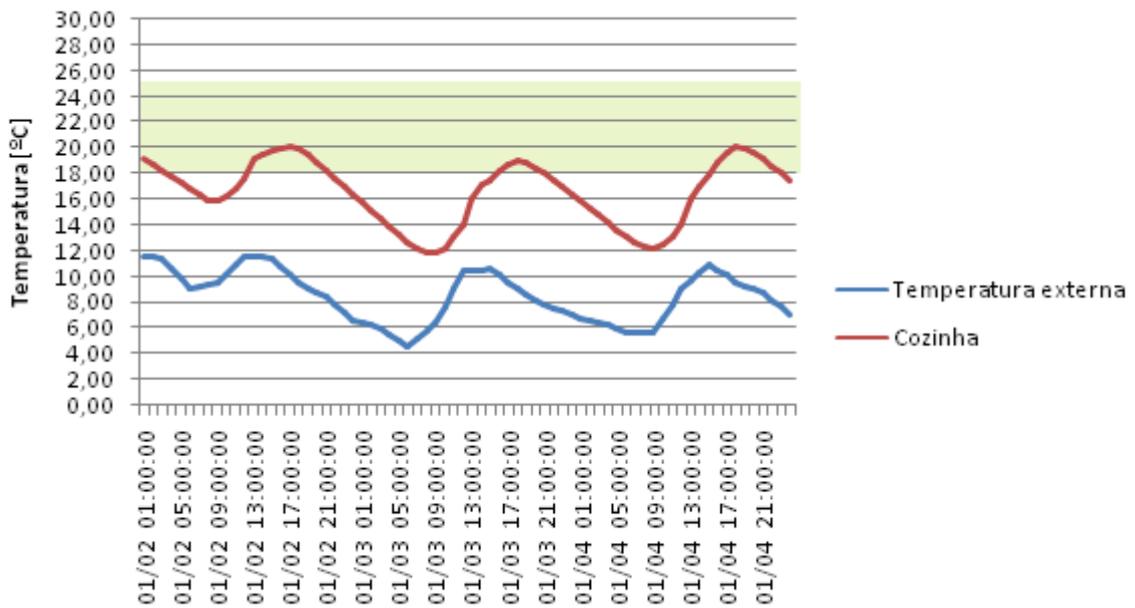


Gráfico 25. Temperaturas na Cozinha para o modelo referência, dias de inverno.

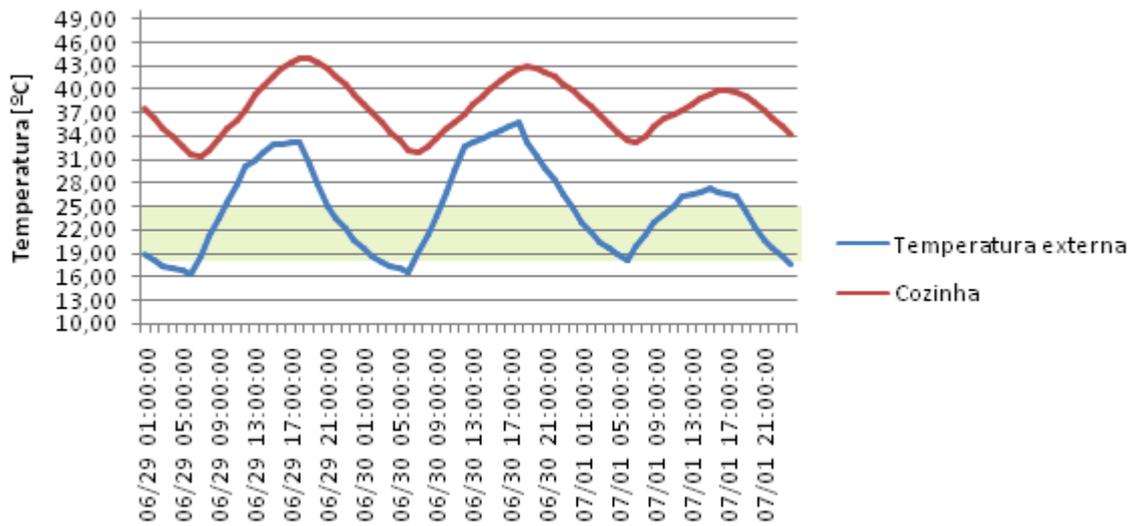


Gráfico 26. Temperaturas na Cozinha para o modelo referência, dias de verão.

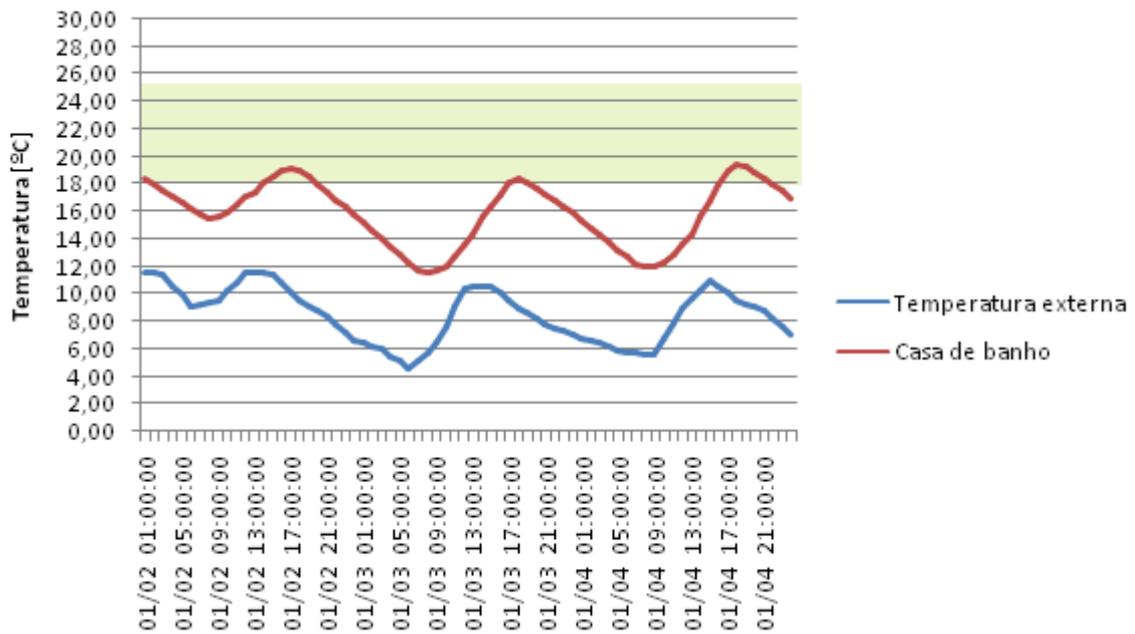


Gráfico 27. Temperaturas na Casa de banho para o modelo referência, dias de inverno.

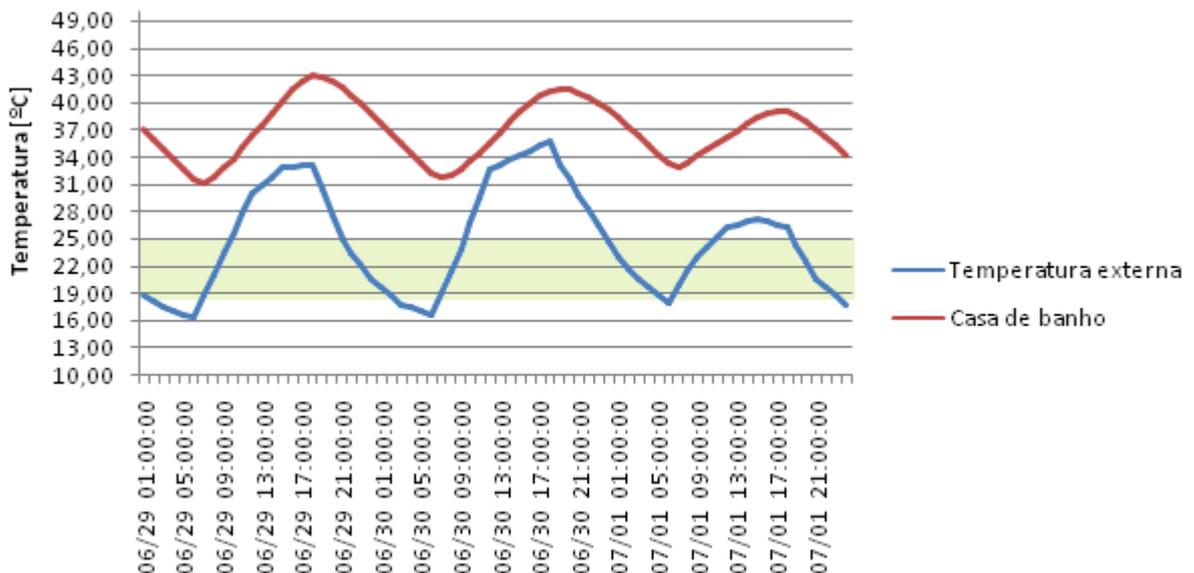


Gráfico 28. Temperaturas na Casa de banho para o modelo referência, dias de verão.

Para o modelo referência (Tabela 25), as necessidades para aquecimento encontradas são de 3408,76 kWh/ano, correspondendo à 35,14 kWh/m².ano. Já as necessidades de arrefecimento são de 6924,11 kWh/ano, sendo 71,38 kWh/m².ano. Somando-se as necessidades de aquecimento e arrefecimento, o total para o modelo referência é de 10332,87kWh/ano.

Tabela 25. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo referência.

Modelo referência		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	222,537	1106,406
Gabinete 2	777,009	1306,405
Gabinete 3	752,537	1383,494
Cozinha	124,806	580,715
Casa de banho	79,842	245,622
Sala técnica	266,096	659,830
Sala de reuniões	1185,933	1641,640
Total	3408,760	6924,112
TOTAL	10332,872	

3.3.3. Modelo sombreado por palas

Para a realização da modelação computacional da estratégia de sombreamento por palas, dimensionou-se previamente as palas de proteção solar com o auxílio das cartas solares e transferidores referentes à localidade de Évora, Portugal. As cartas solares e transferidores foram geradas pelo software Analysis Sol-Ar [43]. O programa foi criado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, e permite obter a carta solar da latitude especificada, assim como auxilia no projeto de proteções solares através da visualização gráfica dos ângulos de projeção desejados sobre transferidor de ângulos, que pode ser plotado para qualquer ângulo de orientação.

De acordo com as características do modelo referência, a edificação está localizada na latitude 38°32'26", e possui a fachada principal orientada a sudoeste. Sendo assim, as palas de proteção solar foram dimensionadas para a orientação do modelo referência e estes elementos foram inseridos no arquivo da modelagem computacional para se obter resultados referentes à temperatura das zonas térmicas. Posteriormente, mantendo-se as mesmas palas previamente dimensionadas, verificou-se as temperaturas encontradas para cada zona térmica para diferentes orientações da edificação. As aberturas são descritas na Figura 18.

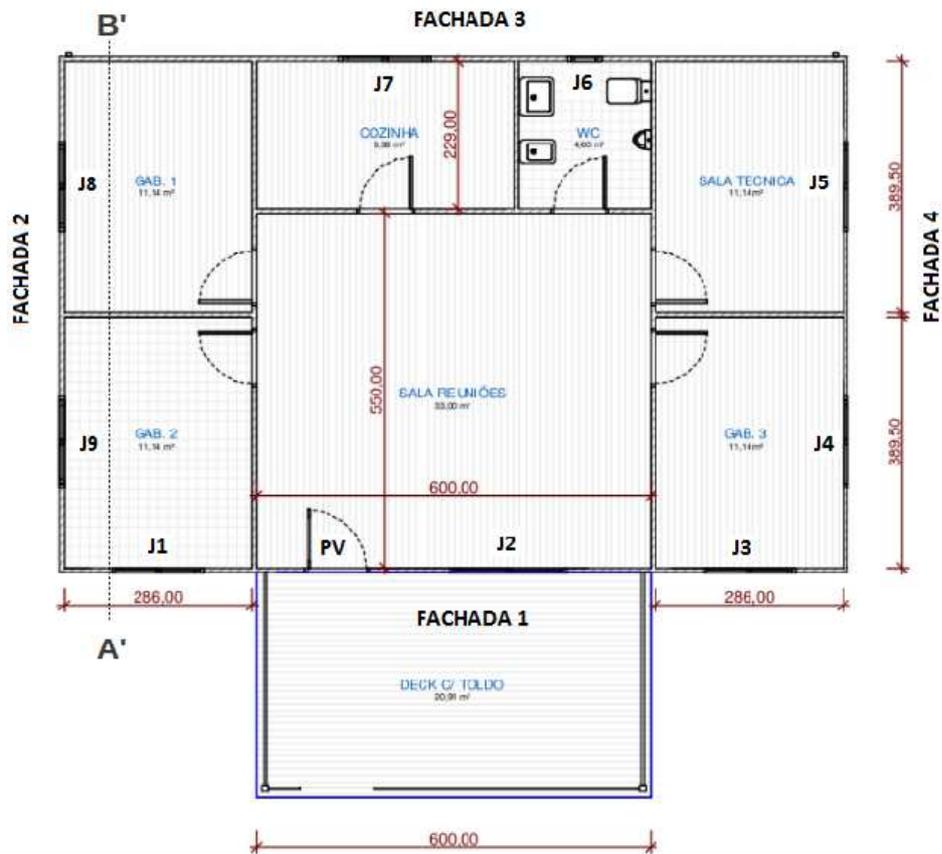


Figura 19. Caracterização das fachadas e aberturas.

O deck coberto pelo toldo apresenta dimensões de 6m x 4m. As dimensões das palas de proteção solar são apresentadas abaixo:

Tabela 26. Configuração das palas por janela.

Fachada	Abertura	Dimensões das palas [m]
1	J1	1,93 x 0,53
	PV	Toldo
	J2	Toldo
	J3	1,93 x 0,53
2	J9	2,6 x 0,64
	J8	2,6 x 0,64
3	J7	3,05 x 0,92
	J6	Sem pala
4	J4	2,6 x 0,92
	J5	2,6 x 0,92

A projeção em 3D das palas de proteção solar é apresentada na Figura 20.

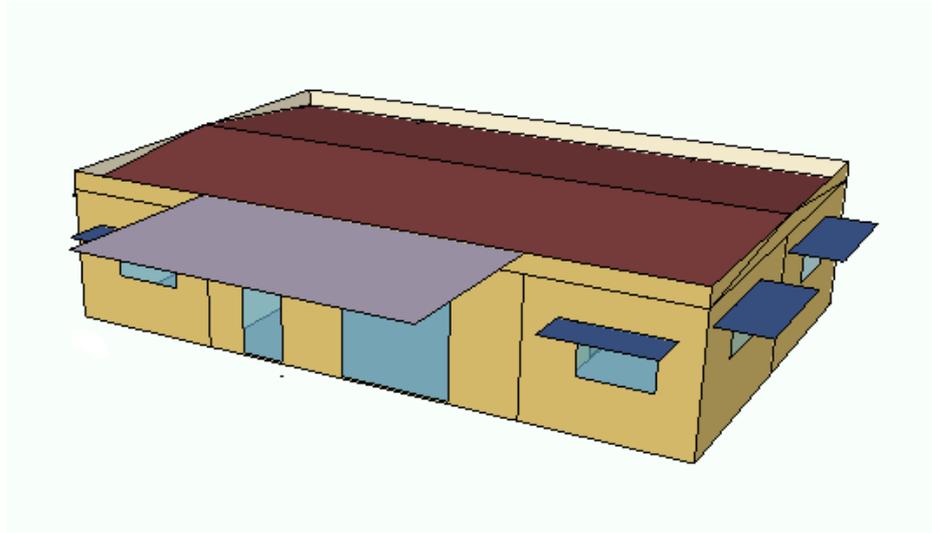


Figura 20. Projeção em 3D das palas de proteção solar.

Para ilustrar o efeito do sombreamento, são apresentados os gráficos referentes ao comportamento da temperatura no gabinete 3 para três dias da estação de aquecimento e três dias da estação de arrefecimento. O modelo referência está orientado à sudoeste (Gráficos 29 e 30). Para avaliar o comportamento das zonas térmicas sombreadas por palas em diferentes orientações, modelou-se também a edificação com a fachada principal orientada à sul e a sudeste (Gráfico 31).

Para os dias apresentados, a diminuição média de temperatura ocasionada pelo sombreamento por palas no inverno (Gráfico 29) foi de $1,0^{\circ}\text{C}$, ao passo que a máxima foi de $3,9^{\circ}\text{C}$ e a mínima de 0°C . Durante os dias de verão (Gráfico 30), a diminuição média de temperatura foi de $2,29^{\circ}\text{C}$, a máxima de $4,31^{\circ}\text{C}$ e a mínima de $0,79^{\circ}\text{C}$.

Analisando os resultados obtidos para as diferentes orientações da fachada principal da edificação (Gráfico 31), é possível observar que a mudança da orientação da edificação não influencia significativamente no desempenho da pala projetada.

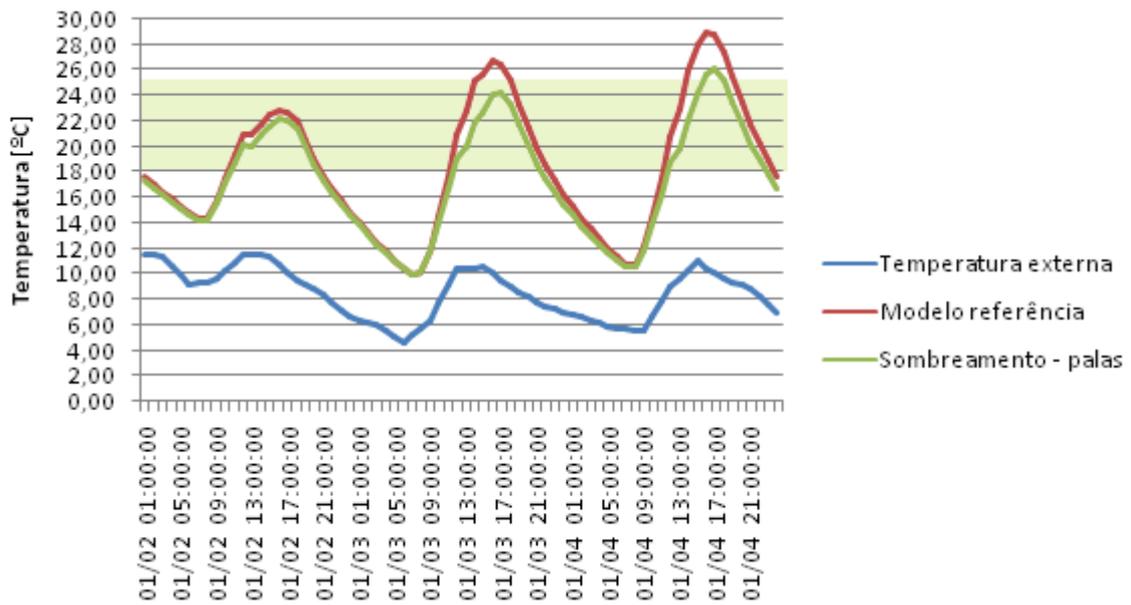


Gráfico 29. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por palas, dias de inverno.

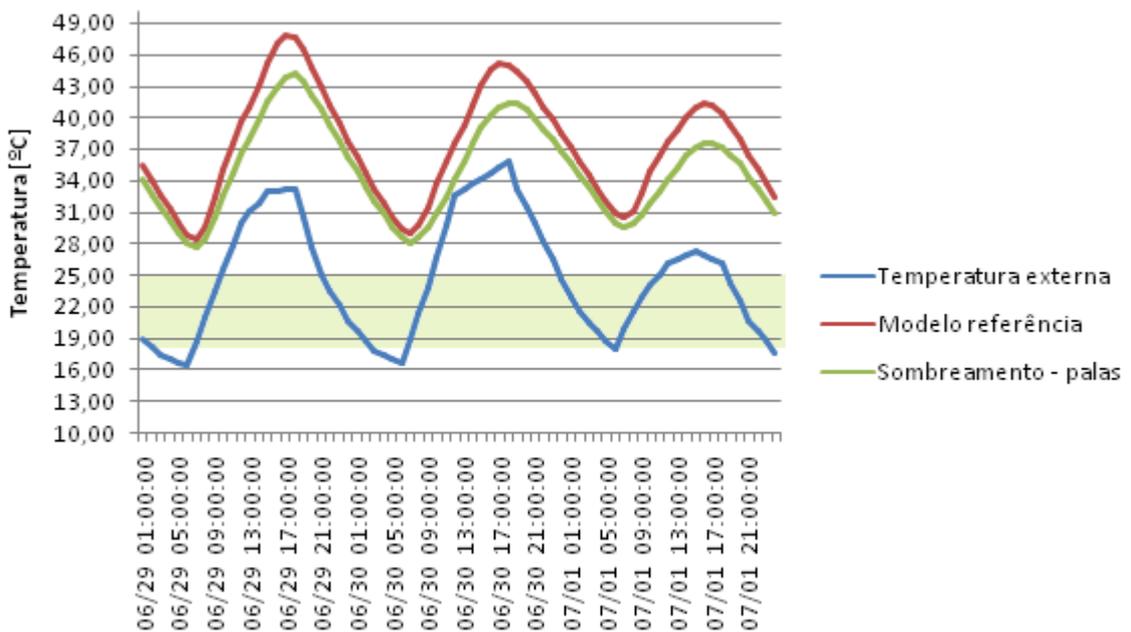


Gráfico 30. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por palas, dias de verão.

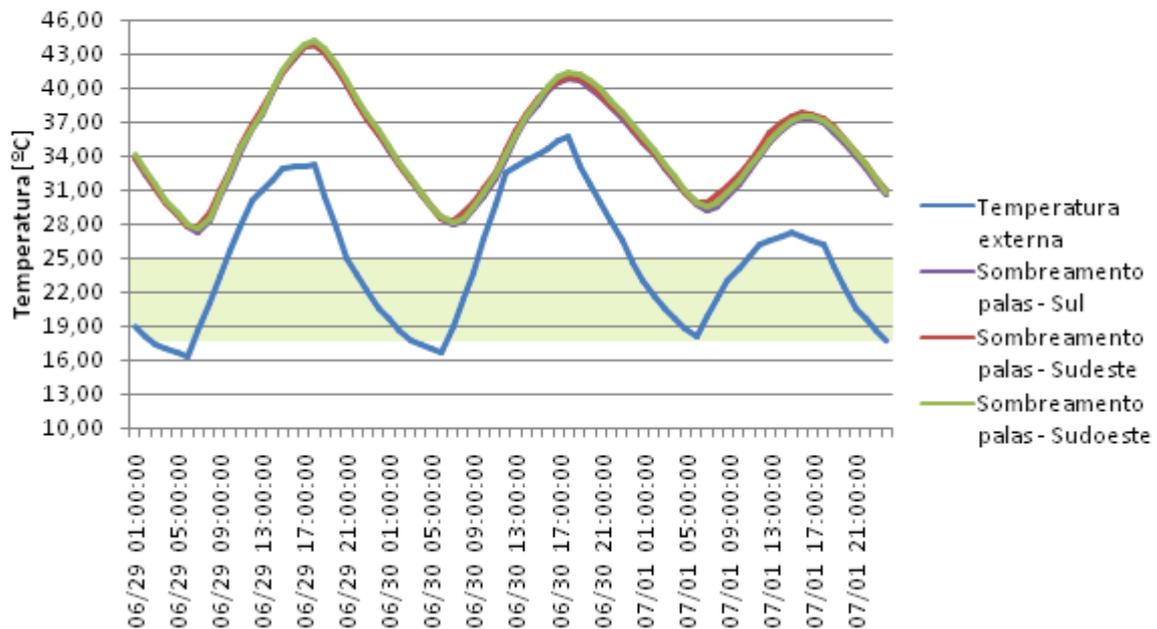


Gráfico 31. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo para diferentes orientações, dias de verão.

Para o modelo que utiliza o sombreamento por meio de palas (Tabela 27), as necessidades para aquecimento são de 3522,44 kWh/ano (36,31 kWh/ano.m²), aumentando em 3,33% em relação ao modelo referência. Todavia, durante a estação de arrefecimento, o modelo de sombreamento por palas requer 5646,52 kWh/ano (58,21 kWh/ano.m²), para necessidades de arrefecimento, proporcionando assim uma redução de 18,45% em relação ao modelo referência. Somando-se as necessidades de aquecimento e arrefecimento, o modelo necessita de 9168,96 kWh/ano, isto é, para atingir o intervalo de temperaturas de conforto térmico, representando uma redução total de 11,26% em relação ao modelo referência.

Tabela 27. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo sombreado por palas.

Sombreamento - palas		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	227,098	969,195
Gabinete 2	800,146	981,483
Gabinete 3	793,085	934,430
Cozinha	111,225	548,575

Casa de banho	83,424	225,437
Sala técnica	290,936	461,226
Sala de reuniões	1216,527	1526,178
Total	3522,441	5646,524
TOTAL	9168,965	

3.3.4. Modelo sombreado por persianas

As persianas definidas para este modelo são persianas externas, que possuem como função bloquear a entrada indesejada de radiação solar no verão, reduzindo também a luz natural que entra no ambiente.

a) Persianas operadas em função da radiação incidente

O *setpoint* definido para a operação das persianas foi a radiação incidente de 400W/m^2 . Com valores superiores a este, as persianas fecham-se. No Gráfico 32, nota-se que para os dias de inverno a diminuição média de temperatura foi de $1,24^\circ\text{C}$, a máxima de $4,46^\circ\text{C}$ e a mínima de $0,05^\circ\text{C}$. Já para os dias de verão (Gráfico 33), a diminuição média de temperatura ao longo dos dias observados foi de $0,74^\circ\text{C}$, sendo a máxima $3,24^\circ\text{C}$ e a mínima $0,03^\circ\text{C}$. As necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento são apresentadas na Tabela 28.

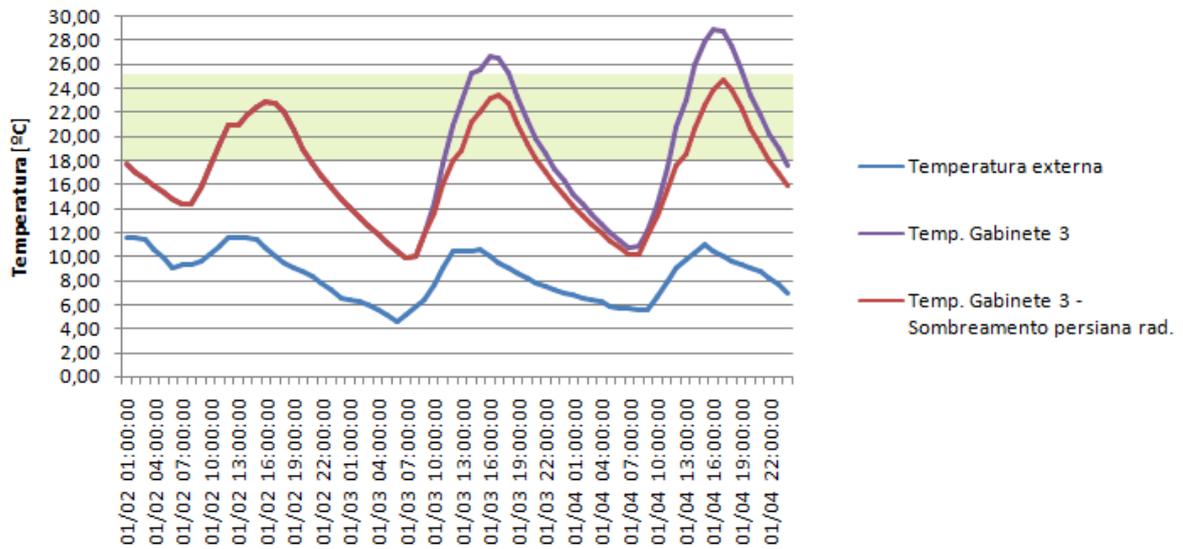


Gráfico 32. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas, dias de inverno.

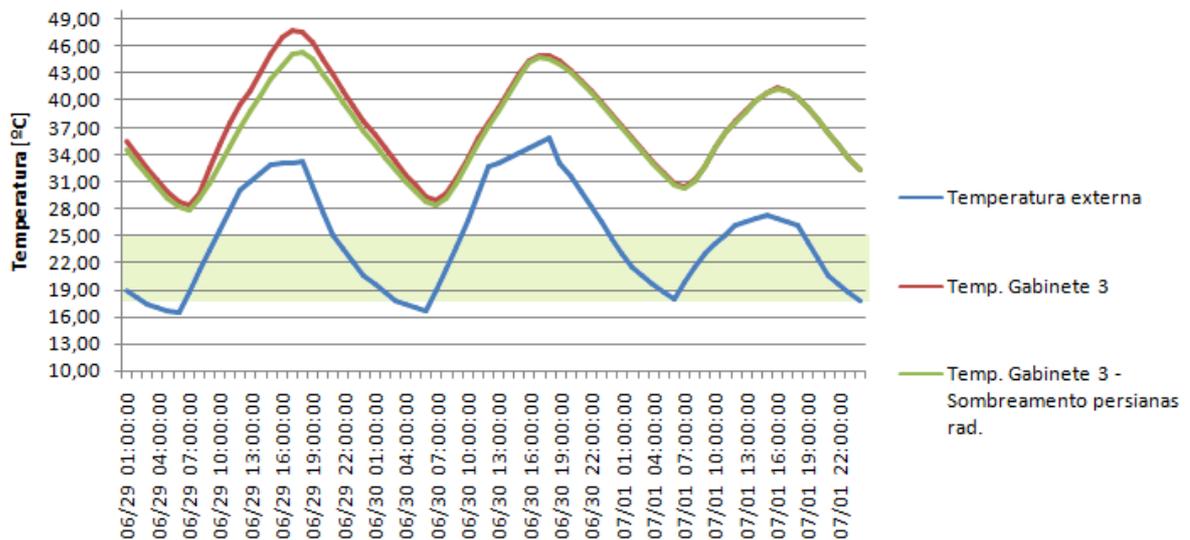


Gráfico 33. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas, dias de verão.

Tabela 28. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo sombreado por persianas operadas em função da radiação incidente.

Sombreamento - persianas operadas em função da radiação incidente		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	472,637	222,474
Gabinete 2	510,805	223,179
Gabinete 3	501,792	226,844
Cozinha	361,260	223,735
Casa de banho	370,490	207,405
Sala técnica	566,878	218,963
Sala de reuniões	944,238	222,344
Total	3728,100	1544,943
TOTAL	5273,043	

b) Persianas operadas em função da temperatura interna da zona térmica

O *setpoint* definido para o funcionamento das persianas foi de 25°C. O Gráfico 32 apresenta os resultados obtidos para os dias de inverno. A diminuição média de temperatura ao longo dos dias observados foi de 0,29°C, sendo a máxima 1,86°C e a mínima 0°C. Para os dias de verão representados pelo Gráfico 33, a redução média de temperatura foi de 1,24°C, ao passo que a máxima foi de 4,46°C e a mínima de 0,05°C. As necessidades nominais são apresentadas pela Tabela 22.

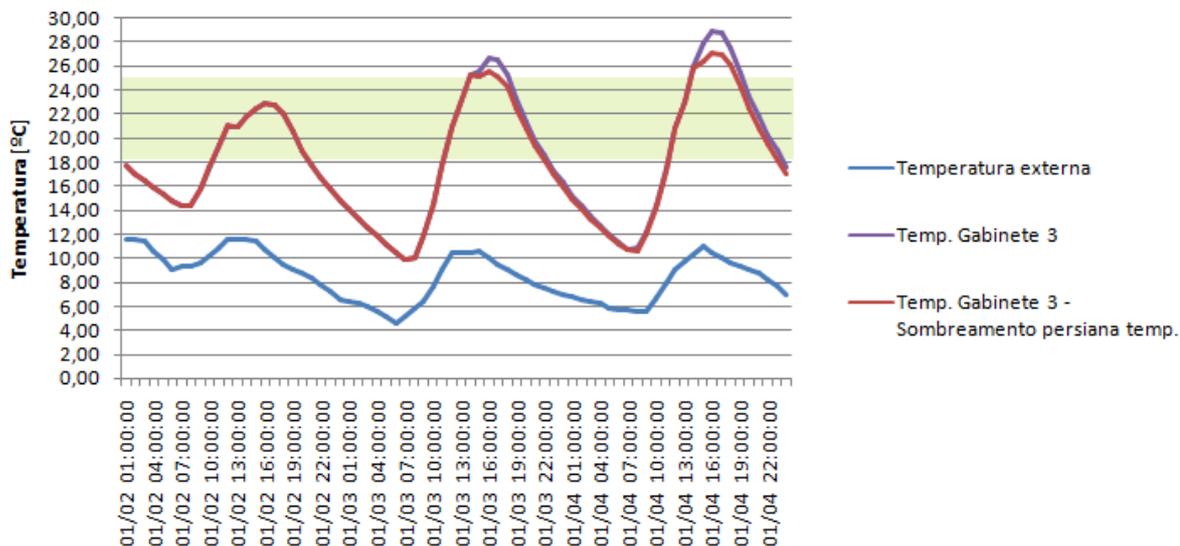


Gráfico 34. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas, dias de inverno.

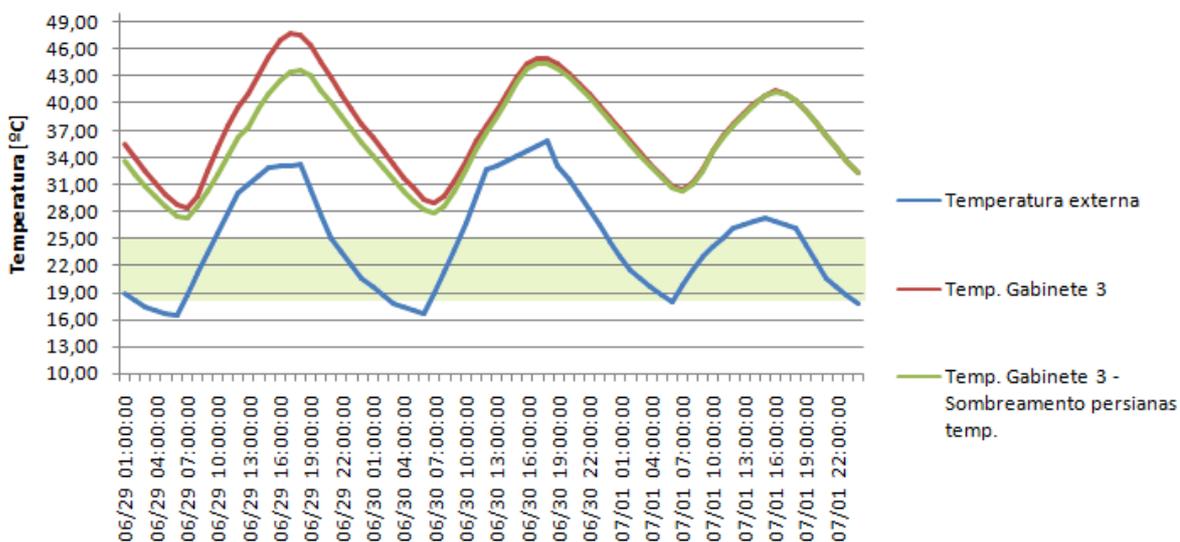


Gráfico 35. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas, dias de verão.

Tabela 28. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas.

Sombreamento - persianas operadas em função da temperatura das zonas térmicas		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	472,176	221,638
Gabinete 2	509,106	222,393
Gabinete 3	494,871	227,091
Cozinha	359,201	223,594
Casa de banho	367,211	206,856
Sala técnica	553,493	223,466
Sala de reuniões	937,898	221,716
Total	3693,956	1546,753
TOTAL	5240,709	

3.3.5. Modelo com ventilação por tubos enterrados

Para os modelos de tubos enterrados, quanto maior o comprimento do tubo, menor a temperatura de saída do ar [43]. Os tubos com menor diâmetro apresentam menor perda de eficiência energética ao decorrer do comprimento. Em relação ao distanciamento dos tubos, afirma-se que quanto maior a distância entre eles, melhor é o desempenho do sistema. A cada metro reduzido da distância entre um tubo e outro, apresenta-se perdas de capacidade de troca na ordem de 5 a 15%. O desempenho aumenta consoante ao comprimento atribuído ao tubo, sendo o material com melhor desempenho para os tubos o aço [43].

A temperatura do solo é um dos fatores mais significantes na performance do sistema de tubos enterrados, razão pela qual os dados de input das características do solo devem ser corretamente inseridos. Para gerar os valores relativos à média anual da temperatura de superfície do solo, amplitude da temperatura de superfície do solo e fase constante da temperatura de superfície do solo, é utilizado um programa auxiliar chamado *CalcSoilSurfTemp*. Este programa prediz os parâmetros considerando a transferência de calor

por convecção entre o solo e o ar, a absorção da radiação pelo solo, a radiação de onda longa emitida pelo solo e a perda de calor latente pela evaporação da umidade na superfície do solo [43].

Utilizando o programa auxiliar *CalcSoilSurfTemp* [40], definiu-se o tipo de solo como pesado e saturado, com superfície sem cobertura e úmida. O setpoint definido para o funcionamento do tubo é entre 22°C e 25°C. Os parâmetros obtidos para as características do solo são os seguintes:

Temperatura média da superfície do solo: 15,14429 °C

Amplitude da temperatura da superfície do solo: 9,608222 °C

Fase constante da temperatura da superfície do solo: 49 dias.

Profundidade: 2 m

Comprimento do tubos: 24 m

Material dos tubos: aço

Diâmetro dos tubos: 0,05 m

Espessura dos tubos: 0,025 m

Distância entre os tubos: 1 m

Vazão do ar pelos tubos: 0,04 m³/s

Como alternativa a este modelo previamente definido, também realizou-se a modelação computacional alternando-se a profundidade de instalação de 2m para 1m e 0,5m, e também com um material diferente para o tubo, considerando assim o PVC. Os tubos de PVC, para este estudo, apresentaram o mesmo comportamento dos tubos de aço.

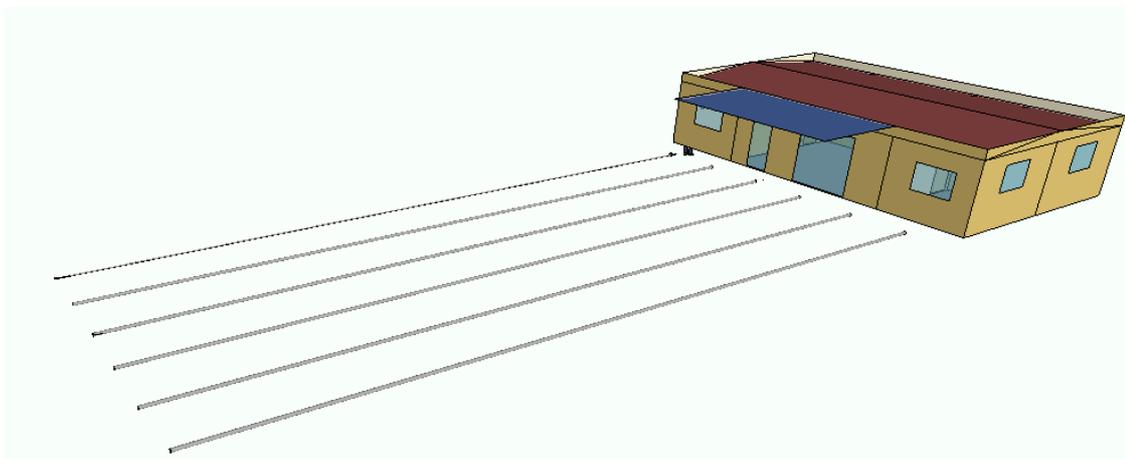


Figura 21. Projeção em 3D do modelo com ventilação por tubos enterrados.

Para ilustrar o comportamento do sistema de ventilação por tubos enterrados instalados à uma profundidade de 2m, abaixo são apresentados os gráficos referentes à temperatura do gabinete 3, para dias de inverno e verão. Como alternativa, modelou-se o sistema dos tubos enterrados instalados à profundidade de 1m e 0,5m.

No Gráfico 36 é possível observar as diferenças de temperatura obtidas pela modelação computacional para os dias de inverno. A diminuição média de temperatura foi de 0,93°C, sendo a máxima de 4,13°C e a mínima de 0,11°C.

Para os dias de verão apresentados (Gráfico 37), a diferença de temperatura ocasionada pela ventilação por tubos enterrados não é representativa.

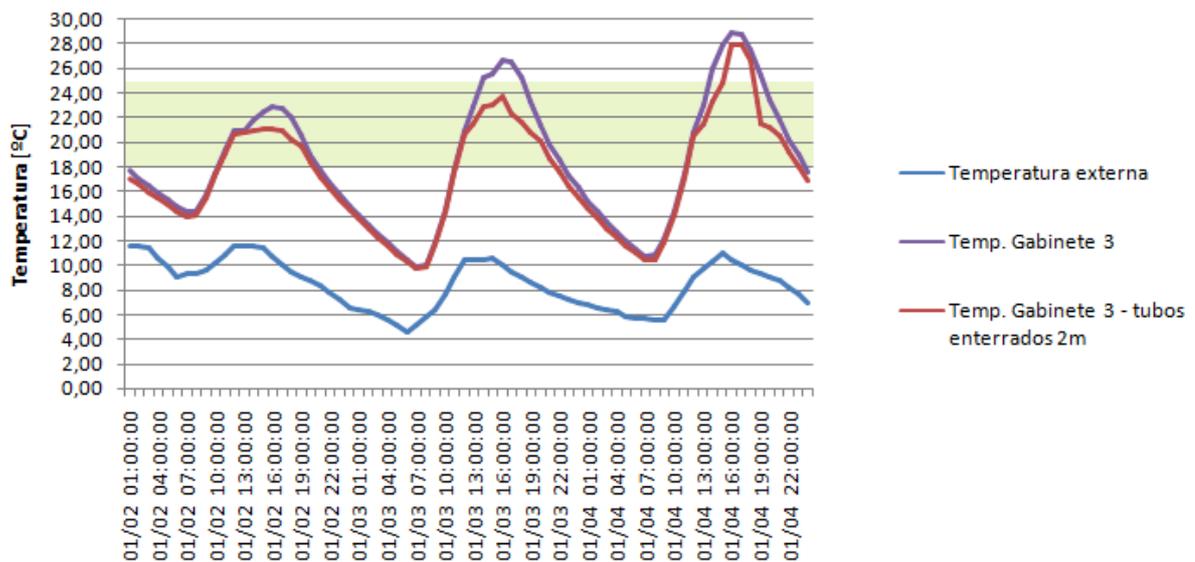


Gráfico 36. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados com profundidade de 2m, dias de inverno.

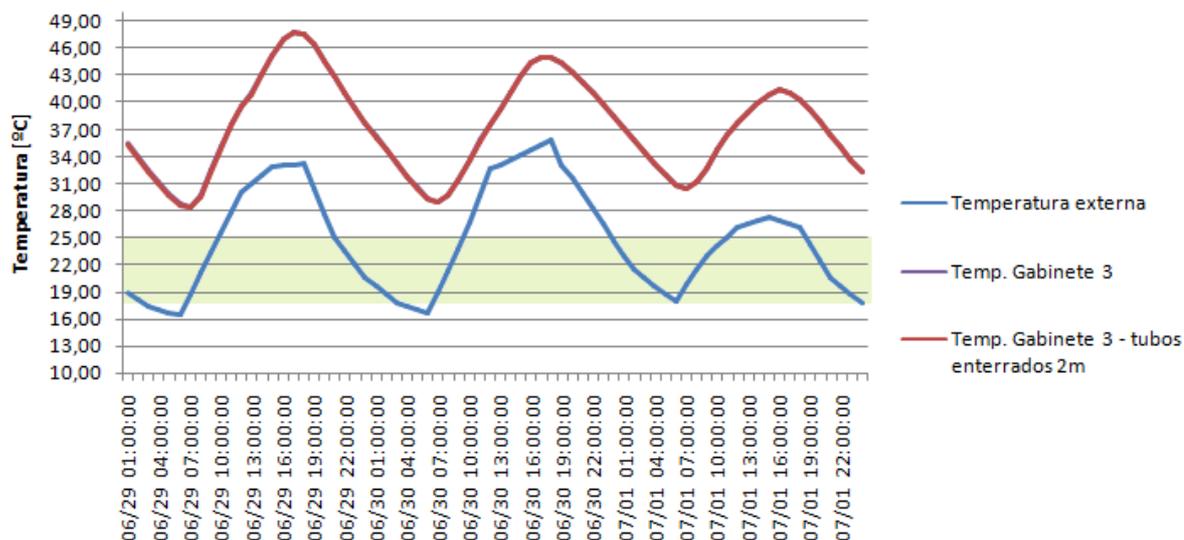


Gráfico 37. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à 2m, dias de verão.

A tabela 30 apresenta as necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para a edificação, para o modelo de tubos enterrados à 2m.

Tabela 30. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com ventilação por tubos enterrados à 2m.

Tubos enterrados - 2m		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	240,948	764,468
Gabinete 2	815,194	1065,68
Gabinete 3	789,475	1118,666
Cozinha	112,678	603,269
Casa de banho	81,309	237,786
Sala técnica	284,740	484,379
Sala de reuniões	1225,86	1425,747
Total	3550,211	5699,997
TOTAL	9250,208	

Para a modelagem com os tubos enterrados à 1m de profundidade, nos dias de inverno (Gráfico 38) a diminuição média de temperatura é de 1,06°C, a máxima é de 4,75°C e a mínima é de 0,13°C.

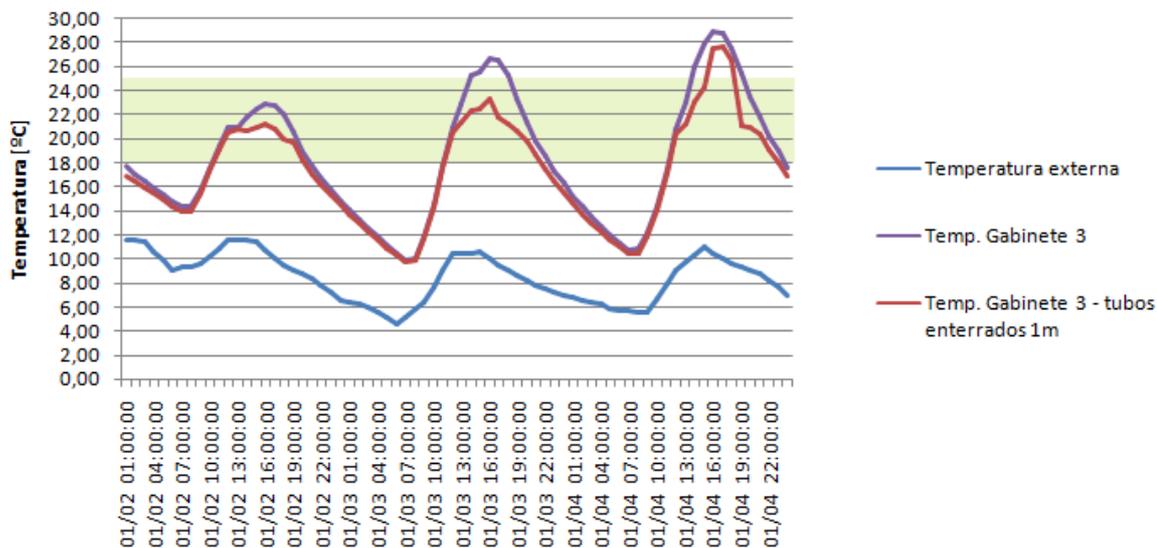


Gráfico 38. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à profundidade de 1m, dias de inverno.

Para os dias de verão (Gráfico 39), a ventilação natural com tubos enterrados não fornece uma diminuição significativa para os dias considerados no gráfico.

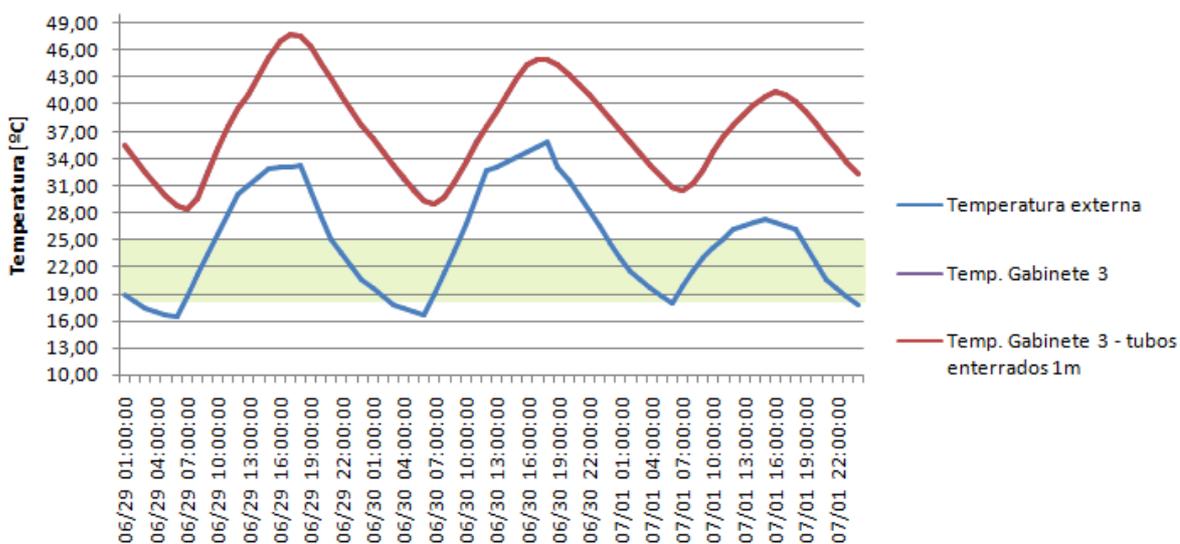


Gráfico 39. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à profundidade de 1m, dias de verão.

A Tabela 31 apresenta as necessidades nominais para o modelo com ventilação por tubos enterrados à 1m.

Tabela 31. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com ventilação por tubos enterrados à 1m.

Tubos enterrados - 1m		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	242,806	809,706
Gabinete 2	817,300	1105,816
Gabinete 3	790,943	1157,028
Cozinha	113,429	607,714
Casa de banho	81,795	240,452
Sala técnica	286,108	524,849
Sala de reuniões	1229,059	1465,727
Total	3561,442	5911,293
TOTAL	9472,735	

Para o sistema de tubos enterrados à 0,5m, nos dias de inverno (Gráfico 40) a redução média de temperatura, em relação ao modelo referência, foi de 1,31°C. A máxima foi de 5,69°C e a mínima de 0,13°C.

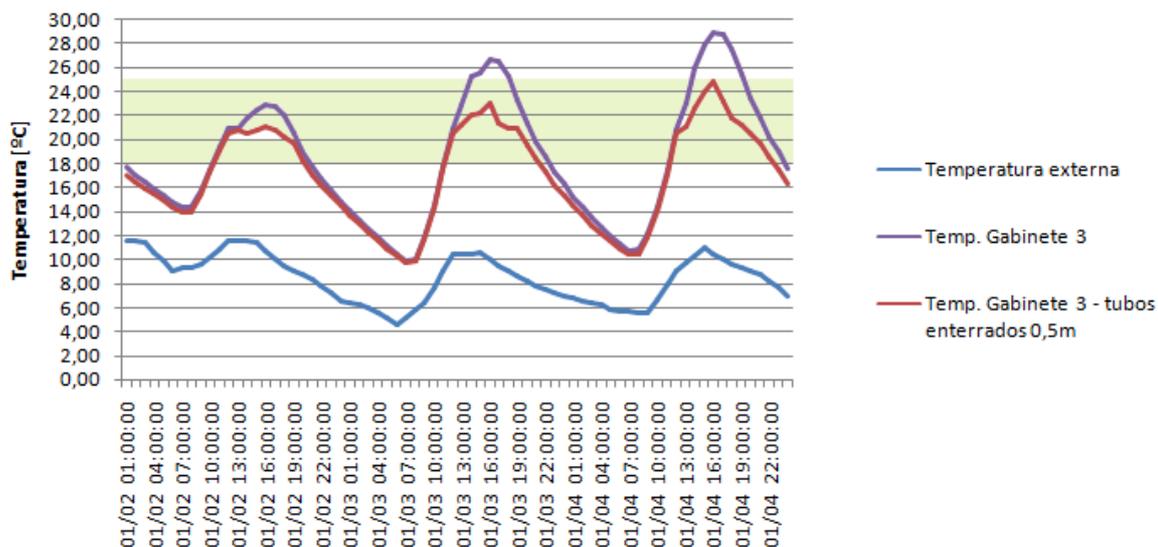


Gráfico 40. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à profundidade de 0,5m, dias de inverno.

Para os dias de verão, o sistema enterrado à 0,5m não apresentou redução significativa para estes dias considerados, como é possível observar no Gráfico 41.

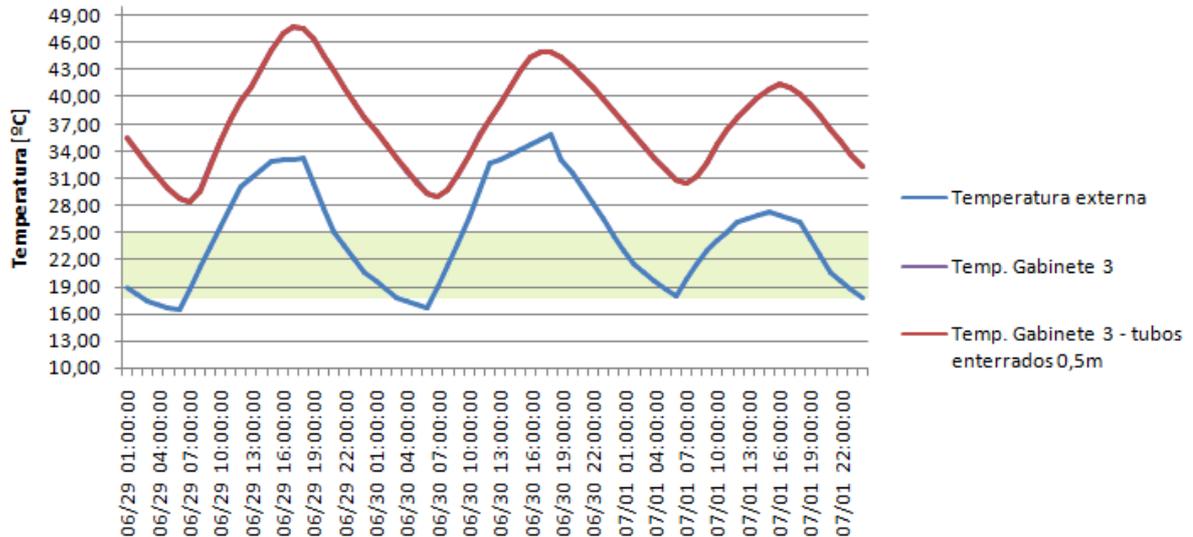


Gráfico 41. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo ventilado por tubos enterrados à profundidade de 0,5m, dias de verão.

A Tabela 32 apresenta as necessidades nominais para o modelo com ventilação por tubos enterrados à 0,5m.

Tabela 32. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com ventilação por tubos enterrados à 0,5m.

Tubos enterrados - 0,5m		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	244,094	846,105
Gabinete 2	818,192	1144,309
Gabinete 3	791,374	1194,378
Cozinha	113,941	615,379
Casa de banho	82,111	244,518
Sala técnica	286,914	558,449
Sala de reuniões	1230,586	1509,519
Total	3567,213	6112,658
TOTAL	9679,871	

3.3.6. Modelo com ventilação por ar insuflado do exterior

Este sistema, aliado ao sistema de *Purchased Air*, faz com que o ar seja insuflado do exterior para o interior da zona térmica, quando a temperatura da zona térmica é superior à temperatura máxima de conforto térmico (25°C) e a temperatura externa é inferior à temperatura da zona térmica, o que ocorre, como nota-se nos resultados para o modelo referência, muitas vezes na estação de aquecimento. Para ilustrar o comportamento deste modelo em relação ao modelo referência, é apresentado no Gráfico 42 a variação de temperatura para dias de verão no Gabinete 3. Para os dias de verão analisados, a média de redução de temperatura foi de 6,2°C, apresentando uma diferença máxima em relação ao modelo referência de 7,78°C e uma mínima de 4,72°C.

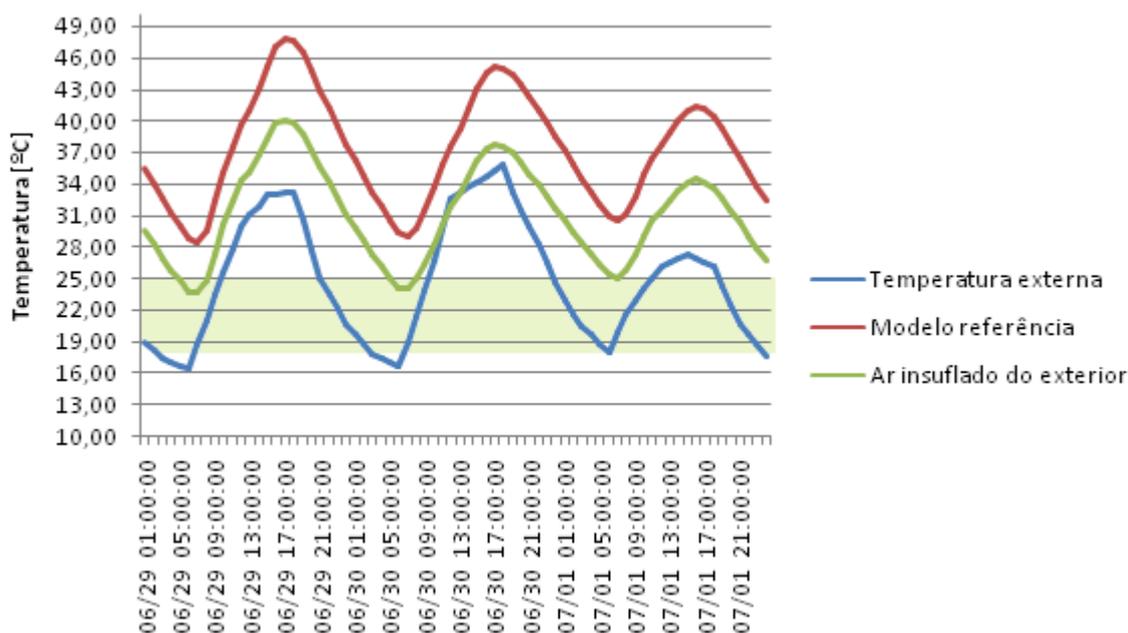


Gráfico 42. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo com ar insuflado do exterior.

O modelo que apresenta como estratégia o insuflamento de ar exterior para o interior da edificação, nos períodos em que a temperatura no interior da casa está acima da temperatura de limite superior de conforto térmico (25°C) e a temperatura externa é menor que a temperatura interna, possui as necessidades de aquecimento e arrefecimento apresentadas pela Tabela 33. Para as necessidades de aquecimento o total obtido é de 3588,28 kWh/ano (36,99 kWh/ano.m²), representando um aumento de 5,26% em relação ao modelo referência. Todavia, as necessidades de arrefecimento são de 1562,70 kWh/ano (16,11

kWh/ano.m²), significando uma redução de 77,43% em relação ao modelo referência. Somando-se às necessidades de aquecimento e arrefecimento obtém-se o total de 5150,99 kWh/ano, representando uma redução de 50,14% em relação ao modelo referência.

Tabela 33. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com ar insuflado do exterior.

Ar insuflado do exterior		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	459,884	223,860
Gabinete 2	492,772	224,425
Gabinete 3	476,356	228,550
Cozinha	351,191	225,598
Casa de banho	359,483	210,902
Sala técnica	538,882	225,573
Sala de reuniões	909,720	223,794
Total	3588,289	1562,703
TOTAL	5150,992	

3.3.7. Estratégias combinadas (Ar insuflado + Sombreamento por palas)

Para o primeiro modelo de estratégias combinadas, utilizou-se o modelo de ar insuflado para o interior somado ao modelo de sombreamento por palas. O Gráfico 43 apresenta os resultados obtidos para o verão, sendo o modelo de estratégias combinadas responsável por uma diminuição de temperatura média de 2,29°C, máxima de 4,31°C e mínima de 0,79°C. Para o inverno, a melhor situação ainda é a do modelo referência, uma vez que nos períodos frios é interessante que exista ganho por radiação solar para que o ambiente interno se mantenha aquecido.

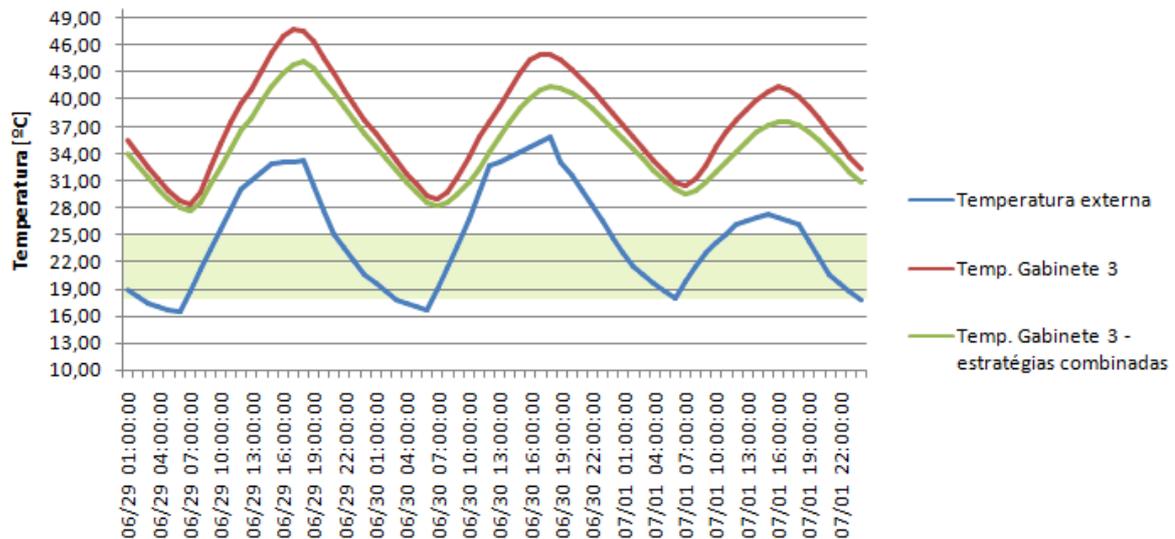


Gráfico 43. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo com estratégias combinadas (ar insuflado + sombreamento por palas).

Combinando-se as estratégias de sombreamento por meio de persianas e ar insuflado do exterior (Tabela 34), as necessidades de aquecimento são de 3832848 kWh/ano (39,51 kWh/ano.m²), aumentando em 12,44% em relação ao modelo referência. As necessidades de arrefecimento, em contrapartida, são de 1520,254 kWh/ano (15,67 kWh/ano.m²), reduzindo em 78,05% as necessidades quando compara-se ao modelo referência.

Tabela 34. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com estratégias combinadas.

Estratégias combinadas (sombreamento palas, ar insuflado do exterior)		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	483,551	220,324
Gabinete 2	522,404	220,835
Gabinete 3	518,706	222,731
Cozinha	368,758	219,473
Casa de banho	379,951	203,091
Sala técnica	595,041	213,025
Sala de reuniões	964,435	220,774
Total	3832,848	1520,254
TOTAL	5353,102	

3.3.8. Estratégias combinadas (Ar insuflado + Sombreamento por persianas)

Utilizou-se, neste modelo, a estratégia das persianas operadas em função da temperatura interna das zonas combinada com o modelo que apresenta o ar exterior insuflado no ambiente, a ser utilizado na estação de aquecimento, com o intuito de arrefecer o ar no interior da edificação. O Gráfico 44 apresenta os resultados obtidos para o verão, sendo este o modelo de estratégias combinadas responsável por uma diminuição de temperatura média de 1,24°C, máxima de 4,46°C e mínima de 0,05°C. Para o inverno, a melhor situação ainda é a do modelo referência, uma vez que nos períodos frios é interessante que exista ganho por radiação solar para que o ambiente interno se mantenha aquecido.

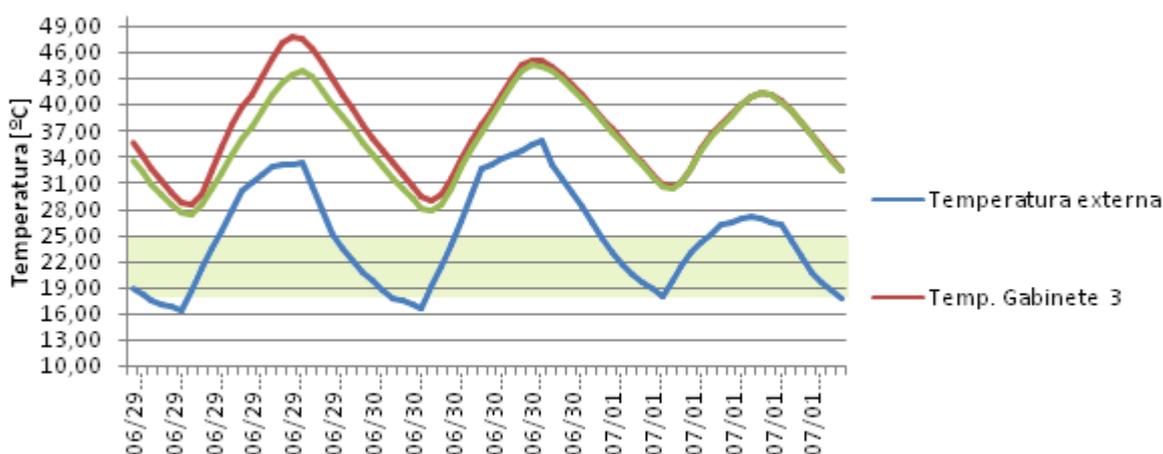


Gráfico 44. Temperaturas no Gabinete 3 para o modelo com estratégias combinadas (ar insuflado + sombreamento por persianas).

Combinando-se as estratégias de sombreamento por meio de persianas e ar insuflado do exterior (Tabela 35), as necessidades de aquecimento são de 3693,956 kWh/ano (38,08 kWh/ano.m²), aumentando em 12,44% em relação ao modelo referência. As necessidades de arrefecimento, em contrapartida, são de 1546,753 kWh/ano (15,94 kWh/ano.m²), reduzindo em 77,67% as necessidades quando compara-se ao modelo referência.

Tabela 35. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento para o modelo com estratégias combinadas.

Estratégias combinadas (sombreamento persianas, ar insuflado do exterior)		
Zona térmica	Necessidades [kWh/ano]	
	Aquecimento	Arrefecimento
Gabinete 1	472,176	221,637
Gabinete 2	509,105	222,392
Gabinete 3	494,871	227,091
Cozinha	359,201	223,594
Casa de banho	367,211	206,855
Sala técnica	553,493	223,466
Sala de reuniões	937,898	221,716
Total	3693,956	1546,753
TOTAL	5240,709	

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos para as necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento dos modelos simulados com o software *Energyplus*. Analisando-a, o modelo com maior eficiência em relação ao modelo referência, no balanço total de necessidades de aquecimento e arrefecimento, é o modelo de estratégias combinadas entre o ar insuflado no interior e as persianas operadas em função da radiação incidente. Todavia, tratando-se da maior diminuição das necessidades nominais de arrefecimento, o modelo de estratégias combinadas de palas e ar insuflado no interior é o que mais possui reduções. Para o aquecimento, o modelo que apresenta as menores necessidades nominais é o modelo referência, uma vez que não possui sombreamentos nos envidraçados e permite maiores ganhos solares. O modelo referência difere-se do modelo alternativo de ar insuflado do exterior em relação aos ganhos solares nos períodos frios, uma vez que o *setpoint* do termostato do modelo para o funcionamento do sistema de ar insuflado está definido para os limites máximos e mínimos de temperatura de conforto, o que faz com que ocorra um atraso térmico que leva a temperatura interior a diminuir abaixo dos limites de conforto, elevando as necessidades de aquecimento.

A Tabela 36 apresenta as reduções das necessidades em relação ao modelo referência, em percentual, resultado também apresentado pelo Gráfico 45.

Tabela 36. Necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento dos modelos.

Necessidades nominais [kWh/ano]			
Modelo	Aquecimento	Arrefecimento	Total
Modelo referência	3408,76	6924,11	10332,87
Sombreamento - palas	3522,44	5646,52	9168,97
Sombreamento - persianas (radiação)	3728,10	1544,94	5273,04
Sombreamento - persianas (temperatura)	3693,96	1546,75	5240,71
Ar insuflado do exterior	3588,29	1562,70	5150,99
Tubos enterrados 2m	3550,21	5700,00	9250,21
Tubos enterrados 1m	3561,44	5911,29	9472,74
Tubos enterrados 0,5m	3567,21	6112,66	9679,87
Estratégias combinadas (pers.)	3693,96	1546,75	5240,71
Estratégias combinadas (palas)	3832,85	1520,25	5353,10

Tabela 37. Diferença percentual das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento em relação ao modelo referência.

Diferença em percentual em relação ao modelo referência (%)			
Modelo	Aquecimento	Arrefecimento	Total
Modelo referência	-	-	-
Sombreamento - palas	3,33	-18,45	-11,26
Sombreamento - persianas (radiação)	9,36	-77,69	-48,96
Sombreamento - persianas (temperatura)	8,36	-77,66	-49,28
Ar insuflado do exterior	5,26	-77,43	-50,14
Tubos enterrados 2m	4,14	-17,68	-13,54
Tubos enterrados 1m	4,47	-14,63	-10,16
Tubos enterrados 0,5m	4,64	-11,72	-7,08
Estratégias combinadas (pers.)	8,36	-77,67	-49,28
Estratégias combinadas (palas)	12,44	-78,08	-48,19

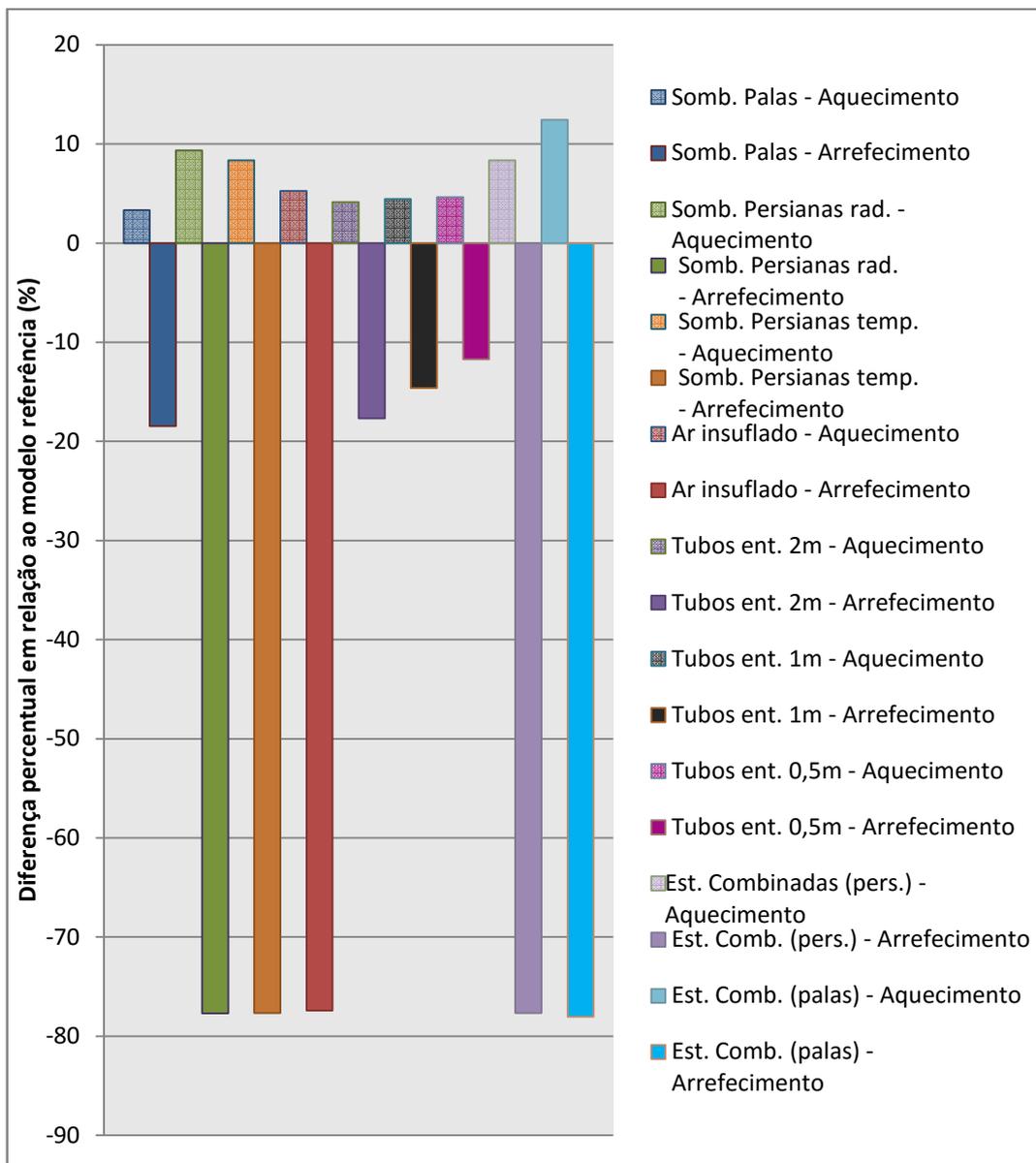


Gráfico 45. Percentual de diferenças de necessidades de aquecimento e arrefecimento em relação ao modelo referência.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Os objetivos propostos de realizar uma breve descrição das estratégias solares passivas para arrefecimento e aquecimento, modelar uma situação referência, validar o modelo, aplicar estratégias solares passivas e demonstrar seu potencial para a conservação de energia foram atendidos. No Capítulo 1, é introduzido o tema da eficiência energética em edificações e apresentar o panorama do contexto e políticas energéticas portuguesas, justificando a necessidade do estudo aprofundado em estratégias solares passivas e também da disseminação da utilização de softwares para modelagem energética de edificações.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, discorrendo sobre a arquitetura bioclimática, a orientação da edificação, a influência do Sol na edificação, as principais estratégias solares passivas para aquecimento (vãos envidraçados, parede de trombe, parede e coluna de água, estufas e coletores de ar) e arrefecimento (ventilação natural, aquecimento geotérmico, arrefecimento evaporativo e sombreamento). O Capítulo 2 também aborda a influência dos materiais da envolvente no desempenho térmico da edificação.

O Capítulo 3 trata do estudo de caso realizado. Primeiramente descreveu-se a arquitetura e materiais da envolvente e as características do clima da região. Determinou-se, então, um modelo referência, que foi validado com a utilização de dados de medições de temperatura no interior de cada zona térmica da edificação e dados de temperatura externa e radiação solar para a alteração do arquivo climático de Évora. A validação ocorreu para um dia sem ocupação (23 de dezembro de 2014) e um dia com ocupação (19 de dezembro de 2014). Após validar o modelo, é determinado um padrão de utilização a ser considerado para as simulações futuras e definido o modelo referência que foi utilizado para a comparação com os modelos que possuíam estratégias solares passivas.

Definiu-se, como estratégias solares passivas a serem adotadas, o sombreamento por palas e persianas, o sistema de ventilação por tubos enterrados, modelando o sistema instalado à uma profundidade de 2m, 1m e 0,5m, e também com um insuflador de ar externo para o interior da casa, para os dias quentes. O Gabinete 3 foi utilizado como referência para a apresentação de resultados, uma vez que está orientado a sul e é a zona térmica com maiores ganhos solares. Os resultados foram apresentados em forma de gráfico, para três dias da estação de arrefecimento (02, 03 e 04 de janeiro) e três dias da estação de aquecimento (29, 30 de junho e 01 de julho).

No que toca à estratégias de sombreamento, o sombreamento por persianas operadas em função da temperatura interna das zonas mostrou-se mais eficaz durante o verão, comparando-se ao sombreamento por palas. Todavia, ressalta-se aqui que a influência do sombreamento na disponibilidade de luz natural no interior da edificação não foi analisada.

Já o sistema de tubos enterrados mostrou-se eficaz, porém as reduções ainda são poucas quando compara-se à estratégia de sombreamento e de ar insuflado do exterior para o interior. O sistema que insufla ar do exterior para o interior da edificação, em dias em que a temperatura interna é superior à temperatura de conforto e a temperatura externa é inferior à temperatura interna, mostrou-se bastante eficaz.

No Capítulo 4 é apresentada a análise de resultados no que toca às necessidades de aquecimento e arrefecimento para cada modelo, em kWh/ano e diferenças percentuais. Para calcular estas necessidades, utilizou-se no software *Energyplus* o sistema de *Purchased Air*. Para o modelo referência, as necessidades nominais de aquecimento são de 35,14 kWh/m².ano, e 71,38 kWh/m².ano para arrefecimento, sendo estes valores foram utilizados para a comparação entre os modelos.

Para o modelo com sombreamento por palas, as necessidades de aquecimento são de 36,31 kWh/m².ano, representando um aumento de 3,33% em relação ao modelo referência. Para as necessidades de arrefecimento, o valor obtido foi de 58,21 kWh/m².ano, 18,45% inferior ao modelo referência. No total, o modelo apresenta uma redução de necessidades de 11,21%.

O modelo sombreado por persianas operadas em função da radiação incidente necessita de 38,43 kWh/m².ano para aquecimento (9,36% superior ao modelo referência), mas somente 15,93 kWh/m².ano para arrefecimento, diminuindo em 77,69%. Ao total, este modelo proporciona uma redução de 48,96% das necessidades em relação ao modelo referência. Já o modelo sombreado por persianas operadas em função da temperatura interna da zona térmica necessita de 38,08 kWh/m².ano para aquecimento (8,36% superior ao modelo referência), mas somente 15,95 kWh/m².ano para arrefecimento, diminuindo em 77,43%. Ao total, este modelo proporciona uma redução de 49,28% das necessidades em relação ao modelo referência.

Para os tubos enterrados à 2m (melhor situação entre as diferentes profundidades de instalação), as necessidades de aquecimento são de 36,60 kWh/m².ano, aumentando em 4,14%. Para o arrefecimento, as necessidades são de 58,76 kWh/m².ano, reduzindo em 17,68%. Ao total, este modelo apresenta uma redução de 13,54% das necessidades.

O modelo que introduz o ar insuflado do exterior possui 36,99 kWh/m².ano de necessidades de aquecimento, 5,29% a mais que o modelo referência, porém apenas 16,11 kWh/m².ano para arrefecimento, o que representa uma redução de 77,43% em relação as necessidades de arrefecimento do modelo referência. Ao total, este modelo apresenta uma redução de 50,14% das necessidades.

O modelo de estratégias combinadas (persianas operadas em função da temperatura + ar insuflado no interior) necessita de 38,08 kWh/m².ano para aquecimento, porém reduz as necessidades de arrefecimento à somente 15,95 kWh/m².ano, o que se traduz em 77,67% de redução em relação ao modelo referência. Ao total, atingiu-se uma perspectiva de redução de 69,31%. O modelo de estratégias combinadas que associa palas e ar insuflado no interior necessita de 39,51 kWh/m².ano para aquecimento, e reduz as necessidades de arrefecimento à 15,67 kWh/m².ano, o que se traduz em 78,05% de redução em relação ao modelo referência. Ao total, atingiu-se uma perspectiva de redução de 65,61%.

Comprova-se, assim, a eficácia das estratégias solares passivas no que toca às reduções de consumo desta edificação. O estudo em questão também reforça o importante papel dos softwares de modelagem energética, pois torna possível quantificar os consumos e também o impacto que as diferentes estratégias possuem sobre o desempenho energético de uma edificação. Como recomendações para trabalhos futuros para este mesmo estudo de caso, indica-se a modelagem de diferentes tipos de envidraçados e a modelagem de estratégias solares ativas, introduzindo as energias renováveis à edificação.

REFERÊNCIAS

- [1] GONÇALVES, H.; GRAÇA, J. M. Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal. Lisboa: DGGE, 2004.
- [2] DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. Building Energy Software Tools Directory. Disponível em:
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/alpha_list.cfm>, acessado em 20/01/2014 às 12:55h.
- [3] FONSECA, A. P., Relatório de Estágio, Universidade de Évora, 2015.
- [4] CAVACO, A. Desenvolvimento e operação de um circuito de ensaios de coletores solares térmicos a óleo. Comparação com os resultados obtidos num circuito a água. Universidade de Évora, 2014.
- [5] LOPES, R. M. F. Otimização do desempenho energético de um edifício residencial em Portugal. Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [6] LACASTA, N. S.; BARATA, P. M. O protocolo de Quioto sobre alterações climáticas: Análise e Perspectivas. Clima e eficiência energética, Working paper 1/98, 1999.
- [7] Diário da República, 1.a série — N.162 — 23 de Agosto de 2006. (Resolução do Conselho de Ministros n.º 104/2006)
- [8] Agência Portuguesa do Ambiente, Relatório do Estado do Ambiente 2014.
- [9] Decreto-lei n.º 118/2013.
- [10] Plano Nacional de Eficiência energética (BRASIL), 2010.
- [11] ÖSTRÖM, C. S.; BAKENS, W. CIB Agenda 21 for Sustainable Construction: why, how and what? Building Research and Information, v. 27, n. 6, p. 348-354, 1999.
- [12] Jornal Oficial da União Europeia (2010).
- [13] Agência Portuguesa do Ambiente, Relatório do Estado do Ambiente 2013
- [14] MOITA, F. (1987). *Energia Solar Passiva* (Vol. 1). DGE.
- [15] FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. Manual de Conforto Térmico. São Paulo: Nobel, 1988.
- [16] LANHAM, A.; GAMA, P.; BRAZ, R. Arquitectura Bioclimática perspectivas de inovação e futuro. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2004.
- [17] Lamberts, R., Morishita, C, Fossati, M. A Eficiência Energética em Edificações e a Regulamentação Brasileira (2011)
- [18] D. Prowler and N. I. of B. Sciences, “Sun Control and Shading Devices | Whole Building Design Guide,” *Whole Building Design Guide, National Institute of Building Sciences*, 2008. [Online]. Disponível em:
http://www.wbdg.org/resources/suncontrol.php?r=env_hvac_integration [Acessado em: 18-Out-2012].

- [19] H.J.P. Gonçalves, Eduardo A.B. Maldonado, E. de Oliveira Fernandes Performance and Modelling of a Passive Solar Residence in Portugal.- - 9th. Biennial Congress of ISES, INTERSOL 85 Montreal - Pergamon Press, 1984.
- [20] YANNAS, S., MALDONADO, E., PASCOOL handbook - Designing for summer comfort. Londres: Architectural Association Graduate School, 1995.
- [21] Chel, A., Nayak, J.K., Kaushil, G., Energy conservation in honey storage building using Trombe wall, International Journal of Energy and Building, Vol.40, 2008, pp. 1643-1650.
- [22] ECOFASP. <ecofasp.br.tripod.com>. Acesso em: 19 nov. 2015.
- [23] GIVONI, B. Passive and Low Energy Cooling of Buildings. Londres: John Wiley & Sons, 1994.
- [24] VERDELHO, S. I. C., Avaliação do potencial de arrefecimento de edifícios através da ventilação natural. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios), Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [25] ALLARD, F. Natural Ventilation in Buildings. Londres: James & James, 1998.
- [26] MUSSKOPF, Estudos exploratórios sobre ventilação natural por tubos enterrados (2006):
- [27] FISK; TURIEL, Heat Exchangers: Performance, Energy Savings and Economics, 1995.
- [28] Lengen, J. Manual do arquiteto descalço. Porto Alegre: Livraria do Arquiteto (2004)
- [29] Manioglu e Yilmaz, Economic Evaluation Of The Building Envelope And Operation Period Of Heating System In Terms Of Thermal Comfort, Energy And Buildings, vol.38, (2006), 266.
- [30] VALÉRIO, Jorge Gustavo Marques Alface Pereira. Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e energético de Edifícios Residenciais Correntes. Instituto Técnico de Lisboa. 2007.
- [31] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Normais climatológicas. Disponível em: <<http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>>. Acesso em: 20 jan. 2014.
- [32] RCCTE, Diário da República. N.º 67 de 4 de abril de 2006.
- [33] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Clima de Portugal Continental. Disponível em: <<https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/>>. Acesso em: 20 jan. 2014.
- [34] WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis. In: BUILDING SIMULATION, 9., 2005, Montreal. Proceedings... Montreal: IBPSA, 2005. p. 1331-1338.
- [35] LAMBERTS, R. A Casa Eficiente. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/casaeficiente/br/arquivos/arquivo1.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2014.

- [36] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Disponível em: <<http://www.keysight.com/en/pd-429828-pn-34980A/multifunction-switch-measure-unit?cc=PT&lc=eng>>. Acesso em: 19 nov. 2015.
- [37] TESTO. Disponível em: <<https://www.testo.pt/produto/0614+0235/Sonda-de-elevada-exatidao-imersao-penetracao-Pt100-incl-pr-#tab-8>>. Acesso em: 19 nov. 2015.
- [38] HUKSEFLUX. Disponível em: <<http://www.hukseflux.com/product/sr20-d2-pyranometer>>. Acesso em: 19 nov. 2015.
- [39] Energyplus - Weather data. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_simulation.cfm>.
- [40] Centro de Geofísica de Évora. Disponível em: <http://www.cge.uevora.pt/pt/component/cge_bd/?cge_bd_e_first=mit>. Acesso em 08 abr. 2015.
- [41] Energyplus - Auxiliary Programs Document.
- [42] Energyplus - Engineering Guide Document.
- [43] Analysis Sol-Ar, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade de Santa Catarina.
Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/analysis-sol-ar>>. Acesso em: 08 abr. 2014.