



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

INDICADOR DE COMPORTAMENTO TÉRMICO SOLAR PASSIVO DE HABITAÇÕES

Estação de Aquecimento

Projeto Comportamento térmico solar passivo de habitações
ADENE – Agência para a Energia

Lisboa • maio de 2018

I&D EDIFÍCIOS

RELATÓRIO 185/2018 – DED/NAICI

Título

INDICADOR DE COMPORTAMENTO TÉRMICO SOLAR PASSIVO DE HABITAÇÕES
Estação de Aquecimento

Autoria

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS

Armando Pinto

Investigador Auxiliar, Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações

AGÊNCIA PARA A ENERGIA

Rui Fragoso

Engenheiro Civil, Departamento de Edifícios

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 185/2018

Proc. 0809/111/19974

INDICADOR DE COMPORTAMENTO TÉRMICO SOLAR PASSIVO DE HABITAÇÕES

Estação de aquecimento

Resumo

No âmbito da promoção da eficiência energética e das condições de conforto nos edifícios, a ADENE solicitou ao LNEC um estudo destinado a desenvolver e a testar um indicador do comportamento térmico solar passivo (temperatura ou outro) de edifícios de habitação com base nos dados recolhidos no Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE). Este documento resume os elementos de suporte do estudo, descreve a metodologia de cálculo e de classificação do indicador e contém os resultados da aplicação da metodologia a dezanove frações e comparação com medições, bem como o resultado da aplicação da metodologia a cerca de 6000 frações registadas no SCE.

Palavras-chave: Comportamento térmico / Construção solar passiva / Conforto / Indicador

INDICATOR OF PASSIVE SOLAR PERFORMANCE OF HOUSING

Heating season

Abstract

To support the promotion of energy efficiency and comfort in residential buildings, ADENE requested to LNEC a study to develop and test a housing passive solar thermal performance indicator (temperature or other) established on the basis of the data collected from the National Building energy certification scheme (SCE) database. This document presents the supporting elements of the study, describes the proposed methodology for calculation and classification of Housing Passive Solar Thermal Performance indicator and shows the results of the methodology application to nineteen real dwellings and comparison with measurements and also the application to about 6000 dwellings registered in the SCE.

Keywords: Thermal performance / Solar passive buildings / Comfort / Indicador

Índice

1	Introdução	1
1.1	Aspetos gerais	1
1.2	Enquadramento e metodologia	1
2	Avaliação do comportamento térmico solar passivo	3
2.1	Aspetos gerais	3
2.2	Crítérios de apreciação do comportamento térmico solar passivo	6
3	Edifícios de referência	8
3.1	Aspetos gerais	8
3.2	Características dimensionais	8
3.2.1	Edifícios unifamiliares	8
3.2.2	Edifícios multifamiliares	11
3.3	Soluções construtivas de referência	12
3.3.1	Edifício unifamiliar	12
3.3.2	Edifício multifamiliar	13
3.3.3	Medidas de reforço do isolamento térmico e proteção solar	16
3.4	Características de utilização	16
3.5	Clima	17
4	Avaliação do comportamento térmico solar passivo de habitações com simulação dinâmica	18
4.1	Resultados globais	18
4.2	Validação	21
4.3	Análise de alguns parâmetros	22
5	Cálculo simples do indicador passivo	24
5.1	Método de cálculo simples	24
5.2	Modelo simples de cálculo da temperatura face ao modelo detalhado	33
5.3	Avaliação do indicador de comportamento térmico solar passivo com método de cálculo simples	38
5.4	Validação	41
5.5	Relação das necessidades térmicas de aquecimento determinadas com a metodologia regulamentar e o indicador solar passivo	41
6	Método de avaliação e Casos de estudo	44
6.1	Aspetos gerais	44
6.2	Método de avaliação de comportamento térmico solar passivo	44
6.3	Casos de estudo	45
6.3.1	Medição	45
6.3.2	Base de dados do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios	50
7	Conclusões	58
	Referências bibliográficas	60
	ANEXO Método de avaliação do indicador de comportamento térmico solar passivo	63

Índice de figuras

Figura 1.1 – Relação direta entre a sensação térmica (Voto Médio Previsto – PMV e Percentagem Previsível de Insatisfeitos – PPD) e a temperatura interior	2
Figura 2.1 – Velocidade do ar necessária para compensar o aumento de temperatura do ar e manter a sensação de conforto térmico (EN 15251, 2007)	4
Figura 2.2 – Ponderação do desvio de PMV face ao limite de -0,7	7
Figura 3.1 – Moradia unifamiliar anterior a 1960 (≤ 1960)	9
Figura 3.2 – Moradia unifamiliar período 1961:1990	10
Figura 3.3 – Moradia unifamiliar período 1991:2012	10
Figura 3.4 – Moradia unifamiliar posterior a 2012 (≥ 2013)	10
Figura 3.5 – Edifício multifamiliar anterior a 1960	12
Figura 3.6 – Edifício multifamiliar do período 1991 a 2012	12
Figura 3.7 – Gama de valores do coeficiente de transmissão térmica das soluções da envolvente	16
Figura 4.1 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo das moradias	19
Figura 4.2 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo de apartamentos anteriores a 1960	19
Figura 4.3 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo de apartamentos 1961:1990	20
Figura 4.4 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo de apartamentos 1991:2012	20
Figura 4.5 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo de apartamentos posteriores a 2013	21
Figura 4.6 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo: todos os casos	21
Figura 4.7 – Coeficiente de transmissão térmica para um edifício passivo face aos valores ótimos das várias épocas de construção do estudo dos custos ótimos (ECO): Moradias, Bragança	23
Figura 5.1 – Modelo simplificado (5RC) do comportamento térmico da fração	26
Figura 5.2 – Modelo simplificado (RC) do comportamento térmico da fração	26
Figura 5.3 – Constante de tempo em função do nível de isolamento térmico da envolvente e do fator de forma	27
Figura 5.4 – Temperatura operativa interior, função da variação cíclica da temperatura exterior	27
Figura 5.5 – Temperatura operativa interior depois de atingido equilíbrio, função da variação cíclica da temperatura exterior	28
Figura 5.6 – Temperatura operativa interior, função da variação cíclica da temperatura exterior e considerando ganhos internos de calor	29
Figura 5.7 – Temperatura operativa interior depois de atingido equilíbrio, em função da variação cíclica da temperatura exterior e considerando ganhos internos de calor	29
Figura 5.8 – Temperatura operativa interior, em função da variação cíclica da temperatura exterior e considerando ganhos internos de calor e ganhos solares	30
Figura 5.9 – Temperatura operativa interior depois de atingido equilíbrio, em função da variação cíclica da temperatura exterior e considerando ganhos internos de calor e ganhos solares	30
Figura 5.10 – Temperatura medida numa fração em Lisboa	31
Figura 5.11 – Temperatura medida em cinco frações de um edifício situado na zona de Lisboa	31
Figura 5.12 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Moradias (expressão (4))	34
Figura 5.13 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Moradias (expressão (15))	35

Figura 5.14 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Apartamentos anteriores a 1960 (expressão (15))	35
Figura 5.15 – Comparação do cálculo simples com detalhado: Apartamentos 1961 a 1990 (expressão (15)).....	36
Figura 5.16 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Apartamentos 1991:2012 (expressão (15))	36
Figura 5.17 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Apartamentos posteriores a 2013 (expressão (15))	37
Figura 5.18 – Comparação da temperatura calculada com método simples face ao método detalhado	37
Figura 5.19 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Moradias	38
Figura 5.20 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Apartamentos anteriores a 1960.....	39
Figura 5.21 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Apartamentos 1961:1990 ¹	39
Figura 5.22 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Apartamentos 1991: 2012 ¹	40
Figura 5.23 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Apartamentos novos	40
Figura 5.24 – Comparação da avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método pelo simplificado e detalhado	41
Figura 5.25 – Avaliação da relação entre as necessidades térmicas e a perceção de desconforto: Multifamiliar	42
Figura 5.26 – Análise da correlação entre parâmetros do estudo paramétrico	43
Figura 6.1 – Fator de forma dos casos de estudo	46
Figura 6.2 – Ganhos de calor das frações	47
Figura 6.3 – Temperatura exterior durante os períodos de medição e valores regulamentares	47
Figura 6.4 – Comparação dos valores da temperatura interior medidos e calculados.....	48
Figura 6.5 – Comparação dos valores da temperatura interior calculados com o método de referência e os calculados com a melhor informação disponível	49
Figura 6.6 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo dos casos de estudo	50
Figura 6.7 – Distribuição acumulada da temperatura interior dos casos de estudo, por época de construção e zona climática	52
Figura 6.8 – Distribuição das frações por época de construção e zona climática	53
Figura 6.9 – Comparação da estimativa de N_{ic} com o valor declarado no certificado energético	53
Figura 6.10 – Distribuição da probabilidade de ocorrência de N_{ic} nos casos de estudo do SCE e do estudo paramétrico.....	54
Figura 6.11 – Distribuição dos valores de área envidraçada por unidade de área útil dos casos de estudo do SCE	54
Figura 6.12 – Relação entre o número de graus dia de aquecimento dos casos de estudo e a temperatura exterior média mensal do mês mais frio	55
Figura 6.13 – Distribuição do fator de utilização dos ganhos térmicos brutos dos casos de estudo	55
Figura 6.14 – Relação entre as necessidades térmicas nominais de aquecimento e a estimativa da temperatura interior	56
Figura 6.15 – Análise da correlação ente parâmetros dos casos de estudo do SCE	57

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Metabolismo e vestuário dos ocupantes	4
Quadro 2.2 – Temperatura operativa de conforto	4
Quadro 2.3 – Escala do voto médio previsto	6
Quadro 3.1 – Características geométricas das frações de referência de edifícios unifamiliares	9
Quadro 3.2 – Características geométricas das frações de referência de edifícios multifamiliares	11
Quadro 3.3 – Soluções construtivas – Edifício de referência unifamiliar	14
Quadro 3.4 – Síntese das características térmicas dos elementos da envolvente - Unifamiliar	14
Quadro 3.5 – Soluções construtivas – Edifício de referência multifamiliar	15
Quadro 3.6 – Síntese das características térmicas dos elementos da envolvente - multifamiliar	15
Quadro 3.7 – Dados climáticos	17
Quadro 6.1 – Classificação da gama de conforto da fração	44
Quadro 6.2 – Resumo das características das frações dos casos de estudo	46
Quadro A.1 – Classificação da gama de conforto da fração.....	65

1 | Introdução

1.1 Aspetos gerais

A ADENE- Agência para a Energia solicitou ao LNEC um estudo destinado a desenvolver e testar um indicador do comportamento térmico solar passivo (temperatura ou outro) nos edifícios de habitação com base nos dados recolhidos no Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE). O plano de trabalhos deste estudo, proposto pelo LNEC e aceite pela ADENE, inclui as seguintes atividades:

1. Análise da informação da base de dados do SCE para definir edifícios de habitação tipo, em função da época de construção e da tipologia unifamiliar e multifamiliar.
2. Desenvolvimento da metodologia de cálculo do indicador do comportamento solar passivo das habitações e análise de sensibilidade.
3. Teste da metodologia de cálculo do indicador de comportamento solar passivo, por comparação com resultados de simulações dinâmicas para diferentes zonas climáticas, por exemplo Lisboa, Bragança, Évora, Ponta Delgada.
4. Teste da metodologia de cálculo do indicador de comportamento solar passivo, por comparação com resultados de medições e simulações dinâmicas em habitações, por exemplo um apartamento situado em Lisboa (construção dos anos 2000) e uma habitação social (anos 1980).
5. Publicação de documento com a definição da metodologia e exemplos de aplicação.

O presente relatório detalha as tarefas desenvolvidas e apresenta a proposta de metodologia de avaliação e classificação do comportamento térmico solar passivo de habitações, constituindo o relatório final do estudo.

1.2 Enquadramento e metodologia

Desde 1990 que a legislação Portuguesa (RCCTE, 1990) sobre comportamento térmico de edifícios impõe regras para a conceção de novas construções destinadas a reduzir as respetivas necessidades de aquecimento e de arrefecimento, melhorar o conforto e a reduzir anomalias relacionadas com condensações superficiais. A qualidade térmica das frações é avaliada com base nas necessidades térmicas nominais de aquecimento (N_{ic}) e de arrefecimento (N_{vc}), face aos respetivos valores limite (N_i e N_v). As necessidades térmicas nominais são expressas em kWh/m².ano. Estes indicadores são pertinentes para o meio técnico, mas para o público em geral dão uma indicação limitada quanto às condições de conforto da fração. Embora a legislação de 2006 e de 2013 (REH, 2013), tenha introduzido também a classificação energética das frações, que é determinada com base nas necessidades nominais de energia primária, que incorpora além da

qualidade térmica da fração, a eficiência dos sistemas técnicos, não é ainda transmitindo de uma forma direta ao consumidor a qualidade térmica da construção e o respetivo comportamento térmico solar passivo na satisfação das condições de conforto.

Dado a temperatura interior ser um indicador das condições gerais de conforto térmico nos edifícios passivos (ISO 7730, 2005; EN 15251, 2007; ASHRAE, 2015) e ter uma relação direta com a sensação térmica (Voto Médio Previsto – PMV e Percentagem Previsível de Insatisfeitos – PPD, Figura 1.1), neste estudo desenvolveu-se um indicador do comportamento térmico solar passivo das construções baseado na estimativa da temperatura média interior da habitação durante o mês mais frio, para transmitir de uma forma mais perceptível ao consumidor e técnicos o potencial da fração ser confortável nesse período, dado que, para o período de verão, a regulamentação (REH, 2013) já dispõem de um critério que avalia a probabilidade de ser necessária a utilização de equipamentos para arrefecimento ambiente. No âmbito da definição de um indicador de comportamento térmico solar passivo de construções foi seguida a seguinte metodologia:

- Definição do que se entende por comportamento térmico solar passivo satisfatório de habitações (capítulo 2);
- Definir edifícios e frações de referência, incluindo condições de utilização, materiais e dimensões (capítulo 3);
- Avaliar a relação entre o comportamento térmico solar passivo da habitação e a estimativa da temperatura média interior com base em simulação dinâmica (capítulo 4);
- Avaliar a aplicabilidade de utilizar um método de cálculo simples para estimar a temperatura média interior e o comportamento térmico solar passivo (capítulo 5);
- Comparação do comportamento térmico solar passivo e necessidades térmicas determinadas com a metodologia (REH, 2013) (capítulo 5);
- Aplicação da metodologia simplificada a casos de estudo (capítulo 6).
- A metodologia proposta para o cálculo do indicador encontra-se descrita no anexo I.

A partir de 2020 (2018 para edifícios públicos) os edifícios novos devem ser de necessidades de energia quase nulas (EPBD-recast, 2010), sendo a conceção de frações com comportamento térmico solar passivo satisfatório uma das componentes dos edifícios NZEB para a qual o presente indicador pode contribuir.

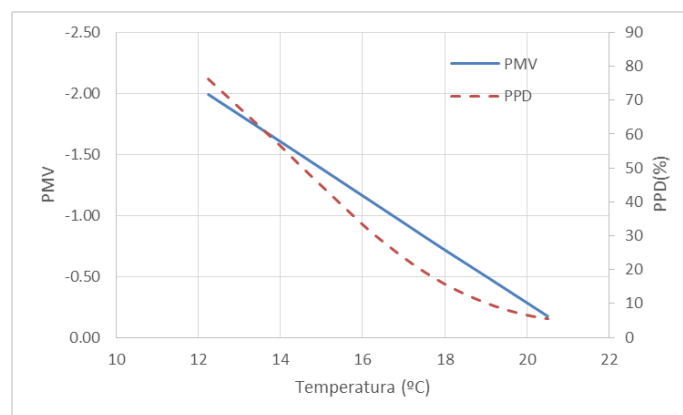


Figura 1.1 – Relação direta entre a sensação térmica (Voto Médio Previsto – PMV e Percentagem Previsível de Insatisfeitos – PPD) e a temperatura interior

2 | Avaliação do comportamento térmico solar passivo

2.1 Aspetos gerais

As condições de conforto térmico consideradas adequadas no interior dos edifícios têm uma variação muito elevada, de 16°C a 30°C (Pinto, 2008), dependendo de fatores diversos como as atividades que estão a ser desenvolvidas, o nível de isolamento térmico do vestuário, a velocidade do ar, a capacidade de adaptação (por exemplo, possibilidade de abertura de janelas, atuação de dispositivos de sombreamento, ativação de ventoinhas) e das condições ambientais exteriores.

Nos edifícios de habitação, durante a noite (23h00-7h00) os ocupantes têm uma atividade do tipo sono (0,7 met), enquanto no restante período de tempo têm uma atividade do tipo sedentária (1,2 met) ou de repouso (1,0 met). Nos edifícios passivos, o vestuário dos ocupantes é tendencialmente adaptado à estação do ano, podendo ser considerados os valores do isolamento térmico do vestuário indicados no Quadro 2.1, em vez dos valores típicos 1,0 clo no inverno e de 0,5 clo no verão.

As condições de sono (0,7 met e 3,4 clo) estão fora das condições normalizadas da ISO 7730, que indica variarem de 0,8 a 4,0 met e de 0 a 2 clo. Contudo, neste trabalho foram adotados resultados de um estudo que avaliou em maior detalhe as condições de conforto durante o sono, tendo determinado experimentalmente a resistência térmica da roupa da cama que chega a ter valores de 4,7 clo, propondo assim um método de cálculo de PMV (Lin and Deng, 2008) para a condição de sono.

Nos edifícios passivos os ocupantes são mais tolerantes com as condições ambientais interiores, podendo ser considerada a classe III de conforto da norma EN 15251¹ para a qual é estimada uma percentagem de ocupantes insatisfeitos (PPD²) não superior a 15% (PPD<15%) ou ambiente ligeiramente quente ou frio (PMV³=±0,7). Para as condições de metabolismo e de vestuário atrás referidas são estimadas as temperaturas operativas de conforto indicadas no Quadro 2.2, para o período noturno e para o período diurno. Salienta-se que através de um vestuário adaptado, as condições de conforto durante o período diurno (16°C/28°C) são mais permissivas que as adotadas para estimar as necessidades nominais de aquecimento e de arrefecimento de habitações (18°C/25°C (REH, 2013)) e do que as preconizadas para os edifícios passivos de comércio e serviços (19°C/27°C (RECS-E, 2013)).

Durante a noite, devido ao isolamento térmico proporcionado pela roupa de cama, é possível ter temperaturas ainda inferiores ao valor de 16°C sem exceder os indicadores de conforto, em concordância com resultados de outros estudos destinados a reduzir as necessidades de energia de

¹ Ou a classe C da norma ISO 7730

² PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied

³ PMV – Predicted Mean Vote

climatização durante o sono (Leung and Ge, 2013). No verão, devido ao menor metabolismo durante o sono também é possível ter temperaturas superiores às recomendadas para o período diurno.

No período de verão, se for aumentada a velocidade do ar no interior dos espaços (pela existência de uma ventoinha ou pela abertura das janelas, considerando que o ar exterior está a uma temperatura não superior à do ar interior) é aceitável ter temperaturas ainda superiores às anteriores (Figura 2.1); efetivamente com a maior velocidade do ar, aumenta-se a transmissão de calor por convecção do corpo humano, sendo aceitável uma temperatura mais elevada para manter o equilíbrio térmico. Para atividade sedentária, esta estratégia pode permitir considerar aceitável uma temperatura interior de cerca de 2,8 °C¹ superior à temperatura de conforto indicada no Quadro 2.2.

Quadro 2.1 – Metabolismo e vestuário dos ocupantes

Período	Inverno	Verão
Atividade		
Sono (0.7 met)	3.4 clo	0.5 clo
Sedentária (1.2 met)	1.3 clo	0.3 clo

Quadro 2.2 – Temperatura operativa de conforto

Período	Inverno	Verão
Atividade		
Sono (0.7 met)	14°C	30°C
Sedentária (1.2 met)	16°C	28°C

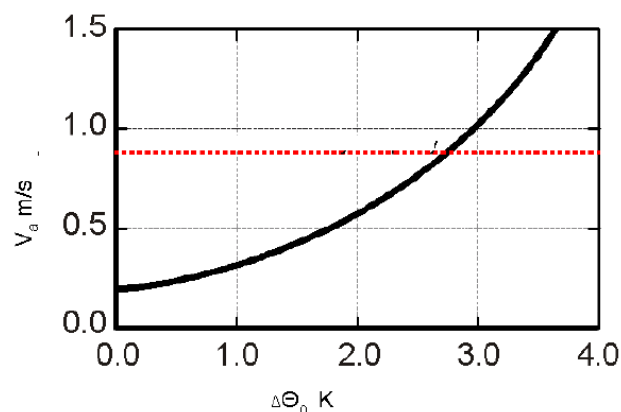


Figura 2.1 – Velocidade do ar necessária para compensar o aumento de temperatura do ar e manter a sensação de conforto térmico (EN 15251, 2007)

¹ Com um ventoinha e atividade sedentária, em vez de 28°C de temperatura do ar, pode ser aceitável ter 30,8°C para uma velocidade do ar de 0,82 m/s.

Na apreciação do comportamento térmico solar passivo de edifícios é importante ter uma avaliação do comportamento térmico ao longo do tempo e não apenas para dias extremos de calor ou de frio ou dias de projeto. A norma ISO 7730 apresenta cinco métodos para avaliar as condições de conforto térmico ao longo do tempo:

- Método A: Número de horas em que são excedidas as condições de conforto;
- Método B: Média ponderada da temperatura em função do desvio à temperatura operativa de conforto;
- Método C: Média ponderada de PMV em função do desvio ao PMV aceitável;
- Método D: Média de PPD durante o período de ocupação;
- Método E: Soma de PPD durante o período de análise.

A norma EN 15251 apresenta também três métodos para efetuar a avaliação do conforto térmico ao longo do tempo, sendo os mesmos agrupados em:

- Método A: Percentagem de tempo fora da gama de conforto;
- Método B: Critério dos graus-dia (Média ponderada da temperatura em função do desvio face à temperatura operativa de conforto);
- Método C: Ponderação com base em PPD.

A regulamentação nacional de eficiência energética em edifícios de comércio e serviços (RECS-E, 2013), considera que um edifício é passivo quando a percentagem de horas de ocupação anual em que se verificam necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento, para manter a temperatura interior de conforto compreendida no intervalo de 19°C a 27°C, não excede mais de 10% do tempo de ocupação. A norma EN 15251, no anexo informativo G, aponta exemplos de critérios aceitáveis de 3% a 5% do tempo de ocupação.

Para analisar o risco de sobreaquecimento existem recomendações da CIBSE TM52 (CIBSE TM52, 2013), que definem três requisitos:

- O número de horas (H_e) em que ΔT é maior ou igual a 1 K entre o período de maio a setembro não deve ser superior a 3% das horas de ocupação.
 - $\Delta T = T_{op} - T_{max}$
 - $T_{max} = 0,33 T_{rm} + 21,8$
 - $T_{rm} = (T_{od-1} + 0,8 T_{od-2} + 0,6 T_{od-3} + 0,5 T_{od-4} + 0,4 T_{od-5} + 0,3 T_{od-6} + 0,2 T_{od-7}) / 3,8$
 - T_{od} , temperatura média diária.
- O período de excedência diário ponderado (W_e) deve ser menor ou igual a 6, em que:
 - $W_e = \sum h_e \times w_f = (h_{e0} \times 0) + (h_{e1} \times 1) + (h_{e2} \times 2) + (h_{e3} \times 3)$
 - $w_f = 0$ se $\Delta T \leq 0$, noutros casos $w_f = \Delta T$ e h_{ey} é o tempo em horas quando $w_f = y$
- Limite superior da temperatura (T_{upp}): a diferença entre a temperatura operativa interior e a temperatura operativa de conforto (ΔT) não deve ser superior a 4°C.

Os critérios da CIBSE TM52 (CIBSE TM52, 2013) acabam por ser menos restritivos e mais adaptados do que os especificados no guia CIBSE Guide A (CIBSE, 2006), que impunha não ser excedida a temperatura interior de 28 °C em mais de 1% do período de ocupação.

2.2 Critérios de apreciação do comportamento térmico solar passivo

Tendo em conta a preferência e a maior tolerância dos ocupantes em relação às condições ambientais em edifícios passivos, neste estudo adota-se como critério de conforto térmico a classe C da norma ISO 7730, sendo consideradas as atividades desenvolvidas nas habitações e o vestuário típico em dias quentes de verão ou frios de inverno (Quadro 2.1). Para a classe C (ISO 7730, 2005) é especificada uma percentagem previsível de insatisfeitos (PPD) não superior a 15% e um voto médio previsto (PMV) de $\pm 0,7$ ¹.

O voto médio previsto (PMV) é um indicador da sensação de conforto numa escala com sete pontos (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 – Escala do voto médio previsto

Sensação térmica	Muito frio	Frio	Ligeiramente frio	Neutro	Ligeiramente quente	Quente	Muito quente
PMV	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Preconiza-se que a avaliação das condições de conforto seja realizada para o mês mais frio, o de janeiro, usando o método C (Média ponderada de PMV em função do desvio ao PMV aceitável) da norma ISO 7730, expressão (1) e Figura 2.2. O valor de PMV foi determinado de acordo com a norma ISO 7730 para a atividade sedentária e de acordo com a correção proposta por (Lin and Deng, 2008) para a atividade sono.

Na apreciação da satisfação das condições de conforto térmico ao longo do mês mais frio, adota-se como critério um período de tempo ponderado do desconforto (w_f) não superior a 10% do tempo do mês de janeiro, expressão (2).

$$w_f = \sum \frac{PMV_{atual}}{PMV_{limite}} \Big|_{Se PMV_{atual} < PMV_{limite}} \quad (1)$$

$$\frac{w_f}{31 \times 24} \leq 0,10 \quad (2)$$

¹ Estas condições são idênticas às definidas para a classe III da norma (EN 15251, 2007) aplicável a edifícios existentes, para ocupantes com uma expectativa moderada.

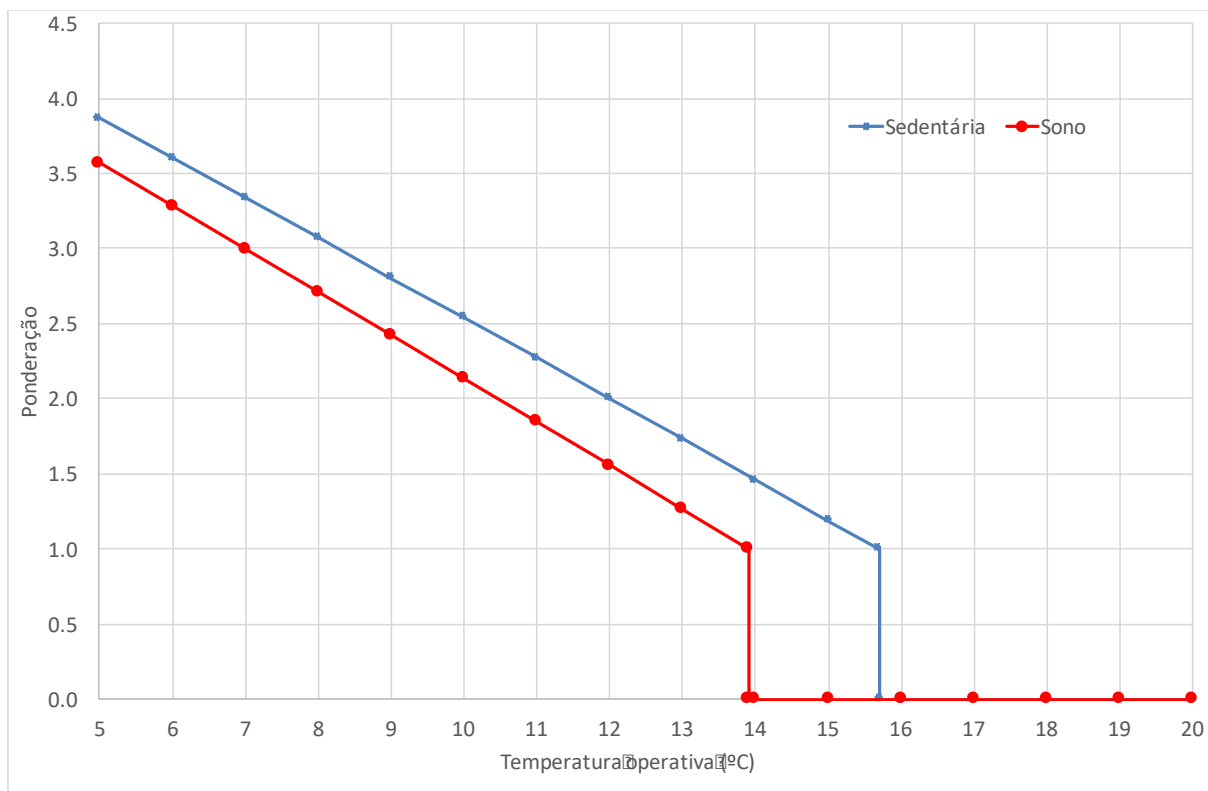


Figura 2.2 – Ponderação do desvio de PMV face ao limite de -0,7

3 | Edifícios de referência

3.1 Aspetos gerais

Para estabelecer a metodologia de avaliação do comportamento térmico solar passivo e apreciar a relação entre a qualidade térmica da envolvente, sensação de conforto e a temperatura média interior nos edifícios de habitação, foram adotados edifícios de referência semelhantes aos utilizados no estudo dos níveis ótimos de rentabilidade de medidas de eficiência energética (DGEG, 2014). A definição dos edifícios de referência foi realizada tendo por suporte a base de dados dos certificados energéticos registados no SCE, gerido pela ADENE - Agência para a Energia, de onde foram retiradas as características mais comuns do parque residencial português, por época de construção, designadamente a geometria, as soluções construtivas e os respetivos desempenhos energéticos.

São adotados edifícios de referência para edifícios unifamiliares e edifícios multifamiliares e para quatro épocas construtivas distintas:

- Edifícios construídos antes de 1960;
- Edifícios construídos entre 1960 e 1990;
- Edifícios construídos entre 1990 e 2012;
- Edifícios novos de acordo com (REH, 2013).

A definição dos edifícios de referência, neste estudo, envolveu a especificação de:

- Características dimensionais: área útil de pavimento, área de fachadas e área de vãos envidraçados;
- Características térmicas dos elementos construtivos: envolvente opaca, envolvente envidraçada, massa térmica;
- Características de utilização da fração: perfis de ocupação, de iluminação, de utilização de equipamentos elétricos, de utilização de proteções solares e de abertura das janelas.

A apreciação do desempenho foi realizada para três climas diferentes, abrangendo as zonas climáticas I1, I2 e I3.

3.2 Características dimensionais

3.2.1 Edifícios unifamiliares

De acordo com o estudo anterior (DGEG, 2014), a síntese das características geométricas dos edifícios unifamiliares encontra-se indicada no Quadro 3.1 e nas figuras 2 a 5.

Quadro 3.1 – Características geométricas das frações de referência de edifícios unifamiliares

Época	Unidade	≤ 1960	1961:1990	1991:2012	≥ 2013
Designação		1960	1980	2000	2015
Tipologia		T2	T2	T3	T3
Área útil de pavimento	(m ²)	80	100	155	165
Número de pisos		1	1	2	2
Largura da fachada	(m)	8,94	10,00	8,80	9,08
Largura da empena	(m)	8,94	10,00	8,80	9,08
Pé direito médio (Pd)	(m)	2,7	2,7	2,7	2,7
Área de janelas/Área de pavimento (Aw / Au)		15%	15%	20%	20%
Área de janelas/Área de fachada (WWR ¹)		12%	14%	16%	17%
Área de uma das paredes das fachadas N, E, S ou W	(m ²)	21,1	23,3	19,9	20,4
Área de janelas (Aw) de uma das fachadas N, E, S ou W	(m ²)	3,00	3,75	7,75	8,25
Área de cobertura	(m ²)	79,9	100,0	77,4	82,4
Área de pavimento	(m ²)	79,9	100,0	77,4	82,4
Área de envolvente	(m ²)	256	308	345	361
Volume	(m ³)	216	270	418	445
FF=S / V ²	(m ⁻¹)	1,19	1,14	0,82	0,81

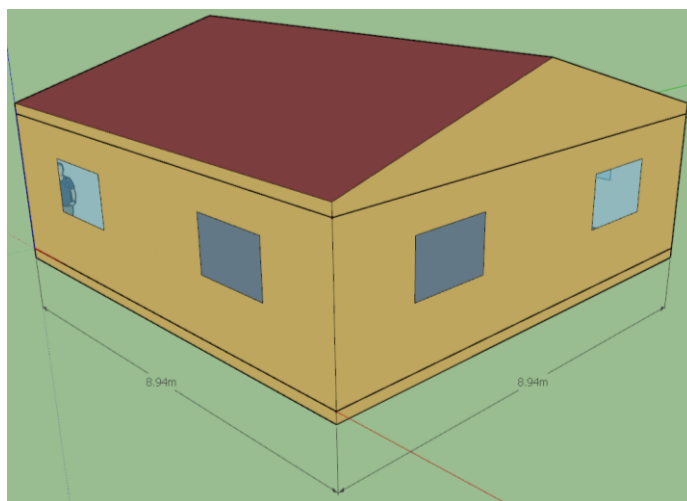


Figura 3.1 – Moradia unifamiliar anterior a 1960 (≤ 1960)

¹ WWR - Window Wall Ratio, relação entre a área de janelas e a área da fachada.

² FF - Fator de Forma (m⁻¹); S - Superfícies de transferência de calor (m²); V - Volume interior (m³).

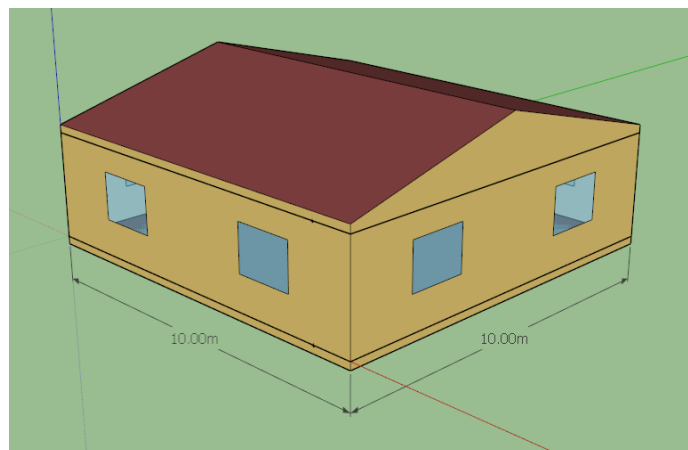


Figura 3.2 – Moradia unifamiliar período 1961:1990

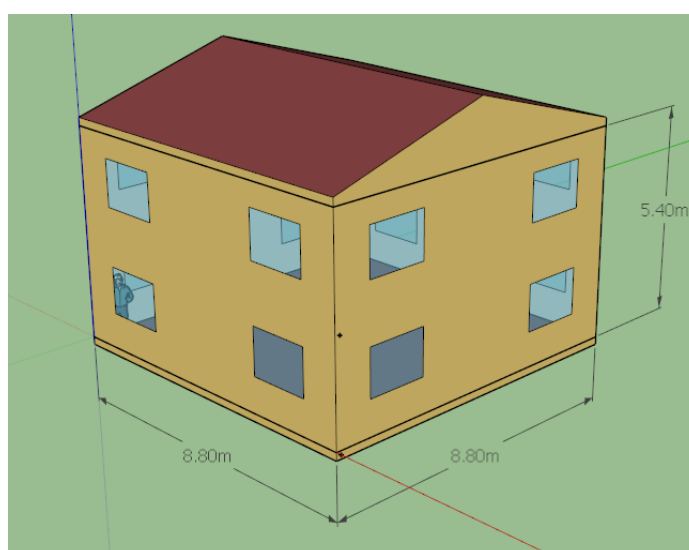


Figura 3.3 – Moradia unifamiliar período 1991:2012

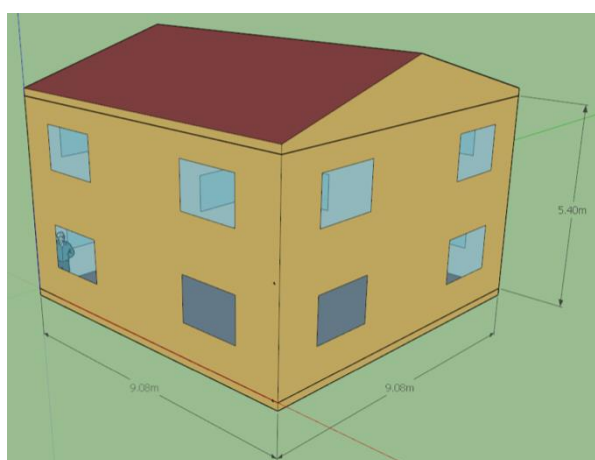


Figura 3.4 – Moradia unifamiliar posterior a 2012 (≥ 2013)

3.2.2 Edifícios multifamiliares

As características geométricas dos edifícios multifamiliares do estudo dos níveis ótimos de rentabilidade (DGEG, 2014) encontram-se no Quadro 3.2. Neste estudo, nos edifícios multifamiliares consideram-se edifícios com exposição Norte/Sul e Este/Oeste e três pisos, para se obter dados representativos da fração do rés-do-chão, do piso da cobertura e de frações intermédias. Por outro lado, são estudadas frações com empena, uma fração confinada por duas frações do mesmo edifício e uma fração com uma parede em contacto com uma fração de um edifício adjacente ($b_{tr}^1=0,6$ (REH, 2013)). Assim, neste estudo, são consideradas no total 24 frações (Figura 3.5 e na Figura 3.6). No estudo (DGEG, 2014) foram adotados apenas edifícios com 4 frentes e 2 frentes e com exposição predominante N/S.

Da análise da informação existente na base de dados do SCE, pode-se inferir que nos edifícios multifamiliares se tem uma profundidade de cerca de 1,75 vezes a largura da fachada. Neste estudo, as frações dos edifícios têm uma forma retangular, com essa relação entre lados. Em função dessa análise, também se infere que a fração envidraçada das fachadas é de cerca de 30% para as frações construídas até 1990, subindo para cerca de 40% nas construções mais recentes, evidenciando-se essa proporção de envidraçados na Figura 3.5 e na Figura 3.6.

Quadro 3.2 – Características geométricas das frações de referência de edifícios multifamiliares

Época	Unidade	2 fachadas expostas ao exterior				2 fachadas expostas ao exterior, empena e cobertura			
		≤ 1960	1961:1990	1991:2012	≥ 2013	≤ 1960	1961:1990	1991:2012	≥ 2013
Designação		1960	1980	2000	2015	1960	1980	2000	2015
Tipologia		T2	T2	T3	T3	T2	T2	T3	T3
Área útil de pavimento	(m ²)	65	70	95	105	65	70	95	105
Número de pisos		1	1	1	1	1	1	1	1
Largura da fachada X	(m)	6,09	6,32	7,37	7,75	6,09	6,32	7,37	7,75
Profundidade/Largura da empena Y	(m)	10,66	11,06	12,90	13,56	10,66	11,06	12,90	13,56
Pé direito médio (Pd)	(m)	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Área de janelas/Área de pavimento (Aw/Au)		15%	15%	15%	16%	15%	15%	15%	16%
Área de janelas/Área de fachada (WWR ²)		30%	30%	35%	40%	30%	30%	35%	40%
Área de parede por fachada	(m ²)	11,5	11,9	12,9	12,6	11,5	11,9	12,9	12,6
Área de empena	(m ²)					28,8	29,9	34,8	36,6
Área de janela (Aw) por fachada	(m ²)	4,93	5,12	6,96	8,37	4,93	5,12	6,96	8,37
Área de cobertura	(m ²)					65,0	70,0	95,0	105,0
Área de envolvente	(m ²)	33	34	40	42	127	134	170	183
Volume	(m ³)	175	189	257	284	175	189	257	284
FF=S/V ¹	(m ⁻¹)	0,19	0,18	0,16	0,15	0,72	0,71	0,66	0,65

¹ b_{tr} é o coeficiente de redução de perdas de determinado espaço não útil ou de um edifício adjacente.

² WWR - Window Wall Ratio, relação entre a área de janelas e a área da fachada.

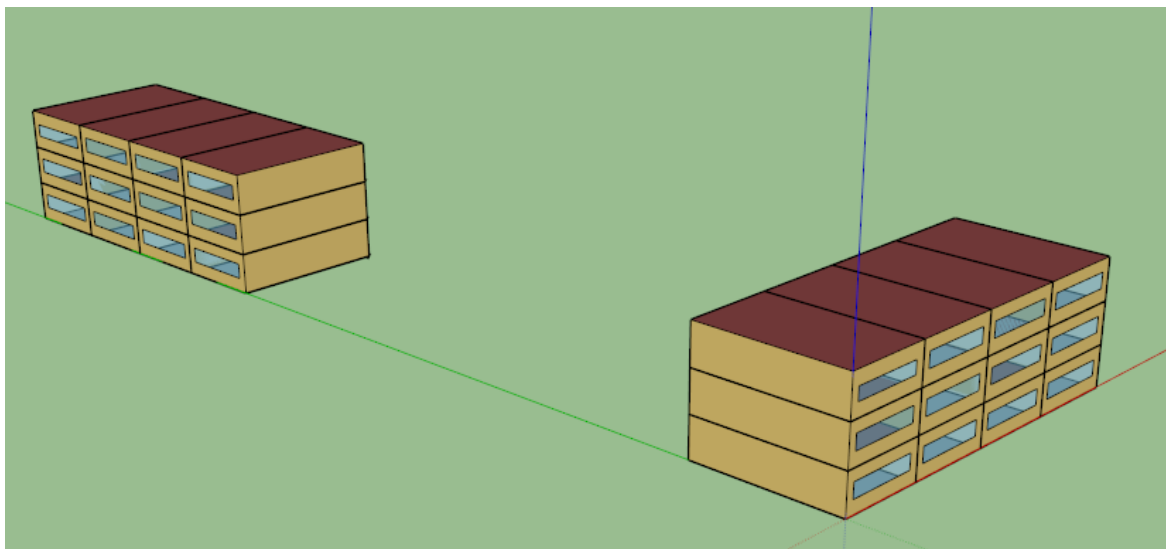


Figura 3.5 – Edifício multifamiliar anterior a 1960

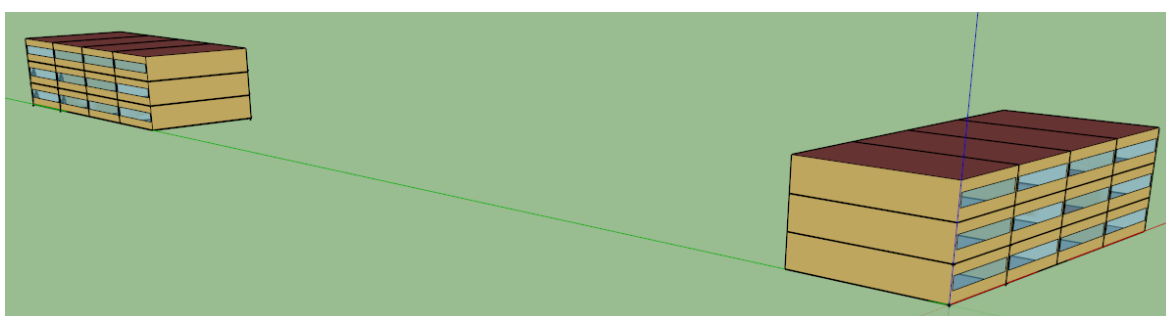


Figura 3.6 – Edifício multifamiliar do período 1991 a 2012

3.3 Soluções construtivas de referência

De acordo com o estudo realizado (DGEG, 2014), nos edifícios existentes as soluções construtivas não variam entre regiões climáticas, mas apenas com a época de construção. Nas seções seguintes, indicam-se as soluções construtivas base do edifício de referência.

3.3.1 Edifício unifamiliar

No Quadro 3.3 indicam-se as soluções de referência aplicáveis ao edifício unifamiliar e no Quadro 3.4 a síntese das características de isolamento térmicos da envolvente.

¹ FF - Fator de Forma (m^{-1}); S - Superfícies da envolvente exterior e interior (m^2); V - Volume interior (m^3).

3.3.2 Edifício multifamiliar

No Quadro 3.5 indicam-se as soluções de referência aplicáveis ao edifício multifamiliar e no Quadro 3.6 a síntese das características de isolamento térmicos da envolvente. Nos quadros seguintes U corresponde ao coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo, g ao fator solar e Rph à taxa de renovação de ar.

Quadro 3.3 – Soluções construtivas – Edifício de referência unifamiliar

Época	Materiais de construção
≤1960	<p>Paredes: Parede de alvenaria ordinária de pedra, rebocada em ambas as faces, com espessura de 50 cm;</p> <p>Coberturas: Cobertura inclinada revestida com telha cerâmica, laje aligeirada de blocos cerâmicos com espessura de 15 cm e revestimento do teto com 2 cm em estuque, desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr}=0,8$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Pavimentos: Revestimento em ladrilho, 4 cm de betonilha, laje aligeirada de 15 cm sobre desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr}=0,2$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Envidraçados: Caixilharia de madeira e vidro corrente simples, cortinas transparentes claras pelo interior;</p> <p>Rph mínimo de Inverno / Verão: 0,4 / 0,6;</p> <p>Idade: > 54 anos;</p> <p>U paredes: 2,00 W/m².°C;</p> <p>U coberturas: 2,80 W/m².°C;</p> <p>U pavimentos: 2,10 W/m².°C;</p> <p>U envidraçados: 5,10 W/m².°C; Fator solar global com proteções móveis e fixas ativadas: 0,38.</p>
1961:1990	<p>Paredes: Parede simples de alvenaria de tijolo furado de 22 cm, rebocada em ambas as faces, com espessura de 26 cm;</p> <p>Coberturas: Cobertura inclinada revestida com telha cerâmica, laje aligeirada de blocos cerâmicos com espessura de 15 cm e revestimento do teto de 2 cm em estuque, desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr}=0,8$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Pavimentos: Revestimento em ladrilho, 4 cm de betonilha, laje aligeirada de 15 cm sobre desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr}=0,2$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Envidraçados: Caixilharia metálica de correr sem corte térmico, vidro simples corrente e portadas opacas interiores claras;</p> <p>Rph mínimo de Inverno / Verão: 0,4 / 0,6;</p> <p>Idade: 53-24 anos;</p> <p>U paredes: 1,76 W/m².°C;</p> <p>U coberturas: 2,80 W/m².°C;</p> <p>U pavimentos: 2,10 W/m².°C;</p> <p>U envidraçados: 4,10 W/m².°C; Fator solar global com proteções móveis e fixas ativadas 0,30.</p>
1991:2012	<p>Paredes: Parede dupla de alvenaria de tijolo furado 11+11, com 3 cm de poliestireno expandido na caixa-de-ar, rebocada em ambas as faces, com espessura total de 30 cm;</p> <p>Coberturas: Cobertura inclinada revestida com telha cerâmica, com 3 cm de poliestireno expandido, laje aligeirada de blocos cerâmicos de 15 cm e revestimento do teto de 2 cm em estuque, desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr}=0,8$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Pavimentos: Revestimento em ladrilho, 4 cm de betonilha, 3 cm de poliestireno expandido, laje aligeirada de 15 cm sobre desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr}=0,2$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Envidraçados: Caixilharia metálica de correr sem corte térmico e vidro duplo corrente e persianas plásticas exteriores claras;</p> <p>Rph mínimo de Inverno / Verão: 0,4 / 0,6;</p> <p>Idade: 23-2 anos;</p> <p>U paredes: 0,92 W/m².°C;</p> <p>U coberturas: 0,94 W/m².°C;</p> <p>U pavimentos: 0,78 W/m².°C;</p> <p>U envidraçados: 3,10 W/m².°C; Fator solar global com proteções móveis e fixas ativadas: 0,04.</p>

Quadro 3.4 – Síntese das características térmicas dos elementos da envolvente - Unifamiliar

Parâmetro	Unidade	≤ 1960	1961:1990	1991:2012	≥ 2013, I1	≥ 2013, I2	≥ 2013, I3
U _{Parede}	W/(m ² .K)	2,00	1,76	0,92	0,50	0,40	0,35
U _{Cobertura}	W/(m ² .K)	2,80	2,80	0,94	0,40	0,35	0,30
U _{Pavimento}	W/(m ² .K)	2,10	2,10	0,78	0,40	0,35	0,30
U _{Envidraçado}	W/(m ² .K)	5,10	4,10	3,10	2,80	2,40	2,20
g _{vidro}	-	0,85	0,85	0,75	0,75	0,75	0,75
g	-	0,38	0,30	0,04	0,04	0,04	0,04
Rph	(h ⁻¹)	0,5/0,6	0,4/0,6	0,4/0,6	0,4/0,6	0,4/0,6	0,4/0,6

Quadro 3.5 – Soluções construtivas – Edifício de referência multifamiliar

Época	Materiais de construção
≤1960	<p>Paredes: Parede de alvenaria ordinária de pedra, rebocada em ambas as faces, com espessura de 50 cm;</p> <p>Coberturas: Cobertura inclinada revestida com telha cerâmica, laje aligeirada de blocos cerâmicos com espessura de 15 cm e revestimento do teto de 2 cm em estuque;</p> <p>Pavimentos: Revestimento em ladrilho, 4 cm de betonilha, laje aligeirada de 15 cm sobre desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr} = 0,2$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Envidraçados: Caixilharia de madeira e vidro corrente simples e cortinas transparentes claras;</p> <p>Rph mínimo de Inverno: 0,4 / 0,6;</p> <p>Idade: > 54 anos;</p> <p>U paredes: 2,00 W/m².°C;</p> <p>U coberturas: 2,80 W/m².°C;</p> <p>U pavimentos: 2,10 W/m².°C;</p> <p>U envidraçados: 5,10 W/m².°C; Fator solar global com proteções móveis e fixas ativadas: 0,38.</p>
1961:1990	<p>Paredes: Parede simples de alvenaria de tijolo furado de 22 cm, rebocada em ambas as faces, com espessura de 26 cm;</p> <p>Coberturas: Cobertura inclinada revestida com telha cerâmica, laje aligeirada de blocos cerâmicos com espessura de 15 cm e revestimento do teto de 2 cm em estuque, desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr} = 0,8$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Pavimentos: Revestimento em ladrilho, 4 cm de betonilha, laje aligeirada de 15 cm sobre desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr} = 0,2$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Envidraçados: Caixilharia metálica de correr sem corte térmico e vidro simples corrente e portadas opacas interiores claras;</p> <p>Rph mínimo de Inverno / Verão: 0,4 / 0,6;</p> <p>Idade: 53-24 anos;</p> <p>U paredes: 1,76 W/m².°C;</p> <p>U coberturas: 2,80 W/m².°C;</p> <p>U pavimentos: 2,10 W/m².°C;</p> <p>U envidraçados: 4,10 W/m².°C; Fator solar global com proteções móveis e fixas ativadas: 0,30.</p>
1991:2012	<p>Paredes: Parede dupla de alvenaria de tijolo furado 11cm+11cm, com 3 cm de poliestireno expandido na caixa-de-ar, rebocada em ambas as faces, com espessura de 30 cm;</p> <p>Coberturas: Cobertura inclinada revestida com telha cerâmica, com 3 cm de poliestireno expandido, laje aligeirada de blocos cerâmicos de 15 cm e revestimento do teto de 2 cm em estuque, desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr} = 0,8$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Pavimentos: Revestimento em ladrilho, 4 cm de betonilha, 3 cm de poliestireno expandido, laje aligeirada de 15 cm sobre desvão fortemente ventilado, sendo adotado $b_{tr} = 0,2$ de acordo com resultados de simulações detalhadas;</p> <p>Envidraçados: Caixilharia metálica de correr sem corte térmico e vidro duplo corrente e persianas plásticas exteriores claras;</p> <p>Rph mínimo de Inverno / Verão: 0,4 / 0,6;</p> <p>Idade: 23-2 anos;</p> <p>U paredes: 0,92 W/m².°C;</p> <p>U coberturas: 0,94 W/m².°C;</p> <p>U pavimentos: 0,78 W/m².°C;</p> <p>U envidraçados: 3,10 W/m².°C; Fator solar global com proteções móveis e fixas ativadas: 0,04.</p>

Quadro 3.6 – Síntese das características térmicas dos elementos da envolvente - multifamiliar

Parâmetro	Unidade	≤ 1960	1961:1990	1991:2012	≥ 2013, I1	≥ 2013, I2	≥ 2013, I3
U _{Parede}	W/(m ² .K)	2,00	1,76	0,92	0,50	0,40	0,35
U _{Cobertura}	W/(m ² .K)	2,80	2,80	0,94	0,40	0,35	0,30
U _{Pavimento}	W/(m ² .K)	2,10	2,10	0,78	0,40	0,35	0,30
U _{Envidraçado}	W/(m ² .K)	5,10	4,10	3,10	2,80	2,40	2,20
g _{vidro}	-	0,85	0,85	0,75	0,75	0,75	0,75
g	-	0,38	0,30	0,04	0,04	0,04	0,04
Rph	(h ⁻¹)	0,5/0,6	0,4/0,6	0,4/0,6	0,4/0,6	0,4/0,6	0,4/0,6

3.3.3 Medidas de reforço do isolamento térmico e proteção solar

Para avaliar a influência da melhoria da qualidade térmica da envolvente das frações existentes e de soluções alternativas para a construção nova, foram consideradas as seguintes soluções:

- isolamento térmico de coberturas, com aplicação de isolamento sobre a esteira com espessura de 3, 6, 10 e 16 cm;
- isolamento térmico de paredes com aplicação nuns casos de isolamento pelo exterior e noutros pelo interior com espessura de 3, 6, 10 e 16 cm;
- paredes com revestimento exterior de cor clara (absortância de 0,4) e de cor escura (absortância de 0,8);
- isolamento térmico do pavimento com aplicação de isolamento pelo lado exterior com 6 cm de espessura;
- vãos envidraçados e proteções solares com coeficientes de transmissão térmica (U_{wdn}) de 5.1, 2.7 e 2.0 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, fator solar do vidro de 0.85, 0.75 e 0.60 e fator solar do vão com proteção solar de 0.45, 0.08 e 0.05);
- sistema de ventilação, com base em soluções com $R_{\text{ph}}=0,8 \text{ h}^{-1}$ e $0,4 \text{ h}^{-1}$, bem como a solução com $0,4 \text{ h}^{-1}$ e com recuperação de calor com uma eficiência de 60%.

Deste modo são avaliados elementos da envolvente com as gamas de coeficientes de transmissão térmica indicados na Figura 3.7, abrangendo também valores de isolamento superiores aos valores de referência regulamentares (REH, 2013).

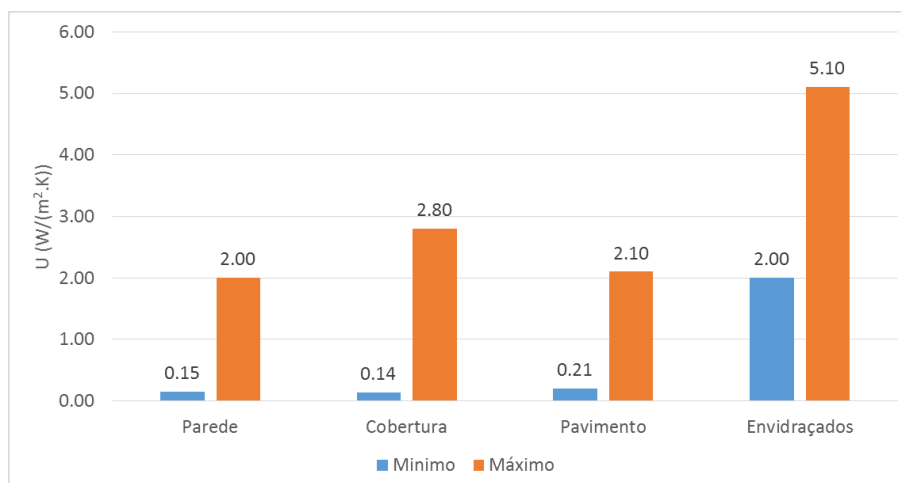


Figura 3.7 – Gama de valores do coeficiente de transmissão térmica das soluções da envolvente

3.4 Características de utilização

Na avaliação do comportamento térmico solar passivo do edifício considera-se que existem ganhos térmicos internos de equipamentos e de iluminação de $4 \text{ W}/\text{m}^2$, ou seja, ganhos internos de calor mensais de $2,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{mês})$, de certa forma concordantes com o consumo médio anual de energia elétrica no setor de habitação de $2,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{mês})$ (INE e DGEG, 2011), ou $2,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{mes})$ se for descontado o consumo associado à climatização e à produção de água quentes sanitária. A estes ganhos dos equipamentos e da iluminação de $4 \text{ W}/\text{m}^2$, acrescem 110 W por ocupante,

correspondente ao valor médio dos ganhos de calor durante o período de sono e de atividade sedentária. Considera-se que a habitação se encontra ocupada em permanência.

Para melhor valorizar o comportamento térmico solar passivo do edifício, considera-se que os ocupantes têm comportamentos adaptados, nomeadamente:

Na estação de aquecimento:

- São mantidos recolhidos os dispositivos de proteção solar ou de oclusão (proteção solar aberta) para maximizar o aproveitamento dos ganhos solares;
- Durante a noite os dispositivos de oclusão são fechados por questões de privacidade, de segurança e para aumentar o isolamento térmico dos vãos;
- As janelas permanecem fechadas, para reduzir as perdas de calor nos períodos mais frios, sendo a renovação geral e permanente do ar mantida pelo sistema de ventilação.

3.5 Clima

Para avaliar o comportamento térmico solar passivo de habitações em diferentes climas, são considerados os climas de Lisboa (à altitude de referência de 54 m - LSB, I1 / V3), Bragança (à altitude de referência de 817 m - BRG, I3 / V2) e Portalegre (à altitude de referência de 500 m - PTL, I2 / V3). Para melhor avaliar o comportamento térmico solar passivo das frações nos períodos mais críticos, considera-se apenas o mês de janeiro (correspondente ao mês mais frio) e o mês de julho (representativo do período mais quente). No Quadro 3.7 apresenta-se um resumo dos dados climáticos considerados (REH, 2013).

Quadro 3.7 – Dados climáticos

	Lisboa	Bragança	Portalegre
Altitude (m)	54	817	500
Zona climática	I1, V3	I3, V2	I2, V3
Duração da estação de aquecimento (meses)	5,1	7,3	5,8
Temperatura média mês mais frio (°C)	11,0	5,0	8,8
Graus-dia de aquecimento (base 18°C)	978	2207	1526
Temperatura média de verão (°C)	22,3	20,5	24,5
G_{sul} (kWh/m²)	150	125	145

4 | Avaliação do comportamento térmico solar passivo de habitações com simulação dinâmica

4.1 Resultados globais

Com base nos pressupostos anteriores foram realizadas simulações das frações do tipo moradia unifamiliar, para os 3 climas, para as 4 épocas construtivas e para a combinação das respetivas soluções de reforço do desempenho térmico, perfazendo 22.680 casos. Todos esses resultados estão representados na Figura 4.1. Na Figura 4.2 são representados os resultados para as frações multifamiliares da tipologia “anterior a 1960”, na Figura 4.3 para a tipologia “1960:1990”, na Figura 4.4 para a tipologia “1991:2012” e na Figura 4.5 para a tipologia “construção nova”. Para os 3 climas e para as quatro épocas construtivas, para as 24 frações dos edifícios multifamiliares e para a combinação das respetivas soluções de reforço do desempenho térmico, existem 544.320 casos. Nas figuras dos edifícios multifamiliares também se representa a azul os resultados das moradias unifamiliares, para ser perceptível a sobreposição de resultados.

Dessas quatro figuras, infere-se que existe uma relação aproximadamente biunívoca entre a temperatura média interior e o indicador do comportamento térmico solar passivo, ou seja a percentagem de tempo de desconforto, ponderada pelo valor de PMV. Estes resultados permitem evidenciar que a temperatura média interior no mês mais frio pode ser um bom indicador do comportamento térmico solar passivo de uma habitação, ou seja, uma habitação com um reduzido número de horas de desconforto e que nesse sentido pode dispensar sistemas mecânicos.

Para que a perceção de desconforto seja limitada a 10%, a temperatura média mensal interior calculada de forma detalhada não deve ser inferior a 16°C. Para temperatura média interior superior a 18,5 °C a percentagem de tempo ponderada de PMV é sempre inferior a 10%, permitindo identificar um edifício passivo.

Pelas figuras, consta-se que existem inúmeras soluções com possibilidade de assegurar condições de conforto térmico satisfatórias apenas com base em soluções passivas, apesar dos diferentes fatores de forma e climas. Contudo, existem também inúmeras soluções que não permitem satisfazer esse princípio de um edifício com necessidades térmicas quase nulas para assegurar o conforto, evidenciando um grande potencial de reabilitação da construção para melhorar o bem-estar dos seus ocupantes. No Anexo apresentam-se estes mesmos resultados, mas discriminados por zona climática, onde é perceptível a maior facilidade de obter frações confortáveis no clima mais ameno de Lisboa, do que em Portalegre ou Bragança.

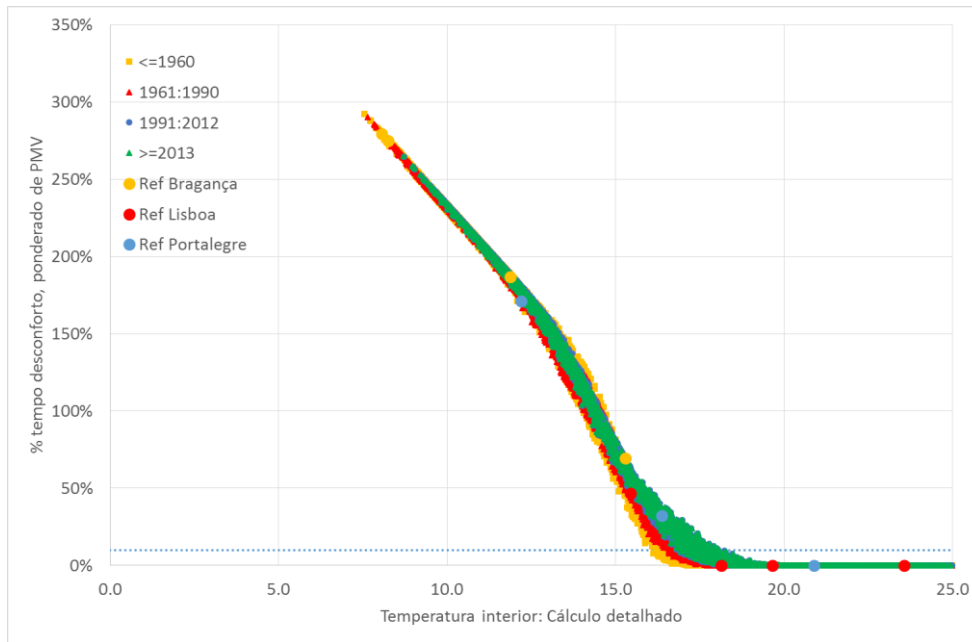


Figura 4.1 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo das moradias

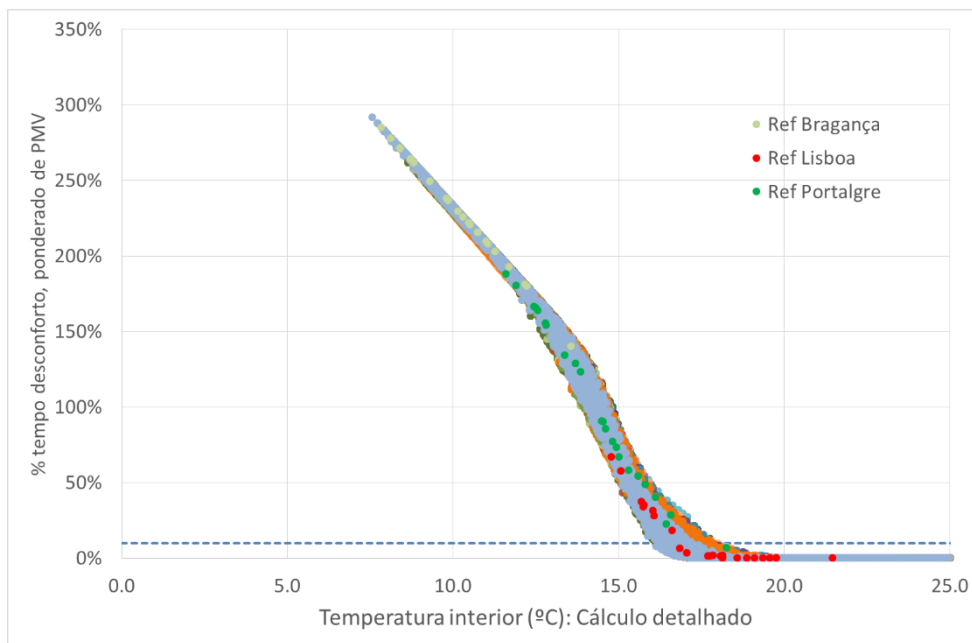


Figura 4.2 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo de apartamentos anteriores a 1960

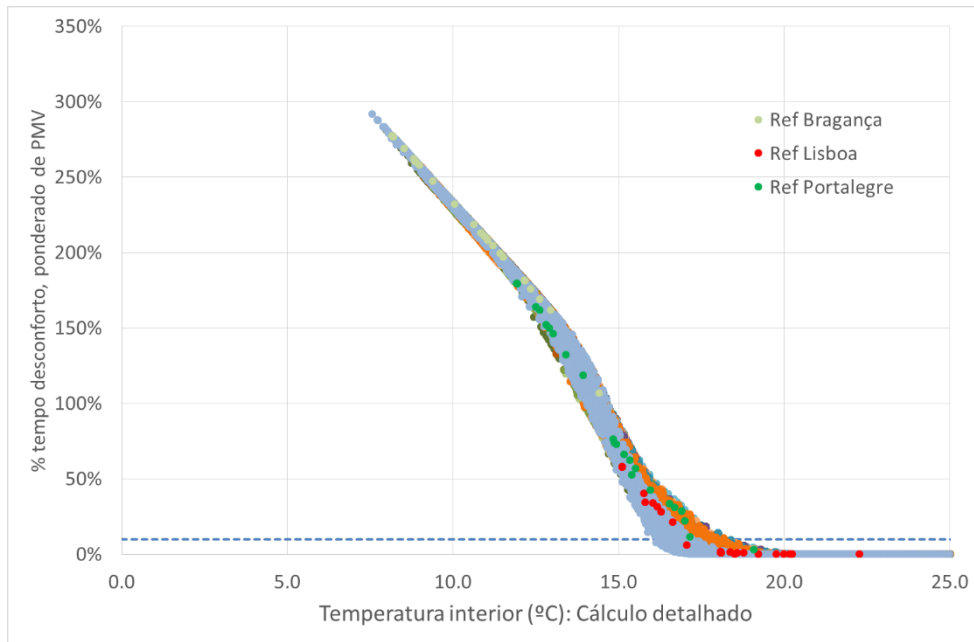


Figura 4.3 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo de apartamentos 1961:1990

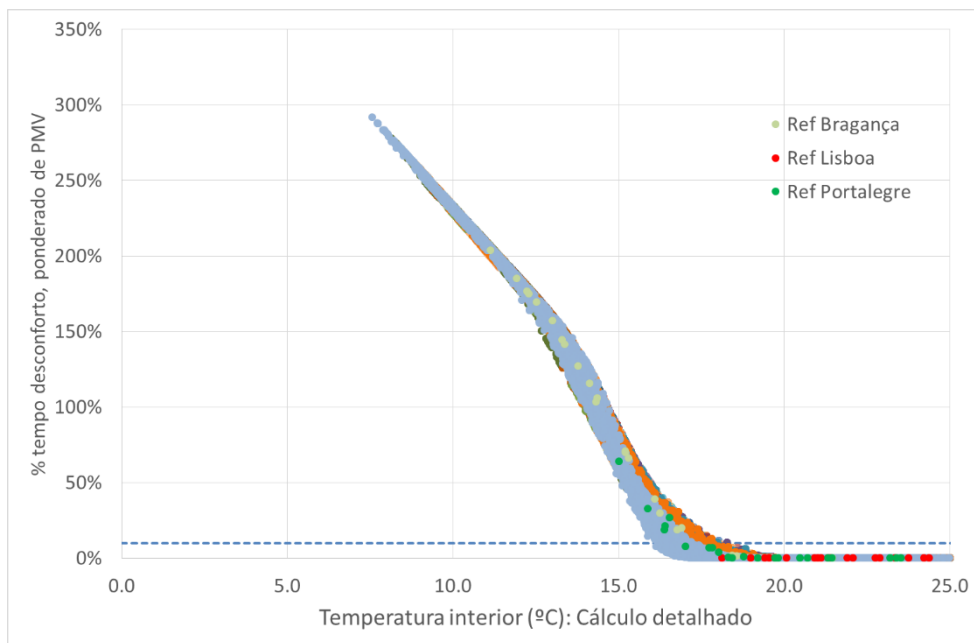


Figura 4.4 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo de apartamentos 1991:2012

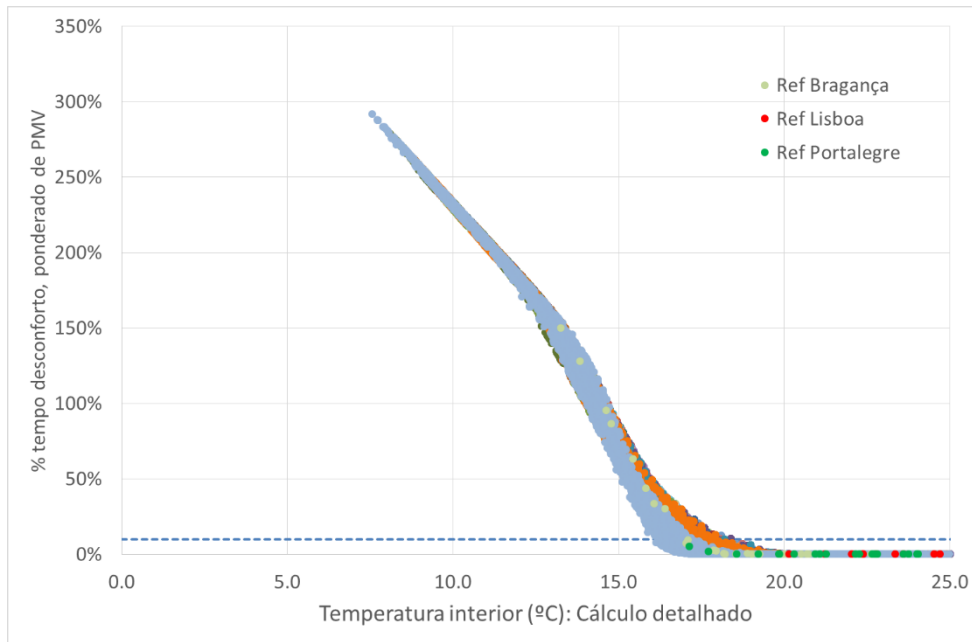


Figura 4.5 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo de apartamentos posteriores a 2013

4.2 Validação

Na Figura 4.6 encontram-se representados os resultados de todos os casos de estudo da relação entre a temperatura média e a percentagem de tempo de desconforto prevista para o mês de janeiro. Para validar a relação empírica entre a temperatura média interior e o indicador de comportamento térmico solar passivo foi efetuado o teste de correlação de Spearman's, obtendo-se uma correlação estatisticamente forte ($\rho=-0.985$) e significativa ($p < 2.2 \times 10^{-16}$).

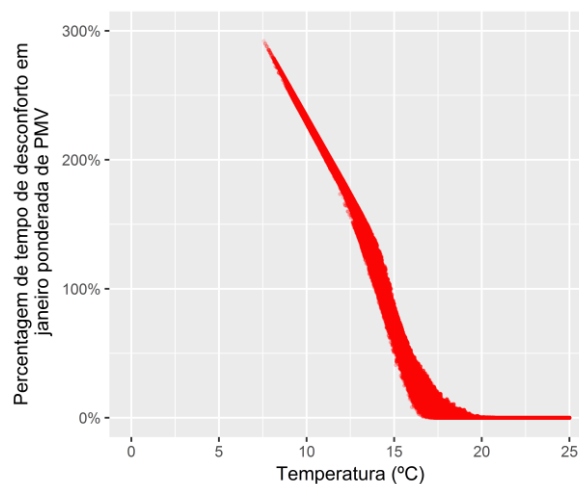


Figura 4.6 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo: todos os casos

4.3 Análise de alguns parâmetros

A metodologia adotada para avaliar o comportamento térmico solar passivo permite evidenciar o impacto do clima na dificuldade de obter condições de conforto, sendo evidenciado que nas localidades mais frias (Portalegre e Bragança) a obtenção de um edifício passivo requer, como se esperaria, uma qualidade térmica mais elevada.

Por exemplo, face às soluções avaliadas (ver secção 3.3.3), nas moradias em Bragança para ser possível alcançar uma percentagem de tempo de desconforto ponderado inferior a 10% é necessário:

- Recorrer à recuperação de calor do ar extraído do sistema de ventilação e reduzir as infiltrações de ar ($R_{ph}=0.4 \text{ h}^{-1}$);
- Elementos da envolvente opaca apresentarem um isolamento térmico elevado, cerca de 10 cm a 16 cm de isolamento térmico na cobertura e paredes e 6 cm no pavimento;
- Envidraçados com pelo menos U_{wdn} de $2,7 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e fator solar não inferior a 0,75, ou U_{wdn} de $2,0 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e fator solar não inferior a 0,60.

Na Figura 4.7 representa-se a comparação dos coeficientes de transmissão térmica requeridos para um edifício poder ser considerado passivo no clima de Bragança, com os valores ótimos resultantes dos estudos dos custos ótimos (DGEG, 2014), enfatizando que no edifício passivo a ventilação tem recuperação de calor com uma eficiência não inferior a 60%. Dessa análise conclui-se que a exigência de isolamento do edifício passivo é superior à da construção nova nas paredes e cobertura. Nos envidraçados, o nível de exigência é menor do que os das soluções ótimas, desde que exista captação de ganhos solares.

Deste modo, a apreciação do comportamento térmico solar passivo, destinada a promover soluções construtivas que conduzam a edifícios confortáveis, com baixa necessidade de recurso a sistema de climatização, acaba por conduzir a soluções ainda mais exigentes do que as proporcionadas pelos estudos dos níveis ótimos de rentabilidade, podendo configurar o limiar mínimo para os edifícios de necessidades energéticas quase nulas.

No caso dos apartamentos ou de climas mais amenos, existe um maior número de soluções que permitem assegurar a satisfação do critério de comportamento térmico solar passivo, não fazendo sentido apresentar uma comparação direta com as soluções ótimas.

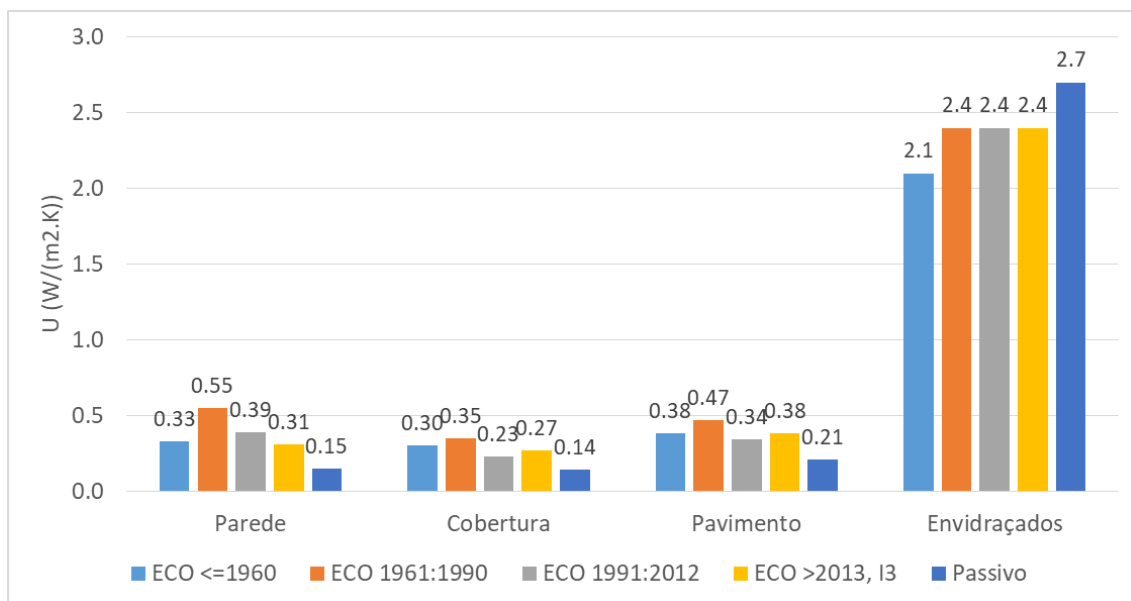


Figura 4.7 – Coeficiente de transmissão térmica para um edifício passivo face aos valores ótimos das várias épocas de construção do estudo dos custos ótimos (ECO): Moradias, Bragança

5 | Cálculo simples do indicador passivo

5.1 Método de cálculo simples

Do capítulo 4 infere-se que o comportamento térmico solar passivo de habitações (percentagem de horas de desconforto ponderada de PMV não superior a 10% do tempo) pode ser avaliado pelo valor da temperatura média no mês mais frio, independentemente da zona climática, soluções construtivas e arquitetónicas. Para que a perceção de desconforto seja limitada a 10%, a temperatura média mensal interior calculada de forma detalhada não deve ser inferior a 16°C. Para temperatura média interior superior a 18,5 °C a percentagem de tempo ponderada de PMV é sempre inferior a 10%, permitindo identificar um edifício passivo.

O cálculo detalhado da temperatura média interior é complexo e requer o uso de modelos de simulação detalhada como foi adotado no capítulo 4, ou então podem ser utilizados modelos mais simples como o definido nas normas (EN ISO 13790, 2012) ou (EN ISO 13792, 2012), nos quais é adotado um elemento de inércia térmica (C_m) e cinco resistências térmicas para efetuar a análise da transmissão de calor e o balanço de energia de uma zona térmica. Simplificando este “circuito”, o comportamento térmico pode ser assemelhado a um circuito RC (Figura 5.2). O comportamento dinâmico do circuito RC é caracterizado pela constante de tempo¹ (τ expressa em h) que pode ser obtida pela expressão (3), em que C_m é a capacidade térmica (expressa em J/K) e a resistência térmica equivalente (R , expressa em K/W) é dada pelo inverso do coeficiente de transmissão térmica global da fração (H , expressão (11)).

A construção Portuguesa é normalmente classificada como tendo inércia térmica média ou forte, às quais corresponde uma massa térmica superficial útil por unidade de área de pavimento superior a 400 kg/m² para classe de inércia térmica forte e não inferior a 150 kg/m² para a classe de inércia térmica média.

A constante de tempo de uma zona varia com a massa térmica superficial útil e com o coeficiente global de perdas. Para a mesma massa térmica e o mesmo nível de isolamento térmico dos componentes da envolvente, a constante de tempo varia com o fator de forma da fração. Na Figura 5.3 apresentam-se estimativas da constante de tempo para frações com diferentes massas térmicas, níveis de isolamento térmico da envolvente e fator de forma. Atendendo aos valores do coeficiente a para cálculo do fator de utilização dos ganhos térmicos brutos indicado no (REH, 2013)² e ao método de cálculo desse coeficiente definido na norma (EN ISO 13790, 2012), são estimadas constantes de

¹ A constante de tempo é o tempo necessário para que exista um decaimento exponencial até 36,7% do valor inicial.

² $a = 1,8$ para frações de classe de inércia térmica fraca; $a = 2,6$ para frações de classe de inércia térmica média; $a = 4,2$ para frações de classe de inércia térmica forte.

A classe de inércia térmica fraca aplica-se a frações com massa térmica superficial útil inferior a 150 kg/m²; Classe de inércia térmica média quando a massa térmica superficial útil se situa entre 150 a 400 kg/m² e classe de inércia térmica forte quando a massa térmica superficial útil é superior a 400 kg/m².

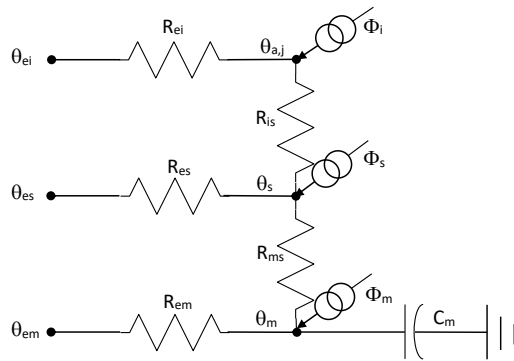
tempo de 2,25 dias para frações de classe de inércia térmica média e de 4,25 dias para frações de classe de inércia térmica forte.

Deste modo, para frações que pertençam às classes de inércia térmica média ou forte a constante de tempo é normalmente superior a 1 dia, pelo que é de esperar que a amplitude da oscilação da temperatura interior seja substancialmente inferior à da oscilação da temperatura exterior (mantendo-se constantes os ganhos de calor e a taxa de renovação de ar), pois a constante de tempo da zona é substancialmente superior a metade do período diário da oscilação da temperatura exterior.

No mês mais frio a temperatura exterior é inferior à temperatura interior de conforto (indicada no Quadro 3.7) e a amplitude térmica diária é de cerca de 6 a 8°C. Na Figura 5.4 e na Figura 5.5 representam-se as variações da temperatura operativa interior face a uma variação cíclica da temperatura exterior (temperatura média exterior de 10,7°C e amplitude de 4,1°C), para frações com diferentes massas térmicas úteis e constantes de tempo de respetivamente 0,45, 1,35, 2,25, 4,5 e 6,75 dias. Na Figura 5.4 identifica-se a resposta das diferentes frações face a uma solicitação aproximadamente equivalente a um degrau, onde se apresenta a constante de tempo de cada uma das 5 frações. Na Figura 5.5 representa-se a variação horária da temperatura operativa interior, onde se constata que a temperatura média interior é igual à temperatura média exterior e a amplitude da variação da temperatura interior é inversamente proporcional ao aumento da massa térmica superficial útil. Nas frações de inércia térmica média ou forte a variação da temperatura interior é relativamente diminuta (cerca de 1°C), enquanto nas frações de inércia térmica fraca é de cerca de 5°C.

Tendo em conta que para frações de inércia térmica média ou forte a oscilação diária da temperatura é diminuta, é razoável considerar o seu valor médio para uma avaliação das condições de conforto, podendo ser dispensado o cálculo horário da temperatura, como de certa forma se concluiu no capítulo anterior. Assim, apesar das características dinâmicas das condições de fronteira e dos fenómenos de transmissão de calor nos elementos construtivos, pode ser razoável utilizar a condição de regime estacionário para determinar a temperatura média interior.

$$\tau = \frac{C_m/3600}{H} \quad (3)$$



Nós de Temperatura:	Resistências térmicas:
θ_{ai} – Ar interior	R_{ei} - devido à renovação do ar
θ_{ei} – Ar exterior	R_{es} - dos componentes leves que separam o exterior do interior
θ_m – Massa	R_{em} - dos componentes pesados que separam o exterior do interior
θ_s – <i>Star</i>	R_{is} , R_{ms} – entre as superfícies interiores e o ar interior
θ_{es} , θ_{em} – ar-sol para os componentes externos	

Figura 5.1 – Modelo simplificado (5RC) do comportamento térmico da fração

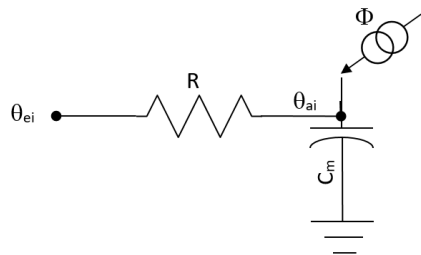


Figura 5.2 – Modelo simplificado (RC) do comportamento térmico da fração

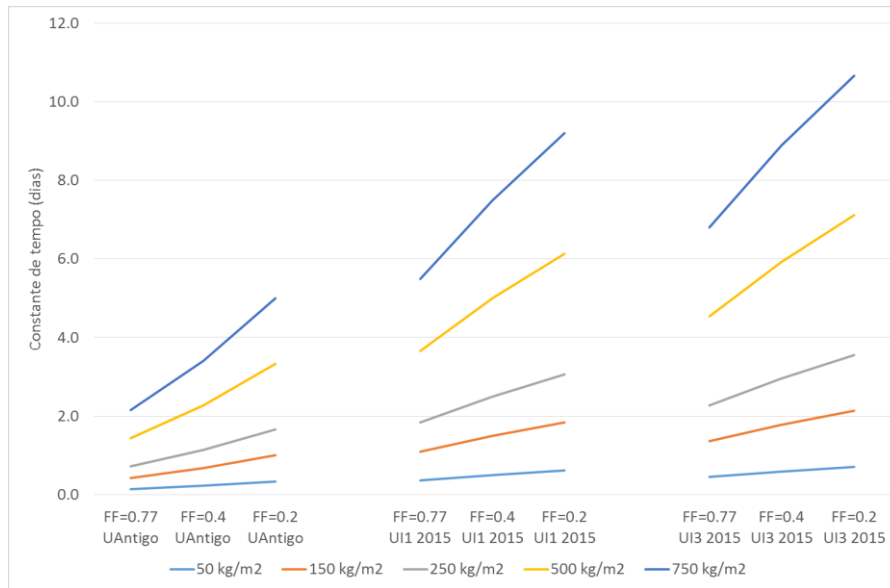


Figura 5.3 – Constante de tempo em função do nível de isolamento térmico da envolvente e do fator de forma

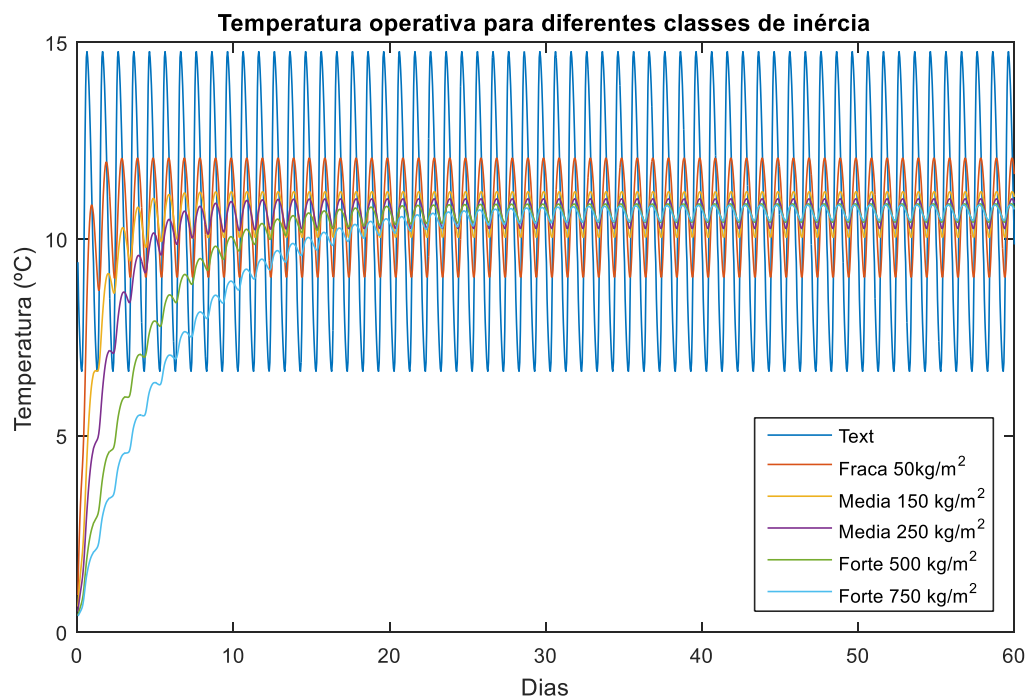


Figura 5.4 – Temperatura operativa interior, função da variação cíclica da temperatura exterior

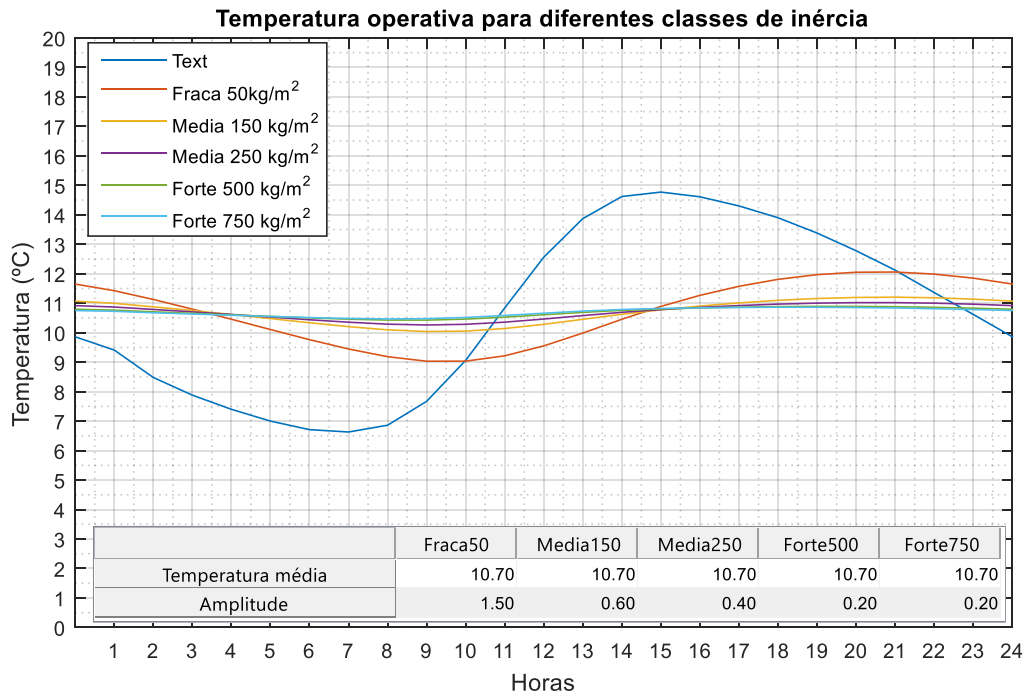


Figura 5.5 – Temperatura operativa interior depois de atingido equilíbrio, função da variação cíclica da temperatura exterior

Quando se considera a existência de ganhos térmicos internos constantes (Figura 5.6 e Figura 5.7) é observado um comportamento semelhante ao anterior; contudo, neste caso a temperatura média interior é superior à da temperatura exterior. No caso de existirem ganhos solares, como estes variam ao longo do dia, regista-se um aumento da amplitude da temperatura interior (Figura 5.8 e Figura 5.9), que agora chega a ser cerca de 2 °C em frações de inércia térmica média e, portanto, pode comprometer a avaliação simplificada do comportamento térmico solar passivo da fração. Pela Figura 5.10, constata-se que a oscilação de temperatura em espaços de uma habitação é de cerca de 2°C, havendo contudo diferenças de temperaturas entre espaços.

Deste modo, para períodos de tempo relativamente superiores à constante de tempo (frações com inércia térmica forte ou média), neste estudo vai ser testada a hipótese da temperatura média interior mensal poder ser calculada com o valor médio das solicitações, por comparação com os resultados do cálculo do modelo detalhado no capítulo 4.

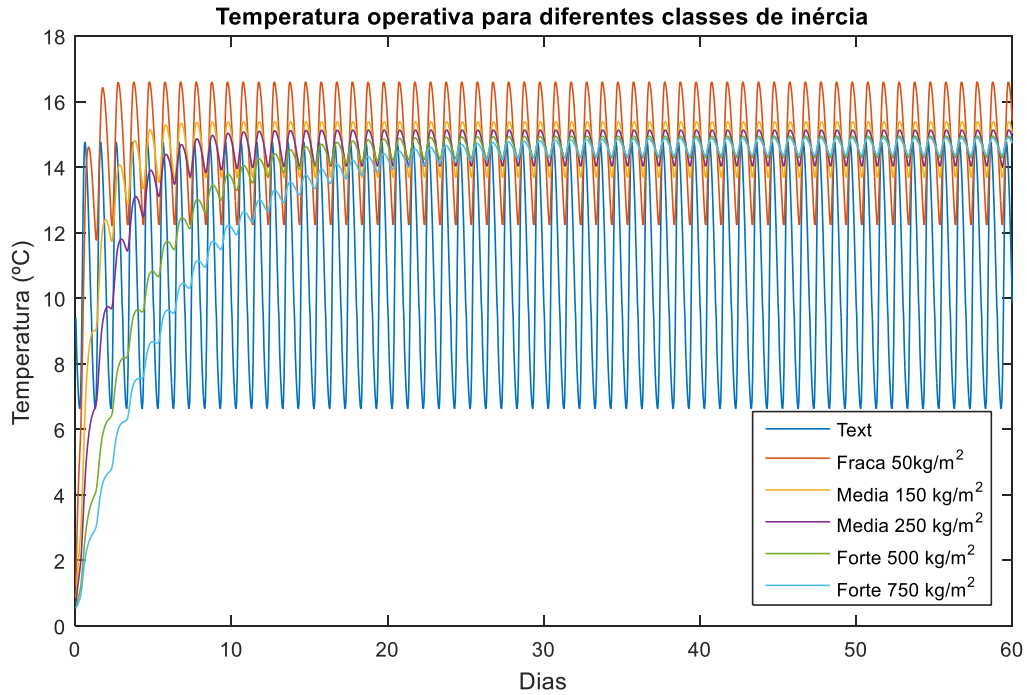


Figura 5.6 – Temperatura operativa interior, função da variação cíclica da temperatura exterior e considerando ganhos internos de calor

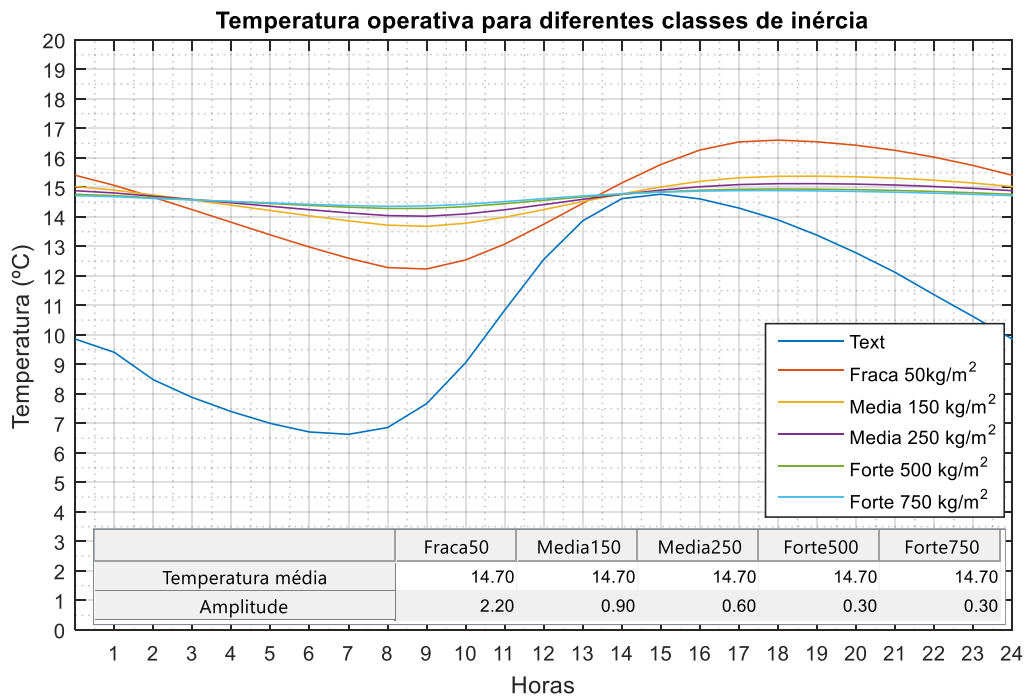


Figura 5.7 – Temperatura operativa interior depois de atingido equilíbrio, em função da variação cíclica da temperatura exterior e considerando ganhos internos de calor

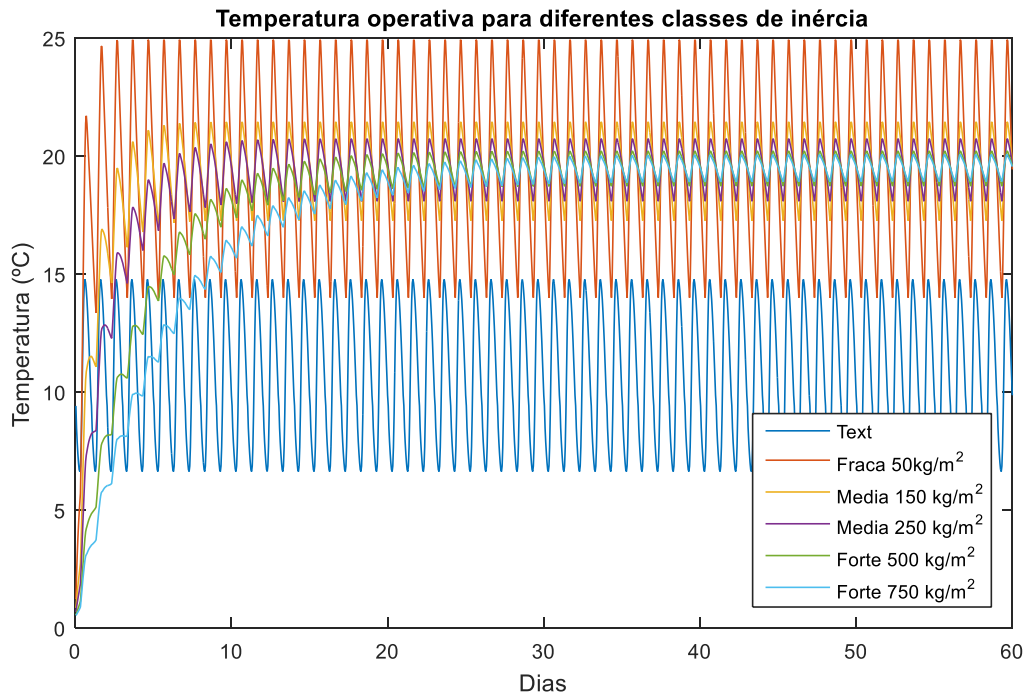


Figura 5.8 – Temperatura operativa interior, em função da variação cíclica da temperatura exterior e considerando ganhos internos de calor e ganhos solares

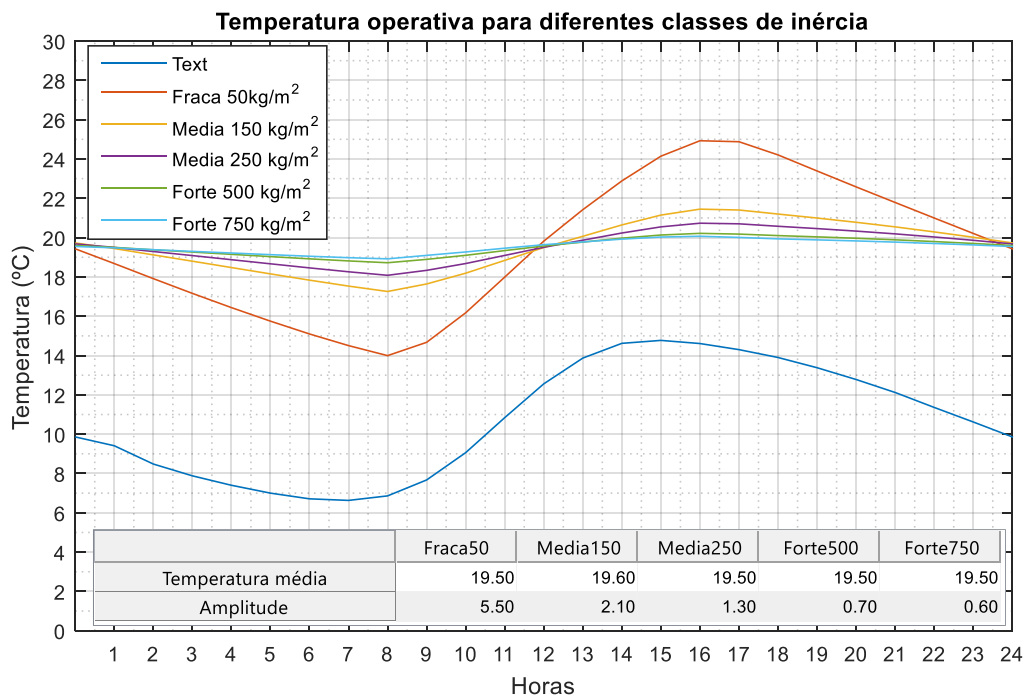


Figura 5.9 – Temperatura operativa interior depois de atingido equilíbrio, em função da variação cíclica da temperatura exterior e considerando ganhos internos de calor e ganhos solares

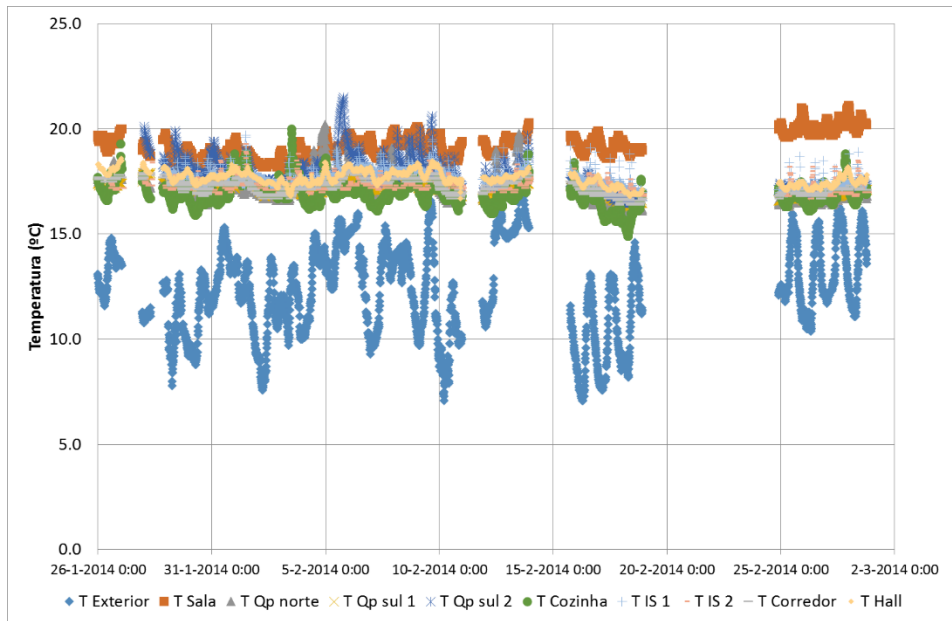


Figura 5.10 – Temperatura medida numa fração em Lisboa

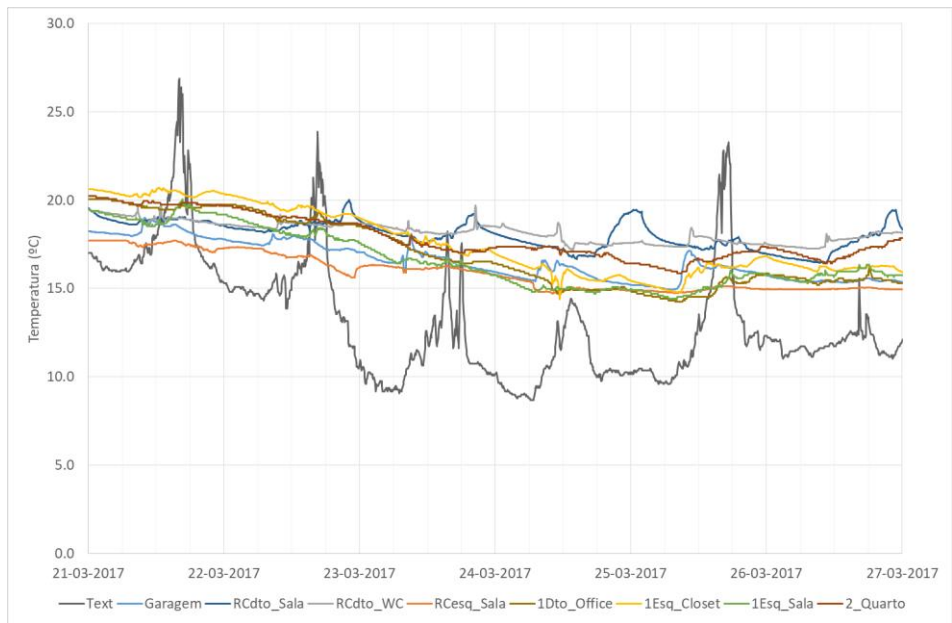


Figura 5.11 – Temperatura medida em cinco frações de um edifício situado na zona de Lisboa

Aplicando o princípio da conservação de energia em regime estacionário ao volume de controlo definido pela massa de ar interior da fração, a temperatura interior média mensal pode ser calculada pela expressão (4).

$$T_i = T_e + \frac{G}{H} \tag{4}$$

Em que:

- T_i – Temperatura média interior mensal (°C)
- T_e – Temperatura média exterior mensal (°C)
- G – Ganhos térmicos médios (W)
- H – Coeficiente global de perdas térmicas (W/°C)

Na fração podem existir ganhos térmicos devidos aos equipamentos (G_{eq}), aos ocupantes (G_{oc}), aos vãos envidraçados (G_{env}) e aos ganhos térmicos pelos elementos da envolvente opaca (G_{op}), expressão (5). Esses ganhos de calor podem ser calculados pelas expressões (6) a (10).

$$G = G_{eq} + G_{oc} + G_{op} + G_{env} \quad (5)$$

$$G_{eq} = q_{int} \cdot A_p \quad (6)$$

$$G_{oc} = 110 \times n_p \quad (7)$$

$$G_{op} = \sum G_{solj} / (3.6 \times 31 \times 24) \times abs_{sol} \times A_j \times U_j / 25 \quad (8)$$

$$G_{env} = \sum G_{solj} / (3.6 \times 31 \times 24) \times F_{s,inj} \cdot A_{s,i,nj} \quad (9)$$

$$A_{s,nj} = A_w \cdot F_g \cdot g_i \quad (10)$$

Em que:

- G , Ganhos térmicos brutos médios mensais (W);
- q_{int} , Ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície, iguais a 4 W/m²;
- A_p , Área útil de pavimento (m²);
- n_p , número de pessoas;
- G_{sol} , Valor médio mensal da energia solar incidente numa superfície vertical com a orientação i , por unidade de área (kWh/m².mês);
- abs_{sol} , Absortância solar do elemento opaco;
- A_j , Área do elemento opaco da envolvente (m²);
- U_j , Coeficiente de transmissão térmica do elementos opaco da envolvente (W/(m².K));
- $F_{s,inj}$, Fator de obstrução do vão envidraçado n , com orientação j , no mês de janeiro;
- $A_{s,inj}$, Área efetiva coletora de radiação solar do vão envidraçado na superfície n , com orientação j (m²);
- j , Índice correspondente a cada uma das orientações;

- n , Índice que corresponde a cada uma das superfícies com orientação j ;
- A_w , Área total do vão envidraçado, incluindo caixilho (m^2);
- F_g , Fração envidraçada do vão;
- g_i , Fator solar de inverno.

O coeficiente global de perdas térmicas (H) é calculado pela soma do coeficiente global de transferência de calor por transmissão ($H_{tr,i}$) e por ventilação ($H_{ve,i}$). No caso de existirem sistemas de recuperação de calor do ar de rejeição, as perdas térmicas por ventilação serão calculadas pela expressão (14).

$$H = H_{tr,i} + H_{ve,i} \quad (11)$$

$$H_{tr,i} = \sum A_i \times U_i + A_i \times U_i \times b_{tr} \quad (12)$$

$$H_{ve,i} = 0.34 \times R_{ph,i} \times A_p \times P_d \quad (13)$$

$$H_{ve,i} = 0.34 \times R_{ph,i} \times A_p \times P_d(1 - \eta) \quad (14)$$

Em que:

- $H_{tr,i}$, Coeficiente global de transferência de calor por transmissão ($W/^\circ C$);
- $H_{ve,i}$, Coeficiente global de transferência de calor por ventilação ($W/^\circ C$);
- $R_{ph,i}$, Taxa nominal de renovação do ar interior na estação de aquecimento (h^{-1});
- A_p , Área interior útil de pavimento (m^2);
- P_d , Pé direito médio da fração (m);
- η , rendimento da recuperação de calor do ar de ventilação.

5.2 Modelo simples de cálculo da temperatura face ao modelo detalhado

Função das simplificações inerentes ao modelo de cálculo simples da temperatura média interior, para avaliar a sua adequação na estimativa da temperatura média interior foi realizado o cálculo da temperatura para as 567.000 frações objeto de simulação detalhada. Nas figuras seguintes representa-se a relação entre o valor da temperatura operativa média mensal calculada pelo método detalhado e pelo método simples. De uma forma geral, quando a temperatura média interior aumenta, o valor do cálculo detalhado tem tendência a ser superior ao do cálculo simples (Figura 5.12) devido ao efeito da variação das condições ambientais e da condução de calor em regime dinâmico pelos

elementos pesados. Da análise dos resultados, essa diferença pode ser reduzida adotando a expressão (15) para calcular a temperatura média interior. De uma forma geral as diferenças são inferiores a 1°C com essa expressão (Figuras 5.13 a 5.17), tendo valores máximos de 2,8°C. As diferenças superiores a 1°C podem ser importantes, avaliando-se na seção seguinte o seu impacto na indicação da percepção de conforto proporcionado pelas frações.

$$T_i = T_e + a \left(\frac{G}{H} \right)^b \quad (15)$$

a	b
1,29	0,89

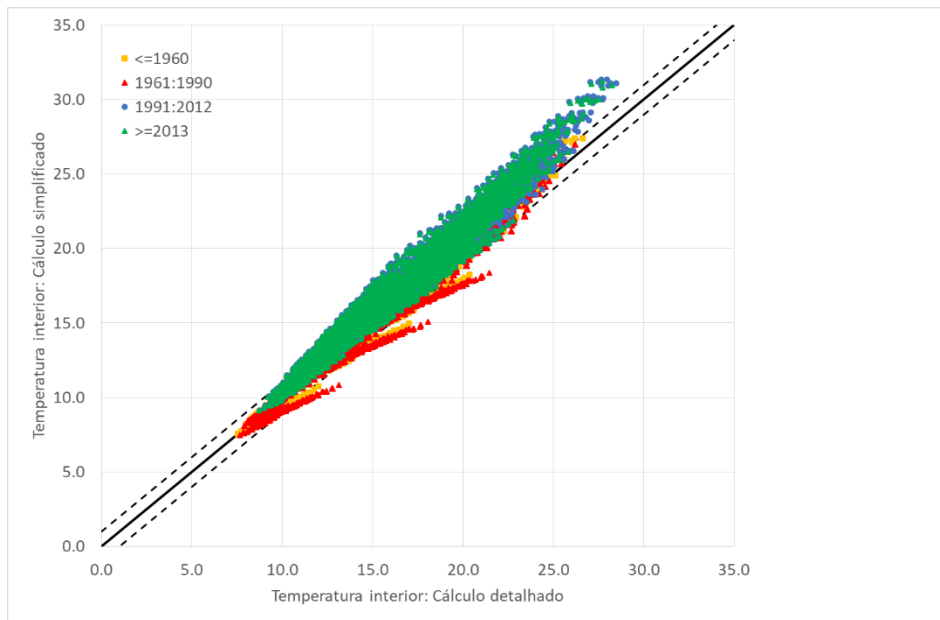


Figura 5.12 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Moradias (expressão (4))

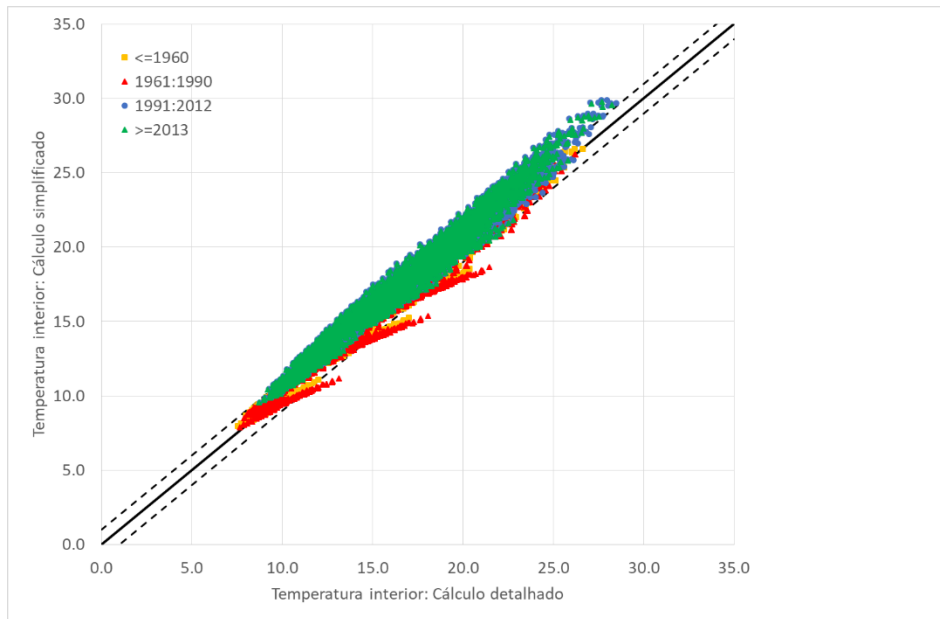


Figura 5.13 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Moradias (expressão (15))

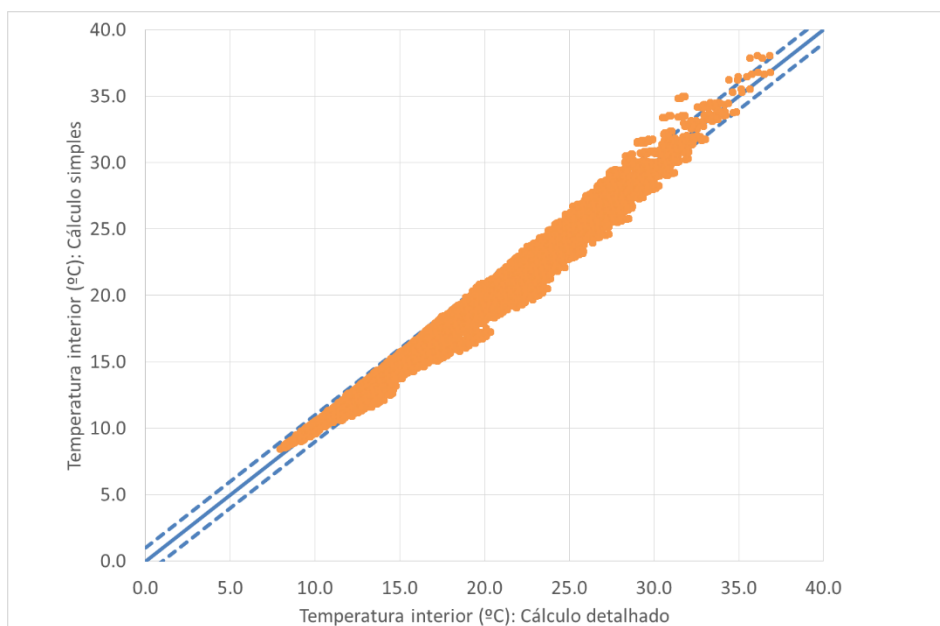


Figura 5.14 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Apartamentos anteriores a 1960 (expressão (15))

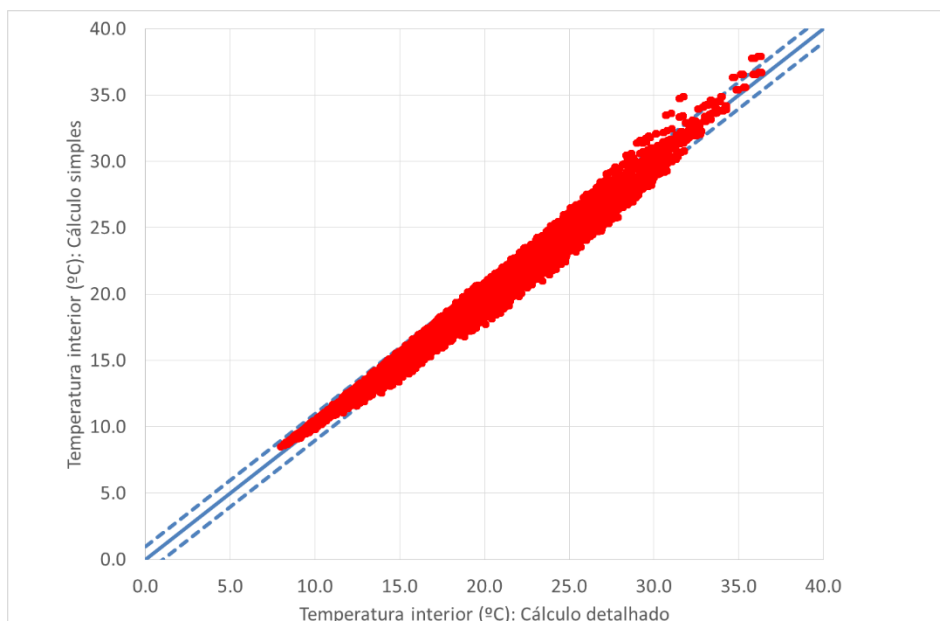


Figura 5.15 – Comparação do cálculo simples com detalhado: Apartamentos 1961 a 1990 (expressão (15))

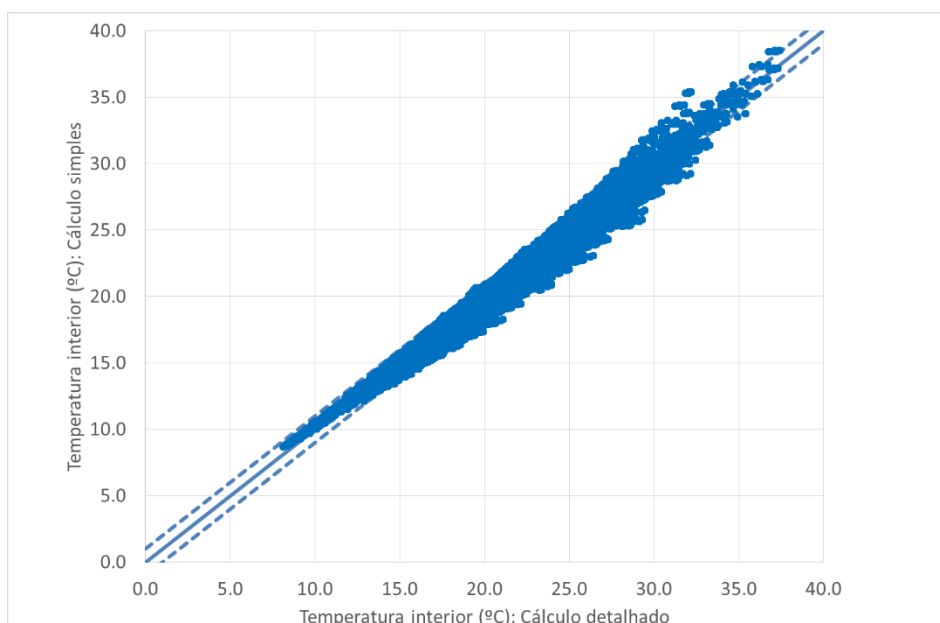


Figura 5.16 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Apartamentos 1991:2012 (expressão (15))

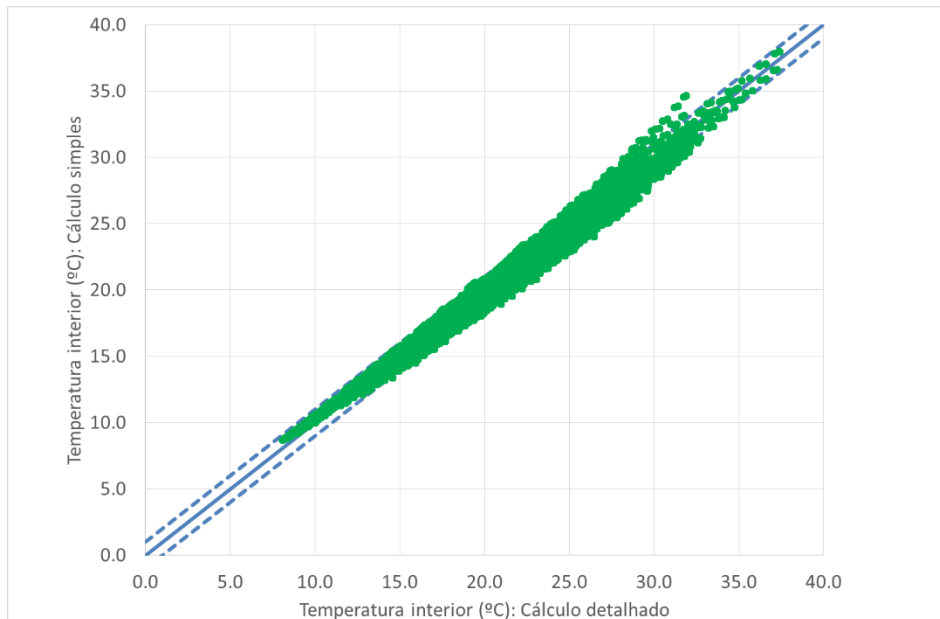


Figura 5.17 – Comparação do cálculo da temperatura operativa com método simples e detalhado: Apartamentos posteriores a 2013 (expressão (15))

Analisando conjuntamente os 567.000 casos de estudo que se encontram indicados na Figura 5.18, verifica-se que existe uma relação estatisticamente forte ($R^2=0.98$) e significativa ($p<2.2\times 10^{-16}$) entre a temperatura calculada pelo método detalhado e pelo método simples (expressão (15)). O valor de RMSE é de $0,7^{\circ}\text{C}$, significando que a temperatura do método simples tem 95% de probabilidade de se aproximar do cálculo detalhado com um desvio não superior a $1,4^{\circ}\text{C}$. Na secção seguinte avalia-se o impacto desta diferença no valor do indicador passivo.

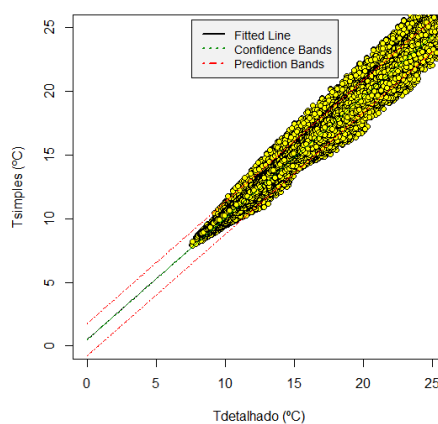


Figura 5.18 – Comparação da temperatura calculada com método simples face ao método detalhado

5.3 Avaliação do indicador de comportamento térmico solar passivo com método de cálculo simples

O método de cálculo simples (expressão (15)) permite estimar a temperatura média interior com diferenças normalmente inferiores a 1°C face ao modelo detalhado (capítulo 4). Contudo, em alguns cenários esse erro é superior a esse valor. Nesta secção efetua-se a análise da relação entre o cálculo simplificado da temperatura interior e o comportamento térmico solar passivo determinado de forma detalhada (capítulo 4). Nas figuras 5.19 a 5.23 são apresentados os resultados obtidos para as diversas frações com o método simplificado, onde se observa uma dispersão maior face aos resultados apresentados na secção 4.1 com o cálculo detalhado, nomeadamente para as temperaturas inferiores a 15°C. Nas figuras encontra-se representado o limite de 10% do tempo de desconforto e a azul claro os resultados provenientes do método de cálculo detalhado, para permitir uma melhor visualização da maior dispersão de resultados associada ao método simplificado. No caso das figuras correspondentes aos edifícios multifamiliares as diferentes cores referem-se aos resultados de cada uma das frações e a azul claro todos os resultados do cálculo detalhado.

Com cálculo simplificado, a adoção do limite de 16°C para habitações “frias” e de 18,5°C “para habitações confortáveis” permite distinguir as frações provavelmente desconfortáveis e provavelmente confortáveis, como sucedia com os resultados do cálculo do método detalhado. Na zona entre os 16,0 e os 18,5 °C, o cálculo simplificado tem uma incerteza elevada na identificação do tempo de desconforto, não sendo possível efetuar uma classificação fiável destas frações que são consideradas como “moderadamente confortáveis”.

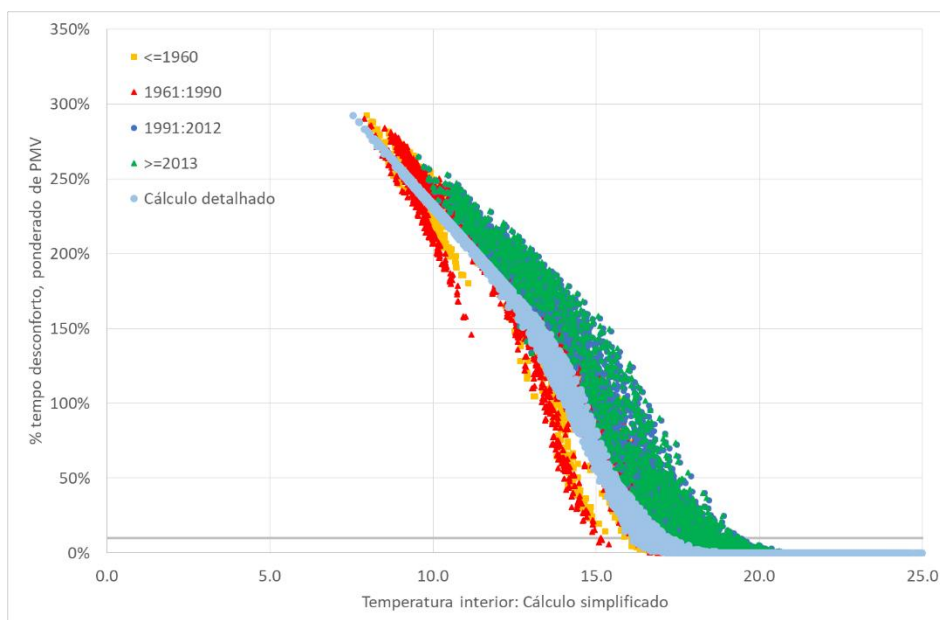


Figura 5.19 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Moradias

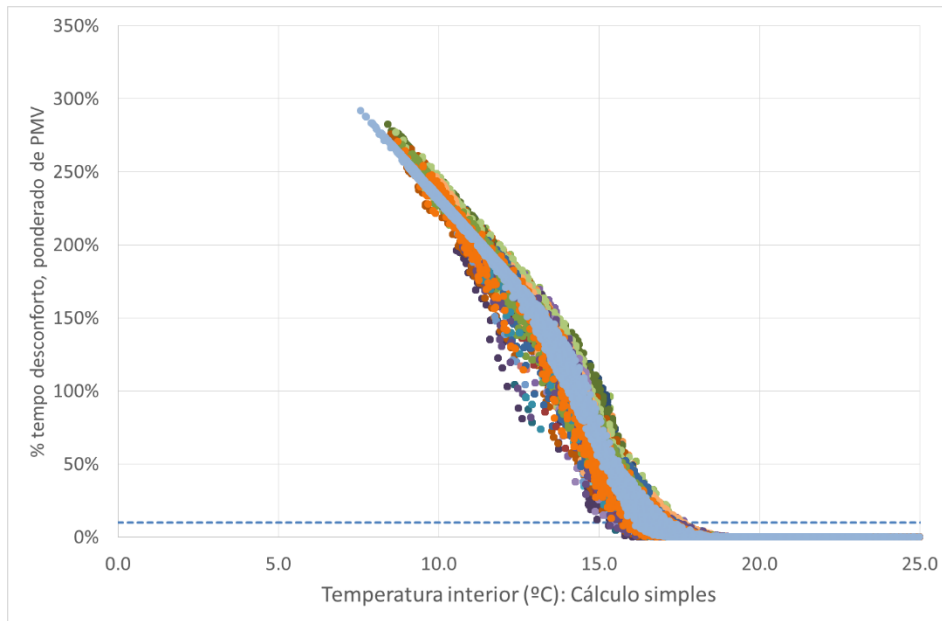


Figura 5.20 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Apartamentos anteriores a 1960¹

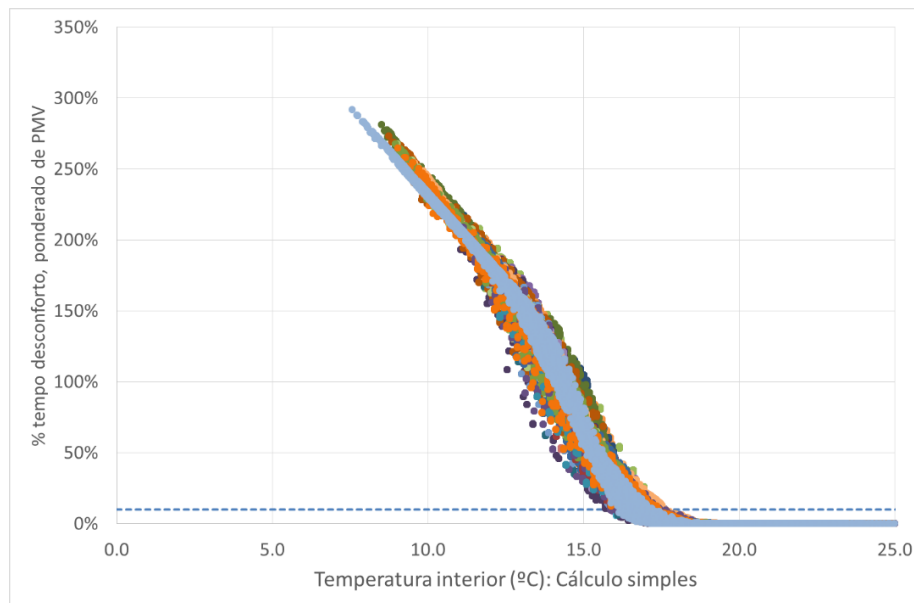


Figura 5.21 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Apartamentos 1961:1990¹

¹ A mancha azul clara corresponde aos resultados do cálculo detalhado para cada uma das 24 frações e todas as combinações de parâmetros. As restantes cores correspondem aos resultados de cada uma das 24 frações com as combinações dos respetivos parâmetros.

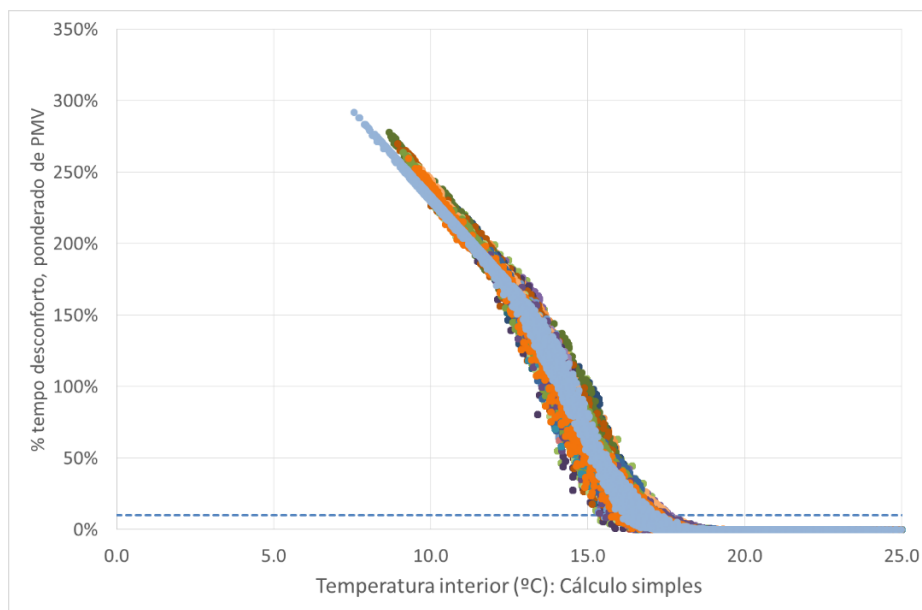


Figura 5.22 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Apartamentos 1991: 2012¹

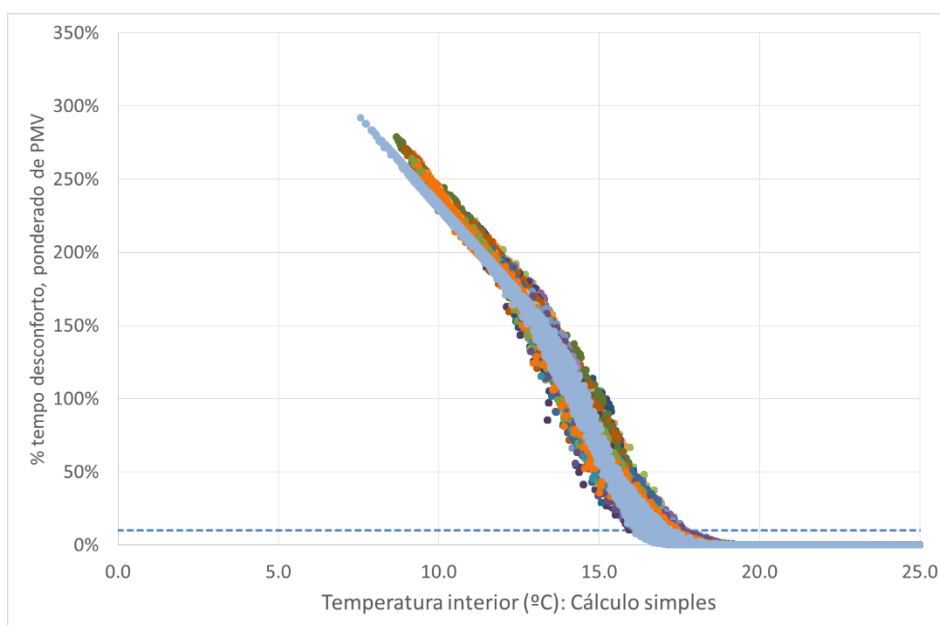


Figura 5.23 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método simplificado: Apartamentos novos¹

¹ A zona azul clara corresponde aos resultados do cálculo detalhado para cada uma das 24 frações e todas as combinações de parâmetros. As restantes cores correspondem aos resultados de cada uma das 24 frações com as combinações dos respetivos parâmetros.

5.4 Validação

Na Figura 5.24 encontra-se representada a relação entre a percentagem de tempo de desconforto ponderada de PMV prevista para o mês de janeiro e a temperatura média obtida pelo método simplificado e pelo método detalhado de todos os casos de estudo (moradias e apartamentos). Nessa figura evidencia-se a maior dispersão dos resultados do método simplificado. Foi efetuado o teste de correlação de Spearman's entre o indicador e a temperatura calculada pelo método simplificado, obtendo-se uma correlação estatisticamente forte ($\rho = -0.978$) e significativa ($p < 2.2 \times 10^{-16}$), pelo que se considera aceitável a sua adoção como indicador. Efetivamente, na secção anterior evidenciou-se que frações com temperatura interior calculada pelo método simplificado inferior a 16°C indicam frações frias e com uma temperatura superior a 18,5°C indicam frações confortáveis. Para as frações entre os 16,0 e os 18,5 °C, o indicador temperatura tem uma incerteza elevada na identificação do tempo de desconforto (quer no cálculo detalhado quer no simplificado). Nesse sentido, para alguns casos com uma temperatura de 16°C, pode corresponder a uma situação de tempo de desconforto próxima do aceitável (10%) até uma situação de tempo ponderado de desconforto elevada.

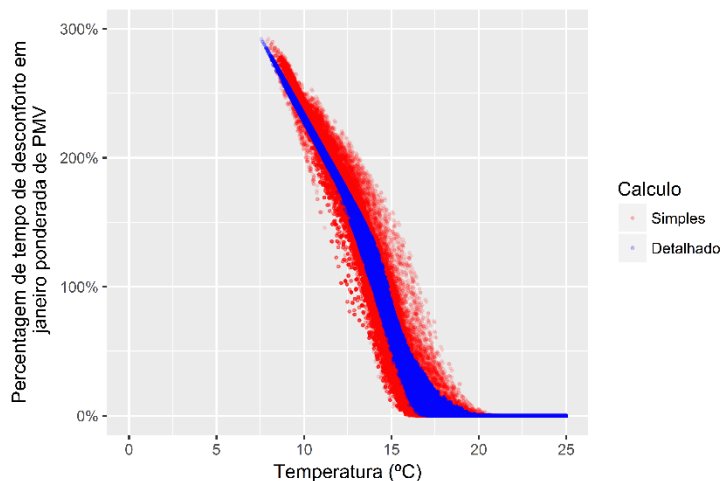
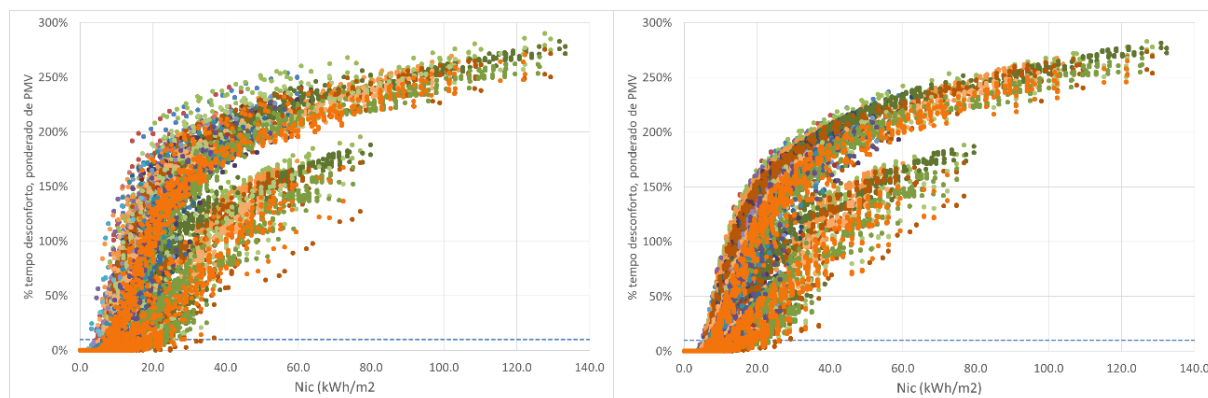


Figura 5.24 – Comparação da avaliação do comportamento térmico solar passivo pelo método pelo simplificado e detalhado

5.5 Relação das necessidades térmicas de aquecimento determinadas com a metodologia regulamentar e o indicador solar passivo

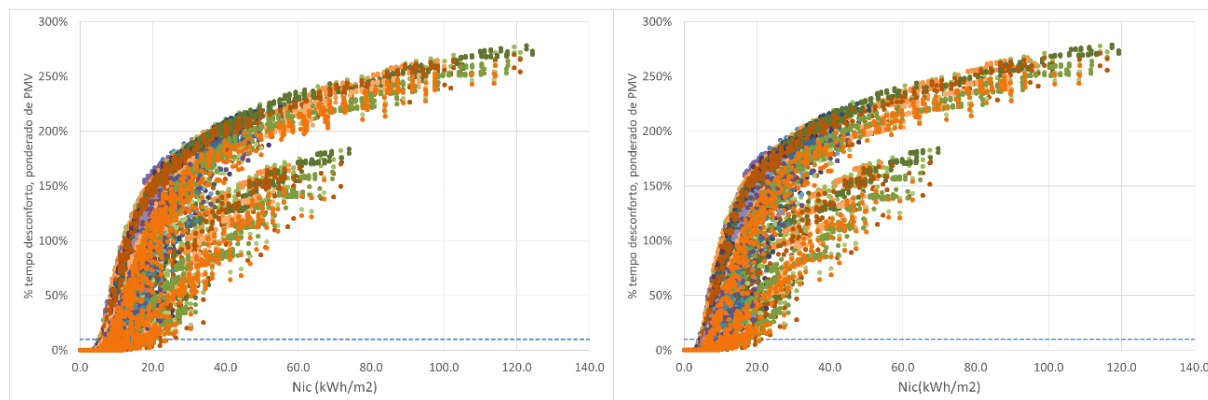
Com base na metodologia regulamentar (REH, 2013) foram calculadas as necessidades térmicas nominais de aquecimento (N_{ic}) de cada um dos casos de estudo. Na Figura 5.25 representa-se a relação entre N_{ic} e o tempo de desconforto ponderado de PMV, de onde se infere que para obter frações passivas as necessidades térmicas nominais não devem ser superiores a 4,5 kWh/m². Contudo, é possível ter frações passivas com N_{ic} até cerca de 25 kWh/m². A adoção de N_{ic} para avaliar o comportamento térmico solar passivo considera-se não ser tão adequada quanto a

temperatura média interior pela maior dispersão dos resultados e pela menor relação com a percepção de conforto térmico.



a) ≤ 1960

b) 1961:1990



c) 1991:2012

d) ≥ 2013

Figura 5.25 – Avaliação da relação entre as necessidades térmicas e a percepção de desconforto: Multifamiliar

Foi realizada uma análise da correlação entre os diversos parâmetros analisados:

- Indicador solar passivo, tempo de desconforto ponderado de PMV (Time Desconf.);
- Necessidades térmicas nominais da fração (Nic);
- Temperatura média interior calculada de forma detalhada (Tint_d);
- Temperatura média interior calculada de forma simplificada (Tint_s);
- Fator de utilização de ganhos térmicos brutos (Heta);
- Taxa de renovação do ar e efeito de recuperação de calor (Rph);
- Coeficiente de transmissão térmica de paredes (Upar);
- Coeficiente de transmissão térmica de coberturas (Ucob);
- Coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados (Uw);
- Fator solar do vidro (gv);

- Coeficiente de transmissão térmica de pavimentos (U_{pav});
- Absortância solar da superfície exterior dos elementos opacos (abs).

Na Figura 5.26 encontram-se os resultados da análise da correlação das variáveis do estudo paramétrico (coeficiente de correlação r), sendo todas essas correlações consideradas estatisticamente significativas ($p > 0.05$). Essa figura evidencia a forte correlação entre o indicador de desconforto ($time\ desconf.$) e os indicadores N_{ic} , temperatura média interior no mês mais frio calculado pelo método detalhado ou pelo método simplificado, bem como com o fator de utilização dos ganhos térmico brutos, evidenciando que a utilização da temperatura média interior para expressar o comportamento solar passivo de habitações é satisfatória. Dos parâmetros relevantes da qualidade térmica da construção, constata-se que o mais influente para o indicador do comportamento térmico solar passivo é a taxa de renovação de ar, seguida pela qualidade térmica de paredes e coberturas. As janelas, o pavimento e a absortância solar apresentam uma correlação menor com o indicador do comportamento térmico solar passivo.

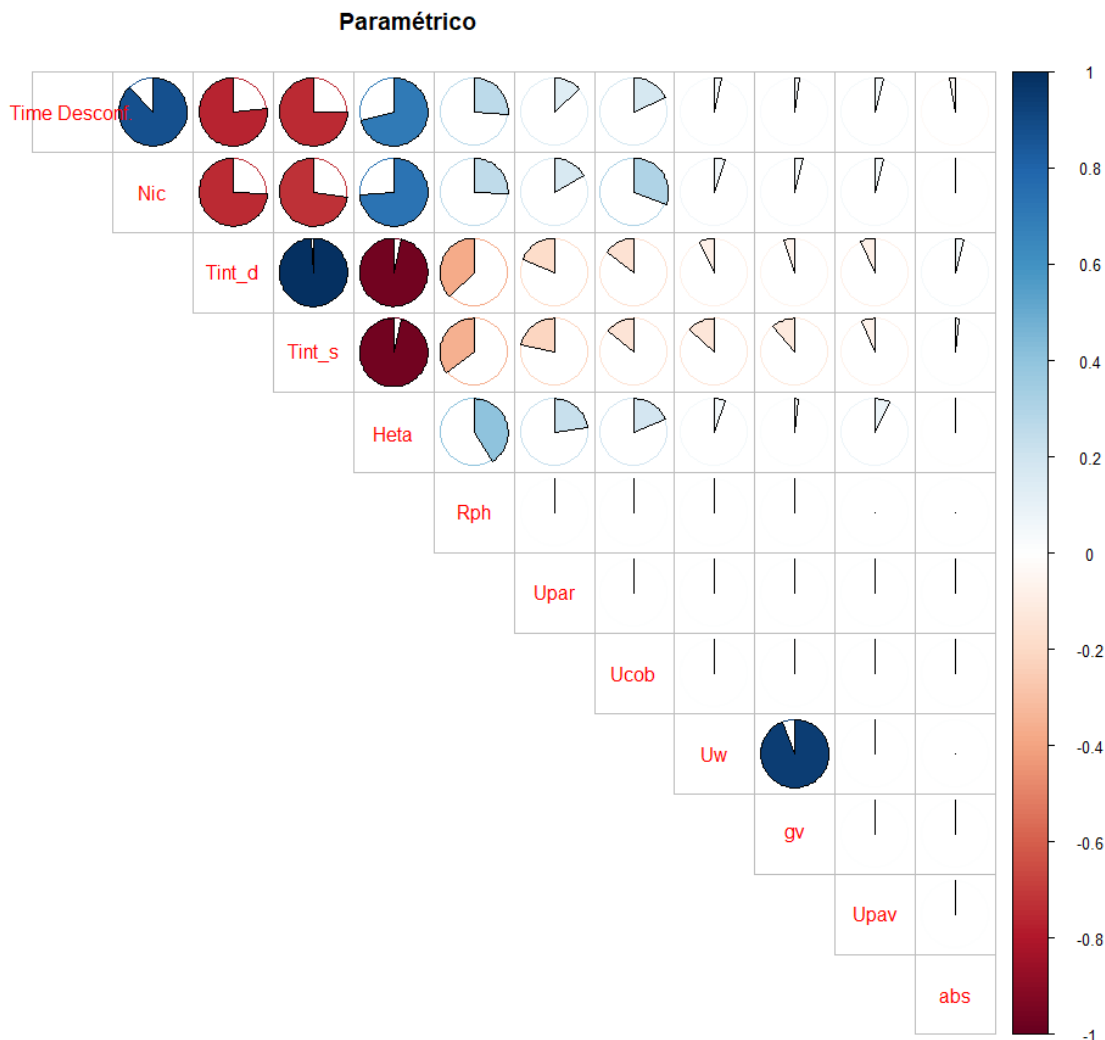


Figura 5.26 – Análise da correlação entre parâmetros do estudo paramétrico

6 | Método de avaliação e Casos de estudo

6.1 Aspetos gerais

Os casos de estudo destinam-se a ilustrar a aplicação da metodologia simplificada na avaliação do comportamento térmico solar passivo de habitações e na exemplificação de medidas de melhoria destinadas a mitigar situações de desconforto.

Na secção 6.2 efetua-se uma síntese do método e na secção 6.3 efetua-se uma validação da metodologia por comparação com medições de 19 casos de estudo e com informação da base de dados do SCE.

6.2 Método de avaliação de comportamento térmico solar passivo

Considera-se que uma habitação tem um comportamento térmico solar passivo satisfatório quando o número de horas de desconforto estimado para o mês mais frio (janeiro), ponderado do desvio do voto médio previsto (PMV), não excede 10%, admitindo ocupantes com atividade sedentária durante o dia (1,2 met e 1,3 clo) e atividade do tipo sono durante a noite (0,7 met e 3,4 clo). Com base no estudo apresentado anteriormente, para avaliar o comportamento térmico solar passivo da habitação de inércia térmica média ou forte preconiza-se a adoção da temperatura média interior calculada pela expressão (16), considerando cinco classes de desempenho das frações baseadas nos resultados obtidos e no indicador voto médio previsto (PMV, ver Quadro 2.3), como se indica no Quadro 6.1. Os edifícios de inércia térmica fraca, devido às grandes variações de temperatura interior que têm ao longo do dia, são classificados como “frios” (ver secção 5.1).

Quadro 6.1 – Classificação da gama de conforto da fração

Classificação da fração	Gama de temperatura	Gama de Voto Médio Previsto (PMV)
Fria	$T_i \leq 14$	$PMV \leq -1.6$
Ligeiramente fria	$14 < T_i \leq 16$	$-1.6 < PMV \leq -1.2$
Moderadamente fria	$16 < T_i \leq 18$	$-1.2 < PMV \leq -0.7$
Solar passiva	$18 < T_i \leq 20$	$-0.7 < PMV \leq -0.3$
Confortável	$20 < T_i$	$-0.3 < PMV$

$$T_i = T_e + 1.29 \left(\frac{G}{H} \right)^{0.89} \quad (16)$$

Em que:

- T_i – Temperatura média interior mensal (°C)
- T_e – Temperatura média exterior mensal (°C)
- G – Ganhos térmicos brutos médios mensais (W)
- H – Coeficiente global de perdas térmicas (W/°C)

De uma forma geral todos os parâmetros adotados neste método de avaliação do comportamento térmico solar passivo de habitações estão definidos na regulamentação térmica de edifícios de habitação (REH, 2013). A temperatura média exterior mensal do mês mais frio (T_e) encontra-se definida no (REH, 2013). Os ganhos térmicos (G) a considerar no cálculo são os devidos aos equipamentos (G_{eq}), aos ocupantes (G_{oc}), aos vãos envidraçados (G_{env}) e aos ganhos térmicos pelos elementos opacos da envolvente (G_{op}), sendo obtidos pela expressão (5). O coeficiente global de perdas térmicas (H) pode ser obtido com base na expressão (11).

6.3 Casos de estudo

6.3.1 Medição

Para avaliar a aplicabilidade do método de avaliação do comportamento térmico solar passivo de habitações descrito nos capítulos 1 a 5 e resumido na secção 6.2, nesta secção é efetuada a aplicação do mesmo a 19 frações, cujas características se resumem no Quadro 6.2. A análise envolve a comparação dos valores calculados com os valores medidos usando a melhor informação disponível obtida durante a medição, nomeadamente sobre fontes internas de calor. Por outro lado, são usadas as condições de referência regulamentares, para efetuar a comparação desses resultados com os resultados medidos e se obter uma estimativa da influência do comportamento dos ocupantes.

Na Figura 6.1 representa-se o fator de forma das frações dos casos de estudo, que compreende habitações compactas até frações com uma elevada relação entre a área de transmissão de calor e o volume interior.

Quadro 6.2 – Resumo das características das frações dos casos de estudo

Caso	Localidade	Zona Climática	Tipologia	Construção Ano	Orientação	FF m ⁻¹	A _{pav} m ²	A _{env} /A _{pav}	U _{opacos} W/(m ² .K)	U _{envidraçados} W/(m ² .K)	Rph	Fonte
1	Lisboa	I1	Apartamento	2000	N/S	0.66	105.0	16%	0.96	3.10	0.70	Autor
2	Sobreda	I1	Moradia	Novo	NE/SW	0.84	226.6	25%	0.37	1.90	0.20	Autor
3	Revelhe	I2	Moradia	Reabilitado	E/W	1.33	65.7	26%	0.61	2.30	0.10	(Jerónimo, 2014)
4	Revelhe	I2	Moradia	Reabilitado	E/W	1.17	61.4	6%	1.33	2.30	0.10	
5	Porto	I1	Apartamento-Cobertura	Recente	NE/SW	1.02	60.1	17%	0.90	3.50	0.56	(Curado, 2014)
6	Porto	I1	Apartamento	Recente	NE/SW	0.70	60.1	17%	1.14	3.50	0.35	
7	Porto	I1	Apartamento	Recente	NE/SW	0.70	60.1	17%	1.14	3.50	0.69	
8	Matosinhos	I1	Apartamento	2003	S/N	0.26	63.0	12%	1.30	5.90	0.90	(LNEC, 2003)
9	Leiria	I2	Apartamento-Cobertura	1984-R	E/W	0.75	60.0	13%	0.60	3.00	0.60	(LNEC, 2012)
10	Leiria	I2	Apartamento	1984-R	E/W	0.49	50.0	13%	0.60	3.00	0.60	
11	Leiria	I2	Apartamento	1984-R	E/W	0.49	50.0	13%	0.60	3.00	0.60	
12	Leiria	I2	Apartamento-Cobertura	1984-R	E/W	0.75	60.0	13%	0.60	3.00	0.60	
13	Leiria	I2	Apartamento-Cobertura	1984	E/W	0.75	60.0	13%	2.64	3.90	0.70	
14	Leiria	I2	Apartamento	1984	E/W	0.34	60.0	13%	2.40	3.90	0.70	
15	Lisboa	I1	Apartamento	1970	E/W	0.54	113.2	18%	1.96	4.4	0.35	Autor
16	Lisboa	I1	Apartamento	1970	E/W	0.55	109.7	14%	2.01	4.7	0.36	
17	Lisboa	I1	Apartamento	1970	E/W	0.59	104.1	9%	2.30	4.8	0.39	
18	Lisboa	I1	Apartamento	1970	E/W	0.59	104.1	9%	2.30	4.8	0.39	
19	Lisboa	I1	Apartamento	1970	E/W	0.72	101.4	25%	2.45	5.3	0.66	

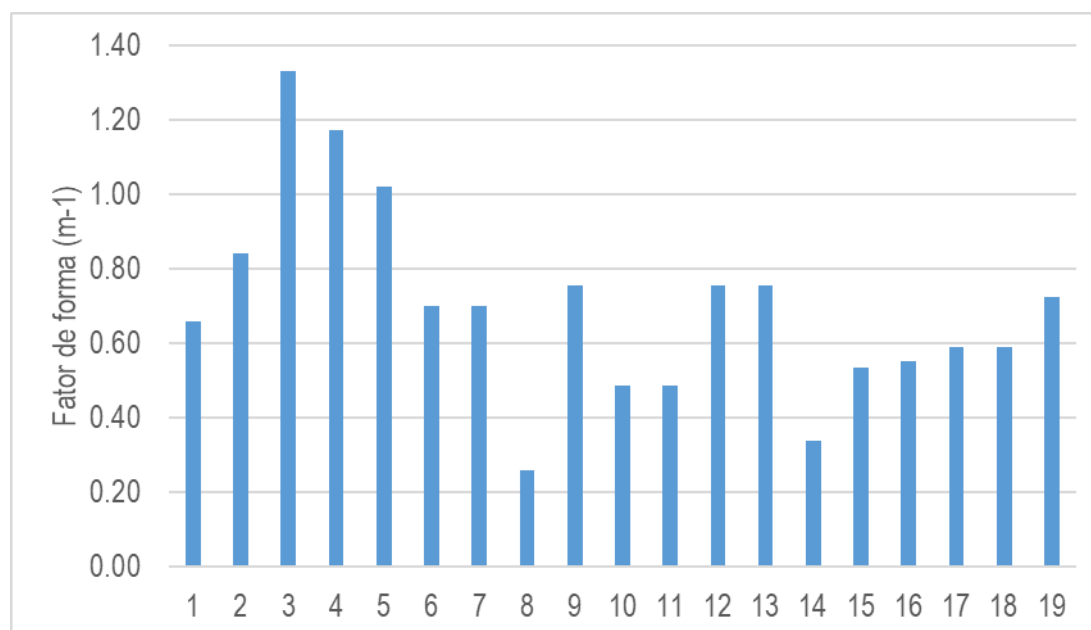


Figura 6.1 – Fator de forma dos casos de estudo

Nos casos de estudo existem frações que estavam vazias (casos 3 e 4), enquanto nas frações ocupadas foram identificadas as fontes de calor relevantes (Figura 6.2), sendo perceptível que de uma forma geral as mesmas são superiores ao valor de referência regulamentar de 4 W/m² (REH, 2013).

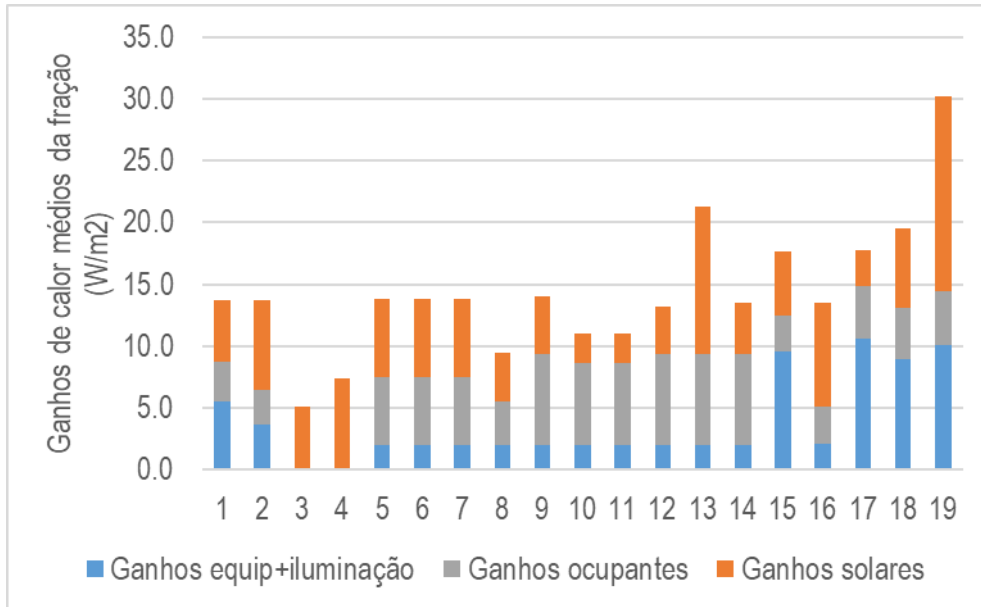


Figura 6.2 – Ganhos de calor das frações

Os casos de estudo reportam-se todos a períodos relativamente frios, tendo um desvio médio de 5% em relação à temperatura exterior média do mês mais frio indicada no (REH, 2013), como se mostra na Figura 6.3, que se considera adequado para apreciar a aplicabilidade do método.

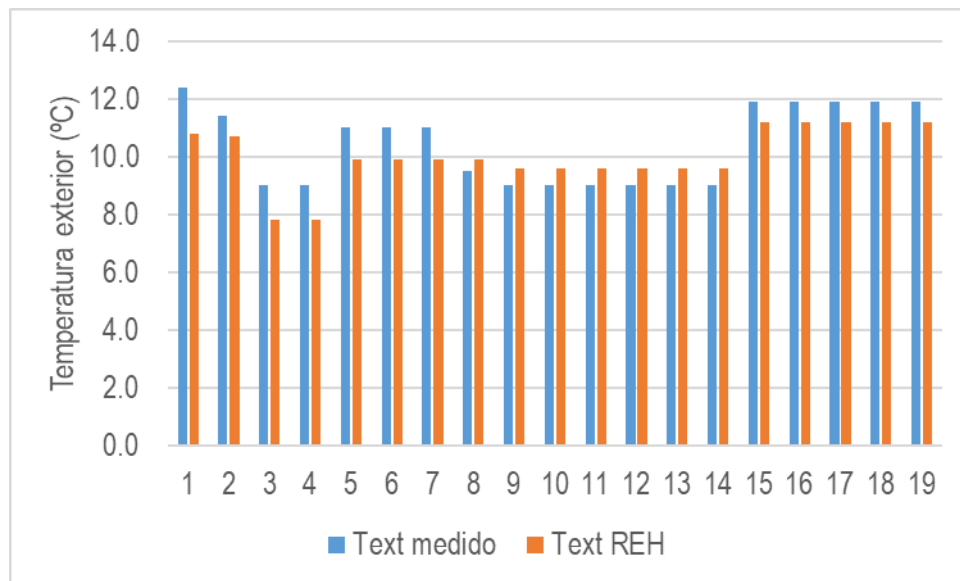


Figura 6.3 – Temperatura exterior durante os períodos de medição e valores regulamentares

Na Figura 6.4 mostra-se a comparação dos valores da temperatura média interior medida em cada uma das frações e a temperatura média interior calculada de forma simples (expressão (4)) e que na figura tem a designação “Tint calculado”). Foi também calculada a temperatura interior que tem em conta a relação com a percepção de conforto (expressão (16)) e que na figura tem a designação “Tint calc método”). De uma forma geral a concordância entre os valores calculados (“Tint calc método”) e os medidos é satisfatória, existindo um erro quadrático médio¹ de 4%, evidenciando assim a adequação da metodologia proposta. Nos períodos de medição os ganhos na temperatura interior média face à temperatura exterior variam entre 2,5 a 9,1°C, evidenciando o potencial de comportamento térmico solar passivo.

Na aplicação mais generalizada do método, se em vez da melhor informação disponível do uso da fração se adotarem as condições de referência regulamentares (REH, 2013), nomeadamente ganhos internos de 4 W/m², um número de ocupantes igual ao número de quartos mais 1 e um caudal de ar novo não inferior a 0,4 h⁻¹, obtêm-se os resultados indicados na Figura 6.5. Nessa figura, representa-se a comparação entre a temperatura interior calculada com a melhor informação disponível (“Tint calc método”) e o valor calculado com a ocupação e ganhos de referência (“Tint calc método *standard*”), sendo perceptível a influência dos padrões de utilização e de consumo de energia nas condições de conforto (desvios em alguns casos de 20%). Por exemplo, o decréscimo da temperatura estimada no exemplo 1, deve-se a menores ganhos internos e menos um ocupante face ao cálculo *standard*; no exemplo 2 esse decréscimo deve-se a não se ter considerado o consumo de aquecimento ambiente. Nos casos 8 a 14, sucede o oposto, regista-se um aumento da temperatura de cálculo pelo facto de nessas habitações o consumo de energia ser substancialmente inferior à média nacional e ao valor de 4 W/m².

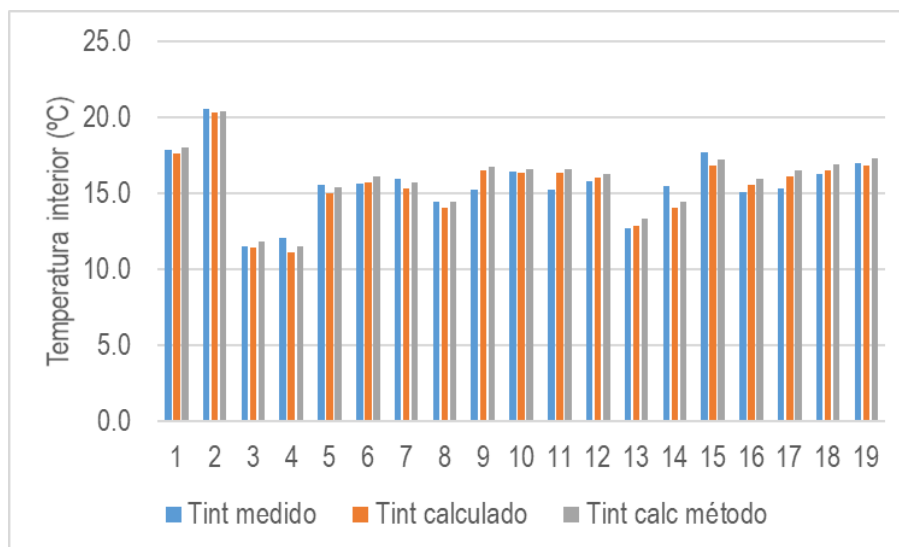


Figura 6.4 – Comparação dos valores da temperatura interior medidos e calculados

$$^1 \text{ RMSD} = \sqrt{\frac{\sum (T_{\text{calculado}} - T_{\text{medido}})^2}{n}}$$

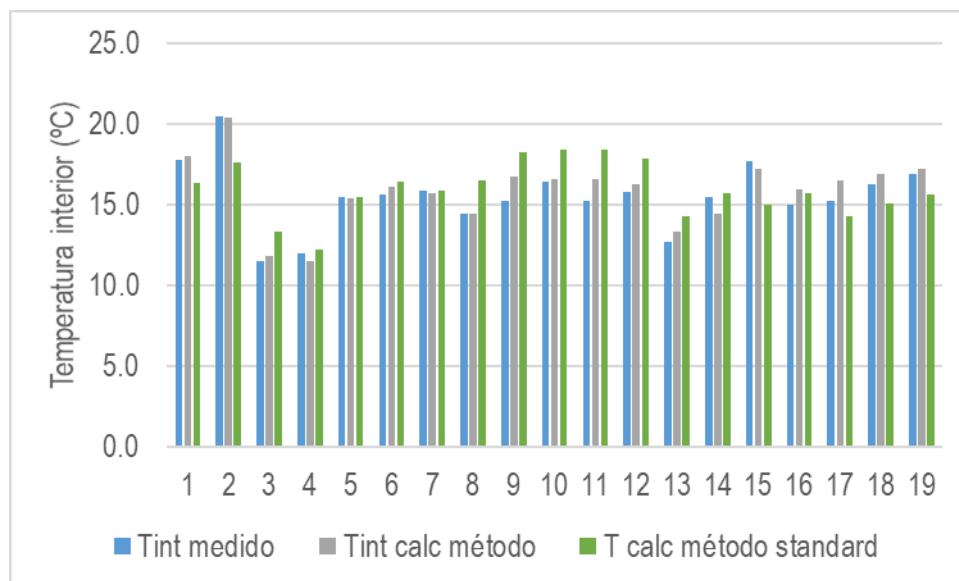


Figura 6.5 – Comparação dos valores da temperatura interior calculados com o método de referência e os calculados com a melhor informação disponível

Na Figura 6.6 apresenta-se a análise do comportamento térmico solar passivo dos casos de estudo face aos critérios estabelecidos. Apenas os casos 9 a 11 apresentam uma temperatura superior a 18°C (temperatura de cálculo do método *standard* não inferior a 18°C), dado tratarem-se de habitações reabilitadas com isolamento térmico (5 cm de isolamento), serem habitações de reduzida dimensão e compactas e terem captação de ganhos solares. A habitação 12 não alcança este nível mínimo, devido à menor exposição solar de alguns vãos, enquanto os casos 13 e 14 não satisfazem porque não têm isolamento térmico na envolvente.

Os casos 3 e 4 são os mais frios devido à reduzida captação de ganhos solares e no caso 4 também devido à falta de isolamento térmico.

Os casos 1, 2, 6, 7 e 8, não satisfazem ao critério de edifício passivo devido a fatores diversos, podendo alcançar esse objetivo mediante as seguintes opções:

- Caso 1: Aumentar o fator solar dos vidros de 0,35 para 0,60 e reduzir a renovação de ar de 0,7h⁻¹ para 0,5 h⁻¹;
- Caso 2: Implementar um sistema de ventilação com recuperação de calor dado o nível de isolamento térmico da envolvente já ser razoável e não ser viável aumentar a exposição solar dos vãos envidraçados;
- Caso 5, 6, 7 e 8: Incrementar o isolamento térmico das paredes de 1,3 para 0,4 W/(m².K) e controlar os caudais de ventilação para um valor de 0,5 h⁻¹.

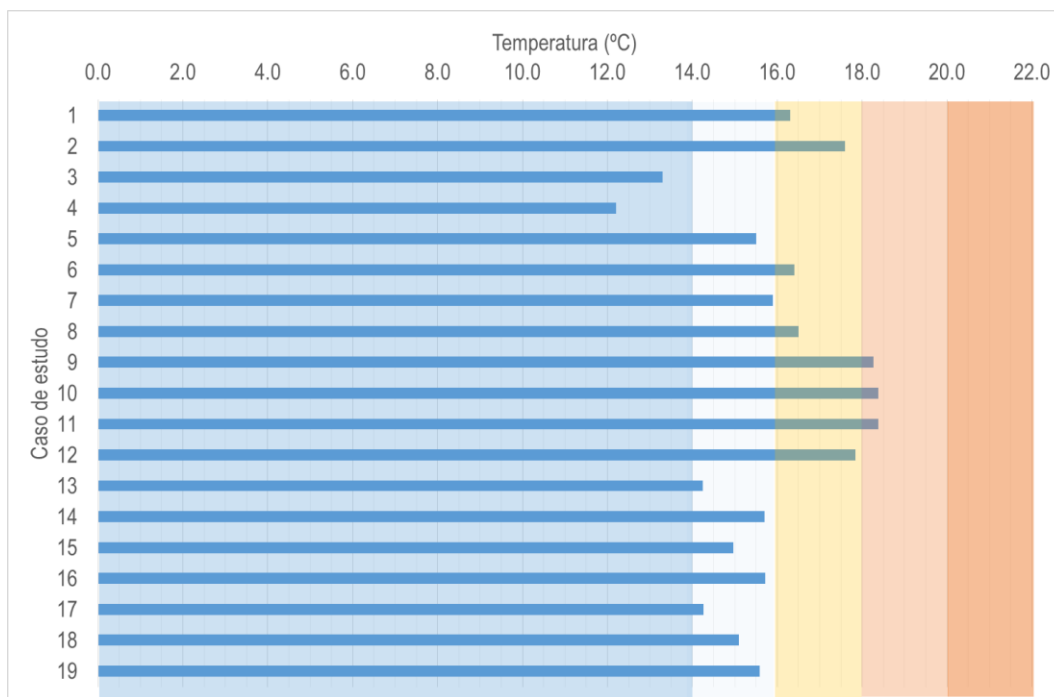


Figura 6.6 – Avaliação do comportamento térmico solar passivo dos casos de estudo

6.3.2 Base de dados do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

Para avaliar a aplicabilidade da metodologia e apreciar os resultados que se podem obter numa aplicação mais generalizada da metodologia de cálculo do indicador do comportamento térmico passivo dos edifícios, foram utilizadas 5785 frações registadas no SCE.

Na Figura 6.7 representa-se a curva da distribuição acumulada da temperatura interior das frações, tendo em conta a época¹ de construção e a zona climática. Nessa figura é possível registar que a legislação térmica de 1990 (período 1991 a 2005) conduziu a uma ligeira melhoria da qualidade térmica da construção e à melhoria das condições de conforto. Com a revisão regulamentar de 2006, regista-se uma melhoria adicional. Essa figura também evidencia a importância da zona climática onde a fração se situa, face às condições de conforto, mostrando que as frações na zona climática I3 são as mais frias, existindo poucos casos que possam ser consideradas construções solares passivas. Na zona climática I1 e na época de construção após 2006, regista-se que cerca de 50% das frações podem ser consideradas solares passivas. Como se ilustrou na secção anterior, ainda é necessário melhorar a qualidade térmica das construções, nomeadamente das frações existentes nas zonas climáticas I2 e I3.

As frações da base de dados do SCE têm a distribuição por época de construção e zona climática indicada na Figura 6.8, portanto ligeiramente diferente da distribuição utilizada no estudo paramétrico

¹ Atendendo aos dados disponíveis, nas construções recentes adota-se o ano de 2006, dado na informação disponível não ser possível distinguir as frações construídas após 2013.

(capítulos 3 a 5). Na Figura 6.9 representa-se a comparação entre o valor agora estimado de N_{ic} com base nas características da fração existente na base de dados do SCE e o valor de N_{ic} declarado pelo perito qualificado, registando-se que a informação disponível é suficiente e permite uma adequada estimativa de N_{ic} . Contudo, o comportamento térmico da amostra dos casos de estudo do SCE é significativamente diferente da amostra do caso de estudo paramétrico (Figura 6.10), devido às diferenças na arquitetura, características de isolamento térmico e clima. Por exemplo, a área envidraçada por unidade de área útil de pavimento da amostra do SCE tem valores (Figura 6.11) com gamas superiores às do estudo parâmetro (Quadro 3.1 e Quadro 3.2), evidenciando uma tendência para menores áreas envidraçadas nas zonas mais frias.

Na Figura 6.12 representa-se a relação entre a temperatura exterior média mensal do mês mais frio dos casos de estudo e o número de graus dia de aquecimento na base 18°C. O estudo paramétrico apresentado nos capítulos 3 a 5 tem em conta apenas os 3 valores indicados a azul, enquanto a informação existente na base de dados tem uma gama mais extensa. Ao nível da arquitetura existem também diferenças relevantes entre os casos de estudo do SCE e os do estudo paramétrico. Por exemplo, no estudo paramétrico foram considerados frações de referência com uma área envidraçada de 15% ou 20% da área útil de pavimento, enquanto nos casos de estudo do SCE existem maiores variações (Figura 6.11). Na zona climática mais fria (I3) a área de janelas por unidade de área de pavimento é menor do que nas restantes zonas climáticas. Ao longo do tempo regista-se um incremento da fração de vãos envidraçados por unidade de área de pavimento. No que diz respeito ao sombreamento exterior este é predominante “Normal/Standard” (Despacho (extrato) n.º 15793-E, 2013), enquanto no estudo paramétrico este era “Sem sombreamento”, reduzindo os ganhos solares pelos vãos envidraçados.

Estas diferenças entre os pressupostos dos casos de estudo paramétrico e dos casos da base de dados do SCE conduzem a relações entre ganhos térmicos e perdas térmicas diferentes das obtidas no estudo paramétrico e conseqüentemente a uma diferente relação no fator de utilização de ganhos térmicos brutos (Figura 6.13), que conduz a diferenças na relação entre as necessidades térmicas nominais de aquecimento e a temperatura interior (Figura 6.14).

Foi realizada uma análise da correlação entre os diversos parâmetros analisados:

- Necessidades térmicas nominais da fração (N_{ic});
- Temperatura média interior calculada de forma simplificada (T_{int});
- Temperatura média exterior (T_{ext});
- Coeficiente global de perdas térmica (Perdas, $W/m^2 \cdot ^\circ C$);
- Ganhos térmicos brutos (Ganhos, W/m^2);
- Ganhos solares ($G_{solares}$, W/m^2);
- Relação ente área de vãos envidraçados e área útil de pavimento (A_{env}/A_{util});
- Área útil de pavimento (A_{util});
- Coeficiente de perdas térmicas por ventilação (ventilacao);
- Coeficiente de perdas térmicas por transmissão através de paredes (paredes);
- Coeficiente de perdas térmicas por transmissão através de coberturas (coberturas);

- Coeficiente de perdas térmicas por transmissão através de pavimentos (pavimento);
- Coeficiente de perdas térmicas por transmissão através de vãos envidraçados (vao).

Na Figura 6.15 encontram-se os resultados da análise da correlação das variáveis dos casos de estudo da base de dados do SCE, sendo todas essas correlações consideradas estatisticamente significativas ($p > 0.05$). Essa figura evidencia a correlação (moderada) entre a temperatura interior e a temperatura exterior e o coeficiente global de perdas térmicas. Os ganhos térmicos para estes casos de estudo, apresentam uma correlação fraca com as condições de temperatura interior. Nestes casos de estudo, como nos do estudo paramétrico, também se verifica a maior importância do isolamento da cobertura, paredes, pavimentos, face ao isolamento dos vãos envidraçados. Desta forma, da análise destes casos de estudo, para se alcançarem frações mais confortáveis será de prever um maior isolamento térmico da envolvente opaca. O ajustamento (aumento) da fração envidraçada ($A_{\text{envidraçada}}/A_{\text{útil}}$) também apresenta uma correlação positiva com as condições de conforto.

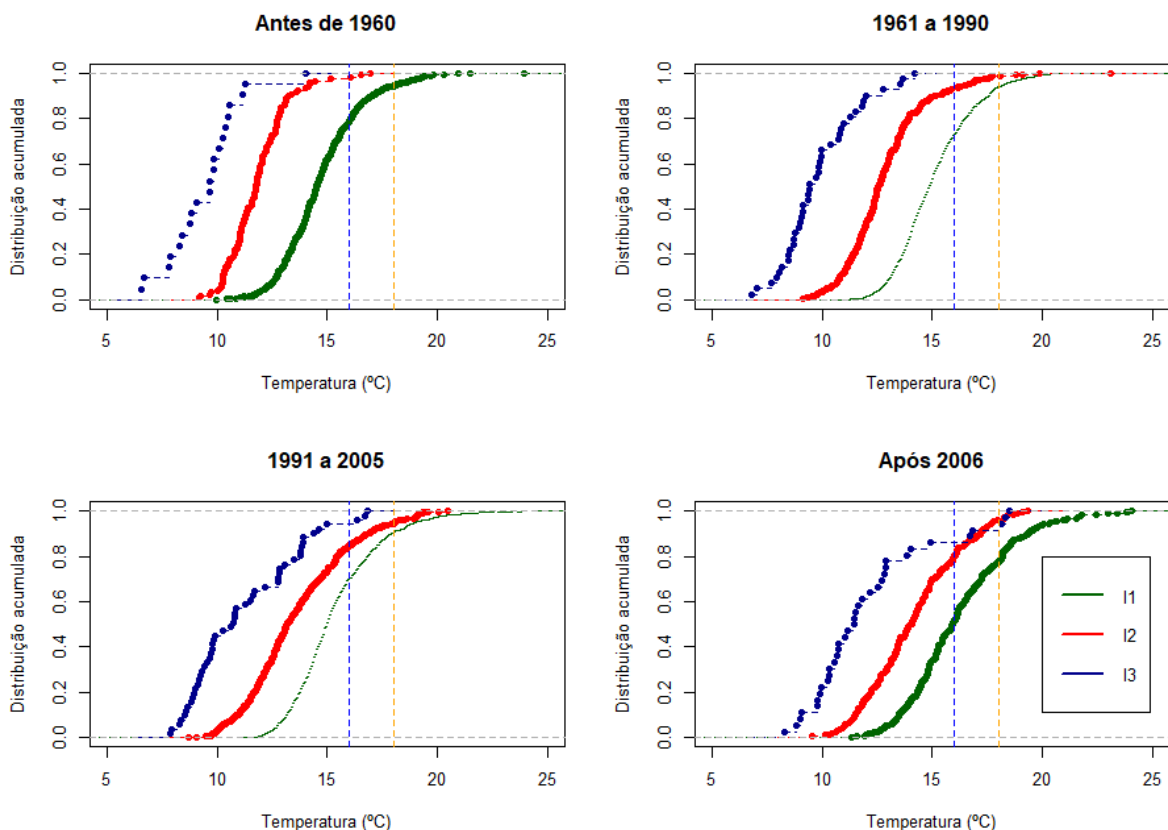


Figura 6.7 – Distribuição acumulada da temperatura interior dos casos de estudo, por época de construção e zona climática

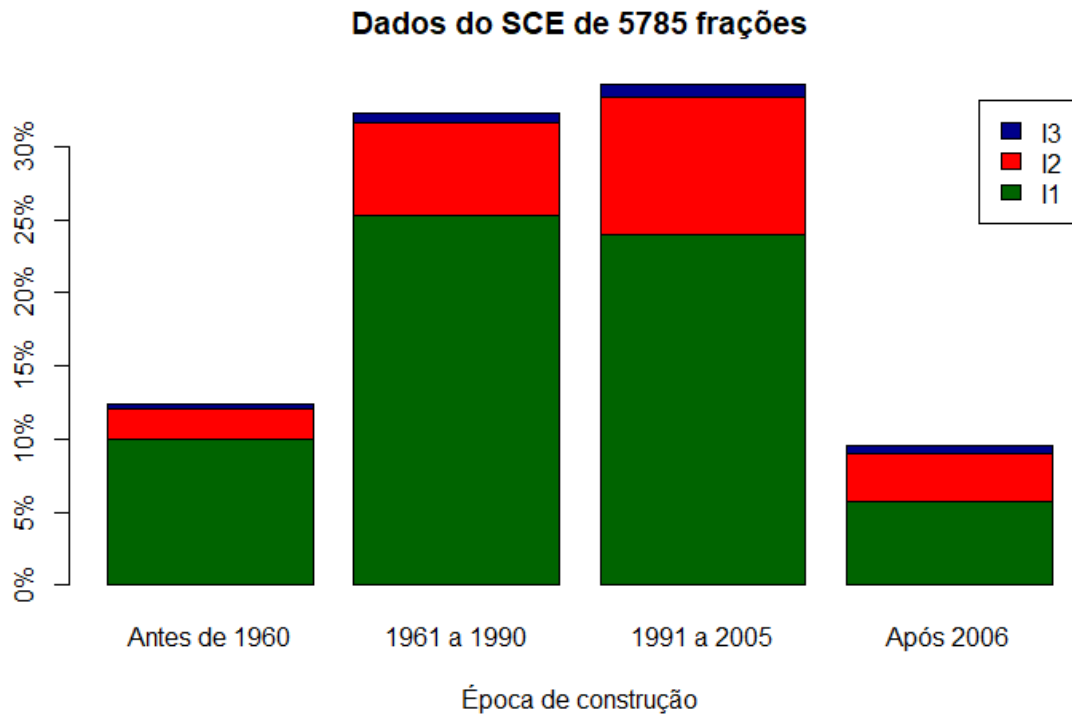


Figura 6.8 – Distribuição das frações por época de construção e zona climática

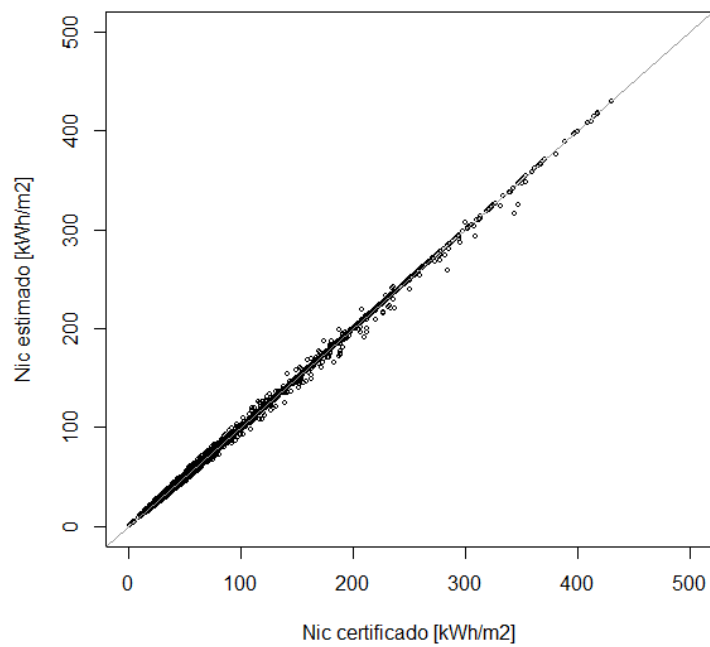


Figura 6.9 – Comparação da estimativa de N_{ic} com o valor declarado no certificado energético

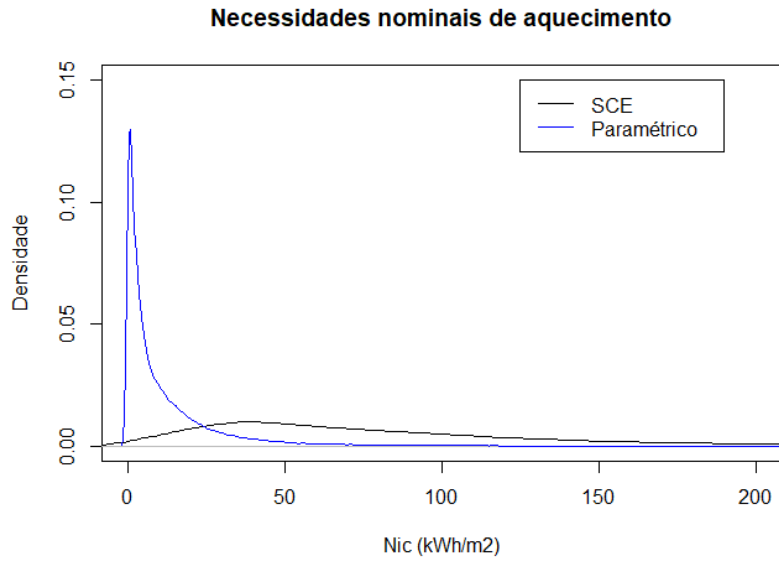


Figura 6.10 – Distribuição da probabilidade de ocorrência de N_{ic} nos casos de estudo do SCE e do estudo paramétrico

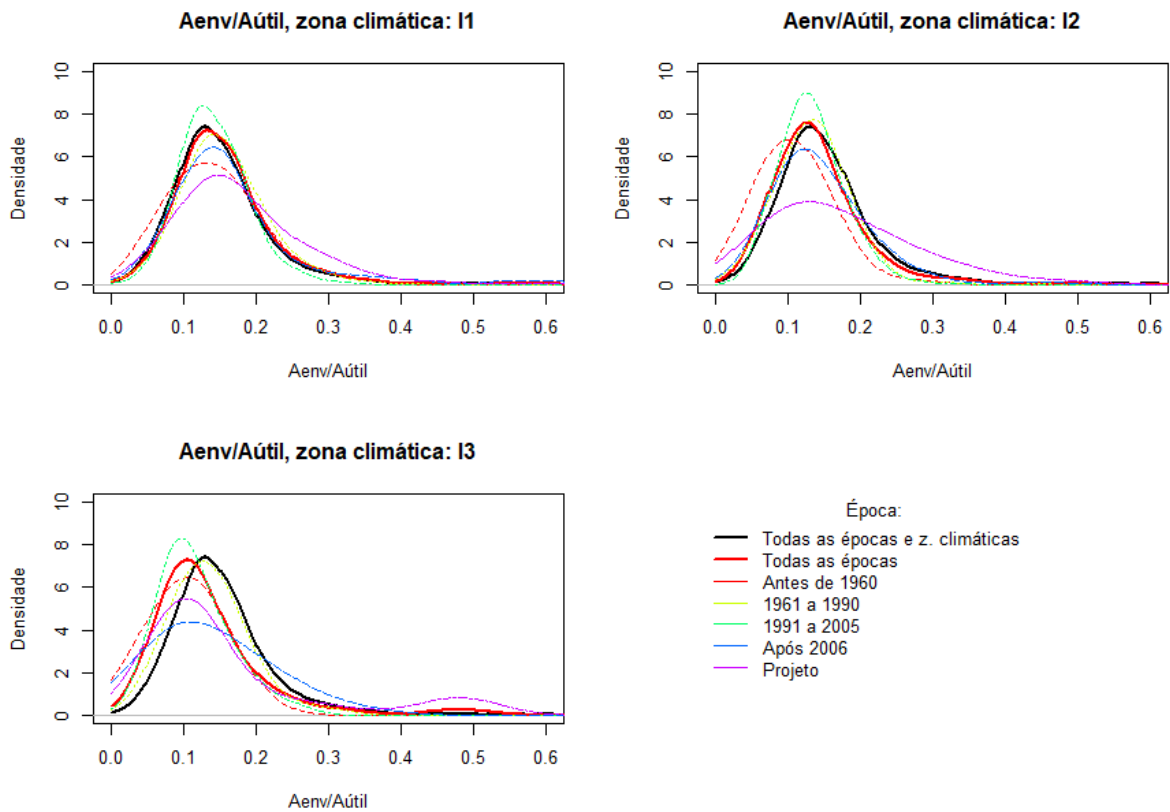


Figura 6.11 – Distribuição dos valores de área envidraçada por unidade de área útil dos casos de estudo do SCE

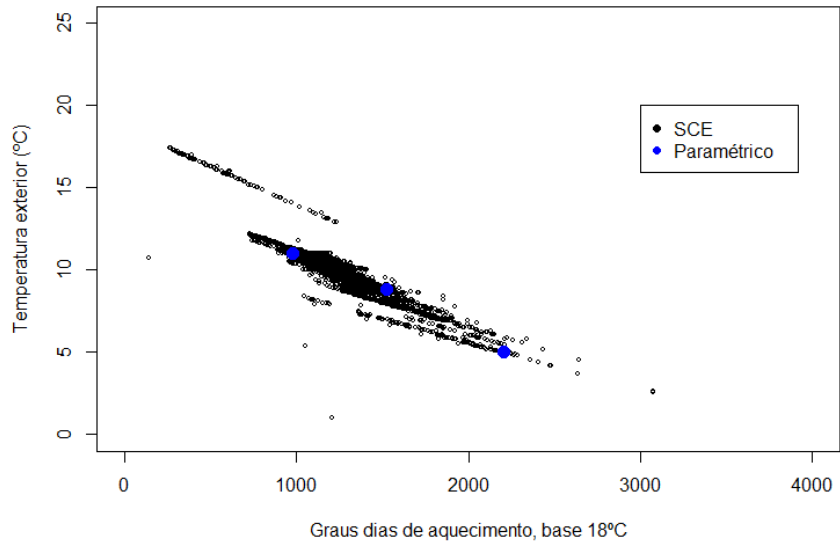


Figura 6.12 – Relação entre o número de graus dia de aquecimento dos casos de estudo e a temperatura exterior média mensal do mês mais frio

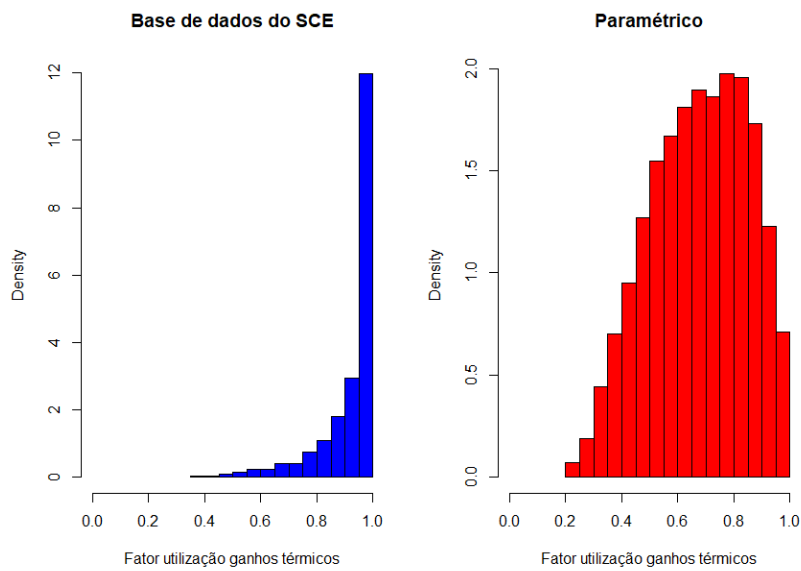


Figura 6.13 – Distribuição do fator de utilização dos ganhos térmicos brutos dos casos de estudo

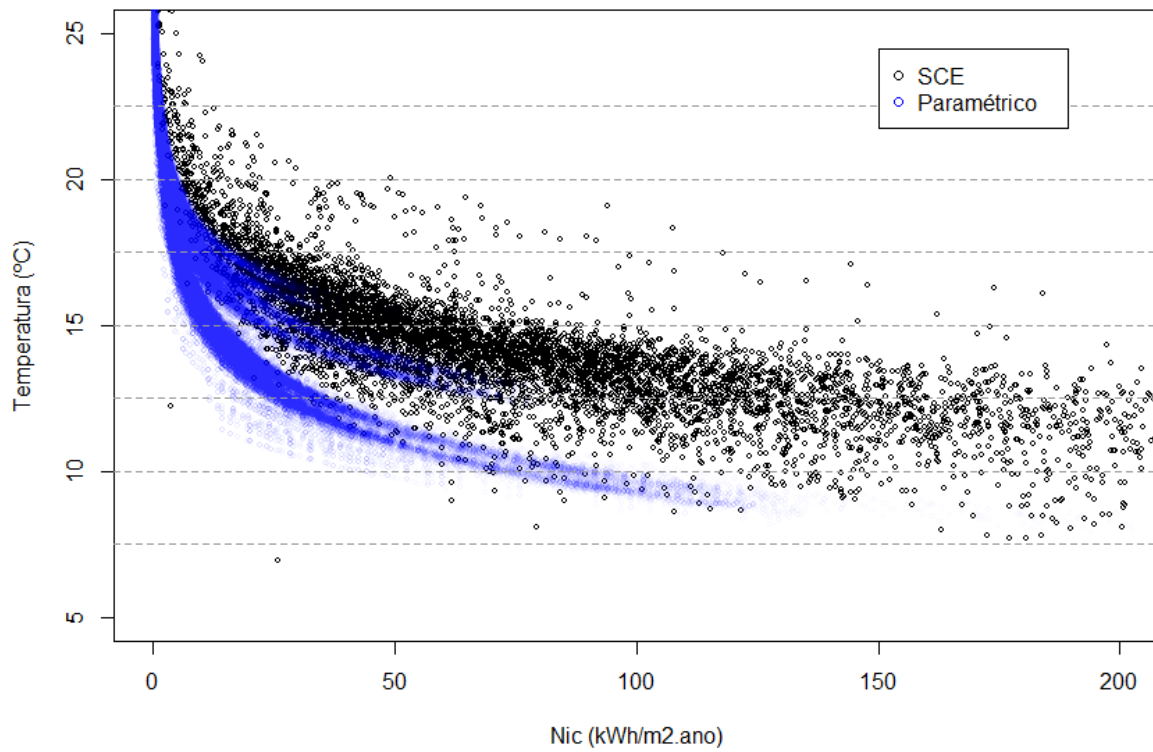


Figura 6.14 – Relação entre as necessidades térmicas nominais de aquecimento e a estimativa da temperatura interior

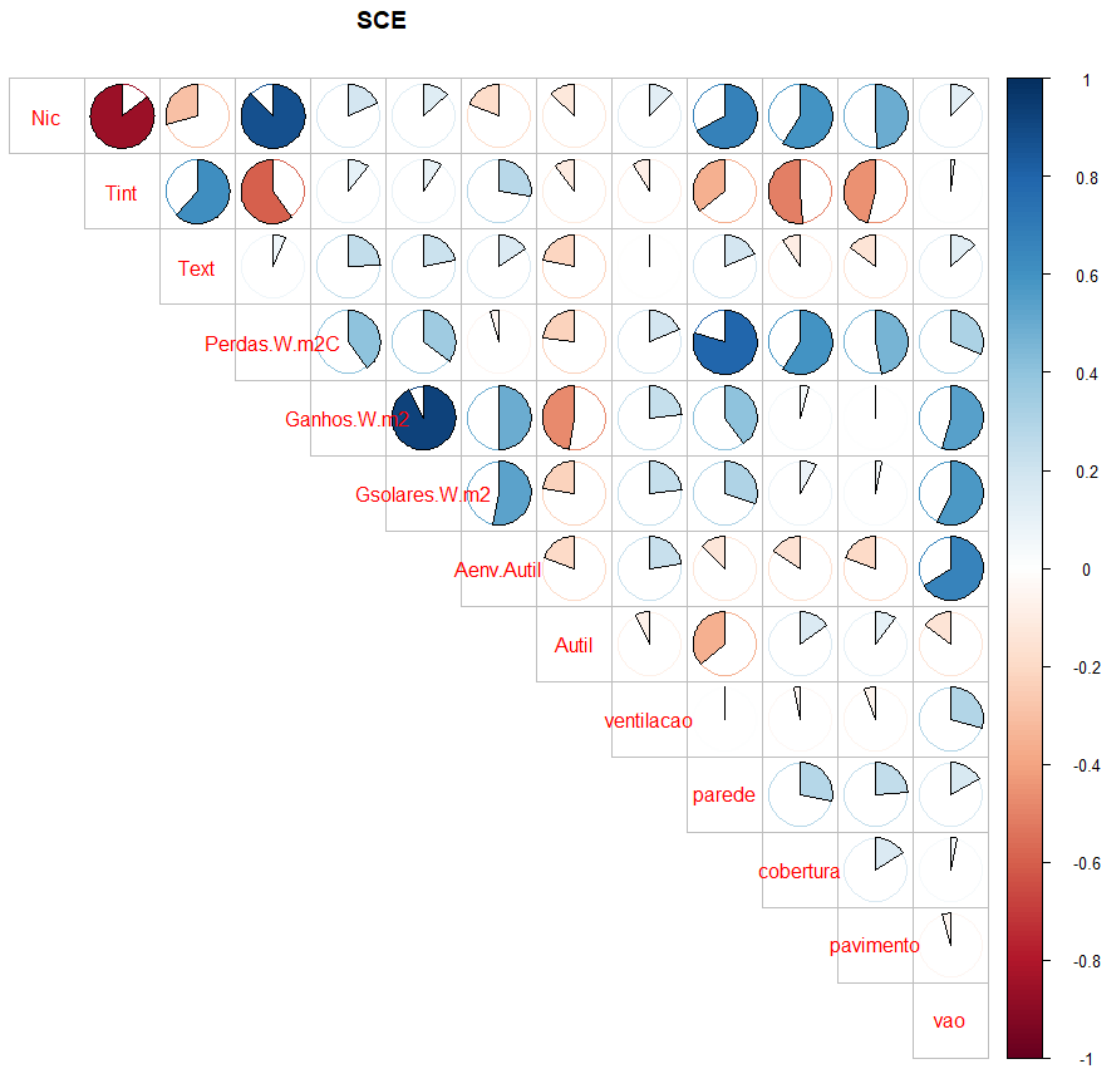


Figura 6.15 – Análise da correlação ente parâmetros dos casos de estudo do SCE

7 | Conclusões

Foi desenvolvido e detalhado o conceito de edifício solar passivo, como aquele em que o número de horas de desconforto, ponderado do desvio do voto médio previsto (PMV), não deve exceder 10% no mês mais frio. De uma análise de vários edifícios de referência com vários níveis de qualidade térmica, foi possível constatar que existe uma relação entre esse indicador de comportamento térmico solar passivo e a temperatura média interior, podendo concluir-se que são confortáveis de forma passiva, no período de aquecimento, edifícios com uma temperatura de cálculo superior a 18°C.

Estabeleceu-se um método de cálculo simplificado da temperatura interior média e comparou-se com o método de cálculo detalhado. Apesar da maior dispersão de resultados, este método de cálculo simplificado continua a dar uma indicação de frações passivas (frações com temperatura média não inferior a 18°C) e de frações ligeiramente frias (aquelas com temperatura média não superior a 16°C). Para permitir uma maior discretização dos resultados, foram introduzidas classes adicionais de comportamento térmico, baseadas na escala de sensação térmica, podendo assim os edifícios serem classificados quanto ao seu comportamento térmico solar passivo em frações:

- Frias;
- Ligeiramente frias;
- Moderadamente frias;
- Solar passiva;
- Confortável.

Este método de cálculo foi aplicado a 19 casos de estudo com medições no período de inverno, provando ser suficientemente robusto para o cálculo da temperatura média interior e para a identificação de comportamento térmico solar passivo dos edifícios de habitação. Na aplicação mais generalizada do método a casos existentes na base de dados do SCE, verifica-se que este conduz a resultados satisfatórios, contudo diferentes dos existentes no estudo paramétrico, dadas as diferenças ao nível da arquitetura e do clima. A análise de sensibilidade (variância) da temperatura interior no estudo paramétrico e nos casos de estudo do SCE permitiu identificar a relevância do coeficiente global de perdas térmicas (isolamento térmico da envolvente, nomeadamente dos elementos opacos) e da taxa de renovação de ar.

Lisboa, LNEC, abril de 2018

VISTOS

O Coordenador da ADENE Research
ADENE - Agência para a Energia



Ricardo Bernardo

O Diretor do Departamento de Edifícios
Laboratório Nacional de Engenharia Civil



Jorge M. Grandão Lopes

AUTORIA



Armando Pinto
Investigador Auxiliar
Laboratório Nacional de Engenharia Civil



Rui Fragoso
Diretor do Departamento de Edifícios
ADENE - Agência para a Energia

Referências bibliográficas

- ASHRAE, 2015 – **ANSI/ASHRAE Standard 55–2015, Thermal environmental conditions for human occupancy.**
- CIBSE, 2006 – **CIBSE Guide A. Environmental Design 2006.** Londres: CIBSE.
- CIBSE TM52, 2013 – **The limits of thermal comfort: avoiding overheating in European buildings.** Edited by F. Nicol and B. Spires. CIBSE.
- CURADO, A. J. C., 2014 – **Conforto térmico e eficiência energética nos edifícios de habitação social reabilitados.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- DESPACHO (EXTRATO) N.º 15793–E, 2013 – **Regras de simplificação a utilizar nos edifícios sujeitos a grandes intervenções, bem como existentes.**
- DGEG, 2014 – **Níveis ótimos de rentabilidade. Anexo C: Edifícios de habitação.** Lisboa: DGEG.
- EN 15251, 2007 – **Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.** Bruxelas: CEN.
- EN ISO 13790, 2012 – **Energy performance of buildings—Calculation of energy use for space heating and cooling.** Bruxelas: CEN.
- EN ISO 13792, 2012 – **Thermal performance of buildings – Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling – Simplified methods,** CEN. Bruxelas: CEN.
- EPBD–RECAST, 2010 – **Diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios.** Bruxelas: Comissão Europeias, Jornal Oficial.
- INE E DGEG, 2011 – **Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010.** Lisboa.
- ISO 7730, 2005 – **Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** Geneve: ISO.
- JERÓNIMO, R. M. S., 2014 – **Avaliação do desempenho higrotérmico e do conforto de edifícios rurais reabilitados.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- LEUNG, C. AND GE, H., 2013 – **Sleep thermal comfort and the energy saving potential due to reduced indoor operative temperature during sleep,** *Building and Environment.* Elsevier Ltd, 59, pp. 91–98. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.08.010.
- LIN, Z. AND DENG, S., 2008 – **A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Developing a thermal comfort model for sleeping environments,** *Building and Environment,* 43(1), pp. 70–81. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.026.
- LNEC, 2003 – **Avaliação das condições ambientes de um apartamento em Matosinhos em situação de utilização corrente. Inverno de 2003.** Lisboa.
- LNEC, 2012 – **Condições de conforto térmico em edifícios de habitação social. Bairro Sá Carneiro (Leiria). Medições no inverno.** Lisboa.
- PINTO, A., 2008 – **Aplicação da Avaliação de ciclo de vida à análise energética e ambiental de**

edifícios. Instituto Superior Técnico.

RCCTE, 1990 – **Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios.**

Lisboa: INCM. Decreto-Lei n.º90/1990.

RECS-E, 2013 – **Regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços**

(RECS) – Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções. Lisboa: INCM.

Portaria n.º 349D–2013, alterada pela Portaria n.º 17–A/2016.

REH, 2013 – **Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) —**

Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções. Lisboa: INCM. Portaria n.º

349B–2013, alterada pela Portaria n.º 379–A/2015, de 22 de outubro e Portaria n.º 319/2016,

de 15 de dezembro.

ANEXO
Método de avaliação do indicador de comportamento térmico solar
passivo

Considera-se que uma habitação tem um comportamento térmico solar passivo satisfatório na estação de aquecimento quando o número de horas de desconforto estimado para o mês mais frio (janeiro), ponderado do desvio do voto médio previsto (PMV), não excede 10%, admitindo ocupantes com atividade sedentária durante o dia (1,2 met e 1,3 clo) e atividade do tipo "sono" durante a noite (0,7 met e 3,4 clo). Para avaliar o comportamento térmico solar passivo adota-se a temperatura média estimada para a fração no mês mais frio (janeiro), estabelecendo-se a classificação indicada no Quadro A.1. Os edifícios de inércia térmica fraca, devido às grandes variações de temperatura interior que têm, são classificados como "frio".

Quadro A.1 – Classificação da gama de conforto da fração

Classificação da fração	Gama de temperatura
Fria	$T_i \leq 14$
Ligeiramente fria	$14 < T_i \leq 16$
Moderadamente fria	$16 < T_i \leq 18$
Solar passiva	$18 < T_i \leq 20$
Confortável	$20 < T_i$

Para calcular a temperatura média no mês mais frio adota-se a expressão (A.1), considerando que:

$$T_i = T_e + 1.3 \left(\frac{G}{H} \right)^{0.9} \quad (A.1)$$

Em que:

- T_i – Temperatura média interior mensal (°C)
- T_e – Temperatura média exterior mensal (°C)
- G – Ganhos térmicos médios mensais (W)
- H – Coeficiente global de perdas térmicas (W/°C)

De uma forma geral todos os parâmetros adotados neste método de avaliação do comportamento térmico solar passivo estão definidos na regulamentação térmica (REH, 2013). A temperatura média exterior mensal do mês mais frio (T_e) encontra-se definida nessa regulamentação (REH, 2013).

Os ganhos térmicos (G , (A.2)) a considerar no cálculo são os devidos aos equipamentos (G_{eq} , (A.3)), aos ocupantes (G_{oc} , (A.4)), aos vãos envidraçados (G_{env} , (A.5)) e aos ganhos térmicos pelos elementos opacos da envolvente (G_{op} , (A.6)).

$$G = G_{eq} + G_{oc} + G_{op} + G_{env} \quad (A.2)$$

$$G_{eq} = q_{int} \cdot A_p \quad (A.3)$$

$$G_{oc} = 110 \text{ W} \times n_p \quad (A.4)$$

$$G_{env} = \sum G_{solj} \times \frac{1}{3.6 \times 24 \times 31} \times F_{s,inj} \cdot A_{s,i,nj} \quad (A.5)$$

$$G_{op} = \sum G_{solj} \times \frac{1}{3.6 \times 24 \times 31} \times abs_{sol} \times A_j \times U_j/25 \quad (A.6)$$

$$A_{s,nj} = A_w \cdot F_g \cdot g_i \quad (A.7)$$

Em que:

- G, Ganhos térmicos brutos médios mensais (W);
- q_{int} , Ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície, iguais a 4 W/m²;
- G_{sol} , Valor médio mensal da energia solar incidente numa superfície vertical com a orientação i, por unidade de área (kWh/m².mês);
- $F_{s,inj}$, Fator de obstrução do vão envidraçado n, com orientação j, na estação de aquecimento (REH, 2013);
- $A_{s,inj}$, Área efetiva coletora de radiação solar do vão envidraçado na superfície n, com orientação j (m²);
- j, Índice correspondente a cada uma das orientações;
- n, Índice que corresponde a cada uma das superfícies com orientação j;
- A_w , Área total do vão envidraçado, incluindo caixilho (m²);
- F_g , Fração envidraçada do vão (REH, 2013);
- g_i , Fator solar da estação de aquecimento (REH, 2013).

O coeficiente global de perdas térmicas (H, expressão (A.8)) é calculado pela soma do coeficiente global de transferência de calor por transmissão ($H_{tr,i}$, expressão (A.9)) e por ventilação ($H_{ve,i}$, expressão (A.10)). No caso de existirem sistemas de recuperação de calor do ar de rejeição, as perdas térmicas por ventilação serão calculadas pela expressão (A.11).

$$H = H_{tr,i} + H_{ve,i} \quad (A.8)$$

$$H_{tr,i} = \sum A_i \times U_i + A_i \times U_i \times B_{tr} \quad (A.9)$$

$$H_{ve,i} = 0.34 \times R_{ph,i} \times A_p \times P_d \quad (A.10)$$

$$H_{ve,i} = 0.34 \times R_{ph,i} \times A_p \times P_d(1 - \eta) \quad (A.11)$$

Em que:

- $H_{tr,i}$, Coeficiente global de transferência de calor por transmissão ($W/^\circ C$);
- $H_{ve,i}$, Coeficiente global de transferência de calor por ventilação ($W/^\circ C$);
- $R_{ph,i}$, Taxa nominal de renovação do ar interior na estação de aquecimento (h^{-1});
- A_p , Área interior útil de pavimento (m^2);
- P_d , Pé direito médio da fração (m);
- η , rendimento da recuperação de calor do ar de ventilação.

