

Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto

**RELAÇÃO ENTRE O NÍVEL DE ISOLAMENTO
TÉRMICO DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS E O
POTENCIAL DE SOBREAQUECIMENTO NO VERÃO**

Karin Maria Soares Chvatal

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Civil

Porto
Abril 2007

Esta pesquisa de Doutorado teve o apoio da FCT- Fundação para a Ciência e a
Tecnologia

Resumo

Há uma tendência para a prescrição de restrições cada vez mais severas para o isolamento da envolvente nos edifícios nas regulamentações europeias, particularmente devido à recente Directiva sobre o Desempenho Energético dos Edifícios. O objectivo desta pesquisa é investigar a influência do aumento do isolamento da envolvente no desempenho térmico dos edifícios em Portugal e em climas do Sul Europeu, com ênfase no período do Verão. Os benefícios com o aumento da espessura do isolamento são evidentes numa situação típica de Inverno. No entanto, no Verão, em certas condições, uma envolvente altamente isolada pode dificultar a dissipação do calor para o exterior, causando um aumento da temperatura interior acima do limite de conforto.

A metodologia desenvolvida compreende estudos paramétricos obtidos em simulações computacionais. São considerados distintos modelos de edifícios, com diferentes espessuras de isolamento da envolvente, e distintos ganhos internos, padrões de ventilação e taxas de sombreamento. Dessa forma, é possível investigar a interdependência de vários parâmetros no desempenho térmico e fazer análises comparativas. São avaliadas as condições nas quais o sobreaquecimento ocorre, e as suas consequências, tanto em termos do conforto dos ocupantes, quanto do aumento do consumo de energia para arrefecimento e a correspondente potencial eliminação das poupanças de Inverno. Para a análise do conforto, utiliza-se uma metodologia baseada na Abordagem Adaptativa.

Os resultados mostraram que, quando o isolamento da envolvente é aumentado, a fim de que se possa evitar o sobreaquecimento excessivo, no Verão, é necessário controlar rigorosamente os ganhos internos e solares. Finalmente, foi desenvolvido um modelo teórico simplificado, que possibilita a previsão da temperatura média do ar no interior de edifícios multizona, sem condicionamento artificial. Esse modelo foi aplicado para casos representativos dentre os simulados e apresentou resultados fidedignos. Através dele, é possível determinar-se se a temperatura interior aumenta ou diminui, com o aumento do isolamento da envolvente, permitindo, portanto, otimizar o processo de especificação deste importante parâmetro do edifício.

Abstract

There is a tendency for prescribing more and more severe restrictions for the building envelope insulation in the European legislations, in particular after the recent European Directive on the Energy Performance of Buildings. This research aims at establishing the impact of the increase of the envelope insulation upon the Summer thermal performance of buildings in Portugal and Southern European climates. The benefits of increasing the insulation thickness are evident in a typical Winter situation. However, under certain conditions, during Summer, a highly insulated envelope turns heat dissipation towards the exterior difficult, contributing to increased internal temperatures above the comfort limits.

The methodology is based on parametric studies obtained through computational simulations. Distinct building models were considered, with various internal gains, ventilation patterns and shading factors. In this way, it is possible to investigate the influence of various parameters upon the thermal building behaviour, and to make comparative analyses. It is investigated when overheating occurs and the consequences in terms of both occupant comfort and cooling consumption increase, which can undermine the Winter energy savings. The comfort analysis methodology is based on the Adaptive Approach.

The results show that, with added insulation, it is necessary to control solar and internal gains more closely to avoid overheating in Summer. Finally, a simple theoretical model, that calculates the buildings average interior temperature, was developed. The model was applied for the simulated cases and it produced good results.

Résumé

On peut constater une tendance actuelle de la réglementation européenne vers la prescription de restrictions de plus en plus sévères en ce qui concerne l'isolement thermique de l'enveloppe des bâtiments, conformément à la Directive Européenne pour la Performance Énergétique des Bâtiments. L'objectif de cette recherche est celui d'étudier l'influence de l'augmentation de l'isolement de l'enveloppe sur la performance thermique des bâtiments au Portugal et aux pays du Sud de l'Europe, en donnant une attention particulière aux conditions d'Été. Les avantages de l'isolement thermique sont évidents pendant l'Hiver. Cependant, en Été, dans certaines conditions, une enveloppe trop isolée peut diffuser la dissipation de la chaleur vers l'extérieur, ayant comme conséquence une élévation de la température de l'ambiance intérieure au-dessus du limite de confort.

La méthodologie adoptée consiste en des études paramétriques effectuées par des simulations numériques. Ceux-ci permettent une comparaison de la performance thermique et de la consommation annuelle d'énergie de différents scénarios d'un même immeuble avec d'épaisseurs d'isolant différentes. On considère des typologies d'immeuble différentes et on fait varier d'autres paramètres tels que les apports internes, la ventilation et l'ensoleillement. De cette façon, on peut évaluer l'interdépendance de plusieurs paramètres et faire des analyses comparatives. On identifie les conditions où la surchauffe se fait sentir et ses conséquences en ce qui concerne le confort thermique des usagers et aussi l'augmentation de la consommation d'énergie pour le refroidissement et son potentiel d'élimination des économies d'Hiver. Pour l'analyse du confort, on utilise une méthodologie basée sur l'approche adaptative.

Les résultats ont montré que, afin d'éviter une surchauffe excessive pendant l'Été, il est nécessaire de contrôler très rigoureusement les apports internes et solaires. Finalement, un modèle analytique simplifié a été développé, permettant le calcul de la température moyenne de l'ambiance intérieure et, de cette façon, rendant possible l'étude des différents types de comportement, sans recours à la simulation numérique. Le modèle proposé a été appliqué aux différents scénarios étudiés et il a conduit à des résultats conformes à ceux des simulations.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Eduardo Maldonado pela oportunidade do doutoramento, pelo espírito crítico e pela seriedade na avaliação do trabalho. Agradeço também à Professora Helena Corvacho, pela disponibilidade que demonstrou desde o contacto inicial, por ter sido sempre receptiva quando necessário e por toda a contribuição que deu ao longo da pesquisa.

À FCT- Fundação para a Ciência e a Tecnologia, agradeço por ter fornecido a bolsa de estudos que possibilitou a minha dedicação ao trabalho.

A todos os colegas e às funcionárias da Secção de Fluidos e Calor, que acompanharam o processo, seja apenas no seu início, na parte final, ou durante todos esses anos. Agradeço especialmente à Rosa Silva, pelo auxílio no envio das versões finais corrigidas pelo correio. Fica também um agradecimento especial ao Manuel Lima, pela valiosa contribuição na parte de programação em C e ao José Luís Alexandre, pela disponibilidade e pelo essencial auxílio durante o desenvolvimento do modelo.

Agradeço às tantas pessoas que conheci e convivi no Porto, que foram companhia, apoio e amizade durante esta trajetória. Gostaria aqui de citar os nomes de algumas pessoas que foram presença marcante neste período: Ana Palmero, Andreia Malucelli, Antonio Miranda e Fernanda Campos. Fica aqui também um agradecimento especial à Ana, por todo o apoio e amizade, e pela ajuda na fase final de impressão, e ao Antonio, pelo auxílio com a encadernação e a entrega da tese.

Às minhas queridas amigas do Brasil, Alessandra Niero, Izabella Casadei, Renata Faccin e Valéria Zukeran, obrigada pela torcida, e por me mostrarem que “amigo é coisa pra se guardar do lado esquerdo do peito, mesmo que o tempo e distância digam não”.

Ao Daniel, agradeço por tudo, pelo companheirismo, paciência, apoio, compreensão e carinho sempre demonstrados.

Agradeço ao meu pai, que infelizmente já não está mais aqui para participar deste momento, mas que sempre me deu estrutura e apoio para a realização dos meus sonhos, e me ensinou o valor da disciplina, do compromisso e da seriedade.

E finalmente agradeço à minha mãe, amiga e companheira, que sempre me apoiou, compreendeu e incentivou as minhas decisões, e que sempre foi para mim um exemplo de determinação, inteligência e coragem.

Conteúdo

1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objectivos	5
1.3 Estrutura	6
2 Metodologia	9
2.1 Justificação	9
2.2 Esquema geral	11
2.3 Programa TRNSYS	11
2.3.1 Escolha do programa de simulação	11
2.3.2 Descrição do funcionamento do TRNSYS	14
2.4 Processo de simulação através do PARAM	16
2.4.1 Primeira etapa: criação manual dos ficheiros para o projecto-base	16
2.4.2 Segunda etapa: criação de ficheiros	19
2.4.2.1 Ficheiros de entrada do PARAM	19
2.4.2.2 Ficheiros com dados utilizados durante as simulações e no pós-processamento	20
2.4.3 Terceira etapa: simulações e pós-processamento	22
2.5 Análise do conforto	24
2.5.1 Análise do conforto em ambientes interiores	24
2.5.1.1 Abordagem analítica	25
2.5.1.2 Abordagem empírica	28
2.5.1.3 Diferenças entre as abordagens analítica e empírica	34
2.5.2 Metodologia de análise do conforto adoptada	38
2.5.2.1 Modelo adaptativo adoptado: SCATs	38
2.5.2.2 Caracterização dos períodos de desconforto	40
3 Estudos paramétricos: dados de entrada	45
3.1 Modelos de edifícios escolhidos	46
3.2 Esquema geral dos estudos paramétricos	46
3.2.1 Primeiro grupo de estudos paramétricos	47

3.2.2 Segundo grupo de estudos paramétricos	50
3.3 Área dos envidraçados e orientação em relação ao sol	53
3.4 Envolventes exterior e interior e espessura do isolamento	54
3.4.1 Envolventes adoptadas	54
3.4.1.1 Envolventes com inércia média a alta	54
3.4.1.2 Envolventes com inércia fraca	54
3.4.2 Propriedades termo-físicas das envolventes adoptadas	58
3.5 Ganhos internos	62
3.6 Ventilação	66
3.7 Sombreamento das janelas	67
3.8 Clima	69
3.9 Regime de controlo da temperatura interior	70
3.10 Quadro-resumo dos dados de entrada	73
4 Estudos paramétricos: resultados	77
4.1 Esclarecimentos gerais sobre o capítulo	77
4.1.1 Esclarecimentos gerais sobre os casos detalhados	77
4.1.2 Esclarecimentos gerais sobre os resultados para as utilizações como habitação e serviços	80
4.2 Descrição de casos detalhados	84
4.2.1 Edifício A	84
4.2.1.1 Edifício A, caso de referência	84
4.2.1.2 Edifício A, caso de referência, utilizado como serviços	87
4.2.2 Edifício B	89
4.2.2.1 Edifício B, caso de referência	89
4.2.2.2 Edifício B, caso de referência, com variação do sombreamento	92
4.2.2.3 Edifício B, caso de referência, com variação da ventilação	92
4.2.2.4 Edifício B, caso de referência, utilizado como serviços	93
4.2.3 Edifício C	96
4.2.3.1 Edifício C, caso de referência	96
4.2.3.2 Edifício C, caso de referência, utilizado como serviços	98
4.3 Resultados para a utilização como habitação	101
4.3.1 Análise do conforto	101
4.3.1.1 Edifício B, em Évora, com ventilação mínima	101
4.3.1.2 Parâmetros de conforto seleccionados para representar as situações analisadas	104

4.3.1.3 Edifício C, em Évora, com ventilação mínima	109
4.3.1.4 Edifício A, em Évora, com ventilação mínima	110
4.3.1.5 Edifício B, em Évora, com diferentes possibilidades de ventilação	111
4.3.1.6 Edifícios A e C, em Évora, com diferentes possibilidades de ventilação	113
4.3.1.7 Edifícios B e C, em Évora, com alteração da cor exterior	115
4.3.1.8 Edifícios A, B e C, nos climas restantes, com todas as possibilidades consideradas	117
4.3.1.9 Diferenças entre os edifícios A, B e C	119
4.3.2 Análise das necessidades energéticas	120
4.3.3 Considerações finais para a utilização como habitação	123
4.4 Resultados para a utilização como serviços	124
4.4.1 Análise do conforto	124
4.4.1.1 Parâmetros de conforto seleccionados para representar as situações analisadas	124
4.4.1.2 Diferenças entre os edifícios de habitação e serviços	124
4.4.1.3 Edifícios A, B e C, com ganhos internos padrão 3, em todos os climas, com ventilação mínima	128
4.4.1.4 Edifícios A, B e C, com ganhos internos padrão 2, em todos os climas, com ventilação mínima	131
4.4.1.5 Edifícios A, B e C, em todos os climas, com diferentes possibilidades de ventilação	136
4.4.1.6 Alteração da inércia dos edifícios B e C	140
4.4.1.7 Edifícios A, B e C, em todos os climas, com alteração da cor exterior	143
4.4.1.8 Diferenças entre os edifícios A, B e C	143
4.4.2 Análise das necessidades energéticas	144
4.4.3 Considerações finais para a utilização como serviços	147
4.5 Considerações finais sobre o capítulo	148

5 Desenvolvimento do modelo simplificado de previsão de sobreaquecimento **151**

5.1 Descrição geral	151
5.1.1 Objectivos	151
5.1.2 Descrição dos ganhos/perdas de calor de um edifício	152
5.1.3 Equações do modelo	158
5.2 Aplicação do modelo	162

5.2.1	Características dos casos seleccionados	162
5.2.2	Resultados	166
5.3	Aplicação prática e previsão do sobreaquecimento de um edifício através do modelo	169
5.3.1	Aplicação prática do modelo	169
5.3.2	Previsão do sobreaquecimento de um edifício através do modelo	180
5.4	Considerações finais	
5.4.1	Interpretação dos resultados das simulações através do modelo	189
5.4.2	Conclusões	196
6	Conclusões e sugestões de trabalhos futuros	199
6.1	Conclusões	199
6.2	Sugestões de trabalhos futuros	203
7	Referências bibliográficas	205
Anexo A	Ficheiro final de resultados do PARAM	213
Anexo B	Valores máximos e mínimos mensais da temperatura de conforto	215
Anexo C	Características geométricas dos edifícios A, B e C	217
Anexo D	Coeficientes globais de transferência de calor da envolvente	227
Anexo E	Factores solares das janelas utilizadas nas simulações	231
Anexo F	Valores mensais de temperatura do solo	233
Anexo G	Resultados para os edifícios B e C, utilizados como habitação, com ventilação mínima, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice	235
Anexo H	Resultados para os edifícios B e C, utilizados como habitação, com variadas possibilidades de ventilação, em Lisboa e no Porto	237
Anexo I	Resultados para os edifícios B e C, utilizados como habitação, com variadas possibilidades de cor exterior, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice	239
Anexo J	Resultados para os edifícios A, B e C, utilizados como serviços (ganhos internos padrão 3), em vários climas, com ventilação mínima	241
Anexo L	Resultados para os edifícios A, B e C, utilizados como serviços (ganhos internos padrões 2 e 3), em todos os climas, com diferentes possibilidades de ventilação	245
Anexo M	Obtenção da equação dos ganhos/perdas de calor pela envolvente exterior opaca	251

Lista de Figuras

2.1	Esquema geral da metodologia adoptada.	12
2.2	Principais ficheiros necessários para a simulação do desempenho térmico de edifícios através do TRNSYS.	16
2.3	Esquema do processo de simulação com a utilização do PARAM	17
2.4	Diagrama representativo do tratamento dos resultados.	23
2.5	Relação entre o PMV e a percentagem média de pessoas insatisfeitas, PPD, segundo o modelo de Fanger.	28
2.6	Proporção de indivíduos confortáveis em relação à temperatura média interior, em edifícios de serviços, no Paquistão.	33
2.7	Temperaturas de conforto previstas pelo método do PMV e medidas em campo, em edifícios naturalmente ventilados. Dados da base da ASHRAE.	35
2.8	Equações da temperatura de conforto correspondentes aos climas estudados.	41
2.9	Temperaturas exterior e interior, limites superior e inferior da zona de conforto e períodos de desconforto, durante 6 dias, no Verão, para a zona 1 do Edifício B, localizado no Porto, utilizado como edifício de serviços, com o padrão 3 de ganhos internos, factor solar dos envidraçados de 0,30, com ventilação mínima e com nível 4 de isolamento	43
3.1	Modelos de edifícios escolhidos	47
3.2	Esquema geral do primeiro grupo de estudos paramétricos	48
3.3	Esquema geral da série de estudos paramétricos do segundo grupo	51

	correspondente à variação de inércia	
3.4	Esquema geral das séries de estudos paramétricos do segundo grupo correspondentes às variações de clima, ventilação e cor das paredes exteriores	52
3.5	Percentagem de área de janelas em relação às áreas de cada fachada e à área útil de pavimento, para os edifícios A, B e C.	53
3.6	Desenhos esquemáticos das soluções adoptadas para as envolventes exterior e interior, com inércia média a alta	56
3.7	Desenhos esquemáticos das soluções adoptadas para as envolventes exterior e interior, com inércia fraca	58
3.8	Zonas ocupadas, horário de ocupação e elementos considerados, de acordo com o padrão de ganhos internos tipo 1, correspondente à utilização habitacional, para os edifícios A, B e C.	64
3.9	Zonas ocupadas, horário de ocupação e elementos considerados, de acordo com os padrões de ganhos internos tipo 2 e 3, correspondentes à utilização de serviços, para os edifícios A, B e C.	65
3.10	Regiões climáticas de Verão, em Portugal, e cidades escolhidas para as simulações.	69
4.1	Panorama geral dos tipos de análises conduzidos na secção 4.2	79
4.2	Panorama geral dos tipos de análise conduzidos para a utilização como habitação (secção 4.3)	82
4.3	Panorama geral dos tipos de análise conduzidos para a utilização como serviços (secção 4.4)	83
4.4	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício A, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	84
4.5	Temperaturas durante uma semana de Inverno. Edifício A, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	85
4.6	Temperaturas durante uma semana de Meia Estação. Edifício A, utilizado	85

	como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	
4.7	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	88
4.8	Temperaturas durante uma semana de Inverno. Edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	88
4.9	Temperaturas durante uma semana de Meia Estação. Edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	89
4.10	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	90
4.11	Temperaturas durante uma semana de Inverno. Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	91
4.12	Temperaturas durante uma semana de Meia Estação. Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	91
4.13	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com variados factores solares das janelas e nível de isolamento intermédio (nível 3).	92
4.14	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	93
4.15	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	94
4.16	Temperaturas durante uma semana de Inverno. Edifício B, utilizado como	95

	serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	
4.17	Temperaturas durante uma semana de Meia Estação. Edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	95
4.18	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	97
4.19	Temperaturas durante uma semana de Inverno. Edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	97
4.20	Temperaturas durante uma semana de Meia Estação. Edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	98
4.21	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	99
4.22	Temperaturas durante uma semana de Inverno. Edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	100
4.23	Temperaturas durante uma semana de Meia Estação. Edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	100
4.24	Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factor solar das janelas.	101
4.25	Ponto de viragem do factor solar para a percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima.	104

4.26	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, factor solar das janelas de 0,75 e variados níveis de isolamento da envolvente.	105
4.27	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, factor solar das janelas de 0,22 e variados níveis de isolamento da envolvente.	105
4.28	Parâmetros de conforto para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	107
4.29	Ponto de viragem do factor solar para a média do sobreaquecimento máximo por dia, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima.	108
4.30	Ponto de viragem do factor solar para os graus-hora de desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima.	108
4.31	Parâmetros de conforto para o edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	110
4.32	Parâmetros de conforto para o edifício A, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	111
4.33	Parâmetros de conforto e ponto de viragem para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	113
4.34	Parâmetros de conforto para o edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	114
4.35	Parâmetros de conforto para os edifícios B e C, utilizados como habitação, em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente, cor das paredes exteriores e factores solares das janelas.	116
4.36	Parâmetros de conforto para os edifícios A, B e C, utilizados como	119

	habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente, e factor solar das janelas de 0,75.	
4.37	Necessidades de energéticas para o edifício C, utilizado como habitação, em Évora.	122
4.38	Parâmetros de conforto para o edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), no Porto, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	125
4.39	Parâmetros de conforto para as variações de ganhos internos do edifício B, em Évora, com ventilação mínima, factor solar das janelas de 0,15 e variados níveis de isolamento da envolvente.	126
4.40	Parâmetros de conforto para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora e no Porto, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	129
4.41	Parâmetros de conforto para o edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), no Porto, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	130
4.42	Parâmetros de conforto para o edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 2), no Porto, Lisboa e Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	133
4.43	Parâmetros de conforto para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 2), no Porto, Lisboa e Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	134
4.44	Parâmetros de conforto para o edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 2), no Porto, Lisboa e Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	135
4.45	Parâmetros de conforto para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	137
4.46	Resultados para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com variadas possibilidades de inércia, ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	141
4.47	Resultados para o edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3),	142

	em Évora, com variadas possibilidades de inércia, ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.	
4.48	Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com variadas possibilidades de ventilação e inércia, factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).	143
4.49	Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora e Atenas, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente, cor das paredes exteriores e factores solares das janelas.	144
4.50	Parâmetros de conforto para os edifícios A, B e C, utilizados como serviços (ganhos tipo 3), em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente, e factor solar das janelas de 0,75.	144
4.51	Necessidades de energéticas para os edifícios A e B, utilizados como serviços	145
5.1	Ganhos/perdas de calor em cada zona de um determinado edifício multizona não condicionado artificialmente.	153
5.2	$(t_{im-p}-t_{em})$ calculadas e simuladas, para todos os 180 casos considerados para o edifício A	166
5.3	$(t_{im-p}-t_{em})$ calculadas e simuladas, para todos os 300 casos considerados para o edifício B	167
5.4	$(t_{im-p}-t_{em})$ calculadas e simuladas, para todos os 300 casos considerados para o edifício C	167
5.5	T_{im-p} calculada através do modelo para os quatro casos dos edifícios A, B e C	181
5.6	Valores de b_w para $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} = 0,10$	189
5.7	Valores de b_w para $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} = 0,20$	190

5.8	Valores de b_w para $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} = 0,30$	190
5.9	Valores de b_w para $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} = 0,40$	191

Lista de Tabelas

2.1	Informações dos ficheiros <i>bui</i> e <i>dck</i> do projecto-base utilizadas na criação desses mesmos ficheiros para os casos derivados	19
2.2	Ficheiros de entrada do PARAM ⁽¹⁾	21
2.3	Votos médios previstos e sensações térmicas correspondentes, de acordo com o modelo de Fanger.	27
2.4	Escala da ASHRAE e de Bedford para a avaliação subjectiva das condições térmicas do ambiente	29
2.5	Factores de expectativa para edifícios não condicionados em climas quentes	37
2.6	Temperaturas de conforto obtidas no projecto SCATs	40
2.7	Mínimos e máximos valores para a temperatura de conforto, calculada de acordo com o modelo do SCATs.	41
2.8	Parâmetros definidos para caracterizar os períodos de desconforto	44
3.1	Soluções adoptadas para as envolventes exterior e interior, com inércia média a alta	55
3.2	Níveis de isolamento da envolvente exterior	55
3.3	Soluções adoptadas para as envolventes exterior e interior com inércia fraca	57
3.4	Propriedades termo-físicas dos elementos das envolventes opacas	59
3.5	Propriedades termo-físicas das superfícies	60
3.6	Propriedades dos vidros e caixilhos	60
3.7	Coeficientes globais de transferência de calor das envolventes com inércia média a alta	61

3.8	Coeficientes globais de transferência de calor das envolventes com inércia fraca	62
3.9	Ganhos internos médios, em W/m^2 , para os três padrões de ganhos internos.	63
3.10	Horários e taxas de infiltração adoptados	67
3.11	Factores solares das janelas correspondentes às diferentes possibilidades de sombreamento	68
3.12	Propriedades do dispositivo de sombreamento.	68
3.13	Dados climáticos médios mensais para o Porto, Lisboa e Évora	71
3.14	Dados climáticos médios mensais para Atenas e Nice	72
3.15	Períodos de Verão e Inverno para todos os climas estudados.	72
3.16	Quadro-resumo dos dados de entrada dos estudos paramétricos	74
4.1	Aumento ou redução da percentagem de horas com desconforto, no Verão, conforme se acrescenta isolamento à envolvente do edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima.	103
4.2	Redução do desconforto, ao se utilizar cores mais claras nas paredes exteriores, para o edifício B, com nível 1 de isolamento e factor solar de 0,75, em Évora	117
4.3	Comparação entre o desconforto no edifício A, com dois tipos de ganhos internos.	127
4.4	Comparação entre o desconforto no edifício B, com dois tipos de ganhos internos.	127
4.5	Comparação entre o desconforto no edifício C, com dois tipos de ganhos internos.	127
4.6	Graus-hora de desconforto para os edifícios A, B e C, com ventilação mínima, padrão 3 de ganhos internos, nível 3 de isolamento e factor solar de 0,75, em todos os climas analisados.	131
4.7	Percentagem de horas de desconforto para os edifícios A, B e C, com ventilação mínima e padrões 2 e 3 de ganhos internos, nível 3 de isolamento e factor solar de 0,15, no Porto, Lisboa e Évora.	132

4.8	Percentagem de horas de desconforto para os edifícios A, B e C, com variados padrões de ventilação e de ganhos internos, nível 3 de isolamento e factor solar de 0,15, no Porto, Lisboa e Évora.	138
4.9	Casos dentre os analisados para o edifício A, com ventilação, nos quais o sobreaquecimento ocorre em menos de 15% do tempo ocupado, para qualquer nível de isolamento	139
4.10	Casos dentre os analisados para o edifício B, com ventilação, nos quais o sobreaquecimento ocorre em menos de 15% do tempo ocupado, para qualquer nível de isolamento	139
4.11	Casos dentre os analisados para o edifício C, com ventilação, nos quais o sobreaquecimento ocorre em menos de 15% do tempo ocupado, para qualquer nível de isolamento	139
4.12	Tipos de resultados encontrados para todos os casos simulados para a utilização de serviços, com relação às necessidades energéticas	147
5.1	Casos de edifícios multizona seleccionados para aplicação do modelo	163
5.2	Valores adoptados para as variáveis pertencentes às equações do modelo (equações 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24)	164
5.3	Valores adoptados para as variáveis pertencentes às equações do modelo (equações 5.25, 5.26 e 5.19)	165
5.4	Diferenças entre as temperaturas médias interiores ponderadas (t_{im-p}) calculadas e simuladas (°C)	168
5.5	Aplicação do modelo para o edifício A (combinação 1)	170
5.6	Aplicação do modelo para o edifício A (combinação 2)	170
5.7	Aplicação do modelo para o edifício A (combinação 3)	171
5.8	Aplicação do modelo para o edifício A (combinação 4)	171
5.9	Aplicação do modelo para o edifício B (combinação 1)	172
5.10	Aplicação do modelo para o edifício B (combinação 2)	172
5.11	Aplicação do modelo para o edifício B (combinação 3)	173
5.12	Aplicação do modelo para o edifício B (combinação 4)	173

5.13	Aplicação do modelo para o edifício C (combinação 1)	174
5.14	Aplicação do modelo para o edifício C (combinação 2)	174
5.15	Aplicação do modelo para o edifício C (combinação 3)	175
5.16	Aplicação do modelo para o edifício C (combinação 4)	175
5.17	Temperaturas médias interiores ponderadas (t_{im-p}) calculadas e simuladas (°C)	180
5.18	Resultados da aplicação do modelo para as quatro combinações do edifício A	182
5.19	Resultados da aplicação do modelo para as quatro combinações do edifício B	182
5.20	Resultados da aplicação do modelo para as quatro combinações do edifício C	182
5.21	Valores de b_w e outros factores para os edifícios B e C	188
5.22	Variáveis da equação 5.41 para casos variados do edifício B	195
5.23	Variáveis da equação 5.41 para casos variados do edifício C	196

Capítulo 1 Introdução

Este Capítulo introdutório fornece um enquadramento do tema da pesquisa, expondo o panorama a partir do qual o assunto do estudo foi originado (secção 1.1). São também apresentados os objectivos do trabalho (secção 1.2) e a estrutura na qual o mesmo foi organizado (secção 1.3).

1.1 Enquadramento

A preocupação com a utilização racional de energia nos edifícios surgiu no período posterior à primeira crise internacional do petróleo, em 1973. O aumento significativo do custo da energia, acrescido da constatação de que as suas fontes não são ilimitadas e do impacto ambiental relativo à sua utilização, fomentaram iniciativas, medidas e pesquisas que estimulassem a eficiência energética. Desde então, muitos países passaram a adoptar medidas legais e regulamentações com o objectivo de estabelecer certos níveis mínimos de desempenho térmico para os edifícios, as quais têm sido gradativamente alteradas, de modo a acompanhar a evolução do conhecimento referente ao tema.

Em Portugal, a primeira regulamentação, denominada RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) [1], entrou em vigor no início de 1991. A intenção principal desse regulamento foi a de melhorar as condições de conforto no interior dos edifícios, que eram, em geral, tradicionalmente insatisfatórias, encorajando a obtenção desse conforto sem o gasto excessivo de energia. Apesar de apresentar exigências relativamente pouco severas, se comparado com os regulamentos

de outros países europeus da mesma época, foi um dos primeiros que levou em consideração o conforto no Verão, impondo também limites às necessidades anuais de arrefecimento para prevenir o sobreaquecimento e reduzir a necessidade de condicionamento artificial de ar [2]. Posteriormente, em 1992 e em 1998, surgiram os RQSECE (Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios) [3] e o RSECE (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios) [4], nos quais foram estabelecidas exigências de concepção e instalação de sistemas, tendo em vista a sua racionalização energética.

A assinatura, por parte da União Europeia, do Protocolo de Quioto, obrigou os países membros a definirem medidas de acção que incentivassem a utilização prudente e racional dos recursos energéticos de forma a reduzir a emissão dos gases de dióxido de carbono para a atmosfera. O sector residencial e terciário, composto maioritariamente pelos edifícios, é foco de grande atenção, por ser o responsável por mais de 40% do consumo final de energia da União. Dentro desse contexto surgiu a Directiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios [5], a qual estabeleceu uma série de requisitos com o objectivo de promover a melhora do desempenho energético e dessa forma atender aos compromissos assumidos no Protocolo de Quioto.

De forma resumida, as principais exigências da Directiva são as seguintes:

- adopção de uma metodologia integrada de cálculo do desempenho energético dos edifícios;
- estabelecimento de requisitos mínimos para o projecto de novos edifícios ou para os antigos, sujeitos a grandes obras de renovação;
- obrigatoriedade de implantação da certificação energética dos edifícios;
- implantação da necessidade de inspecção regular das caldeiras e instalações de ar condicionado dos edifícios.

Todos os países membros deveriam ter que implementar as exigências supracitadas nas suas regulamentações nacionais até 4 de Janeiro de 2006. Com o intuito de auxiliar essa implementação, foi publicada uma série de novas normas Europeias [6].

Dessa forma, em Portugal, tanto o RCCTE quanto o RSECE foram sujeitos, recentemente, a uma revisão [7] [8], além de ter sido legalmente implantada a certificação energética dos edifícios [9], conforme estabelecido na Directiva.

Dentre muitas das consequências práticas da aplicação dessa Directiva, uma é a que impulsionou a condução desta pesquisa: a prescrição de *restrições mais severas para o isolamento da envolvente nos edifícios*. Há uma alta pressão da indústria [10] e da própria União Europeia [11] para que se aumente o nível do isolamento da envolvente de todos os tipos de edifícios na Europa. Por exemplo, no novo RCCTE, as exigências para o nível de isolamento da envolvente aumentaram aproximadamente 50%, e tendências similares são visíveis em muitos países [12].

O enfoque da adopção desse tipo de medida é a redução do consumo energético devido ao aquecimento. Os benefícios de se aumentar o isolamento são evidentes numa situação típica de Inverno, pois quanto menor for o coeficiente de transmissão térmica, menores serão as perdas pela envolvente, e consequentemente, menor o gasto com aquecimento. Em países com estações de aquecimento prolongadas e Verões amenos e curtos (por exemplo, os do Norte Europeu), o consumo de energia pode ser consideravelmente reduzido através da adopção de envolventes altamente isoladas.

No entanto, numa situação de Verão, os benefícios já não são tão evidentes, principalmente quando se trata de ambientes não condicionados. Há certas condições, quando os ganhos internos e/ou solares não são adequadamente controlados, nas quais uma envolvente altamente isolada dificulta a dissipação desses ganhos para o exterior, contribuindo para a elevação das temperaturas internas, eventualmente acima dos limites de conforto. Esse problema pode ser encontrado nos países do sul da Europa, que possuem longos períodos de Verão, altas temperaturas externas e elevada incidência

de radiação solar, ou também em climas frios, desde que os ganhos internos ou solares sejam suficientemente elevados.

As regulamentações dos países do Sul Europeu anteriores à exigência de revisão proposta pela Directiva, apresentavam valores de coeficiente global de transmissão térmica da envolvente (U) mais altos, se comparados com os situados mais ao Norte [13]. Com as novas exigências regulamentares, este é o momento propício e necessário para a avaliação do impacto que envolventes mais isoladas terão no desempenho de Verão de edifícios nessas regiões.

Tradicionalmente, nas construções do Sul Europeu, habitacionais ou de pequenos serviços, o ar condicionado não é usualmente necessário. As soluções arquitectónicas são bem adaptadas a esses climas, por meio da alta inércia térmica, boa protecção solar e provisões para ventilação nocturna. No entanto, se forem feitas alterações nos desenhos desses edifícios e o conforto for importante para os ocupantes, o sobreaquecimento pode levá-los a instalarem ar condicionado, o que contribuiria para o aumento do consumo efectivo de energia. Dessa forma, as poupanças energéticas obtidas no Inverno com o aumento do isolamento podem até chegar a ser anuladas. Acrescenta-se a essa questão, como fonte de preocupação adicional, o facto de que indicadores revelam que as vendas de equipamento de ar condicionado na Europa têm aumentado muito rapidamente nas duas últimas décadas, em média 10% ou mais, por ano, e essa taxa pode tornar-se ainda maior através da adição de mais isolamento às envolventes sem que sejam tomadas medidas adequadas para prevenir o sobreaquecimento [14].

Há uma série de trabalhos que tratam dos benefícios do aumento do isolamento no que se refere à economia de energia com o aquecimento [15] [16] [17] [18], mas há ausência de estudos sistematizados que tratem dos impactos no Verão, e do resultado combinado dos consumos de aquecimento e arrefecimento nessas situações. Dentro deste panorama surgiu este trabalho, no qual se tenciona investigar a influência do aumento do isolamento da envolvente no desempenho térmico dos edifícios em Portugal e em climas do Sul Europeu, em especial durante o Verão, considerando-se a hipótese de

sobreaquecimento nesse período. Procura-se avaliar em que condições o sobreaquecimento ocorre, e as suas consequências, tanto em termos do conforto dos ocupantes, quanto do aumento do consumo de arrefecimento e da potencial eliminação das poupanças de Inverno.

Para avaliar o impacto do aumento do isolamento foi desenvolvida uma metodologia que compreende estudos paramétricos obtidos em simulações computacionais. Estes permitem a comparação entre o desempenho térmico e o consumo de energia anual de casos de um mesmo edifício com diferentes espessuras de isolamento da envolvente. São considerados distintos modelos de edifícios, conjugados a variações de outros parâmetros, como os ganhos internos, a ventilação e o sombreamento. Dessa forma, é possível investigar a interdependência de vários outros parâmetros no desempenho térmico e fazer análises comparativas. Finalmente, como proposta final do trabalho, é desenvolvido um modelo teórico simplificado, cuja intenção é viabilizar análises expeditas referentes às condições interiores do edifício, especialmente no período do Verão, com aplicação directa em uma possível futura regulamentação.

1.2 Objectivos

São objectivos desta pesquisa:

1. Avaliar o impacto do aumento do isolamento da envolvente exterior dos edifícios no seu desempenho térmico, em especial no período de Verão. Verificar as hipóteses de ocorrência de sobreaquecimento, tanto em habitações, quanto em pequenos edifícios de serviços, para climas de Portugal e do Sul Europeu.
2. Verificar em que situações específicas ocorre sobreaquecimento do ambiente interior com o aumento do isolamento. Propor uma metodologia de análise que integre os factores que interferem no desempenho térmico do edifício, que

podem incrementar ou amenizar o sobreaquecimento verificado, como o sombreamento, a ventilação, os ganhos internos, entre outros.

3. Definir um critério de análise das condições de conforto nos ambientes interiores, a fim de que seja possível avaliar quando a temperatura interior se encontra fora dos limites aceitáveis pelos utentes.
4. Verificar se há aumento das necessidades energéticas de arrefecimento devido ao acréscimo de isolamento e em caso positivo, se o mesmo é suficiente para eliminar as poupanças de Inverno. Verificar em que tipo de situações isso ocorre, nos climas analisados.
5. Propor um modelo simplificado que possibilite a previsão das temperaturas interiores durante o Verão, a fim de auxiliar na identificação de possíveis situações de sobreaquecimento de forma objectiva e simples.

1.3 Estrutura

O presente trabalho é dividido em sete Capítulos:

Capítulo 1. Introdução

Capítulo 2. Metodologia

Apresenta-se a justificativa e a descrição detalhada da metodologia desenvolvida para atender aos objectivos da pesquisa, a qual consiste em estudos paramétricos obtidos em simulações computacionais. Como a questão do sobreaquecimento é de fundamental importância, é feita neste Capítulo uma revisão de literatura sobre métodos de avaliação do conforto térmico, necessária para a selecção de um critério de avaliação das condições ambientais dos casos simulados nos estudos paramétricos.

Capítulo 3. Estudos paramétricos: dados de entrada

Nesse Capítulo são detalhados todos os dados de entrada dos estudos paramétricos: os modelos de edifícios adotados e suas respectivas características, tais como taxa de sombreamento dos envidraçados, elementos construtivos utilizados, padrões de ocupação e ventilação, entre outras. São apresentadas todas as possibilidades de variação previstas para cada um desses dados de entrada e as combinações consideradas nos estudos paramétricos.

Capítulo 4. Estudos paramétricos: resultados

Apresentação e discussão dos resultados dos estudos paramétricos propriamente ditos.

Capítulo 5. Desenvolvimento do modelo simplificado de previsão de sobreaquecimento

Neste Capítulo é desenvolvido um modelo teórico simplificado para o cálculo da temperatura média do ar no interior de um edifício não condicionado artificialmente, o qual pode ser utilizado para prever as condições interiores, e auxiliar na previsão da possibilidade de ocorrência de situações de desconforto.

Capítulo 6. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

É feito um sumário de todo o conteúdo da tese, dos resultados encontrados e das principais conclusões obtidas. São apresentadas as limitações da pesquisa e sugestões para novos trabalhos.

Capítulo 7. Referências bibliográficas

Capítulo 2 Metodologia

O presente Capítulo descreve a metodologia desenvolvida para atender ao propósito fundamental deste trabalho, que é avaliar o efeito do aumento do isolamento da envolvente dos edifícios no seu desempenho térmico e nas suas necessidades nominais anuais de energia, tendo em conta o possível aumento da ocorrência de sobreaquecimento no Verão, potencial geradora de recurso a ar condicionado.

A metodologia compreende basicamente estudos paramétricos obtidos em simulações computacionais, conforme apresentado na justificação (secção 2.1) e na apresentação do seu esquema geral (secção 2.2). Apresentam-se também as ferramentas que viabilizaram este processo: o programa TRNSYS [19], adoptado para a simulação do comportamento térmico dos edifícios (secção 2.3), e o programa PARAM, criado no âmbito do presente trabalho para efectuar os estudos paramétricos e o posterior tratamento dos dados (secção 2.4). Devido à complexidade da metodologia de análise do conforto que foi adoptada, na secção 2.5 apresenta-se uma revisão de literatura sobre os principais métodos disponíveis para avaliação do conforto e, em seguida, o critério escolhido para análise das condições ambientais dos edifícios simulados nos estudos paramétricos.

2.1 Justificação

Procurou-se desenvolver uma metodologia que possibilitasse a avaliação do impacto do aumento do isolamento da envolvente dos edifícios no seu desempenho térmico e no seu consumo de energia (nomeadamente o aquecimento e o arrefecimento). Ênfase deveria ser dada às hipóteses levantadas anteriormente (Capítulo 1), de sobreaquecimento no

Verão e do consequente aumento do consumo energético neste período, que poderia ser suficientemente alto para eliminar as poupanças energéticas com o aquecimento no Inverno.

Não é possível analisar o impacto do aumento do isolamento nos edifícios isoladamente, pois há uma série de outros factores que também influenciam o desempenho térmico, sendo as condições ambientais interiores um resultado da combinação entre eles. A influência do isolamento também é função, por exemplo, dos ganhos internos, da área de janelas e do seu sombreamento, entre outros.

A forma mais simples de se alterar o isolamento de uma envolvente e verificar o seu efeito na resposta térmica do edifício é através de simulações computacionais. Há uma série de programas disponíveis que simulam com elevado grau de confiança o comportamento térmico dos edifícios através de métodos de cálculo complexos e fornecem como resultados as cargas térmicas e as temperaturas interiores horárias, entre outros. Pode-se escolher um determinado modelo de construção, com uma certa envolvente, variar aos poucos a sua espessura de isolamento, e verificar o que acontece em cada uma dessas alterações. Também é possível alterar outros parâmetros que influenciam o comportamento térmico do edifício e efectuar análises comparativas de modo a investigar o seu grau de inter-relação com o isolamento da envolvente.

Esses tipos de estudos comparativos são denominados *estudos paramétricos ou de sensibilidade*. Optou-se por essa alternativa, pois seria a melhor forma de avaliar o impacto do aumento do isolamento e sua interdependência com outros factores. A utilização de programas de simulação viabiliza esse método, através do qual é possível verificar a sensibilidade de determinados parâmetros através da sua alteração gradativa, conforme realizado em diversos estudos [20] [21] [22]. Os resultados são rápidos, confiáveis, de baixo custo e tem-se total controlo dos parâmetros envolvidos, com a garantia de que, ao se modificar uma variável, as outras permanecem constantes.

2.2 Esquema geral

A figura 2.1 apresenta um esquema geral da metodologia adoptada. Tem-se um determinado modelo de edifício (edifício X) e as variações paramétricas para as quais se deseja simular o desempenho térmico. Um dos parâmetros variados é o nível de isolamento da envolvente, cujo impacto deve ser analisado em conjunto com outros parâmetros que também influenciam o desempenho térmico do edifício. É feito o cruzamento entre todas as possibilidades, resultando numa grande quantidade de casos, derivados do modelo de edifício X e correspondentes a combinações únicas dos parâmetros variados. A seguinte etapa corresponde à simulação computacional do desempenho térmico de todos os casos gerados. O programa TRNSYS [19] foi o escolhido para este fim, e a justificação de sua escolha, bem como a descrição de seu funcionamento, são apresentados na sequência, na secção 2.3. Finalmente, durante o pós processamento, os resultados das simulações são tratados e organizados de forma a viabilizar a sua análise.

As combinações de todas as variações paramétricas para distintos modelos de edifícios resultaria numa grande quantidade de casos a serem simulados, os quais não poderiam ser corridos manualmente um a um. Para viabilizar o processo, criou-se um programa, denominado PARAM, o qual é apresentado na secção 2.4. O PARAM automaticamente cria os ficheiros necessários para simulação no TRNSYS, corre o programa para todos os casos e efectua o pós-processamento dos resultados.

2.3 Programa TRNSYS

2.3.1 Escolha do programa de simulação

A simulação energética de edifícios começou nos anos 60 e se tornou um tópico de grande interesse na década seguinte, devido à crise do petróleo. Os investimentos nessa área foram gradativamente reduzidos ao longo dos anos, mas um renovado incentivo

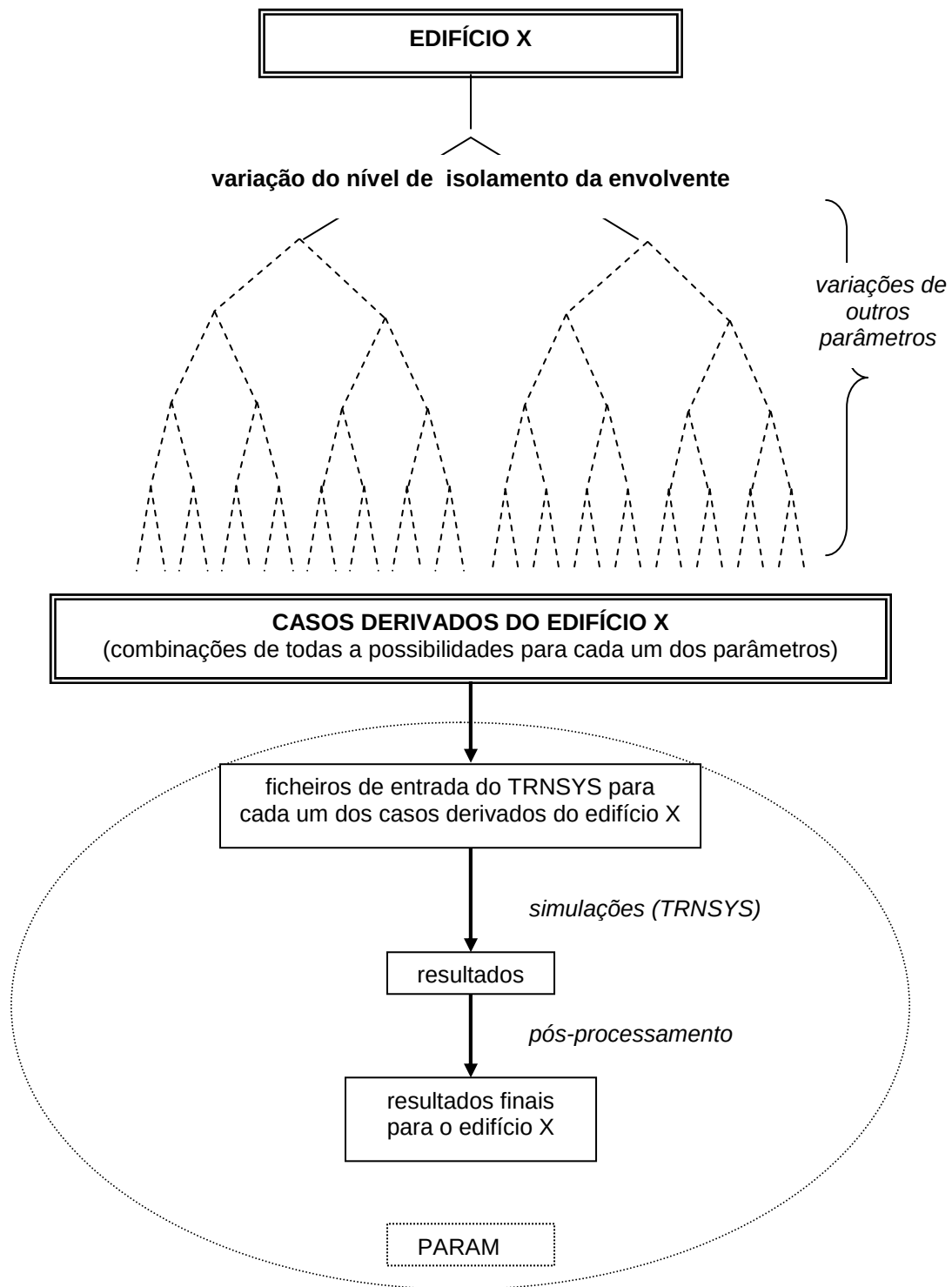


Figura 2.1 - Esquema geral da metodologia adoptada

surgiu com o advento dos computadores de uso pessoal, no início dos anos 80. Na década de 90, devido às crescentes preocupações energéticas e ambientais, esses programas, antes restritos à utilização académica, passaram a ser também adoptados por profissionais [23].

Efectuar a simulação de edifícios envolve entender a natureza do problema a ser resolvido, escolher o programa adequado, saber como utilizá-lo correctamente e finalmente, interpretar os resultados [23]. Actualmente, dentre os “softwares” mais difundidos para a simulação horária do desempenho térmico de edifícios, podem-se citar o ESP-r [24], o DOE [25], o TRNSYS [19] e o EnergyPlus [26]. O tipo de resultado que se desejava obter, ou seja, as cargas térmicas e a variação horária da temperatura, era fornecido por todos esses programas, sem distinção. As diferenças entre eles consistiam no método de cálculo em que se baseavam, na forma de entrada de dados e no formato de apresentação final dos resultados. Como todos permitiam a simulação somente de um edifício individualmente, e como desejava-se simular uma grande quantidade de casos, resultantes de variadas combinações, verificou-se que seria necessário criar um programa que efectuasse os estudos paramétricos automaticamente, independentemente do “software” de simulação escolhido. Optou-se pelo programa TRNSYS devido à sua estrutura modular e flexível, pois em uma primeira análise, avaliou-se que essa característica poderia facilitar tanto a elaboração do programa de estudos paramétricos, quanto a transparência do processo e a verificação do seu correcto funcionamento.

O TRNSYS tem sido uma ferramenta utilizada em variadas investigações em todo o mundo, bem como submetido a constantes revisões de suas versões, a fim de que seu funcionamento seja aprimorado e eventuais falhas ou limitações possam ser corrigidas. Para a avaliação do nível de confiabilidade de um programa de simulação do desempenho térmico de edifícios, há três formas específicas de validação [27]:

1. Validação empírica: comparação dos resultados do programa com dados experimentais, medidos num edifício real ou numa célula de teste.

2. Verificação analítica: comparação dos resultados do programa com os de um determinado método numérico ou solução analítica, com condições de fronteira bem definidas.
3. Testes comparativos: o programa em questão é comparado com ele mesmo ou com outros melhor validados ou mais detalhados.

Descrições de procedimentos para esses estudos de validação são prescritas em alguns documentos [28] [29] [30] [31]. O TRNSYS foi sujeito a verificações que utilizam esses procedimentos, juntamente com alguns dos “softwares” anteriormente citados, nomeadamente o DOE e o ESP-r [28] [29] [32]. As análises mostraram que nenhum desses programas se sobressaiu dos demais, com resultados dentro dos limites de erro previstos em todas as situações analisadas. Além disso, o TRNSYS é um dos poucos programas, dentre todos os analisados, que superaram todos os requisitos de exigência de qualidade estabelecidos na norma ASHRAE 140 [28].

2.3.2 Descrição do funcionamento do TRNSYS

O TRNSYS [19], comercializado desde 1975, é um programa bastante conhecido para a simulação de sistemas transientes. Devido à sua estrutura modular, é bastante versátil e pode ser utilizado nas mais diversas aplicações. O programa é composto por uma série de rotinas escritas na linguagem Fortran, denominadas “types”, que contêm modelos que descrevem componentes do sistema. A sua biblioteca engloba muitos dos componentes comumente encontrados em sistemas térmicos, bem como rotinas de apoio (para leitura de dados climáticos, conversão de unidades, cálculo da radiação nas superfícies, entre outras).

Cada rotina possui os seus específicos dados de saída (“outputs”) e de entrada (“parameters” e “inputs”). Os “parameters” permanecem fixos durante a simulação, enquanto que os “inputs” variam em função do tempo. Em algumas rotinas, os “inputs” devem ser fornecidos em ficheiros externos. Para se efectuar a simulação de um

sistema, são especificadas as rotinas a serem utilizadas no mesmo e definidas as interligações entre elas no ficheiro de entrada do TRNSYS (*.dck). Os “outputs” de uma são os “inputs” de outra, e assim por diante.

No que se refere aos interesses deste estudo, há uma rotina específica que efectua a simulação do comportamento térmico de um edifício multizona, denominada *type 56*. O método de cálculo de cargas térmicas adoptado pelo *type 56* é o das Funções de Transferência de Mitalas e Arseneault [19]. Grande parte dos dados a serem lidos por essa rotina devem constar em dois ficheiros externos (*.bld e *.trn). A figura 2.2 indica os principais ficheiros necessários para a simulação do desempenho térmico de edifícios através do TRNSYS. Os ficheiros *bld* e *trn* são automaticamente gerados através de um programa auxiliar, denominado *Bld*. O *Bld* utiliza como dado de entrada um outro ficheiro, em formato texto (*.bui). O ficheiro *bui* contém praticamente todas as características referentes ao edifício e à sua utilização, tais como as características geométricas, composição da envolvente, dados das superfícies envidraçadas e ganhos internos, entre outros. O ficheiro *bld* possui esses mesmos dados, mas com uma sintaxe específica para leitura pelo *type 56*. Já o ficheiro *trn* contém os coeficientes para as funções de transferência das paredes a serem utilizados no cálculo do comportamento térmico. Além destes, outro ficheiro essencial é o que fornece os dados climáticos horários a rotinas específicas, que são responsáveis pela leitura desses dados e pelo seu tratamento. Os dados de saída padrão do *type 56*, a temperatura interior e as cargas de aquecimento e arrefecimento (uma série de outras opções podem ser definidas no ficheiro *bui*), podem ser interligados a rotinas que permitem a sua visualização no écran ou em ficheiros-texto. Exemplos dos ficheiros *bui*, *bld*, *trn* e *dck* para alguns dos casos simulados nos estudos paramétricos conduzidos neste trabalho encontram-se no CD anexo à esta tese. Neste CD tem-se também todos os ficheiros de dados climáticos utilizados nas simulações.

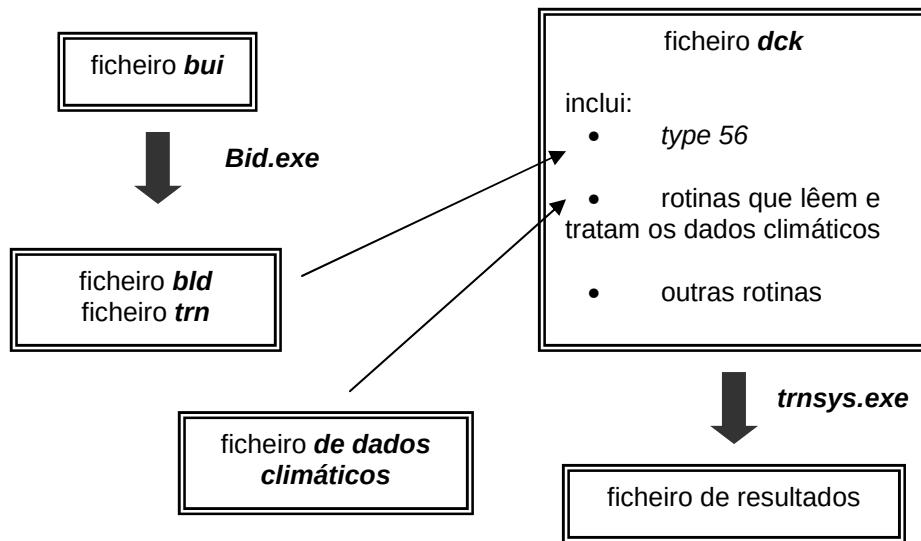


Figura 2.2 – Principais ficheiros necessários para a simulação do desempenho térmico de edifícios através do TRNSYS

2.4 Processo de simulação através do PARAM

O programa PARAM, escrito na linguagem C++, executa automaticamente o TRNSYS para todos os casos necessários e efectua o tratamento dos resultados. A sua listagem e o seu ficheiro executável encontram-se no CD anexo à esta tese.

A figura 2.3 mostra um esquema de todo o processo de simulação com a utilização do PARAM, que pode ser dividido em três etapas. Nas secções seguintes descreve-se cada uma delas. As informações apresentadas referem-se à metodologia de uma forma geral. No CD em anexo tem-se indicações mais detalhadas sobre essa metodologia aplicada aos estudos paramétricos deste trabalho, os quais por sua vez são descritos no Capítulo 3.

2.4.1 Primeira etapa: criação manual dos ficheiros para o projecto-base

O programa PARAM cria os ficheiros de entrada do TRNSYS (*bui* e *dck*) e executa-o

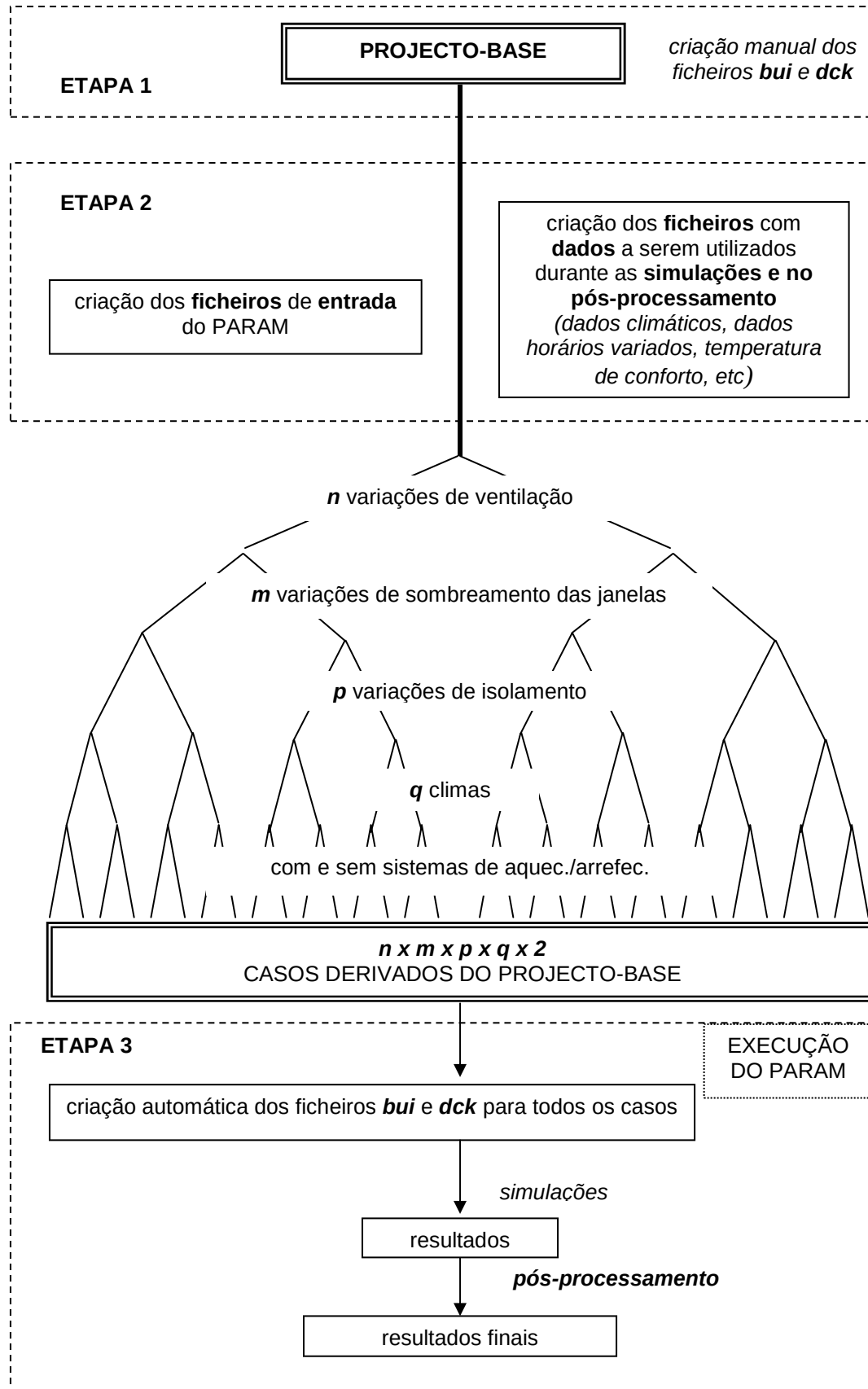


Figura 2.3 – Esquema do processo de simulação com a utilização do PARAM

para uma série de variações paramétricas oriundas de um determinado modelo de edifício, denominado *projecto-base* (figura 2.3). Ou seja, a partir do *projecto-base*, que possui algumas características previamente definidas, o programa permite que se efectue variações dos seguintes parâmetros, combinadas entre si:

- ventilação (caracterizada pela sua duração e intensidade, expressa pelo número de renovações de ar por hora);
- sombreamento das janelas (caracterizado pelo seu factor de sombreamento);
- espessura do isolamento da envolvente;
- clima.

Além disso, as simulações são sempre consideradas para dois cenários: sem e com sistemas de aquecimento e arrefecimento, a fim de que sejam avaliadas tanto as condições de conforto, quanto as necessidades energéticas. Dessa forma, caso haja n variações de ventilação, m de sombreamento, p de isolamento e q de climas, para um determinado *projecto-base*, tem-se ao todo $n \times m \times p \times q \times 2$ casos derivados.

Portanto, a primeira etapa consiste em criar manualmente os ficheiros das características do edifício (*.bui) e de entrada do TRNSYS (*.dck) para o *projecto-base*. Esses ficheiros não são utilizados em simulações, mas os dados neles contidos, lidos pelo PARAM, são posteriormente utilizados na criação dos ficheiros *bui* e *dck* dos casos derivados do *projecto-base*. Deles é copiada uma série de informações que não se altera durante todo o processo (tabela 2.1). No CD em anexo tem-se os ficheiros *bui* e *dck* para todos os *projectos-base* correspondentes aos estudos paramétricos deste trabalho.

Tabela 2.1 – Informações dos ficheiros *bui* e *dck* do projecto-base utilizadas na criação desses mesmos ficheiros para os casos derivados

Informações dos ficheiros <i>bui</i> e <i>dck</i> do projecto-base utilizadas na criação desses mesmos ficheiros para os casos derivados ⁽¹⁾
• Características geométricas de cada zona e sua orientação em relação ao sol (dimensões e orientação de cada superfície opaca e das janelas).
• Materiais constituintes de cada superfície opaca e suas espessuras (com excepção do isolamento, que posteriormente assume outros valores).
• Ganhos internos, caracterizados pela quantidade e tipos de fontes de ganho de calor (computadores, iluminação, pessoas, etc) a ocuparem o ambiente. Definição do ficheiro com dados horários (um ou zero), indicando os períodos nos quais esses ganhos efectivamente ocorrem na zona em questão.
• Configuração das rotinas do TRNSYS a serem utilizadas, com suas respectivas interligações.
⁽¹⁾ <i>Essas informações não se alteram durante as simulações.</i>

2.4.2 Segunda etapa: criação de ficheiros

A segunda etapa consiste na criação de uma série de ficheiros (figura 2.3):

- ficheiros de entrada específicos do PARAM;
- ficheiros com dados a serem utilizados durante as simulações e no pós-processamento.

2.4.2.1 Ficheiros de entrada do PARAM

Esses ficheiros-texto contêm tanto as informações necessárias sobre as variações paramétricas a serem consideradas, quanto as sobre o tratamento dos resultados (pós-processamento). Na etapa seguinte, o programa lê esses dados e os coloca nos ficheiros

bui e *dck*, a serem automaticamente criados para cada caso derivado do projecto-base. Uma breve descrição do conteúdo de cada um desses ficheiros de entrada é apresentada na tabela 2.2, e no CD anexo à esta tese tem-se uma descrição mais detalhada, com exemplos para um dos projectos-base simulados nos estudos paramétricos deste trabalho. Os ficheiros de entrada do PARAM para todos os projectos-base simulados também encontram-se no CD.

2.4.2.2 Ficheiros com dados utilizados durante as simulações e no pós-processamento

No CD anexo à esta tese, tem-se os ficheiros citados abaixo para todos os estudos paramétricos conduzidos neste trabalho.

- Ficheiros com dados climáticos horários: um ficheiro com os valores de temperatura, humidade relativa do ar e radiação solar total na superfície horizontal e outro com a temperatura do solo.
- Ficheiros com os períodos de Verão e Inverno: indicam quais são os meses de Verão e Inverno para os climas simulados.
- Ficheiros variados: contêm dados horários (normalmente 1 ou zero, correspondente a ligado / desligado ou ocorre / não ocorre) para uma série de parâmetros que variam ao longo do ano e que são utilizados pelo TRNSYS durante as simulações ou pelo PARAM no pós-processamento. Por exemplo, nos estudos paramétricos conduzidos nesta pesquisa, os ganhos internos, o aquecimento e o arrefecimento são previstos somente nos horários ocupados, enquanto que o sombreamento e a ventilação só são considerados no Verão. Os ficheiros com os dados horários para esses parâmetros são criados com o auxílio de um programa feito especialmente para tal fim, que gera esses dados de acordo com os períodos de utilização definidos.

Tabela 2.2 – Ficheiros de entrada do PARAM ⁽¹⁾

nome do ficheiro	conteúdo
<i>geral</i>	Área útil total e quantidade de zonas do edifício. Quantidade de variações paramétricas para ventilação, sombreamento, espessura do isolamento e clima.
<i>vent</i>	Taxas de ventilação consideradas, expressas em número de renovações por hora (RPH). Nome dos ficheiros com dados horários de controlo (1 ou zero), indicando existência ou não de ventilação (janelas abertas ou fechadas, respectivamente).
<i>sombr</i>	Número correspondente ao tipo de vidro das janelas com sombreamento. Nome dos ficheiros com os valores dos factores de sombreamento ⁽²⁾ .
<i>envolv</i>	Identificação das paredes com isolamento variável e espessuras consideradas.
<i>clima</i>	Nome dos ficheiros com os dados climáticos e com a temperatura do solo ⁽³⁾ horários.
<i>aqar</i>	Características dos sistemas de aquecimento e arrefecimento: - temperaturas de controlo para o Verão e Inverno; - nome dos ficheiros com dados horários de controlo (1 ou zero, liga/desliga); - zonas nas quais esses sistemas são considerados.
<i>infil</i>	Valor constante da infiltração de ar pelas janelas, quando há aquecimento e arrefecimento.
<i>ocup</i> ⁽⁴⁾	Nome do ficheiro com valores horários (1 ou zero), indicando se há ou não ocupação no edifício, para o pós-processamento dos dados.
<i>factor</i>	Indicação das zonas ocupadas, para o pós-processamento dos dados.

⁽¹⁾ Descrição detalhada dos ficheiros e exemplo no CD em anexo.

⁽²⁾ Os valores dos factores de sombreamento são especificados em um ficheiro com dados horários. Nos estudos paramétricos desta pesquisa, o factor de sombreamento assume um valor constante durante todas as horas do Verão, e é igual a zero no restante do ano.

⁽³⁾ A temperatura do solo é utilizada somente quando o edifício encontra-se em contacto com o mesmo.

⁽⁴⁾ Durante o pós-processamento dos dados, o período de ocupação é considerado sempre o mesmo para todas as zonas ocupadas. Os ganhos internos, que ocorrem somente durante esse período, são definidos previamente, no projecto-base (ver tabela 2.1).

- Ficheiros com os dados dos elementos construtivos: são dois ficheiros, um referente aos elementos opacos, outro referente aos vidros. O ficheiro com os elementos opacos é criado especialmente para leitura pelo PARAM. Inclui todas as paredes, coberturas e pavimentos a serem utilizados nas simulações, com indicação das suas propriedades térmicas e espessura de cada camada. O ficheiro referente aos vidros indica as suas propriedades térmicas e ópticas, e deve vir no formato específico para leitura pelo TRNSYS, podendo ser gerado pelo programa WINDOW [33](ver secção 3.4).
- Ficheiro com as temperaturas de conforto horárias para cada clima (ver secção 2.5.2, com explicação da metodologia adoptada para avaliação do conforto).

2.4.3 Terceira etapa: simulações e pós-processamento

Finalmente, a última etapa consiste simplesmente em correr o PARAM (figura 2.3). São automaticamente criados os ficheiros *bui* e *dck* do TRNSYS para cada caso a ser simulado, derivado do projecto-base. Em seguida, executa-se o *bid*, para a obtenção dos ficheiros *trn* e *bld*, e posteriormente o TRNSYS é executado, considerando duas situações: sem e com sistemas de aquecimento e arrefecimento. Finalmente, é feito o pós-processamento e os resultados finais são apresentados em um ficheiro-texto.

Os resultados brutos das simulações são as temperaturas horárias das zonas e as necessidades de arrefecimento e aquecimento (mensais e anuais) de cada caso simulado. O tratamento dos resultados, cujo diagrama representativo é apresentado na figura 2.4, engloba as análises do conforto e das necessidades energéticas.

A avaliação do conforto segue uma metodologia específica que, devido à sua complexidade, é descrita em detalhes na secção 2.5.2. Seus resultados são os parâmetros de conforto da tabela 2.8, para cada caso derivado do projecto-base. Durante esta análise são utilizados os ficheiros preparados na etapa anterior, que contém dados como a temperatura de conforto, o período de ocupação e a indicação das zonas ocupadas (figura 2.4).

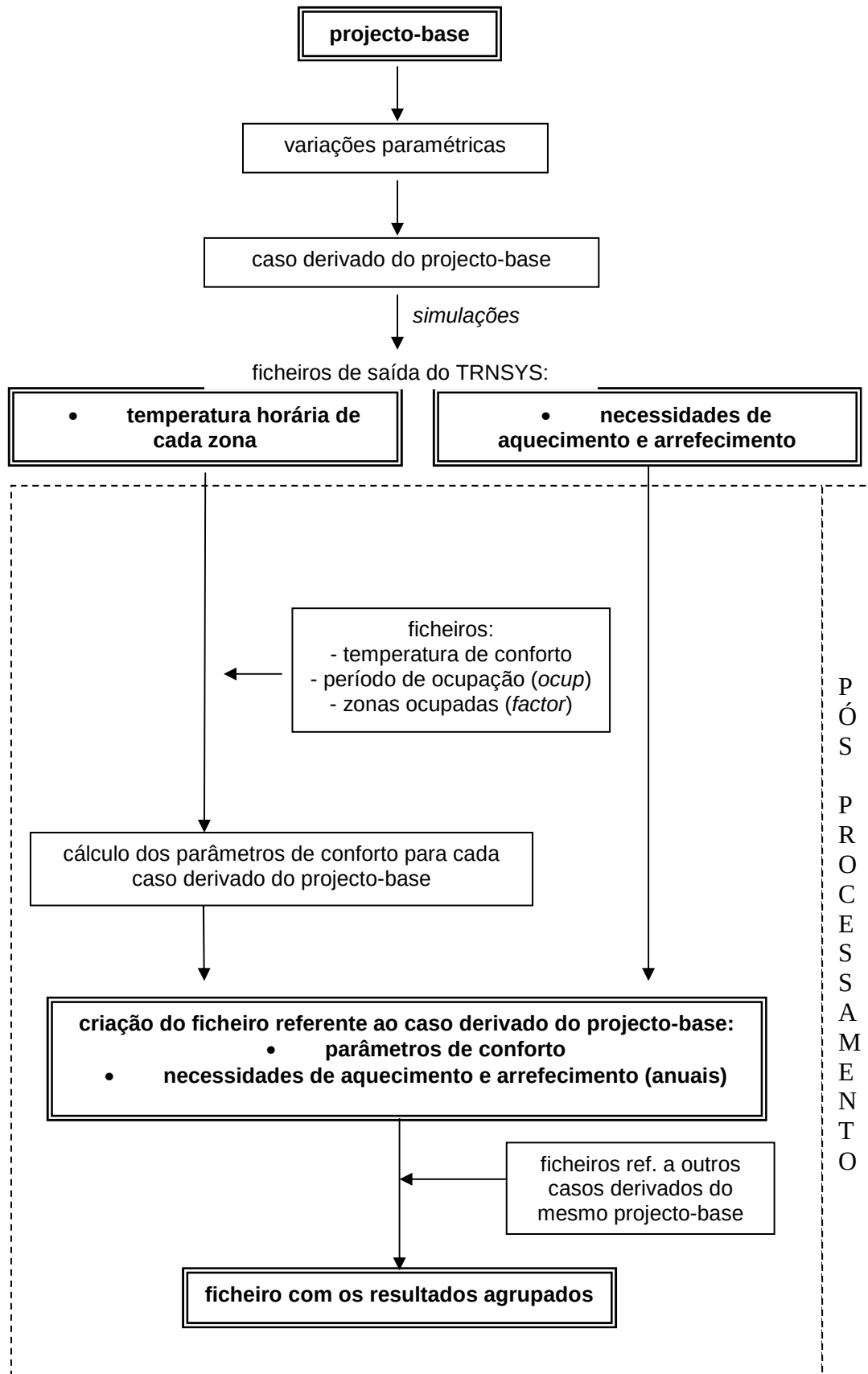


Figura 2.4 - Diagrama representativo do tratamento dos resultados

Quanto à análise das necessidades energéticas, os dados necessários são fornecidos directamente nos ficheiros de saída do TRNSYS: as necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais. Estas correspondem simplesmente à quantidade de energia fornecida ou extraída para que as temperaturas de controlo definidas sejam mantidas. Nas simulações, não é considerado nenhum equipamento específico para a climatização. Ao invés disso, utiliza-se uma opção dentro do TRNSYS, na qual define-se um controlo ideal para aquecimento e arrefecimento (ver secção 3.9).

Finalmente, os resultados obtidos para cada caso derivado do projecto-base são guardados num ficheiro-texto (figura 2.4). O programa também agrupa os resultados referentes à análise do conforto dos casos derivados de um mesmo projecto-base em outros ficheiros-texto, de modo a facilitar a sua visualização e permitir análises comparativas (vide exemplos do ficheiro com os resultados agrupados no Anexo A e no CD em anexo).

2.5 Análise do conforto

Nesta secção apresenta-se (1) uma revisão de literatura sobre os principais métodos disponíveis para avaliação do conforto e (2) o critério escolhido para análise das condições ambientais dos edifícios simulados nos estudos paramétricos.

2.5.1 Análise do conforto em ambientes interiores

As primeiras pesquisas que procuraram estabelecer critérios de conforto térmico para os ambientes interiores surgiram com a industrialização no início do século XX, e suas principais preocupações eram a saúde e a produtividade das pessoas nos seus ambientes de trabalho. No início dos anos 60, alterações nas relações de trabalho para uma visão mais humanista fizeram com que surgissem abordagens multidisciplinares, que englobavam conhecimentos nas áreas de Engenharia, Arquitectura, Medicina, Física e

Psicologia. Muitas pesquisas têm sido conduzidas desde então, inclusive em ambientes térmicos moderados, como moradias e edifícios de serviços, que são os edifícios de interesse para este trabalho. Actualmente, a literatura sobre o assunto é bastante extensa.

Segundo a definição mais amplamente utilizada, presente na norma ASHRAE 55 [34], conforto térmico é “a condição da mente que expressa satisfação com o seu ambiente térmico”. Para definir critérios de conforto, é essencial verificar quais são os factores que influenciam o bem estar dos utentes. A multidisciplinaridade do assunto leva à necessidade do estudo dos processos fisiológicos do corpo humano em relação ao calor, das suas trocas térmicas com o ambiente, do comportamento dos utentes em relação ao espaço e de como se dá a avaliação subjectiva de bem estar. Os critérios de conforto para os ambientes interiores são ferramentas importantes tanto para o projecto de edifícios e de instalações de aquecimento e arrefecimento, quanto para a avaliação de construções já existentes.

Os estudos que propõem critérios de conforto diferenciam-se de acordo com a abordagem experimental adoptada [35]. Existem basicamente duas abordagens, denominadas:

1. *Analítica*, que utiliza as *câmaras climáticas*.
2. *Empírica*, que se baseia em *estudos de campo*.

2.5.1.1 Abordagem analítica

As câmaras climáticas, que servem de base experimental para esse tipo de abordagem, são salas especialmente construídas nas quais é possível o ajuste das variáveis ambientais, como a temperatura, velocidade e humidade do ar e temperatura das superfícies. Permitem um procedimento controlado, e as condições de conforto são obtidas através da avaliação subjectiva de indivíduos expostos ao ambiente por elas proporcionado.

O modelo mais conhecido para análise do conforto, dentre os que representam esse tipo de estudo, é o proposto por Fanger [36]. A base teórica do modelo de Fanger é a interação térmica entre o indivíduo e seu ambiente. Considera que o conforto é obtido quando há equilíbrio entre os ganhos e as perdas de calor do corpo humano, e quando a temperatura da pele e a secreção pelo suor se encontram dentro de certos limites, os quais foram obtidos através de campanhas experimentais em câmaras climáticas. Baseando-se nessas duas condições, e utilizando conceitos de fisiologia e física, Fanger deduziu a equação de conforto. Essa equação permite o cálculo, para uma certa actividade e vestuário dos utentes, das condições ambientais necessárias para o conforto, expressas na combinação das seguintes variáveis: temperatura do ar (bolbo seco), humidade e velocidade do ar e temperatura radiante média¹. A forma final da equação é razoavelmente complexa e, para facilitar a sua utilização na época, Fanger resolveu-a para todas as combinações relevantes de variáveis e apresentou os resultados sob a forma de ábacos.

Além da obtenção das condições necessárias para o conforto, Fanger procurou propor um método que fosse capaz de prever as sensações térmicas produzidas pelos ambientes e dessa forma auxiliasse na análise dos mesmos. Foi desenvolvido então um índice de conforto, no qual a sensação térmica média de um grupo grande de pessoas num determinado ambiente é expressa através de um parâmetro denominado *voto médio previsto* (tradução de “predicted mean vote”, PMV). O PMV obedece à escala apresentada na tabela 2.3.

Foi desenvolvida uma equação que possibilita o cálculo do PMV a partir da entrada das variáveis ambientais (temperatura, velocidade e humidade do ar e temperatura radiante média), da roupa e da actividade dos ocupantes. Essa equação foi obtida utilizando-se respostas subjectivas, de acordo com a escala acima apresentada, de indivíduos expostos a variadas condições em câmaras climáticas. Partindo do princípio de que a sensação térmica de cada um desses indivíduos era função da solicitação térmica a que estavam expostos, Fanger calculou essa solicitação para todas as situações e correlacionou-a com

¹ Temperatura radiante média: valor teórico de temperatura uniforme das superfícies interiores, consideradas negras sob o aspecto de radiação, que corresponde às mesmas trocas de calor por radiação que a situação real.

o voto de conforto. Como a solicitação térmica é função das variáveis ambientais, da roupa e da actividade, foi possível encontrar a relação entre todos esses parâmetros e o voto de conforto médio dado pelas pessoas, nas mais variadas situações. Assim como para a equação de conforto, Fanger calculou o PMV para aproximadamente 3500 combinações de variáveis e disponibilizou os resultados em tabelas.

Tabela 2.3 –Votos médios previstos e sensações térmicas correspondentes, de acordo com o modelo de Fanger.

voto médio previsto	sensação térmica
-3	muito frio
-2	frio
-1	levemente frio
0	neutro
+1	levemente quente
+2	quente
+3	muito quente

A fim de tornar o índice mais significativo, Fanger procurou relacionar o PMV com o grau de insatisfação dos utentes. Utilizando os dados experimentais e considerando como insatisfeitas as pessoas que votassem acima de -2 (frio) ou +2 (quente), obteve-se o gráfico da figura 2.5. Nesse gráfico, têm-se os valores do PMV e suas respectivas percentagens médias de pessoas insatisfeitas (PPD). Vê-se que a curva é simétrica, o que indica que tanto a insatisfação com o frio quanto com o calor seguem o mesmo padrão. Também se observa que mesmo quando o voto médio é igual a zero, há 5 % de pessoas insatisfeitas, em média.

Os dados experimentais deste modelo foram obtidos com mais de mil indivíduos dinamarqueses e norte-americanos. Fanger investigou se o método poderia ser aplicado a outros grupos de pessoas, e se haveria a influência de outros factores, como sexo, idade, peso, ciclo menstrual, diferenças étnicas, alimentação, entre outros, e concluiu que nenhum deles parecia influenciar o conforto de forma significativa. Em estudos posteriores, conduzidos também por Fanger [37], foi analisada a influência da habituação climática. Grupos de indivíduos com distintas experiências climáticas foram colocados nas câmaras e não demonstraram diferenças significativas nas suas temperaturas de preferência. Outras medições experimentais, semelhantes às usadas

para obter os valores do PMV, foram conduzidas com cidadãos asiáticos, e resultados muito similares foram encontrados [38] [39].

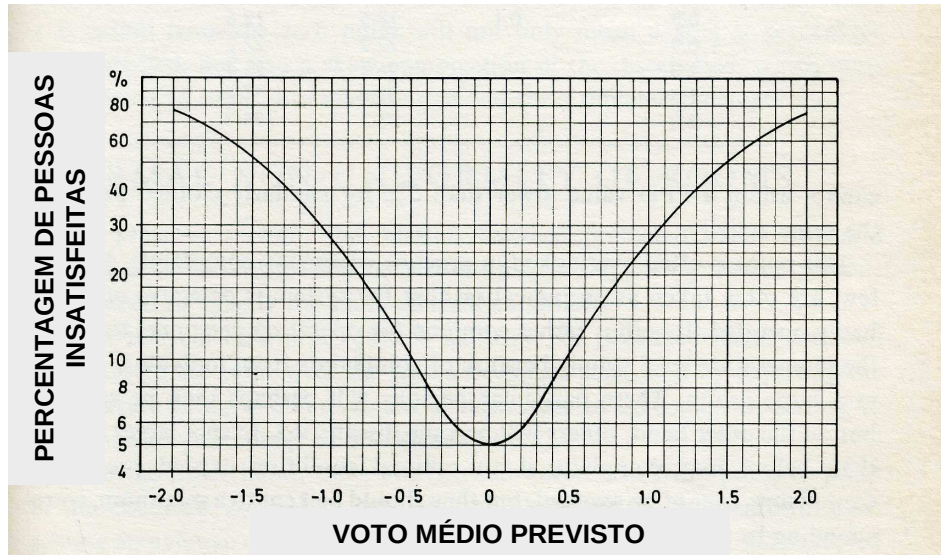


Figura 2.5 – Relação entre o PMV e a percentagem média de pessoas insatisfeitas, PPD, segundo o modelo de Fanger.

Fonte: adaptada de Fanger [36]

O PMV é o índice de conforto mais utilizado e conhecido em todo o mundo. Esse modelo serve de base para a norma internacional ISO 7730 [40], que estabelece as condições para ambientes termicamente moderados, nos quais as pessoas desenvolvem actividades leves. Esta norma e o próprio índice foram inicialmente desenvolvidos considerando-se ambientes artificialmente climatizados, mas tem sido frequentemente sugerido que podem aplicar-se a todos os tipos de edifícios [41]. Na revisão da ISO 7730 [42], de 2005, houve um alargamento da faixa de PMV aceitável, devido a certas alterações implementadas com o objectivo de integrar na norma alguns dos aspectos contemplados na abordagem empírica, a qual apresenta diferenças em relação à analítica (ver secções a seguir).

2.5.1.2 Abordagem empírica

Neste tipo de estudo, os critérios de conforto são estabelecidos através de pesquisas de campo. As variáveis ambientais, como temperatura, humidade, velocidade do ar e

temperatura de globo são medidas nos ambientes onde as pessoas estão a executar suas actividades normais, sem interferência do pesquisador. Ao mesmo tempo, os indivíduos votam as suas sensações de acordo com escalas previamente desenvolvidas para esta finalidade, sendo as da ASHRAE e a de Bedford as mais conhecidas (tabela 2.4). Em seguida, é feita uma análise estatística para encontrar a relação entre esses votos e as medidas experimentais. Dessa forma, obtêm-se os valores de temperatura (ou de outras variáveis ambientais), na(s) qual(is) as pessoas se sentem *confortáveis* ou *neutras*, dependendo da escala utilizada.

Tabela 2.4 – Escalas da ASHRAE e de Bedford
para a avaliação subjectiva das condições térmicas do ambiente
Fonte: adaptada de Humphreys e Nicol [43]

ASHRAE	Voto de conforto	Bedford
Muito quente	+3	Demasiado quente
Quente	+2	Muito quente
Levemente quente	+1	Confortavelmente quente
Neutro	0	Confortável, nem frio, nem quente
Levemente frio	-1	Confortavelmente frio
Frio	-2	Muito frio
Muito frio	-3	Demasiado frio

Um estudo de campo clássico, que criou o conceito de temperatura equivalente, foi conduzido nos anos 30, por Bedford [44], com trabalhadores de fábricas na Inglaterra. Outro estudo importante foi o conduzido em 1959, por Webb [45], em Singapura, sobre o índice de Conforto Equatorial. Posteriormente, em 1970, Humphreys e Nicol [46] completaram um trabalho iniciado por Webb, que visava propor um índice de conforto térmico para trabalhadores em edifícios de serviços, na Inglaterra. Os dados que obtiveram os conduziram a uma série de questões e em seguida a alguns estudos [47] [48] [49] [50] nos quais procuraram explorar o que havia sido observado, o que acabou por resultar na formulação, em 1978 [50], de um modelo de conforto alternativo ao proposto por Fanger. Estes foram os primeiros estudos representativos do que posteriormente se convencionou chamar *abordagem adaptativa* (“adaptive approach”).

A abordagem adaptativa é um tipo de abordagem empírica que utiliza os dados recolhidos em campo para determinar a *temperatura interior de conforto*, a qual é

expressa em função da *temperatura exterior*. A temperatura interior pode ser representada pelas temperaturas de globo², operativa³, ou simplesmente pela temperatura do ar. Os resultados de pesquisas de campo comprovam que a temperatura interior na qual as pessoas se sentem confortáveis é fortemente relacionada com a temperatura exterior. Essa relação é expressa por meio de equações com o seguinte formato [51]:

$$T_c = a.T_{EXT} + b \quad (2.1)$$

As constantes a e b são obtidas através de análise estatística dos dados obtidos nas pesquisas de campo. O parâmetro representativo da temperatura exterior, T_{EXT} , varia conforme o modelo proposto, podendo ser, por exemplo, a temperatura média exterior mensal. A temperatura interior de conforto, T_c , corresponde ao voto zero de conforto (tabela 2.4), e geralmente representa a sensação de neutralidade térmica, pois na maior parte dos estudos adaptativos é utilizada a escala da ASHRAE. Estudos mais recentes procuram investigar não só a sensação térmica do utente, como também a sua preferência em relação às condições internas [52] [43].

A forte dependência da temperatura de conforto em relação à exterior foi primeiramente observada por Humphreys [50], ao investigar 36 estudos de campo conduzidos em vários países. A relação encontrada para edifícios ventilados naturalmente, sem condicionamento artificial de ar, é expressa na equação 2.2, que tem o formato da equação 2.1. De acordo com essa equação, quando o clima está mais frio, as pessoas tendem a sentir-se confortáveis a temperaturas mais baixas, e quando o clima está mais quente, ocorre o oposto.

$$T_c = 0,534.T_M + 11,9 \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.2)$$

² Temperatura de globo: temperatura no interior de uma esfera pintada de preto, com aproximadamente 40 mm de diâmetro, que corresponde a um valor situado entre as temperaturas do ar e radiante média [35].

³ Temperatura operativa: valor teórico de temperatura uniforme de uma envolvente negra na qual o ocupante troca a mesma taxa de calor por radiação e convecção que com o ambiente real. Corresponde à média ponderada entre as temperaturas do ar e radiante média, sendo os factores de ponderação os coeficientes de transferência de calor por radiação e convecção [40].

Onde:

T_M temperatura média exterior mensal (°C)

Uma relação muito similar à expressa em 2.2 foi encontrada posteriormente, através da análise dos dados obtidos em estudos de campo conduzidos em quatro continentes, coordenados pela ASHRAE [53] [54], o que veio reafirmar a validade da relação proposta [55].

Neste critério, é utilizada somente a temperatura interior como parâmetro de “controle”, não sendo consideradas outras variáveis, como a humidade e velocidade do ar, roupa e actividade. Mas, apesar do seu formato simples, nesse tipo de equação estão implicitamente reflectidas todas as características ambientais e de ocupação dos locais específicos avaliados nas pesquisas de campo. O facto da temperatura interior estar vinculada à exterior, e a estreita relação entre ambas, obtida através dos dados empíricos, fazem com que este seja um parâmetro capaz de expressar de forma suficientemente precisa as condições de conforto.

Esta abordagem passou a ser denominada *adaptativa* porque se observou que a temperatura de conforto acompanha a variação da temperatura exterior devido aos mecanismos de adaptação das pessoas. Principalmente nos edifícios ventilados naturalmente, as variações do clima exterior são de certa forma reflectidas na temperatura interior, e as pessoas tendem a adoptar atitudes para se adaptarem a essas alterações e sentirem-se confortáveis. O princípio é de que, se ocorre uma mudança que proporcione desconforto no ambiente, as pessoas reagem com atitudes de forma a recuperar o conforto [56] [57]. Com isso, a temperatura de conforto acompanha a variação da temperatura interior e consequentemente, da exterior. Quando o clima aquece, as pessoas tendem a suportar temperaturas mais altas, quando o clima arrefece, o oposto ocorre, dentro de certos limites, obviamente. Nicol [35] lista os tipos de atitudes de adaptação que podem ser tomadas e cita alguns exemplos:

1. *Modificação da produção de calor do corpo.* Por exemplo, inconscientemente, no Inverno, através do aumento da tensão muscular.
2. *Modificação da taxa de perda de calor do corpo.* Inconscientemente, através da vaso regulação e do suor, ou conscientemente, através da alteração da roupa e da ingestão de bebidas quentes ou frescas.
3. *Modificação do ambiente térmico.* Através da abertura de janelas e do uso de ventilador ou lareira, etc.
4. *Seleção de outro ambiente térmico.* Alteração de posição dentro de uma mesma sala, por exemplo, para um local mais próximo da janela, ou ida para outro ambiente dentro do mesmo edifício, entre outros.

A tendência natural das pessoas a adaptarem-se às alterações nos seus ambientes pode ser verificada na figura 2.6, que mostra a percentagem de trabalhadores de edifícios de serviços, no Paquistão, que se declararam confortáveis nas mais variadas temperaturas [58]. Cada ponto corresponde aos dados médios obtidos para uma determinada cidade, num determinado mês. Havia sido observada grande variação da temperatura interior ao longo do ano, o que é uma característica dos edifícios paquistaneses. Consequentemente, devido à capacidade de adaptação das pessoas, é grande a percentagem de pessoas satisfeitas numa faixa larga de temperatura, nomeadamente entre 20 e 30 °C. Os meios mais utilizados pelos utentes para se adaptarem aos seus ambientes foram alterações significativas no vestuário e a utilização de ventiladores. Mais evidências de adaptação podem ser encontradas numa série de estudos que procuram relacionar o comportamento dos ocupantes, suas sensações de conforto e as variações ambientais [58] [59] [60] [61].

O índice de Fanger também considera, de certa forma, atitudes adaptativas, nomeadamente alterações no vestuário e na velocidade do ar. De acordo com esse índice, quando a temperatura interior aumenta, para que haja conforto (PMV igual a zero), o vestuário deve diminuir e/ou a velocidade do ar, aumentar (e vice-versa). Com

isso, é possível ter-se uma faixa de temperaturas de conforto, mas esta geralmente não corresponde à encontrada através do método adaptativo (ver secção 2.5.1.3).

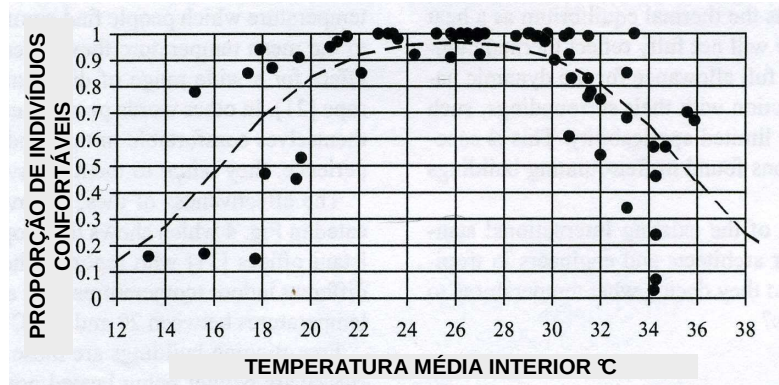


Figura 2.6 – Proporção de indivíduos confortáveis em relação à temperatura média interior, em edifícios de serviços, no Paquistão.

Fonte: adaptada de Nicol [62]

Com o uso de equações como a 2.2 e os dados climáticos de determinada localidade, é possível o cálculo directo da temperatura de conforto, variável ao longo do ano. Encontra-se implícita nessas equações a relação entre os utentes e o ambiente, e todas as acções de adaptação tomadas pelos mesmos, nos locais avaliados nas pesquisas de campo, que não podem ser climatizados. O maior cuidado a ser tomado é com a sua generalização. Sempre que possível, devem ser conduzidos estudos localizados, que possam reflectir de forma mais adequada climas e culturas específicos.

A crescente discussão sobre a necessidade de proposição de uma alternativa ao método determinístico prescrito nas regulamentações [63] [64] levou à inclusão de um modelo adaptativo na recente revisão da norma ASHRAE 55 [54]. Em sua versão anterior, essa norma baseava-se exclusivamente nos estudos de Fanger . O modelo foi desenvolvido utilizando a extensa base de dados da ASHRAE, que congrega resultados obtidos em pesquisas de campo em quatro continentes [54] [53]. Pode ser usado para estabelecer as condições aceitáveis somente em edifícios não climatizados, ventilados naturalmente, nos quais os utentes desenvolvam actividades leves, tenham acesso irrestrito às janelas e possam efectuar alterações no vestuário livremente. Como exemplos de outros estudos, mais localizados, podem-se citar os que propõem modelos adaptativos para a Itália [65], Hong Kong [66], Paquistão [58] e vários locais da Europa [51] [67] [68] [69]. Também

o novo projecto da norma europeia prEN 15251⁴ [70] [71] [72], que procura especificar critérios para o ambiente interior, tendo em vista atender aos objectivos da Directiva sobre o Desempenho Energético de Edifícios [5], considera a adaptação dos ocupantes, ao prescrever valores de temperatura interior em função da temperatura média exterior, no Verão, para edifícios não condicionados. E recorda-se finalmente, que a nova revisão da norma ISO 7730 [40], de 2005, que se baseia no método analítico, procurou integrar de alguma forma a questão adaptativa, aumentando a faixa de conforto para edifícios não climatizados, ventilados naturalmente [42].

2.5.1.3 Diferenças entre as abordagens analítica e empírica

Em princípio, não se pode dizer que haja alguma contradição entre as duas abordagens [73]. Cada uma possui a sua especificidade, sendo que a analítica verifica o que ocorre em câmaras climáticas, enquanto que a empírica se centra no que ocorre nos estudos de campo, em edifícios não climatizados.

A contradição aparece a partir do momento que se comparam os resultados obtidos pelos dois métodos. Em vários estudos de campo, as pessoas mostraram sentir-se confortáveis numa faixa de temperatura muito mais larga do que a prevista pelo método analítico [54] [48] [41] [74] [75] [76] [77] [78], mesmo tendo em conta os valores reais de vestuário e actividade associados a cada situação. Recentes estudos de campo indicam grande conformidade entre a real sensação térmica dos utentes e a prevista por modelos de conforto adaptativo, especialmente nos edifícios naturalmente ventilados [79] [80].

Para exemplificar essa diferença tem-se a figura 2.7, que mostra um dos resultados encontrados na análise dos dados de estudos de campo pertencentes à extensa base da ASHRAE [54]. Tem-se representada no gráfico a temperatura interior de conforto em função da exterior, em edifícios naturalmente ventilados. Cada ponto (indicado na legenda da figura como “OBS- temperatura de conforto”) corresponde aos valores médios obtidos para cada edifício estudado. Há duas linhas, obtidas por meio de análise

⁴prEN 15251: “Criteria for the indoor environment including thermal, indoor air quality (ventilation), light and noise”.

de regressão. Uma corresponde aos valores médios de temperatura interior observados em campo (indicada na figura como “ajustada ao OBS- modelo adaptativo”), e a outra, ao valor de temperatura interior de conforto calculado para as mesmas situações, utilizando o modelo do PMV (linha indicada como “PREVISTO- método PMV”). Para esse cálculo, considerou-se a a velocidade e a humidade do ar médios de cada edifício em questão, e a roupa e o metabolismo utilizados pelos utentes. Nessa figura comparam-se as temperaturas de conforto correspondentes aos dados de campo e às calculadas pelo modelo analítico, e nota-se que, acima de uma certa temperatura exterior, os utentes tendem a sentir-se confortáveis em temperaturas mais altas que as propostas pelo PMV. De forma contrária, abaixo dessa temperatura exterior as pessoas tendem a aceitar temperaturas mais baixas que as previstas pelo PMV. A temperatura de conforto calculada pelo PMV varia em função da temperatura exterior, devido às alterações da roupa dos utentes. Apesar disso, ainda nota-se diferenças significativas entre os dois métodos, indicando que somente as alterações da roupa não são suficientes para explicar essa questão.

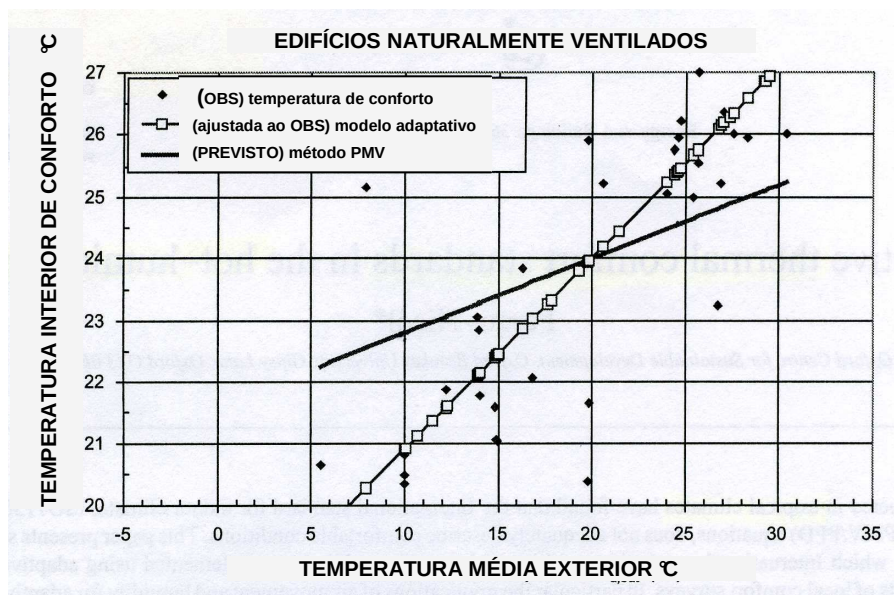


Figura 2.7 – Temperaturas de conforto previstas pelo método do PMV e medidas em campo, em edifícios naturalmente ventilados. Dados da base da ASHRAE.

Fonte: adaptada de Nicol [62]

São levantadas várias hipóteses para explicar as discrepâncias existentes entre os dois métodos, bem como feitas considerações que visam clarificar o entendimento de ambos os modelos. Na sequência são listadas as observações mais relevantes.

1. As câmaras climáticas não permitem que as pessoas ajam com naturalidade, como se estivessem em seus ambientes rotineiros, o que faz com que as suas expectativas se alterem [81]. Baker e Standeven [82] mostraram a importância das *oportunidades adaptativas*, ou seja, oportunidades dadas aos utentes nos edifícios para que possam adoptar as acções adaptativas descritas anteriormente, como abrir ou fechar as janelas, mudar de local dentro da sala ou do edifício, entre outras. Além disso, a insatisfação tende a ser maior quando há menor possibilidade de controlo do ambiente. Ou seja, as câmaras praticamente não oferecem *oportunidades adaptativas*, os utentes encontram-se numa situação passiva, a possibilidade de controlo é mínima, e portanto, a faixa das condições ambientais aceitáveis acaba por ser muito mais limitada.
2. O modelo de Fanger foi desenvolvido para condições de regime permanente, muito distintas das condições reais, encontradas principalmente em edifícios não condicionados, onde os utentes estão em constante interacção com o meio. Os estudos que procuram analisar a influência da variação da temperatura no PMV também foram conduzidos em câmaras climáticas [83], as quais também não conseguem simular as reais condições transitórias, e as reacções naturais dos utentes.

De um modo geral, não foram encontradas tantas discrepâncias entre o modelo do PMV e os dados de campo para edifícios condicionados artificialmente [54] [53]. As principais hipóteses levantadas para o facto são a existência de oportunidades adaptativas mais restritas nesses ambientes e as diferentes expectativas dos utentes. Humphreys e Nicol [76], no entanto, ao analisarem a base de dados da ASHRAE [54] [53], atentam para o facto de que há diferenças também para os edifícios condicionados artificialmente, mas estas são mascaradas pela estreita faixa de temperatura desses ambientes.

O modelo do PMV foi originalmente proposto visando ambientes condicionados artificialmente. A sua aplicação leva à adopção de temperaturas interiores constantes, ou dentro de uma faixa muito estreita, incentivando o gasto de energia desnecessário, pois em ambientes não condicionados seriam toleradas gamas de temperatura mais amplas. Algoritmos de controlo baseados em modelos adaptativos provaram proporcionar economia de energia, sem detrimento do conforto [51] [66].

Recentemente, Fanger [84] propôs uma extensão ao modelo do PMV, que consiste simplesmente em multiplicar o PMV calculado normalmente pelo método tradicional, por um *factor de expectativa*, denominado “e”. Os valores de *e* seriam classificados em três categorias, de acordo com uma primeira proposta sugerida pelo autor, e apresentada na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Factores de expectativa para edifícios
não condicionados em climas quentes
Fonte: adaptada de Fanger [84]

expectativa	Classificação dos edifícios não condicionados		factor de expectativa, <i>e</i>
	local	períodos de calor	
alta	em regiões onde edifícios artificialmente condicionados são comuns	ocorrendo brevemente durante a estação de Verão	0,9-1,0
média	em regiões com alguns edifícios artificialmente condicionados	no Verão	0,7-0,9
baixa	em regiões com poucos edifícios artificialmente condicionados	em todas as estações do ano	0,5-0,7

Esta proposta considera que a diferença encontrada entre os votos de conforto calculados pelo PMV e os obtidos em campo deve-se quase que exclusivamente às distintas expectativas dos utentes, expressas no factor de correcção *e*. No entanto, o problema não pode ser reduzido a esse tipo de enfoque, devido ao facto de que as atitudes adaptativas anteriormente citadas não são consideradas e à dificuldade em se estabelecer os adequados factores de expectativa a serem utilizados.

2.5.2 Metodologia de análise do conforto adoptada

Tendo em vista os métodos para a avaliação do conforto anteriormente expostos, considerou-se que a abordagem adaptativa seria a mais conveniente para atender aos objectivos do trabalho. O modelo adaptativo adequa-se a uma grande parte das residências e pequenos edifícios de serviços existentes em Portugal e em países do Sul Europeu, os quais são ventilados naturalmente, com variadas possibilidades de adaptação e controlo por parte dos utentes. Além disso, o modelo adaptativo mostrou-se mais realista, e portanto mais adequado para o tipo de análise que se desejava obter. Com o modelo do Fanger, as conclusões seriam muito mais restritivas e distantes das reais avaliações dos utentes.

A maior dificuldade para a utilização da abordagem adaptativa é a selecção de um critério que possa ser representativo das situações que se deseja analisar, pois muito cuidado deve ser tomado nas generalizações das equações empíricas obtidas pelo método. No entanto, este não foi um problema para este trabalho, cujo enfoque é Portugal e países do Sul Europeu, pois puderam ser utilizados os resultados de um estudo recente, denominado SCATs (“Smart Controls and Thermal Comfort”), que desenvolveu um modelo adaptativo para países europeus [51].

O modelo adaptativo adoptado é descrito a seguir, e posteriormente apresenta-se a metodologia de caracterização dos períodos de desconforto.

2.5.2.1 Modelo adaptativo adoptado: SCATs

No estudo SCATs [51], foram efectuadas campanhas experimentais em Portugal, França, Grécia, Suécia e Reino Unido, a fim de se desenvolver um modelo adaptativo para esses países. Os modelos desenvolvidos para Portugal, França e Grécia foram utilizados nas simulações do presente trabalho.

O objectivo final do SCATs era encontrar uma equação no formato da equação 2.3, que possibilitasse o cálculo da temperatura de conforto em função do clima exterior.

$$T_c = d.T_{RM}^n + e \quad (2.3)$$

Os coeficientes d e e seriam obtidos através de análise de regressão dos dados de campo. Como parâmetro representativo do clima exterior, utilizou-se a *temperatura média exterior exponencialmente ponderada* (“running mean outside temperature”), T_{RM} , que se mostrou mais precisa e adequada para representar a dependência entre a temperatura de conforto e o clima exterior. A T_{RM} é calculada da seguinte forma:

$$T_{RM}^n = c.T_{RM}^{n-1} + (1-c).T_{DM}^{n-1} \quad (2.4)$$

Ou seja, a T_{RM} do dia n depende, em parte, da T_{RM} do dia anterior, e em parte, da temperatura média exterior do dia anterior, T_{DM} . O valor de c , situado entre 0 e 1, define a velocidade com que a T_{RM} responde às alterações da temperatura exterior. Esse tipo de cálculo é similar aos cálculos de tempo de *meia-vida* de elementos radioactivos. Quanto maior o valor de c , maior a resistência a alterações climáticas exteriores, ou seja, maior a meia-vida da T_{RM} . De acordo com Humphreys [49], a meia-vida de uma determinada T_{RM} é igual a aproximadamente $0,69/(1-c)$ dias.

O melhor valor para a constante c , de acordo com os dados experimentais obtidos no SCATs, seria de 0,80, o que corresponde a uma meia-vida de aproximadamente 3,5 dias. A equação 2.4 fica então da seguinte forma:

$$T_{RM}^n = 0,80.T_{RM}^{n-1} + 0,20.T_{DM}^{n-1} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.5)$$

Os valores diários de T_{RM} foram calculados de acordo com a equação acima, para cada um dos climas considerados nos estudos paramétricos deste trabalho. Para o primeiro dia do ano assumiu-se que a T_{RM} é igual à temperatura média diária exterior.

As equações finais encontradas para a temperatura de conforto pelo SCATs, tanto para cada um dos países em separado, quanto para todos em conjunto, são apresentadas na

tabela 2.6. Apesar de terem sido notadas algumas variações entre os países, o formato geral do modelo apresentou-se bastante robusto. A temperatura de conforto corresponde à sensação térmica de neutralidade de acordo com a escala da ASHRAE (tabela 2.4). Os valores prescritos por essas equações apresentaram grande concordância com as medições reais num estudo posterior, conduzido em edifícios no sul da França [78].

Tabela 2.6 – Temperaturas de conforto obtidas no projecto SCATs (°C)
Fonte: adaptada de McCartney e Nicol [51]

País	Algoritmo de controlo adaptativo	
	$T_{RM} \leq 10^{\circ}\text{C}$	$T_{RM} > 10^{\circ}\text{C}$
França	$0,049.T_{RM} + 22,58$	$0,206.T_{RM} + 21,42$
Grécia	—————	$0,205.T_{RM} + 21,69$
Portugal	$0,381.T_{RM} + 18,12$	$0,381.T_{RM} + 18,12$
Suécia	$0,051.T_{RM} + 22,83$	$0,051.T_{RM} + 22,83$
Reino Unido	$0,104.T_{RM} + 22,58$	$0,168.T_{RM} + 21,63$
Todos	22,8 °C	$0,302.T_{RM} + 19,39$

As temperaturas de conforto para todos os dias de um ano típico dos climas considerados nos estudos paramétricos foram obtidas utilizando-se as equações da tabela 2.6 referentes ao país em questão (Portugal, França ou Grécia). A tabela 2.7 apresenta os maiores e os menores valores encontrados para a temperatura de conforto, para cada um dos climas, e o Anexo B apresenta esses mesmos valores, mês a mês. Na figura 2.8 tem-se representadas as mesmas equações da tabela 2.6 (T_c em função da T_{RM}), dentro das faixas de temperaturas correspondentes aos climas estudados (valores máximos e mínimos da tabela 2.7).

2.5.2.2 Caracterização dos períodos de desconforto

Após a definição da temperatura de conforto, foi necessário criar um critério para analisar os resultados dos estudos paramétricos. Utilizou-se esse critério para avaliar os períodos de desconforto nos quais ocorre sobreaquecimento, que é a principal

preocupação deste trabalho. Estes períodos são analisados tendo em vista as suas intensidade e duração, pois quanto maiores forem esses valores, maior a probabilidade de adoção do ar condicionado pelos ocupantes.

Tabela 2.7 – Mínimos e máximos valores para a temperatura de conforto, calculada de acordo com o modelo do SCATs.

Local	Máxima (°C)	Mínima (°C)
Porto (Portugal)	26,7	21,0
Lisboa (Portugal)	27,4	21,3
Évora (Portugal)	27,7	20,9
Atenas (Grécia)	27,5	22,8
Nice (França)	26,6	22,9

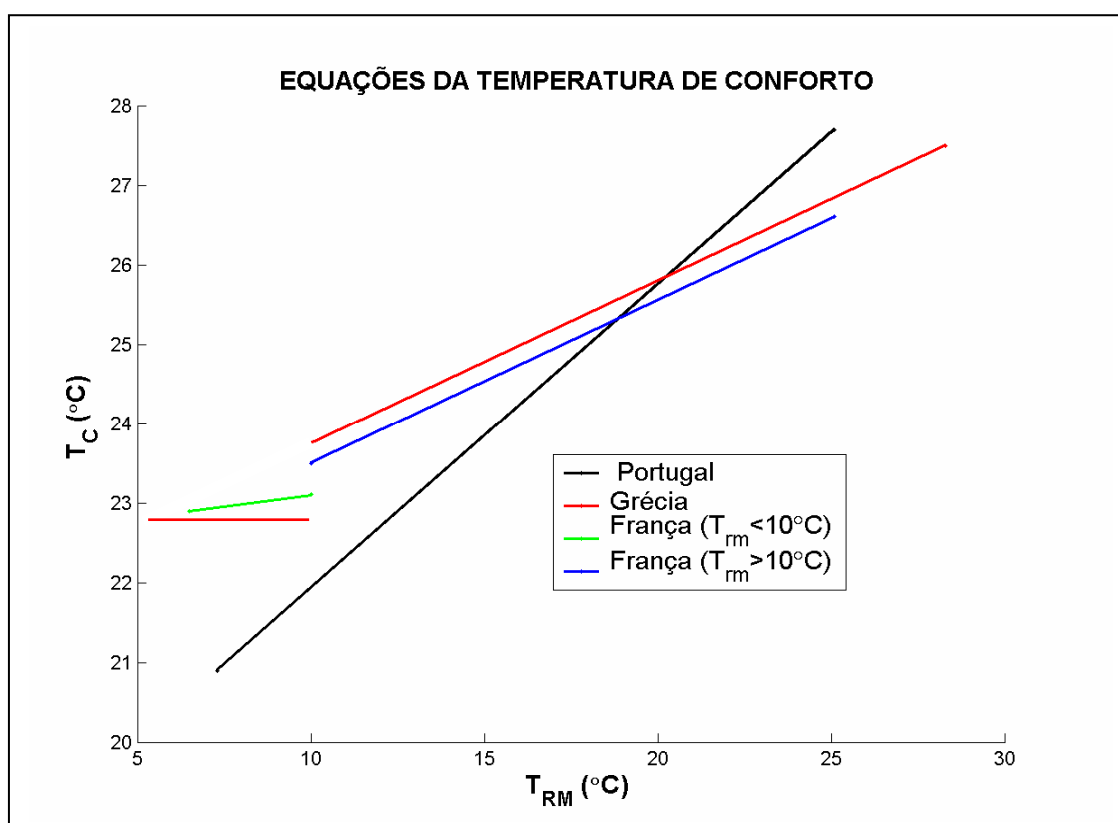


Figura 2.8 – Equações da temperatura de conforto correspondentes aos climas estudados.

Segundo Nicol e Humphreys [85], na verdade não há um limite definido entre conforto e desconforto, mas o que ocorre é que a percentagem de pessoas insatisfeitas com o ambiente tende a aumentar quanto maior for a diferença entre as temperaturas interior e de conforto. Segundo esses autores, quando a diferença entre a temperatura interior e a de conforto ultrapassa os 2 °C, a insatisfação dos utentes tende a aumentar de forma mais acentuada e o desconforto pode chegar a ser considerado inaceitável. Esse foi portanto o limite adoptado para este estudo.

A figura 2.9 apresenta a variação das temperaturas interior e exterior, durante 6 dias, no Verão, para um dos casos simulados nos estudos paramétricos ⁵. Também são representados os limites superior e inferior de $T_c \pm 2^\circ\text{C}$ para a zona de conforto, conforme citado no parágrafo acima.

Para a análise do desconforto devido ao sobreaquecimento, é importante observar a parte da curva de temperatura interior localizada acima do limite superior de conforto, durante os períodos em que há ocupação. É importante contabilizar tanto o excesso de temperatura (°C) acima desse limite, quanto a duração desses períodos de sobreaquecimento, e o número de dias nos quais ocorrem.

Portanto, com o intuito de caracterizar as condições de conforto, todos os resultados das simulações foram pós-processados a fim de se obter os resultados apresentados na tabela 2.8, *para cada caso simulado*, ou seja, para cada edifício com combinações únicas dos parâmetros variados. Todos os parâmetros de conforto expressos na tabela 2.8 referem-se apenas ao período ocupado. Para cada um dos parâmetros, os valores referentes ao edifício como um todo são obtidos considerando-se a média aritmética entre os valores referentes a cada uma das zonas ocupadas.

⁵ Os casos simulados nos estudos paramétricos são descritos no Capítulo 3.

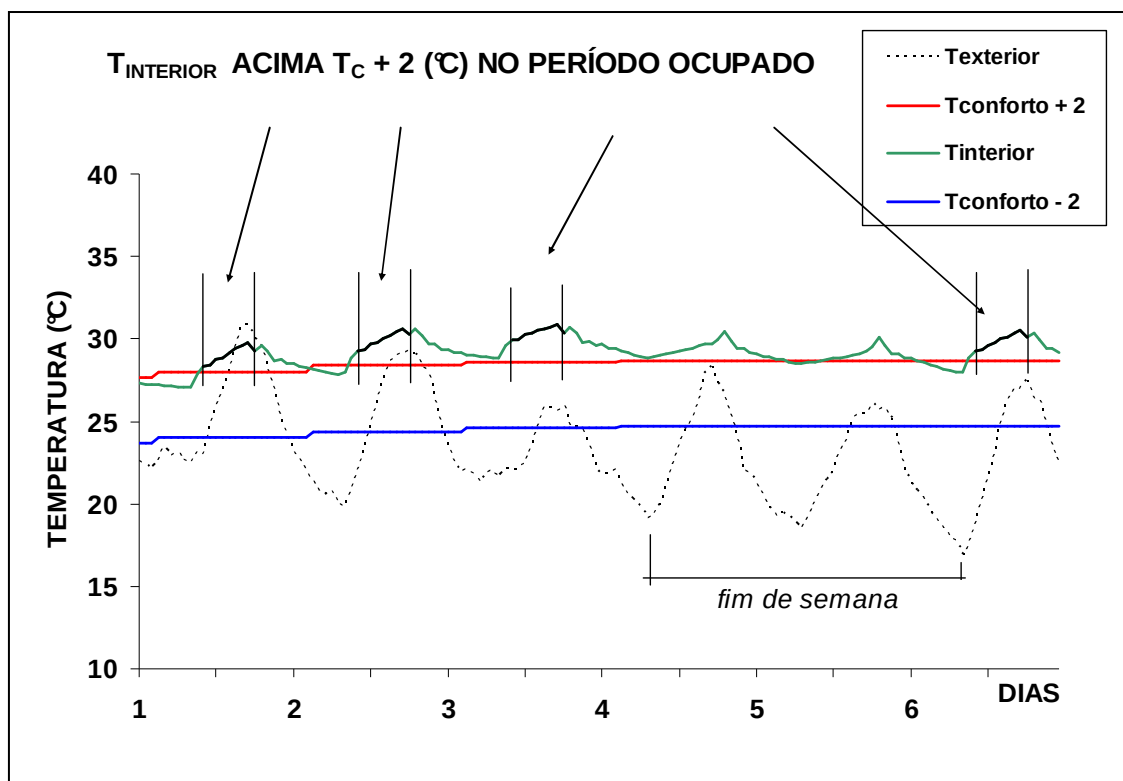


Figura 2.9 – Temperaturas exterior e interior, limites superior e inferior da zona de conforto e períodos de desconforto, durante 6 dias, no Verão, para a zona 1 do Edifício B, localizado no Porto, utilizado como edifício de serviços, com o padrão 3 de ganhos internos, factor solar dos envidraçados de 0,30, com ventilação mínima e com nível 4 de isolamento⁶.

⁶ Os casos simulados nos estudos paramétricos são descritos no Capítulo 3.

Tabela 2.8 – Parâmetros definidos para caracterizar os períodos de desconforto

Aspecto a ser caracterizado	Parâmetro ⁽¹⁾
Quantidade de horas com desconforto ⁽²⁾	Percentagem ⁽³⁾ de horas com desconforto, no Verão
Quantidade de dias com desconforto ⁽⁴⁾	Percentagem ⁽⁵⁾ de dias com desconforto, no Verão
Quantidade de dias consecutivos com desconforto ⁽⁴⁾	Número de dias consecutivos com desconforto durante o ano
Duração do período de desconforto, por dia	Percentagem do dia com desconforto, no Verão (média das percentagens das horas com desconforto em relação ao período ocupado, para cada dia em que há desconforto)
Intensidade do sobreaquecimento ⁽⁶⁾	Sobreaquecimento médio (°C), no Verão Média do sobreaquecimento máximo (°C) /dia de desconforto, no Verão
Graus-hora de desconforto ⁽⁷⁾	Graus-hora de desconforto (°C.h) totais, no Verão

⁽¹⁾ Todos os parâmetros referem-se ao edifício como um todo, e são obtidos considerando-se, para cada um deles, a média aritmética entre os seus valores referentes às zonas ocupadas.

⁽²⁾ Hora com desconforto: hora em que há ocupação e na qual a temperatura interior é maior ou igual à $T_c + 2^\circ\text{C}$.

⁽³⁾ Percentagem em relação ao total de horas ocupadas durante o Verão.

⁽⁴⁾ Um dia é considerado desconfortável quando possui no mínimo uma hora de desconforto.

⁽⁵⁾ Percentagem em relação ao total de dias ocupados durante o Verão.

⁽⁶⁾ Sobreaquecimento (°C): número de graus acima do limite superior da zona de conforto, numa hora em que há desconforto, durante o período ocupado.

⁽⁷⁾ Graus.hora de desconforto (°C.h): multiplicação do número de graus acima do limite superior da zona de conforto pela duração do período de desconforto, quando há ocupação.

Capítulo 3 Estudos paramétricos: dados de entrada

Neste Capítulo descrevem-se todos os dados de entrada necessários para que os estudos paramétricos fossem efectuados. Primeiramente são apresentados os modelos de edifícios escolhidos (secção 3.1) e, em seguida, o esquema geral dos estudos paramétricos, com indicação de todas as variações e combinações previstas (secção 3.2).

Os outros parâmetros que precisaram ser definidos para que as simulações fossem conduzidas são descritos nas secções subsequentes:

- área dos envidraçados e orientação dos edifícios em relação ao sol (secção 3.3);
- envolventes exterior e interior e espessura do isolamento (secção 3.4);
- ganhos internos (secção 3.5);
- ventilação (secção 3.6);
- sombreamento das janelas (secção 3.7);
- clima (secção 3.8);
- regime de controlo da temperatura interior (secção 3.9);

A fim de facilitar a visualização de todos esses dados, é apresentado um quadro-resumo na secção 3.10.

Todos esses dados de entrada foram especificados nos diversos ficheiros que devem ser elaborados para que as simulações através do PARAM sejam efectuadas. O procedimento de simulação através do PARAM foi apresentado no Capítulo anterior. No CD anexo à esta tese seguem todos esses ficheiros, bem como a descrição da aplicação do procedimento de simulação através do PARAM aos estudos paramétricos desta pesquisa.

3.1 Modelos de edifícios escolhidos

Foram seleccionadas três tipologias de edifícios, denominados A, B e C. Os desenhos da figura 3.1 apresentam a configuração espacial das diversas zonas que os compõem, bem como suas áreas úteis de pavimento e seus factores de forma, definidos como a área de envolvente exterior em relação ao volume⁷. Procurou-se escolher modelos cuja geometria correspondesse à de construções correntes nos climas estudados.

O edifício A é o que possui maior área de envolvente em contacto com o ambiente exterior, com a cobertura, em terraço, e paredes voltadas às quatro orientações. Consequentemente, é o que possui maior factor de forma (igual a 0,70). Já os edifícios B e C situam-se em andares intermédios de prédios e possuem menor superfície de envolvente em contacto com o exterior, com paredes voltadas a três e duas orientações, respectivamente, e factores de forma de 0,30 e 0,18.

As fichas completas desses edifícios, com as dimensões detalhadas de cada zona e dos seus respectivos envidraçados, podem ser encontradas no Anexo C. Os dados apresentados nessas fichas foram os necessários para a definição da sua geometria no TRNSYS. Como se considerou dois tipos de utilização para cada edifício, nomeadamente serviços ou habitação, as características de ocupação de cada zona variaram de acordo com cada uma dessas situações. Com relação aos materiais construtivos utilizados, foram feitas simulações com distintas soluções de inércia para as envoltentes exteriores e interiores, além de ter sido alterada a espessura do isolamento. Todos esses dados são descritos na sequência deste Capítulo.

3.2 Esquema geral dos estudos paramétricos

Os estudos paramétricos conduzidos nesta pesquisa podem ser divididos em dois grupos. O primeiro consiste em simulações nas quais foram efectuadas alterações de

⁷ Esta definição também é a utilizada no Regulamento Português, o RCCTE [7].

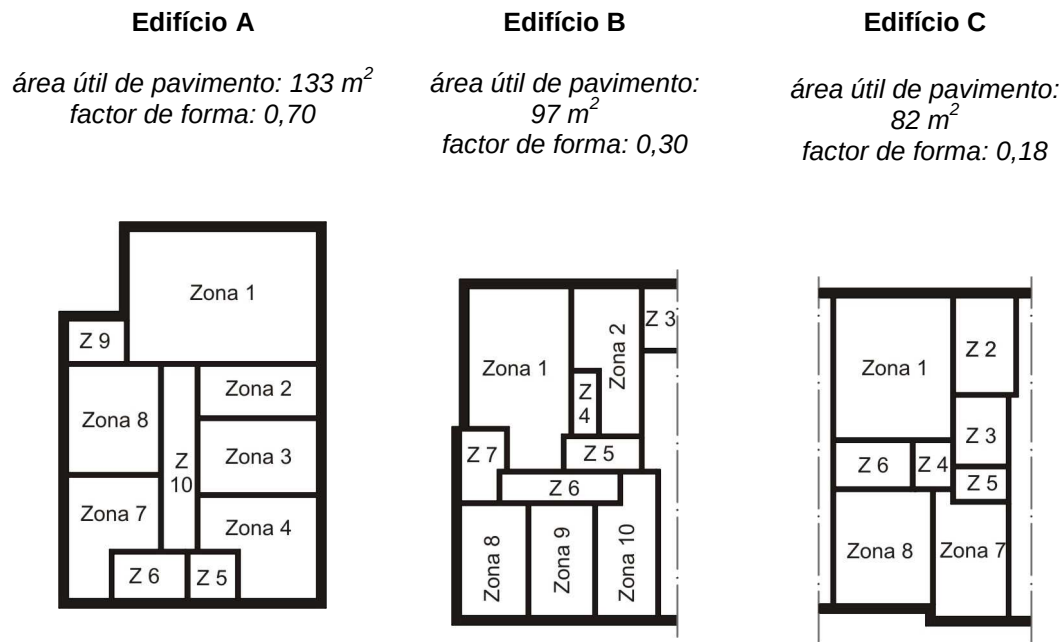


Figura 3.1 - Modelos de edifícios escolhidos

vários parâmetros, todas combinadas entre si, para os três modelos de edifícios. O segundo corresponde a séries menores de estudos feitas em alguns casos seleccionados.

Os dois grupos totalizam 6180 casos simulados, correspondentes a variadas combinações de modelo de edifício, nível de isolamento, sombreamento, ventilação e ganhos internos, entre outros.

3.2.1 Primeiro grupo de estudos paramétricos

Na figura 3.2 apresenta-se o esquema geral do primeiro grupo de estudos paramétricos, com indicação dos parâmetros que sofreram variação e suas combinações. Dessa forma, para cada edifício, os seguintes parâmetros contemplaram mais de uma possibilidade nessas simulações:

- ganhos internos;

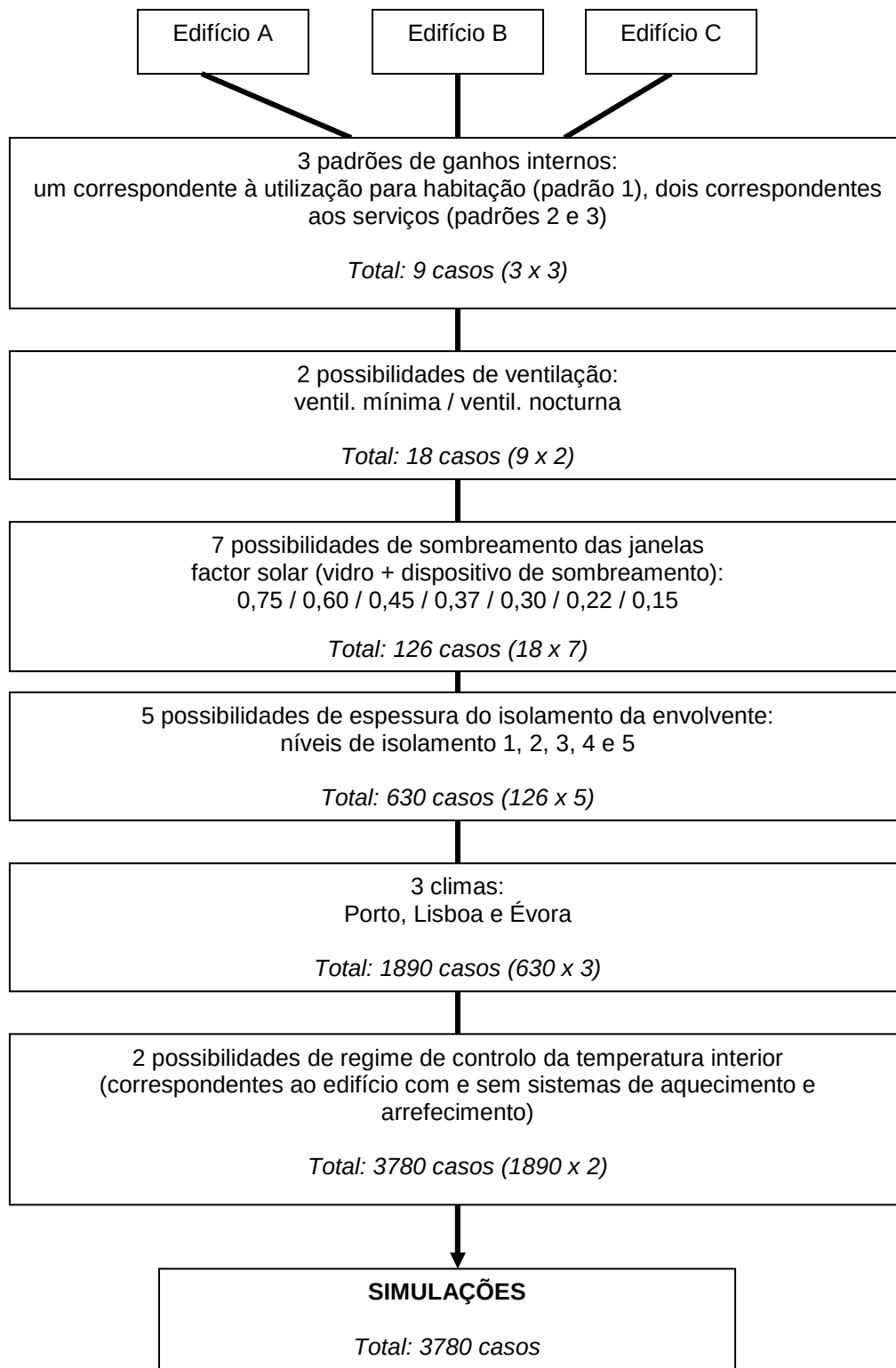


Figura 3.2 - Esquema geral do primeiro grupo de estudos paramétricos

- ventilação;
- sombreamento das janelas;
- espessura do isolamento da envolvente;
- clima;
- regime de controlo da temperatura interior.

Os parâmetros restantes permaneceram constantes durante todo o processo.

O impacto do aumento do isolamento da envolvente, aspecto principal que se desejava analisar, foi avaliado em conjunto com outros parâmetros que também influenciam o desempenho do edifício no Verão e consequentemente podem intensificar ou reduzir o sobreaquecimento causado pelo acréscimo de isolamento. São eles o sombreamento das janelas, a ventilação e os ganhos internos, este último função directa do tipo de utilização considerada para o edifício, no caso, serviços ou habitação. As análises abrangeram diversos climas de Portugal, além de considerarem dois cenários: a ausência de controlo da temperatura interior (regime livre) e a existência de sistemas de aquecimento e arrefecimento (com definição de temperaturas de controlo para Verão e Inverno). Assim foi possível analisar tanto as condições de conforto a que estariam submetidos os utentes no Verão, quanto se o consequente consumo de arrefecimento devido à adopção de ar condicionado era suficientemente elevado para eliminar as poupanças de aquecimento.

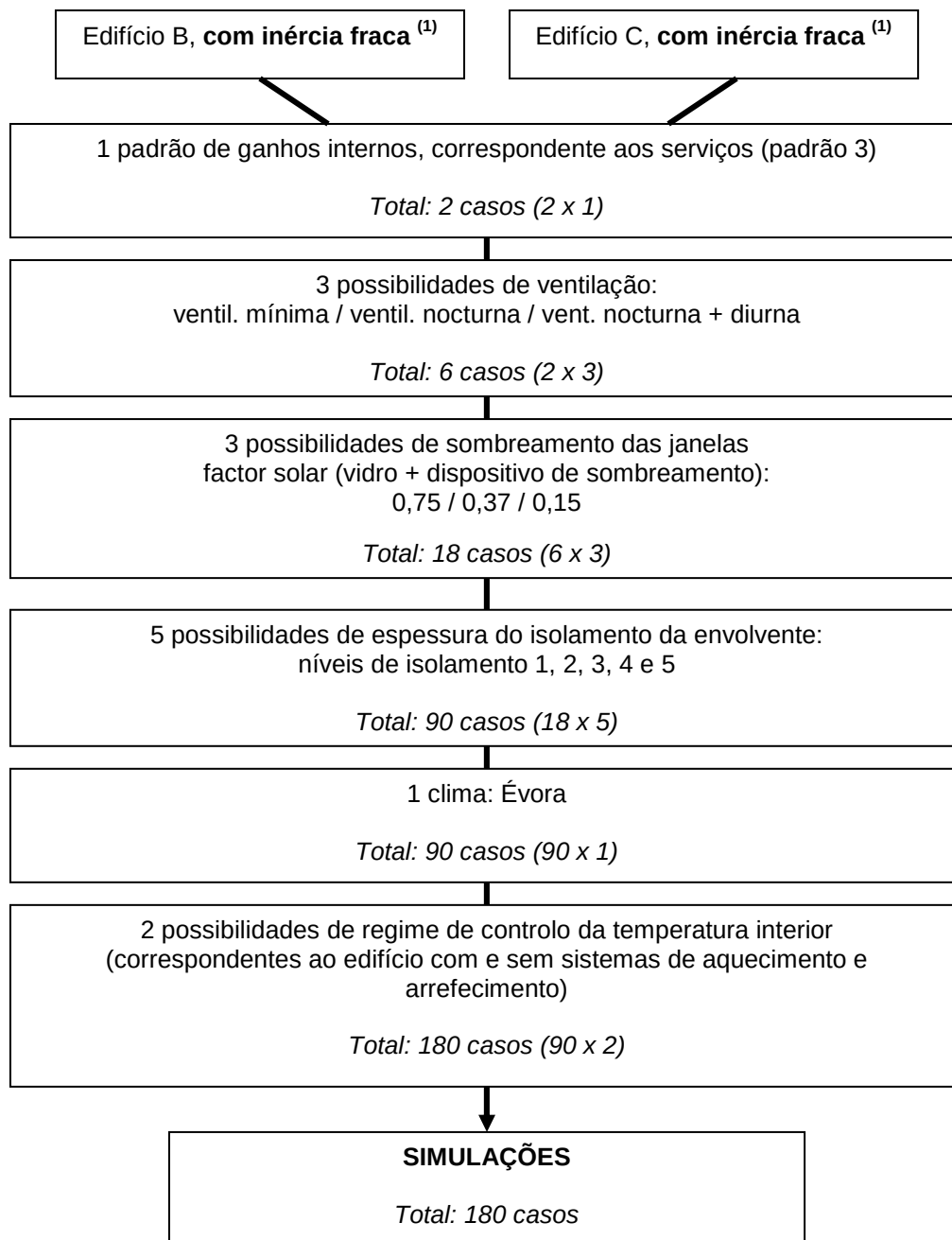
O cruzamento de todas as alternativas resultou num grande número de casos, conforme se pode visualizar na figura 3.2. Obteve-se um total de 3780 casos para os três edifícios, correspondentes a combinações singulares de nível de isolamento da envolvente, sombreamento das janelas, ventilação, ganhos internos, clima e regime de controlo da temperatura.

3.2.2 Segundo grupo de estudos paramétricos

Após a análise dos resultados do primeiro grupo, surgiu a necessidade de se avaliar a influência de parâmetros antes não alterados, bem como acrescentar mais alternativas às já existentes. Foram então efectuadas séries isoladas de estudos considerando variações dos seguintes aspectos:

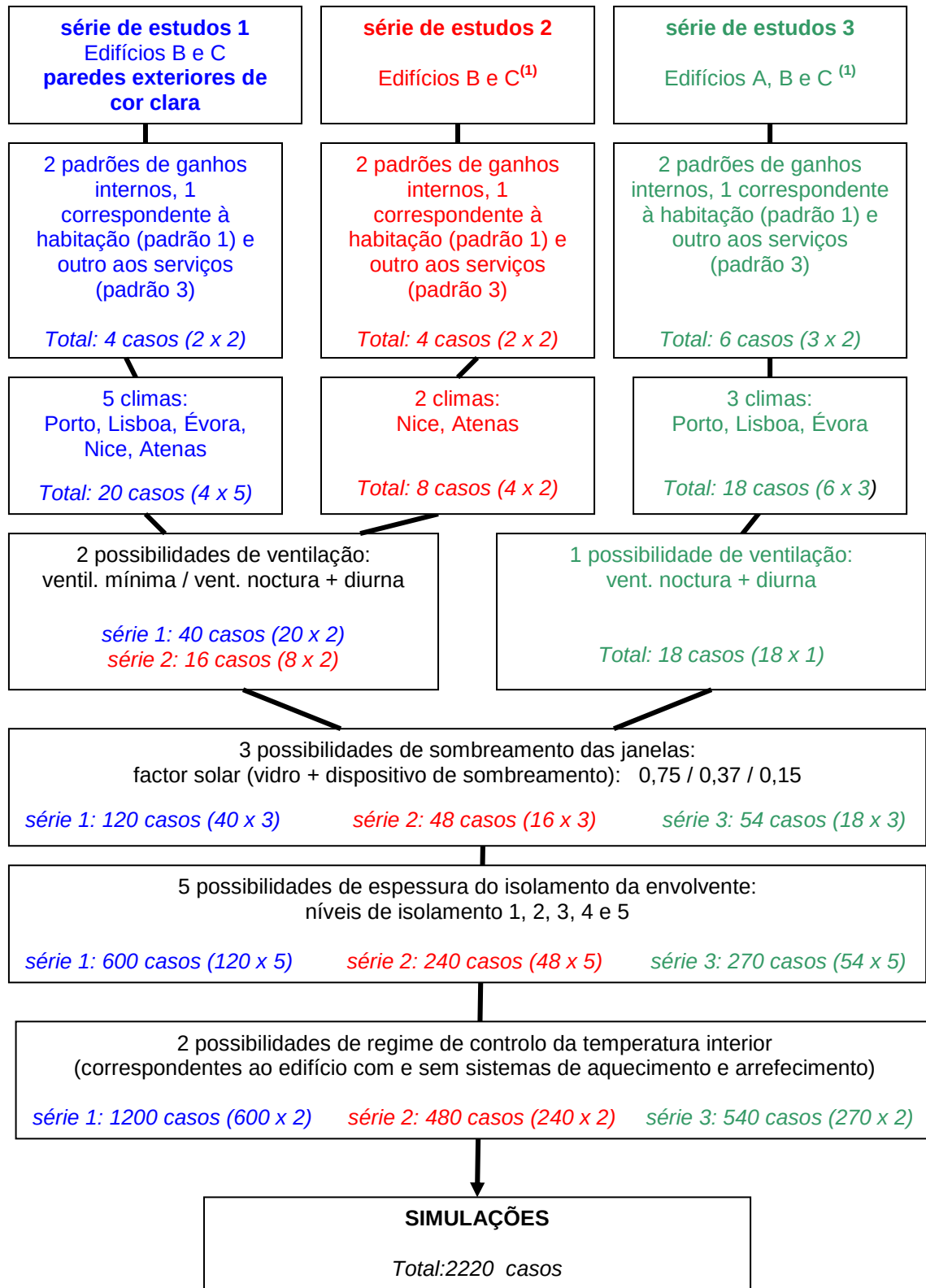
- inércia (alteração para inércia fraca);
- cor das paredes exteriores (alteração para cor clara, pois nos estudos do primeiro grupo havia sido adoptada cor mais escura);
- clima (inclusão de outros climas do Sul Europeu);
- ventilação (inclusão de ventilação diurna mais nocturna).

As séries de estudos paramétricos do segundo grupo são apresentadas nas figuras 3.3 e 3.4. Estas novas simulações não corresponderam, como no primeiro grupo, ao cruzamento de todas as possibilidades consideradas para os parâmetros, mas sim a séries de estudos em menor escala, nos quais procurou-se abranger situações que fossem representativas e em quantidade suficiente para permitir obter tendências de comportamento térmico claras e inequívocas. As quatro séries de estudos paramétricos apresentadas nessas figuras totalizam 2400 casos simulados.



⁽¹⁾ Cor das paredes exteriores igual à considerada no primeiro grupo de estudos paramétricos (não há alteração para cor clara).

Figura 3.3 - Esquema geral da série de estudos paramétricos do segundo grupo correspondente à variação de inércia



⁽¹⁾ Cor das paredes exteriores igual à considerada no primeiro grupo de estudos paramétricos (não há alteração para cor clara).

Figura 3.4 - Esquema geral das séries de estudos paramétricos do segundo grupo correspondentes às variações de clima, ventilação e cor das paredes exteriores

3.3 Área dos envidraçados e orientação em relação ao sol

Conforme já citado na secção 3.1, no Anexo C encontram-se os dados geométricos detalhados dos edifícios escolhidos. Um importante aspecto que possui relação directa com os ganhos solares, e consequentemente com a temperatura interior, é a área de envidraçados. Na figura 3.5 têm-se as percentagens de área de janelas em relação à área de cada fachada e à área útil de pavimento, para os três edifícios.

A orientação também é um aspecto de grande influência nos ganhos solares e nas condições de conforto. As orientações dos edifícios permaneceram constantes durante todas as simulações, de acordo com o apresentado na figura 3.5.

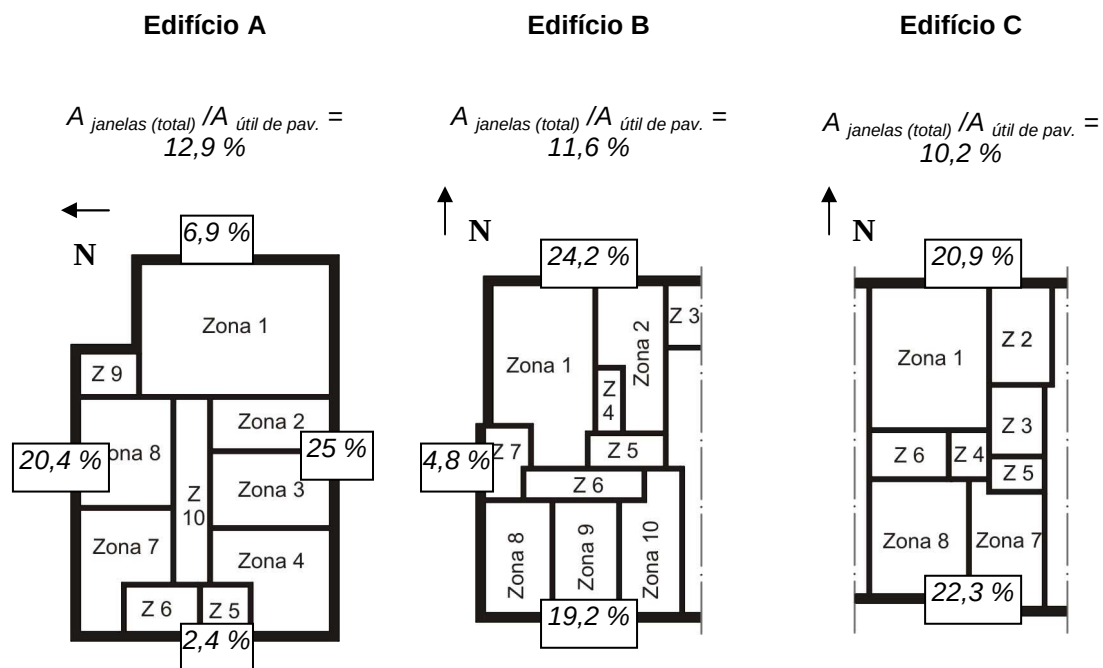


Figura 3.5 - Percentagem de área de janelas em relação às áreas de cada fachada e à área útil de pavimento, para os edifícios A, B e C.

3.4 Envolvertes exterior e interior e espessura do isolamento

3.4.1 Envolvertes adoptadas

3.4.1.1 Envolvertes com inércia média a alta

Em todas as simulações conduzidas no primeiro grupo de estudos paramétricos e em algumas séries de estudos do segundo grupo, foram seleccionadas soluções de envolvertes exterior e interior com inércia média a alta. Na tabela 3.1 têm-se a indicação das soluções adoptadas para cada tipo de envolverte, cuja localização nos edifícios A, B e C encontra-se no Anexo C. Na figura 3.6 têm-se a descrição detalhada dessas soluções, com seus desenhos esquemáticos, elementos construtivos e respectivas espessuras. Convém ressaltar que as envolvertes permaneceram as mesmas em todas as simulações, tendo sido alterada apenas a espessura do isolamento das paredes exteriores e da cobertura, conforme indicado nos desenhos. A tabela 3.2 apresenta as espessuras consideradas, as quais resultaram em cinco níveis distintos de isolamento da envolverte exterior.

Para cada parede, é necessário definir no TRNSYS a temperatura do ar no ambiente adjacente à zona em questão. Para as paredes exteriores e cobertura, é a temperatura exterior, fornecida nos dados climáticos; para o pavimento térreo, é a temperatura do solo; para as paredes interiores tipo A (ver tabela 3.1), é a temperatura do ar da zona adjacente, calculada pelo próprio TRNSYS; e para as tipo B e C (ver tabela 3.1), esta é definida como idêntica à temperatura do ar da própria zona.

3.4.1.2 Envolvertes com inércia fraca

No segundo grupo de estudos paramétricos foram efectuadas algumas simulações com soluções de envolvertes exterior e interior com inércia fraca, somente para os edifícios B e C. Tem-se na tabela 3.3 a indicação das soluções adoptadas e na figura 3.7, os seus desenhos esquemáticos. A espessura do isolamento foi alterada segundo o mesmo padrão apresentado anteriormente, na tabela 3.2. A temperatura do ar dos ambientes

adjacentes à cada parede, definida no TRNSYS, seguiu o mesmo critério das simulações das envolventes com inércia média a alta (secção 3.4.1.1).

Tabela 3.1 – Soluções adoptadas para as envolventes exterior e interior com inércia média a alta

Tipo de envolvente ⁽¹⁾	Número indicativo da solução adoptada ⁽²⁾	
	Edifício A	Edifícios B e C
paredes exteriores	100 ou 101 ⁽³⁾	100 ou 101 ⁽³⁾
cobertura exterior	111	não possui
pavimento intermédio	não possui	116
pavimento térreo	107	não possui
paredes interiores tipo A ⁽⁴⁾	106	106
paredes interiores tipo B ⁽⁵⁾	não possui	109
paredes interiores tipo C ⁽⁵⁾	não possui	108
superfícies envidraçadas	6001	6001

⁽¹⁾ A indicação da localização dos tipos de envolvente em cada edifício encontra-se no Anexo C.

⁽²⁾ Os códigos referem-se às soluções apresentadas na figura 3.6.

⁽³⁾ A solução adoptada para as paredes exteriores depende do nível de isolamento. Para o nível 1, que corresponde à ausência de isolamento nas paredes exteriores (tabela 3.2), a solução adoptada é a 100. Para os outros níveis, é a 101.

⁽⁴⁾ Paredes que dividem duas zonas do mesmo apartamento.

⁽⁵⁾ Paredes que dividem o apartamento com outras zonas interiores do mesmo edifício (outros apartamentos, caixa de escada, hall do elevador, etc).

Tabela 3.2 – Níveis de isolamento da envolvente exterior

Nível de isolamento da envolvente	1	2	3	4	5
Espessura do isolamento (cm) [parede exterior / cobertura ⁽¹⁾]	[0/2]	[2/4]	[4/6]	[6/10]	[15/22]

⁽¹⁾ Há isolamento na cobertura somente no edifício A. Os edifícios B e C não possuem isolamento na laje por encontrarem-se em pavimentos intermédios.

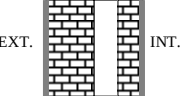
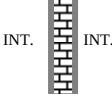
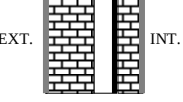
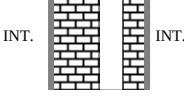
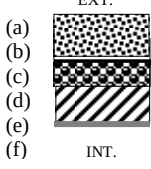
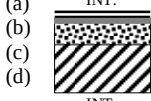
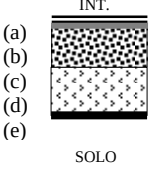
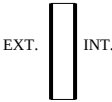
100: parede exterior dupla sem isolamento térmico  EXT. INT. (a)(b)(c)(d)(e) (a) argamassa (2 cm) (b) tijolos furados (15 cm) (c) espaço de ar (5 cm) (d) tijolos furados (11 cm) (e) argamassa (2 cm)	106: parede interior simples  INT. INT. (a)(b)(c) (a) argamassa (2 cm) (b) tijolos furados (11 cm) (c) argamassa (2 cm)
101: parede exterior dupla com isolamento térmico  EXT. INT. (a)(b)(c)(d)(e)(f) (a) argamassa (2 cm) (b) tijolos furados (15 cm) (c) espaço de ar (2 cm) (d) isolamento de poliestireno expandido moldado (variável) (e) tijolos furados (11 cm) (f) argamassa (2 cm)	108: parede interior dupla sem isolamento térmico  INT. INT. (a)(b)(c)(d)(e) (a) argamassa (2 cm) (b) tijolos furados (15 cm) (c) espaço de ar (5 cm) (d) tijolos furados (11 cm) (e) argamassa (2 cm)
111: cobertura em terraço com isolamento  EXT. INT. (a)(b)(c)(d)(e)(f) (a) brita (15 cm) (b) impermeabiliz. (1 cm) (c) isolamento de poliestireno expandido moldado (variável) (d) betão de inertes (10cm) (e) laje aligeirada (13 cm) (f) argamassa (2 cm)	109: parede interior de betão  INT. INT. (a)(b)(c)(d) (a) argamassa (2 cm) (b) betão (15 cm) (c) tijolos furados (7 cm) (d) argamassa (2 cm)
116: laje aligeirada interior  INT. INT. (a)(b)(c)(d) (a) madeira (0,5 cm) (b) argamassa (2 cm) (c) betão (3 cm) (d) laje aligeirada (18 cm)	107: pavimento térreo (de madeira)  INT. SOLO (a)(b)(c)(d)(e) (a) madeira (0,5 cm) (b) argamassa (2 cm) (c) betão (12 cm) (d) brita (15 cm) (e) isolamento de poliestireno expandido moldado (5 cm) 6001: vidro duplo  EXT. INT. (a)(b)(c) (a) vidro plano (4 mm) (b) câmara de ar (6 mm) (c) vidro plano (4 mm)

Figura 3.6 - Desenhos esquemáticos das soluções adoptadas para as envolventes exterior e interior, com inércia média a alta

Tabela 3.3 – Soluções adoptadas para as envolventes exterior e interior com inércia fraca

Tipo de envolvente ⁽¹⁾	Número indicativo da solução adoptada ⁽²⁾
	Edifícios B e C
paredes exteriores	102 ou 103 ⁽³⁾
cobertura exterior	não possui
pavimento intermédio	117
pavimento térreo	não possui
paredes interiores tipo A ⁽⁴⁾	131
paredes interiores tipo B ⁽⁵⁾	132
paredes interiores tipo C ⁽⁵⁾	132
superfícies envidraçadas	6001 ⁽⁶⁾

⁽¹⁾ A indicação da localização dos tipos de envolvente em cada edifício encontra-se no Anexo C.

⁽²⁾ Os códigos referem-se às soluções apresentadas na figura 3.7.

⁽³⁾ A solução adoptada para as paredes exteriores depende do nível de isolamento. Para o nível 1, que corresponde à ausência de isolamento nas paredes exteriores (tabela 3.2), a solução adoptada é a 102. Para os outros níveis, é a 103.

⁽⁴⁾ Paredes que dividem duas zonas do mesmo apartamento.

⁽⁵⁾ Paredes que dividem o apartamento com outras zonas interiores do mesmo edifício (outros apartamentos, caixa de escada, hall do elevador, etc).

⁽⁶⁾ Mesma solução utilizada no primeiro grupo de estudos paramétricos, cujo desenho esquemático já foi apresentado na figura 3.6.

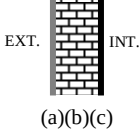
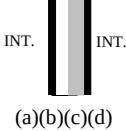
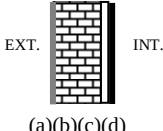
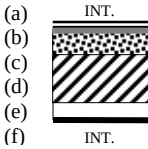
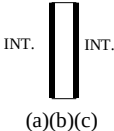
102: parede exterior simples sem isolamento térmico  (a) argamassa (2 cm) (b) tijolos furados (22 cm) (c) gesso carton. (1,25 cm)	132: parede interior de gesso cartonado com isolamento térmico  (a) gesso carton. (2,5 cm) (b) espaço de ar (5 cm) (c) lã de rocha (2 cm) (d) gesso carton. (2,5 cm)
103: parede exterior simples com isolamento térmico pelo interior  (a) argamassa (2 cm) (b) tijolos furados (22 cm) (c) isolamento de poliestireno expandido moldado (variável) (d) gesso carton. (1,25 cm)	117: laje aligeirada interior, com gesso cartonado  (a) alcatifa (0,5 cm) (b) argamassa (2 cm) (c) betão (3 cm) (d) laje aligeirada (18 cm) (e) espaço de ar (5 cm) (f) gesso carton. (1,25 cm)
131: parede interior de gesso cartonado  (a) gesso carton. (1,25 cm) (b) espaço de ar (5 cm) (c) gesso carton. (1,25 cm)	

Figura 3.7 - Desenhos esquemáticos das soluções adoptadas para as envolventes exterior e interior, com inércia fraca

3.4.2 Propriedades termo-físicas das envolventes adoptadas

As propriedades termo-físicas, necessárias para entrada no TRNSYS, dos elementos constituintes de todas as envolventes opacas adoptadas e de suas respectivas superfícies são apresentadas respectivamente nas tabelas 3.4 e 3.5.

Outros dados de entrada necessários são os coeficientes de transferência de calor por convecção nas superfícies interior e exterior. Utilizaram-se os valores sugeridos por defeito pelo TRNSYS, de 3,05 e 17,78 W/ m² K (interior e exterior, respectivamente⁸).

Tabela 3.4 –Propriedades termo-físicas dos elementos das envolventes opacas

Elemento (nomenclatura adoptada no TRNSYS)	condutibilidade térmica λ (W/m K)	calor específico C_p (J/kg K)	massa volumica ρ (kg/m ³)
argamassa de reboco e assentamento (ARG)	1,15 ⁽¹⁾	837 ⁽²⁾	1950 ⁽¹⁾
tijolo cerâmico furado (TIJOFUR)	0,44 ⁽²⁾	936 ⁽²⁾	1100 ⁽²⁾
laje aligeirada com blocos cerâmicos (LAJECER13)	0,93 ⁽¹⁾	965 ⁽³⁾	1320 ⁽³⁾
betão normal (BET)	1,75 ⁽¹⁾	1080 ⁽²⁾	2200 ⁽¹⁾
betão de inertes de argila expandida (BETARG)	0,70 ⁽¹⁾	1000 ⁽⁷⁾	1300 ⁽¹⁾
brita (BRITA)	0,70 ⁽¹⁾	500 ⁽⁴⁾	1250 ⁽¹⁾
granito, gneisse, pórfiro (PEDRA1)	3,00 ⁽¹⁾	820 ⁽⁴⁾	2600 ⁽¹⁾
carvalho, freixo, faia, pinho, casquinha, cedro, abeto, choupo (MAD1)	0,15 ⁽¹⁾	2750 ⁽²⁾	550 ⁽¹⁾
gesso cartonado (GESS)	0,35 ⁽¹⁾	1000 ⁽⁷⁾	750 ⁽¹⁾
poliestireno expandido moldado (ISPOEXMO)	0,04 ⁽¹⁾	1210 ⁽⁵⁾	25 ⁽¹⁾
lã de rocha (LAROCK)	0,04 ⁽¹⁾	900 ⁽⁷⁾	80 ⁽¹⁾
alcatifa (ALCAT)	0,05 ⁽¹⁾	1880 ⁽⁶⁾	400 ⁽¹⁾
impermeabilizante (IMP)	0,23 ⁽¹⁾	1000 ⁽⁷⁾	1000 ⁽¹⁾
Espaços de ar			
Elemento (nomenclatura adoptada no TRNSYS)	resistência térmica (R) m ² K/W		
espaço de ar – parede - 20 mm (ARPAR2)	0,16 ⁽¹⁾		
espaço de ar- parede - 50 a 100 mm (ARPAR5)	0,17 ⁽¹⁾		
espaço de ar – laje - 20 a 100mm (APARV)	0,14 ⁽¹⁾		

Dados colectados em [86] ⁽¹⁾, [87] ⁽²⁾, [88] ⁽⁴⁾, [89] ⁽⁵⁾, [90] ⁽⁶⁾.

⁽³⁾ Valores calculados considerando-se 20% de betão e 80% de tijolo furado.

⁽⁷⁾ Valores retirados da livraria de materiais fornecida pelo TRNSYS.

⁸ Valores por defeito, do programa, de 11 kJ/h m² K e 64 kJ/h m² K.

Tabela 3.5 –Propriedades termo-físicas das superfícies

Superfície	Coeficiente de absorção da radiação solar (α) ⁽¹⁾
superfícies exteriores das paredes ⁽²⁾	0,60 ou 0,30
superfícies exteriores dos telhados	0,60
superfícies interiores das paredes e teto	0,30
superfície interior do pavimento	0,60

⁽¹⁾ Valores retirados da tabela de coeficientes de absorção fornecida pelo TRNSYS.

⁽²⁾ Utilizou-se 0,60 para as superfícies das paredes exteriores nos estudos do primeiro grupo. No segundo grupo, foram feitas algumas simulações considerando-se essas superfícies exteriores mais claras (0,30).

Com relação às janelas, nas simulações pelo TRNSYS é necessário fornecer informações sobre os vidros e caixilhos. Os dados térmicos e ópticos do vidro escolhido devem ser fornecidos num ficheiro padrão, que pode ser gerado pelo programa WINDOW [33]. Esse programa calcula de forma detalhada as reflexões entre os panos de vidro que compõem a janela, além da absorção e transmissão de cada um deles. No CD em anexo tem-se esse ficheiro, com o vidro adoptado nas simulações (conforme já apresentado na figura 3.6, adoptou-se vidro duplo em todas as janelas). Na tabela 3.6 tem-se o seu respectivo factor solar⁹. Quanto aos caixilhos, as propriedades definidas, que foram sempre as mesmas para todas as janelas, também são apresentadas na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Propriedades dos vidros e caixilhos

Factor solar do vidro adoptado (vidro duplo)	0,751
Área de caixilho/ área total da janela	0,15 %
U (coeficiente global de transferência de calor do caixilho)	2,27 W/m ² K
Coeficiente de absorção da radiação solar das superfícies exterior/interior do caixilho	0,6 / 0,6

⁹ Factor solar: fração da energia solar incidente que atravessa o vidro [7].

Tendo em vista todas as propriedades térmicas descritas, nas tabelas 3.7 e 3.8 são apresentados os valores de U (coeficiente global de transferência de calor) para as soluções de envolvente exterior e interior com inércia média a alta e com inércia fraca. Também são indicados os respectivos valores de referência fornecidos pelo regulamento térmico português, o RCCTE [7].

Tabela 3.7 - Coeficientes globais de transferência de calor das envoltentes com inércia média a alta

Coeficientes globais de transferência de calor ⁽¹⁾					
Parede exterior (envolvente 100 ou 101) ⁽²⁾					
nível de isolamento	1	2	3	4	5
U (W/m ² K)	0,91	0,64	0,47	0,37	0,20
$U_{RCCTE(ref.)}$ (W/m ² K)	0,7 (Lisboa) /0,6 (Porto e Évora)				
Cobertura exterior (envolvente 111)					
nível de isolamento	1	2	3	4	5
U (W/m ² K)	0,80	0,50	0,38	0,27	0,14
$U_{RCCTE(ref.)}$ (W/m ² K)	0,5 (Lisboa) /0,45 (Porto e Évora)				
Envolvente		U (W/m ² K)			
pavimento intermédio (116)		2,34			
pavimento térreo (107)		0,57			
parede interior tipo A (106)		1,91			
parede interior tipo B (109)		1,92			
parede interior tipo C (108)		0,97			
janela (6001)		7,41			

⁽¹⁾ Esses coeficientes globais de transferência de calor correspondem aos exactamente utilizados nas simulações pelo TRNSYS. Foi necessário obter esses valores durante os cálculos efectuados no Capítulo 5. No Anexo D é descrita a forma como foram obtidos.

⁽²⁾ O nível 1 de isolamento corresponde à envolvente 100. Os restantes correspondem à envolvente 101 (tabela 3.1 e figura 3.6).

Tabela 3.8 - Coeficientes globais de transferência de calor das envolturas com inércia fraca

Coeficientes globais de transferência de calor ⁽¹⁾					
Parede exterior (envolvente 102 ou 103) ⁽²⁾					
nível de isolamento	1	2	3	4	5
U (W/m ² K)	1,14	0,72	0,53	0,42	0,21
$U_{RCCTE(ref.)}$ (W/m ² K)	0,7 (Lisboa) / 0,6 (Porto e Évora)				
Envolvente		U (W/m ² K)			
pavimento intermédio (117)		1,49			
parede interior tipo A (131)		2,08			
parede interior tipo B (132)		0,95			
parede interior tipo C (132)		0,95			
janela (6001)		7,41			

⁽¹⁾ Esses coeficientes globais de transferência de calor correspondem aos exactamente utilizados nas simulações pelo TRNSYS. Foi necessário obter esses valores durante os cálculos efectuados no Capítulo 5. No Anexo D é descrita a forma como foram obtidos.

⁽²⁾ O nível 1 de isolamento corresponde à envolvente 102. Os restantes correspondem à envolvente 103 (tabela 3.3 e figura 3.7).

3.5 Ganhos internos

Os três edifícios, A, B e C, foram considerados para servirem tanto como habitação quanto como para serviços, pois sua geometria pode ser representativa de ambas as situações, além do que esse tipo de adaptação é comum na realidade portuguesa. Devido ao importante papel que os ganhos internos podem ter no sobreaquecimento dos edifícios, procurou-se abranger uma faixa considerável de variação dos mesmos dentro dessas duas categorias de utilização. Foram então adoptados três padrões distintos de ganhos, conforme a seguinte descrição:

1. *Ganhos internos tipo 1.* Assumem valores baixos, correspondentes à utilização habitacional.

2. *Ganhos internos tipo 2.* Correspondem à utilização de serviços e assumem um valor intermédio de ganhos entre os tipos 1 e 3.
3. *Ganhos internos tipo 3.* Também correspondem à utilização de serviços, com um valor alto de ganhos.

As características de ocupação de cada zona (equipamentos, pessoas e iluminação responsáveis pelos ganhos internos e seus horários de utilização) variam de acordo com o padrão de ganhos adoptado. As figuras 3.8 e 3.9 apresentam a descrição do horário de ocupação das zonas e os equipamentos, pessoas e iluminação considerados para cada uma delas, para cada padrão de ganhos internos. No caso dos ganhos tipo 2 e 3, as zonas ocupadas são as mesmas, pois ambos correspondem à utilização de serviços. A contribuição de cada elemento foi obtida na tabela fornecida como padrão pelo TRNSYS, sendo que a correspondente às pessoas é a mesma descrita na ISO 7730 [40].

De acordo com a distribuição apresentada, e considerando-se somente as áreas úteis das zonas ocupadas, tem-se os ganhos internos médios por metro quadrado, apresentados na tabela 3.9. Estes correspondem à média entre os três edifícios, para cada padrão de ganhos e contando-se como referência um período de 24 horas. Também são indicados na tabela os ganhos internos médios prescritos pelo RCCTE [7].

Tabela 3.9 – Ganhos internos médios, em W/m^2 , para os três padrões de ganhos internos.

Padrão de ganhos internos	Ganhos internos médios (W/m^2) durante um período de 24 horas ⁽¹⁾	Ganhos internos médios (W/m^2), prescritos pelo RCCTE, para um período de 24 horas
1 (habitação)	3,3	4,0
2 (serviços)	9,2	7,0
3 (serviços)	14,8	7,0

⁽¹⁾ Valor médio entre os três edifícios, e referente somente às zonas ocupadas.

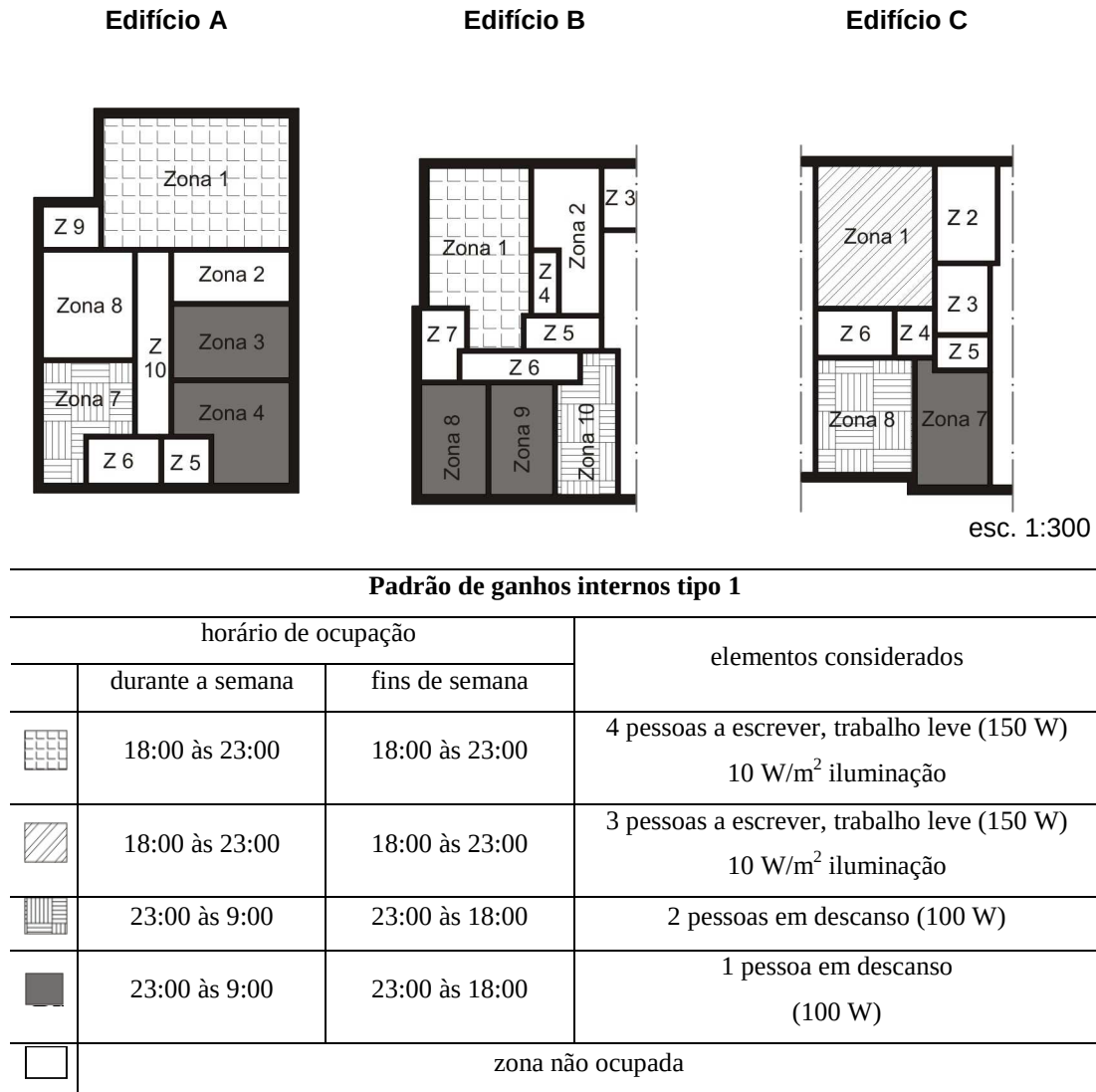
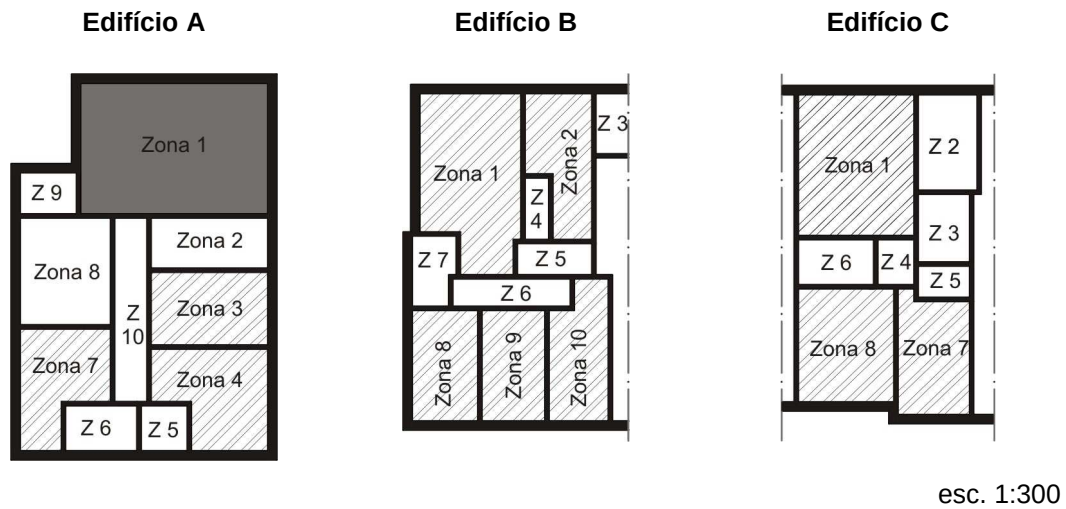


Figura 3.8 - Zonas ocupadas, horário de ocupação e elementos considerados, de acordo com o padrão de ganhos internos tipo 1, correspondente à utilização habitacional, para os edifícios A, B e C.



Padrão de ganhos internos tipo 2			
horário de ocupação			elementos considerados
	durante a semana	fins de semana	
	09:00 às 18:00	-----	2 pessoas a digitar, trabalho leve (150 W) 1 computador, 230 W 5 W/m ² iluminação
	09:00 às 18:00	-----	1 pessoas a digitar, trabalho leve (150 W) 1 computador, 230 W 5 W/m ² iluminação
	zona não ocupada		

Padrão de ganhos internos tipo 3			
horário de ocupação			elementos considerados
	durante a semana	fins de semana	
	09:00 às 18:00	-----	4 pessoas a digitar, trabalho leve (150 W) 2 computadores, 230 W 5 W/m ² iluminação
	09:00 às 18:00	-----	2 pessoas a digitar, trabalho leve (150 W) 2 computadores, 230 W 5 W/m ² iluminação
	zona não ocupada		

Figura 3.9 - Zonas ocupadas, horário de ocupação e elementos considerados, de acordo com os padrões de ganhos internos tipo 2 e 3, correspondentes à utilização de serviços, para os edifícios A, B e C.

3.6 Ventilação

Foram consideradas três possibilidades para a renovação do ar:

1. Ventilação mínima, ou seja, renovação do ar somente devido à infiltração pelas aberturas.
2. Ventilação nocturna, somente durante os meses de Verão.
3. Ventilação diurna e nocturna, também somente durante os meses de Verão.

A tabela 3.10 apresenta os horários e as taxas de infiltração considerados para cada uma dessas possibilidades. Para a alternativa 1 (ventilação mínima), adoptou-se uma taxa de infiltração de 0,6 renovações por hora (RPH), conforme indicado por Afonso et al. [91]. Para as alternativas 2 e 3, quando foram previstas ventilação nocturna ou diurna mais nocturna, a renovação do ar só ocorreu quando a temperatura do ar exterior era menor que a média da temperatura do ar das zonas ocupadas. Caso contrário, era adoptada a taxa de infiltração de 0,6 RPH. Com isso, foi possível garantir que, durante os períodos especificados, houvesse ventilação natural somente quando as condições eram favoráveis para tal. Trata-se de uma situação ideal, que pressupõe uma actuação muito atenta dos ocupantes ou intervenção de sistemas de controlo automático. Na realidade, o controlo nunca será tão efectivo, mas considerou-se apenas a solução ideal como forma de obter a máxima contribuição potencial para os efeitos benéficos da ventilação natural. As características da ventilação também variaram de acordo com o tipo de utilização do edifício: habitação ou serviços. Para os edifícios de serviços, devido aos seus ganhos internos mais altos, considerou-se uma taxa de renovação do ar e um período de duração maiores.

Tabela 3.10 – Horários e taxas de infiltração adoptados

Possibilidades consideradas para a renovação do ar	utilização: habitação		utilização: serviços	
	taxa de infiltração (RPH ⁽¹⁾)	horário	taxa de infiltração (RPH ⁽¹⁾)	horário
1. ventilação mínima	0,6	constante, durante todo o ano	0,6	constante, durante todo o ano
2. ventilação nocturna	3,0	entre 18:00 e 24:00, todos os dias da semana, durante o Verão ^{(2) (3)}	5,0	entre 18:00 e 09:00, de segunda a sexta, durante o Verão ^{(2) (3)}
	0,6	restante do tempo, no Verão e 24 horas/dia, no restante do ano ⁽³⁾	0,6	restante do tempo, no Verão e 24 horas/dia, no restante do ano ⁽³⁾
3. ventilação diurna e nocturna	3,0	entre 09:00 e 24:00, todos os dias da semana, durante o Verão ^{(2) (3)}	5,0	24 horas, todos os dias da semana, durante o Verão ^{(2) (3)}
	0,6	restante do tempo, no Verão e 24 horas/dia, no restante do ano ⁽³⁾	0,6	restante do tempo, no Verão e 24 horas/dia, no restante do ano ⁽³⁾

⁽¹⁾ RPH: número de renovações por hora.

⁽²⁾ Nesses casos, essa taxa de ventilação foi adoptada somente quando a temperatura do ar exterior era menor que a média da temperatura do ar das zonas ocupadas. Caso contrário, foi considerada a taxa de infiltração de 0,6 RPH.

⁽³⁾ Os períodos de Verão variam de acordo com a região climática e são apresentados na secção 3.8.

3.7 Sombreamento das janelas

Considerou-se sombreamento nas janelas durante o período de Verão, o qual é variável de acordo com o clima e apresentado na secção 3.8.

O dispositivo de sombreamento é exterior, (como por exemplo, um estore), e presente em todas as janelas do edifício, sem exceção. Foram consideradas sete possibilidades de sombreamento constantes ao longo do tempo. A tabela 3.11 apresenta os valores resultantes do factor solar das janelas para os sete sombreamentos adoptados, que variam entre 0,75 (janelas sem sombreamento) a 0,15 (janelas com 80% de sua área sombreada). Maiores detalhes sobre como esses factores solares foram obtidos podem ser vistos no Anexo E.

No TRNSYS também é necessária a definição de algumas propriedades relativas ao dispositivo de sombreamento, que são apresentadas na tabela 3.12.

Tabela 3.11 – Factores solares das janelas correspondentes às diferentes possibilidades de sombreamento

possibilidade de sombreamento (TRNSYS)	factor solar da janela (vidro + sombreador)
1	0,75
2	0,60
3	0,45
4	0,37
5	0,30
6	0,22
7	0,15

Tabela 3.12 – Propriedades do dispositivo de sombreamento.

Propriedade	valor adoptado
Resistência térmica adicional devido ao dispositivo de sombreamento ($\text{m}^2 \text{K/W}$)	0 (zero) ⁽¹⁾
Coeficiente de reflexão do dispositivo de sombreamento	0,6

⁽¹⁾ Considerou-se que o estore é do tipo permeável ao ar, e portanto a temperatura do espaço de ar entre o estore e o vidro é próxima da temperatura exterior. Logo, a resistência que interessa é a que está entre esse espaço de ar e o interior do edifício. Dessa forma, pode-se desprezar a resistência do estore.

3.8 Clima

Todas as simulações pertencentes ao primeiro grupo de estudos paramétricos, que correspondem aos resultados mais significativos, foram efectuadas para climas portugueses. Como o enfoque da pesquisa era a avaliação das condições de sobreaquecimento no Verão, foram seleccionados climas representativos das três regiões climáticas de Verão de Portugal, definidas no regulamento térmico, o RCCTE [7], e apresentadas na figura 3.10. As cidades escolhidas, Porto, Lisboa e Évora, são também indicadas no mapa.

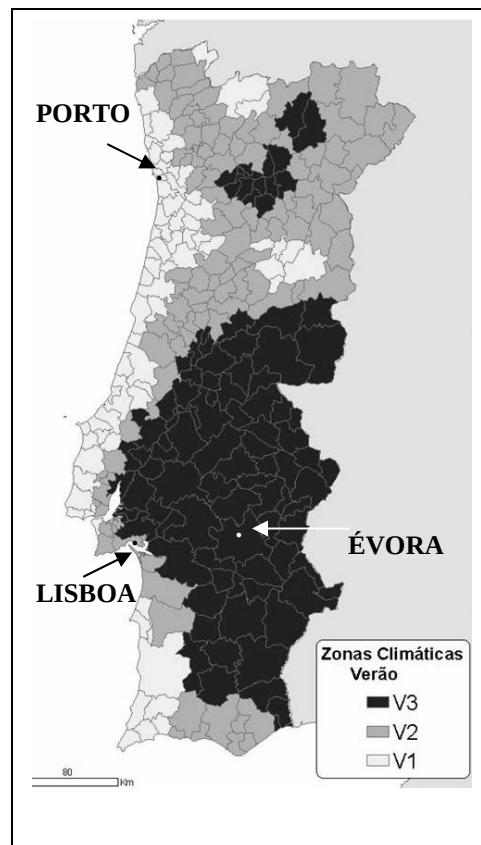


Figura 3.10 - Regiões climáticas de Verão, em Portugal, e cidades escolhidas para as simulações.

No segundo grupo de estudos paramétricos, a fim de se verificar o impacto do aumento do isolamento em outros climas do Sul Europeu, considerou-se as cidades de Nice, na França e Atenas, na Grécia. Estes eram os dois países do Sul Europeu para os quais se

tinha também critérios disponíveis para a avaliação do conforto com o mesmo grau de precisão dos usados para a situação portuguesa (ver secção 2.5.2).

Os ficheiros de dados climáticos para todos os climas considerados foram obtidos através do Meteonorm [92]. A partir da lista de estações climatológicas disponíveis nesse programa, foram gerados os dados horários de temperatura do ar, humidade e radiação global horizontal para um ano típico. Nas tabelas 3.13 e 3.14 têm-se a média mensal desses dados para todas as localidades consideradas, além da latitude, longitude e altitude das suas respectivas estações climatológicas. Também foi necessária a temperatura do solo para as simulações do edifício A, que possui um pavimento no rés-do-chão. Os valores adoptados são apresentados no Anexo F, de acordo com os dados climáticos obtidos em [93].

Na tabela 3.15 tem-se os períodos de Verão e Inverno para cada um dos climas. A definição dos mesmos seguiu um procedimento similar ao utilizado pelo anterior regulamento português¹⁰ [1] e por Mendes et al. [94], para o cálculo das estações de arrefecimento e aquecimento. Nesta pesquisa, para todos os climas estudados, considerou-se os *meses* de Inverno aqueles com *temperatura média* menor que 13 °C, e os *meses* de Verão, aqueles cujo mesmo valor de temperatura fosse maior que 18,5 °C¹¹.

3.9 Regime de controlo da temperatura interior

As simulações foram efectuadas para dois cenários:

- regime livre, sem a existência de sistemas de aquecimento e arrefecimento;
- com sistemas de aquecimento e arrefecimento, e definição de temperaturas de controlo para Verão e Inverno.

¹⁰ Este era o regulamento disponível quando esses períodos foram estabelecidos.

¹¹ Para esta pesquisa, o Verão e o Inverno foram definidos tendo-se como base períodos mensais. Nas referências indicadas ([1] e [94]), haviam sido considerados períodos de 10 dias.

Tabela 3.13 – Dados climáticos médios mensais para o Porto, Lisboa e Évora

Porto												latitude: 41,08° longitude: 8,36° altitude: 100 m
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura (°C)	9,3	10,1	11,5	12,9	15,1	18,1	19,9	19,8	19	16,2	12,3	9,9
Humidade (%)	81	80	75	74	74	74	73	73	76	80	81	81
Radiação global horizontal (kWh/m ²)	60	71	126	151	193	208	206	192	145	101	60	48
Lisboa												latitude: 38,43° longitude: 9,09° altitude: 77 m
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura (°C)	11,4	12,3	13,7	15,1	17,4	20,2	22,4	22,8	21,7	18,5	14,5	11,8
Humidade (%)	80	78	71	69	66	66	63	61	67	72	77	79
Radiação global horizontal (kWh/m ²)	66	79	144	158	199	216	225	207	156	113	65	58
Évora												latitude: 38,34° longitude: 7,54° altitude: 321 m
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura (°C)	9,4	10,2	11,8	13,4	16,3	20,1	23	23,2	21,6	17,3	12,7	9,9
Humidade (%)	78	71	70	64	61	53	46	46	54	64	75	78
Radiação global horizontal (kWh/m ²)	74	84	147	157	204	221	241	217	162	120	72	61

Tabela 3.14 – Dados climáticos médios mensais para Atenas e Nice

Atenas												<i>latitude: 38,04°</i>
												<i>longitude: -23,37°</i>
												<i>altitude: 107 m</i>
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura (°C)	11,0	10,8	11,4	14,4	18,8	22,8	25,5	25,8	23,8	19,5	15,9	13,0
Humidade (%)	71	71	68	62	59	53	48	49	56	65	72	72
Radiação global horizontal (kWh/m ²)	66	74	104	147	183	201	213	200	155	106	66	52
Nice												<i>latitude: 43,4°</i>
												<i>longitude: -7,12°</i>
												<i>altitude: 5 m</i>
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura (°C)	8,7	9,4	10,9	13,2	16,4	19,9	22,9	23,0	20,5	17,0	12,4	9,6
Humidade (%)	66	66	68	72	74	72	71	71	73	73	69	67
Radiação global horizontal (kWh/m ²)	54	67	113	141	183	197	207	183	135	90	55	46

Tabela 3.15 – Períodos de Verão e Inverno para todos os climas estudados

VERÃO												
<i>meses</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Porto												
Lisboa												
Évora												
Atenas												
Nice												
INVERNO												
<i>meses</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Porto												
Lisboa												
Évora												
Atenas												
Nice												

No primeiro cenário, a temperatura flutua livremente e não há nenhum tipo de controle. Dessa forma, é possível saber quais as temperaturas interiores atingidas em cada caso, e avaliar as condições de conforto.

No segundo cenário, considerou-se aquecimento e arrefecimento somente nas zonas ocupadas (ver secção 3.5). Não foi definido nenhum sistema específico, mas utilizada uma opção disponível no TRNSYS de um controlo ideal, com as temperaturas de 25 °C para arrefecimento e 20 °C para aquecimento. A potência máxima de aquecimento e arrefecimento foi considerada ilimitada durante o período ocupado e igual a zero no restante do tempo, o que significa que, quando não há ocupação, os sistemas de aquecimento e arrefecimento ficam desligados. Nenhum sistema de humificação ou desumificação foi considerado.

Quando a temperatura ultrapassa os limites de controlo definidos, o ambiente arrefece ou aquece, conforme necessário. Como consequência, tem-se que a temperatura flutua entre 20 e 25 °C durante o ano todo, no período ocupado. A quantidade de energia fornecida ou extraída para que isso ocorra corresponde respectivamente às *necessidades de aquecimento e arrefecimento*, que são dados de saída das simulações.

3.10 Quadro-resumo dos dados de entrada

A tabela 3.16 apresenta um resumo dos dados de entrada dos estudos paramétricos expostos anteriormente, com indicação de todos os valores adoptados.

Tabela 3.16 – Quadro-resumo dos dados de entrada dos estudos paramétricos

Edifícios simulados	
A, B e C (figuras 3.1 e 3.5)	
Envolventes exterior e interior *	
<i>Inércia média a alta</i> paredes exteriores duplas, com isolamento (variável) na caixa de ar. U entre 0,20 e 0,91. cobertura exterior em terraço, com isolamento (variável). U entre 0,14 e 0,80. paredes interiores de betão ($U=1,92$), ou de tijolos cerâmicos, simples ($U=1,91$) ou duplas ($U=0,97$) pavimentos interiores: laje aligeirada. $U = 2,34$. pavimento térreo de madeira, brita e betão. $U = 0,57$. vidro duplo, $U = 7,41$, factor solar = 0,75	<i>Inércia fraca **</i> paredes exteriores simples, com isolamento (variável). U entre 0,21 e 1,14. paredes interiores de gesso cartonado, simples ($U=2,08$) ou duplas com isolamento ($U=0,95$) pavimentos interiores: laje aligeirada, com forro de gesso cartonado. $U = 1,49$. vidro duplo, $U = 7,41$, factor solar = 0,75 <i>Coefficientes de absorção da radiação solar das superfícies exteriores das paredes</i> duas possibilidades: 0,60 / 0,30 **
* <i>Coefficiente global de transferência de calor, U, em W/m^2K</i> ** <i>Opção simulada em pequenas séries de estudos.</i>	
Isolamento da envolvente exterior	
5 níveis de isolamento da envolvente: [0/2], [2/4], [4/6], [6/10] e [15/22] cm [espessura do isolamento da parede exterior / espessura do isolamento do telhado]	
Percentagem de área de janelas / área útil de pavimento	
Edifício A: 12,9% / Edifício B: 11,6% / Edifício C: 10,2%	
Sombreamento das janelas	
7 possibilidades de sombreamento: 0,75 / 0,60 / 0,45 / 0,37 / 0,30 / 0,22 / 0,15 (factores solares do conjunto: vidro + dispositivo de sombreamento exterior *)	
* <i>Há sombreamento nos meses de Verão.</i>	

Tabela 3.16 (Continuação) –Quadro-resumo dos dados de entrada dos estudos paramétricos

Tipos de utilização		
Um padrão de ocupação habitacional e dois padrões de serviços		
Períodos de ocupação		
Utilização: habitacional Entre 18:00 e 09:00 horas, durante a semana 24 horas nos finais de semana	Utilização: serviços, padrões 1 e 2 Entre 09:00 and 18:00 horas, durante a semana somente	
Ganhos internos *		
Utilização: habitacional 3,3 W/m ²	Utilização: serviços, padrão 1 9,2 W/m ²	Utilização: serviços, padrão 2 14,8 W/m ²
* Valores médios para períodos de 24 horas, nas zonas ocupadas.		
Ventilação *		
3 possibilidades de ventilação: ventilação mínima / ventilação nocturna / ventilação nocturna + diurna		
Ventilação Mínima Taxa constante (natural) de 0,6 RPH		
Ventilação nocturna **		
Utilização: habitacional Horário: entre 18:00 e 24:00 horas (3,0 RPH), todos os dias da semana	Utilização: serviços, padrões 1 e 2 Horário: entre 18:00 e 09:00 horas, (5,0 RPH), de segunda a sexta	
Ventilação diurna e nocturna **		
Utilização: habitacional Horário: entre 09:00 e 24:00 horas (3,0 RPH), todos os dias da semana	Utilização: serviços, padrões 1 e 2 Horário: 24 horas (5,0 RPH), todos os dias da semana	
* RPH: número de renovações por hora. ** Há ventilação somente durante o Verão, quando a temperatura do ar exterior for menor que a média da temperatura do ar das zonas ocupadas. No restante do tempo, é igual a 0,6 RPH.		
Climas		
Portugal: Porto, Lisboa e Évora / Sul Europeu: Nice e Atenas		
Aquecimento e Arrefecimento *		
Temperatura de controlo para arrefecimento: 25 °C Temperatura de controlo para aquecimento: 20 °C * Há aquecimento e arrefecimento somente nas zonas e nos períodos ocupados, durante todo o ano.		

Capítulo 4 Estudos paramétricos: resultados

Neste Capítulo são apresentados todos os resultados dos estudos paramétricos realizados neste trabalho, cujos dados de entrada foram descritos no Capítulo anterior. Devido à grande quantidade de dados analisados, antes de se proceder a análise dos resultados propriamente ditos são feitos alguns esclarecimentos gerais sobre o Capítulo, sendo fornecido um panorama geral dos tipos de análises conduzidos (secção 4.1). Em seguida, são analisados alguns casos de forma detalhada (secção 4.2), para posteriormente serem apresentados os resultados na sua totalidade, subdivididos nos dois tipos de utilização considerados: habitação (secção 4.3) e serviços (secção 4.4). Finalmente, são apresentadas as considerações finais sobre o Capítulo (secção 4.5).

4.1 Esclarecimentos gerais sobre o capítulo

Na apresentação dos resultados dos estudos paramétricos, faz-se referência às alternativas adoptadas para a ventilação, o nível de isolamento, o sombreamento, etc. A descrição detalhada de todas as possibilidades escolhidas encontra-se ao longo do Capítulo 3 e no quadro-resumo apresentado na secção 3.10.

4.1.1 Esclarecimentos gerais sobre os casos detalhados

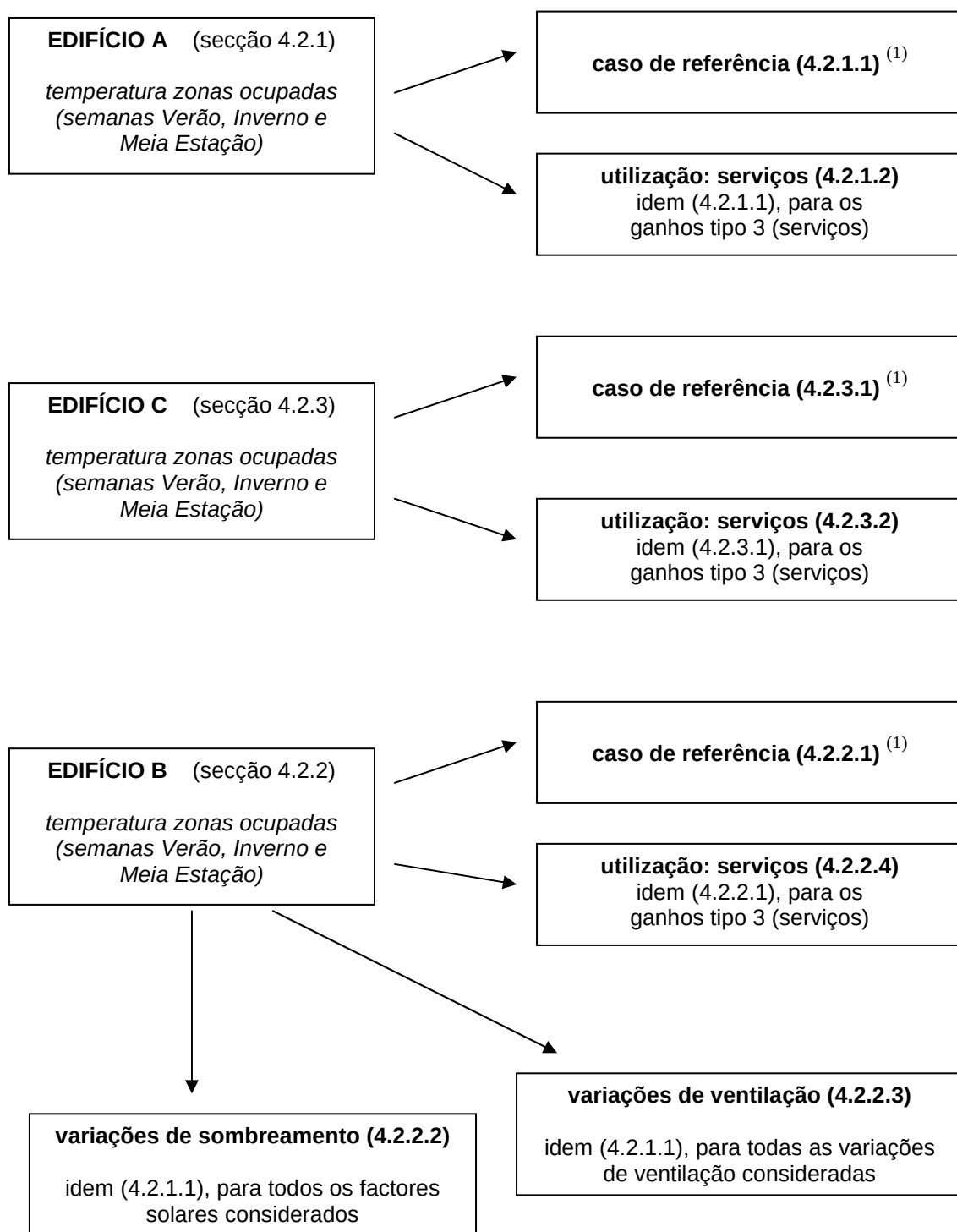
Na secção 4.2 deste Capítulo é apresentado o detalhamento de alguns casos, dentre os simulados, indicando-se a evolução da temperatura do ar das zonas ocupadas durante semanas típicas de Inverno, Verão e Meia Estação. As semanas de Verão e de Meia

Estação correspondem respectivamente aos períodos de 7 dias consecutivos dos meses de Verão e Outono ou Primavera ¹², com maiores temperaturas médias diárias do ar. De forma análoga, a semana de Inverno corresponde ao período com as menores temperaturas.

Os objectivos desse tipo de análise são (a) apresentar a temperatura zona a zona para alguns casos seleccionados, haja visto que nos resultados gerais, os dados são sintéticos e referem-se sempre ao edifício como um todo; (b) verificar se há coerência nos resultados encontrados, em relação às três estações do ano analisadas; (c) verificar o funcionamento correcto do programa com relação às diferentes possibilidades consideradas nas simulações, nomeadamente as variações de ventilação e sombreamento.

Segundo esses objectivos, alguns casos foram seleccionados para apresentação dos seus dados detalhados. Na figura 4.1 tem-se um panorama geral dos tipos de análises conduzidos, os quais foram considerados separadamente para os edifícios A, B e C. Para cada um desses edifícios, primeiramente são apresentados os resultados para um caso específico, denominado *caso de referência*, que corresponde ao edifício em questão, utilizado como habitação, em Évora, sem sombreamento, com ventilação mínima e nível de isolamento intermédio. Em seguida, é analisado o mesmo caso de referência, com outro padrão de ganhos internos (alteração de habitação para serviços). Para um dos edifícios (no caso, o B) também foram analisados os resultados correspondentes às variações de sombreamento e ventilação. Dessa forma, puderam ser contempladas as principais alterações consideradas nas simulações (ver Capítulo 3). Quanto às variações de nível de isolamento da envolvente e de inércia térmica, casos detalhados são apresentados posteriormente, nas secções 4.3.1.1 e 4.4.1.6, respectivamente.

¹² Os meses de Outono e Primavera correspondem aos meses do ano não caracterizados nem como Inverno, nem como Verão. O critério para caracterização dos meses de Verão e Inverno é apresentado na secção 3.8.



⁽¹⁾ Caso de referência: corresponde ao edifício em questão, utilizado como habitação (ganhos internos 1), em Évora, janelas sem sombreamento (factor solar igual a 0,75), com ventilação mínima e nível de isolamento intermédio (nível 3).

Figura 4.1 – Panorama geral dos tipos de análises conduzidos na secção 4.2

4.1.2 Esclarecimentos gerais sobre os resultados para as utilizações como habitação e serviços

Todos os resultados das simulações foram trabalhados e sintetizados segundo a metodologia descrita na secção 2.5.2, de forma a facilitar a sua posterior análise. A partir das temperaturas horárias de cada zona, foram encontrados todos os parâmetros de conforto descritos na tabela 2.8 para o edifício como um todo, bem como foi conduzida a análise das necessidades de aquecimento e arrefecimento, através dos dados de consumo de energia, fornecidos pelas simulações. Todos esses resultados foram subdivididos em dois grandes grupos, referentes aos dois tipos de utilização previstos: habitação e serviços ¹³. Seguem abaixo algumas observações gerais sobre esses resultados, que devem ser reforçadas:

- Os parâmetros de conforto referem-se sempre somente ao período ocupado.
- Os períodos de Verão considerados na obtenção dos parâmetros de conforto correspondem sempre aos meses de Julho a Setembro.
- Os parâmetros de conforto são sempre obtidos da seguinte forma: para cada um deles, primeiramente são encontrados os valores referentes a cada uma das zonas ocupadas. Posteriormente, é feita a média aritmética entre esses valores, a fim de se obter um valor referente ao edifício como um todo.
- Salvo quando expressamente referido, as cores das paredes exteriores e a inércia térmica correspondem aos valores utilizados no primeiro grupo de estudos paramétricos.
- A indicação dos níveis de isolamento da envolvente exterior, com seus respectivos coeficientes globais de transferência de calor, foi apresentada nas tabelas 3.7 e 3.8.

¹³ Os resultados de todos os casos simulados são fornecidos no CD anexo a esta tese (somente os parâmetros de conforto representativos – ver secção 4.3.1.2).

- Quando se trata dos diversos níveis de sombreamento adoptados, estes são expressos através do factor solar do conjunto vidro duplo mais dispositivo de sombreamento (ver tabela 3.11). As janelas com os menores valores de factores solares são as que possuem maior sombreamento.

As figuras 4.2 e 4.3 apresentam um panorama geral dos tipos de análise conduzidos para o caso habitacional e para o de serviços, respectivamente. As análises são sempre feitas levando-se em conta o que ocorre com um determinado parâmetro em função do aumento do isolamento. O primeiro parâmetro a ser avaliado é o sombreamento, para os casos com ventilação mínima. Em seguida, são acrescentadas, passo a passo, outras variações, como as de ventilação, cor exterior, ou clima. Para facilitar a interpretação dos resultados, são seleccionados alguns parâmetros de conforto como representativos, dentre todos os definidos. São também feitas análises comparativas entre as diferentes alternativas adoptadas para a inércia (figura 4.3). Procura-se sempre verificar se as tendências encontradas são as mesmas para todos os edifícios e climas, além de se efectuar uma comparação geral entre o comportamento dos três edifícios. Para finalizar, faz-se a análise das necessidades de aquecimento e arrefecimento, e as considerações finais para o tipo de utilização em questão (habitação ou serviços).

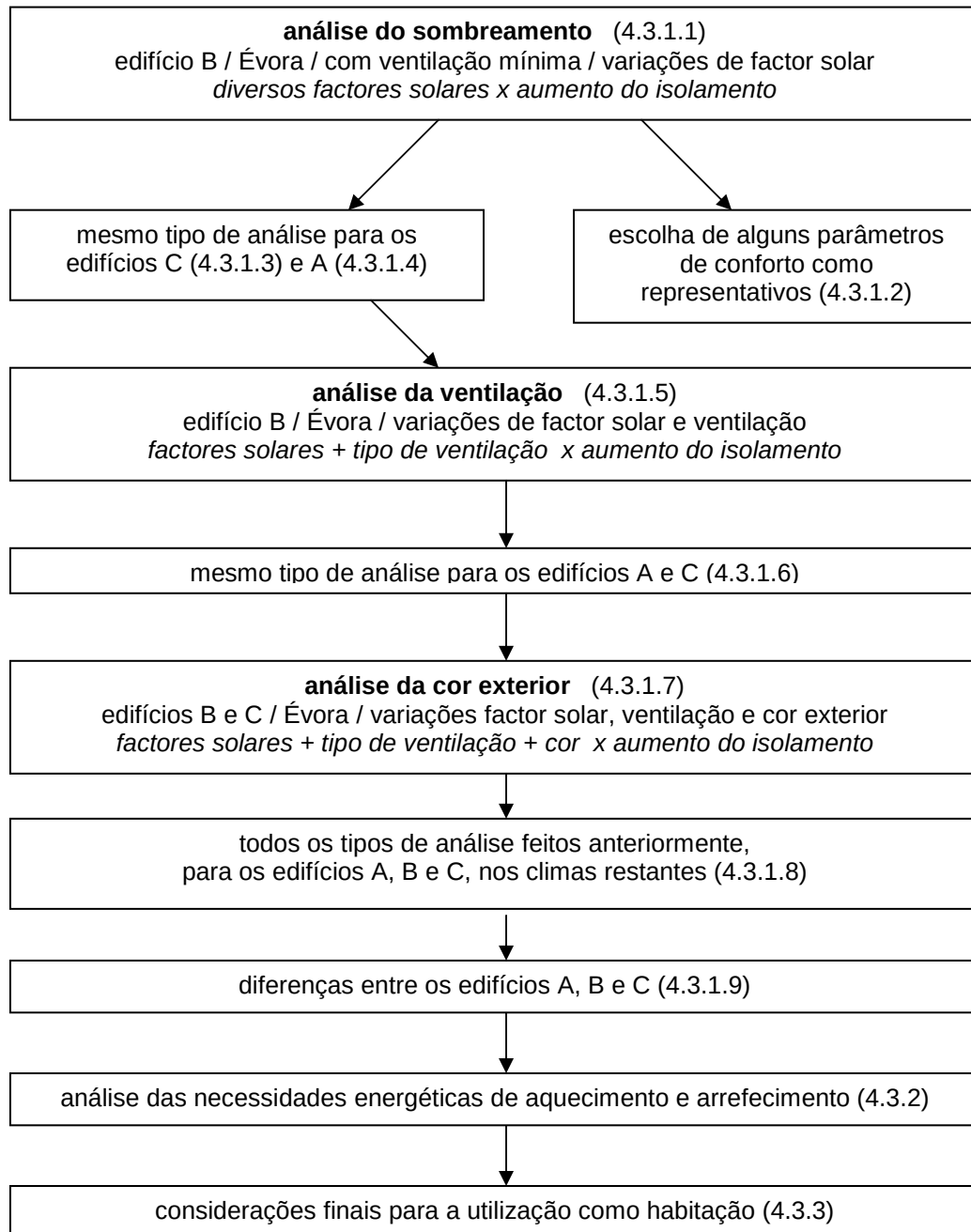


Figura 4.2 – Panorama geral dos tipos de análise conduzidos para a utilização como habitação (secção 4.3)

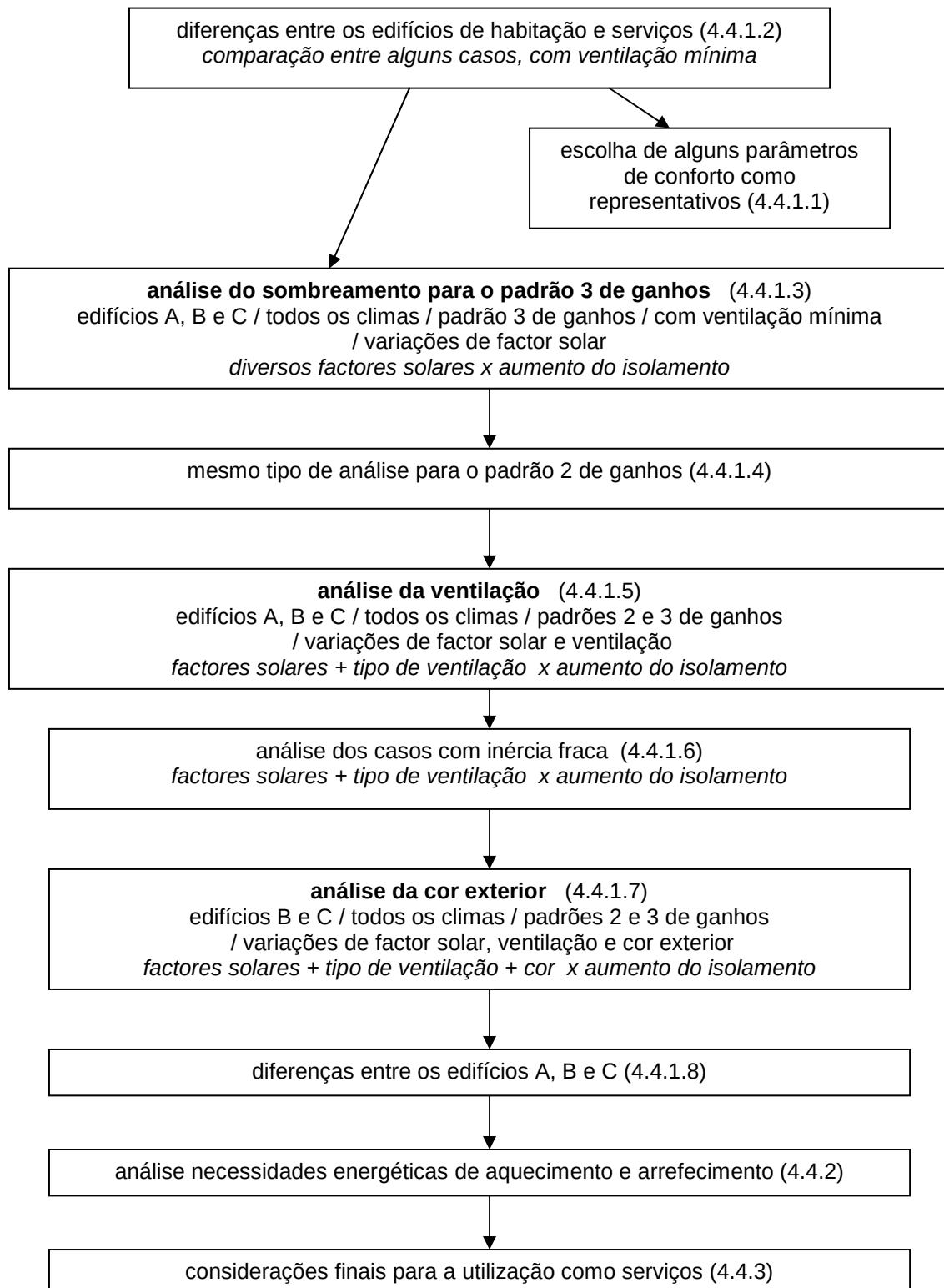


Figura 4.3 – Panorama geral dos tipos de análise conduzidos para a utilização como serviços (secção 4.4)

4.2 Descrição de casos detalhados

4.2.1 Edifício A

4.2.1.1 Edifício A, caso de referência

Nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6 tem-se a evolução da temperatura do ar das zonas ocupadas (zonas 1, 3, 4 e 7) do caso de referência do edifício A, ao longo de semanas de Verão, Inverno e Meia Estação. O caso de referência corresponde à utilização como habitação (ganhos internos 1), em Évora, janelas sem sombreamento (factor solar igual a 0,75), ventilação mínima e nível de isolamento intermédio (nível 3) ¹⁴. Também são indicados nos gráficos a temperatura exterior e os limites superior e inferior de conforto (faixa de conforto segundo o critério anteriormente descrito na secção 2.5.2, e temperatura de conforto de acordo com a equação referente ao país em questão).

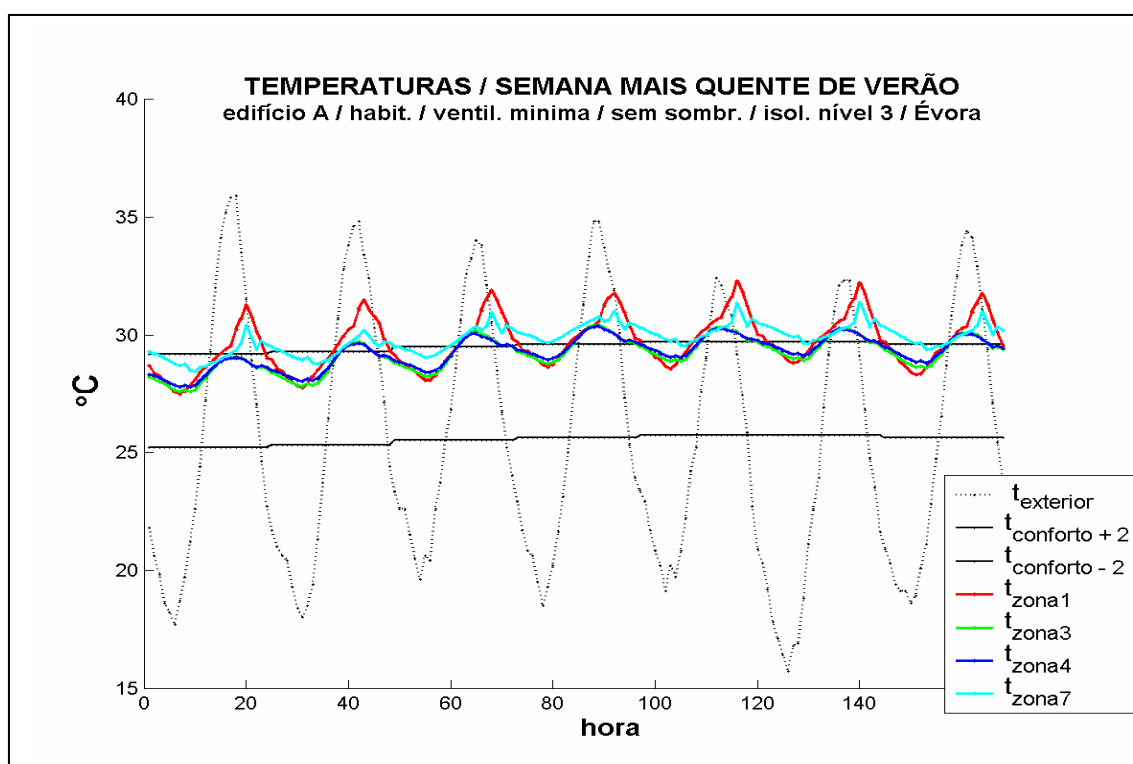


Figura 4.4 – Temperaturas durante uma semana de Verão.
Edifício A, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

¹⁴ Ver tabelas 3.2, 3.7 e 3.8 (níveis de isolamento), 3.10 (padrões de ventilação adoptados) e 3.11 (factores solares das janelas) e figuras 3.8 e 3.9 (características de ocupação).

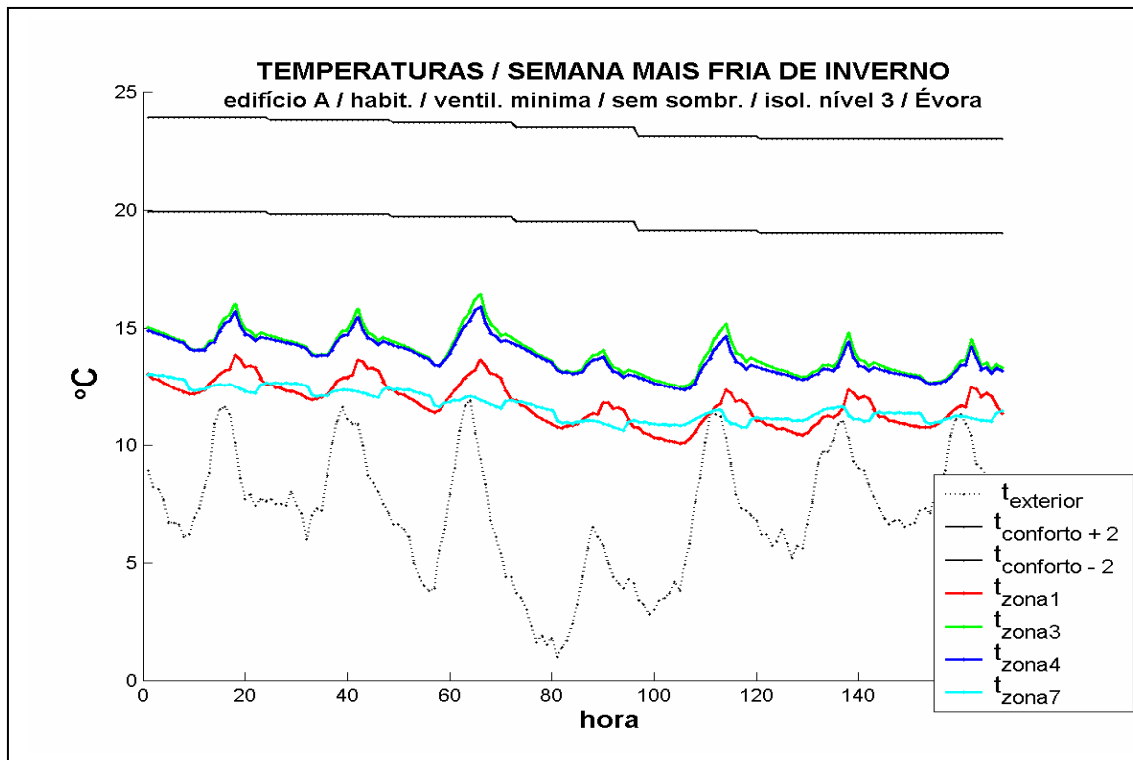


Figura 4.5 – Temperaturas durante uma semana de Inverno.
Edifício A, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

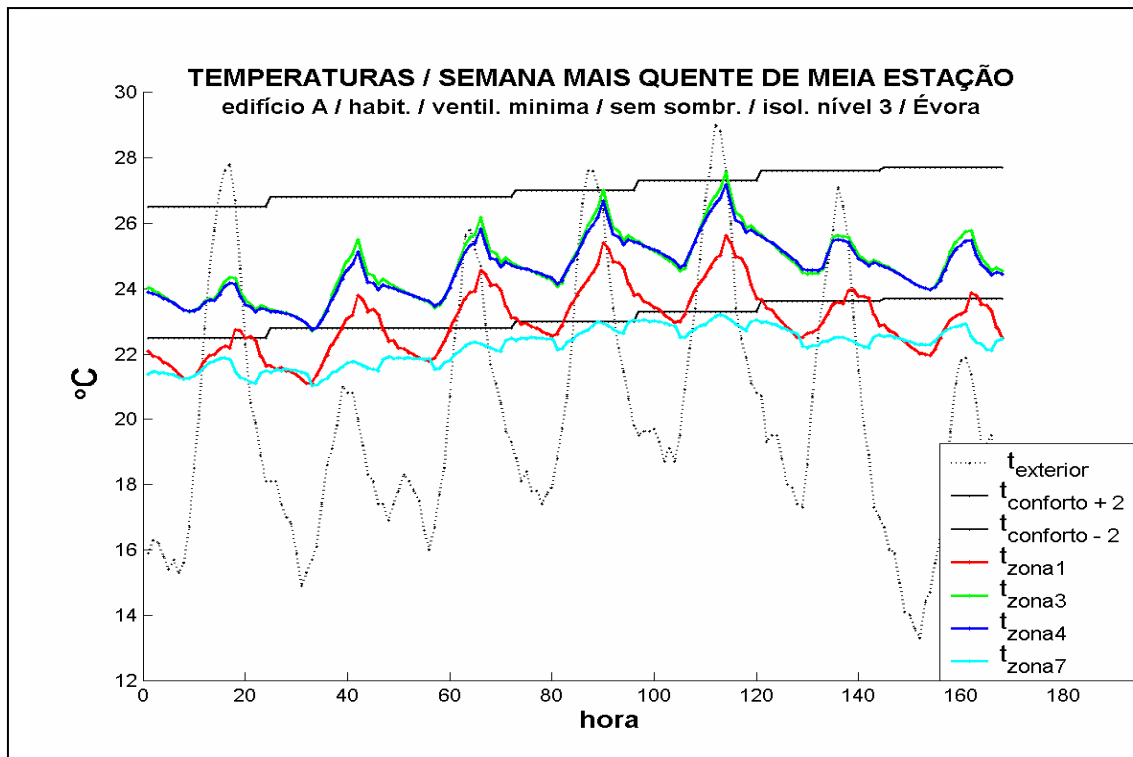


Figura 4.6 – Temperaturas durante uma semana de Meia Estação.
Edifício A, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

Observa-se em todas as figuras, como esperado, o amortecimento e o atraso da temperatura interior em relação às variações externas, devido à inércia da envolvente.

Nota-se também que as zonas 3 e 4 possuem um comportamento muito similar entre si em todas as estações, pois encontram-se lado a lado no edifício, com janelas com as mesmas dimensões e orientação (voltadas ao sul).

No Verão (figura 4.4), em todas as zonas, há alguns períodos que apresentam desconforto. A zona 1 é a que apresenta maior amplitude de temperatura, pois possui três paredes voltadas ao exterior, com janelas voltadas a 3 orientações distintas, o que a faz receber grande insolação durante o dia, mas também perder o calor mais facilmente durante à noite.

No Inverno (figura 4.5), as temperaturas são sempre bem inferiores à faixa de conforto, para todas as zonas, indicando a necessidade de utilização de aquecimento. As zonas voltadas a sul (zonas 3 e 4) são menos frias, devido ao facto dessa orientação ser a mais favorável no Inverno, por receber insolação durante todo o dia.

Na semana mais quente de Meia Estação (figura 4.6), o edifício apresenta-se confortável nas zonas 3 e 4, as quais, com janelas orientadas a sul, recebem insolação praticamente o dia todo. A zona 7 (orientação norte), não recebe insolação durante esse período, encontrando-se abaixo do limite inferior durante toda a semana. A zona 1, devido às suas janelas voltadas a norte, sul e leste, acaba por ser aquecida também na Meia Estação, e oferecendo condições de conforto durante o dia. Durante a noite, devido à perda de calor para o exterior pela envolvente, acaba por tornar-se mais fria.

Os outros casos, produtos das diversas combinações de clima, edifício, etc, também apresentaram diferenças entre as zonas. Devido à grande quantidade de resultados obtida com os estudos paramétricos, e como cada caso possui o seu comportamento próprio, foi necessário adoptar um critério comum que fornecesse a indicação do desconforto no edifício como um todo. Portanto, segundo a metodologia desenvolvida neste trabalho, são determinados os parâmetros de conforto para o Verão, para o edifício

como um todo, através da média aritmética entre os parâmetros obtidos para cada zona (secções 2.5.2 e 3.9). Dessa forma, na apresentação dos resultados comparativos (secção 4.3), os parâmetros de conforto referem-se ao desconforto do edifício em termos médios, no Verão.

4.2.1.2 Edifício A, caso de referência, utilizado como serviços

Os ganhos internos de serviços, e neste caso, do tipo 3, são mais elevados que os do tipo 1 (habitacional), e portanto as temperaturas encontradas também são mais elevadas, tanto no Verão (figura 4.7) quanto na Meia Estação (figura 4.8) e no Inverno (figura 4.9).

Nesse tipo de utilização, a ocupação dá-se durante o dia, e portanto os ganhos internos coincidem com os ganhos solares máximos. Como há maior diferença entre os ganhos nos períodos diurno e noturno, em comparação à utilização habitacional, a amplitude da temperatura interior é maior, conforme nota-se nos gráficos.

Na semana mais quente do Verão, há praticamente sempre desconforto em todas as zonas, com excepção de algumas horas na zona 1, durante o período noturno. Isso ocorre porque a zona 1 consegue perder calor com maior facilidade, devido à sua maior área de envolvente.

Na semana de Inverno, as curvas de temperatura situam-se abaixo do limite inferior, indicando a necessidade de aquecimento. No entanto, as zonas 3 e 4, as mais insoladas no Inverno (janelas com orientação sul), apresentam algumas poucas horas dentro da zona de conforto.

Na Meia Estação, as zonas 3 e 4, voltadas a sul, com insolação praticamente o dia todo nesse período, apresentam vários períodos de sobreaquecimento. Já as zonas 1 e 7, que para a utilização habitacional eram frias neste período, encontram-se dentro da faixa de conforto na maior parte do tempo.

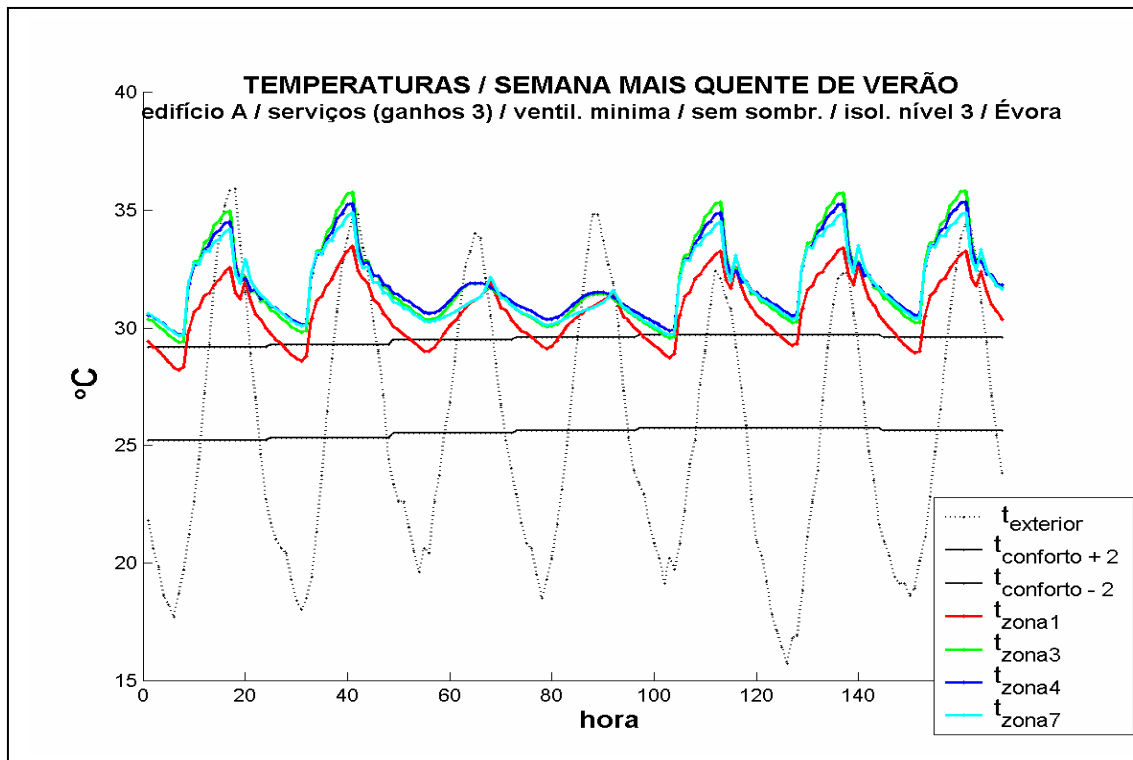


Figura 4.7 – Temperaturas durante uma semana de Verão.

Edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

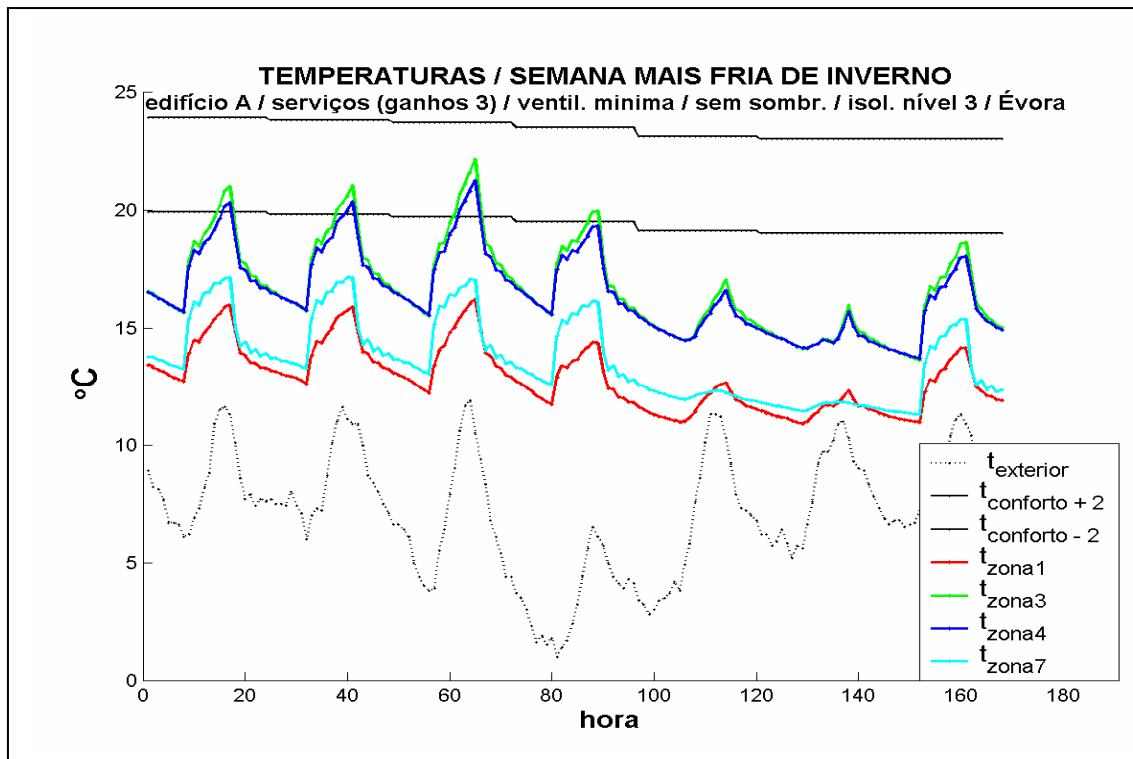


Figura 4.8 – Temperaturas durante uma semana de Inverno.

Edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

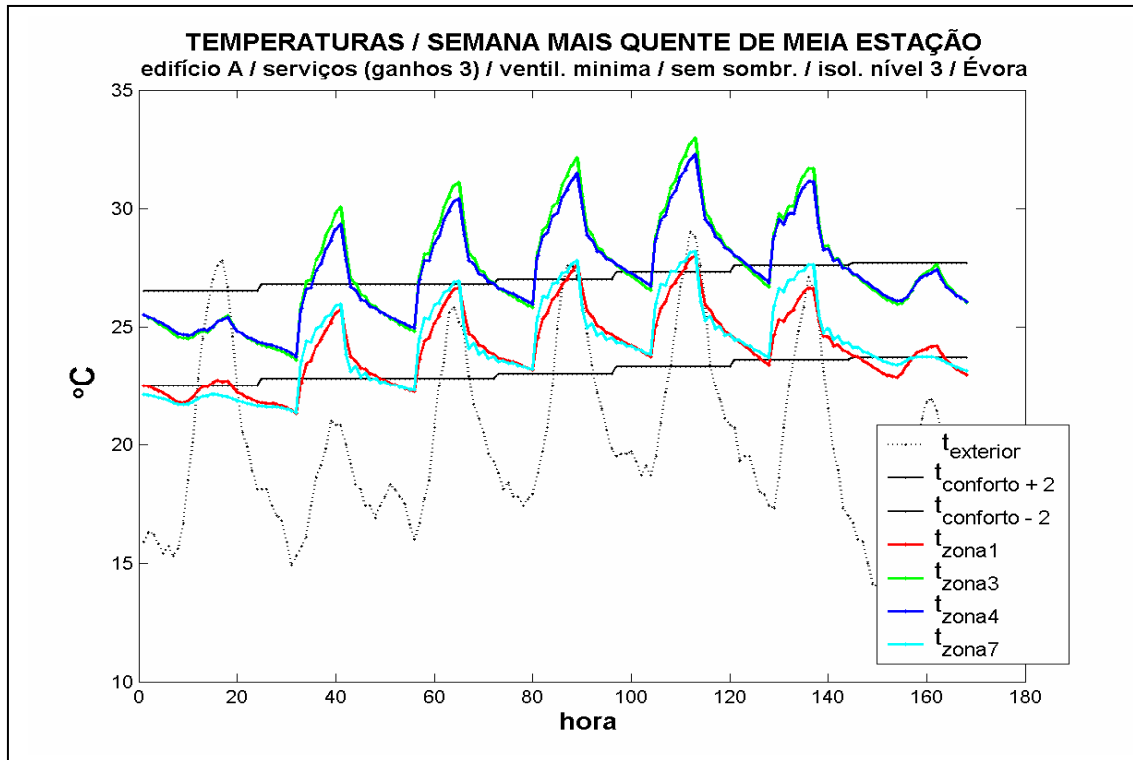


Figura 4.9 – Temperaturas durante uma semana de Meia Estação.

Edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

4.2.2 Edifício B

4.2.2.1 Edifício B, caso de referência

O comportamento do caso de referência¹⁵ do edifício B, nas três estações do ano, é apresentado nas figuras 4.10 a 4.12.

As zonas 8, 9 e 10 apresentam-se em todas as estações com comportamentos muito similares, pois encontram-se lado a lado no edifício, com janelas com a mesma orientação (sul).

¹⁵ Caso de referência: corresponde ao edifício em questão, utilizado como habitação (ganhos internos 1), em Évora, com janelas sem sombreamento (factor solar igual a 0,75), com ventilação mínima e nível de isolamento intermédio (nível 3).

O edifício B apresenta temperaturas bem mais elevadas que as do edifício A. Durante a semana mais quente do Verão, a temperatura interior de todas as zonas desse edifício encontra-se sempre acima do limite de conforto.

Na semana de Inverno, a temperatura de todas as zonas encontra-se abaixo do limite inferior de conforto, indicando a necessidade de aquecimento. A zona 1 é a mais desconfortável (mais fria), devido à sua orientação norte, que recebe pouca insolação no Inverno.

Na semana mais quente da Meia Estação, há predominância de sobreaquecimento no edifício, com as zonas 8, 9 e 10 com temperaturas sempre acima do limite superior de conforto (zonas orientadas a sul, que recebem insolação praticamente durante o dia todo). Quanto à zona 1, esta apresenta-se confortável na maior parte do tempo.

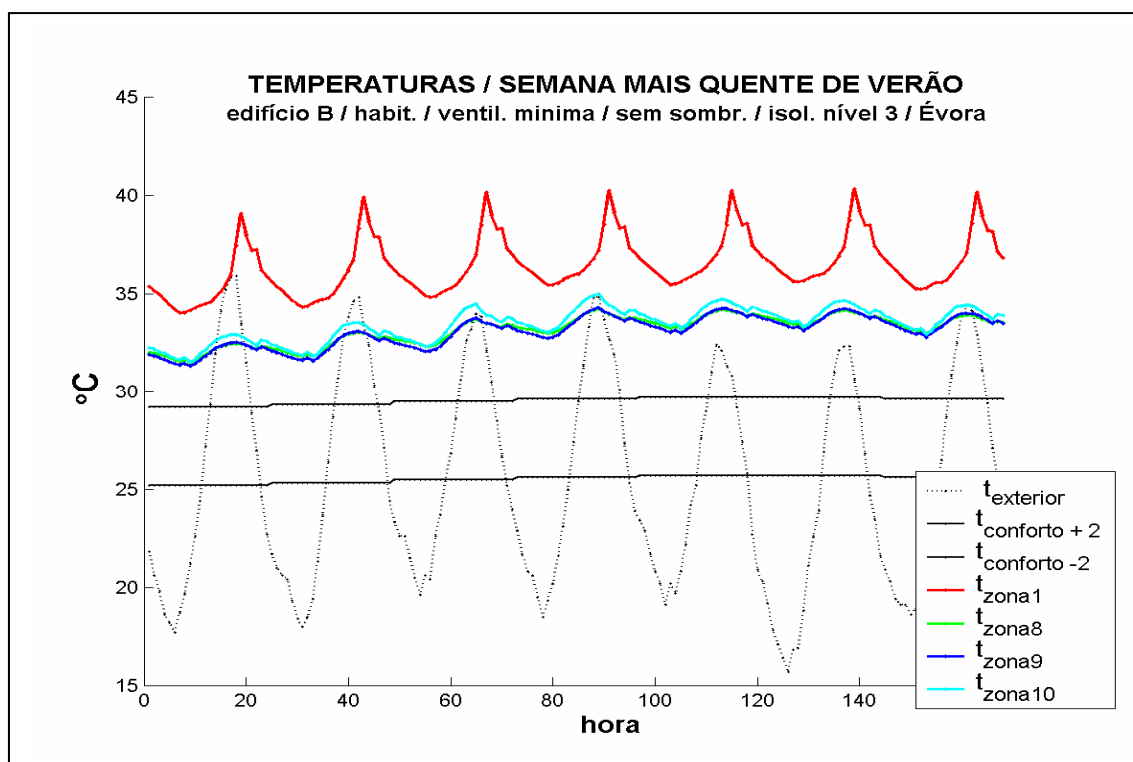


Figura 4.10 – Temperaturas durante uma semana de Verão.
Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

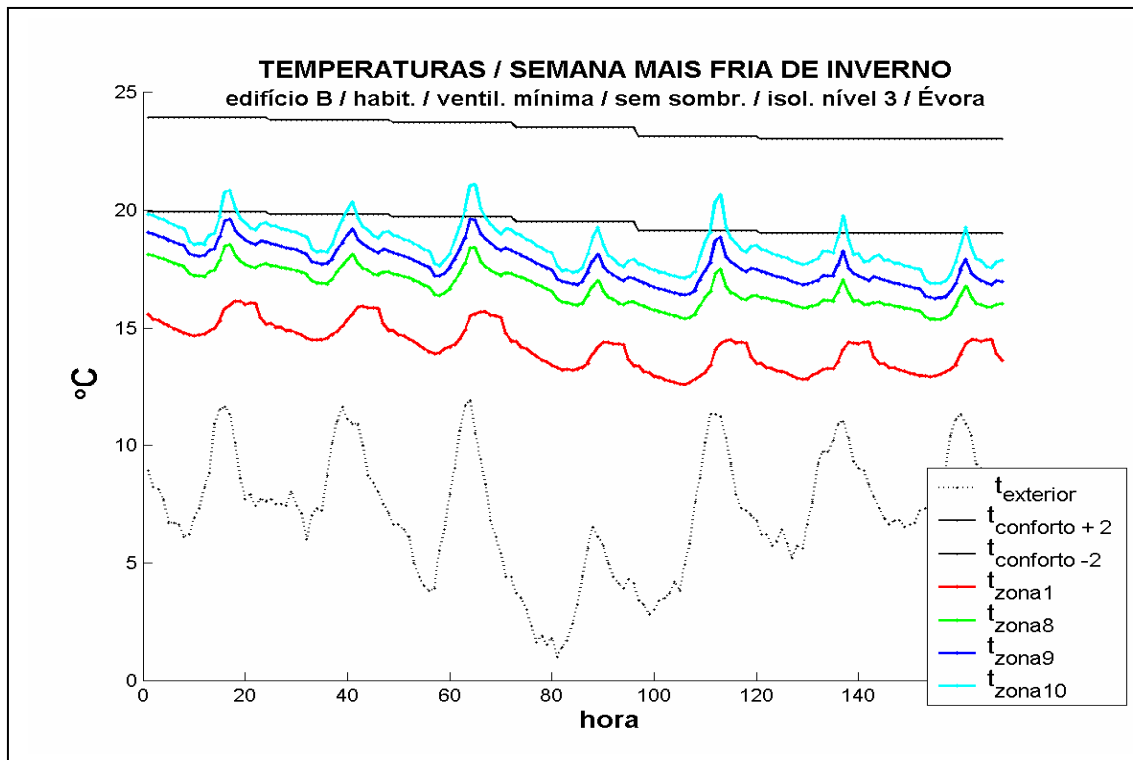


Figura 4.11 – Temperaturas durante uma semana de Inverno.
Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

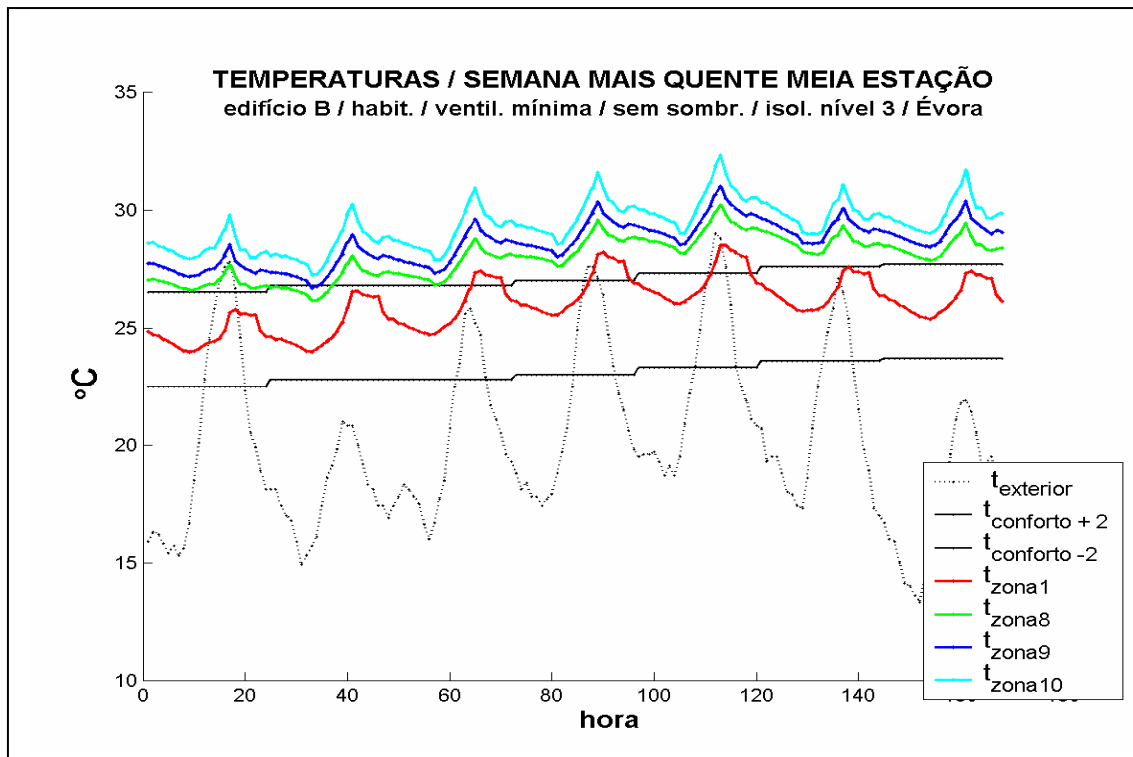


Figura 4.12 – Temperaturas durante uma semana de Meia Estação.
Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

4.2.2.2 Edifício B, caso de referência, com variação do sombreamento

A figura 4.13 apresenta a diferença entre as temperaturas do ar da zona 9 do edifício B, caso de referência, com os diversos sombreamentos adoptados. Como considerou-se sombreamento somente no Verão, é representada somente a evolução da temperatura referente a esse período. Verifica-se, conforme esperado, a diminuição da temperatura conforme aumenta-se o sombreamento e a consequente melhora das condições de conforto nessa zona (quanto maior o sombreamento, menor o factor solar, ver tabela 3.11).

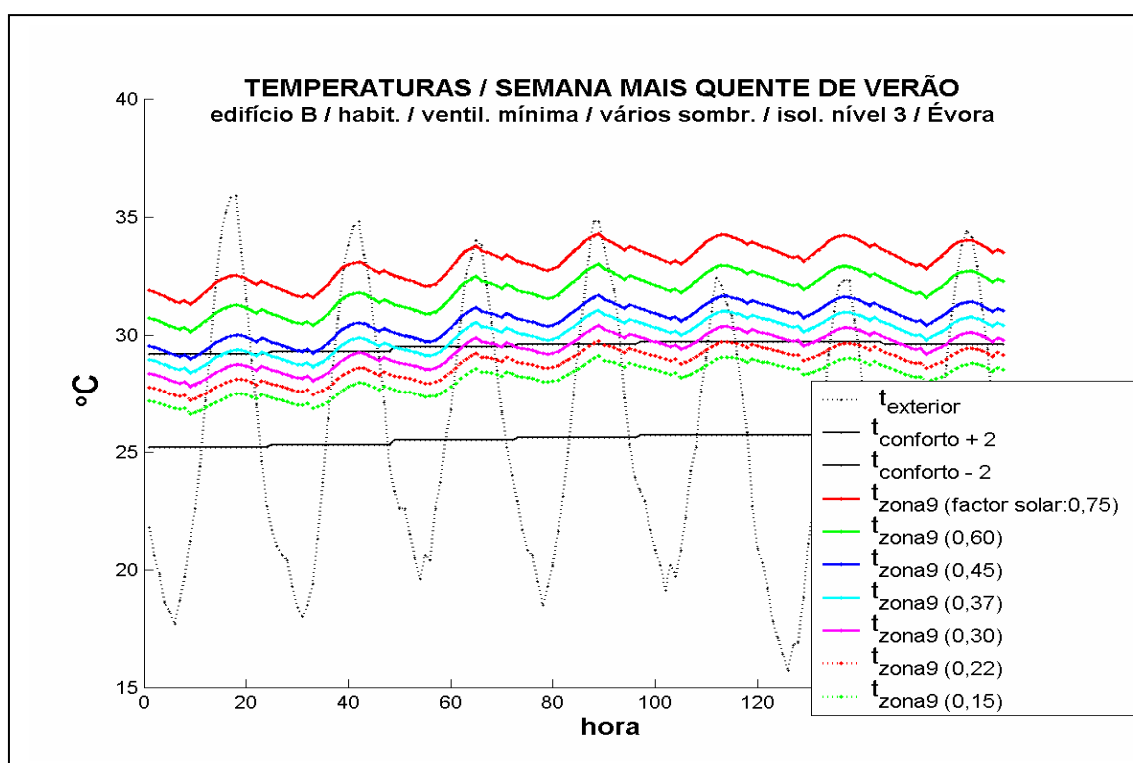


Figura 4.13 – Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com variados factores solares das janelas e nível de isolamento intermédio (nível 3).

4.2.2.3 Edifício B, caso de referência, com variação da ventilação

Na figura 4.14 pode-se notar o efeito de redução das temperaturas interiores devido à ventilação, para o caso de referência do edifício B, no Verão. São representadas as duas

possibilidades consideradas, ventilação nocturna e ventilação diurna mais nocturna, em contraponto ao caso com ventilação mínima.

Nota-se, como esperado, a redução da temperatura à medida que a ventilação aumenta (nocturna e diurna). Verifica-se o efeito benéfico não só da ventilação durante à noite, mas também durante o dia, pois pode-se tirar partido do ar exterior, que encontra-se mais frio que o interior, para reduzir o desconforto.

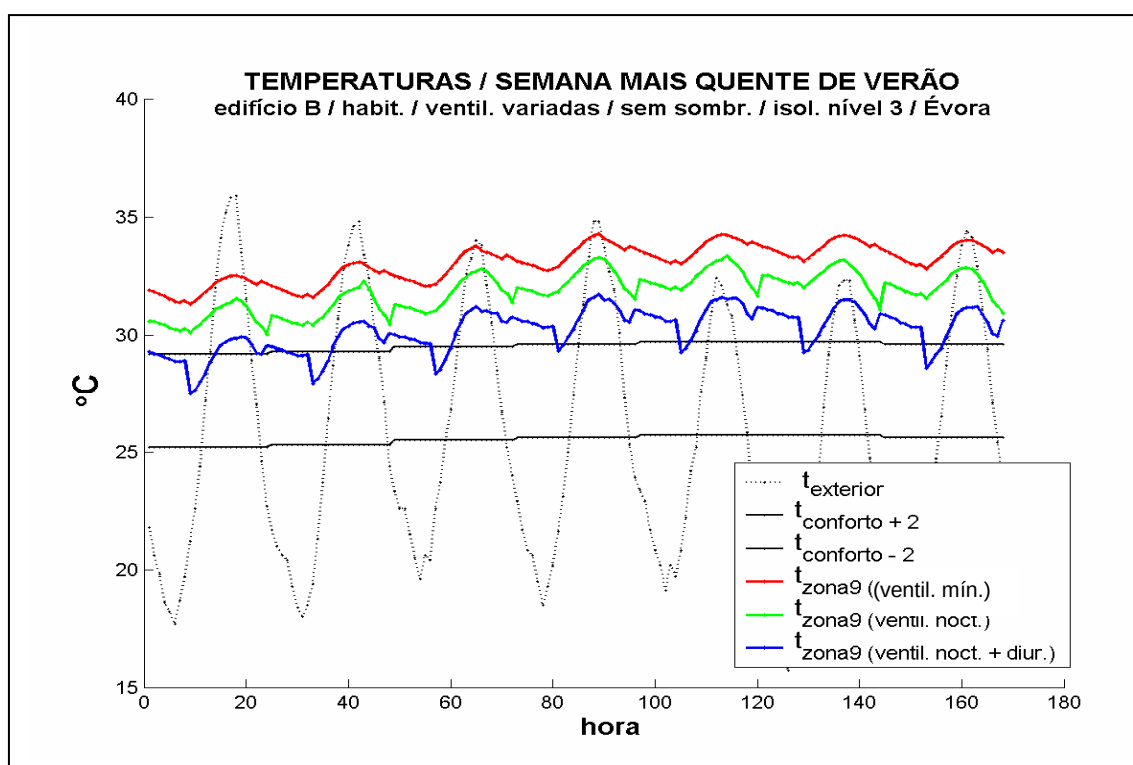


Figura 4.14 – Temperaturas durante uma semana de Verão.

Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

4.2.2.4 Edifício B, caso de referência, utilizado como serviços

O desempenho do caso de referência do edifício B, com altos ganhos internos (tipo 3), no Verão, Inverno e Meia Estação, encontra-se nas figuras 4.15 a 4.17. Foi observado o mesmo que no edifício A (secção 4.2.1.2): elevação da temperatura interior e maior amplitude, em comparação com o caso habitacional.

Da mesma forma que nas habitações, as zonas 8, 9 e 10 apresentam-se em todas as estações com comportamentos muito similares, pois encontram-se lado a lado no edifício, com janelas com a mesma orientação (sul).

No Verão, em todas as zonas, há sempre desconforto (temperatura bem acima do limite superior aceitável), assim como na Meia Estação (com excepção de algumas poucas horas, nas zonas 1 e 2). Mesmo no Inverno, a temperatura eleva-se a tal ponto que chega a haver sobreaquecimento nas zonas 8, 9 e 10, durante certos períodos do dia. No Inverno e na Meia Estação, as zonas 8, 9 e 10 são as mais quentes, pois recebem maior insolação nesse período, se comparadas às 1 e 2, orientadas a norte.

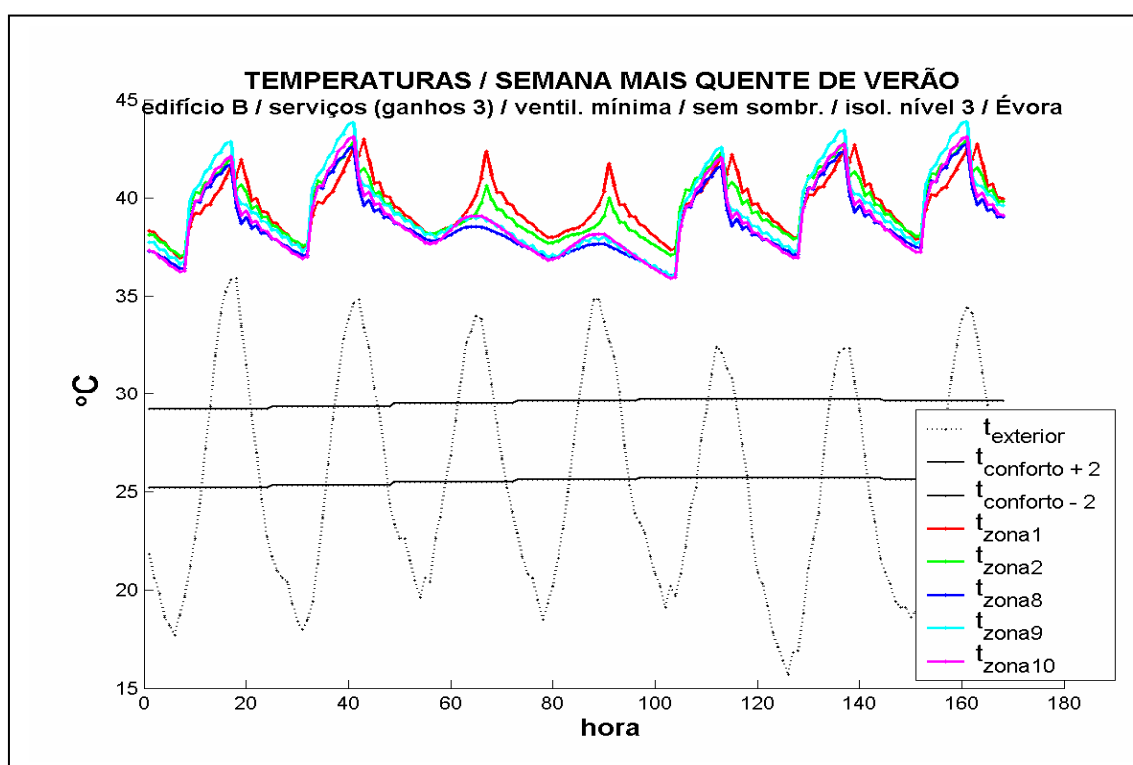


Figura 4.15 – Temperaturas durante uma semana de Verão.

Edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

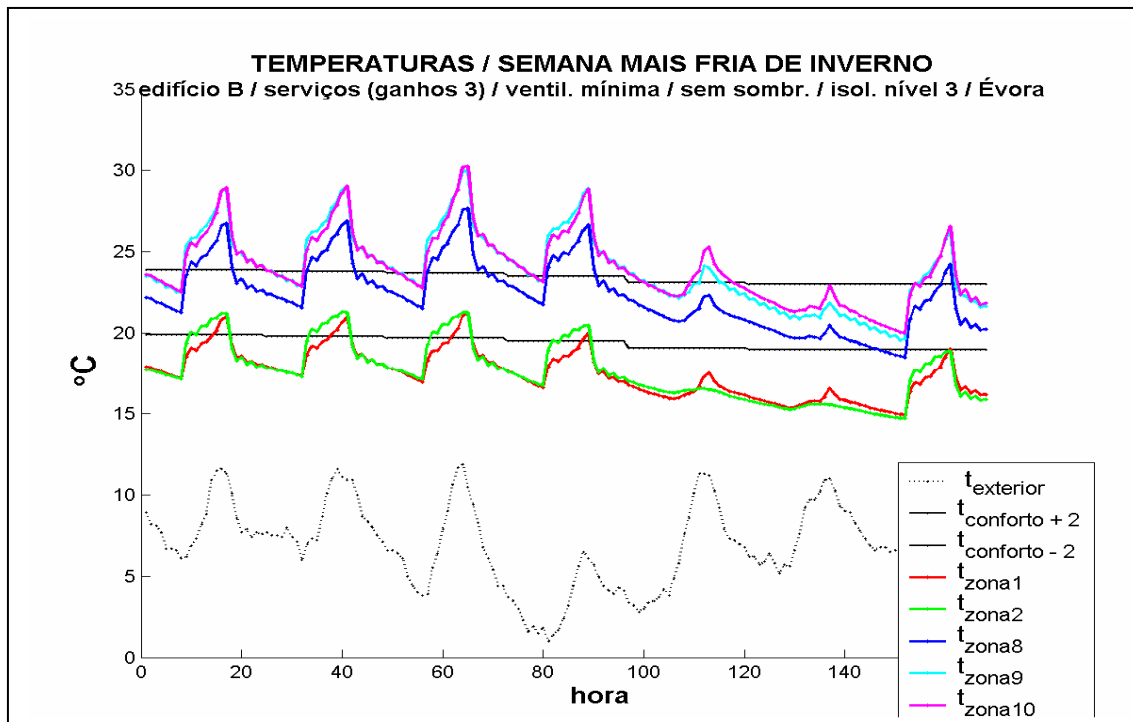


Figura 4.16 – Temperaturas durante uma semana de Inverno.

Edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

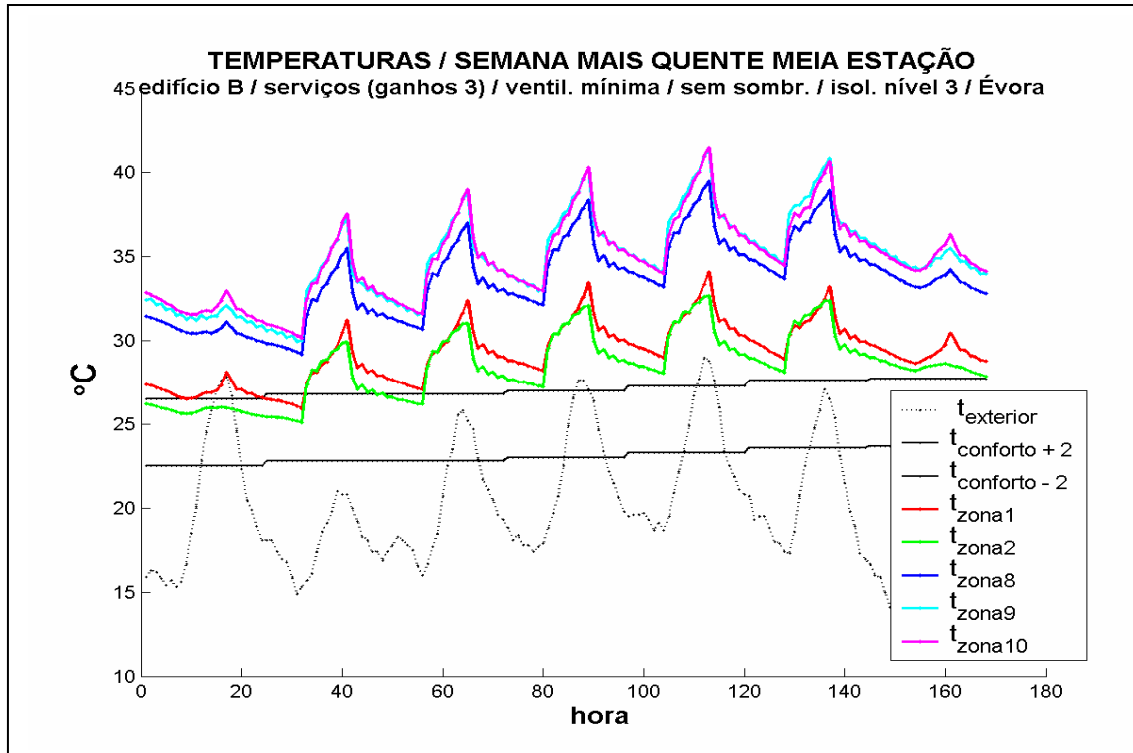


Figura 4.17 – Temperaturas durante uma semana de Meia Estação.

Edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

4.2.3 Edifício C

4.2.3.1 Edifício C, caso de referência

Nas figuras 4.18 a 4.20 tem-se a evolução das temperaturas no Verão, Inverno e Meia Estação, para o caso de referência do edifício C¹⁶.

Em todas as estações, as zonas 7 e 8 apresentam comportamento muito similar, pois encontram-se lado a lado e possuem a mesma orientação.

Durante toda a semana mais quente de Verão há desconforto em todas as zonas. No Inverno, há necessidade de aquecimento, e na Meia Estação, duas das três zonas ocupadas (zonas 7 e 8) encontram-se sempre sobreaquecidas. Tanto no Inverno, quanto na Meia Estação, as zonas 7 e 8 apresentam temperaturas maiores que as da zona 1, pois são justamente as mais insoladas nesses períodos (orientadas a sul, em contraposição à zona 1, orientada a norte).

¹⁶ Caso de referência: corresponde ao edifício em questão, utilizado como habitação (ganhos internos 1), em Évora, sem sombreamento (factor solar igual a 0,75), com ventilação mínima e nível de isolamento intermédio (nível 3).

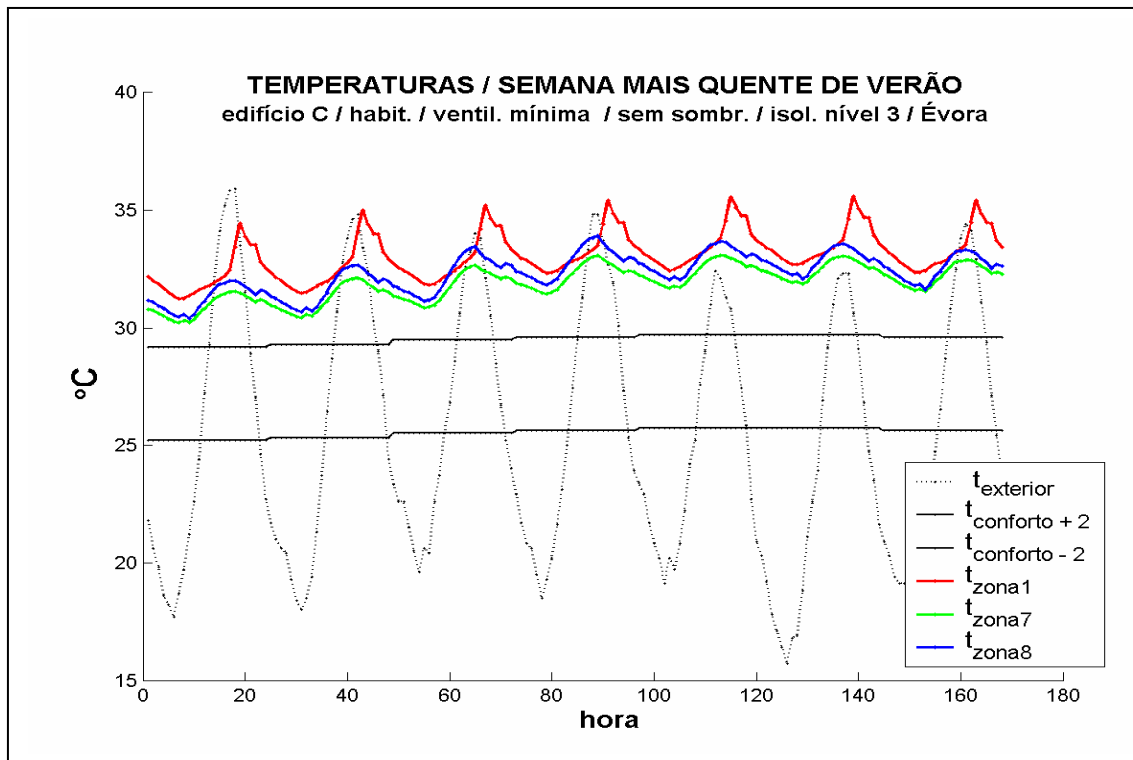


Figura 4.18 – Temperaturas durante uma semana de Verão.
Edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

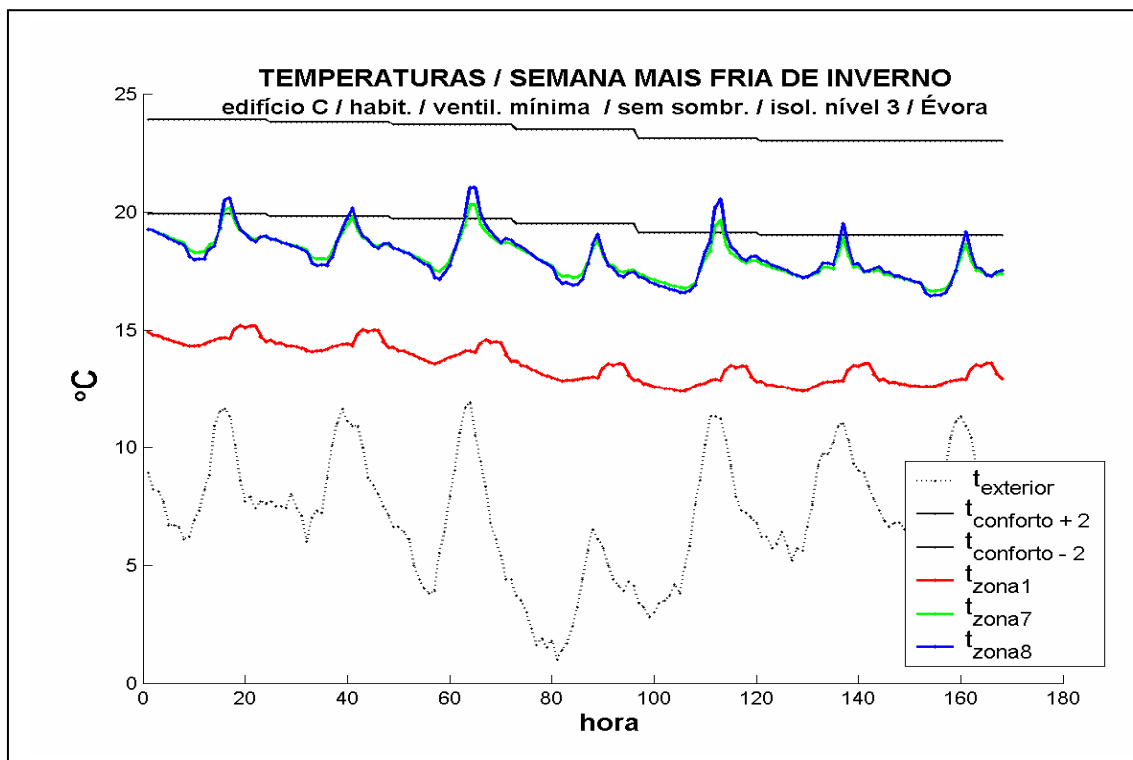


Figura 4.19 – Temperaturas durante uma semana de Inverno.
Edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

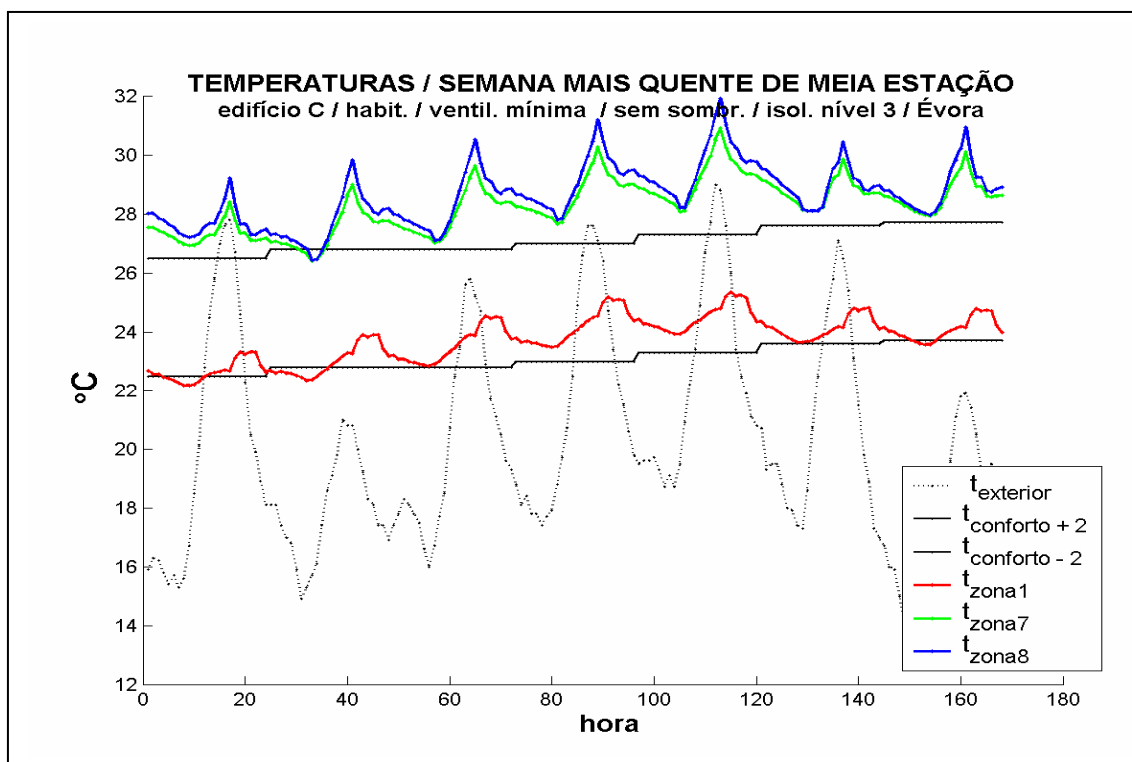


Figura 4.20 – Temperaturas durante uma semana de Meia Estação. Edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

4.2.3.2 Edifício C, caso de referência, utilizado como serviços

Para o caso de referência do edifício C, utilizado como serviços, ganhos tipo 3 (figuras 4.21 a 4.23), nota-se o mesmo que nos edifícios A e B (secções 4.2.1.2 e 4.2.2.4): temperaturas mais elevadas e maiores amplitudes do que para o caso habitacional.

Conforme também já notado na utilização deste edifício como habitação, as zonas 7 e 8 encontram-se sempre com valores muito próximos.

Na semana mais quente de Verão, há sempre desconforto nas zonas 7 e 8, e em grande parte do tempo, na zona 1.

No Inverno e na Meia Estação, a zona 1 apresenta as temperaturas mais baixas, justamente devido à sua orientação norte, que não recebe sol nesses períodos. No Inverno, há necessidade de aquecimento somente na zona 1. As zonas 7 e 8, com os

maiores ganhos solares que possuem nesse período, somados aos altos ganhos internos, chegam a ter até algumas horas de sobreaquecimento. Na Meia Estação, as zonas 7 e 8 novamente encontram-se sempre sobreaquecidas (orientação sul), enquanto a zona 1 chega a apresentar períodos com temperaturas abaixo do limite inferior de conforto (orientação norte).

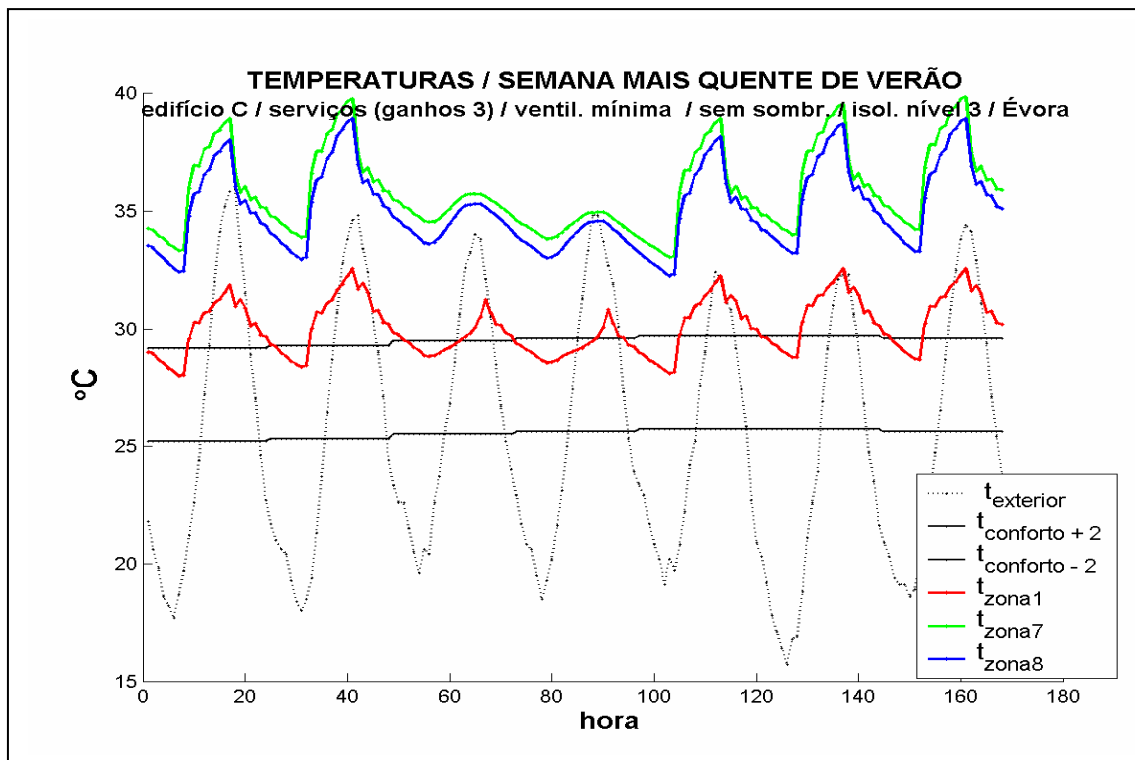


Figura 4.21 – Temperaturas durante uma semana de Verão.

Edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

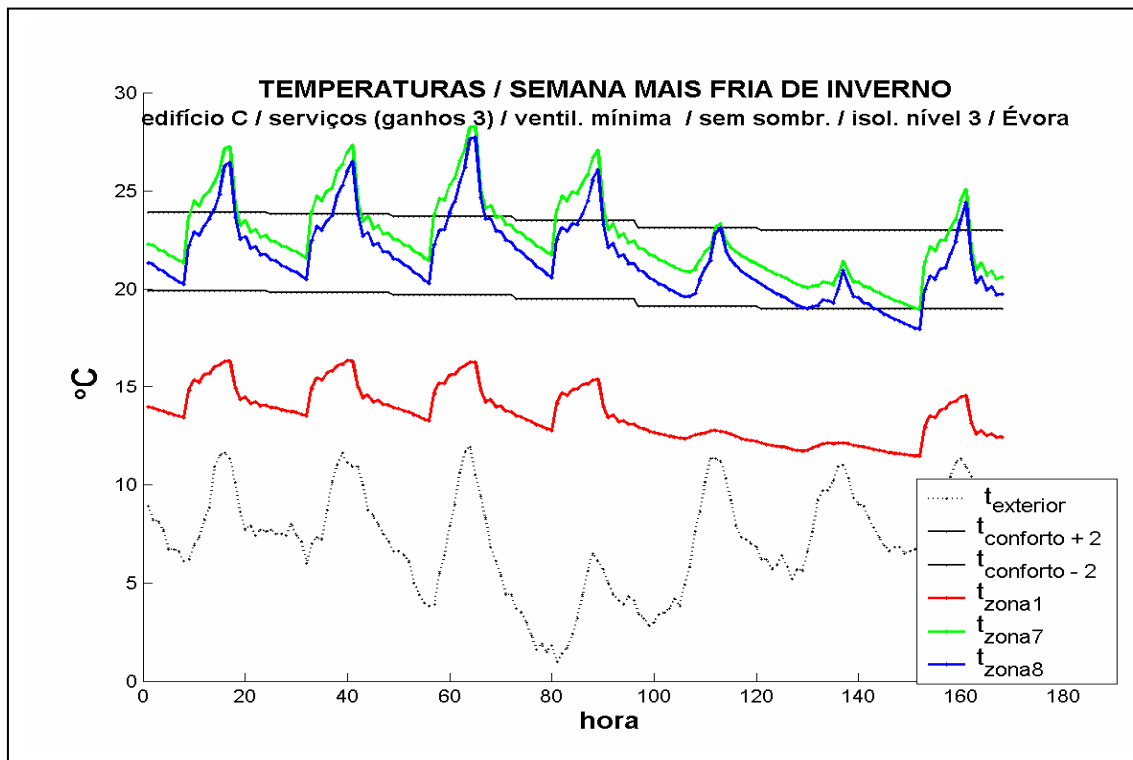


Figura 4.22 – Temperaturas durante uma semana de Inverno.

Edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

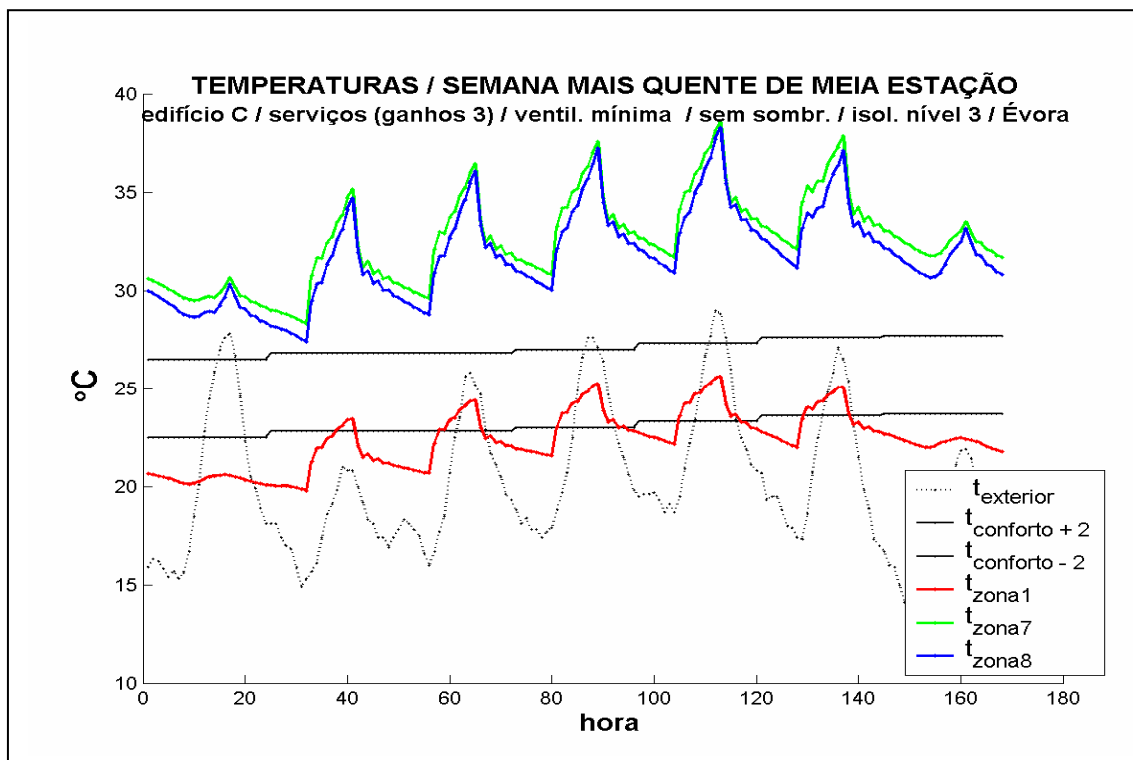


Figura 4.23 – Temperaturas durante uma semana de Meia Estação.

Edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima, com factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

4.3 Resultados para a utilização como habitação

4.3.1 Análise do conforto

4.3.1.1 Edifício B, em Évora, com ventilação mínima

A figura 4.24 apresenta a percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, com ventilação mínima, localizado em Évora, com distintos níveis de isolamento da envolvente exterior¹⁷. Cada curva corresponde a um determinado factor solar das janelas, resultante da combinação vidro duplo mais dispositivo de sombreamento exterior (tabela 3.11).

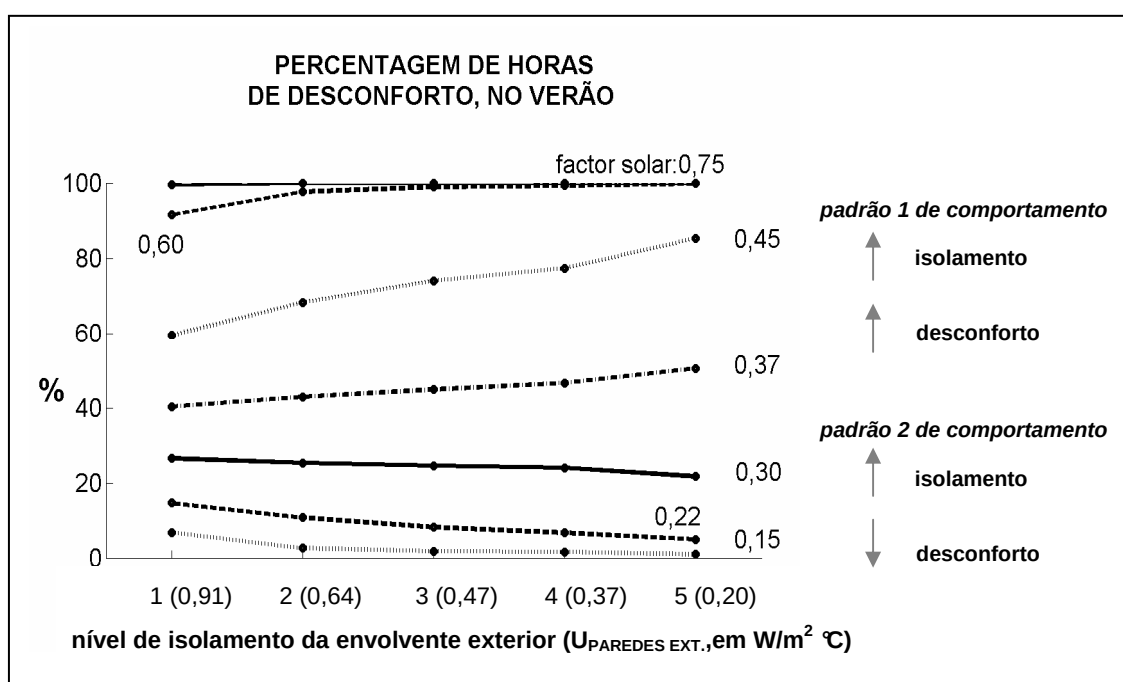


Figura 4.24 - Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factor solar das janelas.

¹⁷ A indicação dos níveis de isolamento da envolvente exterior, com seus respectivos coeficientes globais de transferência de calor, U , foram apresentadas nas tabelas 3.7 e 3.8. Os valores entre parêntesis referem-se ao valor de U das paredes exteriores.

Nota-se que, para esse caso específico, para factores solares iguais ou acima de 0,60, tem-se desconforto praticamente durante todo o período ocupado, no Verão. De acordo com o esperado, conforme se aumenta a protecção em relação ao sol, ou seja, quanto menor o factor solar, tem-se menos desconforto. Chega-se a valores abaixo de 20% do período ocupado, para factores solares menores que 0,22.

Quanto ao impacto do aumento do nível de isolamento da envolvente, percebe-se claramente nessa figura dois padrões diferentes de comportamento:

1. Para altos factores solares (ou seja, baixos níveis de sombreamento, que correspondem a elevados ganhos solares), o aumento do isolamento tende a piorar a situação, elevando a percentagem de horas com sobreaquecimento.
2. Para baixos factores solares, (ou seja, quando o sombreamento é mais efectivo, o que corresponde a baixos ganhos solares), ao se aumentar o isolamento, a percentagem de horas com sobreaquecimento é reduzida. Além disso, o desconforto assume valores bem menores.

A tabela 4.1 apresenta o aumento ou a redução da percentagem de horas com desconforto, conforme se aumenta o nível de isolamento da envolvente, para o caso da figura 4.24. Têm-se indicadas as diferenças absolutas entre o nível 5 (mais isolado) e os níveis 1 (menos isolado) ou 3¹⁸, para os vários factores solares. Quando o factor solar é igual a 0,45, vê-se que, entre os níveis 1 e 5, a percentagem de horas de desconforto aumenta de 59,5 % para 85,3 % (ou seja, um aumento de 25,8 %, em termos absolutos, de percentagem de horas de ocorrência de desconforto, de acordo com a tabela 4.1).

Os resultados da figura 4.24 e da tabela 4.1 indicam que o aumento do isolamento da envolvente proporciona maior conforto para os ocupantes somente quando os ganhos solares das janelas estão abaixo de certos limites. Neste exemplo específico, o *ponto de viragem*, isto é, o factor solar acima do qual o aumento do isolamento resulta num pior desempenho do edifício no Verão, é de 0,32 (ver no Anexo E a relação existente entre o

¹⁸ Mínimo aceitável para Évora, de acordo com o RCCTE [7], dentre os níveis de isolamento considerados. Ver tabela 3.7.

factor de sombreamento e o factor solar, para as situações consideradas nas simulações). Esse valor foi encontrado através de um procedimento de refinamento, no qual foram corridas diversas simulações para esse caso específico do edifício B, com taxas de sombreamento variáveis entre 50 e 60% (correspondentes aos factores solares de 0,37 e 0,30, respectivamente). O ponto de viragem correspondeu ao factor de sombreamento a partir do qual o comportamento da curva passava de crescente para decrescente. Os resultados dessas simulações específicas referentes à determinação do ponto de viragem são apresentados na figura 4.25.

Tabela 4.1 - Aumento ou redução da percentagem de horas com desconforto, no Verão, conforme se acrescenta isolamento à envolvente do edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima.

Aumento (+) ou redução (-) da percentagem de horas com desconforto, no Verão ⁽¹⁾		
factor solar	(do nível de isolamento 1 p/ 5)	(do nível de isolamento 3 ⁽²⁾ p/ 5)
0,75	+ 0,4 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾
0,60	+ 8,4 ⁽³⁾	+ 1,0 ⁽³⁾
0,45	+ 25,8	+ 11,3
0,37	+ 10,2	+ 5,6
0,30	-4,8	-2,9
0,22	-9,7	-3,2
0,15	-5,8	-0,8

⁽¹⁾ Valores absolutos (em %).

⁽²⁾ Mínimo aceitável para Évora, de acordo com o RCCTE, dentre os níveis de isolamento considerados. Ver tabela 3.7.

⁽³⁾ Valores baixos devido à duração do desconforto ser igual (ou praticamente igual) a 100% do período ocupado, para todos os níveis de isolamento.

Dados mais detalhados, também referentes ao edifício B, em Évora, com ventilação mínima, são apresentados nas figuras 4.26 e 4.27. Nesses gráficos, tem-se a variação das temperaturas do ar da zona 9¹⁹ ao longo da semana mais quente de Verão, para os diversos níveis de isolamento da envolvente e para os factores solares das janelas de 0,75 e 0,22. Também se encontram representados nos gráficos a temperatura exterior e os limites superior e inferior de conforto. Pode-se verificar o mesmo padrão da figura 4.24: quando o factor solar é alto (figura 4.26), o caso com envolvente mais isolada tem

¹⁹ As outras zonas ocupadas seguem o mesmo padrão.

maiores temperaturas interiores do que o com a envolvente menos isolada ($t_{z9 \text{ (isol 5)}} > t_{z9 \text{ (isol 1)}}$). Na figura 4.27, representativa dos casos com factor solar mais baixo, a situação inverte-se, além do que verifica-se menor diferença entre as envolventes mais e menos isoladas (curvas mais próximas entre si).

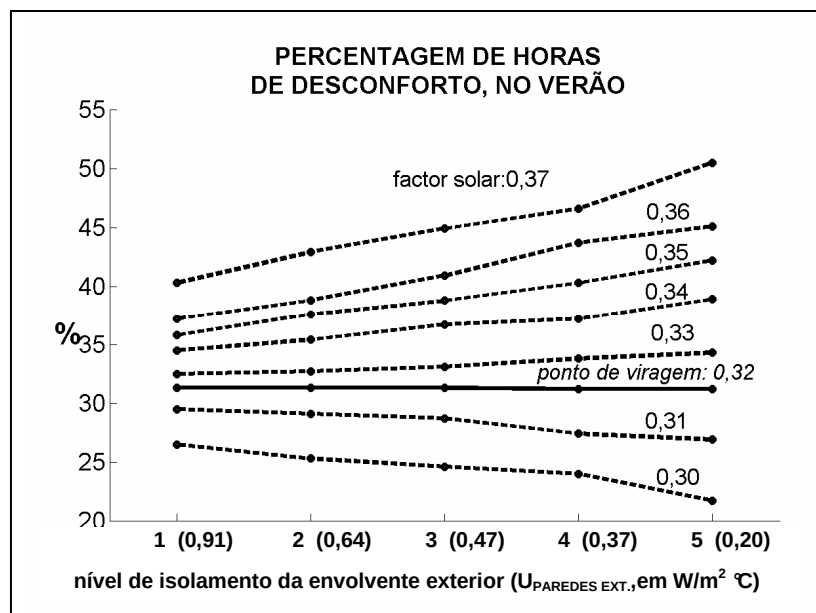


Figura 4.25 - Ponto de viragem do factor solar para a percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima.

4.3.1.2 Parâmetros de conforto seleccionados para representar as situações analisadas

Na figura 4.28 são apresentados gráficos similares ao da figura 4.24, com os outros parâmetros de conforto definidos na metodologia ²⁰, para o edifício B, com ventilação mínima, em Évora:

- percentagem de dias com desconforto, no Verão (indica a quantidade de dias em que ocorre desconforto pelo menos durante uma parte do dia);

²⁰ Ver descrição detalhada desses parâmetros na tabela 2.8.

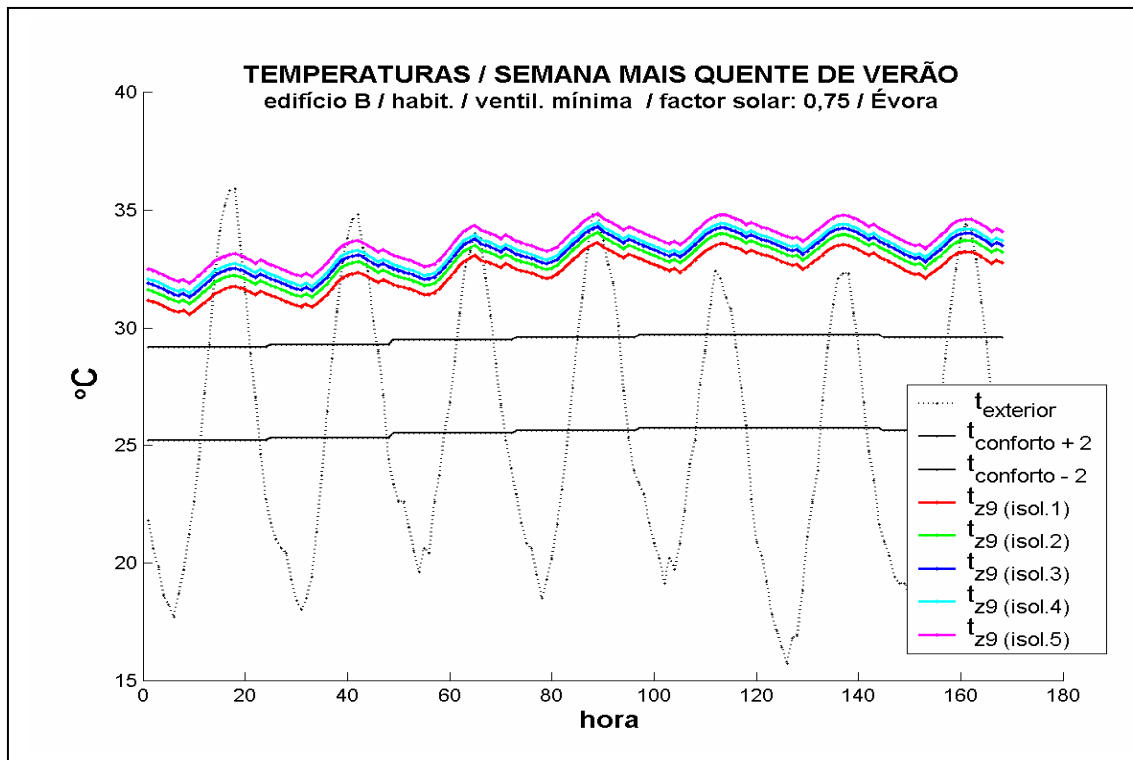


Figura 4.26 – Temperaturas durante uma semana de Verão.
Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, factor solar das janelas de 0,75 e variados níveis de isolamento da envolvente.

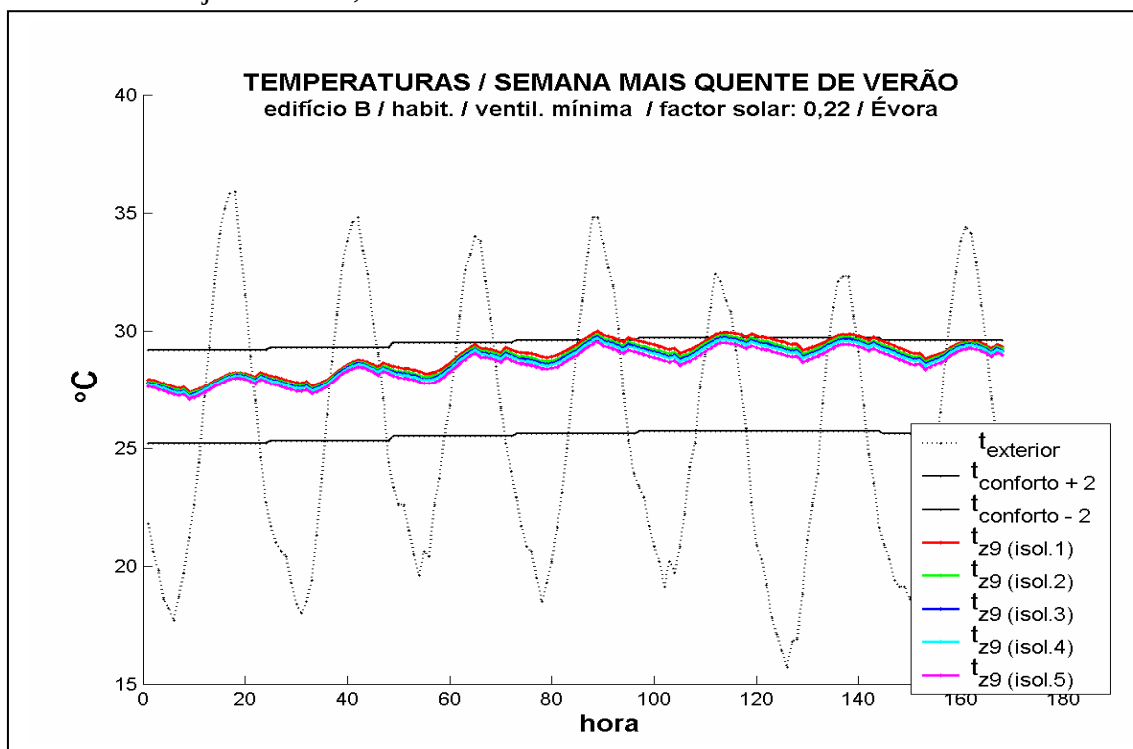


Figura 4.27 – Temperaturas durante uma semana de Verão.
Edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, factor solar das janelas de 0,22 e variados níveis de isolamento da envolvente.

- número de dias consecutivos com desconforto durante o ano (indica a quantidade de dias consecutivos em que ocorre desconforto pelo menos durante uma parte do dia);
- percentagem do dia com desconforto, no Verão (indica a duração do período de desconforto, por dia, relativamente ao período ocupado);
- sobreaquecimento médio por dia, no Verão (indica a intensidade média do sobreaquecimento, durante os períodos de desconforto);
- média do sobreaquecimento máximo por dia, no Verão (indica a intensidade máxima do sobreaquecimento);
- graus-hora de desconforto, no Verão (engloba, num só parâmetro, a quantidade de horas de desconforto e sua intensidade).

Nesses gráficos tem-se o mesmo tipo de resultado observado na secção anterior. Nota-se, em todos eles, que a alteração da inclinação das curvas de crescente para decrescente (ou para praticamente constante) segue padrões muito aproximados. Vê-se que o efeito do aumento do isolamento da envolvente nas condições de conforto depende dos ganhos solares. Envolventes bem isoladas com sombreamento insuficiente (altos factores e ganhos solares) têm uma tendência a maior desconforto em todos os aspectos (duração, sobreaquecimento máximo, etc). A partir de um determinado valor de sombreamento, esse desconforto diminui, ou pelo menos, não aumenta consideravelmente.

Essas similaridades entre o comportamento de todos os parâmetros foram observadas em todos os casos simulados. Portanto, não seria necessário considerá-los todos para caracterizar o nível de desconforto dos edifícios simulados. Foram identificados os parâmetros mais significativos, tendo em consideração a caracterização dos períodos de desconforto (conforme indicados anteriormente, na figura 2.9), de acordo com sua *intensidade e duração de exposição*. Os seguintes parâmetros foram escolhidos:

- Percentagem de horas com desconforto (figura 4.24): representa a duração do período de desconforto, durante o Verão.

- Média do sobreaquecimento máximo por dia de desconforto (figura 4.28): representa a máxima intensidade desse desconforto, durante o Verão.
- Graus-hora de desconforto (figura 4.28): integra a informação sobre a duração e intensidade do desconforto em um único parâmetro.

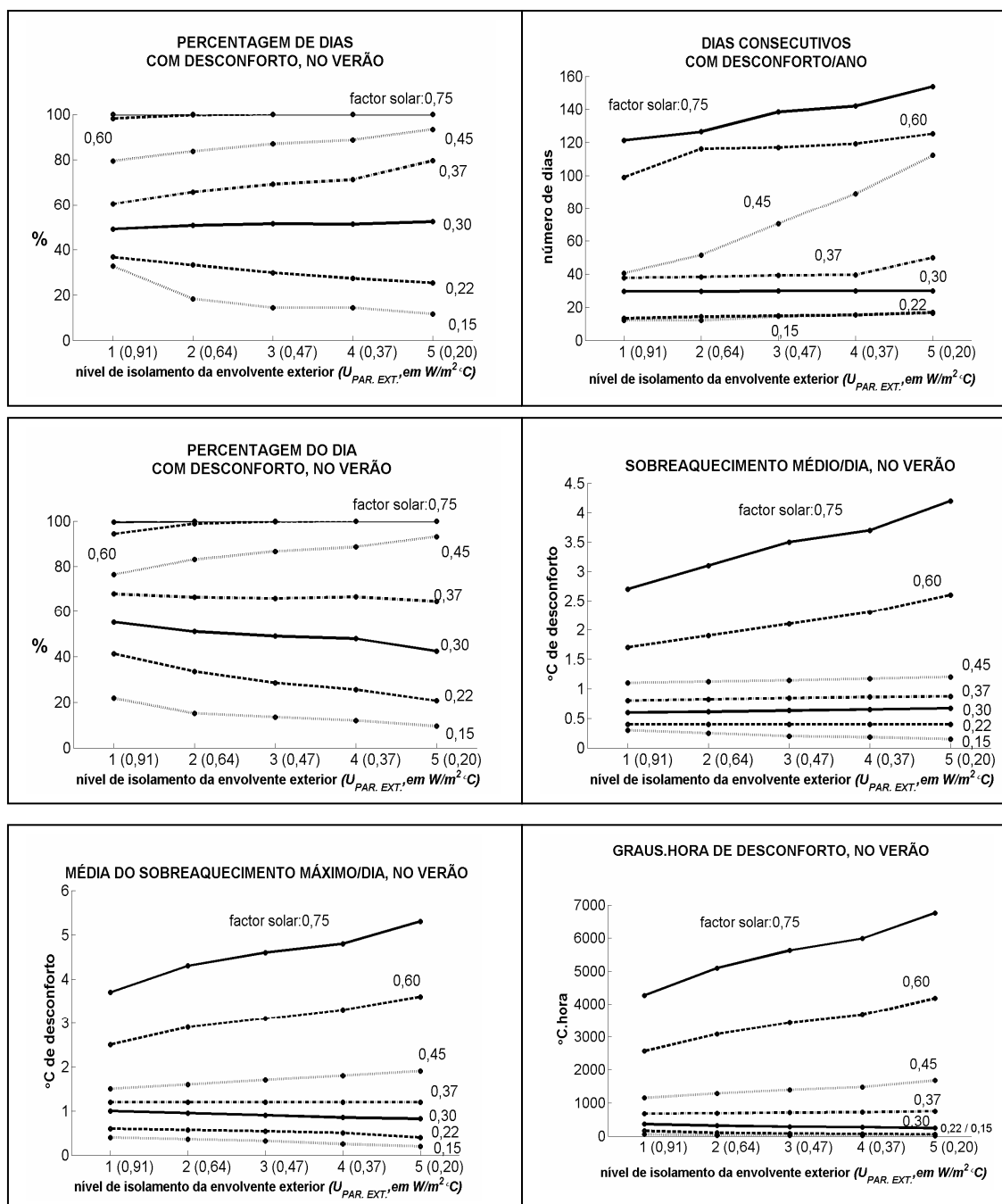


Figura 4.28 – Parâmetros de conforto para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

De forma idêntica ao indicado na secção anterior, foram encontrados os pontos de viragem para os parâmetros de conforto seleccionados como representativos. Os seus valores são muito próximos entre si: 0,32 para a percentagem de horas de desconforto (anteriormente apresentada na figura 4.25), entre 0,33 e 0,32, para os graus-hora de desconforto (figura 4.29) e 0,37 para a média do sobreaquecimento máximo por dia (figura 4.30).

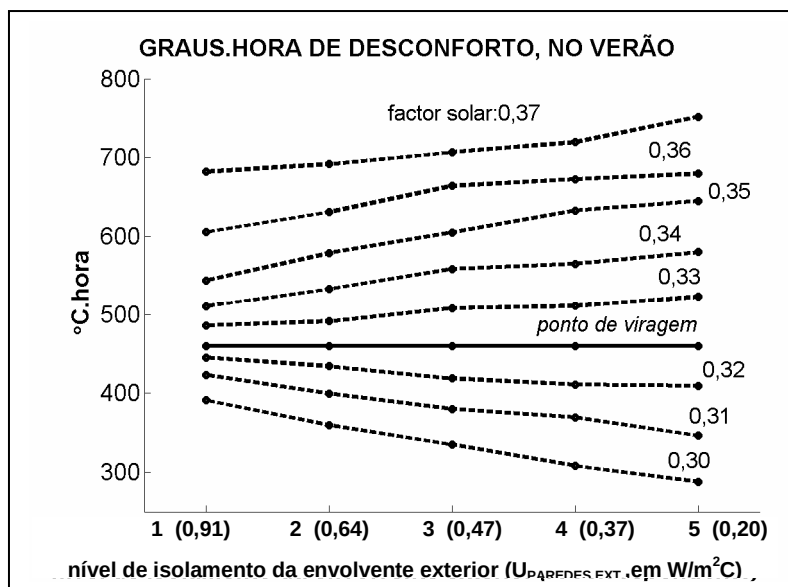


Figura 4.29 - Ponto de viragem do factor solar para a média do sobreaquecimento máximo por dia, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima.

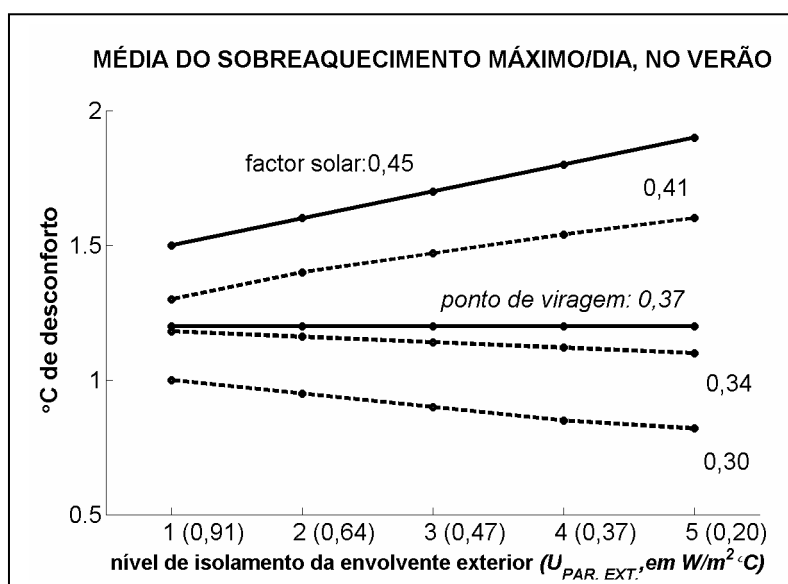


Figura 4.30 - Ponto de viragem do factor solar para os graus-hora de desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima.

4.3.1.3 Edifício C, em Évora, com ventilação mínima

A figura 4.31 apresenta os três parâmetros de conforto seleccionados como representativos para o edifício C, com ventilação mínima, em Évora. Os seus períodos de desconforto são um pouco menos intensos e de menor duração, se comparados com os do edifício B. O mesmo tipo de comportamento citado nas secções anteriores pôde ser observado: para altos factores solares, há uma elevação do desconforto conforme se aumenta o isolamento. Há também significativa redução da inclinação das curvas conforme se reduz o factor solar, com somente uma pequena diferença: para o edifício C, em alguns casos, mesmo quando os ganhos solares são baixos, o desconforto eleva-se conforme o isolamento é aumentado. Essa elevação, no entanto, é bem inferior à que ocorre quando o sombreamento é ineficiente, sendo desprezível para os mais baixos factores solares.

Portanto, os resultados das simulações para o edifício C, apesar de não apresentarem ponto de viragem claramente definido, como no edifício B, indicam a importância do controlo dos ganhos solares, para que se evite um aumento indesejado do sobreaquecimento com o acréscimo de isolamento.

Esse tipo de resultado está relacionado ao equilíbrio entre os ganhos e as perdas de calor do edifício. No Capítulo 5 deste trabalho, tem-se descrito uma equação (eq. 5.19), que inclui todas as variáveis envolvidas neste processo. São também indicados os resultados da sua aplicação para casos variados (secção 5.3), onde as diferenças entre o comportamento dos edifícios, encontradas nas simulações, são discutidas e justificadas.

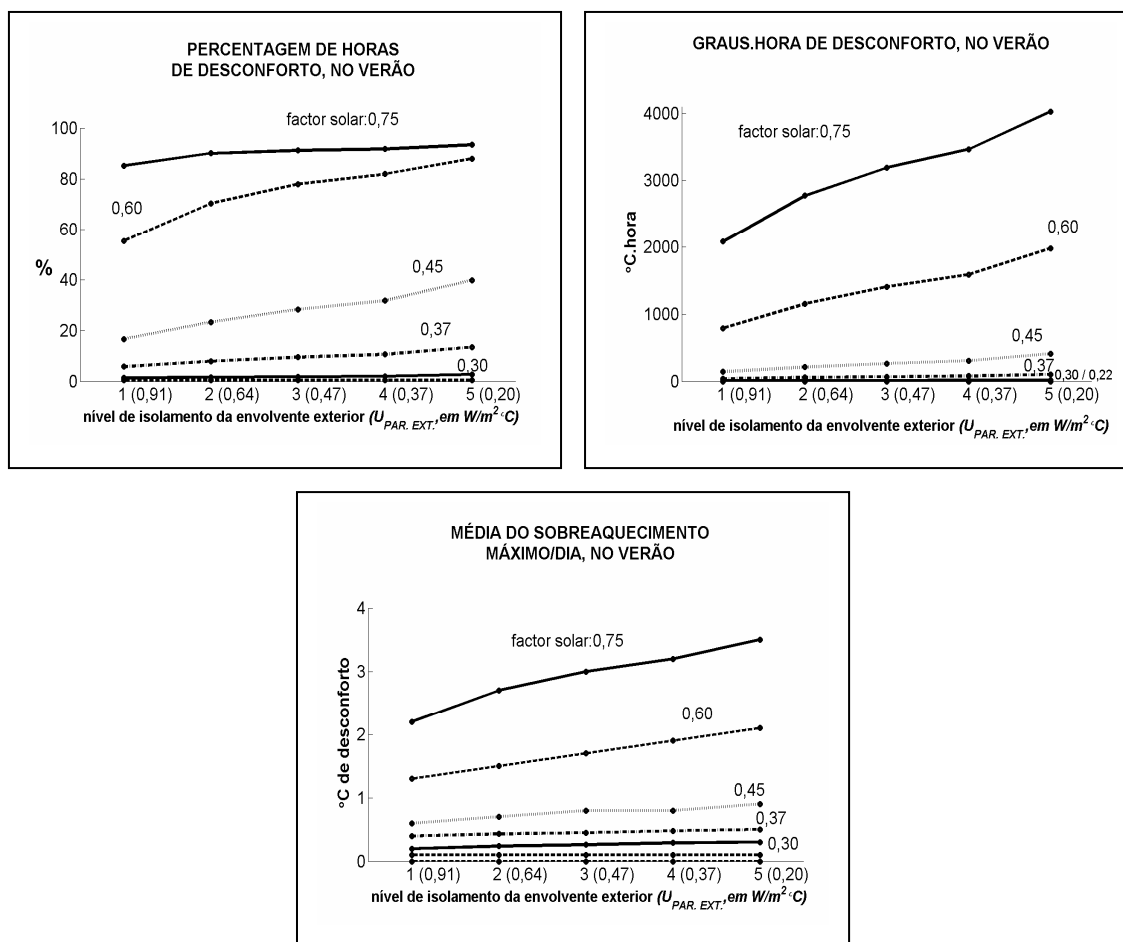


Figura 4.31 – Parâmetros de conforto para o edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

4.3.1.4 Edifício A, em Évora, com ventilação mínima

Na figura 4.32, tem-se os três parâmetros de conforto para o edifício A, em Évora, com ventilação mínima, e com os três maiores factores solares considerados (0,75, 0,60 e 0,45). Nota-se que os valores de desconforto são muito baixos, e bem inferiores aos dos edifícios B e C. O edifício A apresenta-se de certa forma confortável, mesmo sem a previsão de ventilação. Com a redução do factor solar de 0,75 para 0,60, tem-se quase ausência de sobreaquecimento, no Verão.

Na secção 5.3 apresenta-se os resultados da aplicação, para o edifício A, do modelo teórico simplificado proposto neste trabalho, onde pode-se verificar as razões do padrão de comportamento apresentado.

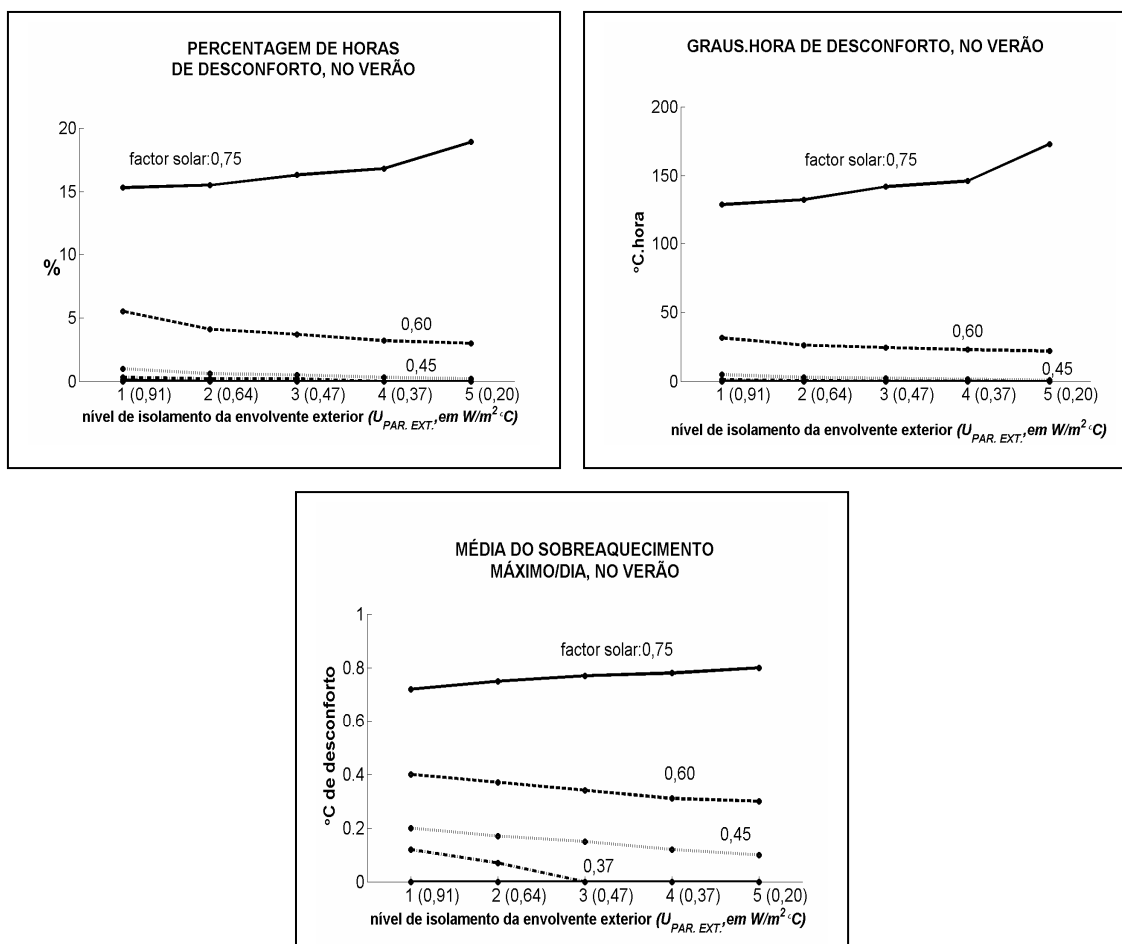


Figura 4.32 – Parâmetros de conforto para o edifício A, utilizado como habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

4.3.1.5 Edifício B, em Évora, com diferentes possibilidades de ventilação

A figura 4.33 apresenta o desempenho do edifício B, em Évora, com as distintas possibilidades adoptadas para a ventilação. Cada curva corresponde a um determinado factor solar das janelas conjugado a um padrão de ventilação. São representadas todas as possibilidades de ventilação consideradas nas simulações (ventilação mínima, somente ventilação nocturna, e diurna mais nocturna)²¹, e dois factores solares das janelas, um alto (0,75) e outro intermédio (0,37).

Nesses gráficos, observa-se o seguinte:

²¹ Ventilação mínima: 0,6 RPH. Ventilação nocturna e diurna + nocturna: 3,0 RPH (ver tabela 3.10).

- Conforme esperado, quando aumenta-se a ventilação, reduz-se o desconforto. É importante salientar que, em todos os casos apresentados, há aumento da ventilação somente quando a temperatura do ar exterior é menor que a temperatura média do ar das zonas ocupadas. Nessas condições, a ventilação é um importante contributo para remover o calor acumulado dentro do edifício. Por exemplo, para os casos com factor solar de 0,75 e ventilação diurna mais nocturna, o desconforto é reduzido a ponto de tornar-se muito próximo ao dos casos com factor de 0,37, com ventilação mínima (observar, em todos os gráficos da figura 4.33, que a curva de factor solar 0,75 e ventilação diurna mais nocturna é sempre próxima à curva de factor 0,37 e ventilação mínima).

- Apesar da ventilação nocturna ter apresentado-se benéfica, o prolongamento da duração da ventilação, com a inclusão do período diurno, mostrou ser uma alternativa ainda mais eficiente, capaz de reduzir o sobreaquecimento consideravelmente. Esse efeito positivo ocorre porque a temperatura do ar exterior é inferior à das zonas, em grande parte do período diurno.

- O aumento da taxa e do período de ventilação não só reduz o desconforto, como também reduz a inclinação das curvas, diminuindo as diferenças entre as envolventes mais e menos isoladas. Ou seja, quando há mais ventilação, conforme se aumenta o isolamento, o efeito negativo nas condições de conforto não é tão acentuado. Os pontos de viragem também correspondem a factores solares maiores (ver tabela na figura 4.33). Isso significa que, em edifícios com ganhos solares mais altos (factores solares maiores) mas com suficiente ventilação, consegue-se aumentar o isolamento sem detrimento do conforto. Quando há ventilação diurna mais nocturna, para alguns parâmetros nem há ponto de viragem definido, devido à grande redução da inclinação das curvas (tabela da figura 4.33), o que indica que a ventilação passa a ser o fenómeno dominante, desaparecendo o efeito do isolamento da envolvente no conforto de Verão.

Convém ressaltar que essa estratégia ideal de controlo considerada nas simulações, de aumento da ventilação somente quanto a temperatura exterior for menor que a interior, é de difícil implementação prática, a menos de controlo automático da ventilação com

sistema de gestão adequada. O controle manual para esta situação é impossível. Portanto, os resultados indicam a máxima contribuição potencial para os efeitos benéficos da ventilação natural, não se podendo traduzir em ganhos reais nos casos correspondentes a edifícios normais. Dessa forma, as conclusões obtidas para situações em que a ventilação é menos eficaz correspondem mais de perto à realidade expectável.

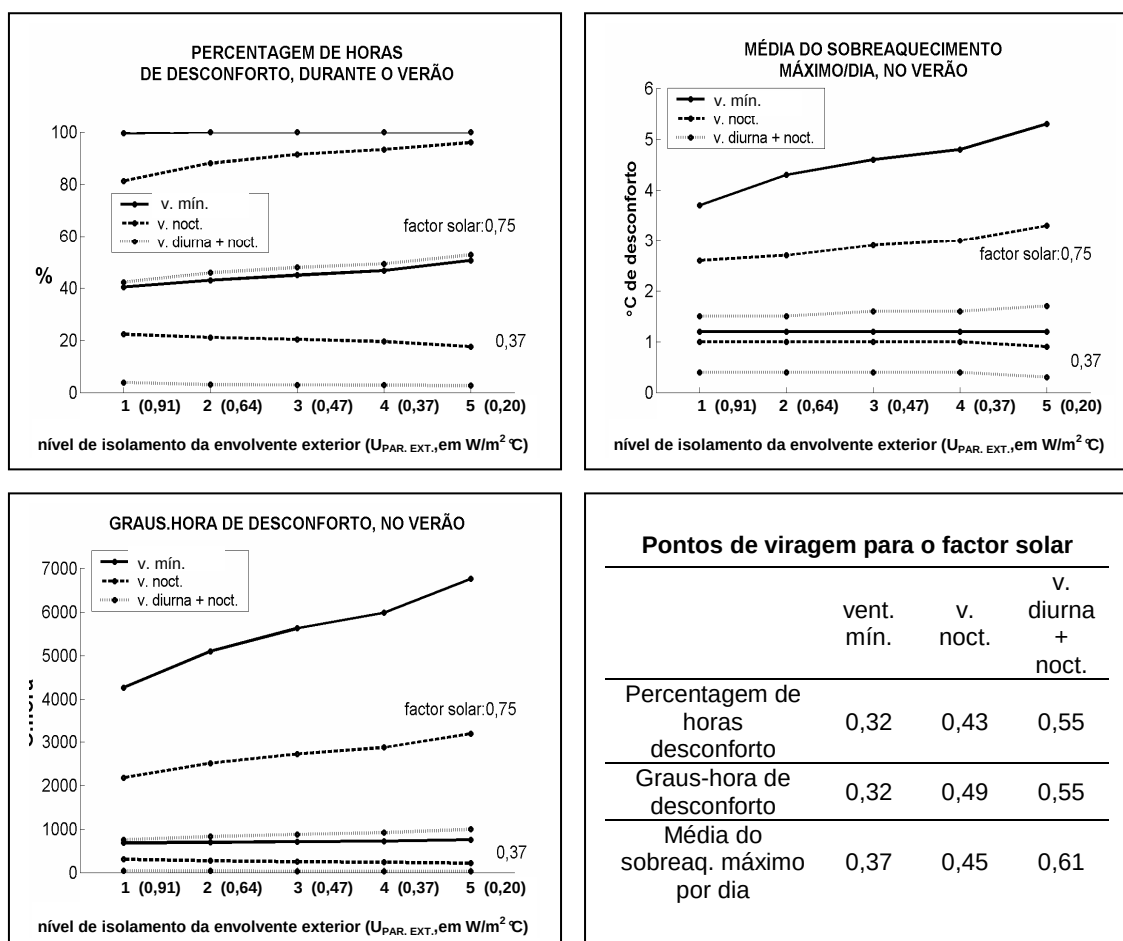


Figura 4.33 – Parâmetros de conforto e ponto de viragem para o edifício B, utilizado como habitação, em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

4.3.1.6 Edifícios A e C, em Évora, com diferentes possibilidades de ventilação

Os baixos valores de desconforto do edifício A (secção 4.3.1.4) são reduzidos ainda mais com a intensificação de ventilação. Por exemplo, a percentagem de horas de desconforto, para o nível de isolamento 3, e factor solar de 0,75, passa de 16,3 %,

quando a ventilação é mínima, para 3,3%, quando há ventilação diurna mais nocturna nas condições optimizadas (ver CD em anexo).

Já para o edifício C (figura 4.34), a situação é muito similar à observada na secção anterior, para o edifício B. Nota-se que, para todos os parâmetros de conforto, o aumento da ventilação reduz consideravelmente o desconforto, além de reduzir a inclinação das curvas. Por exemplo, quando há somente ventilação mínima, o edifício C, com factor solar de 0,75 possui uma média de sobreaquecimento máximo sempre maior do que 2 °C, podendo chegar até 3,5 °C, para o maior nível de isolamento. Já quando há ventilação nocturna, esse valor diminui, e chega a ser ainda menor (sobreaquecimento menor do que 1 °C), quando há ventilação diurna e nocturna.

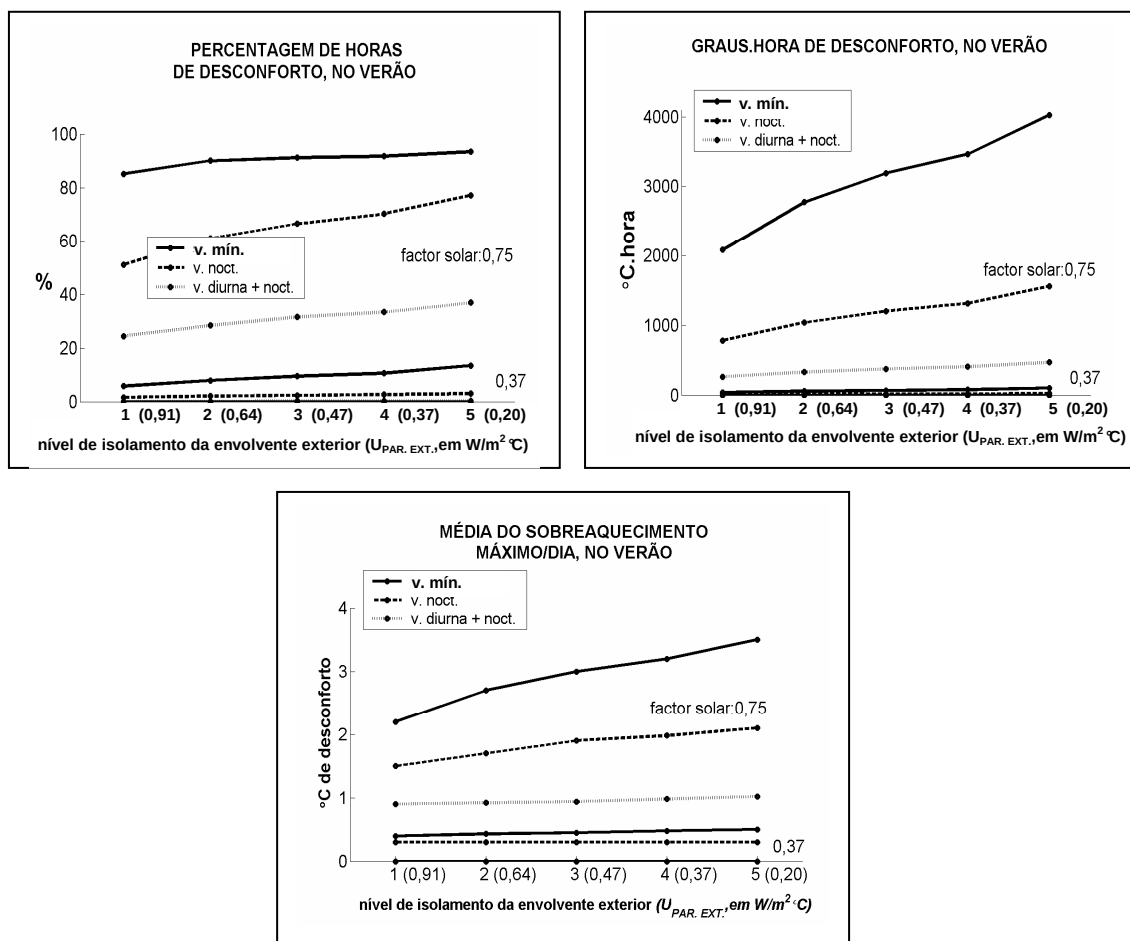


Figura 4.34 – Parâmetros de conforto para o edifício C, utilizado como habitação, em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

Portanto, chega-se às mesmas conclusões já apresentadas, de que a ventilação é um aspecto essencial para a redução do sobreaquecimento e para que se possa aumentar o isolamento da envolvente sem detrimento do conforto, sendo que a ventilação diurna mais nocturna é a alternativa mais eficaz, no clima analisado.

4.3.1.7 Edifícios B e C, em Évora, com alteração da cor exterior

Em uma pequena série de estudos, feita somente para os edifícios B e C, adoptou-se cor mais clara para as paredes exteriores, alterando o coeficiente de absorção da radiação solar de 0,6 para 0,3. Na figura 4.35 tem-se esses resultados, correspondentes aos três parâmetros de conforto, para os edifícios B e C, com variadas combinações de factor solar, padrão de ventilação e cor das paredes exteriores.

De uma forma geral, quando há ventilação diurna e nocturna, a cor não mostrou ser um aspecto de grande impacto. A diferença entre as curvas para coeficiente de absorção de 0,6 e 0,3 é maior quando a ventilação é mínima, do que quando há ventilação diurna e nocturna (diferença entre as linhas vermelha e preta maior do que entre as verde e azul, na figura 4.35). Pode-se também observar a tabela 4.2, a qual apresenta a redução do desconforto, ao se utilizar cores mais claras, para o edifício B, com nível 1 de isolamento e factor solar de 0,75, localizado em Évora. Nota-se que a redução, quando a ventilação é mínima, é bem maior do que quando a ventilação é diurna mais nocturna (por exemplo, 2055 °C.hora de desconforto, contra 380 °C.hora).

Esse tipo de resultado vai de encontro ao esperado. Quando a ventilação é mínima, a utilização de cores mais claras diminui o ganho de calor para o ambiente interior através das paredes opacas, fazendo com que a temperatura seja reduzida. No entanto, a partir do momento que intensificam-se as perdas de calor devido à ventilação, a cor passa a ter uma menor influência, pois esse ganho de calor pelas superfícies opacas já é mais facilmente eliminado. Tal como no caso anterior, a ventilação é o fenómeno dominante e todos os demais (isolamento, cor, etc) revelam-se desprezáveis em termo de impacto na temperatura interior obtida.

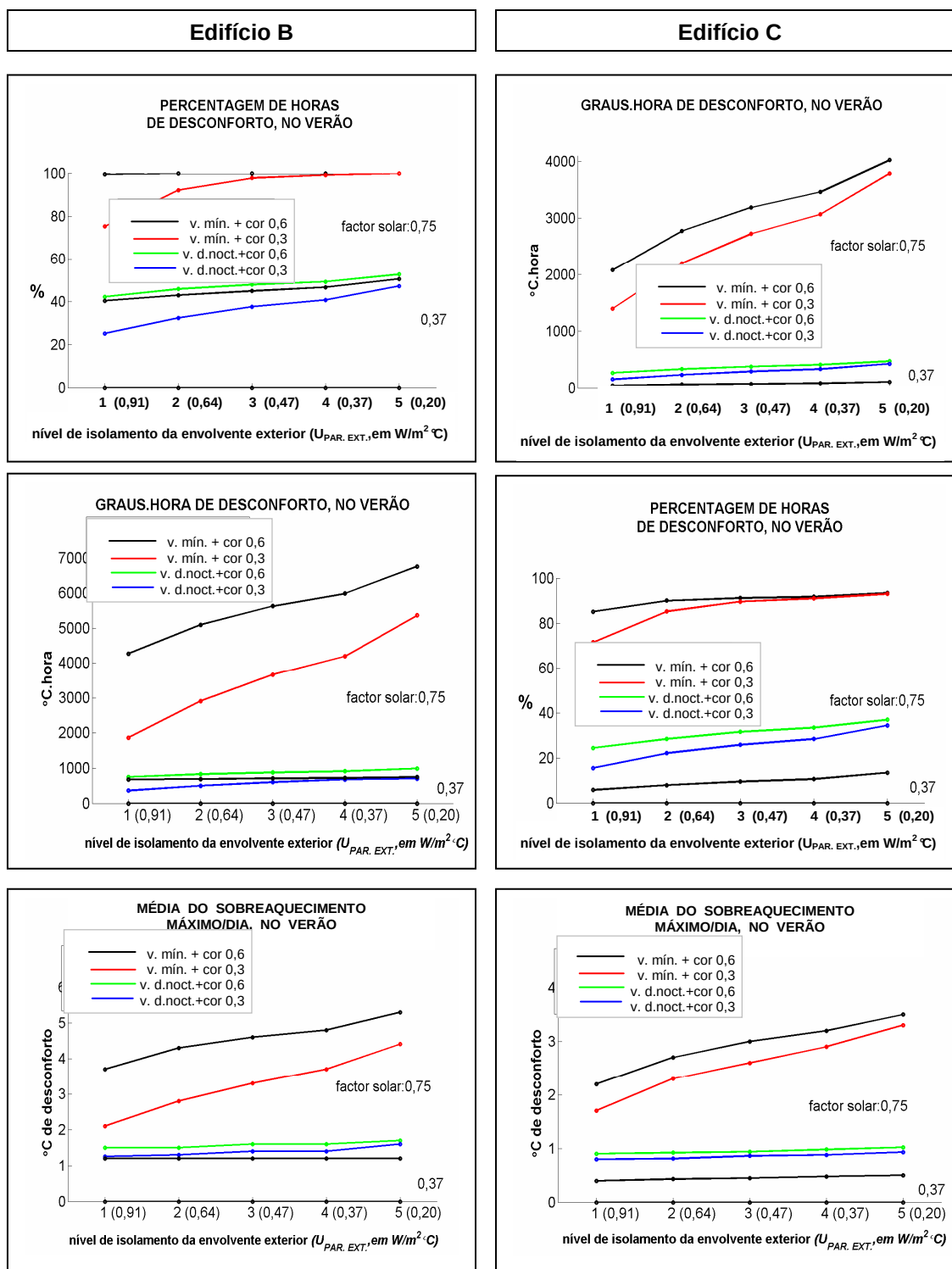


Figura 4.35 – Parâmetros de conforto para os edifícios B e C, utilizados como habitação, em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente, cor das paredes exteriores e factores solares das janelas.

Tabela 4.2 - Redução do desconforto, ao se utilizar cores mais claras nas paredes exteriores, para o edifício B, com nível 1 de isolamento e factor solar de 0,75, em Évora

Redução absoluta ⁽¹⁾	com ventilação mínima	com ventilação diurna mais nocturna
percentagem de horas de desconforto (%)	25,8	15,7
graus-hora de desconforto (°C.hora)	2055	380
média do sobreaquecimento máximo por dia (°C)	1,6	0,2

⁽¹⁾ Diferença entre o caso com coeficiente de absorção de 0,3 e o com coeficiente de 0,6.

4.3.1.8 Edifícios A, B e C, nos climas restantes, com todas as possibilidades consideradas

As secções anteriores tratam de todas as possibilidades consideradas para os edifícios A, B e C, em Évora. Nesta secção são apresentados os resultados desses mesmos edifícios, nos restantes climas:

- edifício A, em Lisboa e Porto;
- edifícios B e C, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice;

a) Edifício A

O edifício A já havia apresentado valores baixos de desconforto, até mesmo para o caso com ventilação mínima, em Évora, que é o clima mais quente dentre os estudados para esse edifício. Portanto, para os climas de Lisboa e Porto, zonas de climas menos quentes, há ainda menos períodos de sobreaquecimento, e em muitos casos a temperatura nunca ultrapassa o limite de conforto (ver CD em anexo, com todos os resultados).

b) Edifícios B e C

Para os edifícios B e C, são feitos os mesmos tipos de análise dos que os conduzidos em Évora (secções anteriores), para os seguintes casos:

- Casos com *ventilação mínima*, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice (ver figuras do Anexo G) ²².
- Casos com *variadas possibilidades de ventilação*, em Lisboa e no Porto (ver figuras do Anexo H).
- Casos com *variadas possibilidades de cor exterior*, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice (ver figuras do Anexo I) .

Os resultados para todos esses climas seguem de uma forma geral os mesmos padrões de comportamento encontrados nas secções anteriores, para esses edifícios, em Évora:

- Aumento do desconforto conforme se aumenta o isolamento, para altos factores solares, e diminuição da inclinação das curvas conforme se aumenta o factor solar.
- A ventilação auxilia na redução do desconforto de forma bastante significativa, além do que reduz a diferença entre as envolventes mais e menos isoladas.
- A cor apresenta influência positiva, mas não tão significativa, principalmente para as envolventes mais isoladas e/ou quando a ventilação diurna e nocturna é adoptada.
- Para os climas portugueses, Évora apresenta sempre o maior desconforto, seguido de Lisboa e Porto. Para os outros climas do Sul Europeu, tem-se Atenas como

²² Nessas figuras é representado um dos parâmetros de conforto, nomeadamente a percentagem de horas com desconforto, no Verão.

mais desconfortável que Nice. Esses resultados são coerentes com os dados médios de temperatura do ar, nos meses de Verão, para essas localidades (secção 3.8).

4.3.1.9 Diferenças entre os edifícios A, B e C

Em todas as diversas combinações analisadas nos estudos paramétricos, o edifício A mostrou-se sempre o mais confortável, no Verão. Já o edifício B foi o que indicou maior sobreaquecimento, seguido muito proximamente de C. Um exemplo para um dos casos simulados encontra-se na figura 4.36 (caso com ventilação mínima e factor solar de 0,75, em Évora).

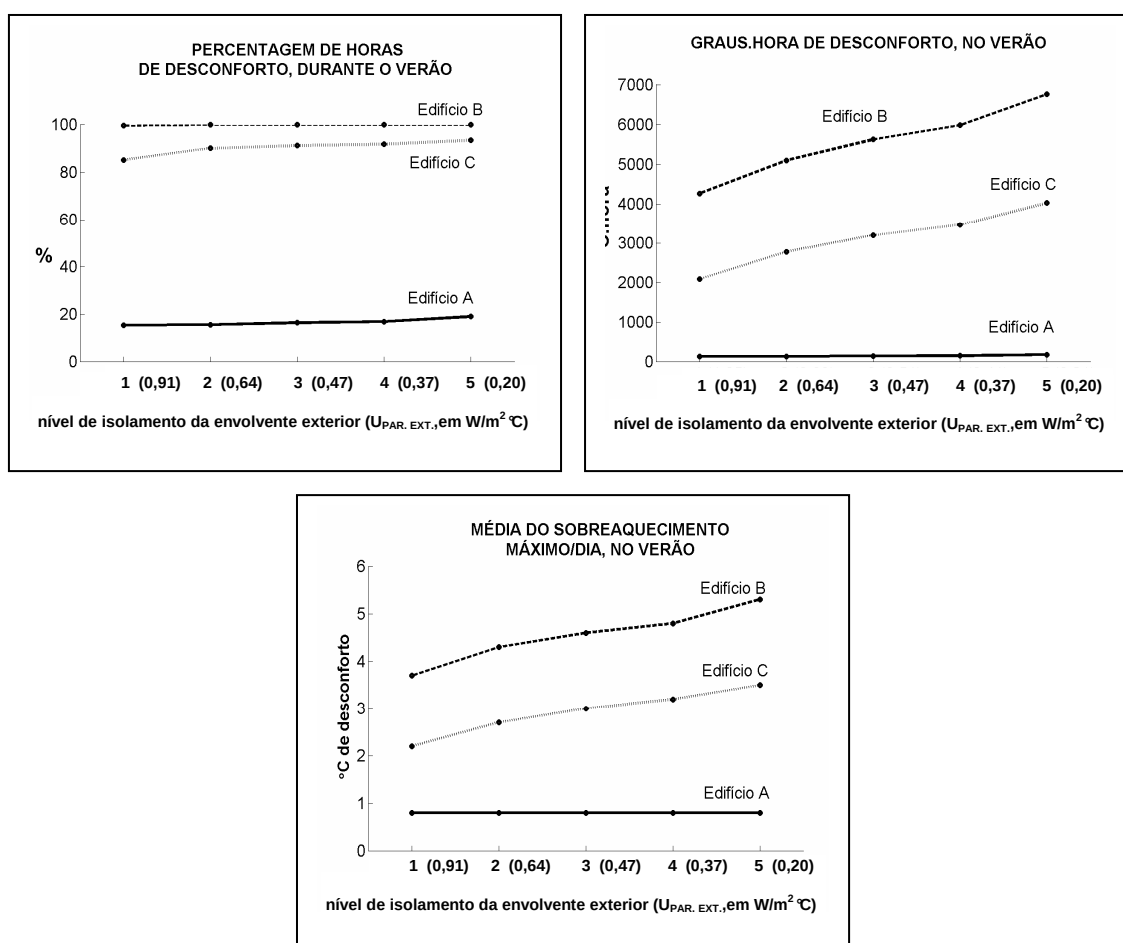


Figura 4.36 – Parâmetros de conforto para os edifícios A, B e C, utilizados como habitação, em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente, e factor solar das janelas de 0,75.

Cada um desses edifícios possui uma particular geometria, orientação, configuração e área das zonas ocupadas, além de taxas de ganhos internos não exactamente iguais, embora assumam valores próximos entre si. As condições finais dependem da combinação de todos esses aspectos, que resultam em variados ganhos e perdas totais do edifício, conforme apresentado no modelo desenvolvido no Capítulo 5 deste trabalho.

4.3.2 Análise das necessidades energéticas

A análise das necessidades energéticas é feita considerando-se tanto as necessidades de aquecimento e de arrefecimento separadamente, bem como a soma de ambas. Essa soma é efectuada tendo-se em conta a conversão desses consumos em energia primária, e levando-se em consideração os sistemas usuais e seus padrões correntes de utilização.

Energia primária, segundo a definição do Regulamento Térmico Português, o RCCTE [7], “é o recurso energético que se encontra disponível na natureza (petróleo, gás natural, energia hídrica, energia eólica, biomassa, solar). Exprime-se, normalmente, em termos da massa equivalente de petróleo (quilograma equivalente de petróleo – kgep – ou tonelada equivalente de petróleo – tep)”.

Através da equação abaixo, pode-se converter a energia útil ²³, ou seja, as necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais, obtidas através das simulações, em energia primária:

$$N_p = \frac{N_{aquec}}{\eta_{aquec}} \cdot F_{pu-aquec} + \frac{N_{arref}}{\eta_{arref}} \cdot F_{pu-arref} \quad (\text{kgep/m}^2) \quad (4.1)$$

Onde:

²³ Segundo o RCCTE [7], “energia útil, de aquecimento ou de arrefecimento, é a energia-calor fornecida ou retirada de um espaço interior”.

N_p	necessidades globais anuais de energia primária (kgep/m ²)
N_{aquec}	necessidades anuais de aquecimento (kWh/m ²)
N_{arref}	necessidades anuais de arrefecimento (kWh/m ²)
$\eta_{aquec}, \eta_{arref}$	eficiência nominal dos equipamentos utilizados para aquecimento e para arrefecimento
$F_{pu-aquec}, F_{pu-arref}$	factor de conversão entre energia útil e energia primária (valores tabelados de acordo com o tipo de combustível utilizado para aquecimento e para arrefecimento) (kgep/kWh)

Considerando-se os sistemas usuais utilizados, tem-se os seguintes valores, retirados do RCCTE [7]:

Aquecimento: $\eta_{aquec} = 0,87$ (caldeira a combustível gasoso)
 $F_{pu-aquec} = 0,086$ kgep/kWh (combustível gasoso)

Arrefecimento: $\eta_{arref} = 3$ (bomba de calor)
 $F_{pu-arref} = 0,290$ kgep/kWh (electricidade)

Dessa forma, aplicando-se os coeficientes acima na equação 4.1, tem-se como resultado a seguinte expressão:

$$N_p = (N_{aquec} + N_{arref}) \cdot 0,10 \quad (\text{kgep/m}^2) \quad (4.2)$$

Vê-se através da expressão acima que as necessidades de aquecimento e de arrefecimento possuem o mesmo factor de conversão de energia útil para energia primária, levando-se em consideração os sistemas utilizados e suas respectivas eficiências. Portanto, essas necessidades, ao serem somadas directamente, conforme efectuado nos resultados apresentados na sequência, fornecem uma indicação directa da energia primária resultante.

A figura 4.37 apresenta os resultados para o edifício C, em Évora, com variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas. Tem-se as necessidades

energéticas de aquecimento, arrefecimento e a soma de ambas, considerando-se controlo termostático do ambiente interior, ao longo de todo o ano (ver secção 3.9).

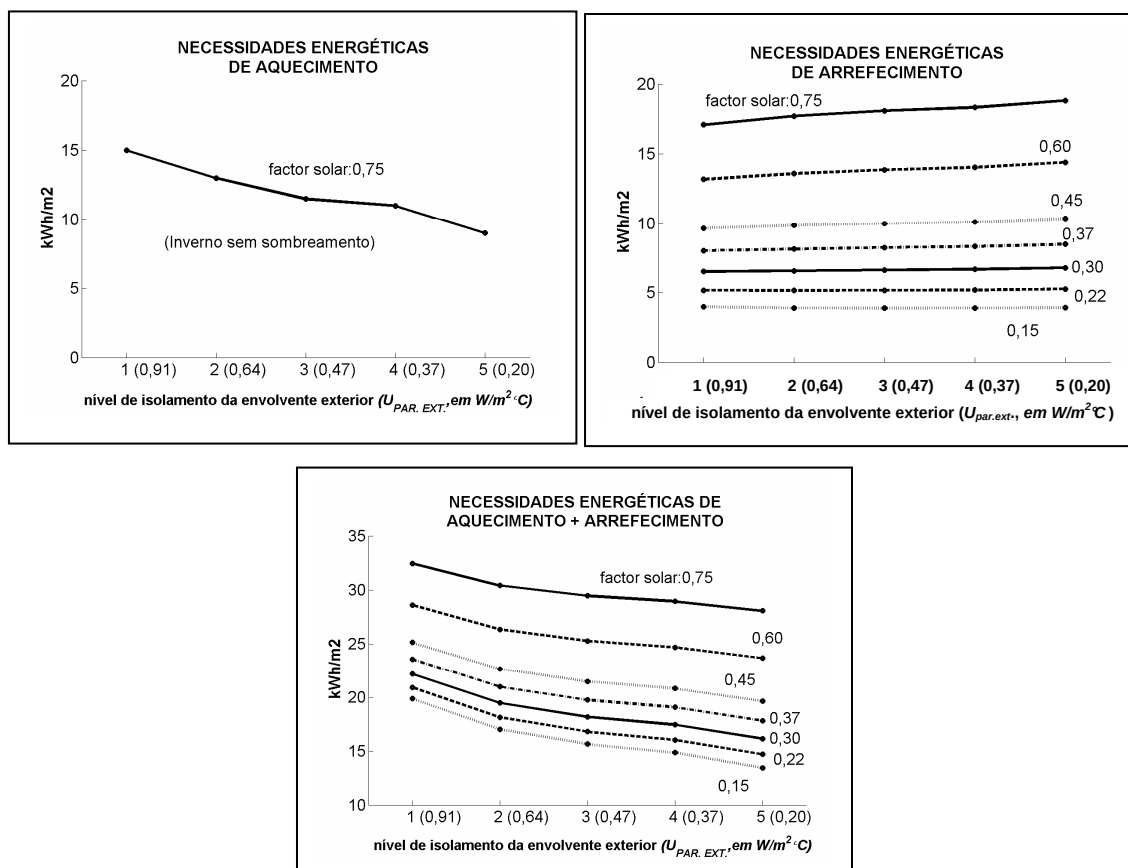


Figura 4.37 – Necessidades de energéticas para o edifício C, utilizado como habitação, em Évora.

Como há sombreamento somente nos meses de Verão, o factor solar das janelas, no Inverno, é sempre igual a 0,75 (sem sombreamento) e portanto, as necessidades energéticas de aquecimento são representadas através de uma única curva. Conforme esperado, as necessidades de aquecimento anuais sempre diminuem com o aumento do isolamento (figura 4.37). Em oposição, as necessidades de arrefecimento aumentam para os factores solares mais altos, e permanecem praticamente constantes para os restantes (figura 4.37). Isso vem de encontro às análises já apresentadas nas secções anteriores, onde se tem maior desconforto no Verão em envoltentes com alto factor solar e maior isolamento.

As análises feitas neste trabalho procuram avaliar o seguinte aspecto: se nos casos em que há acréscimo do consumo de arrefecimento devido ao aumento do isolamento, este chega a ser suficientemente alto para eliminar as poupanças obtidas no Inverno. Para o caso do edifício em questão, isso não ocorre (observar que necessidades energéticas de aquecimento mais arrefecimento, na figura 4.37, sempre reduzem com o aumento do isolamento).

O mesmo tipo de resultado foi encontrado para *todos* os outros casos simulados de utilização residencial: os três edifícios, em variados climas, incluindo Atenas, o mais quente dos climas de Verão, com ou sem alteração da cor exterior e da orientação. Em nenhuma situação, para a utilização habitacional, a economia de energia no Inverno foi eliminada pelo aumento do consumo, no Verão. Ou seja, houve sempre redução do consumo de aquecimento mais arrefecimento com o aumento do isolamento, mesmo quando o ar condicionado foi intensamente utilizado durante o Verão, sob controlo termostático.

4.3.3 Considerações finais para a utilização como habitação

De forma resumida, os resultados encontrados indicam o seguinte:

1. Em edifícios habitacionais, os ganhos solares precisam ser controlados, pois quando estes são muito altos, o aumento do isolamento da envolvente pode resultar no aumento do desconforto no Verão. Quando prevê-se sistemas de climatização artificial, há um aumento do consumo de energia para arrefecimento, que, embora não elimine completamente, pode reduzir os benefícios obtidos durante a estação de aquecimento.
2. Deve-se procurar garantir condições adequadas para a ventilação natural, pois este é um aspecto de grande impacto na redução do sobreaquecimento. Para os climas estudados, quanto maior o período de ventilação natural, inclusive durante o dia, e não somente à noite, desde

que a temperatura exterior seja menor que a interior, melhores resultados são obtidos.

4.4 Resultados para a utilização como serviços

4.4.1 Análise do conforto

4.4.1.1 Parâmetros de conforto seleccionados para representar as situações analisadas

Na figura 4.38 tem-se todos os parâmetros de conforto definidos na Metodologia (secção 2.5.2.2) para o edifício A, no Porto, com ventilação mínima, ganhos padrão 3 (o mais alto considerado para serviços) e com variados factores solares das janelas e níveis de isolamento da envolvente. Da mesma forma que nos edifícios de habitação (secção 4.3), todos os parâmetros indicaram tendências similares e, portanto, foram escolhidos como representativos, os mesmos que anteriormente: percentagem de horas de desconforto, graus-hora de desconforto e média do sobreaquecimento máximo, no Verão. A análise dos casos específicos do edifício A, representados nesses gráficos, é conduzida na secção 4.4.1.3.

4.4.1.2 Diferenças entre os edifícios de habitação e serviços

Os edifícios utilizados como serviços comportam-se de maneira distinta do que quando utilizados como habitação. A figura 4.39 apresenta a variação do desconforto, no Verão, conforme se aumenta o isolamento, para o edifício B, com ventilação mínima, em Évora, com o mais baixo factor solar considerado (igual a 0,15), em três situações: utilizado como habitação (ganhos internos padrão 1) e como serviços (ganhos padrões 2 e 3). Pode-se verificar que, principalmente para os ganhos internos mais altos, o desconforto é claramente maior e assume altos valores, apesar do elevado sombreamento.

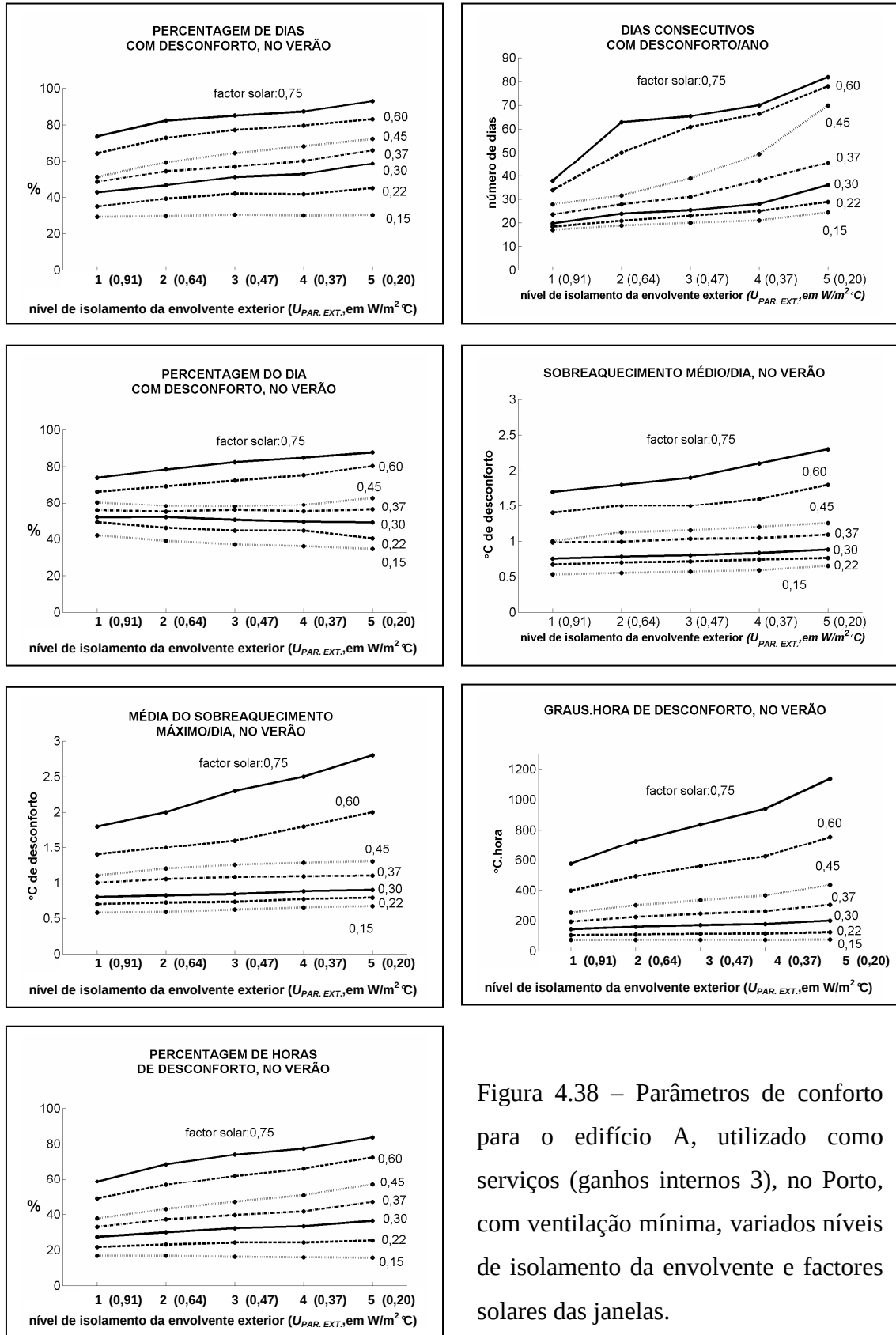


Figura 4.38 – Parâmetros de conforto para o edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), no Porto, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

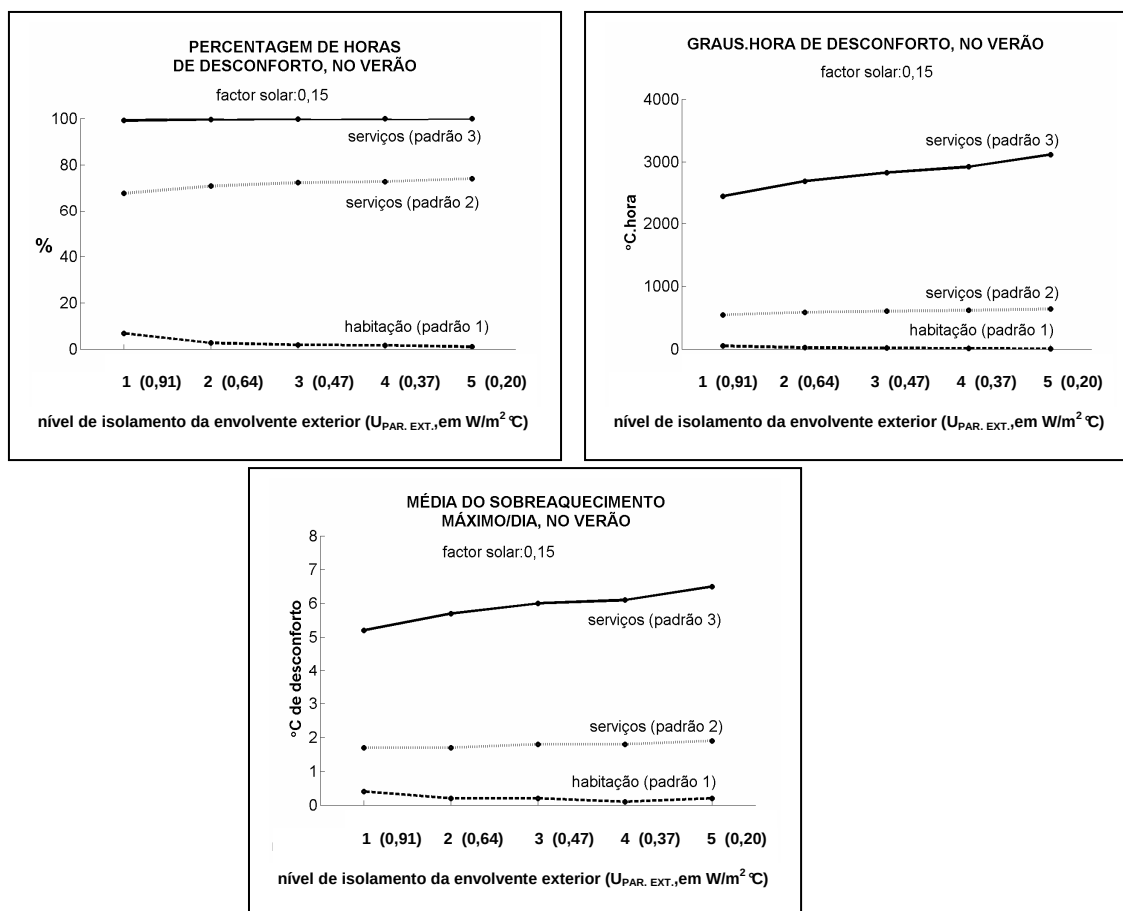


Figura 4.39 - Parâmetros de conforto para as variações de ganhos internos do edifício B, em Évora, com ventilação mínima, factor solar das janelas de 0,15 e variados níveis de isolamento da envolvente.

Todos os edifícios apresentaram esse mesmo tipo de comportamento, nos vários climas estudados. As tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam uma comparação entre o desconforto nos edifícios A, B e C, respectivamente, com a maior taxa de sombreamento considerada (factor solar de 0,15), em todos os climas analisados, em duas situações: utilizados como habitação e como serviços, padrão 3. Nota-se que há sempre elevado desconforto nos edifícios usados como serviços (acima de 50% do tempo ocupado), devido aos altos ganhos internos, mesmo para baixos factores solares das janelas, com excepção do edifício A, no Porto.

Tabela 4.3 - Comparação entre o desconforto no edifício A, com dois tipos de ganhos internos.

Edifício A, com ventilação mínima factor solar de 0,15 e nível 3 de isolamento da envolvente		
	Percentagem de horas de desconforto, no Verão (%)	
clima	habitação ganhos internos padrão 1	serviços ganhos internos padrão 3
Porto	zero	16,2
Lisboa	zero	56,5
Évora	zero	52,3

Tabela 4.4 – Comparação entre o desconforto no edifício B, com dois tipos de ganhos internos.

Edifício B, com ventilação mínima factor solar de 0,15 e nível 3 de isolamento da envolvente		
	Percentagem de horas de desconforto, no Verão (%)	
clima	habitação ganhos internos padrão 1	serviços ganhos internos padrão 3
Porto	zero	93,3
Lisboa	26,0	99,7
Atenas	34,5	99,6
Nice	1,1	97,2

Tabela 4.5 - Comparação entre o desconforto no edifício C, com dois tipos de ganhos internos.

Edifício C, com ventilação mínima factor solar de 0,15 e nível 3 de isolamento da envolvente		
	Percentagem de horas de desconforto, no Verão (%)	
clima	habitação ganhos internos padrão 1	serviços ganhos internos padrão 3
Porto	0,5	73,2
Lisboa	zero	95,6
Évora	zero	93,9
Atenas	12,8	99,4
Nice	0,1	95,1

4.4.1.3 Edifícios A, B e C, com ganhos internos padrão 3, em todos os climas, com ventilação mínima

Para os ganhos internos padrão 3, quando a ventilação é mínima, o desconforto assume valores elevados, e bem maiores do que nos edifícios habitacionais (ver comparação na secção anterior).

Os três parâmetros de conforto para o edifício B, em Évora e no Porto, são apresentados na figura 4.40. Vê-se os valores altos que resultam, e que há sempre maior sobreaquecimento com o aumento do isolamento, mesmo quando os ganhos solares assumem os menores valores (elevado sombreamento).

O mesmo comportamento indicado na figura 4.40 foi observado para o edifício B, nos outros climas estudados, nomeadamente Lisboa, Atenas e Nice, conforme pode-se observar nas figuras do Anexo J, que representam os graus-hora de desconforto para esses casos. Também para o edifício C, os resultados são muito similares, em todos os climas estudados, bem como para o edifício A, em Évora e Lisboa (ver figuras no Anexo J).

A excepção ocorre para o edifício A, no Porto, onde o sobreaquecimento é menor, e para factores solares baixos, pode-se aumentar o isolamento, sem que haja detrimento do conforto (figura 4.41). Ou seja, esse edifício, apesar dos altos ganhos internos, apresentou bons resultados no clima mais ameno dentre os estudados (Porto), quando bem sombreado. Isso vem de encontro ao já observado para a utilização habitacional, onde este edifício foi o que apresentou as menores taxas de desconforto (secção 4.3.1.9).

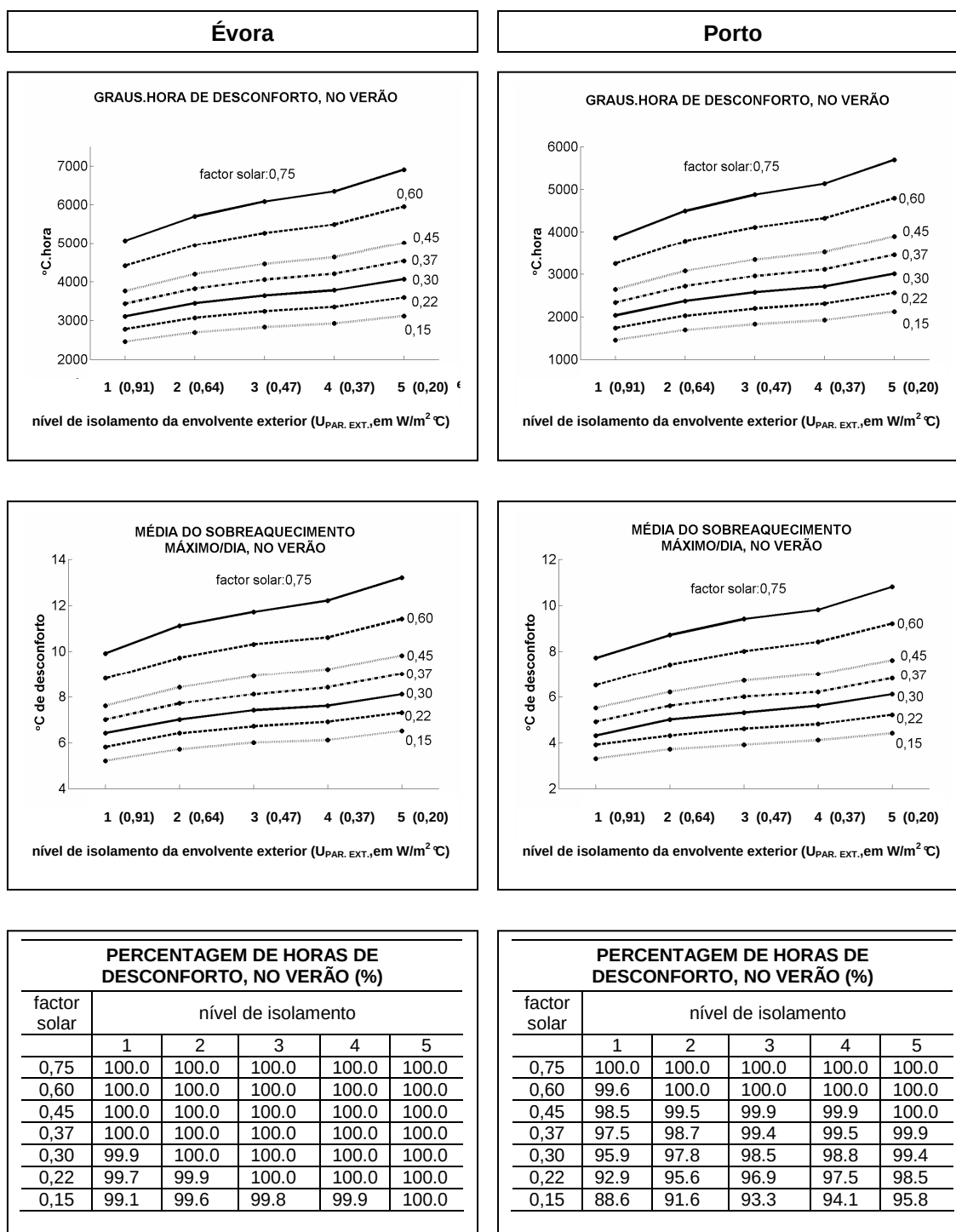


Figura 4.40 – Parâmetros de conforto para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora e no Porto, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

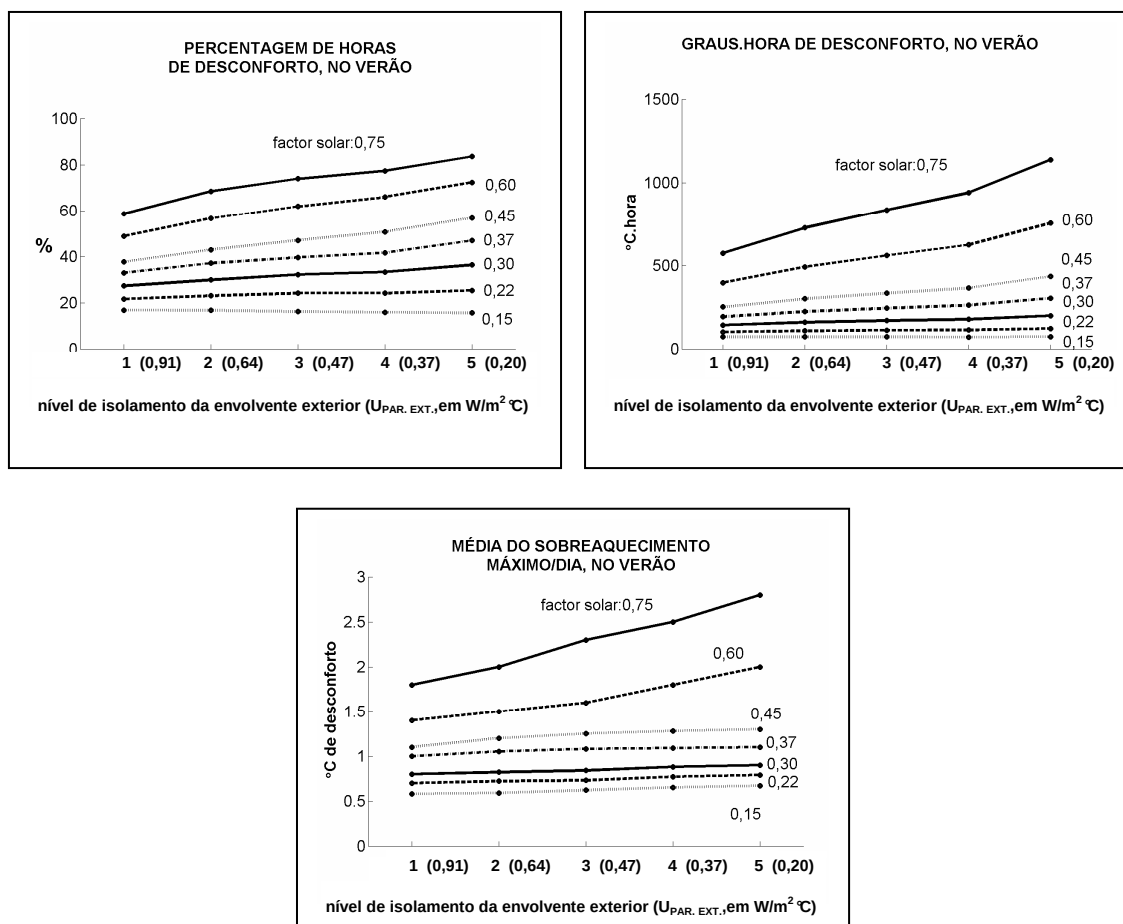


Figura 4.41 – Parâmetros de conforto para o edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), no Porto, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

Quanto à influência do clima, para todos os edifícios, em todas as situações simuladas, é a mesma encontrada para a utilização habitacional: em Portugal, tem-se Évora como o clima mais quente, seguida muito proximamente de Lisboa e, depois, do Porto; para os outros climas do Sul Europeu, Atenas apresentou-se mais desconfortável que Nice. Isso vai de encontro aos dados climáticos dessas localidades, conforme pode ser visto na tabela 4.6, onde tem-se os climas acima referidos e sua temperatura média exterior no mês mais quente. Nessa tabela tem-se também um exemplo do tipo de resultado encontrado, com indicação dos graus-hora de desconforto para os três edifícios, em todos esses climas, em ordem crescente.

Tabela 4.6 – Graus-hora de desconforto para os edifícios A, B e C, com ventilação mínima, padrão 3 de ganhos internos, nível 3 de isolamento e factor solar de 0,75, em todos os climas analisados.

Graus-hora de desconforto, no Verão (°C.hora)				
climas portugueses	temperatura (°C) ⁽¹⁾	edifício A	edifício B	edifício C
Porto	19,9	835,7	4874,3	3631,7
Lisboa	22,8	1654,4	5977,3	4467,4
Évora	23,2	1711,1	6084,7	4630,7
outros climas	temperatura (°C) ⁽¹⁾	edifício A	edifício B	edifício C
Nice	23,0	⁽²⁾	5068,7	4699,2
Atenas	25,8	⁽²⁾	5797,1	5383,3

⁽¹⁾ Temperatura média do ar exterior no mês mais quente de Verão.

⁽²⁾ Simulação não efectuada.

4.4.1.4 Edifícios A, B e C, com ganhos internos padrão 2, em todos os climas, com ventilação mínima

Os resultados para os três edifícios, com ganhos internos padrão 2, nos três climas estudados (Porto, Lisboa e Évora) são apresentados nas figuras 4.42 (edifício A), 4.43 (edifício B) e 4.44 (edifício C), respectivamente. Tem-se representados nesses gráficos os graus-hora e a percentagem de horas com desconforto, no Verão.

Nas três figuras, nota-se a tendência de aumento do desconforto com o aumento do isolamento, para altos factores solares. Quando o factor solar é reduzido, dependendo do edifício e do clima, pode-se aumentar o isolamento, sem detrimento do conforto.

A tabela 4.7 exemplifica as diferenças entre os padrões 2 e 3 de ganhos, para os três edifícios, nos três climas portugueses estudados. Verifica-se que, ao contrário do observado para o padrão 3 (secção anterior), para o padrão 2 dos ganhos, mais moderado, em algumas situações, o sobreaquecimento não é tão elevado. Por exemplo,

o edifício C, no Porto, tem 73,2% de suas horas ocupadas com desconforto, as quais são reduzidas para 0,3% do tempo, com a redução dos ganhos. Em Évora, para esse mesmo edifício, a redução é de 93,9 para 33,5 %.

Tabela 4.7 – Percentagem de horas de desconforto para os edifícios A, B e C, com ventilação mínima e padrões 2 e 3 de ganhos internos, nível 3 de isolamento e factor solar de 0,15, no Porto, Lisboa e Évora.

Percentagem de horas de desconforto, no Verão (%)						
climas	edifício A		edifício B		edifício C	
	ganhos 2	ganhos 3	ganhos 2	ganhos 3	ganhos 2	ganhos 3
Porto	zero	16,2	22,1	93,3	0,3	73,2
Lisboa	0,5	56,5	71,3	99,7	26,7	95,6
Évora	1,2	52,3	72,2	99,6	33,5	93,9

Ganhos 2: valor médio de $9,2 \text{ W/m}^2$, durante um período de 24 horas.

Ganhos 3: valor médio de $14,8 \text{ W/m}^2$, durante um período de 24 horas.

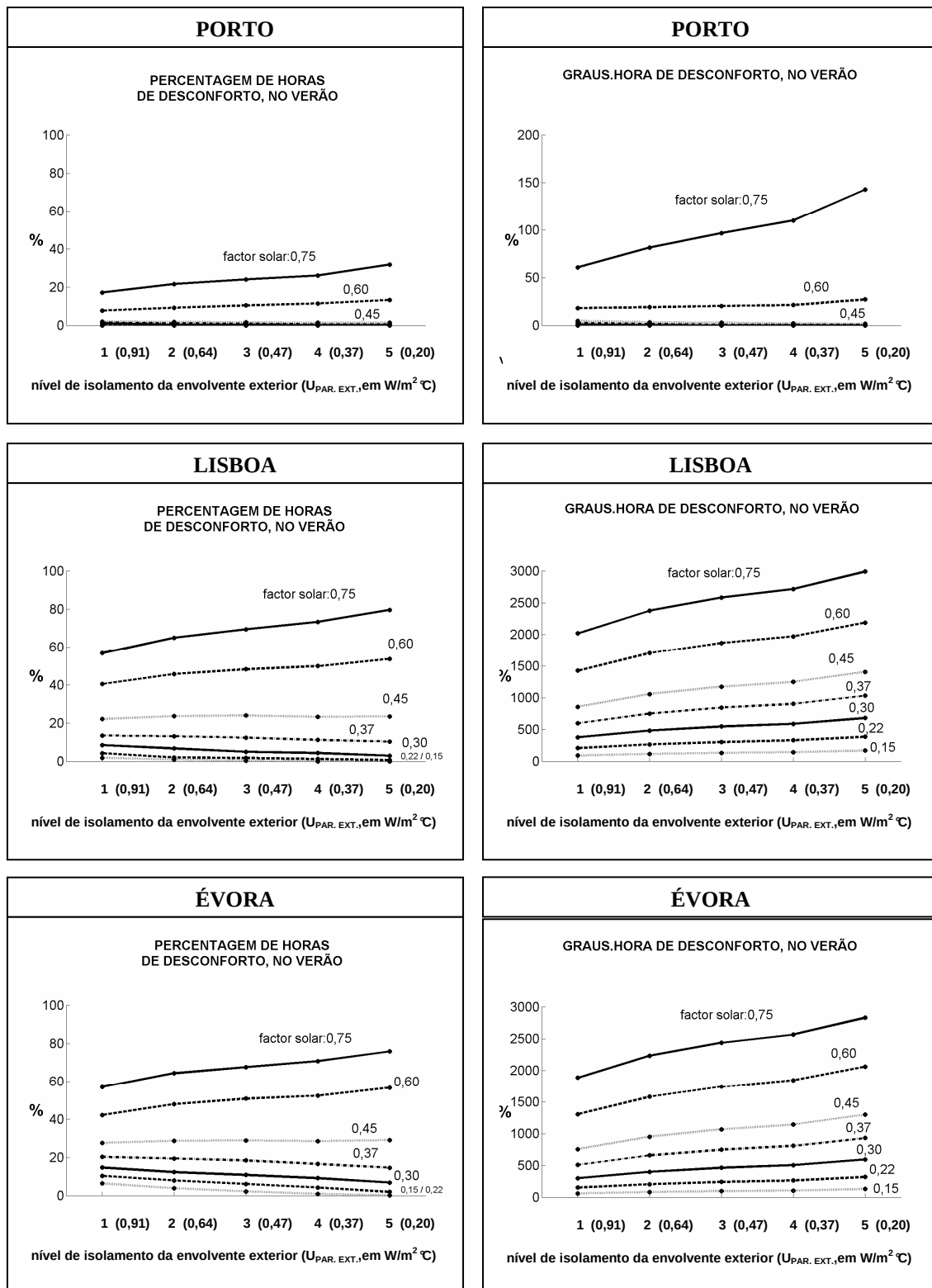


Figura 4.42 – Parâmetros de conforto para o edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 2), no Porto, Lisboa e Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

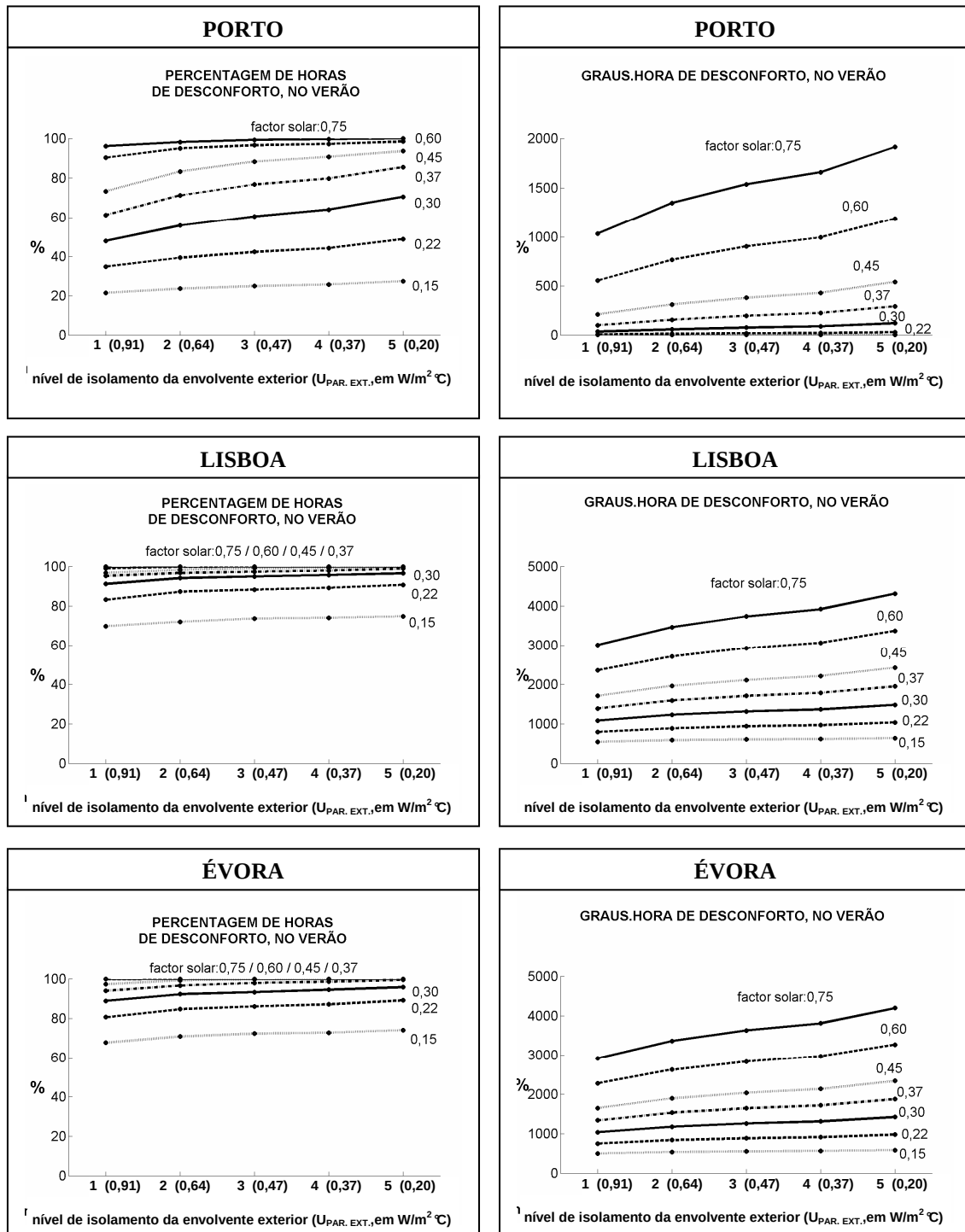


Figura 4.43 – Parâmetros de conforto para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 2), no Porto, Lisboa e Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

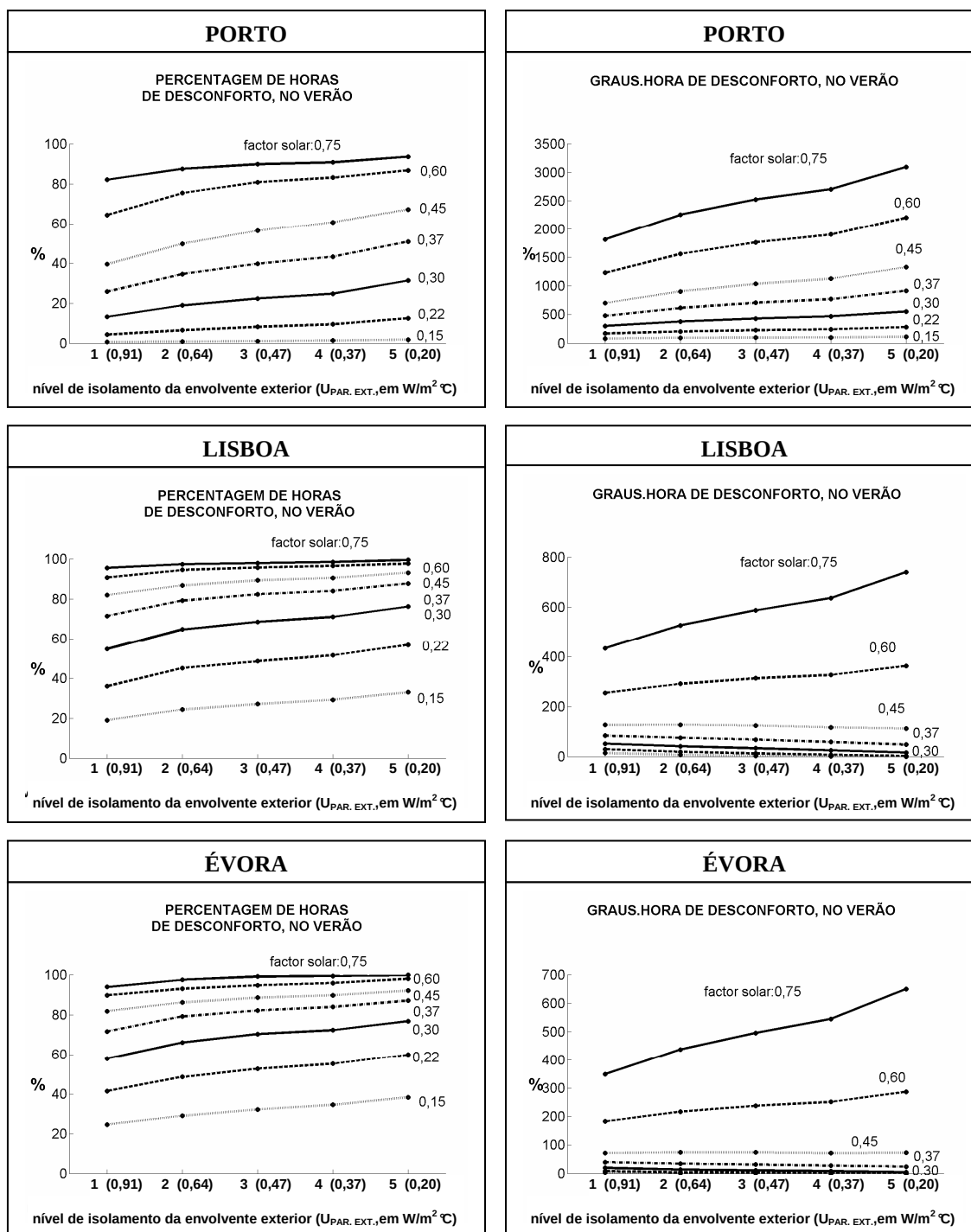


Figura 4.44 – Parâmetros de conforto para o edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 2), no Porto, Lisboa e Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

4.4.1.5 Edifícios A, B e C, em todos os climas, com diferentes possibilidades de ventilação

A figura 4.45 apresenta os graus-hora e a percentagem de horas de desconforto, no Verão, para o edifício B, com ganhos internos 3, em Évora, para três factores solares (alto, intermédio e baixo). Estes eram alguns dos casos que apresentavam elevado desconforto com ventilação mínima, mesmo para o factor solar mais baixo. No Anexo L tem-se o mesmo tipo de gráfico da figura 4.45, indicando a percentagem de horas de desconforto, no Verão, para todos os demais casos nos quais as variadas possibilidades de ventilação foram consideradas, nomeadamente:

- edifícios A, B e C, com ganhos internos 2, em Évora, Lisboa e Porto (nestas situações, foi estudada apenas a ventilação nocturna);
- edifício A, com ganhos internos 3, em Évora, Lisboa e Porto;
- edifício B, com ganhos internos 3, nos demais climas (Lisboa, Porto, Atenas e Nice);
- edifício C, com ganhos internos 3, em Évora, Lisboa, Porto, Atenas e Nice;

Para todas essas figuras, as observações, de forma geral, são muito similares às obtidas para a utilização habitacional:

- A ventilação é um importante aspecto que contribui consideravelmente para a redução do sobreaquecimento. A ventilação durante o dia e à noite, sempre que a temperatura exterior é menor que a interior, é mais eficiente do que somente durante o período nocturno.
- Com a ventilação mais intensa, a diferença entre o desconforto para as envolventes mais e menos isoladas é reduzida, mesmo para os factores solares mais altos.

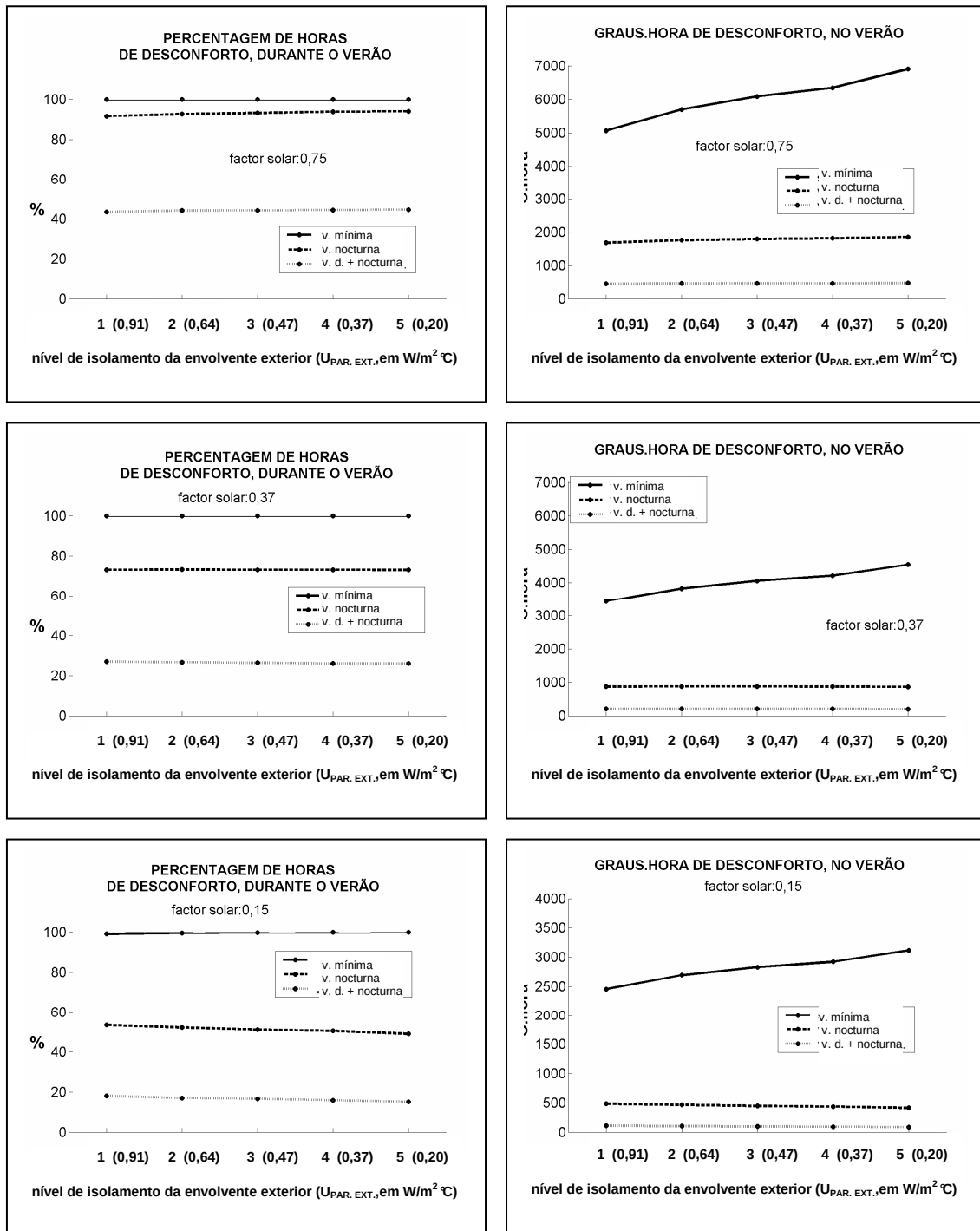


Figura 4.45 – Parâmetros de conforto para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

- Quando os ganhos internos são reduzidos (do padrão 3 para o 2, ver secção anterior), o desconforto também decresce, mas não tanto quanto quando há ventilação, conforme é possível verificar-se na tabela 4.8. Para o edifício B, em Évora, quando os ganhos internos são padrão 3 e o factor solar 0,15, tem-se 99,6% do período ocupado com desconforto. Esse valor é igual a 72,2% quando os ganhos internos são menores, mas a redução é consideravelmente maior quando há ventilação diurna mais nocturna, mesmo com os ganhos mais altos: o desconforto passa a ser igual a 16,6% do tempo. Todos os outros edifícios, em todos os outros climas, apresentaram resultados muito similares.

Tabela 4.8 – Percentagem de horas de desconforto para o edifício B, com variados padrões de ventilação e de ganhos internos, nível 3 de isolamento e factor solar de 0,15, no Porto, Lisboa e Évora.

Percentagem de horas de desconforto, no Verão (%)			
climas	edifício B		
	ganhos 3	ganhos 2	ganhos 3 + vent. diurna + noct.
Porto	93,3	22,1	8,5
Lisboa	99,7	71,3	14,3
Évora	99,6	72,2	16,6

Em todos esses resultados, pode-se notar que, dependendo do clima, do edifício, do factor de sombreamento e do tipo de ventilação adoptada, pode-se ter condições interiores aceitáveis. Como exemplo são indicados os casos, dentre os analisados, nos quais o sobreaquecimento ocorre em menos de 15% do tempo ocupado para qualquer nível de isolamento, nas tabelas 4.9 (para o edifício A), 4.10 (edifício B) e 4.11 (edifício C). Quando a ventilação é mínima, isso não ocorre em nenhuma situação.

Tabela 4.9 – Casos dentre os analisados para o edifício A, com ventilação, nos quais o sobreaquecimento ocorre em menos de 15% do tempo ocupado, para qualquer nível de isolamento

Edifício A	
ganhos internos 2	ganhos internos 3
Porto e Lisboa / v. n. / qualquer factor solar Évora / v. n. / factor solar $\leq 0,60$	Porto / v. n. / factor solar $\leq 0,45$ Porto / v. d.+ n. / qualquer factor solar Lisboa e Évora / v. d.+ n. / factor solar $\leq 0,45$
v. n.: ventilação nocturna v. d.+ n.: ventilação diurna + nocturna	

Tabela 4.10 – Casos dentre os analisados para o edifício B, com ventilação, nos quais o sobreaquecimento ocorre em menos de 15% do tempo ocupado, para qualquer nível de isolamento

Edifício B	
ganhos internos 2	ganhos internos 3
Porto / v. n. / factor solar $\leq 0,60$ Lisboa, Évora / v. n. / factor solar $\leq 0,37$	Porto / v. d.+ n. / factor solar $\leq 0,37$ Porto / v. d.+ n. / factor solar $\leq 0,15$
v. n.: ventilação nocturna v. d.+ n.: ventilação diurna + nocturna	

Tabela 4.11 – Casos dentre os analisados para o edifício C, com ventilação, nos quais o sobreaquecimento ocorre em menos de 15% do tempo ocupado, para qualquer nível de isolamento

Edifício C	
ganhos internos 2	ganhos internos 3
Porto / v. n. / todos os factores solares Évora / v. n. / factor solar $\leq 0,45$ Lisboa / v. n. / factor solar $\leq 0,60$	Porto / v. n. / factor solar $\leq 0,22$ Porto / v. d.+ n. / todos os factores solares Lisboa / v. d.+ n. / factor solar $\leq 0,37$ Évora / v. d.+ n. / factor solar $\leq 0,15$
v. n.: ventilação nocturna v. d.+ n.: ventilação diurna + nocturna	

4.4.1.6 Alteração da inércia dos edifícios B e C

Os resultados das séries de estudos feitas para os edifícios B e C, em Évora, com inércia fraca, variadas possibilidades de ventilação e factor solar das janelas, são apresentados nas figuras 4.46 (edifício B) e 4.47 (edifício C), em contraponto aos resultados dos casos simulados com a inércia padrão. Nesses gráficos são indicados dois dos parâmetros de conforto, os graus-hora e a percentagem de horas de desconforto, no Verão, e cada curva corresponde a uma determinada condição, nomeadamente:

- com ventilação mínima e inércia padrão;
- com ventilação mínima e inércia fraca;
- com ventilação nocturna e inércia padrão;
- com ventilação nocturna e inércia fraca;
- com ventilação diurna e nocturna e inércia padrão;
- com ventilação diurna e nocturna e inércia fraca.

Nota-se que os casos com inércia fraca apresentam-se sempre mais desconfortáveis, em todas as condições analisadas. As tendências observadas em relação ao efeito do aumento do isolamento e da ventilação, são as mesmas que as para os casos com inércia média a forte: maior sobreaquecimento quando as envolventes são mais isoladas, mesmo para os factores solares mais baixos; redução significativa do desconforto e das diferenças entre os níveis de isolamento com a ventilação (sendo a diurna mais nocturna, mais eficiente do que a nocturna somente).

Dados detalhados são apresentados na figura 4.48, onde tem-se a evolução da temperatura do ar da zona 8 (parede exterior com orientação sul), do edifício C, com inércia fraca e média a forte, nas situações com ventilação mínima e diurna e nocturna, e factor de solar das janelas de 0,75. Nota-se que, o edifício com inércia fraca apresenta maior amplitude de temperatura, em todas as situações.

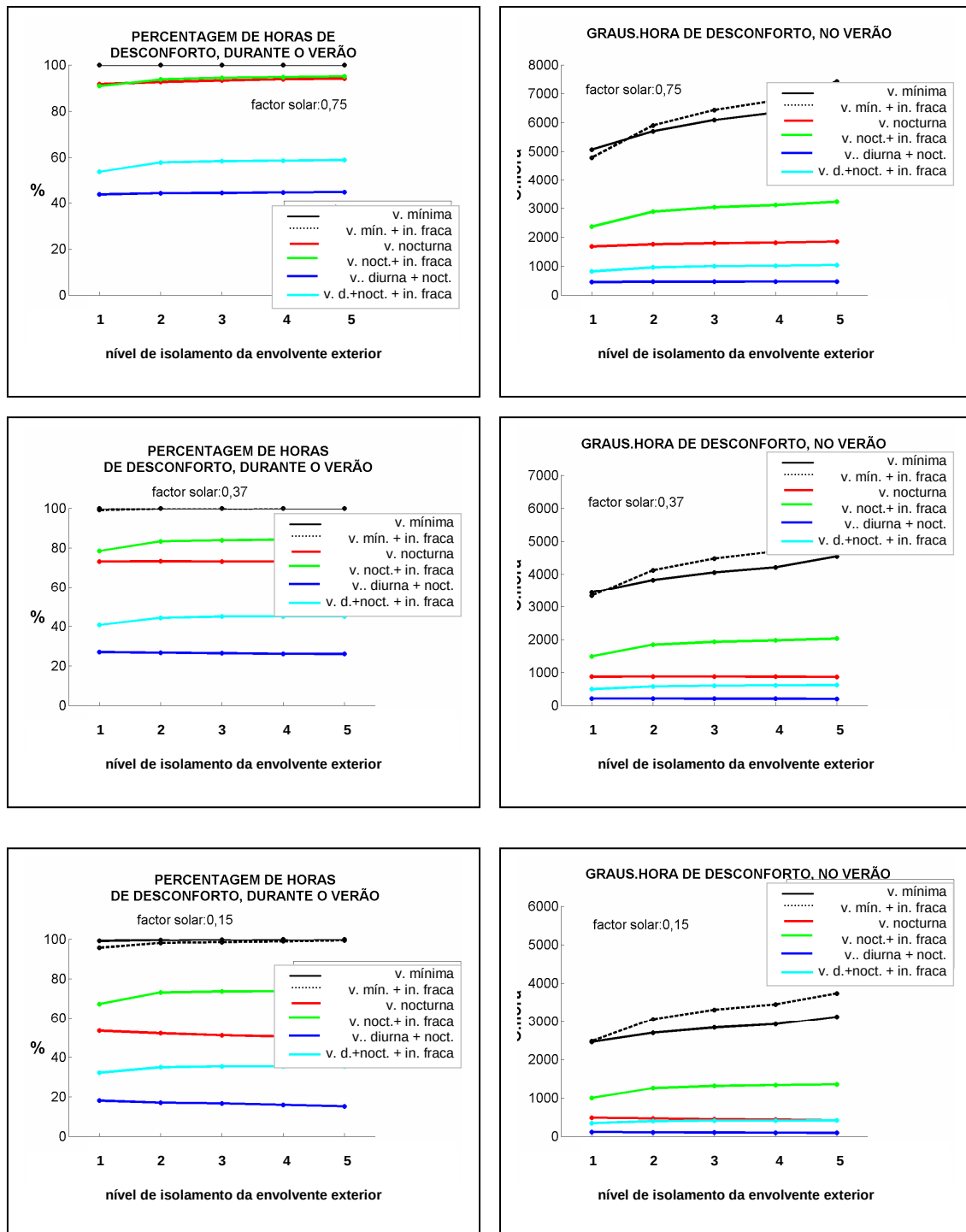


Figura 4.46 – Resultados para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com variadas possibilidades de inércia, ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

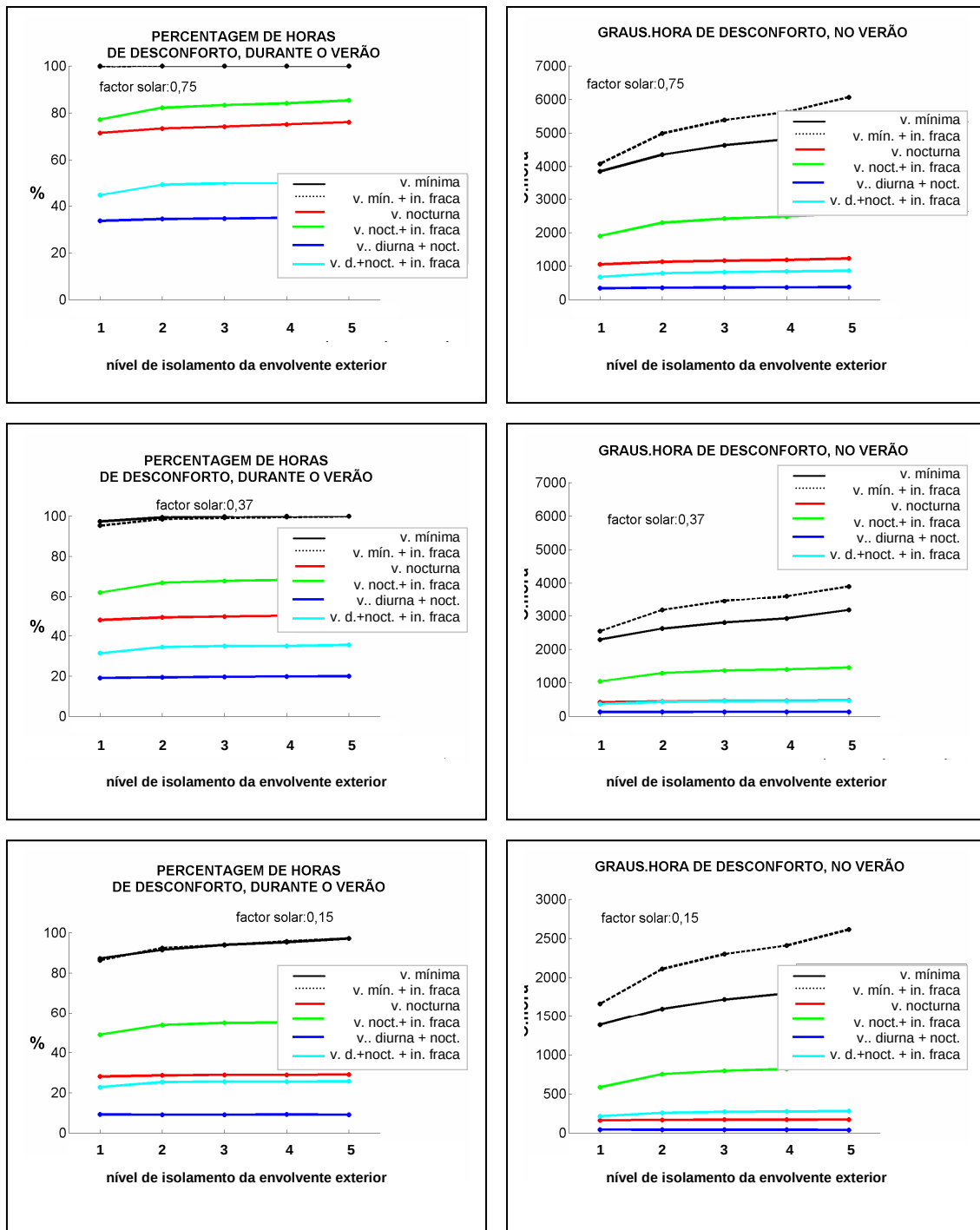


Figura 4.47 – Resultados para o edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com variadas possibilidades de inércia, ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

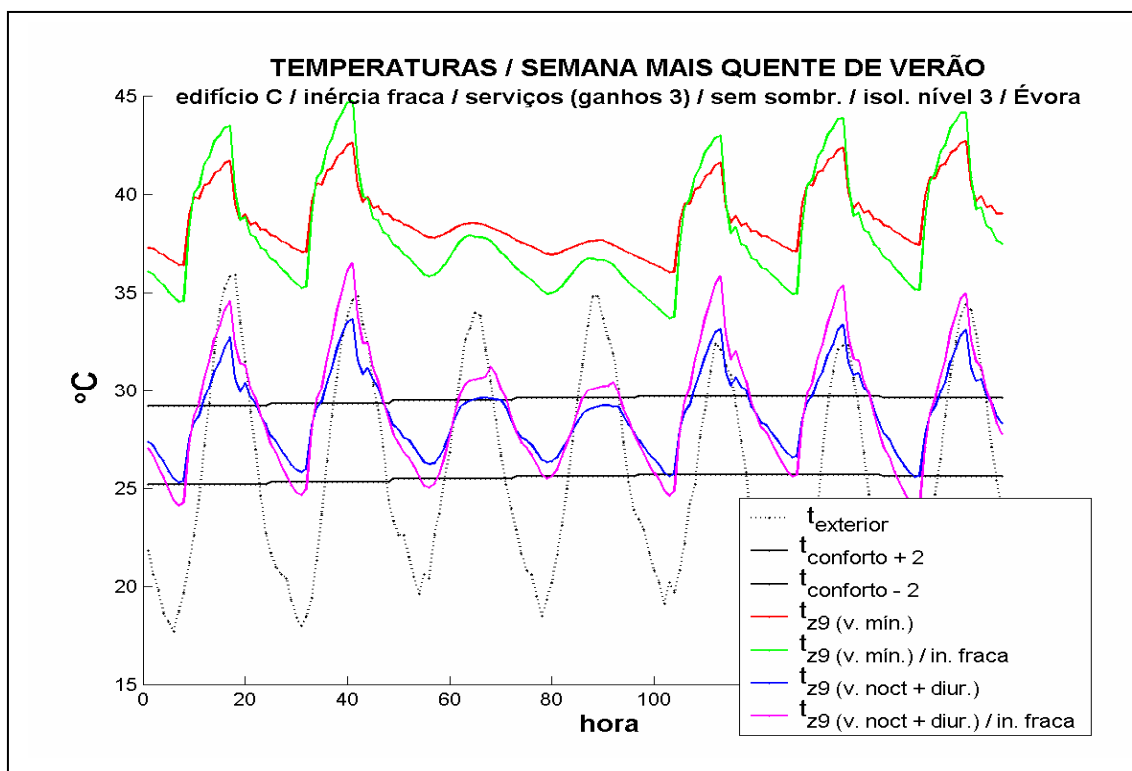


Figura 4.48 – Temperaturas durante uma semana de Verão. Edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com variadas possibilidades de ventilação e inércia, factor solar das janelas de 0,75 e nível de isolamento intermédio (nível 3).

4.4.1.7 Edifícios A, B e C, em todos os climas, com alteração da cor exterior

A figura 4.49 apresenta um exemplo do tipo de resultado encontrado referente à alteração da cor exterior, para o edifício B, em Évora e Atenas. Todos os climas e edifícios seguem padrões muito semelhantes aos da figura 4.49 (ver CD em anexo com todos os resultados). Os resultados indicam, como já foi observado na utilização habitacional, que a cor, nessas situações, não apresenta um impacto muito significativo.

4.4.1.8 Diferenças entre os edifícios A, B e C

Para a utilização de serviços, conforme esperado, o mesmo padrão que o para a utilização habitacional foi encontrado em todas as simulações: edifício B, seguido de C e A (figura 4.50). Todas as observações feitas na secção 4.3.1.9, referentes à utilização habitacional, são também válidas para os casos de serviços.

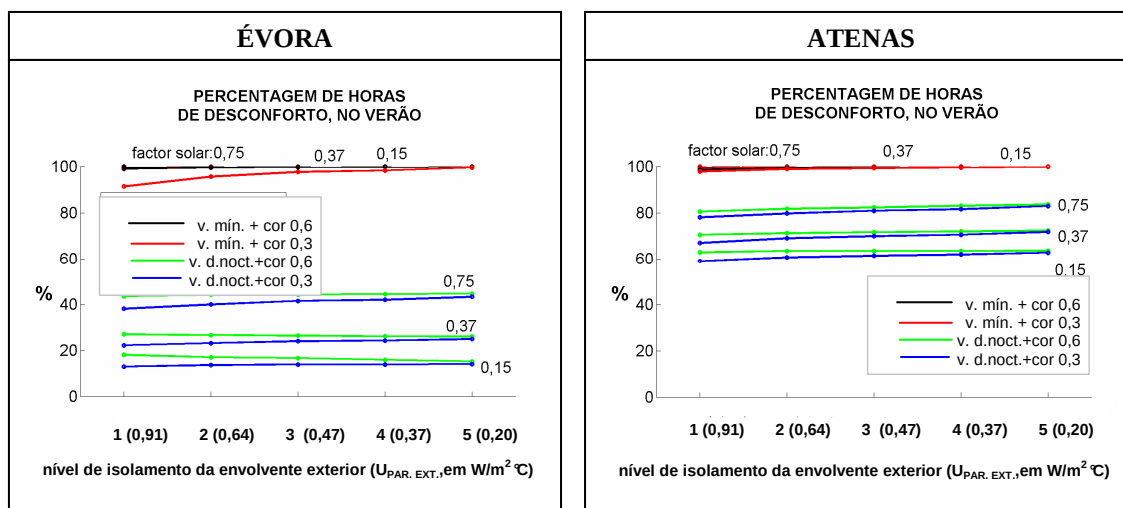


Figura 4.49 – Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora e Atenas, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente, cor das paredes exteriores e factores solares das janelas.

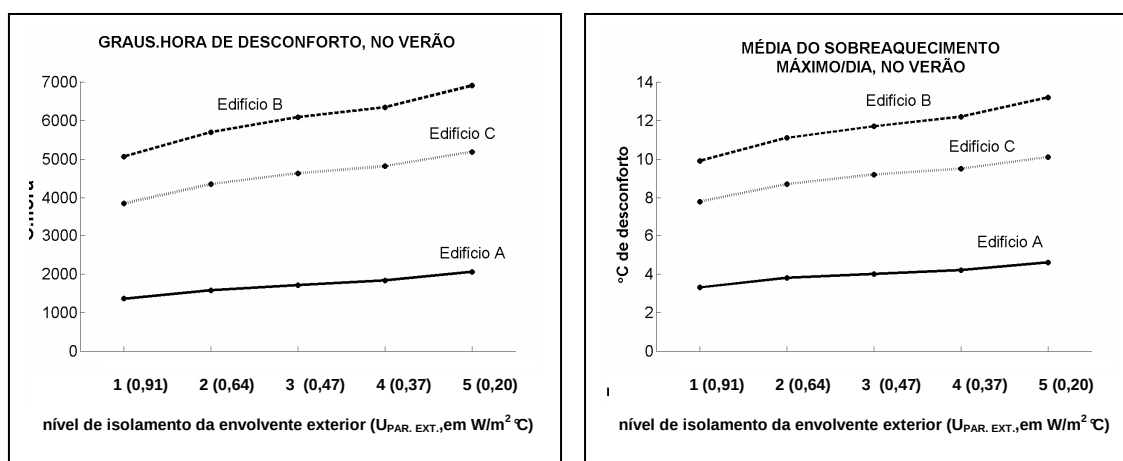


Figura 4.50 – Parâmetros de conforto para os edifícios A, B e C, utilizados como serviços (ganhos tipo 3), em Évora, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente, e factor solar das janelas de 0,75.

4.4.2 Análise das necessidades energéticas

Na figura 4.51 tem-se as necessidades energéticas anuais dos edifícios A e B, ambos com ganhos internos tipo 3, em Lisboa, com variados factores solares das janelas e níveis de isolamento.

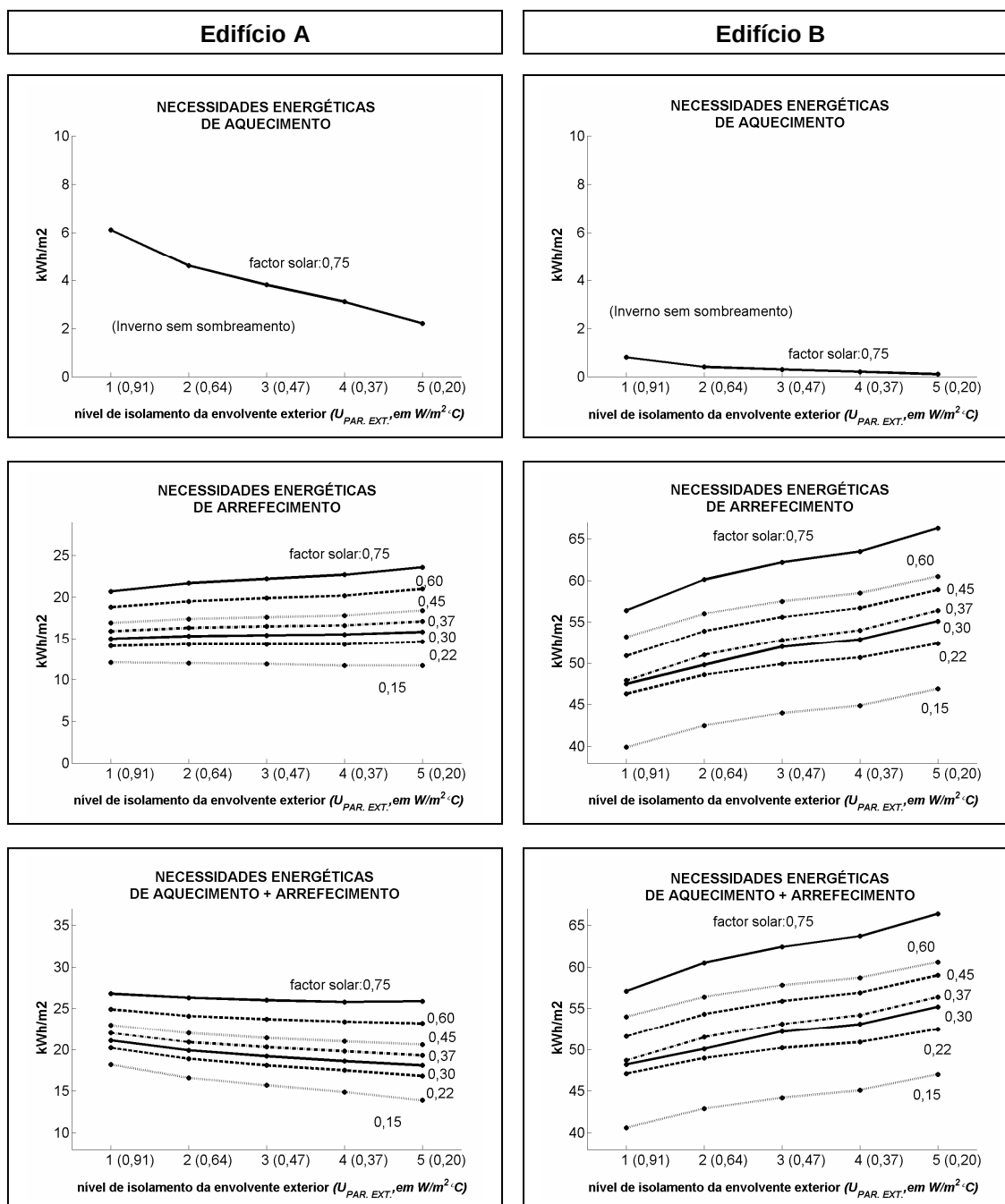


Figura 4.51 – Necessidades de energéticas para os edifícios A e B, utilizados como serviços (ganhos internos 3), em Lisboa.

Como nas simulações conduzidas o factor solar das janelas permaneceu sempre igual a 0,75 (sem sombreamento) no Inverno, as necessidades de aquecimento anuais são representadas através de uma única curva. Para ambos os edifícios, conforme esperado, as necessidades energéticas de aquecimento diminuem com o aumento do isolamento. No entanto, devido aos altos ganhos internos nesses edifícios, as necessidades de

aquecimento são muito baixas e bem menores que as de arrefecimento, conforme pode-se visualizar nos gráficos. Quanto às necessidades de arrefecimento, estas apresentam aumento com o acréscimo de isolamento. No edifício A, esse aumento ocorre quando os factores solares são mais altos, enquanto que no edifício B, ocorre em todas as situações. Isso vem de encontro ao observado na análise do conforto para esses casos.

Quando se observa as necessidades de aquecimento mais arrefecimento²⁴, encontra-se dois tipos distintos de comportamento, para todos os factores solares:

1. *Diminuição das necessidades de aquecimento + arrefecimento, com o aumento do isolamento.* Para o caso do edifício A, da mesma forma que o encontrado para a utilização habitacional (secção 4.3.2), o aumento das necessidades de arrefecimento não é suficiente para eliminar a economia no Inverno.
2. *Aumento das necessidades de aquecimento + arrefecimento, com o aumento do isolamento.* Para o caso do edifício B, o aumento das necessidades de arrefecimento é suficientemente alto para eliminar as poupanças de Inverno, mesmo para os factores solares mais baixos, retirando qualquer benefício que se pudesse ter com uma envolvente mais isolada.

Todas as restantes situações simuladas para a utilização de serviços apresentaram comportamentos iguais aos da figura 4.51, conforme indicado na tabela 4.12. Para os ganhos internos do tipo 2, em nenhum dos edifícios houve aumento das necessidades de aquecimento mais arrefecimento anuais (comportamento 1 acima referido). Já para os ganhos tipo 3, esse aumento ocorreu nos edifícios mais desconfortáveis, B e C. Nesses edifícios, devido aos seus altos ganhos, as necessidades de arrefecimento são muito maiores do que as de aquecimento, o que acaba por resultar no comportamento indicado. A soma das necessidades aumenta mesmo para o caso com maior sombreamento, embora esse aumento assuma, obviamente, valores mais baixos. Esse

²⁴ As necessidades de aquecimento e arrefecimento podem ser somadas directamente devido às razões explanadas no início da secção 4.3.2, que trata da análise das necessidades energéticas para a utilização habitacional.

aspecto correlaciona-se com a análise do conforto desses casos, onde houve sempre aumento do sobreaquecimento com o aumento do isolamento, mesmo para o factor solar de 0,15 (secção 4.4.1.3).

Tabela 4.12 – Tipos de resultados encontrados para todos os casos simulados para a utilização de serviços, com relação às necessidades energéticas

Ganhos tipo 2	Ganhos tipo 3
<i>Edifícios A, B e C</i> Porto, Lisboa, Évora ↓ <u>DIMINUIÇÃO</u> das necessidades de aquecimento + arrefecimento com o aumento do isolamento, para todos os factores solares	<i>Edifício A</i> Porto, Lisboa, Évora ↓ <u>DIMINUIÇÃO</u> das necessidades de aquecimento + arrefecimento com o aumento do isolamento, para todos os factores solares
	<i>Edifícios B e C</i> Porto, Lisboa, Évora, Atenas e Nice ↑ <u>AUMENTO</u> das necessidades de aquecimento + arrefecimento com o aumento do isolamento, para todos os factores solares

4.4.3 Considerações finais para a utilização como serviços

De forma resumida, foi observado o seguinte nos edifícios de serviços:

1. Esse tipo de edifício possui valores muito mais elevados de ganhos internos, se comparado com as habitações. Esses ganhos precisam ser cuidadosamente evitados, aliados à suficiente ventilação, de preferência durante o dia e à noite, para se evitar o desconforto excessivo.

2. Além do problema do desconforto, o aumento das necessidades energéticas devido ao arrefecimento, consoante a geometria e orientação do edifício, pode ser suficientemente alto para eliminar as poupanças energéticas de Inverno, ocasionando um aumento do consumo total anual, quando se aumenta o isolamento da envolvente, especialmente para edifícios com elevados ganhos internos.

4.5 Considerações finais sobre o capítulo

Nos estudos paramétricos realizados, foi possível investigar, nas mais variadas situações, o impacto do aumento do isolamento da envolvente e a sua interdependência com os outros parâmetros do edifício.

Nos *edifícios habitacionais*, foi verificada a importância de sempre se controlar os ganhos solares, no Verão, a fim de se reduzir o impacto negativo do aumento do isolamento da envolvente. Para este tipo de utilização, caso sejam garantidas adequadas condições para a ventilação natural, e seja tomado o devido cuidado na concepção desses edifícios, optando-se por adequada orientação em relação ao sol e controlo dos ganhos solares excessivos, durante o Verão (e ao mesmo tempo a garantia de adequada insolação, no Inverno), pode-se tirar partido dos benefícios de um elevado isolamento, durante o Inverno, sem que haja sobreaquecimento excessivo durante a estação mais quente.

Para os *edifícios de serviços*, a situação é bem distinta, pois além dos ganhos internos serem muito mais elevados, o período no qual eles ocorrem coincide com o dos ganhos solares máximos, o que acaba por agravar a situação. Em alguns casos, dependendo dos ganhos internos e solares, das taxas e do período de ventilação adoptados, e das características geométricas do próprio edifício, pode-se reduzir o desconforto a níveis mais aceitáveis, no Verão, sem que haja necessidade de ar condicionado. No entanto, muito cuidado deve ser tomado na prescrição de envolventes altamente isoladas para

estes casos, pois uma simples alteração na taxa de ganhos internos pode modificar o seu comportamento e criar um ambiente sobreaquecido. Envolventes com inércia fraca, mais comuns nos edifícios de serviços, apresentam maiores índices de desconforto e maior amplitude de temperatura.

Para esse tipo de utilização, é mais usual a adopção de ar condicionado. Quando os ganhos internos são altos e dependendo do tipo de edifício, as necessidades de arrefecimento assumem valores elevados, muitas vezes bem maiores que as de aquecimento, e o seu aumento devido ao acréscimo de isolamento, acaba por ser suficientemente alto para eliminar as poupanças de Inverno. Nesse tipo de situação, o aumento do isolamento não é recomendável, pois só tende a agravar o problema. Além disso, deve haver um controlo cuidadoso dos ganhos solares, no Verão, a fim de reduzir o consumo de arrefecimento e evitar um dispêndio de energia desnecessário.

A fim de se estipular exactamente em que situações ocorre sobreaquecimento devido ao aumento do isolamento, foi desenvolvido um modelo teórico simplificado, apresentado no próximo Capítulo, que leva em consideração a multiplicidade e a interdependência dos vários aspectos envolvidos.

Capítulo 5 Desenvolvimento do modelo simplificado de previsão de sobreaquecimento

Após a análise dos resultados dos estudos paramétricos apresentada no Capítulo anterior, foi desenvolvido um modelo simplificado que permite o cálculo da temperatura média do ar no interior de um edifício não condicionado artificialmente. Os objectivos do modelo, seu desenvolvimento e suas equações são apresentados na secção 5.1 (descrição geral). Na secção 5.2, as equações do modelo são aplicadas aos mesmos casos considerados nos estudos paramétricos, e seus resultados comparados com os obtidos através das simulações. Na secção 5.3, apresenta-se em detalhe como o modelo pode ser utilizado na prática, a fim de prever se há ou não o sobreaquecimento de um determinado edifício com o aumento do seu isolamento. Finalmente, as considerações finais sobre o Capítulo são apresentadas na secção 5.4.

5.1 Descrição geral

5.1.1 Objectivos

Nos resultados dos estudos paramétricos apresentados no Capítulo 4, pôde-se avaliar o impacto do aumento do isolamento da envolvente no desempenho dos edifícios, conjugado aos vários aspectos considerados (ventilação, sombreamento, entre outros). O panorama geral dos resultados encontrados para cada edifício indicou que os padrões encontrados nas situações analisadas podem ser descritos por meio de modelos analíticos simples, conforme já previsto em trabalhos anteriores [2]. Dessa forma,

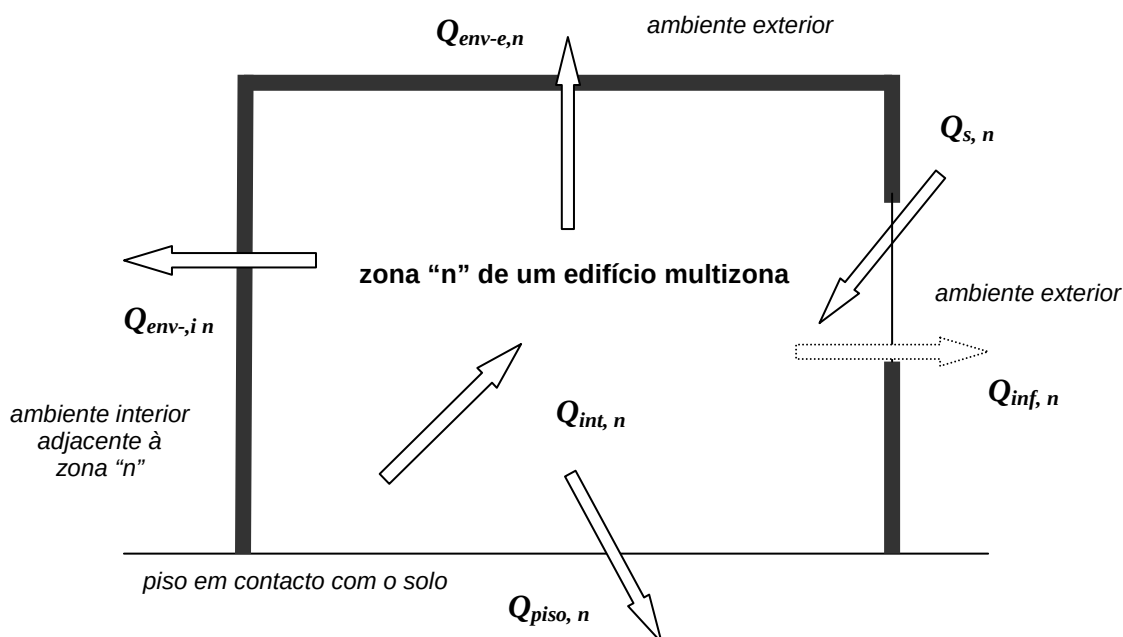
procedeu-se ao desenvolvimento de um modelo simplificado que procurasse atender aos seguintes objectivos:

- simplicidade de aplicação;
- possibilidade da consideração conjunta de todos os aspectos contemplados nos estudos paramétricos, de modo que os padrões de comportamento encontrados nos resultados pudessem ser adequadamente representados.

5.1.2 Descrição dos ganhos/perdas de calor de um edifício

A equação final do modelo desenvolvido neste trabalho permite a previsão da *temperatura média do ar* no interior do edifício multizona, durante um determinado período de tempo suficientemente longo e significativo. A equação base a partir da qual o modelo foi desenvolvido considera os ganhos e as perdas de calor que ocorrem no edifício não condicionado artificialmente. Considerando-se uma determinada zona “n” de um edifício, esses ganhos/perdas podem ser representados conforme indicado na figura 5.1. Dado que o espaço de tempo é suficientemente longo, e não havendo perdas de energia armazenada no edifício entre o início e o fim desse período, a energia trocada através da envolvente pode ser calculada como se, durante esse período, ela se processasse em regime permanente, com as condições médias interiores e exteriores constantes ao longo de todo o período.

Cada um desses ganhos/perdas de calor apresentados na figura 5.1, referentes a um determinado intervalo de tempo ΔT , podem ser descritos através das equações 5.1 a 5.10, as quais são apresentadas na sequência.



$Q_{s,n}$: ganhos solares através dos envidraçados. Correspondem à quantidade de energia solar que entra na zona do edifício através dos envidraçados, tanto por transmissão directa quanto por absorção nessas superfícies.

$Q_{int,n}$: ganhos internos, devido aos ocupantes, iluminação artificial e equipamentos.

$Q_{inf,n}$: ganhos/perdas de calor devido à renovação do ar. Quando a temperatura do ar exterior é menor que a do ar interior, há perda de calor. Caso contrário, há ganho.

$Q_{env-e,n}$: ganhos/perdas de calor pela envolvente exterior. Corresponde à energia que é transmitida entre o espaço interior da zona "n" e o ambiente exterior, através de toda a envolvente exterior do edifício. As trocas de calor ocorrem através de condução de uma face à outra da envolvente e de convecção e radiação nas suas superfícies.

$Q_{env-i,n}$: ganhos/perdas de calor pela envolvente interior. Corresponde à energia que é transmitida entre o espaço interior da zona "n" e outros ambientes interiores adjacentes à ele. Esses ambientes podem ser outras zonas do mesmo edifício ou zonas interiores de outros edifícios adjacentes ao edifício em questão. Nesse caso, as trocas de calor também ocorrem através de condução de uma face à outra da envolvente e de convecção e radiação nas suas superfícies.

$Q_{piso,n}$: perdas de calor pelo piso, quando este encontra-se em contacto com o solo. Essas perdas ocorrem por convecção e radiação na superfície do piso e por condução ao solo.

Figura 5.1 - Ganhos/perdas de calor em cada zona de um determinado edifício multizona não condicionado artificialmente.

$Q_{s,n}$ ganhos solares pelos envidraçados da zona “n”

$$Q_{s,n} = \sum_{j=1}^{jan} (A_{vidro,j} \cdot F_{s,j} \cdot I_j) \quad (\text{Wh}) \quad (5.1)$$

Onde:

jan	índice relativo às janelas em contacto com o exterior, na zona “n”
A_{vidro}	área útil de envidraçado (ou seja, área da janela, sendo descontada a área de caixilho) (m^2)
F_s	factor solar da janela (considerando o vidro mais dispositivo de sombreamento)
I	radiação solar total incidente numa determinada superfície, no intervalo de tempo ΔT (Wh/m^2)

$Q_{int,n}$ ganhos internos da zona “n”

$$Q_{int,n} = \sum_{j=1}^{elementos} (q_{int,j} \cdot \Delta t_{int,j}) \quad (\text{Wh}) \quad (5.2)$$

Onde:

$elementos$	índice relativo a todos os elementos da zona em questão (pessoas, equipamentos ou iluminação)
q_{int}	fluxo de calor médio devido a um determinado elemento (pessoas, equipamentos ou iluminação) durante o intervalo de tempo Δt (W)
Δt_{int}	período de duração / permanência de um determinado elemento (pessoas, equipamentos ou iluminação) na zona “n”, durante o intervalo de tempo ΔT (h)

$Q_{inf,n}$ ganhos/perdas por infiltração de ar na zona “n”

$$Q_{inf,n} = 0,34 \cdot R_{ph,n} \cdot V_n (t_{em} - t_{im,n}) \cdot \Delta T \quad (\text{Wh}) \quad (5.3)$$

Onde:

$R_{ph,n}$	número médio de renovações de ar por hora da zona “n”, no intervalo de tempo ΔT
V_n	volume da zona “n” (m^3)
t_{em}	temperatura média do ar exterior durante o intervalo de tempo ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
$t_{im,n}$	temperatura média do ar da zona “n” durante o intervalo de tempo ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT	intervalo de tempo (h)

 $Q_{env-e,n}$ ganhos/perdas pela envolvente exterior da zona “n”

Os ganhos/perdas pela envolvente exterior da zona “n” são compostos de duas parcelas:

$Q_{env-e,n}^{term}$, referente aos ganhos/perdas devido à diferença de temperatura, e $Q_{env-e,n}^{solar}$, referente aos ganhos solares pela envolvente opaca.

$$Q_{env-e,n} = Q_{env-e,n}^{term} + Q_{env-e,n}^{solar} \quad (\text{Wh}) \quad (5.4)$$

Cada uma dessas parcelas é descrita da seguinte forma:

$$Q_{env-e,n}^{term} = (t_{em} - t_{im,n}) \cdot \Delta T \cdot \left(\sum_{j=1}^{(jan+op)} (U_j \cdot A_j) \right) \quad (\text{Wh}) \quad (5.5)$$

$$Q_{env-e,n}^{solar} = \sum_{j=1}^{op} \left(U_j \cdot A_j \cdot \frac{\alpha_j \cdot I_j}{h_e} \right) \quad (\text{Wh}) \quad (5.6)$$

Onde:

jan	índice relativo às janelas em contacto com o exterior, na zona “n”
op	índice relativo às paredes e cobertura em contacto com o ambiente exterior, na zona “n”
t_{em}	temperatura média do ar exterior durante o intervalo de tempo ΔT (°C)
$t_{im,n}$	temperatura média do ar na zona “n” durante o intervalo de tempo ΔT (°C)
U	coeficiente global de transferência de calor (W/m ² °C)
A	área (m ²)
α	coeficiente de absorção da radiação solar
I	radiação solar total incidente numa determinada superfície, durante o intervalo de tempo ΔT (Wh/m ²)
h_e	coeficiente de transferência de calor por radiação e convecção na superfície exterior (W/m ² °C)

A demonstração da obtenção da equação 5.6 pode ser encontrada no Anexo M.

$Q_{env-i,n}$ ganhos/perdas pela envolvente interior da zona “n”

Os ganhos/perdas pela envolvente interior da zona “n” são compostos de duas parcelas:

$Q_{env-i,n}^{zon}$, referente aos ganhos/perdas devido às trocas de calor com outras zonas do edifício, e $Q_{env-i,n}^{edif}$, referente aos ganhos/perdas devido às trocas com zonas interiores de outros edifícios, adjacentes ao edifício em questão.

$$Q_{env-i,n} = Q_{env-i,n}^{zon} + Q_{env-i,n}^{edif} \quad (\text{Wh}) \quad (5.7)$$

Cada uma dessas parcelas é descrita da seguinte forma:

$$Q_{env-i,n}^{zon} = \sum_{j=1}^{zon} (U_j \cdot A_j \cdot (t_{im,j} - t_{im,n}) \cdot \Delta T) \quad (\text{Wh}) \quad (5.8)$$

$$Q_{env-i,n}^{edif} = \sum_{j=1}^{edif} (U_j \cdot A_j \cdot (t_{im,j} - t_{im,n}) \cdot \Delta T) \quad (\text{Wh}) \quad (5.9)$$

Onde:

zon	índice relativo às paredes e tecto da zona “n” em contacto com outras zonas do mesmo edifício
$edif$	índice relativo às paredes e tecto da zona “n” em contacto com zonas interiores de outros edifícios adjacentes ao edifício em questão
U	coeficiente global de transferência de calor ($\text{W/m}^2\text{°C}$)
A	área (m^2)
$t_{im,j}$	temperatura média do ar na zona “j” durante o intervalo de tempo ΔT (°C)
$t_{im,n}$	temperatura média do ar na zona “n” durante o intervalo de tempo ΔT (°C)

$Q_{piso,n}$ perdas pelo piso da zona “n”

$$Q_{piso,n} = U_{piso,n} \cdot A_{piso,n} \cdot (t_{sm} - t_{im,n}) \cdot \Delta T \quad (\text{Wh}) \quad (5.10)$$

Onde:

$U_{piso,n}$	coeficiente global de transferência de calor do piso em contacto com o solo na zona “n” ($\text{W/m}^2\text{°C}$)
$A_{piso,n}$	área do piso em contacto com o solo na zona “n” (m^2)
t_{sm}	temperatura média da superfície do solo em contacto com o piso durante o intervalo de tempo ΔT (°C)
$t_{im,n}$	temperatura média do ar na zona “n”, durante o intervalo de tempo ΔT (°C)
ΔT	intervalo de tempo (h)

Para quantificar as perdas que ocorrem em paredes em contacto com o solo, o RCCTE e muitos outros regulamentos utilizam um modelo do seguinte tipo [7]:

$$L_{pe} = \sum \psi_j \cdot B_j \quad (\text{W/}^\circ\text{C}) \quad (5.11)$$

Onde:

L_{pe}	perdas unitárias de calor (por grau centígrado de diferença de temperatura entre os ambientes interior e exterior) através dos elementos de construção em contacto com o terreno
ψ_j	coeficiente de transmissão térmica linear, tabelado para várias geometrias típicas ou calculados segundo metodologia específica (W/m $^\circ$ C)
B_j	perímetro do pavimento ou o desenvolvimento da parede, medido pelo interior (m)

Neste caso, contudo, utilizou-se a equação 5.10, pois esta era a que mais se aproximava do modelo de perdas através do solo disponível no programa TRNSYS. Nesse programa, para se especificar o piso em contacto com o solo, considera-se uma superfície em contacto directo com um “ambiente exterior” (no caso, o solo), o qual possui uma temperatura específica (neste caso, a temperatura do solo, obtida em [93], para cada localidade em questão).

5.1.3 Equações do modelo

Tendo-se em conta os ganhos/perdas referentes à cada zona de um determinado edifício, descritos na secção anterior, pode-se admitir que, ao se considerar um intervalo de tempo suficientemente longo, há equilíbrio entre esses ganhos/perdas, conforme descrito na equação abaixo:

$$Q_{s,n} + Q_{\text{int},n} + Q_{\text{inf},n} + Q_{\text{env-e},n}^{\text{term}} + Q_{\text{env-e},n}^{\text{solar}} + Q_{\text{env-i},n}^{\text{zon}} + Q_{\text{env-i},n}^{\text{edif}} + Q_{\text{piso},n} = 0 \quad (\text{Wh}) \quad (5.12)$$

As equações para o cálculo de todas essas parcelas foram descritas na secção anterior. Substituindo-se as equações referentes a $Q_{inf,n}$ (5.3), $Q_{env-e,n}^{term}$ (5.5), e $Q_{piso,n}$ (5.10) na equação 5.12, tem-se:

$$Q_{s,n} + Q_{int,n} + 0,34 \cdot R_{ph,n} \cdot V_n (t_{em} - t_{im,n}) \cdot \Delta T + (t_{em} - t_{im,n}) \cdot \Delta T \cdot \left(\sum_{j=1}^{(jan+op)} (U_j \cdot A_j) \right) +$$

$$Q_{env-e,n}^{solar} + Q_{env-i,n}^{zon} + Q_{env-i,n}^{edif} + U_{piso,n} \cdot A_{piso,n} \cdot (t_{sm} - t_{im,n}) \cdot \Delta T = 0$$

(Wh) (5.13)

A equação 5.13, referente à zona “n”, pode ser desenvolvida e representada da seguinte forma:

$$(K_n + L_n + M_n) \cdot t_{im,n} \cdot \Delta T =$$

$$Q_{s,n} + Q_{int,n} + Q_{env-e,n}^{solar} + (K_n + L_n) \cdot t_{em} \cdot \Delta T + M_n \cdot t_{sm} \cdot \Delta T + Q_{env-i,n}^{zon} + Q_{env-i,n}^{edif}$$

(Wh) (5.14)

Onde:

$$K_n = 0,34 \cdot R_{ph,n} \cdot V_n \quad (W/^{\circ}C) \quad (5.15)$$

$$L_n = \sum_{j=1}^{jan+op} (U_j \cdot A_j) \quad (W/^{\circ}C) \quad (5.16)$$

$$M_n = U_{piso,n} \cdot A_{piso,n} \quad (W/^{\circ}C) \quad (5.17)$$

Para um edifício multizona, com uma quantidade total de “z” zonas, obtém-se “z” equações iguais à 5.14, cada uma correspondente a uma das zonas do edifício. Efectuando-se a soma de todas essas “z” equações, tem-se:

$$\begin{aligned} \Delta T \cdot \sum_{n=1}^z ((K_n + L_n + M_n) \cdot t_{im,n}) = \\ \sum_{n=1}^z (Q_{s,n} + Q_{int,n} + Q_{env-e,n}^{solar}) + t_{em} \cdot \Delta T \cdot \sum_{n=1}^z (K_n + L_n) + \\ t_{sm} \cdot \Delta T \cdot \sum_{n=1}^z M_n + \sum_{n=1}^z Q_{env-i,n}^{zon} + \sum_{n=1}^z Q_{env-i,n}^{edif} \end{aligned} \quad (Wh) \quad (5.18)$$

Na equação acima, a parcela $\sum_{n=1}^z Q_{env-i,n}^{zon}$ é igual à zero, pois no edifício multizona estes ganhos/perdas de calor anulam-se. Substituindo-se essa parcela por zero, considerando-se as expressões anteriores, 5.1, 5.2 e 5.6, e desenvolvendo-se a equação, obtêm-se as seguintes expressões finais, através das quais é possível obter-se a *temperatura média ponderada do ar no interior de um determinado edifício*, t_{im-p} , durante o intervalo de tempo ΔT :

$$t_{im-p} = \frac{Q_s + Q_{int} + Q_{env-e}^{solar} + Q_{env-i}^{edif}}{\Delta T \cdot (K + L + M)} + \frac{t_{em} \cdot (K + L) + t_{sm} \cdot M}{(K + L + M)} \quad (^\circ C) \quad (5.19)$$

Onde:

$$K = \sum_{n=1}^z K_n = \sum_{n=1}^z (0,34 \cdot R_{ph,n} \cdot V_n) \quad (W/^\circ C) \quad (5.20)$$

$$L = \sum_{n=1}^z L_n = \sum_{n=1}^z \left(\sum_{j=1}^{(jan+op)} (U_j \cdot A_j) \right) \quad (W/^\circ C) \quad (5.21)$$

$$M = \sum_{n=1}^z M_n = \sum_{n=1}^z (U_{\text{piso},n} \cdot A_{\text{piso},n}) \quad (\text{W/}^\circ\text{C}) \quad (5.22)$$

$$Q_s = \sum_{n=1}^z Q_{s,n} = \sum_{n=1}^z \left(\sum_{j=1}^{\text{jan}} (A_{\text{vidro},j} \cdot F_{s,j} \cdot I_j) \right) \quad (\text{Wh}) \quad (5.23)$$

$$Q_{\text{int}} = \sum_{n=1}^z Q_{\text{int},n} = \sum_{n=1}^z \left(\sum_{j=1}^{\text{elementos}} (q_{\text{int},j} \cdot \Delta t_{\text{int},j}) \right) \quad (\text{Wh}) \quad (5.24)$$

$$Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}} = \sum_{n=1}^z \left(\sum_{j=1}^{\text{op}} \left(U_j \cdot A_j \cdot \frac{\alpha_j \cdot I_j}{h_e} \right) \right) \quad (\text{Wh}) \quad (5.25)$$

$$Q_{\text{env-i}}^{\text{edif}} = \sum_{n=1}^z Q_{\text{env-i},n}^{\text{edif}} \quad (\text{Wh}) \quad (5.26)$$

A $t_{\text{im-p}}$ corresponde à temperatura média ponderada, no intervalo ΔT , da temperatura média do ar entre todas as zonas do edifício. O factor de ponderação corresponde à somatória $K+L+M$, cujas parcelas são expressas pelas equações 5.20 a 5.22.

$$t_{\text{im-p}} = \frac{\sum_{n=1}^z ((K_n + L_n + M_n) \cdot t_{\text{im},n})}{\sum_{n=1}^z (K_n + L_n + M_n)} \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.27)$$

Dessa forma, através das expressões 5.19 a 5.26, é possível encontrar a temperatura média ponderada no interior de um determinado edifício multizona, não condicionado artificialmente.

5.2 Aplicação do modelo

Utilizando-se as equações do modelo desenvolvido (5.19 a 5.26), foi calculada a temperatura média ponderada, t_{im-p} , para variados casos de edifícios multizona que haviam sido simulados nos estudos paramétricos, cujas características são descritas na secção 5.2.1. Os valores de temperatura obtidos pela aplicação do modelo simplificado foram comparados com os valores mais precisos obtidos através da simulação pelo TRNSYS. Os resultados das comparações são apresentados na secção 5.2.2.

5.2.1 Características dos casos seleccionados

Os estudos paramétricos considerados neste trabalho totalizaram 6180 casos, correspondentes a três modelos de edifícios, conjugados a um número significativo de combinações dos parâmetros variados, conforme a descrição detalhada dos dados de entrada, apresentada no Capítulo 3. O modelo proposto foi aplicado numa parcela representativa desses casos (780, ao todo), conforme indicado na tabela 5.1. Procurou-se considerar toda a gama de situações estudadas, englobando tanto as situações extremas quanto alguns pontos intermédios. Foram consideradas variações representativas dos principais padrões de comportamento anteriormente analisados (alterações nos ganhos internos x factor solar x ventilação x clima x nível de isolamento, para os três edifícios).

Dessa forma, as equações do modelo (equações 5.19 a 5.26, descritas na secção 5.1.3) foram aplicadas a todos os casos da tabela 5.1. Os valores adoptados para cada uma das variáveis pertencentes a essas equações são indicados nas tabelas 5.2 e 5.3. Esses valores correspondem aos mesmos das simulações através do TRNSYS. Como foram considerados intervalos de tempo ΔT mensais, obteve-se as t_{im-p} correspondentes a todos os meses do ano, para os 780 casos analisados, ou seja, 9360 (12 x 780) valores.

Tabela 5.1 – Casos de edifícios multizona seleccionados para aplicação do modelo

<i>Edifício A</i>
2 padrões de ganhos internos: habitação (padrão 1) e serviços (padrão 3)
2 possibilidades de ventilação: ventilação mínima e ventilação diurna + nocturna
3 factores solares das janelas: 0,75, 0,37 e 0,15
3 climas: Porto, Lisboa e Évora
5 níveis de isolamento da envolvente
TOTAL: 1 edifício x 2 x 2 x 3 x 3 x 5 = 180 casos
<i>Edifícios B e C</i>
2 padrões de ganhos internos: habitação (padrão 1) e serviços (padrão 3)
2 possibilidades de ventilação: ventilação mínima e ventilação diurna + nocturna
3 factores solares das janelas: 0,75, 0,37 e 0,15
5 climas: Porto, Lisboa, Évora, Nice e Atenas
5 níveis de isolamento da envolvente
TOTAL: 2 edifícios x 2 x 2 x 3 x 5 x 5 = 600 casos

Tabela 5.2 - Valores adoptados para as variáveis pertencentes às equações do modelo (equações 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24)

K, L e M (W/°C), equações 5.20, 5.21 e 5.22	
$R_{ph,n}$	Para os casos com ventilação mínima, corresponde ao número de renovações de ar por hora na zona “n”, indicado na tabela 3.10. Para os casos com ventilação diurna + nocturna, foi encontrado o número de renovações de ar por hora médio mensal, específico para cada caso
$V_n (m^3)$	Volume da zona “n” (Anexo C)
U_j (W/m ² °C)	Coeficiente global de transferência de calor da parede, cobertura ou janela “j” (os valores exactamente utilizados nas simulações pelo TRNSYS são indicados no Anexo D)
$A_j (m^2)$	Área da parede, cobertura ou janela “j” (Anexo C)
U_{piso} (W/m ² °C)	Coeficiente global de transferência de calor do piso (o valor exactamente utilizado nas simulações pelo TRNSYS é indicado no Anexo D)
A_{piso} (m ²)	Área útil de piso do edifício em questão (figura 3.1)
Q_s ganhos solares pelos envidraçados (Wh), equação 5.23	
$A_{vidro,j}$ (m ²)	Área da janela “j”, com exclusão da área de caixilhos = 0,85 x área da janela “j”, indicada no Anexo C (ver também tabela 3.6)
$F_{s,j}$	Factor solar do vidro + dispositivo de sombreamento (Anexo E)
I_j (Wh/m ²)	Radiação solar total incidente na janela “j”, durante o intervalo de tempo ΔT . Variável de acordo com o clima e a orientação da janela em relação ao sol. Retirada do TRNSYS, que calcula a radiação incidente em cada orientação a partir dos dados climáticos fornecidos.
Q_{int} ganhos internos (Wh), equação 5.24	
$q_{int,j}$ (W)	Fluxo de calor médio devido ao elemento “j”, na zona “n” (figuras 3.8 e 3.9)
$\Delta t_{int,j}$ (h)	Período de duração /permanência total mensal do elemento “j” na zona “n” (figuras 3.8 e 3.9)

Tabela 5.3 - Valores adoptados para as variáveis
pertencentes às equações do modelo (equações 5.25, 5.26 e 5.19)

Q_{env-e}^{solar}	ganhos solares pela envolvente exterior opaca (Wh), equação 5.25
U_j (W/m ² °C)	Coeficiente global de transferência de calor da parede ou cobertura “j” (os valores exactamente utilizados nas simulações pelo TRNSYS são indicados no Anexo D)
A_j (m ²)	Área da parede ou cobertura “j” (Anexo C)
α_j	Coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior da parede ou cobertura “j” (tabela 3.5)
h_e (W/m ² °C)	Coeficiente de transferência de calor por radiação e convecção na superfície exterior da parede ou cobertura “j” (Anexo D)
I_j (Wh/m ²)	Radiação solar total incidente na parede ou cobertura “j”, durante o intervalo de tempo ΔT . Variável de acordo com o clima e a orientação da parede ou cobertura em relação ao sol. Retirada do TRNSYS, que calcula a radiação incidente em cada orientação a partir dos dados climáticos fornecidos.
Q_{env-i}^{edif}	ganhos/perdas pela envolvente interior adjacente a outro edifício (Wh), (equação 5.26)
$Q_{env-i,n}^{edif}$ (Wh)	Igual a zero, pois assumiu-se nas simulações que a temperatura do ar das zonas de outros edifícios adjacentes é idêntica à temperatura do ar da zona em questão.
t_{im-p}	temperatura média interior ponderada (°C) , equação 5.19
ΔT (h)	Número de horas do mês em questão
t_{em} (°C)	Temperatura média mensal do ar exterior, para o clima considerado (tabelas 3.13 e 3.14)
t_{sm} (°C)	Temperatura média mensal do solo, para o clima considerado (Anexo F)

5.2.2 Resultados

As figuras 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam todos os resultados encontrados para os edifícios A, B e C, respectivamente. No eixo das abcissas tem-se representada a diferença entre as temperaturas médias mensais do ar interior e exterior ($t_{im-p}-t_{em}$), utilizando-se os valores de t_{im-p} calculados através do modelo simplificado (equações 5.19 a 5.26)²⁵. No eixo das ordenadas tem-se esse mesmo parâmetro calculado a partir dos valores t_{im-p} simulados detalhadamente com o TRNSYS para as mesmas situações. Cada ponto corresponde a um mês do ano, para cada um dos casos considerados (300 casos para os edifícios A e B e 180, para o C). A recta correspondente a $(t_{im-p}-t_{em})_{calculada} = (t_{im-p}-t_{em})_{simulada}$ também é representada no gráfico. Os pontos mais próximos da recta são os que indicam menor diferença entre os resultados calculados e simulados.

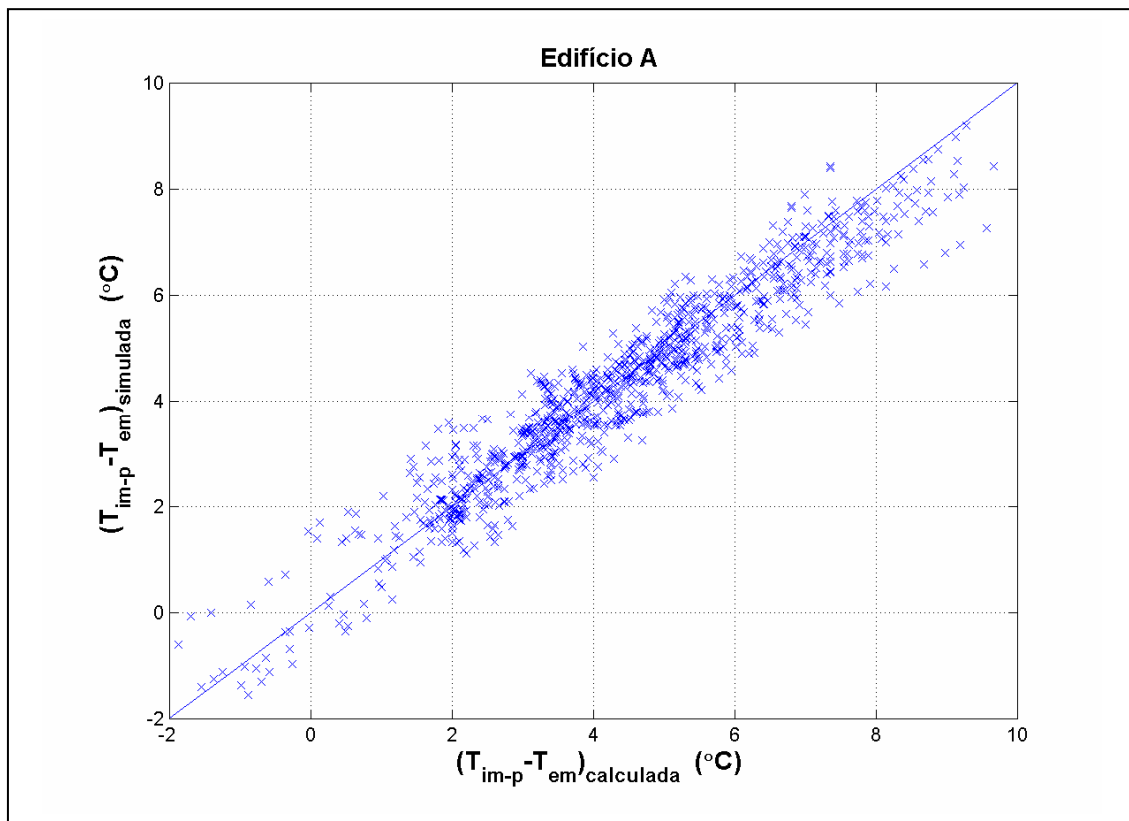


Figura 5.2 – $(t_{im-p}-t_{em})$ calculadas e simuladas, para todos os 180 casos considerados para o edifício A

²⁵ Para todos os casos nos quais o modelo foi aplicado, a temperatura média ponderada, t_{im-p} , da temperatura média do ar de todas as zonas do edifício, é muito próxima à temperatura média aritmética.

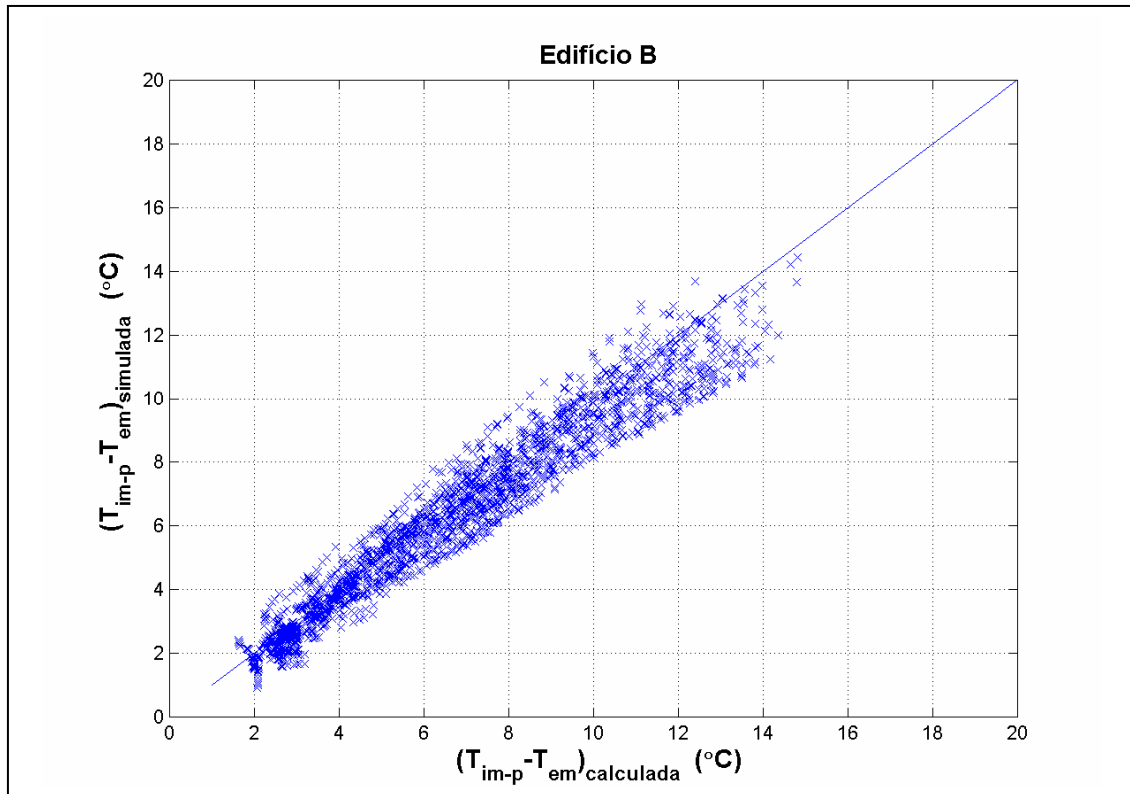


Figura 5.3 – $(t_{im-p} - t_{em})$ calculadas e simuladas, para todos os 300 casos considerados para o edifício B

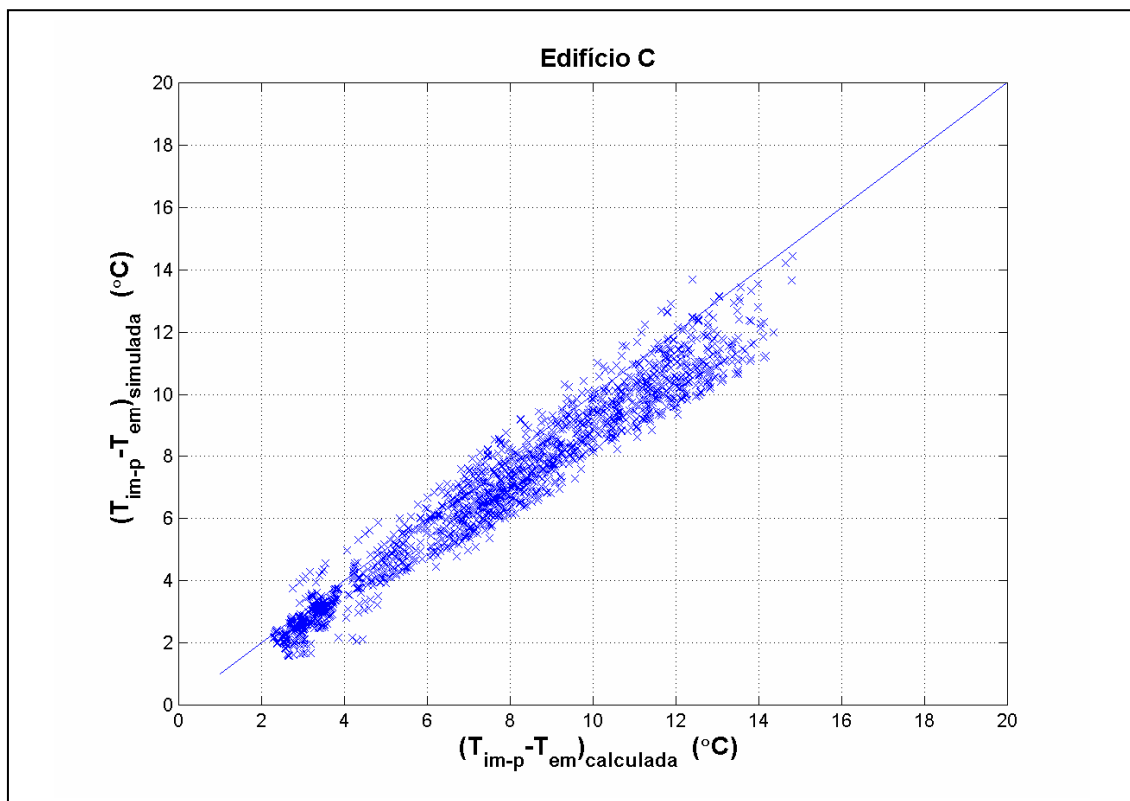


Figura 5.4 – $(t_{im-p} - t_{em})$ calculadas e simuladas, para todos os 300 casos considerados para o edifício C

Nota-se que os resultados com a aplicação do modelo apresentam razoável conformidade com os obtidos através das simulações, tendo-se em conta a sua simplicidade e as hipóteses admitidas. Os pontos distribuem-se sempre ao longo da recta correspondente ao erro igual a zero, indicando que as temperaturas calculadas tendem a estarem sempre próximas às simuladas e que portanto o modelo simplificado é capaz de confirmar as tendências de comportamento encontradas. O erro máximo na estimativa da temperatura média mensal é de 2,8 °C e o erro médio é de 1,2 °C.

Como o enfoque do trabalho é o Verão, visto o sobreaquecimento ser evidenciado nesse período, a tabela 5.4 apresenta a diferença absoluta entre as temperaturas médias calculada e simulada, para os meses de Julho, Agosto e Setembro, para alguns dos casos estudados.

Tabela 5.4 - Diferenças entre as temperaturas médias interiores ponderadas (t_{im-p}) calculadas e simuladas (°C)

$(t_{im-p})_{calculada} - (t_{im-p})_{simulada}$ para o edifício A ⁽¹⁾								
ventilação	mínima				diurna e nocturna			
ganhos internos	moradia (ganhos 1)		serviços (ganhos 3)		moradia (ganhos 1)		serviços (ganhos 3)	
nível de isolamento	1	5	1	5	1	5	1	5
Julho	+0,6	+1,0	+0,6	+1,1	+0,6	-0,3	+0,5	-0,3
Agosto	+0,8	+0,7	+0,8	+0,5	+0,3	+0,5	-0,8	+0,2
Setembro	+0,3	+0,4	+0,2	+0,3	0,0	-0,9	+0,2	+1,2
$(t_{im-p})_{calculada} - (t_{im-p})_{simulada}$ para o edifício B ⁽¹⁾								
Julho	+0,2	+0,1	+0,6	+0,9	-0,3	-0,4	+0,2	+0,7
Agosto	+0,1	+0,4	+1,0	+0,2	-0,1	-0,2	0,0	-0,2
Setembro	0,0	-0,4	+0,1	0,0	-0,3	-0,5	-0,4	+0,3
$(t_{im-p})_{calculada} - (t_{im-p})_{simulada}$ para o edifício C ⁽¹⁾								
Julho	+0,3	+0,2	+0,1	-0,1	+0,3	-0,2	-0,3	-0,1
Agosto	+0,6	+0,4	+0,5	+0,3	+0,2	-0,4	+0,5	+0,6
Setembro	0,0	-0,3	-0,5	-1,0	+0,4	+0,2	+0,5	-0,7

⁽¹⁾ Edifícios em Évora, com factor solar das janelas igual a 0,15.

5.3 Aplicação prática e previsão do sobreaquecimento de um edifício através do modelo

5.3.1 Aplicação prática do modelo

A fim de melhor demonstrar como o modelo pode ser facilmente utilizado na prática, nesta secção descreve-se de forma mais detalhada os resultados encontrados para alguns dos casos nos quais o mesmo havia sido aplicado, na secção 5.2. Como exemplos, tem-se os edifícios A, B e C, utilizados como habitação, em Évora, com ventilação mínima, cada um deles com as seguintes combinações:

- *Combinação 1:* nível 1 de isolamento da envolvente e factor solar das janelas igual a 0,75.
- *Combinação 2:* nível 5 de isolamento da envolvente e factor solar das janelas igual a 0,75.
- *Combinação 3:* nível 1 de isolamento da envolvente e factor solar das janelas igual a 0,15.
- *Combinação 4:* nível 5 de isolamento da envolvente e factor solar das janelas igual a 0,15.

Para todos esses exemplos foi encontrada a temperatura média interior ponderada (t_{im-p}) no mês mais quente do ano para o clima em questão (no caso de Évora, o mês de Agosto), através das equações 5.19 a 5.26. Nas tabelas 5.5 a 5.16 tem-se apresentadas todas as variáveis dessas equações do modelo, bem como o seu resultado final (t_{im-p}), para cada um dos casos. As tabelas 5.5 a 5.8 referem-se ao edifício A, as 5.9 a 5.12 ao edifício B, e as 5.13 a 5.16, ao edifício C.

Tabela 5.5 – Aplicação do modelo para o edifício A (combinação 1)

orient.	$A_{jan} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{vidro} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	$Q_s \text{ (kWh)}$	Q_{env-e}^{solar}
norte	7,80	6,63	30,39	82,58	410,63	41,11
sul	6,82	5,80	31,38	111,75	485,86	57,44
leste	1,87	1,59	25,40	76,72	91,46	31,92
oeste	0,64	0,54	25,81	267,36	109,08	113,03
cobert.	---	---	132,68	186,86	---	357,01
total	17,13				1097,03	600,51
		$q_{int} \text{ (W)}$	$\Delta t_{int} \text{ (h)}$	$Q_{int} \text{ (kWh)}$		
		260,79	744,00	194,03		
F_s	$A_{op} \text{ (paredes)}$ $\text{(m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (cobert.)}$ $\text{(m}^2\text{)}$	U_{jan} $\text{(W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (paredes)}$ $\text{(W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (cobert.)}$ $\text{(W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C)}$	U_{piso} $\text{(W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C)}$
0,75	112,98	132,68	7,41	0,91	0,80	0,57
α	$1/h_e \text{ (m}^2\text{K/W)}$		$A_{piso} \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta T \text{ (h)}$	R_{ph}	$V \text{ (m}^3\text{)}$
0,60	0,03		132,68	744,00	0,60	358,25
	$K \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$L \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$M \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$t_{sm} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{em} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{im-p} \text{ (}^\circ\text{C)}$
	73,08	335,89	75,63	22,2	23,2	28,3

Tabela 5.6 – Aplicação do modelo para o edifício A (combinação 2)

orient.	$A_{jan} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{vidro} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	$Q_s \text{ (kWh)}$	Q_{env-e}^{solar}
norte	7,80	6,63	30,39	82,58	410,63	9,03
sul	6,82	5,80	31,38	111,75	485,86	12,62
leste	1,87	1,59	25,40	76,72	91,46	7,02
oeste	0,64	0,54	25,81	267,36	109,08	24,84
cobert.	---	---	132,68	186,86	---	62,48
total	17,13				1097,03	115,99
		$q_{int} \text{ (W)}$	$\Delta t_{int} \text{ (h)}$	$Q_{int} \text{ (kWh)}$		
		260,79	744,00	194,03		
F_s	$A_{op} \text{ (paredes)} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (m}^2\text{)}$	$U_{jan} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (paredes)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{piso} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$
0,75	112,98	132,68	7,41	0,20	0,14	0,57
α	$1/h_e \text{ (m}^2\text{K/W)}$		$A_{piso} \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta T \text{ (h)}$	R_{ph}	$V \text{ (m}^3\text{)}$
0,60	0,03		132,68	744,00	0,60	358,25
	$K \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$L \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$M \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$t_{sm} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{em} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{im-p} \text{ (}^\circ\text{C)}$
	73,08	168,10	75,63	22,2	23,2	28,9

Tabela 5.7 - Aplicação do modelo para o edifício A (combinação 3)

orient.	$A_{jan} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{vidro} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	$Q_s \text{ (kWh)}$	Q_{env-e}^{solar}
<i>norte</i>	7,80	6,63	30,39	82,58	82,13	41,11
<i>sul</i>	6,82	5,80	31,38	111,75	97,17	57,44
<i>leste</i>	1,87	1,59	25,40	76,72	18,29	31,92
<i>oeste</i>	0,64	0,54	25,81	267,36	21,82	113,03
<i>cobert.</i>	---	---	132,68	186,86	---	357,01
<i>total</i>	17,13				219,41	600,51
		$q_{int} \text{ (W)}$	$\Delta t_{int} \text{ (h)}$	$Q_{int} \text{ (kWh)}$		
		260,79	744,00	194,03		
F_s	$A_{op} \text{ (paredes)}$ $\text{(m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (cobert.)}$ $\text{(m}^2\text{)}$	U_{jan} $\text{(W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (paredes)}$ $\text{(W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (cobert.)}$ $\text{(W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	U_{piso} $\text{(W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$
0,15	112,98	132,68	7,41	0,91	0,80	0,57
α	$1/h_e \text{ (m}^2\text{K/W)}$		$A_{piso} \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta T \text{ (h)}$	R_{ph}	$V \text{ (m}^3\text{)}$
0,60	0,03		132,68	744,00	0,60	358,25
	$K \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$L \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$M \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$t_{sm} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{em} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{im-p} \text{ (}^\circ\text{C)}$
	73,08	335,89	75,63	22,2	23,2	25,9

Tabela 5.8 – Aplicação do modelo para o edifício A (combinação 4)

orient.	$A_{jan} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{vidro} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	$Q_s \text{ (kWh)}$	Q_{env-e}^{solar}
norte	7,80	6,63	30,39	82,58	82,13	9,03
sul	6,82	5,80	31,38	111,75	97,17	12,62
leste	1,87	1,59	25,40	76,72	18,29	7,02
oeste	0,64	0,54	25,81	267,36	21,82	24,84
cobert.	---	---	132,68	186,86	---	62,48
total	17,13				219,41	115,99
		$q_{int} \text{ (W)}$	$\Delta t_{int} \text{ (h)}$	$Q_{int} \text{ (kWh)}$		
		260,79	744,00	194,03		
F_s	$A_{op} \text{ (paredes)} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (m}^2\text{)}$	$U_{jan} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (paredes)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{piso} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$
0,15	112,98	132,68	7,41	0,20	0,14	0,57
α	$1/h_e \text{ (m}^2\text{K/W)}$		$A_{piso} \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta T \text{ (h)}$	R_{ph}	$V \text{ (m}^3\text{)}$
0,60	0,03		132,68	744,00	0,60	358,25
	$K \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$L \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$M \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$t_{sm} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{em} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{im-p} \text{ (}^\circ\text{C)}$
	73,08	168,10	75,63	22,2	23,2	25,2

Tabela 5.9 – Aplicação do modelo para o edifício B (combinação 1)

orient.	A_{jan} (m²)	A_{vidro} (m²)	A_{op} (m²)	I (kWh/m²)	Q_s (kWh)	Q_{env-e}^{solar}
norte	5,39	4,58	16,88	82,58	283,76	22,83
sul	4,18	3,55	17,55	111,75	297,79	32,12
leste	0,00	0,00	0,00	76,72	0,00	0,00
oeste	1,65	1,40	34,26	267,36	281,23	150,04
cobert.	---	---	---	---	---	---
total	11,22		68,69		862,77	204,99
		q_{int} (W)	Δt_{int} (h)	Q_{int} (kWh)		
		231,48	744,00	172,22		
F_s	A_{op} (paredes) (m²)	A_{op} (cobert.) (m²)	U_{jan} (W/m² °C)	U_{op} (paredes) (W/m² °C)	U_{op} (cobert.) (W/m² °C)	U_{piso} (W/m² °C)
0,75	68,69	---	7,41	0,91	---	---
α	$1/h_e$ (m²K/W)		A_{piso} (m²)	ΔT (h)	R_{ph}	V (m³)
0,60	0,03		---	744,00	0,60	261,53
	K (W/°C)	L (W/°C)	M (W/°C)	t_{sm} (°C)	t_{em} (°C)	t_{im-p} (°C)
	53,35	145,65	---	---	23,2	31,6

Tabela 5.10 – Aplicação do modelo para o edifício B (combinação 2)

orient.	$A_{jan} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{vidro} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	$Q_s \text{ (kWh)}$	Q_{env-e}^{solar}
norte	5,39	4,58	16,88	82,58	283,76	5,02
sul	4,18	3,55	17,55	111,75	297,79	7,06
leste	0,00	0,00	0,00	76,72	0,00	0,00
oeste	1,65	1,40	34,26	267,36	281,23	32,98
cobert.	---	---	---	---	---	---
total	11,22		68,69		862,77	45,05
		$q_{int} \text{ (W)}$	$\Delta t_{int} \text{ (h)}$	$Q_{int} \text{ (kWh)}$		
		231,48	744,00	172,22		
F_s	$A_{op} \text{ (paredes)} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (m}^2\text{)}$	$U_{jan} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (paredes)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{piso} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$
0,75	68,69	---	7,41	0,20	---	---
α	$1/h_e \text{ (m}^2\text{K/W)}$		$A_{piso} \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta T \text{ (h)}$	R_{ph}	$V \text{ (m}^3\text{)}$
0,60	0,03		---	744,00	0,60	261,53
	$K \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$L \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$M \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$t_{sm} \text{ (} ^\circ\text{C)}$	$t_{em} \text{ (} ^\circ\text{C)}$	$t_{im-p} \text{ (} ^\circ\text{C)}$
	53,35	96,88	---	---	23,2	32,9

Tabela 5.11 - Aplicação do modelo para o edifício B (combinação 3)

orient.	A_{jan} (m²)	A_{vidro} (m²)	A_{op} (m²)	I (kWh/m²)	Q_s (kWh)	Q_{env-e}^{solar}
<i>norte</i>	5,39	4,58	16,88	82,58	56,75	22,83
<i>sul</i>	4,18	3,55	17,55	111,75	59,56	32,12
<i>leste</i>	0,00	0,00	0,00	76,72	0,00	0,00
<i>oeste</i>	1,65	1,40	34,26	267,36	56,25	150,04
<i>cobert.</i>	---	---	---	---	---	---
<i>total</i>	11,22		68,69		172,55	204,99
		q_{int} (W)	Δt_{int} (h)	Q_{int} (kWh)		
		231,48	744,00	172,22		
F_s	A_{op} (paredes) (m²)	A_{op} (cobert.) (m²)	U_{jan} (W/m² °C)	U_{op} (paredes) (W/m² °C)	U_{op} (cobert.) (W/m² °C)	U_{piso} (W/m² °C)
0,15	68,69	---	7,41	0,91	---	---
α	$1/h_e$ (m²K/W)		A_{piso} (m²)	ΔT (h)	R_{ph}	V (m³)
0,60	0,03		---	744,00	0,60	261,53
	K (W/°C)	L (W/°C)	M (W/°C)	t_{sm} (°C)	t_{em} (°C)	t_{im-p} (°C)
	53,35	145,65	---	---	23,2	26,9

Tabela 5.12 – Aplicação do modelo para o edifício B (combinação 4)

orient.	$A_{jan} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{vidro} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	$Q_s \text{ (kWh)}$	Q_{env-e}^{solar}
norte	5,39	4,58	16,88	82,58	56,75	5,02
sul	4,18	3,55	17,55	111,75	59,56	7,06
leste	0,00	0,00	0,00	76,72	0,00	0,00
oeste	1,65	1,40	34,26	267,36	56,25	32,98
cobert.	---	---	---	---	---	---
total	11,22		68,69		172,55	45,05
		$q_{int} \text{ (W)}$	$\Delta t_{int} \text{ (h)}$	$Q_{int} \text{ (kWh)}$		
		231,48	744,00	172,22		
F_s	$A_{op} \text{ (paredes)} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (m}^2\text{)}$	$U_{jan} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (paredes)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{piso} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$
0,15	68,69	---	7,41	0,20	---	---
α	$1/h_e \text{ (m}^2\text{K/W)}$		$A_{piso} \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta T \text{ (h)}$	R_{ph}	$V \text{ (m}^3\text{)}$
0,60	0,03		---	744,00	0,60	261,53
	$K \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$L \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$M \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$t_{sm} \text{ (} ^\circ\text{C)}$	$t_{em} \text{ (} ^\circ\text{C)}$	$t_{im-p} \text{ (} ^\circ\text{C)}$
	53,35	96,88	---	---	23,2	26,7

Tabela 5.13 – Aplicação do modelo para o edifício C (combinação 1)

orient.	A_{jan} (m²)	A_{vidro} (m²)	A_{op} (m²)	I (kWh/m²)	Q_s (kWh)	Q_{env-e}^{solar}
<i>norte</i>	4,18	3,55	15,80	82,58	220,06	21,37
<i>sul</i>	4,18	3,55	14,58	111,75	297,79	26,69
<i>leste</i>	0,00	0,00	0,00	76,72	0,00	0,00
<i>oeste</i>	0,00	0,00	1,35	267,36	0,00	5,91
<i>cobert.</i>	---	---	---	---	---	---
<i>total</i>	8,36		31,73		517,84	53,97
		q_{int} (W)	Δt_{int} (h)	Q_{int} (kWh)		
		190,22	744,00	141,52		
F_s	A_{op} (paredes) (m²)	A_{op} (cobert.) (m²)	U_{jan} (W/m² °C)	U_{op} (paredes) (W/m² °C)	U_{op} (cobert.) (W/m² °C)	U_{piso} (W/m² °C)
0,75	31,73	---	7,41	0,91	---	---
α	$1/h_e$ (m²K/W)		A_{piso} (m²)	ΔT (h)	R_{ph}	V (m³)
0,60	0,03		---	744,00	0,60	221,73
	K (W/°C)	L (W/°C)	M (W/°C)	t_{sm} (°C)	t_{em} (°C)	t_{im-p} (°C)
	45,23	90,82	---	---	23,2	30,2

Tabela 5.14 – Aplicação do modelo para o edifício C (combinação 2)

orient.	$A_{jan} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{vidro} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	$Q_s \text{ (kWh)}$	Q_{env-e}^{solar}
norte	4,18	3,55	15,80	82,58	220,06	4,70
sul	4,18	3,55	14,58	111,75	297,79	5,87
leste	0,00	0,00	0,00	76,72	0,00	0,00
oeste	0,00	0,00	1,35	267,36	0,00	1,30
cobert.	---	---	---	---	---	---
total	8,36		31,73		517,84	11,86
		$q_{int} \text{ (W)}$	$\Delta t_{int} \text{ (h)}$	$Q_{int} \text{ (kWh)}$		
		190,22	744,00	141,52		
F_s	$A_{op} \text{ (paredes)} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (m}^2\text{)}$	$U_{jan} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (paredes)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{piso} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$
0,75	31,73	---	7,41	0,20	---	---
α	$1/h_e \text{ (m}^2\text{K/W)}$		$A_{piso} \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta T \text{ (h)}$	R_{ph}	$V \text{ (m}^3\text{)}$
0,60	0,03		---	744,00	0,60	221,73
	$K \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$L \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$M \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$t_{sm} \text{ (} ^\circ\text{C)}$	$t_{em} \text{ (} ^\circ\text{C)}$	$t_{im-p} \text{ (} ^\circ\text{C)}$
	45,23	68,29	---	---	23,2	31,1

Tabela 5.15 – Aplicação do modelo para o edifício C (combinação 3)

orient.	$A_{jan} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{vidro} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	$Q_s \text{ (kWh)}$	Q_{env-e}^{solar}
norte	4,18	3,55	15,80	82,58	44,01	21,37
sul	4,18	3,55	14,58	111,75	59,56	26,69
leste	0,00	0,00	0,00	76,72	0,00	0,00
oeste	0,00	0,00	1,35	267,36	0,00	5,91
cobert.	---	---	---	---	---	---
total	8,36		31,73		103,57	53,97
		$q_{int} \text{ (W)}$	$\Delta t_{int} \text{ (h)}$	$Q_{int} \text{ (kWh)}$		
		190,22	744,00	141,52		
F_s	$A_{op} \text{ (paredes)}$ $\text{(m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (cobert.)}$ $\text{(m}^2\text{)}$	U_{jan} $\text{(W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (paredes)}$ $\text{(W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (cobert.)}$ $\text{(W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	U_{piso} $\text{(W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$
0,15	31,73	---	7,41	0,91	---	---
α	$1/h_e \text{ (m}^2\text{K/W)}$		$A_{piso} \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta T \text{ (h)}$	R_{ph}	$V \text{ (m}^3\text{)}$
0,60	0,03		---	744,00	0,60	221,73
	$K \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$L \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$M \text{ (W/}^\circ\text{C)}$	$t_{sm} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{em} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$t_{im-p} \text{ (}^\circ\text{C)}$
	45,23	90,82	---	---	23,2	26,2

Tabela 5.16 – Aplicação do modelo para o edifício C (combinação 4)

orient.	$A_{jan} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{vidro} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (kWh/m}^2\text{)}$	$Q_s \text{ (kWh)}$	Q_{env-e}^{solar}
norte	4,18	3,55	15,80	82,58	44,01	4,70
sul	4,18	3,55	14,58	111,75	59,56	5,87
leste	0,00	0,00	0,00	76,72	0,00	0,00
oeste	0,00	0,00	1,35	267,36	0,00	1,30
cobert.	---	---	---	---	---	---
total	8,36		31,73		103,57	11,86
		$q_{int} \text{ (W)}$	$\Delta t_{int} \text{ (h)}$	$Q_{int} \text{ (kWh)}$		
		190,22	744,00	141,52		
F_s	$A_{op} \text{ (paredes)} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (m}^2\text{)}$	$U_{jan} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (paredes)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{op} \text{ (cobert.)} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$	$U_{piso} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$
0,15	31,73	---	7,41	0,20	---	---
α	$1/h_e \text{ (m}^2\text{K/W)}$		$A_{piso} \text{ (m}^2\text{)}$	$\Delta T \text{ (h)}$	R_{ph}	$V \text{ (m}^3\text{)}$
0,60	0,03		---	744,00	0,60	221,73
	$K \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$L \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$M \text{ (W/} ^\circ\text{C)}$	$t_{sm} \text{ (} ^\circ\text{C)}$	$t_{em} \text{ (} ^\circ\text{C)}$	$t_{im-p} \text{ (} ^\circ\text{C)}$
	45,23	68,29	---	---	23,2	26,2

Através da utilização de tabelas como as apresentadas, o cálculo do modelo é facilitado. Nelas é possível organizar todos os dados de entrada necessários. Para facilitar a compreensão das mesmas, na sequência descrevem-se as etapas necessárias para o cálculo de um dos exemplos considerados, nomeadamente o caso 1 do edifício A, cuja tabela (5.5) apresenta-se com os dados de entrada indicados em cores distintas, a fim de que sejam facilmente identificados²⁶.

Etapa 1. Dados de entrada.

Dados geométricos do edifício. Indicados na cor azul, na tabela 5.5.

A_{jan} área de janelas em cada uma das orientações, além da sua soma total

A_{op} área de paredes opacas em cada uma das orientações, além também da sua soma total. Separadamente, é indicada também a área de cobertura, caso esta exista.

V volume total do edifício

Para os exemplos específicos deste Capítulo, os dados geométricos foram retirados directamente do Anexo C.

Dados climáticos. Indicados na cor vermelha, na tabela 5.5.

I radiação solar total incidente nas várias orientações e na cobertura, durante todo o mês em questão, para o clima estudado.

t_{em} temperatura média do ar exterior para o mês em questão, no clima estudado.

t_{sm} temperatura média da superfície do solo, para o mês em questão, no clima estudado.

Para os exemplos específicos deste Capítulo, os dados climáticos de t_{em} e t_{sm} foram retirados directamente dos ficheiros meteorológicos utilizados nas simulações (ver mais detalhes na secção 3.8). Quanto ao valor de I , este foi retirado do TRNSYS, que calcula a radiação incidente em cada orientação a partir dos dados climáticos fornecidos.

²⁶ Nas tabelas 5.2 e 5.3 também é indicado como as variáveis das equações do modelo foram obtidas, para todos os casos nos quais o mesmo foi aplicado.

Características termo-físicas dos materiais e elementos. Indicadas na cor verde, na tabela 5.5.

- F_s factor solar das janelas (vidro + dispositivo de sombreamento) utilizadas no edifício.
- α coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior das paredes exteriores do edifício.
- h_e coeficiente de transferência de calor por radiação e convecção na superfície exterior.
- U_{jan} Coeficiente global de transferência de calor das janelas.
- U_{op} Coeficiente global de transferência de calor das paredes opacas (paredes e cobertura).

Para os exemplos específicos deste Capítulo, os valores de F_s utilizados são apresentados no Anexo E, os de α , na tabela 3.5 e os de h_e , U_{jan} e U_{op} , no Anexo D ²⁷.

Outros dados variados. Indicados na cor castanha, na tabela 5.5.

- R_{ph} número de renovações de ar por hora. Para os exemplos específicos desta secção, todos os edifícios possuem, em todas as suas zonas, a taxa de ventilação igual a 0,6 RPH, o que corresponde à ventilação mínima.
- ΔT quantidade de horas do mês em questão
- q_{int} fluxo de calor médio devido a todos os elementos responsáveis pelos ganhos internos do edifício (pessoas, equipamentos ou iluminação). Este valor corresponde ao edifício como um todo, e não aos seus ganhos por metro quadrado. Para os exemplos específicos deste Capítulo, considerou-se um fluxo constante durante todas as horas do mês, cujo valor total mensal corresponde à soma das contribuições individuais de todos os elementos, de acordo com o padrão de ocupação apresentado anteriormente na figura 3.8.

²⁷ Numa aplicação geral do modelo, estas propriedades térmicas podem ser obtidas directamente em tabelas, de acordo com os materiais adoptados. Quanto aos valores de U , podem ser facilmente calculados através do indicado no RCCTE [7] ou obtidos directamente através de tabelas, para certos tipos de paredes específicos.

Δt_{int} período de duração / permanência dos elementos responsáveis pelos ganhos internos (pessoas, equipamentos ou iluminação). Para os exemplos específicos deste Capítulo, como considerou-se um fluxo de calor constante durante todo o mês, este período é igual à quantidade de horas do mês.

Etapa 2. Cálculo das áreas úteis dos envidraçados.

Os demais dados indicados na tabela (não coloridos) são calculados através das equações 5.19 a 5.26 do modelo. Primeiramente, são encontradas as áreas úteis dos envidraçados, A_{vidro} (ou seja, área da janela, sendo descontada a área do caixilho). Para todos os casos deste trabalho considerou-se 85% da área das janelas, ou seja $A_{vidro} = 0,85 * A_{jan}$ (ver tabela 3.6).

Etapa 3. Cálculo de Q_s .

Os ganhos solares pelos envidraçados para cada uma das orientações são calculados através da equação 5.23, considerando-se os valores de A_{vidro} , F_s e I inseridos anteriormente na tabela. Em seguida, obtém-se também o Q_s total, o qual é posteriormente utilizado para o cálculo de t_{im-p} (equação 5.19).

Etapa 4. Cálculo de Q_{env-e}^{solar} .

Os ganhos solares pela envolvente opaca para cada uma das orientações são calculados através da equação 5.25, considerando-se os valores de U_{op} , A_{op} , α , I e $1/h_e$ inseridos anteriormente na tabela. Em seguida, obtém-se também o Q_{env-e}^{solar} total, valor posteriormente utilizado para o cálculo de t_{im-p} .

Etapa 5. Cálculo de Q_{int} .

Os ganhos de calor internos são calculados através da equação 5.24, considerando-se os valores de q_{int} e Δt_{int} inseridos anteriormente na tabela. Posteriormente, o Q_{int} é utilizado para o cálculo de t_{im-p} .

Etapa 6. Cálculo de K, L e M .

Estes índices são calculados através das equações 5.20 a 5.22, utilizando-se os valores de R_{ph} , V , U_{op} , A_{op} , U_{jan} , A_{jan} , U_{piso} e A_{piso} inseridos anteriormente na tabela.

Etapa 7. Cálculo de t_{im-p} .

Finalmente, cálculo da temperatura média interior ponderada através da equação 5.19. Todos os parâmetros dessa equação são obtidos na própria tabela (Q_s , Q_{env-e}^{solar} , Q_{int} , K, L, M, t_{em} e t_{sm}).²⁸

Desse modo, de forma rápida, ao se preencher a tabela com os dados do edifício é possível efectuar o cálculo de sua temperatura, e com apenas algumas modificações é possível efectuar as mais variadas alterações de factor solar, nível de isolamento, taxa de ventilação, entre outros parâmetros, a fim de prever-se o seu comportamento.

Para os exemplos específicos das tabelas 5.5 a 5.16, foram feitas pequenas alterações no nível de isolamento da envolvente e/ou no factor solar, dando origem às diversas combinações estudadas. Para cada um dos edifícios (A, B ou C), as alterações efectuadas nas tabelas foram as seguintes:

- *combinação 2*: idêntica à combinação 1, com alteração apenas do nível de isolamento da envolvente (nível 5), ou seja alteração de $U_{op (paredes)}$ para $0,20 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $U_{op (cobertura)}$ para $0,10 \text{ W/m}^2\text{°C}$.
- *combinação 3*: idêntica à combinação 1, com alteração apenas do factor solar das janelas (F_s), para 0,15.
- *combinação 4*: idêntica à combinação 2, com alteração apenas do factor solar das janelas (F_s), para 0,15.

²⁸ Q_{env-i}^{edif} é sempre igual a zero, pois assumiu-se nas simulações que a temperatura do ar das zonas de outros edifícios adjacentes é idêntica à temperatura do ar da zona em questão.

As t_{im-p} calculadas pelo modelo são muito próximas das anteriormente simuladas pelo TRNSYS nos estudos paramétricos, conforme já discutido na secção 5.2. A tabela 5.17 apresenta esses valores.

Tabela 5.17 - Temperaturas médias interiores ponderadas (t_{im-p}) calculadas e simuladas (°C)

comb.	edifício A ⁽¹⁾		edifício B ⁽¹⁾		edifício C ⁽¹⁾	
	t_{im-p} calc. (°C)	t_{im-p} sim. (°C)	t_{im-p} calc. (°C)	t_{im-p} sim. (°C)	t_{im-p} calc. (°C)	t_{im-p} sim. (°C)
1	28,3	28,5	31,6	31,5	30,2	30,7
2	28,9	29,6	32,9	33,3	31,1	31,8
3	25,9	25,1	26,9	26,8	26,2	25,5
4	25,2	24,5	26,7	26,3	26,2	25,8

⁽¹⁾ Edifícios utilizados como habitação, em Évora, no mês de Agosto, com ventilação mínima.

5.3.2 Previsão do sobreaquecimento de um edifício através do modelo

A figura 5.5 apresenta as temperaturas encontradas através do modelo para todas as combinações consideradas na secção anterior, para os três edifícios. Os valores de t_{im-p} indicam o mesmo padrão de comportamento anteriormente observado nas simulações (figuras 4.24, 4.31 e 4.32):

- Em todos os edifícios, quando o factor solar é alto, a t_{im-p} aumenta com o aumento do isolamento.
- Quanto o factor solar é baixo, para os edifícios A e B, a t_{im-p} chega até a ser reduzida com o aumento do isolamento. Para o edifício C, a t_{im-p} permanece a mesma.

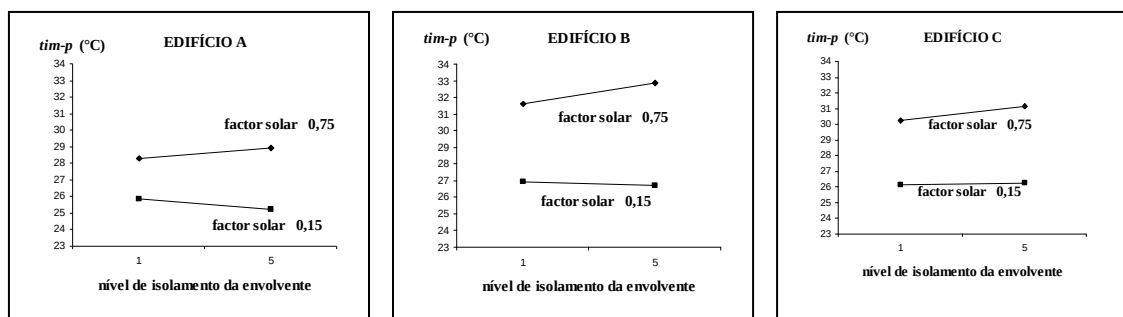


Figura 5.5 – T_{im-p} calculada através do modelo para os quatro casos dos edifícios A, B e C

As razões pelas quais os padrões de comportamento acima descritos ocorrem podem ser melhor compreendidas através das tabelas 5.18 a 5.20, que apresentam uma comparação entre os resultados do modelo encontrados para os três edifícios. Sabe-se que a origem das equações do modelo baseia-se no equilíbrio entre os ganhos e as perdas de calor. Os ganhos de calor correspondem a Q_s , Q_{int} e Q_{env-e}^{solar} . Quanto às perdas, estas correspondem às variáveis K , L e M , as quais fornecem uma indicação da capacidade do edifício de perder calor através da ventilação (K), de sua envolvente (L) ou do piso (M).

Ao se observar os ganhos de calor, nota-se a redução dos ganhos solares pelos envidraçados (Q_s) quando há maior sombreamento (combinações 3 e 4). Verifica-se também que, com o aumento do nível de isolamento (combinações 2 e 4), há a redução do ganho de calor solar pelas paredes opacas (Q_{env-e}^{solar}), devido à redução da transmissão para o interior do calor absorvido na superfície exterior das fachadas. Os ganhos internos, Q_{int} , obviamente, permanecem idênticos, pois o padrão de utilização é sempre o mesmo (utilização como habitação).

Ao se observar os índices referentes às perdas, nota-se que o valor das perdas por ventilação (K) é idêntico para todas as combinações de cada edifício, pois a taxa de ventilação é sempre a mesma (ventilação mínima). Quanto ao valor das perdas pela envolvente (L), este é reduzido quando se aumenta o nível de isolamento (combinações 2 e 4). O valor das perdas pelo pavimento (M) também permanece sempre o mesmo para o edifício A, pois não há alteração do isolamento do piso. Nos casos concretos dos edifícios B e C, a variável M é igual a zero, pois não há piso em contacto com o solo.

Tabela 5.18 – Resultados da aplicação do modelo para as quatro combinações do edifício A

Edifício A, habitação, em Évora, no mês de Agosto, com ventilação mínima							
comb .	ganhos (kWh)			perdas (W/°C)			t_{im-p} (°C)
	Q_{solar}^{env-e}	Q_{int}	Q_s	K	L	M	
1	600,51	194,03	1097,03	73,08	335,89	75,63	28,3
2	115,99	194,03	1097,03	73,08	168,10	75,63	28,9
3	600,51	194,03	219,41	73,08	335,89	75,63	25,9
4	115,99	194,03	219,41	73,08	168,10	75,63	25,2

Tabela 5.19 - Resultados da aplicação do modelo para as quatro combinações do edifício B

Edifício B, habitação, em Évora, no mês de Agosto, com ventilação mínima							
comb .	ganhos (kWh)			perdas (W/°C)			t_{im-p} (°C)
	Q_{solar}^{env-e}	Q_{int}	Q_s	K	L	M	
1	204,99	172,22	862,77	53,35	145,65	---	31,6
2	45,05	172,22	862,77	53,35	96,88	---	32,9
3	204,99	172,22	172,55	53,35	145,65	---	26,9
4	45,05	172,22	172,55	53,35	96,88	---	26,7

Tabela 5.20 - Resultados da aplicação do modelo para as quatro combinações do edifício C

Edifício C, habitação, em Évora, no mês de Agosto, com ventilação mínima							
comb .	ganhos (kWh)			perdas (W/°C)			t_{im-p} (°C)
	Q_{solar}^{env-e}	Q_{int}	Q_s	K	L	M	
1	53,97	141,52	517,84	45,23	90,82	---	30,2
2	11,86	141,52	517,84	45,23	68,29	---	31,1
3	53,97	141,52	103,57	45,23	90,82	---	26,2
4	11,86	141,52	103,57	45,23	68,29	---	26,2

Através dessas tabelas é possível perceber que, ao se alterar o nível de isolamento da envolvente, o tipo de resultado final (aumento ou redução da temperatura) vai depender do equilíbrio entre os ganhos e as perdas envolvidos. Quando há aumento do isolamento, nota-se dois efeitos : redução dos ganhos totais (devido à redução da parcela Q_{env-e}^{solar}) e redução das perdas (devido à redução de L). Como resultado final, três tipos de situações distintas podem ocorrer:

1. Quando a redução das perdas L é tal que, mesmo com a diminuição dos ganhos de calor totais do edifício ainda há dificuldade para a transmissão do calor em excesso para o exterior, a consequência é a elevação da temperatura interior. Isso é o que ocorre nos edifícios A, B e C (da combinação 1 para a 2).
2. Quando os ganhos de calor totais do edifício são reduzidos de tal forma que a maior dificuldade do edifício em perder calor através da envolvente (devido ao aumento do isolamento) não é suficiente para manter o equilíbrio, a temperatura interior é reduzida. Este é o caso dos edifícios A e B (das combinações 3 para 4).
3. Quando a redução das perdas L é idêntica (ou muito próxima) à diminuição dos ganhos de calor totais do edifício, a temperatura interior permanece a mesma. Isto é o que ocorre no edifício C, das combinações 3 para a 4.

É possível determinar-se exactamente em que condições há aumento ou redução da temperatura interior, quando o isolamento de um edifício é aumentado. Na sequência descreve-se o desenvolvimento das equações do modelo que levou à obtenção de uma variável, denominada b_w , a qual indica, de forma rápida, as consequências para a temperatura interior, quando há acréscimo de isolamento.

Primeiramente, considerou-se a equação do modelo (equação 5.19), separando-se os ganhos e as perdas de calor em cada um dos lados da igualdade ²⁹.

²⁹ Assumiu-se que não há piso em contacto com o solo ($A_{piso} = 0$) e que Q_{env-i}^{edif} é igual a zero (temperatura do ar das zonas de outros edifícios adjacentes idêntica à temperatura do ar da zona em questão).

$$Q_{tot} = (K + L) \cdot \Delta T \cdot (t_{im-p} - t_{em}) \quad (Wh) \quad (5.28)$$

Onde:

$$Q_{tot} = Q_s + Q_{int} + Q_{env-e}^{solar} \quad (Wh) \quad (5.29)$$

Ao se aumentar o isolamento da envolvente, conforme já observado nos resultados dos cálculos do modelo (tabelas 5.18 a 5.20), nota-se os seguintes efeitos:

- Um menor valor de U para a envolvente faz com que haja redução na parcela Q_{env-e}^{solar} (ver equação 5.25), o que significa que o edifício mais isolado reduz os ganhos de calor solares pela envolvente opaca. Portanto, na equação 5.28, é reduzida a parcela à esquerda da igualdade, Q_{tot} , referente aos ganhos de calor totais do edifício.
- Com um menor valor de U , a variável L também é reduzida (ver equação 5.21), fazendo com que o termo $(K+L)$ da equação 5.28 seja diminuído. Isso significa que o edifício possui menor capacidade em perder calor pela envolvente.

Consequentemente há também alteração do termo $(t_{im-p} - t_{em})$, que tanto pode aumentar ou diminuir, em função dos valores acima alterados.

Tomando-se como base os efeitos acima descritos, a equação do equilíbrio entre os ganhos e as perdas (equação 5.28), para um caso com envolvente mais isolada, pode ser descrita da seguinte forma:

$$b_{ganhos} \cdot Q_{tot} = b_L \cdot (K + L) \cdot \Delta T \cdot b_w \cdot (t_{im-p} - t_{em}) \quad (Wh) \quad (5.30)$$

Onde:

b_{ganhos} factor adimensional que representa a variação de Q_{tot} , com o aumento do isolamento

b_L factor adimensional que representa a variação de $(K+L)$, com o aumento do isolamento

b_w factor adimensional que representa a variação de $(t_{\text{im-p}}-t_{\text{em}})$, com o aumento do isolamento

Através da equação 5.30, verifica-se que a relação entre os factores b_{ganhos} , b_L , e b_w é descrita da seguinte forma:

$$b_{\text{ganhos}} = b_L \cdot b_w \quad (5.31)$$

Ou seja,

$$b_w = \frac{b_{\text{ganhos}}}{b_L} \quad (5.32)$$

Para a obtenção do índice b_{ganhos} considerou-se a equação 5.29, para um edifício onde há aumento do isolamento. A variável Q_{tot} é multiplicada por b_{ganhos} , enquanto a variável $Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}$ é multiplicada por um factor x :

$$Q_{\text{tot (isolamento aumentado)}} = b_{\text{ganhos}} \cdot Q_{\text{tot}} = Q_s + Q_{\text{int}} + x \cdot Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}} \quad (\text{Wh}) \quad (5.33)$$

Onde:

$$x = \frac{U_{\text{op (isolamento aumentado)}}}{U_{\text{op (isolamento anterior)}}} \quad (5.34)$$

A relação apresentada na equação 5.34 é verdadeira quando os valores de U de todas as paredes opacas é o mesmo, ou quando são diferentes entre si, mas alterados na mesma proporção, x , com o aumento do isolamento.

Como $Q_s + Q_{\text{int}} = Q_{\text{tot}} - Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}$, a equação 5.33 pode ser escrita da seguinte forma:

$$b_{\text{ganhos}} \cdot Q_{\text{tot}} = Q_{\text{tot}} - Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}} + x \cdot Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}} \quad (\text{Wh}) \quad (5.35)$$

Dessa forma, obtém-se o factor b_{ganhos} :

$$b_{\text{ganhos}} = 1 - \frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}} \cdot (1 - x) \quad (5.36)$$

Quanto ao índice b_L (equação 5.32), este considera a redução, devido ao aumento do isolamento, da variável $(K+L)$. Quando reduz-se o valor de U , a variável L também é reduzida (ver equação 5.21), enquanto K , que representa a influência da ventilação, permanece constante (ver equação 5.20). Dessa forma, para um edifício onde há aumento do isolamento, pode escrever a expressão $(K+L)$ da seguinte forma:

$$(K + L)_{(\text{isolamento aumentado})} = b_L \cdot (K + L) = K + U_{\text{jan}} \cdot A_{\text{jan}} + x \cdot U_{\text{op}} \cdot A_{\text{op}} \quad (\text{W/}^\circ\text{C}) \quad (5.37)$$

Onde:

$$x = \frac{U_{\text{op (isolamento aumentado)}}}{U_{\text{op (isolamento anterior)}}} \quad (5.38)$$

Da mesma forma que anteriormente, no desenvolvimento da expressão de b_{ganhos} , a relação apresentada na equação 5.38 é verdadeira quando os valores de U de todas as paredes opacas forem os mesmos, ou quando forem diferentes entre si, mas alterados na mesma proporção, x , com o aumento do isolamento.

Como $K + U_{\text{jan}} \cdot A_{\text{jan}} = (K + L) - U_{\text{op}} \cdot A_{\text{op}}$, a equação 5.37 pode ser escrita da seguinte forma:

$$b_L \cdot (K + L) = (K + L) - U_{op} \cdot A_{op} + x \cdot U_{op} \cdot A_{op} \quad (\text{W/}^\circ\text{C}) \quad (5.39)$$

Dessa forma, obtém-se o factor b_L :

$$b_L = 1 - \frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} \cdot (1 - x) \quad (5.40)$$

Considerando-se as expressões 5.32 (b_w), 5.36 (b_{ganhos}) e 5.40 (b_L), é possível obter-se o valor de b_w , e dessa forma determinar quando a t_{im-p} aumenta ou diminui, com o acréscimo de isolamento, conforme indicado na sequência:

$$b_w = \frac{1 - \frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}} \cdot (1 - x)}{1 - \frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} \cdot (1 - x)} \quad (5.41)$$

Onde:

$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$ e $\frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}}$ correspondem ao edifício sem o acréscimo de isolamento.

$$x = \frac{U_{op \text{ (isolamento aumentado)}}}{U_{op \text{ (isolamento anterior)}}$$

Quando $b_w > 1$, ($t_{im-p} - t_{em}$) aumenta, e portanto, t_{im-p} aumenta;

quando $b_w < 1$, ($t_{im-p} - t_{em}$) diminui, e portanto, t_{im-p} diminui;

quando $b_w = 1$, ($t_{im-p} - t_{em}$) não altera-se, e portanto, t_{im-p} permanece a mesma.

A expressão acima pode ser utilizada desde que se cumpram as seguintes condições, as quais foram assumidas durante o seu desenvolvimento:

- $Q_{env-i}^{edif} = 0$ (temperatura do ar das zonas de outros edifícios adjacentes idêntica à temperatura do ar da zona em questão);
- $A_{piso} = 0$ (não há piso em contacto com o solo);
- Valores de U iguais para todas as paredes opacas (U_{op}), ou distintos entre si, mas alterados na mesma proporção, x , com o aumento do isolamento.

A tabela 5.21 apresenta os resultados da utilização da equação 5.41 para os edifícios B e C, apresentados como exemplos nesta secção (tabelas 5.9 a 5.16), os quais encaixam-se dentro das condições exigidas para o cálculo de b_w . Nota-se que quando $b_w > 1$, a t_{im-p} aumenta, e vice-versa.

Tabela 5.21 – Valores de b_w e outros factores para os edifícios B e C

Edifício B ⁽¹⁾						
comb.	(1-x)	$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$	b_w	t_{im-p} (°C)	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,31	0,17	1,15	31,6	32,9
3 para 4	0,78	0,31	0,37	0,94	26,9	26,7
Edifício C ⁽¹⁾						
comb.	(1-x)	$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$	b_w	t_{im-p} (°C)	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,21	0,08	1,13	30,2	31,1
3 para 4	0,78	0,21	0,18	1,03	26,2 (26,15) ⁽²⁾	26,2 (26,24) ⁽²⁾

⁽¹⁾ Utilizados como habitação, em Évora, no mês de Agosto, com ventilação mínima.

⁽²⁾ Os valores entre parêntesis indicam a tendência de aumento do valor de t_{im-p} , devido ao facto de $b_w > 1$.

5.4 Considerações finais

5.4.1 Interpretação dos resultados das simulações através do modelo

Através da equação 5.41 é possível prever-se de forma simples e rápida se há ou não sobreaquecimento no Verão com o aumento do isolamento, para qualquer edifício que cumpra as suas condições de aplicação. A fim de que se possa entender de forma mais clara a influência de cada parcela dessa equação no resultado final, b_w , são apresentadas as figuras 5.6 a 5.9.

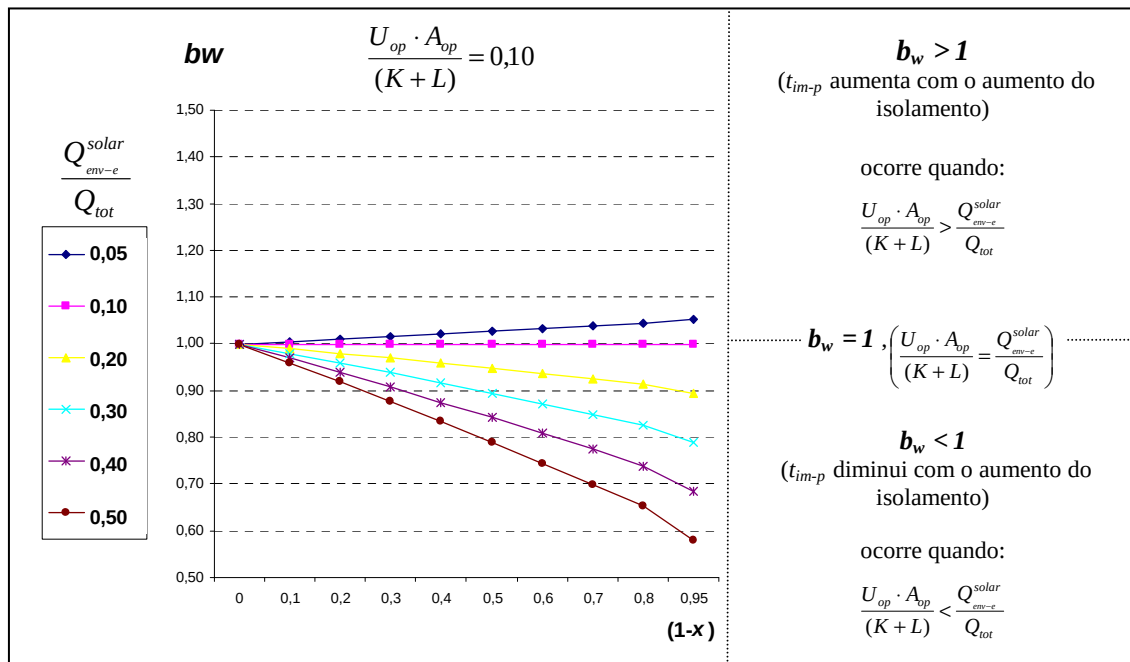


Figura 5.6 – Valores de b_w para $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} = 0,10$

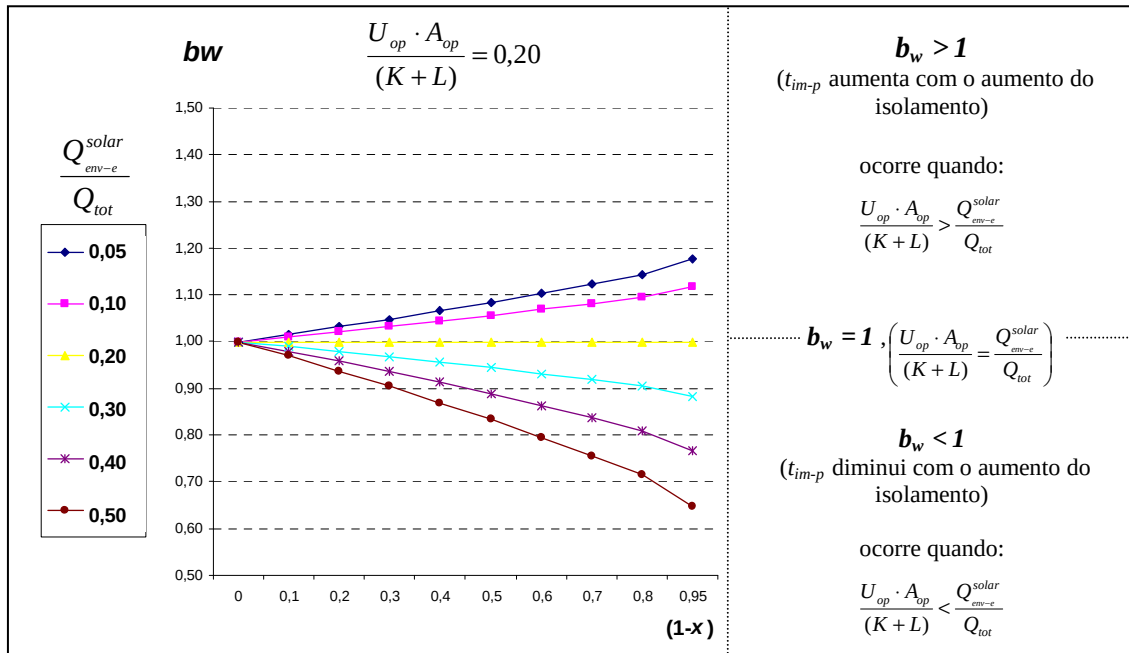


Figura 5.7 – Valores de b_w para $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K+L)} = 0,20$

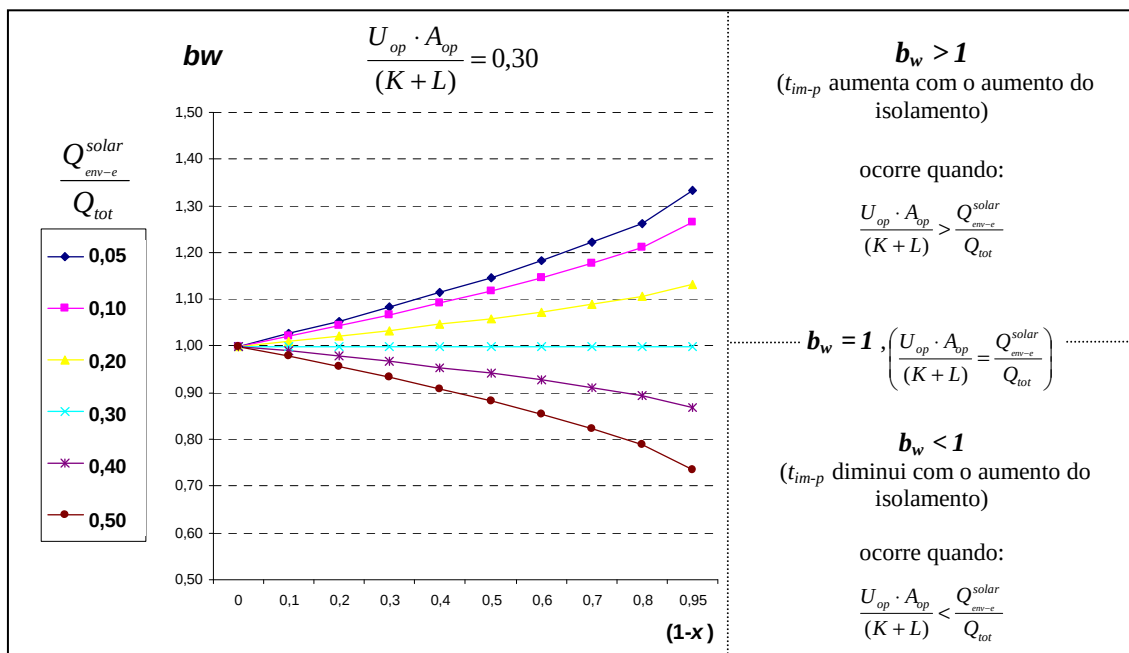


Figura 5.8 – Valores de b_w para $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K+L)} = 0,30$

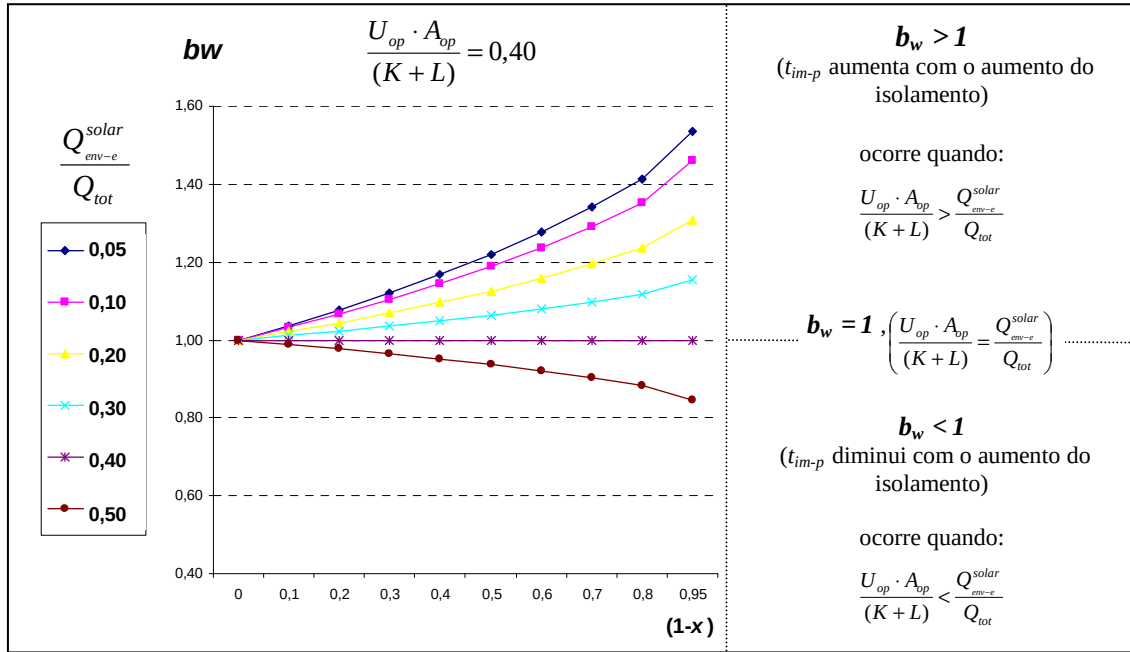


Figura 5.9 – Valores de b_w para $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} = 0,40$

Nesses gráficos, os valores de b_w foram calculados através da equação 5.41. Cada um deles corresponde a um certo valor de $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$. Este índice indica a influência relativa da envolvente opaca sobre a capacidade total do edifício em perder calor (por meio da ventilação e através da envolvente). Quanto maior o seu valor, maiores as perdas pela envolvente, em relação às perdas totais. Edifícios com área de envolvente mais reduzida (menor factor de forma) possuem valores menores para este índice. Este índice também é reduzido ao se intensificar a ventilação de um edifício.

Cada linha representada nos gráficos equivale a um valor de $\frac{Q_{solar}}{Q_{tot} - Q_{env-e}}$, o qual indica a percentagem dos ganhos solares pela envolvente opaca em relação aos ganhos totais. Edifícios com altos ganhos internos e/ou solares possuem valores mais baixos para este índice.

Nas abcissas tem-se (1-x), que corresponde à percentagem na qual o valor de U da envolvente é reduzido, ao se aumentar o isolamento. Quanto maiores os valores de (1-

x), maior a redução de U_{op} , ou seja, maior é o isolamento da envolvente. No eixo das ordenadas tem-se b_w , obtido através da equação 5.41, utilizando-se os valores de

$$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}, \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}} \text{ e } (1-x) \text{ correspondentes.}$$

Nota-se em todos os gráficos que b_w aumenta conforme se reduz $\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$. Ou seja, para

altos ganhos internos e/ou solares ($\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$ baixo), a tendência é ter-se valores de b_w

maiores que 1, o que significa aumento da temperatura com o aumento do isolamento. Conforme os ganhos internos e/ou solares são reduzidos, esta situação tende-se a inverter (ou seja, $b_w < 1$, significando redução da temperatura com o aumento do isolamento). O ponto a partir do qual isso ocorre corresponde sempre a

$$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} = \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}.$$

Dessa forma, pode-se concluir que quando:

$$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} = \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}, \quad b_w = 1 \text{ (temperatura não altera-se com o aumento do isolamento)}$$

$$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} > \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}, \quad b_w > 1 \text{ (a temperatura aumenta com o aumento do isolamento)}$$

$$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} < \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}, \quad b_w < 1 \text{ (a temperatura diminui com o aumento do isolamento)}$$

Os diferentes padrões de comportamento acima podem ser ainda melhor visualizados ao se observar alguns dos resultados da aplicação do modelo para os casos simulados, os quais são apresentados nas tabelas 5.22 e 5.23. Os resultados indicados nessas tabelas referem-se a alguns dos exemplos já apresentados em detalhe na secção 5.3, para os

edifícios B e C, acrescidos de algumas combinações que incluem variação de ventilação e de ganhos internos. Todos possuem a mesma variação do nível de isolamento da envolvente (do nível 1 para o 5), o que corresponde a $(1-x)$ igual a 0,78 (redução de U_{op} em 78%). Dessa forma, puderam ser representados, analisados e justificados os principais padrões de comportamento observados anteriormente nas simulações (ver conclusões do Capítulo 4), a saber:

1. *Influência da redução dos ganhos solares pelos envidraçados (redução do factor solar).* Para os casos com ventilação mínima (onde $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$ assume valores maiores) e utilização habitacional, notou-se nas simulações que quando o factor solar é maior, há tendência de aumento da temperatura com o aumento do isolamento, e que esse efeito é reduzido, ou até invertido, para factores solares mais baixos.
2. *Influência do padrão de ganhos: diferença entre habitação e serviços.* Para a utilização de serviços, principalmente para os maiores ganhos internos, a tendência é sempre a elevação da temperatura, mesmo para os mais baixos factores solares.
3. *Influência da ventilação.* Significativa redução da diferença entre os níveis de conforto para as envolventes mais e menos isoladas, com a intensificação de ventilação.

Estes três padrões de comportamento podem ser justificados através do modelo (tabelas 5.22 e 5.23):

1. *Influência da redução dos ganhos solares pelos envidraçados (redução do factor solar).* Para os casos com ventilação mínima e utilização habitacional, ao se aumentar o isolamento da envolvente da combinação 1 para a 2,
- $$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} > \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}, \text{ ou seja, } b_w \text{ é sempre maior que 1, indicando a elevação da}$$

temperatura. Nas combinações 3 e 4, a única alteração efectuada é a redução do factor solar, o que faz com que os ganhos solares pelos envidraçados sejam

reduzidos, e consequentemente haja um aumento de $\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$. Para o edifício B,

$\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$ aumenta a ponto de reverter a situação, de modo que $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} < \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$,

ou seja, $b_w < 1$, ocasionando a redução da temperatura com o aumento do

isolamento. Para o edifício C, $\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$ aumenta para um valor muito próximo de

$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$, fazendo com que a temperatura permaneça a mesma.

2. *Influência do padrão de ganhos: diferença entre habitação e serviços.* Para os edifícios B e C, com alta taxa de ganhos (serviços 3) e ventilação mínima,

$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$ não altera-se em relação à utilização habitacional, pois as

características da envolvente e de ventilação permanecem as mesmas. Já $\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$

assume valores menores ao se comparar com a utilização habitacional, pois os

ganhos internos são bem maiores. $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$ é sempre maior que $\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$, ou seja,

$b_w > 1$, indicando que a temperatura sempre aumenta com o aumento do isolamento, mesmo para os factores solares mais baixos (combinação 3 para a

4). Isso ocorre porque os ganhos internos são muito altos e portanto $\frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}$ não é

significativamente aumentada com a redução do factor solar, a ponto de tornar-se

maior que $\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$.

3. *Influência da ventilação.* Comparando-se o efeito da ventilação nos edifícios B e

C, tanto utilizados como habitação, quanto como serviços, nota-se que $\frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}}$

permanece igual, pois os ganhos não são alterados. Já $\frac{U_{\text{op}} \cdot A_{\text{op}}}{(K + L)}$ é sempre

reduzida quando a ventilação aumenta, devido ao aumento da capacidade do edifício em perder calor, ou seja, aumento do termo K, referente à contribuição da ventilação. A consequência dessa redução é que b_w também diminui. Isso traduz-se sempre em um efeito benéfico, pois quanto menor o b_w , menos desconforto tem-se com o aumento do isolamento.

Tabela 5.22 – Variáveis da equação 5.41 para casos variados do edifício B

Edifício B, em Évora, no mês de Agosto						
habitação, com ventilação mínima						
combinações	(1-x)	$\frac{U_{\text{op}} \cdot A_{\text{op}}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}}$	b_w	$t_{\text{im-p}} (^{\circ}\text{C})$	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,31	0,17	1,15	31,6	32,9
3 para 4	0,78	0,31	0,37	0,94	26,9	26,7
habitação, com ventilação diurna e nocturna						
combinações	(1-x)	$\frac{U_{\text{op}} \cdot A_{\text{op}}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}}$	b_w	$t_{\text{im-p}} (^{\circ}\text{C})$	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,20	0,17	1,03	28,5	28,6
3 para 4	0,78	0,20	0,37	0,84	26,0	25,6
serviços (ganhos 3), com ventilação mínima						
combinações	(1-x)	$\frac{U_{\text{op}} \cdot A_{\text{op}}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}}$	b_w	$t_{\text{im-p}} (^{\circ}\text{C})$	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,31	0,12	1,21	35,2	37,7
3 para 4	0,78	0,31	0,19	1,13	30,5	31,5
serviços (ganhos 3), com ventilação diurna e nocturna						
combinações	(1-x)	$\frac{U_{\text{op}} \cdot A_{\text{op}}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}}$	b_w	$t_{\text{im-p}} (^{\circ}\text{C})$	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,16	0,12	1,04	29,4	29,7
3 para 4	0,78	0,16	0,19	0,98	27,4 (27,39) ⁽¹⁾	27,4 (27,35) ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Os valores entre parêntesis indicam a tendência de diminuição do valor de $t_{\text{im-p}}$, devido ao facto de $b_w < 1$.

Tabela 5.23 – Variáveis da equação 5.41 para casos variados do edifício C

Edifício C, em Évora, no mês de Agosto						
habitação, com ventilação mínima						
combinações	(1-x)	$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{solar}^{env-e}}{Q_{tot}}$	b_w	$t_{im-p} (^{\circ}C)$	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,21	0,08	1,13	30,2	31,1
3 para 4	0,78	0,21	0,18	1,03	26,2 (26,15) ⁽¹⁾	26,2 (26,24) ⁽¹⁾
habitação, com ventilação diurna e nocturna						
combinações	(1-x)	$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{solar}^{env-e}}{Q_{tot}}$	b_w	$t_{im-p} (^{\circ}C)$	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,13	0,08	1,05	27,7	27,9
3 para 4	0,78	0,13	0,18	0,96	25,5	25,4
serviços (ganhos 3), com ventilação mínima						
combinações	(1-x)	$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{solar}^{env-e}}{Q_{tot}}$	b_w	$t_{im-p} (^{\circ}C)$	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,21	0,05	1,15	33,2	34,7
3 para 4	0,78	0,21	0,09	1,11	29,1	29,8
serviços (ganhos 3), com ventilação diurna e nocturna						
combinações	(1-x)	$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)}$	$\frac{Q_{solar}^{env-e}}{Q_{tot}}$	b_w	$t_{im-p} (^{\circ}C)$	
					isol. 1	isol. 5
1 para 2	0,78	0,10	0,05	1,04	28,0	28,1
3 para 4	0,78	0,10	0,09	1,01	26,4	26,4

⁽¹⁾ Os valores entre parêntesis indicam a tendência de aumento do valor de t_{im-p} , devido ao facto de $b_w > 1$.

5.4.2 Conclusões

A aplicação do modelo teórico simplificado aos 780 casos de edifícios multizona, correspondentes a variadas combinações de clima, nível de isolamento, ganhos internos, entre outros, indicou que o mesmo fornece resultados fidedignos. O modelo pode ser utilizado de forma expedita, sem necessidade de simulações complexas, para prever as condições interiores do edifício, e dessa forma auxiliar na tomada de decisões durante a fase de concepção. A partir das temperaturas interiores expectáveis durante o Verão poder-se-á depois concluir sobre a possibilidade de ocorrência de situações de

desconforto e da eventual necessidade de os usuários poderem vir a recorrer a ar-condicionado durante as condições normais de funcionamento do edifício. Com a obtenção do índice b_w , é possível determinar-se se a temperatura interior aumenta ou diminui, com o aumento do isolamento da envolvente, permitindo, portanto, otimizar o processo de especificação deste importante parâmetro do edifício. Finalmente, o modelo possibilitou um melhor entendimento dos padrões de comportamento que haviam sido observados nos resultados das simulações.

Capítulo 6 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

6.1 Conclusões

O presente trabalho consistiu no estudo do impacto do aumento do isolamento da envolvente dos edifícios no seu desempenho térmico. A exigência de envolventes exteriores cada vez mais bem isoladas é uma tendência nas regulamentações europeias, consequência da transposição para os regulamentos nacionais das exigências da recente Directiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios [5]. A pesquisa partiu da hipótese de que, em certas condições, quando os ganhos de calor no edifício são elevados, envolventes muito isoladas podem dificultar a dissipação desse calor e fazer com que a temperatura interior aumente acima do limite de conforto. Esse tipo de problema é mais susceptível de ocorrer em climas do Sul Europeu ou climas tropicais, os quais são sujeitos a Verões mais quentes e insolados. O objectivo principal da pesquisa foi investigar em que situações há sobreaquecimento do ambiente interior devido ao acréscimo de isolamento, no Verão, e se o mesmo é suficientemente alto para gerar um aumento das necessidades energéticas de arrefecimento a ponto de eliminar a economia obtida com o aquecimento.

A metodologia baseou-se na simulação do desempenho térmico de variações paramétricas de três modelos de edifícios. O TRNSYS [19] foi o programa adoptado para efectuar as simulações. Foram consideradas variações de espessura do isolamento da envolvente, taxas e períodos de ventilação, sombreamento, climas, inércia térmica e cor das paredes exteriores. Todas as simulações foram corridas para duas situações: com regime livre e com aquecimento e arrefecimento. Foram investigados diversos climas do Sul Europeu, nomeadamente Atenas e Nice e cidades pertencentes às três regiões climáticas portuguesas de Verão: Porto, Lisboa e Évora. Todas as combinações resultaram em 6180 casos simulados. Foi elaborado um programa para efectuar as

simulações automaticamente e efectuar o pós-processamento da grande quantidade de dados obtida. Os resultados brutos foram tratados através de uma metodologia específica para avaliação do conforto, que utilizou os critérios da abordagem adaptativa.

Através da análise dos resultados, foram obtidas as conclusões abaixo apresentadas:

a) Nos edifícios habitacionais, com baixa taxa de ganhos internos, o conforto pode ser obtido de forma natural e a adopção de ar condicionado deve ser evitada, a fim de se evitar um consumo de energia desnecessário. Uma envolvente altamente isolada pode trazer economia de energia para o Inverno, sem elevação do sobreaquecimento no Verão, caso haja adequado controlo dos ganhos solares nesse período. Também deve-se procurar garantir condições adequadas para a ventilação natural, pois este é um aspecto de grande impacto na redução do sobreaquecimento.

b) Nos edifícios de serviços, o desconforto é muito maior, pois os altos ganhos internos, devido às pessoas e aos equipamentos, ocorrem durante o mesmo período que os ganhos solares máximos. A tendência é sempre a elevação da temperatura, mesmo para os mais baixos factores solares. Com elevadas taxas de sombreamento, conjugadas à redução dos ganhos internos e à ventilação natural, em alguns casos é possível evitar o sobreaquecimento, de forma que um maior isolamento da envolvente possa ser benéfico (quer no Inverno, quer no Verão). No entanto, o problema é de mais difícil gestão nesse tipo de edifício e muito cuidado deve ser tomado na adopção de elevado isolamento, pois uma alteração no padrão de ganhos pode interferir de forma negativa nas condições interiores. As envolventes com inércia fraca apresentam maiores índices de desconforto e maior amplitude de temperatura.

c) Nos edifícios de serviços, quando há condicionamento artificial de ar, o que é usual, e os ganhos internos são muito elevados, há a tendência de eliminação total das poupanças energéticas devido ao aumento do consumo de arrefecimento, ou seja, uma envolvente muito isolada só faz com que haja maior consumo de energia e sobreaquecimento. Além disso, deve haver um controlo cuidadoso dos ganhos solares,

no Verão, a fim de reduzir o consumo de arrefecimento e evitar um dispêndio de energia desnecessário.

d) A conversão indiscriminada de edifícios projectados para habitação em serviços, ou vice-versa, ou mesmo entre estes com padrões muito distintos de ganhos, deve ser evitada. O aumento do isolamento pode ser benéfico para uma determinada habitação, mas não desejável quando esse mesmo edifício é adaptado, por exemplo, para um pequeno escritório, com alta taxa de ocupação e equipamento, devido às diferenças entre os seus padrões de ganhos.

Mostra-se assim que é conveniente, nos regulamentos térmicos para edifícios, fazer uma distinção clara entre os edifícios residenciais e os não residenciais. Enquanto que, nos primeiros, a tendência deve continuar a ser de aumentar a espessura de isolamento térmico da envolvente e protecção solar dos envidraçados, nos edifícios não residenciais deve ser permitido uma optimização da envolvente, sem obrigar a isolamentos excessivos. Foi esta, precisamente, a estratégia dos novos regulamentos térmicos adoptados em Portugal (RCCTE [7] e RSECE [8]).

Como resultado final do trabalho é proposto um *modelo teórico simplificado*, que calcula a temperatura média do ar no interior de um edifício multizona não condicionado artificialmente durante um período típico representativo (por exemplo, um mês). As suas equações foram desenvolvidas a partir da equação de equilíbrio entre os ganhos e as perdas de calor do edifício. O modelo foi aplicado em 780 casos representativos dentre os simulados nos estudos paramétricos. A temperatura média, calculada através do modelo, foi comparada com os valores obtidos na simulação pelo TRNSYS, mais precisos. Os resultados indicaram boa aproximação, garantindo a sua confiabilidade.

A partir das equações do modelo foi desenvolvido um índice de desempenho b_w , que indica, para edifícios que cumpram certos requisitos³⁰, se a temperatura média do ar

³⁰ Edifícios (1) que não possuam piso em contacto com o solo; (2) cujos valores de U sejam iguais para todas as paredes opacas (U_{op}), ou distintos entre si, mas alterados na mesma proporção, x , com o aumento

interior aumenta ou diminui quando o isolamento é aumentado. Esse índice é calculado da seguinte forma:

$$b_w = \frac{1 - \frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}} \cdot (1-x)}{1 - \frac{U_{\text{op}} \cdot A_{\text{op}}}{(K+L)} \cdot (1-x)} \quad (6.1)$$

Onde:

$$x = \frac{U_{\text{op (isolamento aumentado)}}}{U_{\text{op (isolamento anterior)}}$$

$$\frac{Q_{\text{env-e}}^{\text{solar}}}{Q_{\text{tot}}}$$

índice adimensional que indica a percentagem dos ganhos solares pela envolvente opaca em relação aos ganhos totais.

$$\frac{U_{\text{op}} \cdot A_{\text{op}}}{(K+L)}$$

índice adimensional que indica a influência relativa da envolvente opaca sobre a capacidade total do edifício em perder calor (por meio da ventilação e da envolvente).

Ambos estes índices são calculados para o edifício inicial, sem qualquer acréscimo de isolamento.

Através da análise do valor b_w obtido para um dado edifício, podem ocorrer então três situações distintas:

do isolamento e (3) nos quais a temperatura do ar das zonas de outros edifícios adjacentes seja considerada idêntica à temperatura do ar das zonas do edifício em questão.

$$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} = \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}, \quad b_w = 1 \text{ (temperatura não altera-se com o aumento do isolamento)}$$

$$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} > \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}, \quad b_w > 1 \text{ (a temperatura aumenta com o aumento do isolamento)}$$

$$\frac{U_{op} \cdot A_{op}}{(K + L)} < \frac{Q_{env-e}^{solar}}{Q_{tot}}, \quad b_w < 1 \text{ (a temperatura diminui com o aumento do isolamento)}$$

Dessa forma, ao obter-se os parâmetros acima descritos, é possível determinar facilmente se haverá ou não aumento do desconforto com o aumento do isolamento, para um caso específico. Essa ferramenta pode ser utilizada de forma expedita para prever as condições médias interiores do edifício, e assim auxiliar na tomada de decisões durante a fase de concepção.

Os parâmetros da equação de b_w , acima descritos, foram obtidos para alguns casos representativos dos principais padrões de comportamento observados nas simulações, justificando os resultados encontrados anteriormente.

6.2 Sugestões de trabalhos futuros

Este trabalho traz um novo enfoque no que diz respeito ao efeito do aumento do isolamento da envolvente. Enquanto a maior parte dos estudos concentra-se nos benefícios devido à economia com o aquecimento, esta pesquisa indica que a adoção de envoltórios altamente isoladas, para os climas do Sul Europeu, pode não ser sempre benéfica do ponto de vista energético e de conforto.

Na sequência são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros que considerem o tema deste trabalho, possam complementar e dar continuidade a este doutoramento:

- Inclusão de forma mais detalhada, nas análises energéticas, de outros aspectos que também influenciam no gasto de energia do edifício, como por exemplo, a iluminação. Verificar, dessa forma, até que ponto o aumento das necessidades de iluminação artificial, para as taxas mais altas de sombreamento, pode influenciar os resultados. Adopção de sistemas específicos de aquecimento e arrefecimento, haja visto nas simulações ter sido considerado um “sistema ideal”.
- Fazer ensaios com uma gama de climas mais ampla, nomeadamente em climas mais frios (tomados pelo aquecimento) e em climas mais quentes, tipo tropical, por exemplo, cobrindo a grande diversidade de climas existentes em todo o Brasil e América Latina.

Capítulo 7 Referências bibliográficas

- [1] *Decreto Lei 40/90 de 6 de Fevereiro. Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE)*. Lisboa, Portugal, 1990.
- [2] Maldonado, E. B. e Fernandes, E. O. *Building thermal regulations: why has summer been forgotten ?* 3rd European Conference on Architecture. Florence, Italy, 1993.
- [3] *Decreto Lei 156/92 de 29 de Julho. Regulamento da qualidade dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RQSECE)*. Lisboa, Portugal, 1992.
- [4] *Decreto Lei 118/98 de 7 de Maio. Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RSECE)*. Lisboa, Portugal, 1998.
- [5] *EU Official Journal. Directive on the energy performance of buildings. 2002/91/CE. 4/January, 2003.*
- [6] *CEN 2004. Explanation of the general relationship between various CEN standards and the EPBD (Umbrella Document). CEN/BT WG 173 EPBD N 15 rev., 25 October.*
- [7] *Decreto Lei 80/2006 de 4 de Abril. Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE)*. Lisboa, Portugal, 2006.
- [8] *Decreto Lei 79/2006 de 4 de Abril. Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RSECE)*. Lisboa, Portugal, 2006.
- [9] *Decreto Lei 78/2006 de 4 de Abril. Sistema nacional de certificação energética e da qualidade do ar interior nos edifícios (SCE)*. Lisboa, Portugal, 2006.
- [10] *Ecofys. Mitigation of CO2 emissions from the building stock. Beyond the EU Directive on the energy performance of buildings.* Köln, Germany, 2004.
- [11] *European Commission. Green paper on energy efficiency: doing more with less. COM (2005) 265.* Brussels, Belgium, 2005.
- [12] Maldonado, E. B. *The impactos of the EPBD upon the summer performance of buildings.* Internacional conference on passive and low energy cooling for the built environment (PALENC). Santorini, Greece, 2005. p. 797-802.

- [13] Visier, J. C., *et al.* *Energy performance of buildings: calculation procedures used in European countries. Task 1: final report.* ENPER-TEBUC project. 2004. (CSTB-DDD-AGE no. 02-126R)
- [14] Dupont, M. e Adnot, J. *Inspection and auditing of air-conditioning facilities in Europe: a new efficiency target.* Mandelieu, France: ECEEE (European council for an energy efficient economy). Summer study, 2005.
- [15] Lechner, N. *Heating, cooling, lighting. Design methods for architects.* New York, USA: John Wiley & Sons, 1991.
- [16] Gustafsson, S.-I. Optimisation of insulation measures on existing buildings. *Energy and Buildings*, v.33, n.1, p.49-55. 2000.
- [17] Jaber, J. O. Prospects of energy savings in residential space heating. *Energy and Buildings*, v.34, n.4, p.311-319. 2002.
- [18] Oreszczyn, T., *et al.* Determinants of winter indoor temperatures in low income households in England. *Energy and Buildings*, v.38, n.3, p.245-252. 2006.
- [19] *Solar Energy Laboratory. TRNSYS, version 15.* Wisconsin, USA: Solar Energy Laboratory, 2002.
- [20] Saporito, A., *et al.* Multi-parameter building thermal analysis using the lattice method for global optimisation. *Energy and Buildings*, v.33, n.3, p.267-274. 2001.
- [21] Gratia, E. e De Herde, A. A simple design tool for the thermal study of an office building. *Energy and buildings*, v.34, n.3, p.279-289. 2002.
- [22] Gratia, E. e De Herde, A. A simple design tool for the thermal study of dwellings. *Energy and buildings*, v.34, n.4, p.411-420. 2002.
- [23] Hong, T., *et al.* Building simulation: an overview of developments and information sources. *Building and environment*, v.35, n.4, p.347-361. 2000.
- [24] *Energy Systems Research Unit. ESP-r, system for building energy simulation.* Glasgow, Scotland: University of Strathclyde, Energy Systems Research Unit, ESRU, 2002.
- [25] *Lawrence Berkeley National Laboratory. DOE-2.* Berkeley, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley.
- [26] *Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. Energy plus.* US: Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2004.

- [27] Neymark, J. e Judkoff, R. *Hvac Bestest: a procedure for testing the ability of whole-building energy simulation programs to model space conditioning equipment*. Building simulation conference. Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- [28] ANSI / ASHRAE Standard 140. *Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs*. ASHRAE Inc., 2004.
- [29] Judkoff, R. e Neymark, J. *International energy agency building energy simulation test (bestest) and diagnostic method. (NREL/TP-472-6231)*. Golden, USA: National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [30] Judkoff, R. e Neymark, J. *Home energy rationing system building energy simulation test (hers bestest). (NREL/TP-472-7332)*. Golden, USA: National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [31] Lomas, K. J., et al. *Empirical validation of thermal building simulation programs using test room data*. Golden, USA: National Renewable Energy Laboratory, 1994.
- [32] Lomas, K. J., et al. *Empirical validation of building energy simulation programs. Energy and buildings*, v.26, n.3, p.253-275. 1997.
- [33] *Windows and Daylighting Group, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory. Window 4.1, program for analyzing window thermal performance in accordance with standard NFRC procedures*. Berkeley, USA: Windows and Daylighting Group, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, 1994.
- [34] ANSI / ASHRAE Standard 55. *Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE Inc., 2004.
- [35] Nicol, F. S. *A handbook for field studies toward an adaptive model*. London, UK: University of East London, 1993.
- [36] Fanger, P. O. *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*: Mc Graw-Hill, 1970.
- [37] Fanger, P. O., et al. *Can winter swimming cause people to prefer lower room temperatures. International Journal of Biometeorology*, v.21, n.1, p.44-50. 1977.
- [38] Tanabe, S., et al. *Thermal comfort requirements during the summer season in Japan. ASHRAE Transactions*, v.93, n.1, p.564-577. 1987.
- [39] De Dear, R., et al. *Thermal comfort in the humid tropics. Part I. Climate chamber experiments on temperature preferences in Singapore. ASHRAE Transactions*, v.97, n.1, p.874-879. 1991.
- [40] ISO 7730. *Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices*

and local thermal comfort criteria. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.

- [41] Brager, G. S. e De Dear, R. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and buildings*, v.27, n.1, p.83-96. 1998.
- [42] Olesen, B. W. e Parsons, K. C. Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and buildings*, v.34, n.6, p.537-548. 2002.
- [43] Humphreys, M. A. e Nicol, J. F. *Do people like to feel "neutral"? Response to the ASHRAE scale of subjective warmth in relation to thermal preference, indoor and outdoor temperature*. ASHRAE Annual Meeting. Nashville, USA: ASHRAE, 2004. p. 543-551.
- [44] Bedford, T. *The warmth factor in comfort at work. A physiological study of heating and ventilation*. Medical Research Council Industrial Health Board. London, UK. 1936. (76)
- [45] Webb, C. G. S. An analysis of some observations of thermal comfort in an equatorial environment. *British journal of industrial medicine*, v.16, n.3, p.297-310. 1959.
- [46] Humphreys, M. A. e Nicol, F. An investigation into thermal comfort in office workers. *Journal of institution of heating and ventilation engineer*, v.38, p.181-189. 1970.
- [47] Nicol, F. e Humphreys, M. A. *Thermal comfort as part of a self-regulating system*. CIB Comission W45 Symposium: thermal comfort and moderate heat stress. Garston, UK, 1972. p. 263-280.
- [48] Humphreys, M. A. Field studies of thermal comfort compared and applied. *Building services engineer*, v.44, n.1, p.5-27. 1976.
- [49] Humphreys, M. A. Classroom temperature, clothing and thermal comfort: a study of secondary school children in summertime. *Building services engineer*, v.41, p.191-202. 1973.
- [50] Humphreys, M. A. Outdoor temperatures and comfort indoors. *Building research and practice*, v.6, n.2, p.92-105. 1978.
- [51] McCartney, K. J. e Nicol, J. F. Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, v.34, n.6, p.623-635. 2002.
- [52] Corgnati, S. P., *et al.* Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: subjective preferences and thermal comfort. *Building and environment*, v.42, n.2, p.951-959. 2007.

- [53] De Dear, R. e Brager, G. S. The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International Journal of Biometeorology*, v.45, n.2, p.100-108. 2001.
- [54] De Dear, R. J. e Brager, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, v.34, n.6, p.549-561. 2002.
- [55] Humphreys, M. A. Outdoor temperature and indoor thermal comfort: raising the precision of the relationship for the 1988 ASHRAE database of field studies. *ASHRAE Transactions*, v.106, n.485-492. 2000.
- [56] Humphreys, M. A. Thermal comfort temperatures world-wide - The current position. *Renewable Energy*, v.8, n.1-4, p.139-144. 1996.
- [57] Nicol, J. F. e Humphreys, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, v.34, n.6, p.563-572. 2002.
- [58] Nicol, J. F., *et al.* Climatic variations in comfortable temperatures: the Pakistan projects. *Energy and Buildings*, v.30, n.3, p.261-279. 1999.
- [59] Raja, L. A., *et al.* Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. *Energy and Buildings*, v.33, n.3, p.235-244. 2001.
- [60] Nicol, J. F. e Humphreys, M. A. A stochastic approach to thermal comfort-occupant behavior and energy use in buildings. *ASHRAE Transactions*, v.110, n.2, p.554. 2004.
- [61] Brager, G. S., *et al.* Operable windows, personal control, and occupant comfort. *ASHRAE Transactions*, v.110, n.2, p.17. 2004.
- [62] Nicol, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*, v.36, n.7, p.628-637. 2004.
- [63] Fountain, M., *et al.* Expectations of indoor climate control. *Energy and Buildings*, v.24, n.3, p.179-182. 1996.
- [64] Mahdavi, A. e Kumar, S. Implications of indoor climate control for comfort, energy and environment. *Energy and Buildings*, v.24, n.3, p.167-177. 1996.
- [65] Fato, I., *et al.* Thermal Comfort in the Climatic Conditions of Southern Italy. *ASHRAE Transactions*, v.110, n.2, p.578. 2004.
- [66] Mui, K. Adaptive comfort temperature model of air-conditioned building in Hong Kong. *Building and environment*, v.38, n.6, p.837-852. 2003.

- [67] Van Der Linden, K., *et al.* Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response. *Energy and Buildings*, v.34, n.7, p.737-744. 2002.
- [68] Van Der Linden, A. C., *et al.* Adaptive temperature limits: a new guideline in The Netherlands. A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. *Energy and buildings*, v.38, n.1, p.8-17. 2006.
- [69] Raue, A. K., *et al.* *Dutch thermal comfort guidelines: from weighted temperature exceeding hours towards adaptive temperature limits*. Conference Comfort and Energy Use in Buildings. Getting them Right. Windsor, UK, 2006.
- [70] Seppanen, O., *et al.* *Indoor environment for energy performance of buildings: a new european draft standard*. Internacional conference on passive and low energy cooling for the built environment (PALENC). Santorini, Greece, 2005. p. 797-802.
- [71] Olesen, B. W., *et al.* *Criteria for the indoor environment for energy performance of buildings - a new european standard*. . Conference Comfort and Energy Use in Buildings. Getting them Right. Windsor, UK, 2006.
- [72] Boerstra, A. C. *The adaptive thermal comfort criterion in the new EPBD IEQ standard*. Conference Comfort and Energy Use in Buildings. Getting them Right. Windsor, UK, 2006.
- [73] Humphreys, M. A. Cap. 1: Thermal comfort in the context of energy conservation. In: S. Roaf e M. Hancock (Ed.). *Energy efficient building: a design guide*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1992. Chap. 1: Thermal comfort in the context of energy conservation.
- [74] Busch, J. F. A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventlated offices in Thailand. *Energy and buildings*, v.18, n.3-4, p.235-249. 1992.
- [75] Oseland, N. A. Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes. *Energy and Buildings*, v.23, n.2, p.105-115. 1995.
- [76] Humphreys, M. A. e Nicol, F. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and buildings*, v.34, n.6, p.667. 2002.
- [77] Wong, N. H. e Khoo, S. S. Thermal comfort in classrooms in the tropics. *Energy and buildings*, v.35, n.4, p.337-351. 2003.
- [78] Moujalled, B., *et al.* *Adaptive thermal comfort evaluation in a field study*. Internacional conference on passive and low energy cooling for the built environment (PALENC). Santorini, Greece, 2005. p. 225-230.

- [79] Hellwig, R. T., *et al.* *Thermal comfort in offices : natural ventilation vs. air conditioning.* . Conference Comfort and Energy Use in Buildings. Getting them Right. Windsor, UK, 2006.
- [80] Wagner, A., *et al.* *Thermal comfort under summer climate conditions - results from a survey in an office building in Karlsruhe, Germany.* Conference Comfort and Energy Use in Buildings. Getting them Right. Windsor, UK, 2006.
- [81] De Dear, R. Thermal comfort in practice. *Indoor Air*, v.14, p.32-39. 2004.
- [82] Baker, N. e Standeven, M. Thermal comfort for free-running buildings. *Energy and Buildings*, v.23, n.3, p.175-182. 1996.
- [83] De Dear, R., *et al.* Thermal sensations resulting from sudden ambient temperature changes. *Indoor Air*, v.3, p.181-192. 1993.
- [84] Fanger, P. O. e Toftum, J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, v.34, n.6, p.533-536. 2002.
- [85] Nicol, F. e Humphreys, M. A. *Maximum temperatures in buildings to avoid heat discomfort.* Internacional conference on passive and low energy cooling for the built environment (PALENC). Santorini, Greece, 2005. p. 219-224.
- [86] *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC. ITE 28.* Lisboa, 1990.
- [87] Gonçalves, H. J. P. *Interacção de sistemas solares passivos de ganhos directo e de ganho indirecto. Estudo numérico e experimental.* (Doutoramento). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, Portugal, 1990.
- [88] Holman, J. P. *Heat transfer.* New York: Mc Graw-Hill, 1997.
- [89] Incropera, F. P. e De Witt, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer.* New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [90] *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook of Fundamentals.* Atlanta, USA: ASHRAE, 1997.
- [91] Afonso, C. F. A., *et al.* A single tracer-gas method to characterize multi-room air exchanges. *Energy and buildings*, v.9, n.4, p.273-280. 1986.
- [92] *Meteotest. Meteororm, global meteorological database for solar energy and applied climatology, version 4.0.* Switzerland: Meteotest, 2000.
- [93] Ashrae. *International Weather for Energy Calculations (IWEK Weather Files) Users Manual and CD-ROM.* Atlanta: ASHRAE, 2001. http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm.

- [94] Mendes, J. C., *et al.* *Temperaturas exteriores de projecto e número de graus-dia*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC e Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, 1989

Anexo A Ficheiro final de resultados do PARAM

O ficheiro final de resultados agrupados do PARAM, apresentado na sequência, refere-se ao edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, com ventilação mínima.

Nesse ficheiro são indicados todos os parâmetros de conforto para este edifício com as características supracitadas, combinadas aos níveis de isolamento e factores solares (sombreamento das janelas) considerados nas suas simulações.

Nome do ficheiro: servA102-1.txt

(verificar nomenclatura adoptada no CD anexo à tese)

(Os comentários referentes ao conteúdo do ficheiro
são feitos em *itálico e entre parêntesis*).

resultado 1 (percentagem de dias com desconforto, no Verão, %)

95.1	98.3	99.2	99.6	99.6	(factor solar: 0,75)
91.8	93.8	95.4	97.5	99.2	(factor solar: 0,60)
86.7	91.0	91.0	91.8	93.0	(factor solar: 0,45)
83.6	87.1	89.1	90.2	90.5	(factor solar: 0,37)
79.4	83.3	84.4	85.6	86.8	(factor solar: 0,30)
74.6	77.1	77.5	78.0	78.8	(factor solar: 0,22)
70.7	72.3	74.0	74.4	72.9	(factor solar: 0,15)

(Cada linha
corresponde a um
factor solar das
janelas
(sombreamento))

resultado 2 (percentagem do dia com desconforto, no Verão, %)

87.1	91.2	92.8	94.1	96.2	(factor solar: 0,75)
82.9	86.2	87.6	88.6	91.4	(factor solar: 0,60)
76.3	78.8	81.1	81.5	83.8	(factor solar: 0,45)
72.2	74.2	75.2	76.2	77.9	(factor solar: 0,37)
66.9	68.3	69.6	69.9	71.0	(factor solar: 0,30)
63.5	63.7	64.2	64.6	64.9	(factor solar: 0,22)
58.1	57.8	56.9	55.9	54.8	(factor solar: 0,15)

(Cada coluna
corresponde a um nível
de isolamento (do 1 ao 5,
nesta ordem))

resultado 3 (percentagem de horas com desconforto, no Verão, %)

85.4	90.6	92.5	93.9	95.9	(factor solar: 0,75)
79.9	84.3	86.3	88.0	91.1	(factor solar: 0,60)
71.8	76.3	78.5	79.6	82.0	(factor solar: 0,45)
67.6	71.1	73.0	74.4	76.3	(factor solar: 0,37)
62.2	65.2	66.8	67.7	69.3	(factor solar: 0,30)
57.1	58.8	59.5	59.9	60.7	(factor solar: 0,22)
51.0	51.9	52.3	51.8	50.6	(factor solar: 0,15)

resultado 4 *(graus-hora de desconforto (°C.h) totais, no Verão)*

1356.9	1573.4	1711.1	1830.8	2053.6	<i>(factor solar: 0,75)</i>
1077.0	1230.0	1324.2	1402.7	1554.2	<i>(factor solar: 0,60)</i>
818.2	910.9	965.2	1005.2	1087.4	<i>(factor solar: 0,45)</i>
698.4	763.6	798.8	821.5	872.3	<i>(factor solar: 0,37)</i>
586.3	626.2	644.4	651.0	672.8	<i>(factor solar: 0,30)</i>
482.6	500.2	503.3	496.4	493.8	<i>(factor solar: 0,22)</i>
388.0	386.3	377.1	359.6	338.1	<i>(factor solar: 0,15)</i>

resultado 5 *(sobreaquecimento médio (°C), no Verão)*

2.6	2.9	3.1	3.3	3.6	<i>(factor solar: 0,75)</i>
2.2	2.4	2.6	2.7	2.8	<i>(factor solar: 0,60)</i>
1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	<i>(factor solar: 0,45)</i>
1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	<i>(factor solar: 0,37)</i>
1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	<i>(factor solar: 0,30)</i>
1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	<i>(factor solar: 0,22)</i>
1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	<i>(factor solar: 0,15)</i>

resultado 6 *(média do sobreaquecimento máximo (°C), no Verão)*

3.3	3.8	4.0	4.2	4.6	<i>(factor solar: 0,75)</i>
2.8	3.1	3.3	3.4	3.7	<i>(factor solar: 0,60)</i>
2.3	2.5	2.6	2.7	2.9	<i>(factor solar: 0,45)</i>
2.0	2.2	2.3	2.3	2.5	<i>(factor solar: 0,37)</i>
1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	<i>(factor solar: 0,30)</i>
1.6	1.6	1.7	1.7	1.6	<i>(factor solar: 0,22)</i>
1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	<i>(factor solar: 0,15)</i>

resultado 7 *(número de dias consecutivos com desconforto, por ano)*

74.3	81.8	101.0	107.3	113.8	<i>(factor solar: 0,75)</i>
65.8	73.8	87.3	100.5	112.3	<i>(factor solar: 0,60)</i>
63.3	68.3	74.8	84.8	101.8	<i>(factor solar: 0,45)</i>
61.5	64.8	72.3	80.0	90.0	<i>(factor solar: 0,37)</i>
59.5	62.3	68.8	76.0	81.3	<i>(factor solar: 0,30)</i>
44.8	59.0	65.0	70.8	75.8	<i>(factor solar: 0,22)</i>
37.0	37.3	44.5	44.3	43.8	<i>(factor solar: 0,15)</i>

Anexo B Valores máximos e mínimos mensais da temperatura de conforto

Tabela B.1 – Valores máximos mensais da temperatura de conforto, para os climas analisados (°C).

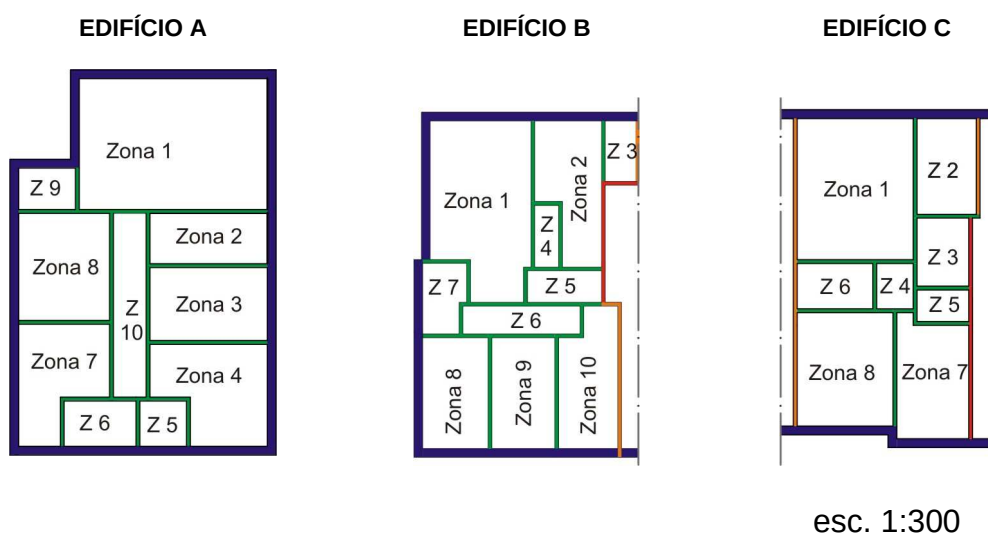
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Porto	22,2	22,6	23,8	23,8	24,8	25,7	26,7	26,3	26,3	25,4	23,7	23,0
Lisboa	23,5	23,4	24,0	24,7	25,6	26,3	27,2	27,4	27,3	25,8	25,4	23,6
Évora	22,4	22,7	23,7	23,8	25,5	27,1	27,7	27,5	27,0	25,9	25,1	24,7
Atenas	24,2	24,5	24,5	25,0	25,8	26,7	27,3	27,5	27,1	26,7	25,6	24,8
Nice	23,7	23,8	24,5	24,5	25,1	26,1	26,5	26,6	26,3	25,6	24,3	24,1

Tabela B.2 – Valores mínimos mensais da temperatura de conforto, para os climas analisados (°C).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Porto	21,3	21,2	21,5	21,8	23,1	23,5	25,1	25,0	24,2	23,0	22,1	21,0
Lisboa	21,3	21,8	22,6	23,2	24,4	24,4	25,9	26,2	25,4	24,7	22,6	21,8
Évora	20,9	21,1	21,2	22,7	22,9	24,2	26,2	26,1	25,9	24,0	22,0	21,1
Atenas	22,8	22,8	22,8	24,1	25,1	25,6	26,4	26,6	26,1	25,1	24,4	22,8
Nice	22,9	22,9	22,9	23,8	24,3	24,9	25,7	26,0	25,1	24,3	23,6	22,9

Anexo C Características geométricas dos edifícios A, B e C

C.1 Tipos de envoltantes dos edifícios A, B e C



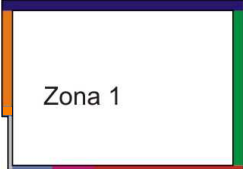
	Tipo de envoltante
	parede exterior
	parede interior tipo A ⁽¹⁾
	parede interior tipo B ⁽²⁾
	parede interior tipo C ⁽²⁾

⁽¹⁾ Paredes que dividem duas zonas do mesmo apartamento.

⁽²⁾ Paredes que dividem zonas de dois apartamentos distintos; um apartamento e a caixa de escadas ou o hall do elevador, etc.

Figura C.1 – Indicação geral dos tipos de paredes dos edifícios A, B e C

C.2 Características geométricas do edifício A

 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 1</th><th>tipo de envoltente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>18,92</td><td>1,87</td></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>12,17</td><td>1,87</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>12,82</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>3,24</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>4,05</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>5,80</td><td>3,78</td></tr><tr><td>teto</td><td>cobertura exterior</td><td>40,04</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento térreo</td><td>40,04</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 1	tipo de envoltente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)		parede exterior	18,92	1,87		parede exterior	12,17	1,87		parede interior tipo A	12,82	-----		parede interior tipo A	3,24	-----		parede interior tipo A	4,05	-----		parede exterior	5,80	3,78	teto	cobertura exterior	40,04	-----	piso	pavimento térreo	40,04	-----
ZONA 1	tipo de envoltente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)																																		
	parede exterior	18,92	1,87																																		
	parede exterior	12,17	1,87																																		
	parede interior tipo A	12,82	-----																																		
	parede interior tipo A	3,24	-----																																		
	parede interior tipo A	4,05	-----																																		
	parede exterior	5,80	3,78																																		
teto	cobertura exterior	40,04	-----																																		
piso	pavimento térreo	40,04	-----																																		
 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 2</th><th>tipo de envoltente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>4,19</td><td>1,21</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>12,82</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>12,82</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>5,40</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>cobertura exterior</td><td>9,50</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento térreo</td><td>9,50</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 2	tipo de envoltente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)		parede exterior	4,19	1,21		parede interior tipo A	12,82	-----		parede interior tipo A	12,82	-----		parede interior tipo A	5,40	-----	teto	cobertura exterior	9,50	-----	piso	pavimento térreo	9,50	-----								
ZONA 2	tipo de envoltente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)																																		
	parede exterior	4,19	1,21																																		
	parede interior tipo A	12,82	-----																																		
	parede interior tipo A	12,82	-----																																		
	parede interior tipo A	5,40	-----																																		
teto	cobertura exterior	9,50	-----																																		
piso	pavimento térreo	9,50	-----																																		
 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 3</th><th>tipo de envoltente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>12,82</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>5,96</td><td>1,87</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>12,82</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>7,83</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>cobertura exterior</td><td>13,77</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento térreo</td><td>13,77</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 3	tipo de envoltente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)		parede interior tipo A	12,82	-----		parede exterior	5,96	1,87		parede interior tipo A	12,82	-----		parede interior tipo A	7,83	-----	teto	cobertura exterior	13,77	-----	piso	pavimento térreo	13,77	-----								
ZONA 3	tipo de envoltente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)																																		
	parede interior tipo A	12,82	-----																																		
	parede exterior	5,96	1,87																																		
	parede interior tipo A	12,82	-----																																		
	parede interior tipo A	7,83	-----																																		
teto	cobertura exterior	13,77	-----																																		
piso	pavimento térreo	13,77	-----																																		
 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 4</th><th>tipo de envoltente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>12,82</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>9,06</td><td>1,87</td></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>8,91</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>8,37</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>5,67</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>cobertura exterior</td><td>16,41</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento térreo</td><td>16,41</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 4	tipo de envoltente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)		parede interior tipo A	12,82	-----		parede exterior	9,06	1,87		parede exterior	8,91	-----		parede interior tipo A	8,37	-----		parede interior tipo A	5,67	-----	teto	cobertura exterior	16,41	-----	piso	pavimento térreo	16,41	-----				
ZONA 4	tipo de envoltente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)																																		
	parede interior tipo A	12,82	-----																																		
	parede exterior	9,06	1,87																																		
	parede exterior	8,91	-----																																		
	parede interior tipo A	8,37	-----																																		
	parede interior tipo A	5,67	-----																																		
teto	cobertura exterior	16,41	-----																																		
piso	pavimento térreo	16,41	-----																																		

⁽¹⁾ Área da parede, sendo já excluída a área de janelas. Pé direito igual a 2,70 m.

Figura C.2 – Características geométricas do edifício A (zonas 1, 2, 3 e 4)

Z 5 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 5</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>1,08</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>3,59</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,78</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede exterior</td><td>4,79</td><td>0,20</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>cobertura exterior</td><td>3,33</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento térreo</td><td>3,33</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 5	tipo de envolvente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)		parede interior tipo A	1,08	-----		parede interior tipo A	3,59	-----		parede interior tipo A	4,78	-----		parede exterior	4,79	0,20		parede interior tipo A	4,86	-----	teto	cobertura exterior	3,33	-----	piso	pavimento térreo	3,33	-----				
ZONA 5	tipo de envolvente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)																																		
	parede interior tipo A	1,08	-----																																		
	parede interior tipo A	3,59	-----																																		
	parede interior tipo A	4,78	-----																																		
	parede exterior	4,79	0,20																																		
	parede interior tipo A	4,86	-----																																		
teto	cobertura exterior	3,33	-----																																		
piso	pavimento térreo	3,33	-----																																		
Z 6 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 6</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>2,43</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede exterior</td><td>7,25</td><td>0,44</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>cobertura exterior</td><td>5,13</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento térreo</td><td>5,13</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 6	tipo de envolvente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)		parede interior tipo A	4,86	-----		parede interior tipo A	2,43	-----		parede interior tipo A	4,86	-----		parede exterior	7,25	0,44		parede interior tipo A	4,86	-----	teto	cobertura exterior	5,13	-----	piso	pavimento térreo	5,13	-----				
ZONA 6	tipo de envolvente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)																																		
	parede interior tipo A	4,86	-----																																		
	parede interior tipo A	2,43	-----																																		
	parede interior tipo A	4,86	-----																																		
	parede exterior	7,25	0,44																																		
	parede interior tipo A	4,86	-----																																		
teto	cobertura exterior	5,13	-----																																		
piso	pavimento térreo	5,13	-----																																		
Zona 7 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 7</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>10,12</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>7,83</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede exterior</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede exterior</td><td>11,22</td><td>1,87</td></tr><tr><td>teto</td><td>cobertura exterior</td><td>14,38</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento térreo</td><td>14,38</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 7	tipo de envolvente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)		parede interior tipo A	10,12	-----		parede interior tipo A	7,83	-----		parede interior tipo A	4,86	-----		parede interior tipo A	4,86	-----		parede exterior	4,86	-----		parede exterior	11,22	1,87	teto	cobertura exterior	14,38	-----	piso	pavimento térreo	14,38	-----
ZONA 7	tipo de envolvente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)																																		
	parede interior tipo A	10,12	-----																																		
	parede interior tipo A	7,83	-----																																		
	parede interior tipo A	4,86	-----																																		
	parede interior tipo A	4,86	-----																																		
	parede exterior	4,86	-----																																		
	parede exterior	11,22	1,87																																		
teto	cobertura exterior	14,38	-----																																		
piso	pavimento térreo	14,38	-----																																		
Zona 8 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 8</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>6,48</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>3,24</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>11,47</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>10,12</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede exterior</td><td>9,60</td><td>1,87</td></tr><tr><td>teto</td><td>cobertura exterior</td><td>15,94</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento térreo</td><td>15,94</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 8	tipo de envolvente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)		parede interior tipo A	6,48	-----		parede interior tipo A	3,24	-----		parede interior tipo A	11,47	-----		parede interior tipo A	10,12	-----		parede exterior	9,60	1,87	teto	cobertura exterior	15,94	-----	piso	pavimento térreo	15,94	-----				
ZONA 8	tipo de envolvente	área (m²) ⁽¹⁾	área das janelas (m²)																																		
	parede interior tipo A	6,48	-----																																		
	parede interior tipo A	3,24	-----																																		
	parede interior tipo A	11,47	-----																																		
	parede interior tipo A	10,12	-----																																		
	parede exterior	9,60	1,87																																		
teto	cobertura exterior	15,94	-----																																		
piso	pavimento térreo	15,94	-----																																		

⁽¹⁾ Área da parede, sendo já excluída a área de janelas. Pé direito igual a 2,70 m.

Figura C.3 – Características geométricas do edifício A (zonas 5, 6, 7 e 8)



(sem escala)

ZONA 9	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)
	parede exterior	6,48	-----
	parede interior tipo A	4,05	-----
	parede interior tipo A	6,48	-----
	parede exterior	3,77	0,28
teto	cobertura exterior	3,6	-----
piso	pavimento térreo	3,6	-----



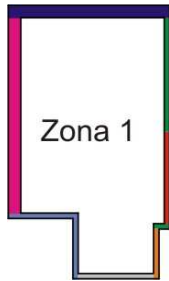
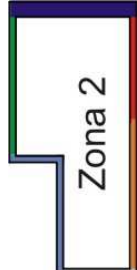
(sem escala)

ZONA 10	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)
	parede interior tipo A	3,91	-----
	parede interior tipo A	5,4	-----
	parede interior tipo A	7,83	-----
	parede interior tipo A	5,67	-----
	parede interior tipo A	1,08	-----
	parede interior tipo A	2,43	-----
	parede interior tipo A	7,83	-----
	parede interior tipo A	11,47	-----
teto	cobertura exterior	10,58	-----
piso	pavimento térreo	10,58	-----

⁽¹⁾ Área da parede, sendo já excluída a área de janelas. Pé direito igual a 2,70 m.

Figura C.4 – Características geométricas do edifício A (zonas 9 e 10)

C.3 Características geométricas do edifício B

 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 1</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>8,45</td><td>2,75</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>8,64</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>6,61</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>3,77</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>5,67</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>8,50</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>13,75</td><td>1,10</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>25,97</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>25,97</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 1	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede exterior	8,45	2,75		parede interior tipo A	8,64	-----		parede interior tipo A	6,61	-----		parede interior tipo A	3,77	-----		parede interior tipo A	5,67	-----		parede interior tipo A	8,50	-----		parede exterior	13,75	1,10	teto	pavimento intermédio	25,97	-----	piso	pavimento intermédio	25,97	-----
ZONA 1	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																						
	parede exterior	8,45	2,75																																						
	parede interior tipo A	8,64	-----																																						
	parede interior tipo A	6,61	-----																																						
	parede interior tipo A	3,77	-----																																						
	parede interior tipo A	5,67	-----																																						
	parede interior tipo A	8,50	-----																																						
	parede exterior	13,75	1,10																																						
teto	pavimento intermédio	25,97	-----																																						
piso	pavimento intermédio	25,97	-----																																						
 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 2</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>5,58</td><td>1,98</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>6,48</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo B</td><td>8,77</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>4,59</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>9,17</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>8,64</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>13,38</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>13,38</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 2	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede exterior	5,58	1,98		parede interior tipo A	6,48	-----		parede interior tipo B	8,77	-----		parede interior tipo A	4,59	-----		parede interior tipo A	9,17	-----		parede interior tipo A	8,64	-----	teto	pavimento intermédio	13,38	-----	piso	pavimento intermédio	13,38	-----				
ZONA 2	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																						
	parede exterior	5,58	1,98																																						
	parede interior tipo A	6,48	-----																																						
	parede interior tipo B	8,77	-----																																						
	parede interior tipo A	4,59	-----																																						
	parede interior tipo A	9,17	-----																																						
	parede interior tipo A	8,64	-----																																						
teto	pavimento intermédio	13,38	-----																																						
piso	pavimento intermédio	13,38	-----																																						
 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 3</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>2,85</td><td>0,66</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo C</td><td>6,48</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo B</td><td>3,51</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>6,48</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>3,12</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>3,12</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 3	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede exterior	2,85	0,66		parede interior tipo C	6,48	-----		parede interior tipo B	3,51	-----		parede interior tipo A	6,48	-----	teto	pavimento intermédio	3,12	-----	piso	pavimento intermédio	3,12	-----												
ZONA 3	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																						
	parede exterior	2,85	0,66																																						
	parede interior tipo C	6,48	-----																																						
	parede interior tipo B	3,51	-----																																						
	parede interior tipo A	6,48	-----																																						
teto	pavimento intermédio	3,12	-----																																						
piso	pavimento intermédio	3,12	-----																																						
 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 4</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>9,17</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>2,56</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>6,61</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>2,33</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>2,33</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 4	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede interior tipo A	9,17	-----		parede interior tipo A	2,56	-----		parede interior tipo A	6,61	-----	teto	pavimento intermédio	2,33	-----	piso	pavimento intermédio	2,33	-----																
ZONA 4	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																						
	parede interior tipo A	9,17	-----																																						
	parede interior tipo A	2,56	-----																																						
	parede interior tipo A	6,61	-----																																						
teto	pavimento intermédio	2,33	-----																																						
piso	pavimento intermédio	2,33	-----																																						

⁽¹⁾ Área da parede, sendo já excluída a área de janelas. Pé direito igual a 2,70 m.

Figura C.5 – Características geométricas do edifício B (zonas 1, 2, 3 e 4)



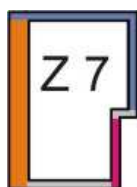
(sem escala)

ZONA 5	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)
	parede interior tipo A	2,56	-----
	parede interior tipo A	4,59	-----
	parede interior tipo B	3,37	-----
	parede interior tipo A	2,29	-----
	parede interior tipo A	5,67	-----
	parede interior tipo A	3,77	-----
teto	pavimento intermédio	3,88	-----
piso	pavimento intermédio	3,88	-----



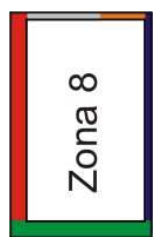
(sem escala)

ZONA 6	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)
	parede interior tipo A	5,67	-----
	parede interior tipo A	5,67	-----
	parede interior tipo A	5,26	-----
	parede interior tipo A	6,75	-----
	parede interior tipo A	2,70	-----
	parede interior tipo A	3,37	-----
teto	pavimento intermédio	5,11	-----
piso	pavimento intermédio	5,11	-----



(sem escala)

ZONA 7	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)
	parede interior tipo A	8,50	-----
	parede interior tipo A	3,37	-----
	parede interior tipo A	5,13	-----
	parede exterior	8,63	0,55
teto	pavimento intermédio	5,78	-----
piso	pavimento intermédio	5,78	-----



(sem escala)

ZONA 8	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)
	parede interior tipo A	5,13	-----
	parede interior tipo A	2,70	-----
	parede interior tipo A	11,88	-----
	parede exterior	7,13	1,10
	parede exterior	11,88	-----
teto	pavimento intermédio	13,42	-----
piso	pavimento intermédio	13,42	-----

⁽¹⁾ Área da parede, sendo já excluída a área de janelas. Pé direito igual a 2,70 m.

Figura C.6 – Características geométricas do edifício B (zonas 5, 6, 7 e 8)

</

⁽¹⁾ Área da parede, sendo já excluída a área de janelas. Pé direito igual a 2,70 m.

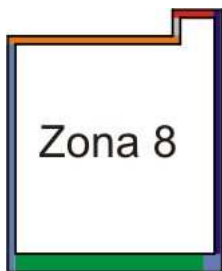
Figura C.7 – Características geométricas do edifício B (zonas 9 e 10)

C.4 Características geométricas do edifício C

Zona 1 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 1</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td> </td><td>parede exterior</td><td>10,7</td><td>2,53</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>10,66</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,05</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,72</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>8,10</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo C</td><td>15,12</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>27,44</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>27,44</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 1	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede exterior	10,7	2,53		parede interior tipo A	10,66	-----		parede interior tipo A	4,05	-----		parede interior tipo A	4,72	-----		parede interior tipo A	8,10	-----		parede interior tipo C	15,12	-----	teto	pavimento intermédio	27,44	-----	piso	pavimento intermédio	27,44	-----
ZONA 1	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																		
	parede exterior	10,7	2,53																																		
	parede interior tipo A	10,66	-----																																		
	parede interior tipo A	4,05	-----																																		
	parede interior tipo A	4,72	-----																																		
	parede interior tipo A	8,10	-----																																		
	parede interior tipo C	15,12	-----																																		
teto	pavimento intermédio	27,44	-----																																		
piso	pavimento intermédio	27,44	-----																																		
Z 2 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 2</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td> </td><td>parede exterior</td><td>5,10</td><td>1,65</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo C</td><td>11,07</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>5,53</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>10,66</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>9,50</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>9,50</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 2	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede exterior	5,10	1,65		parede interior tipo C	11,07	-----		parede interior tipo A	5,53	-----		parede interior tipo A	10,66	-----	teto	pavimento intermédio	9,50	-----	piso	pavimento intermédio	9,50	-----								
ZONA 2	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																		
	parede exterior	5,10	1,65																																		
	parede interior tipo C	11,07	-----																																		
	parede interior tipo A	5,53	-----																																		
	parede interior tipo A	10,66	-----																																		
teto	pavimento intermédio	9,50	-----																																		
piso	pavimento intermédio	9,50	-----																																		
Z 3 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 3</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>5,53</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo B</td><td>7,29</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>5,53</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>2,83</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,05</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>5,53</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>5,53</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 3	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede interior tipo A	5,53	-----		parede interior tipo B	7,29	-----		parede interior tipo A	5,53	-----		parede interior tipo A	2,83	-----		parede interior tipo A	4,05	-----	teto	pavimento intermédio	5,53	-----	piso	pavimento intermédio	5,53	-----				
ZONA 3	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																		
	parede interior tipo A	5,53	-----																																		
	parede interior tipo B	7,29	-----																																		
	parede interior tipo A	5,53	-----																																		
	parede interior tipo A	2,83	-----																																		
	parede interior tipo A	4,05	-----																																		
teto	pavimento intermédio	5,53	-----																																		
piso	pavimento intermédio	5,53	-----																																		
Z 4 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 4</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,72</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>2,83</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>1,62</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>2,16</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>2,16</td><td>-----</td></tr><tr><td> </td><td>parede interior tipo A</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>3,15</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>3,15</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 4	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede interior tipo A	4,72	-----		parede interior tipo A	2,83	-----		parede interior tipo A	1,62	-----		parede interior tipo A	2,16	-----		parede interior tipo A	2,16	-----		parede interior tipo A	4,86	-----	teto	pavimento intermédio	3,15	-----	piso	pavimento intermédio	3,15	-----
ZONA 4	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																		
	parede interior tipo A	4,72	-----																																		
	parede interior tipo A	2,83	-----																																		
	parede interior tipo A	1,62	-----																																		
	parede interior tipo A	2,16	-----																																		
	parede interior tipo A	2,16	-----																																		
	parede interior tipo A	4,86	-----																																		
teto	pavimento intermédio	3,15	-----																																		
piso	pavimento intermédio	3,15	-----																																		

⁽¹⁾ Área da parede, sendo já excluída a área de janelas. Pé direito igual a 2,70 m.

Figura C.8 – Características geométricas do edifício C (zonas 1, 2, 3 e 4)

 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 5</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>5,53</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo B</td><td>3,37</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>6,88</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>1,62</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>2,56</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>2,56</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 5	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede interior tipo A	5,53	-----		parede interior tipo B	3,37	-----		parede interior tipo A	6,88	-----		parede interior tipo A	1,62	-----	teto	pavimento intermédio	2,56	-----	piso	pavimento intermédio	2,56	-----								
ZONA 5	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																		
	parede interior tipo A	5,53	-----																																		
	parede interior tipo B	3,37	-----																																		
	parede interior tipo A	6,88	-----																																		
	parede interior tipo A	1,62	-----																																		
teto	pavimento intermédio	2,56	-----																																		
piso	pavimento intermédio	2,56	-----																																		
 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 7</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>8,10</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>8,10</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo C</td><td>4,86</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>5,40</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>5,40</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 7	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede interior tipo A	8,10	-----		parede interior tipo A	4,86	-----		parede interior tipo A	8,10	-----		parede interior tipo C	4,86	-----	teto	pavimento intermédio	5,40	-----	piso	pavimento intermédio	5,40	-----								
ZONA 7	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																		
	parede interior tipo A	8,10	-----																																		
	parede interior tipo A	4,86	-----																																		
	parede interior tipo A	8,10	-----																																		
	parede interior tipo C	4,86	-----																																		
teto	pavimento intermédio	5,40	-----																																		
piso	pavimento intermédio	5,40	-----																																		
 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 5</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>2,16</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>6,88</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo B</td><td>10,80</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>6,45</td><td>1,65</td></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>1,35</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>10,80</td><td>-----</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>12,4</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>12,4</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 5	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede interior tipo A	2,16	-----		parede interior tipo A	6,88	-----		parede interior tipo B	10,80	-----		parede exterior	6,45	1,65		parede exterior	1,35	-----		parede interior tipo A	10,80	-----	teto	pavimento intermédio	12,4	-----	piso	pavimento intermédio	12,4	-----
ZONA 5	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																		
	parede interior tipo A	2,16	-----																																		
	parede interior tipo A	6,88	-----																																		
	parede interior tipo B	10,80	-----																																		
	parede exterior	6,45	1,65																																		
	parede exterior	1,35	-----																																		
	parede interior tipo A	10,80	-----																																		
teto	pavimento intermédio	12,4	-----																																		
piso	pavimento intermédio	12,4	-----																																		
 (sem escala)	<table><tr><th>ZONA 5</th><th>tipo de envolvente</th><th>área (m²) ⁽¹⁾</th><th>área das janelas (m²)</th></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>8,10</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>10,80</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo A</td><td>2,16</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede interior tipo C</td><td>10,80</td><td>-----</td></tr><tr><td></td><td>parede exterior</td><td>8,13</td><td>2,53</td></tr><tr><td>teto</td><td>pavimento intermédio</td><td>15,80</td><td>-----</td></tr><tr><td>piso</td><td>pavimento intermédio</td><td>15,80</td><td>-----</td></tr></table>	ZONA 5	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)		parede interior tipo A	8,10	-----		parede interior tipo A	10,80	-----		parede interior tipo A	2,16	-----		parede interior tipo C	10,80	-----		parede exterior	8,13	2,53	teto	pavimento intermédio	15,80	-----	piso	pavimento intermédio	15,80	-----				
ZONA 5	tipo de envolvente	área (m ²) ⁽¹⁾	área das janelas (m ²)																																		
	parede interior tipo A	8,10	-----																																		
	parede interior tipo A	10,80	-----																																		
	parede interior tipo A	2,16	-----																																		
	parede interior tipo C	10,80	-----																																		
	parede exterior	8,13	2,53																																		
teto	pavimento intermédio	15,80	-----																																		
piso	pavimento intermédio	15,80	-----																																		

⁽¹⁾ Área da parede, sendo já excluída a área de janelas. Pé direito igual a 2,70 m.

Figura C.9 – Características geométricas do edifício B (zonas 5, 6, 7 e 8)

Anexo D Coeficientes globais de transferência de calor da envolvente

Durante a aplicação do modelo (Capítulo 5), foi necessário obter algumas propriedades térmicas referentes aos elementos construtivos considerados nas simulações, nomeadamente o coeficiente global de transferência de calor, U , e o coeficiente de transferência de calor na superfície exterior, h_e . Esses valores seriam posteriormente utilizados nas equações do modelo proposto no Capítulo 5.

O programa TRNSYS possui um algoritmo de cálculo complexo, que calcula os fluxos de calor horários no edifício, em regime transiente. Era necessário encontrar os valores de U e h_e equivalentes às situações complexas, simuladas. Para tal, foram efectuadas simulações dos edifícios A, B e C em regime permanente, com as seguintes características:

- edifícios A, B e C considerados como edifícios monozona, ou seja, sem as paredes interiores.
- temperatura do ar exterior constante, igual à temperatura média mensal do ar exterior, para o clima considerado ;
- temperatura do ar interior constante, igual à temperatura média mensal do ar interior entre todas as zonas do edifício em questão;
- intensidade de radiação solar incidente nas superfícies exteriores constante, igual à intensidade média mensal entre todas as orientações do edifício em questão;
- temperatura do céu constante, igual à temperatura média do céu mensal, para o clima considerado ²;
- humidade relativa do ar constante, igual à humidade relativa média do ar mensal, para o clima considerado ;
- janelas completamente sombreadas, ou seja, com factor solar igual à zero³;
- taxa de infiltração do ar pelas janelas igual a zero;
- ausência de ganhos internos;

²A temperatura do céu é um dado de entrada da rotina que simula o desempenho térmico do edifício. O TRNSYS possui uma rotina que permite o cálculo da temperatura do céu a partir dos dados climáticos.

³No TRNSYS, o factor solar corresponde a zero, quando é especificado sombreamento exterior em toda a área de janela (ver Anexo E).

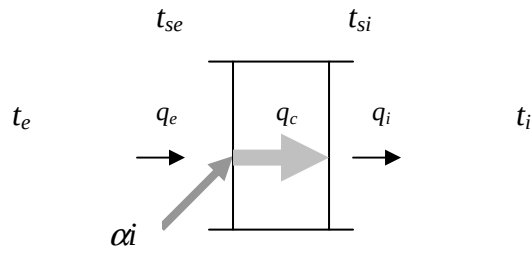
Essas simulações em regime permanente foram conduzidas para uma grande parte dos casos nos quais o modelo foi aplicado, considerando-se combinações de temperatura exterior, humidade relativa, intensidade de radiação solar e temperatura interior correspondentes a todos os meses do ano.

Como todos os dados de entrada eram constantes, os casos simulados entraram em regime permanente após alguns incrementos de tempo (no caso, após aproximadamente 150 horas). Os dados de saída dessas simulações apresentaram-se também constantes ao longo do tempo:

- temperaturas superficiais exterior e interior das paredes e janelas;
- fluxo de calor entre a superfície interior das paredes e o ambiente interior, q_i ;
- fluxo de calor entre a superfície exterior das paredes e o ambiente exterior, q_e .

Por tratar-se de regime permanente, os esquemas representativos do fluxo de calor nos elementos opacos e transparentes da envolvente são indicados nas figuras D.1 e D.2, onde:

q_e	fluxo de calor por convecção e radiação, na superfície exterior (W/m^2)
q_i	fluxo de calor por convecção e radiação, na superfície interior (W/m^2)
q_c	fluxo de calor por condução, da superfície exterior para a interior (W/m^2)
t_e	temperatura exterior ($^{\circ}\text{C}$)
t_i	temperatura interior ($^{\circ}\text{C}$)
t_{se}	temperatura superficial exterior ($^{\circ}\text{C}$)
t_{si}	temperatura superficial interior ($^{\circ}\text{C}$)
h_e	coeficiente de transferência de calor na superfície exterior ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_i	coeficiente de transferência de calor na superfície interior ($\text{W/m}^2\text{K}$)
e	espessura do elemento (m)
λ	condutibilidade térmica do material do elemento (W/mK)
i	fluxo de radiação solar incidente na superfície exterior (W/m^2)
α	coeficiente de absorção da radiação solar
U	coeficiente global de transferência de calor do elemento ($\text{W/m}^2\text{K}$)



$$q_e = h_e \cdot (t_e - t_{se}) + \alpha \cdot i$$

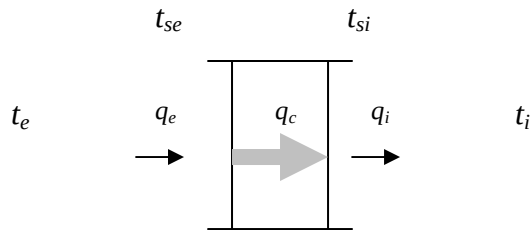
$$q_i = h_i (t_{si} - t_i)$$

$$q_c = \frac{\lambda}{e} (t_{se} - t_{si})$$

$$q_e = q_i = q_c = q$$

$$q = U \cdot (t_e - t_i) + \frac{U \cdot \alpha \cdot i}{h_e}$$

Figura D.1 - Fluxo de calor nos elementos opacos da envolvente, em regime permanente ⁴



$$q_e = h_e \cdot (t_e - t_{se})$$

$$q_i = h_i (t_{si} - t_i)$$

$$q_c = \frac{\lambda}{e} (t_{se} - t_{si})$$

$$q_e = q_i = q_c = q$$

$$q = U \cdot (t_e - t_i)$$

Figura D.2 - Fluxo de calor nos elementos transparentes da envolvente, em regime permanente

⁴ Ver também a demonstração desta equação no Anexo M.

Portanto, através da aplicação das equações indicadas nas figuras D.1 e D.2, foi possível encontrar as propriedades térmicas desejadas, U e h_e , para todos os casos considerados, em todos os meses do ano. Após uma análise comparativa dos resultados encontrados, foram adoptados os seguintes valores, considerados como representativos de todas as situações.

Tabela D.1 – Propriedades térmicas

Propriedades térmicas	Nível de isolamento da envolvente				
	1	2	3	4	5
U paredes exteriores (W/m ² K)	0,91	0,64	0,47	0,37	0,20
U cobertura (W/m ² K)	0,80	0,50	0,38	0,27	0,14
U piso (W/m ² K)	0,57				
U vidro (vidro duplo) (W/m ² K)	7,41				
h_e (W/m ² K)	33,3				

Anexo E Factores solares das janelas utilizadas nas simulações

E.1 Definição de factor de sombreamento

No programa TRNSYS, ao se definir o sombreamento exterior das janelas, deve-se indicar o seu *factor de sombreamento*. De acordo com a definição do programa, este corresponde à relação entre a área sombreada e a área total da janela. Ou seja, quando uma janela possui 10% de sua área com sombreamento exterior, seu factor é igual a 0,10. Uma janela sem sombreamento possuiria um factor igual a zero, enquanto uma janela completamente sombreada possuiria um factor igual a 1 (um).

Nas simulações, foram consideradas 7 possibilidades de sombreamento exterior, correspondentes aos seguintes factores, conforme a definição acima:

- zero / 0,20 / 0,40 / 0,50 / 0,60 / 0,70 e 0,80.

E.2 Definição de factor solar

Segundo o regulamento térmico português, o RCCTE [7]:

“Factor solar de um vidro é o quociente entre a energia solar transmitida através do vidro para o interior e a energia solar nele incidente”.

“Factor solar de um vão envidraçado é o quociente entre a energia solar transmitida para o interior através de um vão envidraçado com o respectivo dispositivo de protecção e a energia da radiação solar que nele incide”.

O factor solar do vidro utilizado nas simulações foi fornecido através do ficheiro gerado pelo programa WINDOW [33] (ver secção 3.4), e é igual a 0,75. Restava então encontrar o factor solar do vão envidraçado, ou seja, do conjunto, vidro mais sombreador, para os factores de sombreamento indicados em E.1.

De acordo com informações obtidas através dos fabricantes do TRNSYS, quando se define o sombreamento exterior de uma janela no programa, não há transmissão de energia solar para o interior através da parte que encontra-se sombreada. Por exemplo, quando o factor de sombreamento é igual a 1, a energia solar transmitida é igual a zero.

Considerando-se, por exemplo, uma janela com 30% de sua área sombreada e vidro com factor solar de 0,75. O factor solar de seu vão envidraçado seria igual ao produto do factor solar do seu vidro e da percentagem de sua área que não encontra-se sombreada, ou seja, $(1-0,30) * 0,75$, o que seria igual a 0,52.

E.3 Factores solares para as situações simuladas nos estudos paramétricos

Dessa forma, seguindo a linha de raciocínio apresentada nas secções acima, tem-se indicados na tabela E.1, os factores solares do conjunto vidro mais sombreador, para as sete possibilidades consideradas nos estudos paramétricos.

Tabela E.1 – Factores solares das janelas correspondentes às diferentes possibilidades de sombreamento

possibilidade de sombreamento	factor de sombreamento, segundo a definição do TRNSYS	área relativa da janela que não encontra-se sombreada	factor solar da janela (vidro + sombreador)
1	0	1,00	0,75
2	0,20	0,80	0,60
3	0,40	0,60	0,45
4	0,50	0,50	0,37
5	0,60	0,40	0,30
6	0,70	0,30	0,22
7	0,80	0,20	0,15

Anexo F Valores mensais de temperatura do solo

Para cada hora do mês, nos locais indicados, foram utilizados os valores de temperatura do solo correspondentes, indicados na tabela F.1.

Tabela F.1 – Valores mensais de temperatura do solo (°C)

	temperatura do solo (°C) ⁽¹⁾											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Porto	10,2	9,8	10,5	11,6	14,6	10,2	18,4	18,8	18,0	16,3	13,9	11,7
Lisboa	11,4	10,9	11,8	13,1	16,6	11,4	21,1	21,7	20,8	18,7	15,8	13,2
Évora	10,0	9,4	10,4	12,0	16,2	10,0	21,5	22,2	18,6	18,6	15,2	12,1

⁽¹⁾ Dados obtidos em [93].

Anexo G Resultados para os edifícios B e C, utilizados como habitação, com ventilação mínima, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice

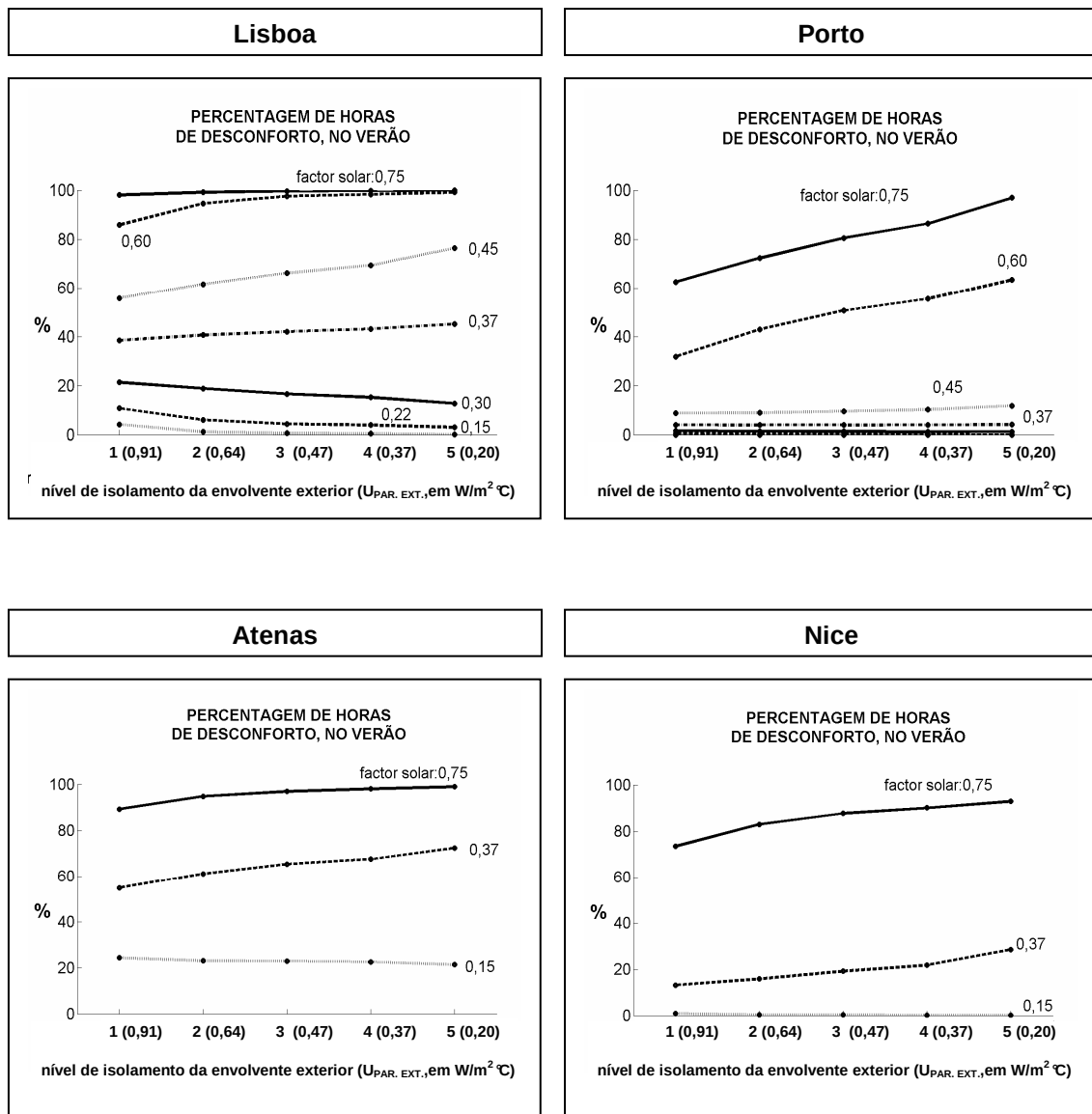


Figura G.1 - Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factor solar das janelas.

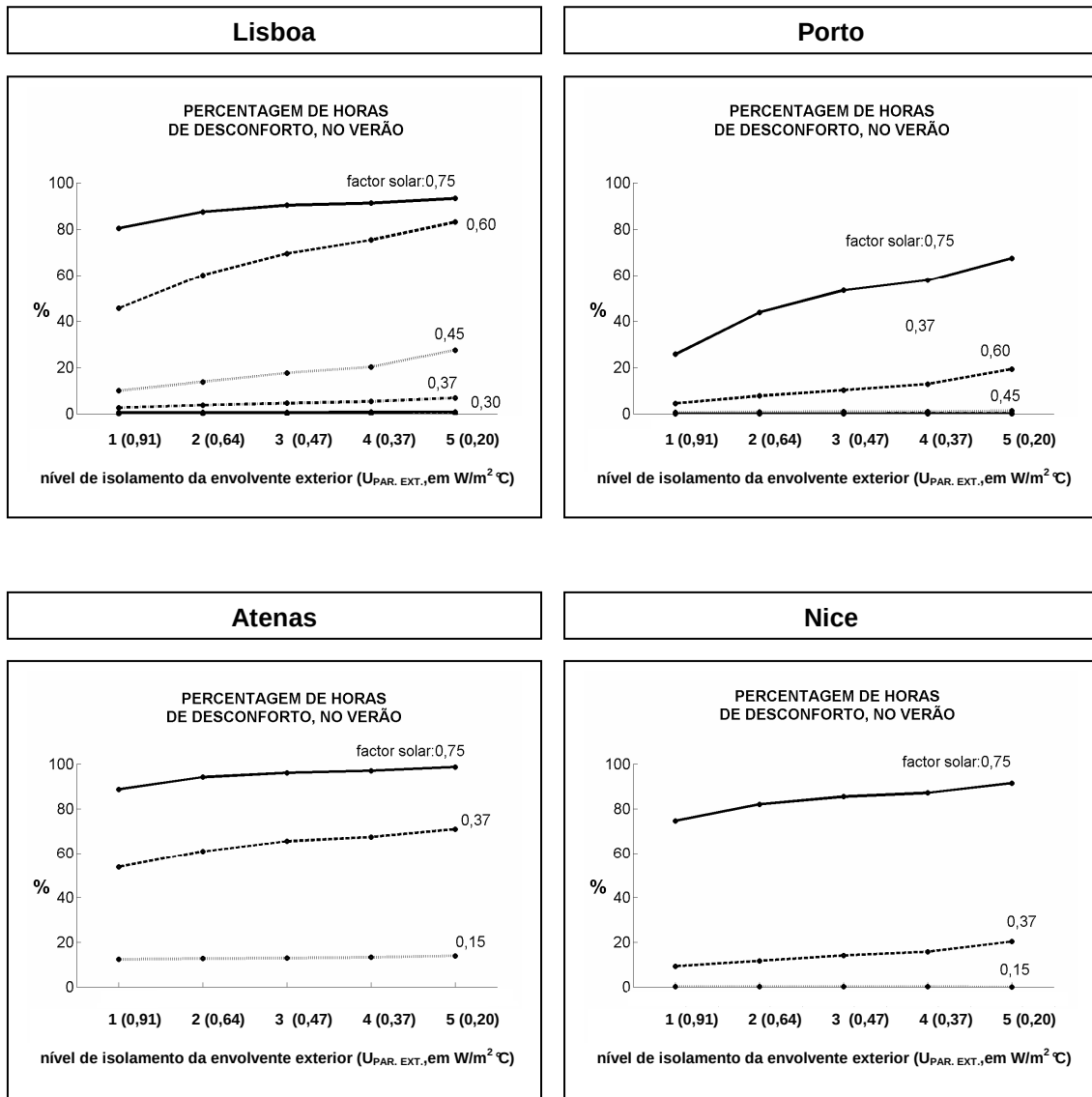


Figura G.2 - Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício C, utilizado como habitação, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factor solar das janelas.

Anexo H Resultados para os edifícios B e C, utilizados como habitação, com variadas possibilidades de ventilação, em Lisboa e no Porto

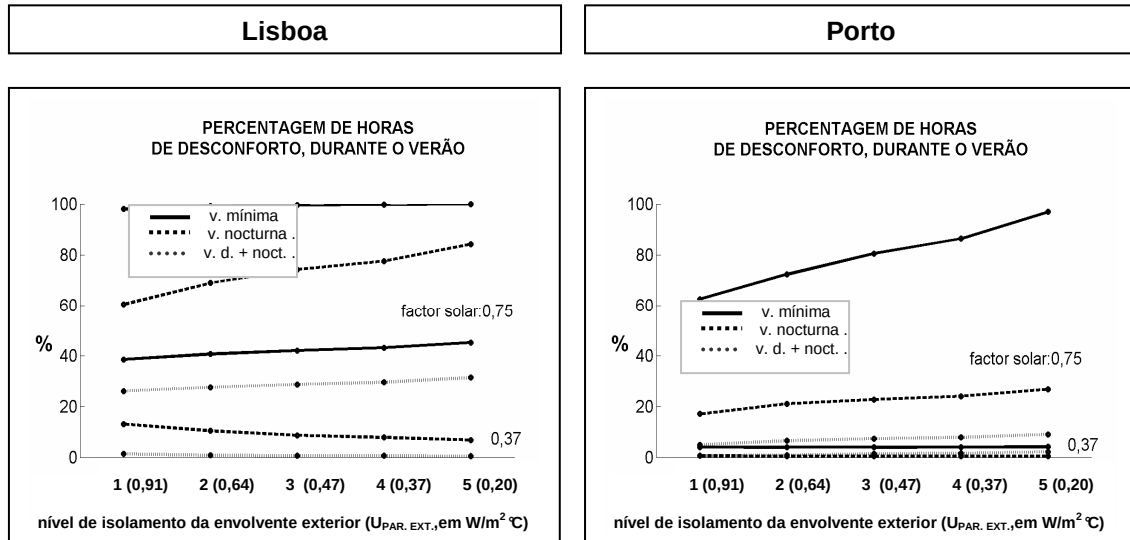


Figura H.1 – Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Lisboa e no Porto, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

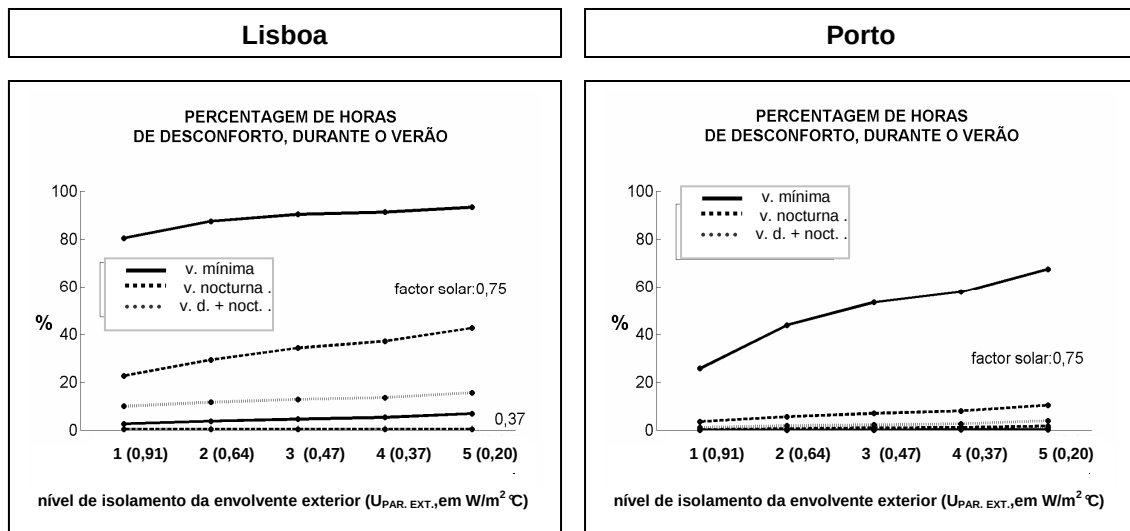


Figura H.2 – Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício C, utilizado como habitação, em Lisboa e no Porto, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

Anexo I Resultados para os edifícios B e C, utilizados como habitação, com variadas possibilidades de cor exterior, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice

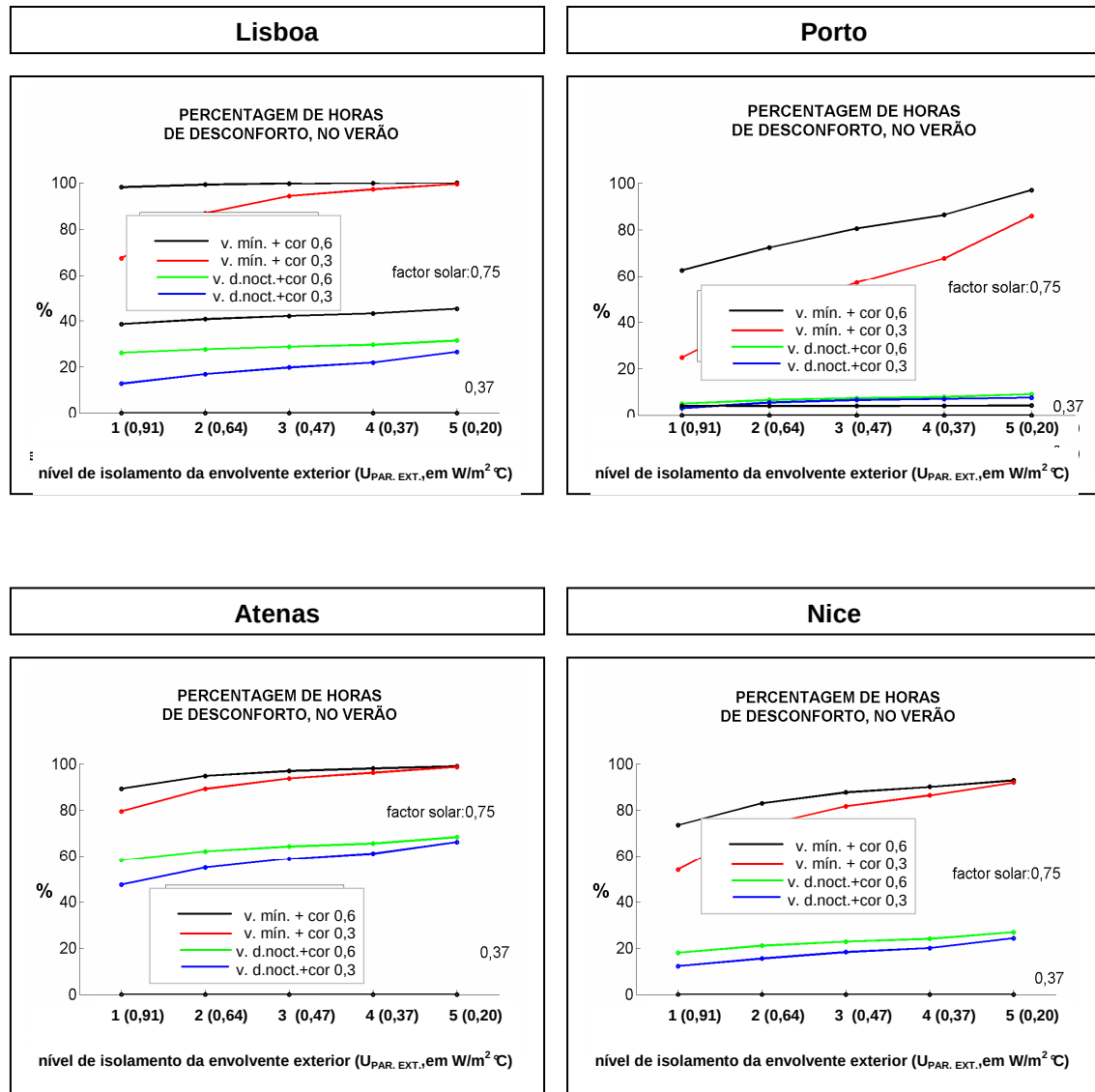


Figura I.1 – Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como habitação, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente, cor das paredes exteriores e factores solares das janelas.

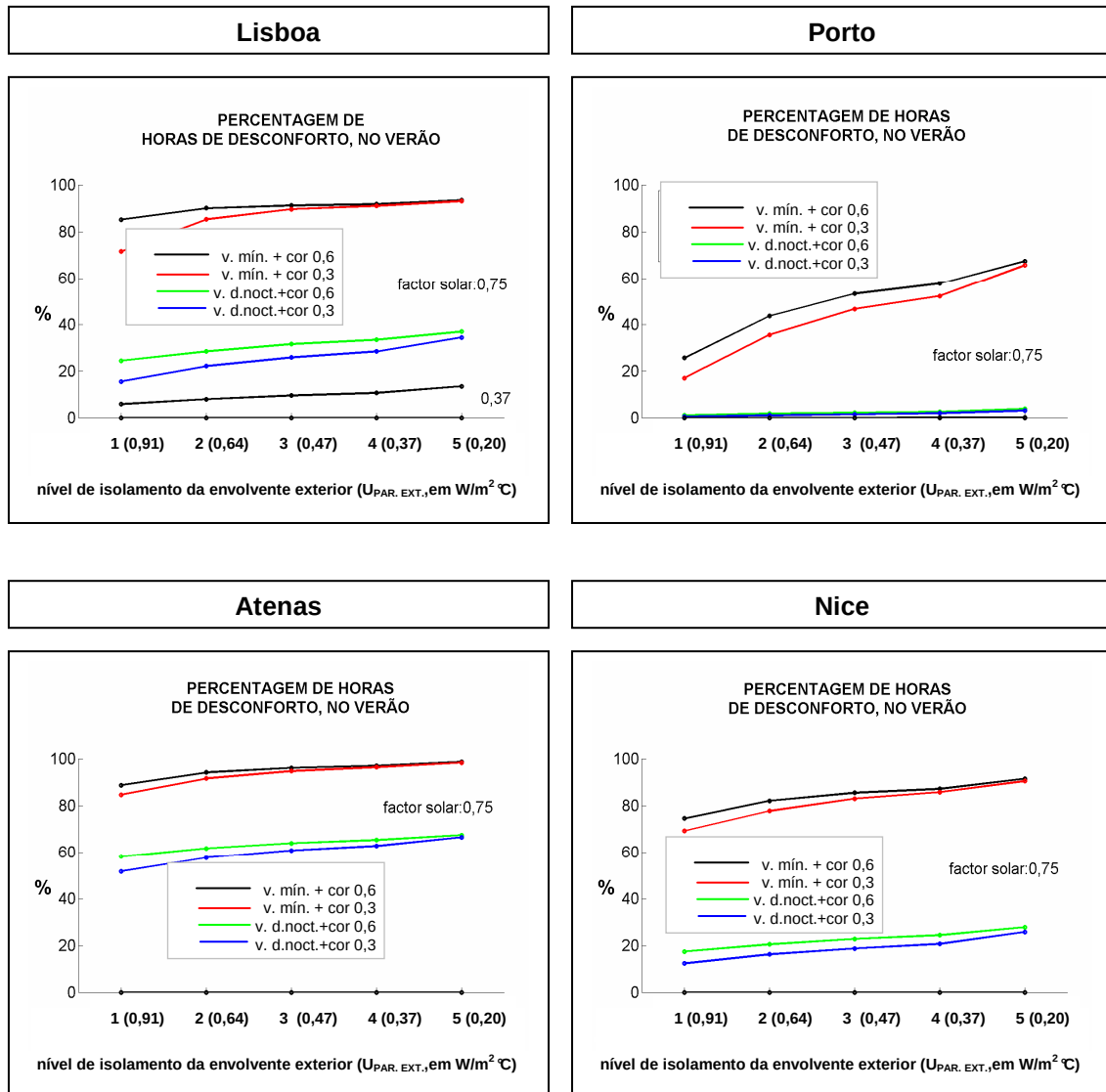


Figura I.2 – Percentagem de horas com desconforto, no Verão, para o edifício C, utilizado como habitação, em Lisboa, Porto, Atenas e Nice, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente, cor das paredes exteriores e factores solares das janelas.

Anexo J Resultados para os edifícios A, B e C, utilizados como serviços (ganhos internos padrão 3), em vários climas, com ventilação mínima

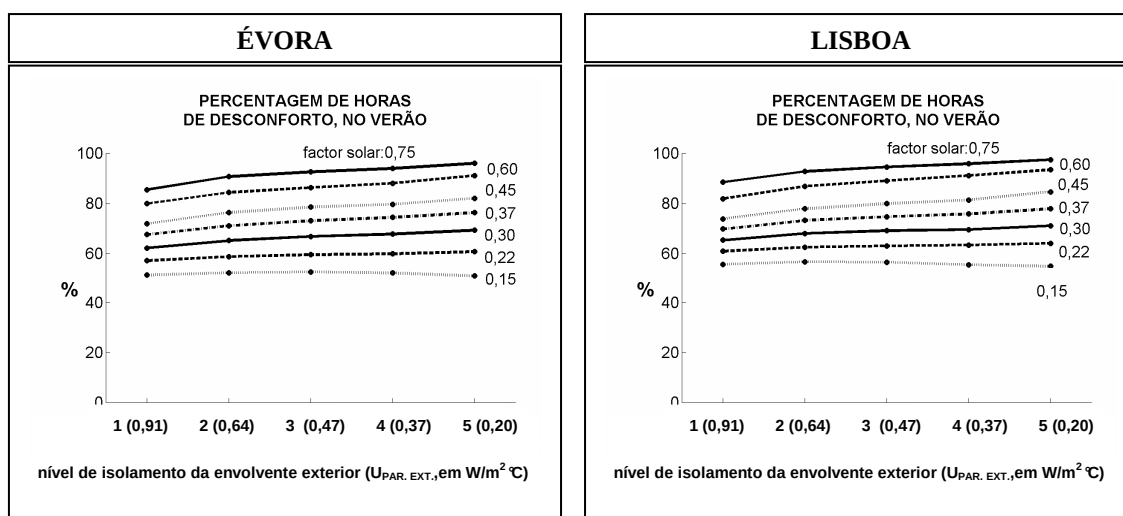


Figura J.1 – Graus-hora de desconforto para o edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora e Lisboa, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

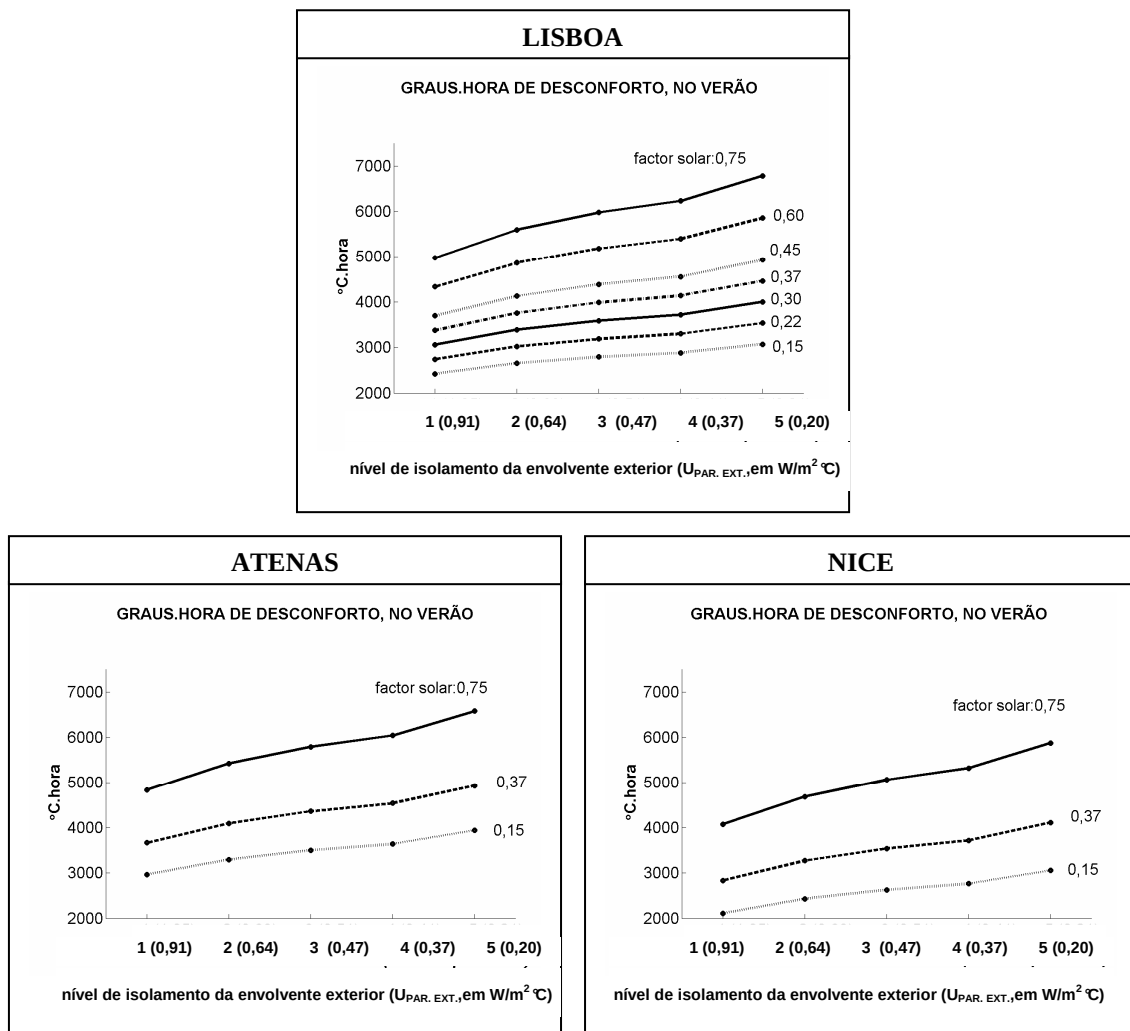


Figura J.2 – Graus-hora de desconforto para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Lisboa, Atenas e Nice, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

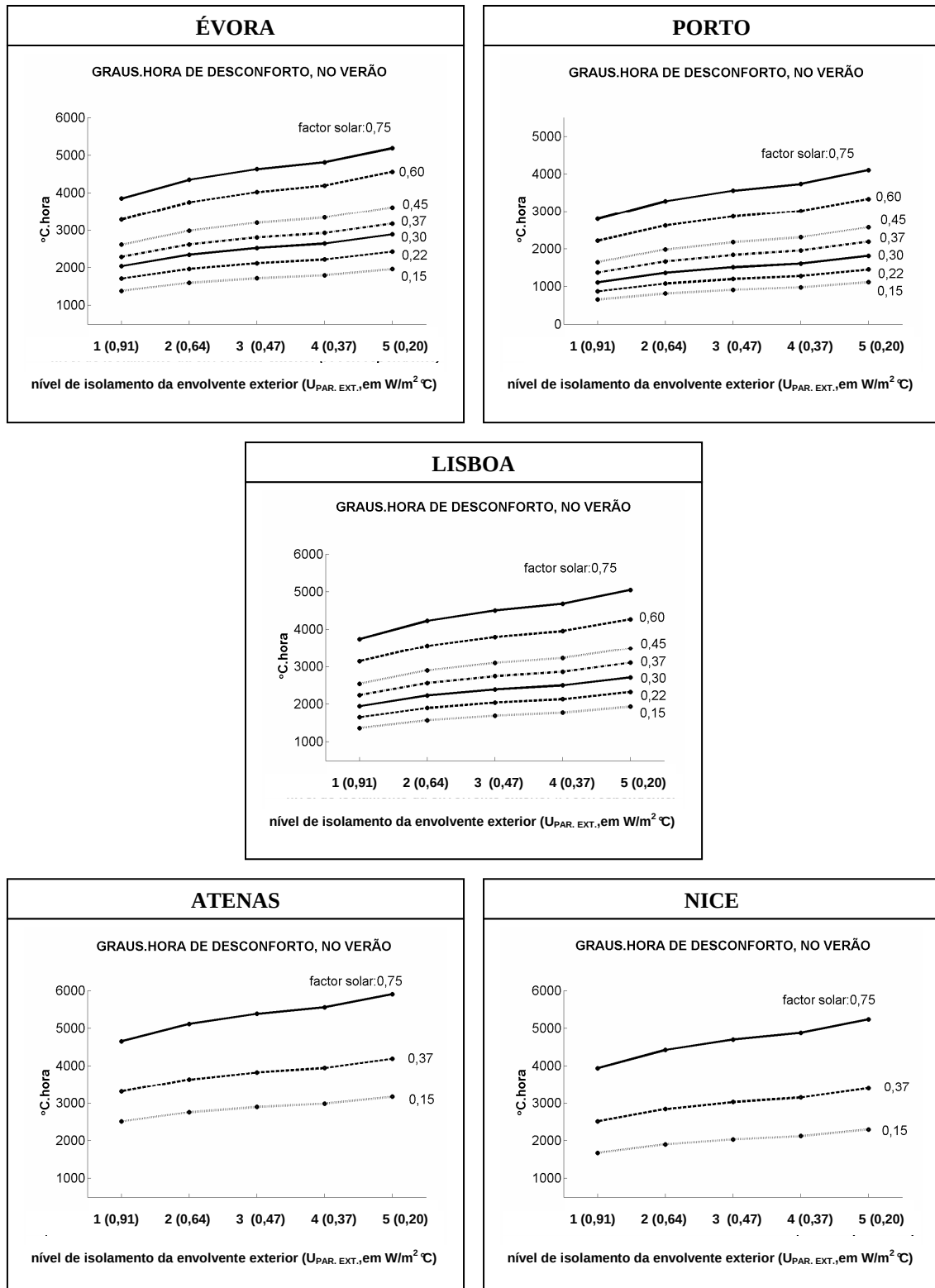


Figura J.3 – Graus-hora de desconforto para o edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, Lisboa, Porto, Atenas e Nice, com ventilação mínima, variados níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

Anexo L Resultados para os edifícios A, B e C, utilizados como serviços (ganhos internos padrões 2 e 3), em todos os climas, com diferentes possibilidades de ventilação

L.1 Padrão de ganhos internos 2

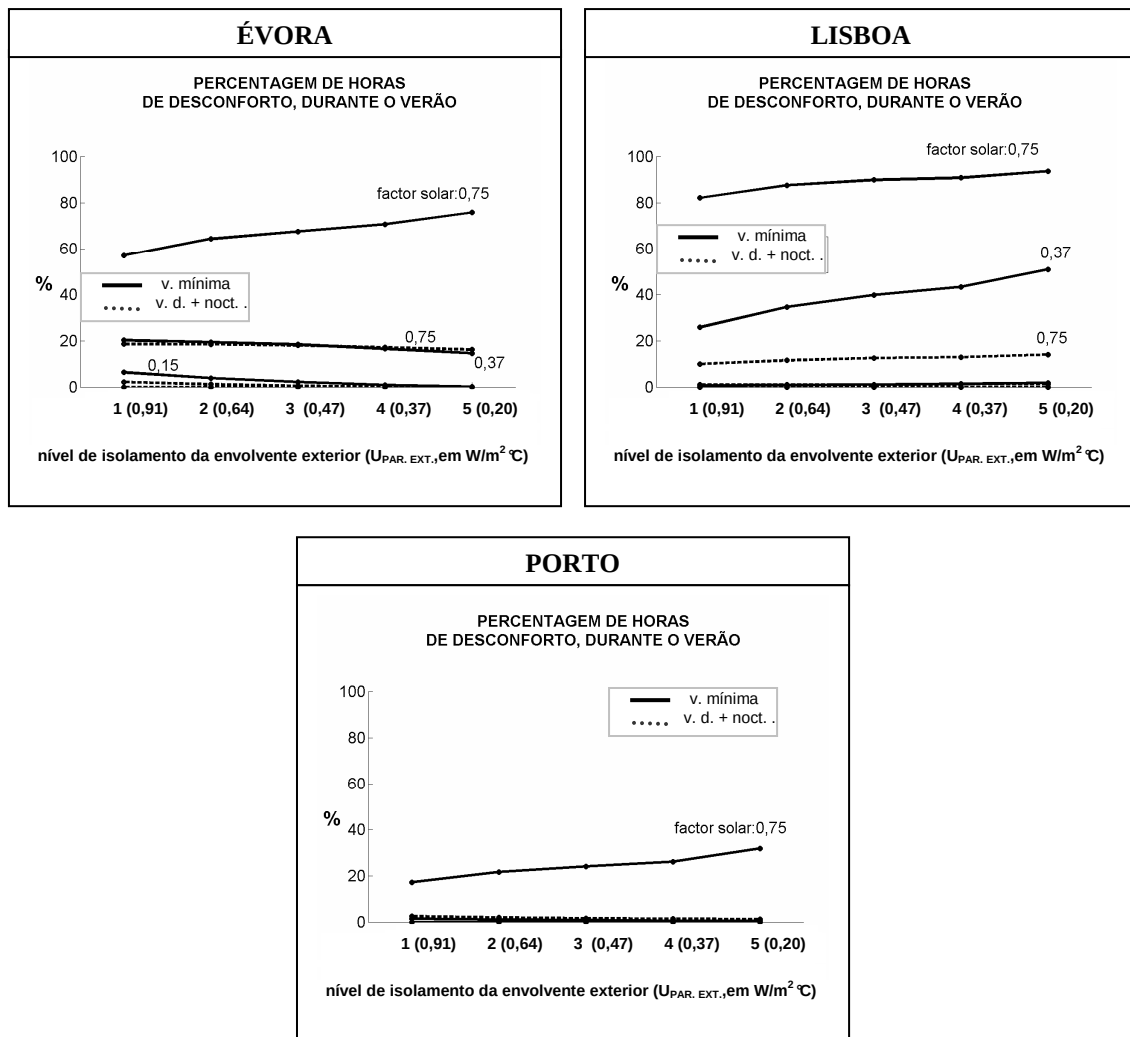


Figura L.1 –Percentagem de horas de desconforto, no Verão, para o edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 2), em Évora, Lisboa e Porto, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

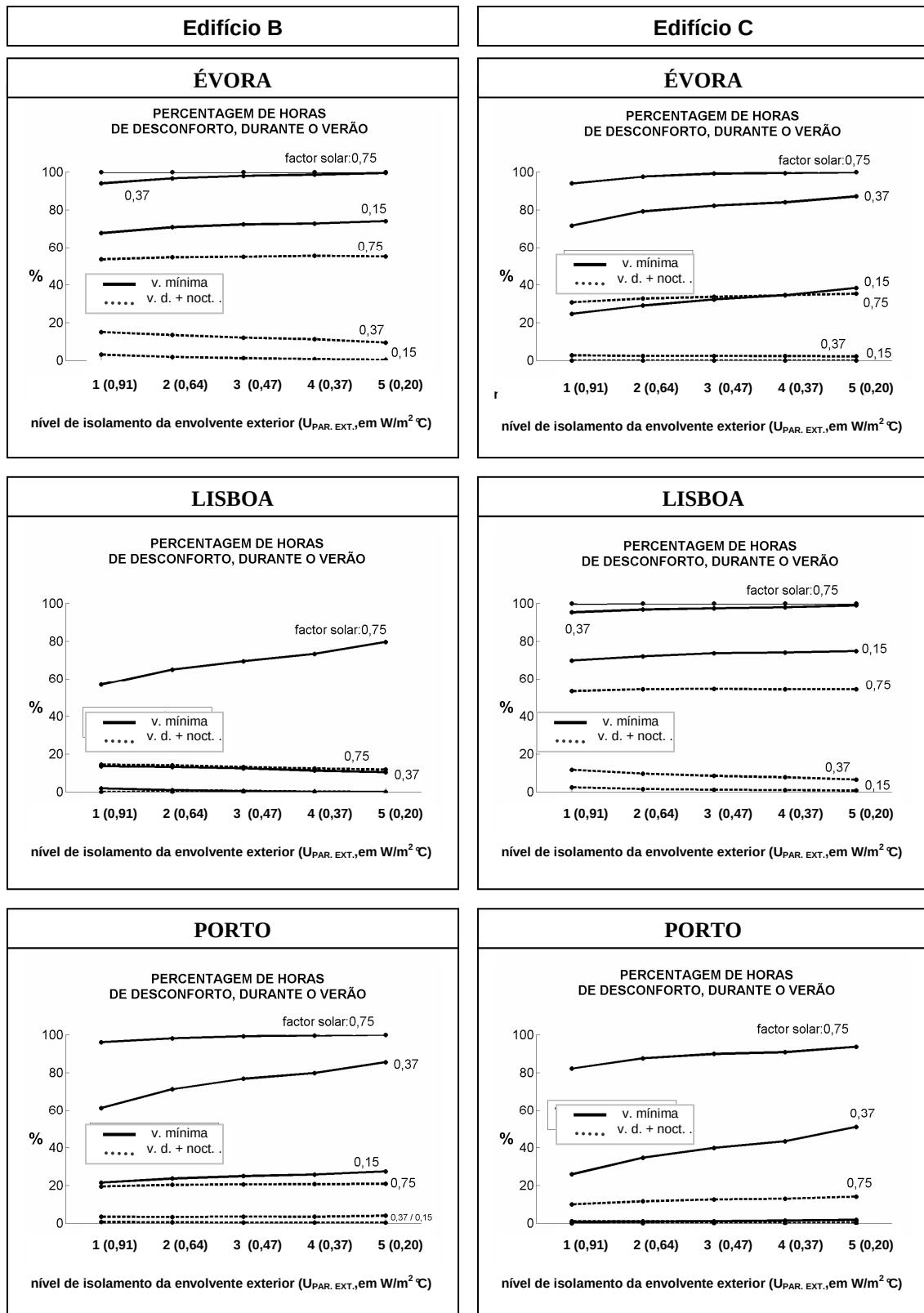


Figura L.2 – Percentagem de horas de desconforto, no Verão, para os edifícios B e C, utilizados como serviços (ganhos internos 2), em Évora, Lisboa e Porto, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

L.2 Padrão de ganhos internos 3

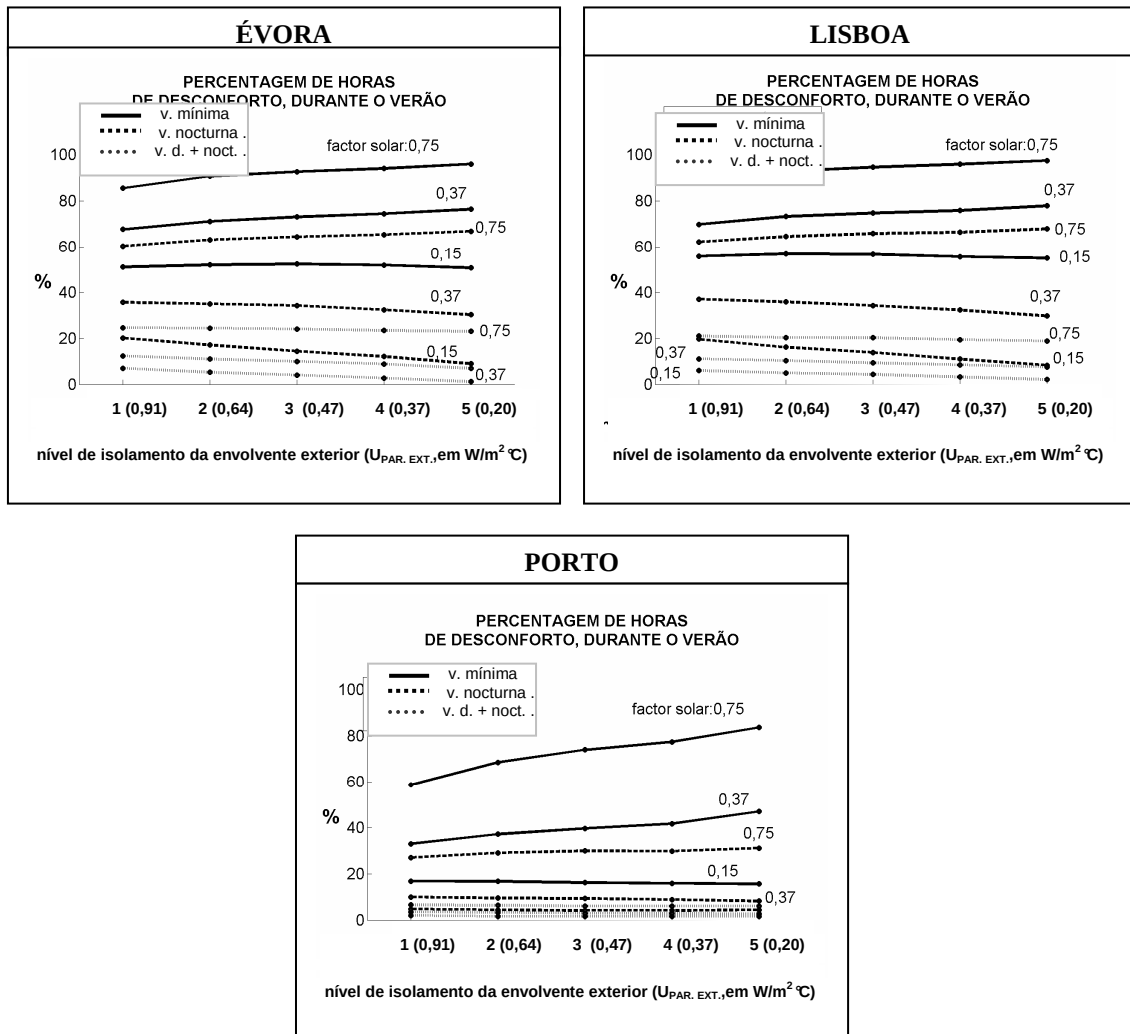


Figura L.3 – Percentagem de horas de desconforto, no Verão, para o edifício A, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, Lisboa e Porto, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

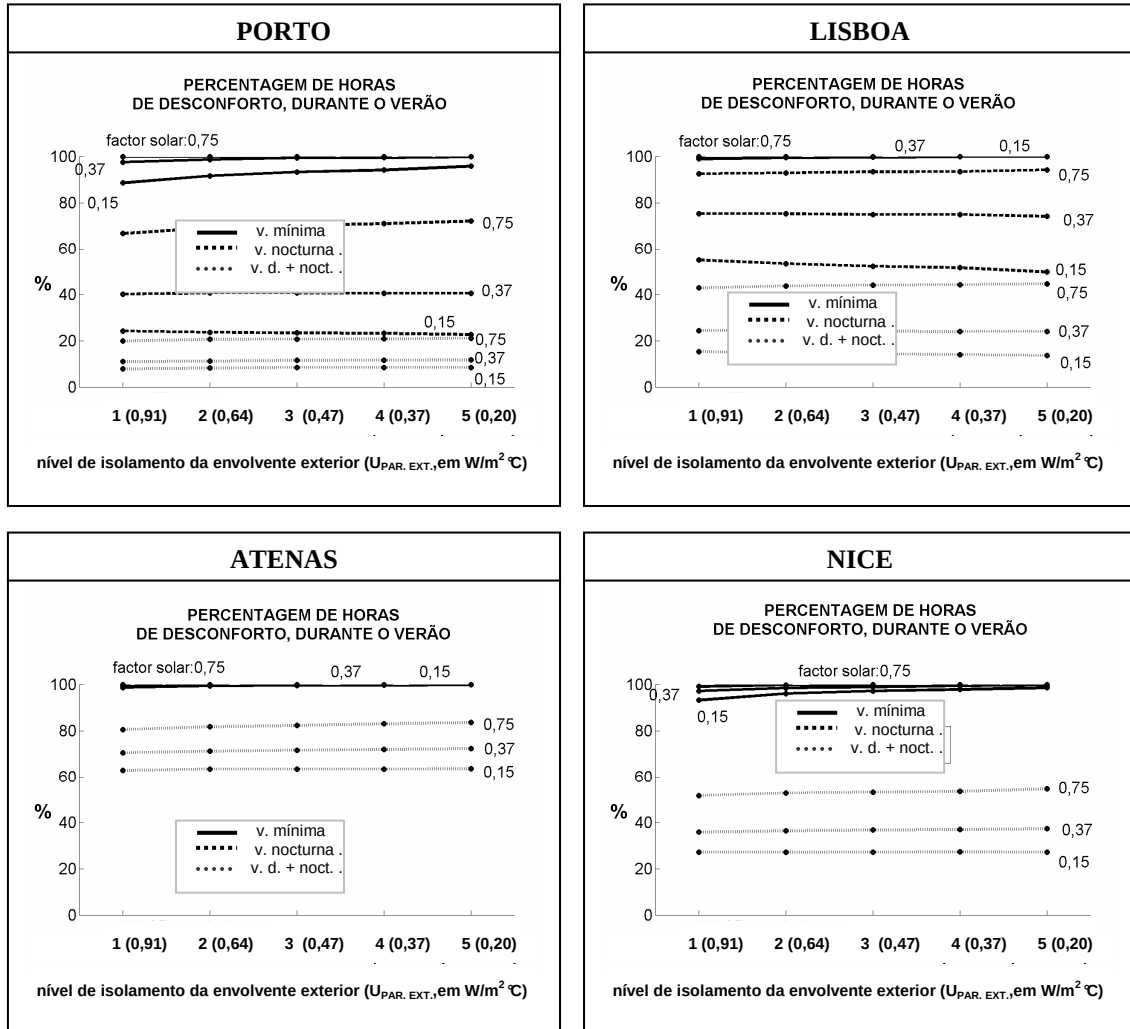


Figura L.4 – Percentagem de horas de desconforto, no Verão, para o edifício B, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Lisboa, Porto, Atenas e Nice, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

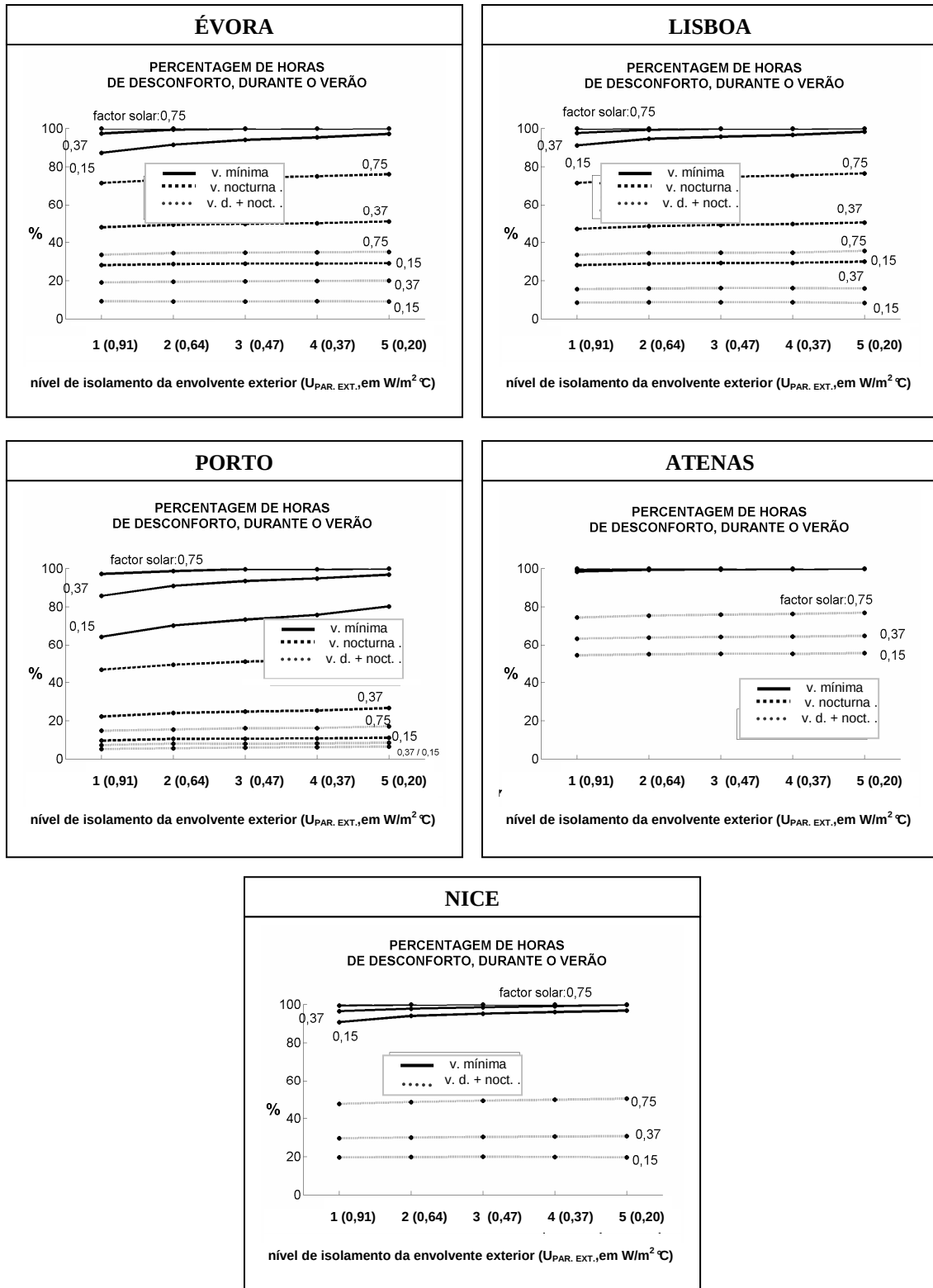
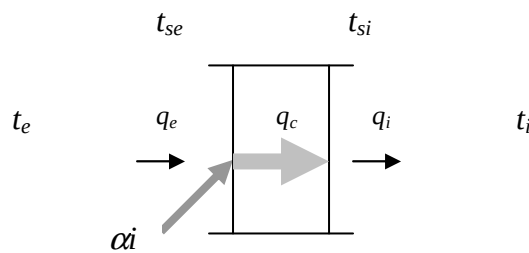


Figura L.5 – Percentagem de horas de desconforto, no Verão, para o edifício C, utilizado como serviços (ganhos internos 3), em Évora, Lisboa, Porto, Atenas e Nice, com variadas possibilidades de ventilação, níveis de isolamento da envolvente e factores solares das janelas.

Anexo M Obtenção da equação dos ganhos / perdas de calor pela envolvente exterior opaca

Os fluxos de calor por condução, radiação e convecção, em uma envolvente exterior opaca, é indicado na figura M.1, onde:

q_e	fluxo de calor por convecção e radiação, na superfície exterior (W/m^2)
q_i	fluxo de calor por convecção e radiação, na superfície interior (W/m^2)
q_c	fluxo de calor por condução, da superfície exterior para a interior (W/m^2)
t_e	temperatura exterior ($^{\circ}\text{C}$)
t_i	temperatura interior ($^{\circ}\text{C}$)
t_{se}	temperatura superficial exterior ($^{\circ}\text{C}$)
t_{si}	temperatura superficial interior ($^{\circ}\text{C}$)
h_e	coeficiente de transferência de calor na superfície exterior ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_i	coeficiente de transferência de calor na superfície interior ($\text{W/m}^2\text{K}$)
e	espessura do elemento (m)
λ	condutibilidade térmica do material do elemento (W/mK)
i	fluxo de radiação solar incidente na superfície exterior (W/m^2)
α	coeficiente de absorção da radiação solar
U	coeficiente global de transferência de calor do elemento ($\text{W/m}^2\text{K}$)



$$q_e = h_e \cdot (t_e - t_{se}) + \alpha \cdot i \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{M.1})$$

$$q_i = h_i (t_{si} - t_i) \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{M.2})$$

$$q_c = \frac{\lambda}{e} (t_{se} - t_{si}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{M.3})$$

Figura M.1 - Fluxos de calor por condução, radiação e convecção, em uma envolvente exterior opaca

Como $q_i = q_c$ (na superfície interior) e $q_c = q_e$ (na superfície exterior), conclui-se que:

$$q_i = q_c = q_e = q_{env} \quad (M.4)$$

Onde:

q_{env} fluxo de calor através da envolvente (W/m^2)

Substitui-se, portanto, nas equações M.1 a M.3, q_i , q_c e q_e por q_{env} , conforme indicado em M.4. Em seguida, nas equações M.2 e M.3, isola-se t_{si} e t_{se} e substitui-se as expressões encontradas para estas duas variáveis na equação M.1. Obtém-se, então, a seguinte equação:

$$q_{env} = (t_e - t_i) \cdot U + \frac{U \cdot \alpha \cdot i}{h_e} \quad (W/m^2) \quad (M.5)$$

Somando-se os fluxos de calor pela envolvente (q_{env}) durante um determinado período de tempo ΔT , tem-se o ganho de calor correspondente a esse período. Multiplicando-se pela área, tem-se o ganho de calor total pela envolvente (Q_{env}), conforme abaixo indicado:

$$Q_{env} = (t_e - t_i) \cdot \Delta T \cdot U \cdot A + \frac{U \cdot A \cdot \alpha \cdot I}{h_e} \quad (Wh) \quad (M.6)$$

Onde:

I radiação solar total incidente na superfície exterior, durante o intervalo de tempo ΔT (Wh/m^2)