

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO E DO CONFORTO DE EDIFÍCIOS RURAIS REABILITADOS

RUI MIGUEL SENDAS JERÓNIMO

Tese Submetida para a obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas

CO – Orientador: Professor Doutor Romeu da Silva Vicente

CO – Orientador: Professora Doutora Isabel Cristina da Silva Martins
Ribeiro

JULHO DE 2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ prodec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais.

Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele conduz somente até onde os outros foram.

Alexandre Graham Bell

AGRADECIMENTOS

A elaboração da presente Tese de Doutoramento não seria possível sem o acompanhamento, sempre pronto e útil, dos orientadores: Exmo. Senhor Professor Doutor Vasco Freitas, Exmo. Senhor Professor Doutor Romeu Vicente e Exma. Senhora Professora Doutora Isabel Ribeiro. Aos três orientadores o meu profundo agradecimento pelos ensinamentos ministrados, pelo debate de ideias e pela indicação dos caminhos a seguir na investigação.

Ao Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à equipa que nele desempenha funções agradeço a disponibilidade, prontidão e o auxílio prestado nos pedidos efetuados.

Aos meus Pais o reconhecimento pela motivação e apoio sempre presentes.

RESUMO

Os edifícios rurais constituem um legado de importância histórica, cultural, social e arquitetónica. Com o objetivo de avaliar se as exigências térmicas são ajustadas, o presente trabalho caracteriza o desempenho térmico e o conforto de edifícios rurais reabilitados utilizando como base uma construção típica da região do Minho. O edifício é constituído por dois apartamentos de geometrias análogas, sendo um reabilitado utilizando as práticas construtivas atuais, e outro reabilitado de forma a manter as características construtivas mais tradicionais onde não se coloca isolamento térmico, em particular, nas paredes de fachada.

O trabalho da tese de doutoramento exigiu uma procura bibliográfica com o objetivo de: caracterizar os edifícios rurais; avaliar os parâmetros influenciadores do conforto térmico; estudar diferentes modelos de conforto (Fanger e adaptativo) e interpretar a importância da ventilação noturna e da inércia térmica no seu desempenho.

A tese de doutoramento tem por base duas tarefas chave: a avaliação experimental do desempenho térmico dos edifícios rurais reabilitados através da medição *in situ* dos parâmetros de conforto e a simulação numérica do desempenho térmico de um edifício-tipo, para cinco cidades de Portugal Continental. As simulações numéricas recorreram ao programa WUFI Plus validado através da comparação dos resultados, da temperatura do ar interior, obtidos *in situ* com os obtidos numericamente. Foi também desenvolvido um estudo de sensibilidade visando a necessidade de isolar ou não isolar as paredes de pedra com elevada espessura e grande massa em diferentes localizações geográficas.

Por último, desenvolveu-se um modelo de otimização, que minimiza a energia, respeitando o conforto, obtendo-se a melhor solução construtiva de reabilitação, das paredes de elevada espessura e massa, em função da ventilação noturna no Verão e do tipo de aquecimento. O modelo de otimização desenvolvido foi solucionado através do *software* comercial GAMS.

PALAVRAS-CHAVE: Edifícios Rurais; Conforto; Desempenho Térmico; Avaliação experimental; Simulação Numérica; Inércia térmica; Ventilação noturna; Otimização.

ABSTRACT

Rural buildings are an important part of our historical, cultural, social and architectural heritage. In order to assess if the thermal requirements are adequate, this thesis describes the thermal performance and comfort of rehabilitated rural buildings using a typical construction from the Minho area. The building consists of two apartments of similar shape, one of which was rehabilitated using current building practices, while the other was renovated in such a way as to maintain its more traditional characteristics (in particular by avoiding using thermal insulation on the walls of the façade).

The doctorate thesis required bibliographic research in order to: characterize the rural buildings; assess the parameters influencing thermal comfort; study different comfort models (Fanger and adaptive) and interpret the importance of nocturnal ventilation and thermal inertia in its performance.

The PhD thesis based on two key tasks: the experimental assessment of the thermal performance of rural buildings rehabilitated using the *in situ* measurements of comfort parameters and a numeric simulation of thermal performance of a type-building, for five cities in mainland Portugal. The numerical simulations were done using the programme WUFI Plus, validated by comparing the results of the interior air temperature obtained *in situ* with those obtained numerically. A sensitivity study was also performed to assess whether it was necessary to insulate thick solid stone walls in different geographic locations.

Finally, an optimization model was developed that minimizes energy consumption while respecting comfort, obtaining the best rehabilitation solution for thick solid walls in function of nocturnal ventilation in summer and the type of heating. The optimization was developed using the commercial software GAMS.

KEYWORDS: Rural buildings; Comfort; Thermal performance; Experimental assessment; Numerical simulation; Thermal inertia; Night ventilation; Optimization.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. OBJETIVOS E ESTRATÉGIA	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA	2
1.3. ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	3
2. CONFORTO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RURAIS REABILITADOS ...	5
2.1. PROBLEMÁTICA DA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS	5
2.1.1. PATRIMÓNIO EDIFICADO EXISTENTE	5
2.1.2. REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS EXISTENTES EM PORTUGAL	9
2.1.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	12
2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS RURAIS PORTUGUESES	16
2.2.1. CASA DE ANDAR (SOBRADO).....	17
2.2.1.1. Região Minhota.....	17
2.2.1.2. Região Transmontana	19
2.2.1.3. Região da Beira Interior.....	21
2.2.2. CASA TÉRREA	23
2.2.2.1. Região do Alentejo	23
2.2.2.2. Região do Algarve	25
2.2.2.3. Região do Ribatejo e Estremadura.....	27
2.2.2.4. Região do Centro Litoral Português	28
2.3. CONFORTO TÉRMICO	29
2.3.1. FATORES QUE INFLUENCIAM O CONFORTO TÉRMICO	30
2.3.1.1. Temperatura do ar	30
2.3.1.2. Temperatura média radiante	30
2.3.1.3. Humidade do ar	31
2.3.1.4. Velocidade do ar	32
2.3.1.5. Atividade metabólica.....	32
2.3.1.6. Resistência térmica do vestuário	33
2.3.1.7. Outros Fatores.....	34

2.3.2. MODELO DE FANGER	35
2.3.3. MODELO ADAPTATIVO.....	36
2.3.4. QUANTIFICAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO INTERIOR.....	38
2.4. VENTILAÇÃO NOTURNA E INÉRCIA TÉRMICA.....	41
3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RURAIS REABILITADOS	45
3.1. OBJETIVOS.....	45
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO MONITORIZADO	46
3.2.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO.....	46
3.2.2. PARÂMETROS MONITORIZADOS E DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE MONITORIZAÇÃO	49
3.2.2.1. Medição da Temperatura do Ar e da Humidade Relativa.....	49
3.2.2.2. Medição do Caudal de Ventilação – Quartos	50
3.2.2.3. Medição do Caudal de Ventilação – Sala/Cozinha.....	52
3.2.2.4. Medição do Fluxo de Calor da Parede	53
3.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	54
3.3.1. CLIMA EXTERIOR	54
3.3.2. CAUDAL DE VENTILAÇÃO – QUARTOS	58
3.3.3. CAUDAL DE VENTILAÇÃO – SALA/COZINHA	59
3.3.4. POTÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS DE AQUECIMENTO	60
3.3.5. RESULTADOS DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	60
3.3.5.1. Regime de Flutuação Livre da Temperatura do Ar Interior	60
3.3.5.2. Regime de Aquecimento Contínuo.....	64
3.3.5.3. Regime de Aquecimento Intermitente	67
3.3.6. RESULTADOS DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO.....	72
3.3.6.1. Influência da Ventilação Noturna.....	75
3.3.7. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	82
3.3.8. AVALIAÇÃO DO CONFORTO NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO.....	84
3.3.8.1. Efeito da Ventilação Noturna.....	87
3.4. FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DA PAREDE EXTERIOR.....	89
3.5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	92
4. VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA UTILIZADO	95
4.1. OBJETIVOS.....	95

4.2. IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO DINÂMICA	96
4.3. ESCOLHA DO PROGRAMA WUFI PLUS	97
4.4. MODELO MATEMÁTICO DO WUFI PLUS	99
4.5. MODELAÇÃO GEOMÉTRICA E CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO SELECIONADO	101
4.5.1. DADOS CLIMÁTICOS	102
4.5.2. DEFINIÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS.....	107
4.5.3. OCUPAÇÃO E GANHOS INTERNOS.....	108
4.5.4. CONDIÇÕES DE AQUECIMENTO, ARREFECIMENTO, VENTILAÇÃO E DESUMIDIFICAÇÃO NA SIMULAÇÃO	109
4.5.5. DEFINIÇÃO DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO E VENTILAÇÃO	109
4.5.6. DEFINIÇÃO DE CONDIÇÕES INICIAIS DE SIMULAÇÃO	110
4.6. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	111
4.6.1. TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	112
4.6.2. TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO.....	116
4.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	118
5. QUANTIFICAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RURAIS EM FUNÇÃO DO CLIMA E DA ENVOLVENTE	119
5.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA	119
5.2. EDIFÍCIO-TIPO E CENÁRIOS DE REABILITAÇÃO	120
5.2.1. EDIFÍCIO-TIPO	120
5.2.2. CENÁRIOS DE REABILITAÇÃO	121
5.2.3. DADOS CLIMÁTICOS.....	124
5.3. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE	126
5.3.1. ESTRATÉGIA ADOTADA	126
5.3.2. TEMPERATURA DO AR INTERIOR – ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	129
5.3.2.1. Porto	129
5.3.2.2. Bragança	132
5.3.2.3. Influência da Localização no Território Nacional na Temperatura do Ar Interior da Estação de Aquecimento.....	135
5.3.3. CONSUMO ENERGÉTICO NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	139
5.3.3.1. Porto	139
5.3.3.2. Bragança	141
5.3.3.3. Influência da Localização no Território Nacional no Consumo Energético	143

5.3.4. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO – ÍNDICE DE DESCONFORTO TÉRMICO DE INVERNO (IDT – I)	145
5.3.4.1. Porto	146
5.3.4.2. Bragança	148
5.3.4.3. Influência da Localização no Território Nacional no Índice de Desconforto Térmico de Inverno – IDT – I	150
5.3.5. AVALIAÇÃO DO CONFORTO – MÉTODO DA NORMA EN 15251	153
5.3.5.1. Porto	153
5.3.5.2. Bragança	155
5.3.5.3. Influência da Localização no Território Nacional na Quantificação do Desconforto Térmico Pela Norma EN 15251	156
5.3.6. TEMPERATURA DO AR INTERIOR – ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO	159
5.3.6.1. Porto	159
5.3.6.2. Bragança	162
5.3.6.3. Influência da Localização no Território Nacional na Temperatura do Ar Interior da Estação de Arrefecimento	164
5.3.7. TEMPERATURA DO AR INTERIOR – EFEITO DA VENTILAÇÃO NOTURNA	169
5.3.7.1. Porto	169
5.3.7.2. Bragança	170
5.3.7.3. Influência da Localização no Território Nacional na Temperatura do Ar Interior na Estação de Arrefecimento – Efeito da Ventilação Noturna	171
5.3.8. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO – ÍNDICE DE DESCONFORTO TÉRMICO DE VERÃO (IDT – V)	175
5.3.8.1. Porto	175
5.3.8.2. Bragança	176
5.3.8.3. Influência da Localização no Território Nacional no Índice de Desconforto Térmico de Verão – IDT – V	177
5.3.9. AVALIAÇÃO DO CONFORTO – MÉTODO DA NORMA EN 15251	180
5.3.9.1. Porto	181
5.3.9.2. Influência da Localização no Território Nacional Segundo a Norma EN 15251	182
5.3.10. TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE	184
5.3.10.1. Estação de Aquecimento	185
5.3.10.2. Estação de Arrefecimento	187
5.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	188
6. OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO DOS EDIFÍCIOS RURAIS REABILITADOS	191

6.1. OBJETIVOS.....	191
6.2. MODELO DESENVOLVIDO.....	192
6.2.1. LIMITES DE CONFORTO	193
6.2.2. CATEGORIAS DE CONFORTO	194
6.2.3. MODELO MATEMÁTICO.....	195
6.2.4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO	199
6.3. RESULTADOS DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	203
6.3.1. RESULTADOS DO MODELO A	203
6.3.2. RESULTADOS DO MODELO B	205
6.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	210
7. CONCLUSÕES	211
7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	211
7.2. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS	212
7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	218
BIBLIOGRAFIA	219

ANEXOS

ANEXO I. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA	225
ANEXO II.229 SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA A VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	229
ANEXO III. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS CONSIDERADAS NOS ESTUDOS DE SENSIBILIDADE.....	237
ANEXO IV. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO	241
ANEXO V.249 RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – CONSUMO ENERGÉTICO NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO.....	249
ANEXO VI. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – ÍNDICE DE DESCONFORTO TÉRMICO DE INVERNO, IDT – I.....	253
ANEXO VII. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO TÉRMICO NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO ATRAVÉS DA NORMA EN 15251	257
ANEXO VIII. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO.....	261
ANEXO IX. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – EFEITO DA VENTILAÇÃO NOTURNA.....	269
ANEXO X. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – ÍNDICE DE DESCONFORTO TÉRMICO DE VERÃO, IDT – V	271
ANEXO XI. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO TÉRMICO NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO ATRAVÉS DA NORMA EN 15251	275
ANEXO XII. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE VS TEMPERATURA DO AR INTERIOR.....	279

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Número de edifícios segundo a época de construção em Portugal Continental [5].	6
Fig.2 – Número de edifícios segundo a época de construção na zona Norte de Portugal Continental [5].	6
Fig.3 – Número de edifícios segundo a época de construção por estado de conservação em Portugal Continental [5].	7
Fig.4 – Número de edifícios segundo a época de construção por estado de conservação na zona Norte de Portugal Continental [5].	7
Fig.5 – Número de alojamentos segundo o tipo de ocupação por época de construção para Portugal Continental [5].	8
Fig.6 – Número de alojamentos segundo o tipo de ocupação por época de construção para o Norte de Portugal Continental [5].	8
Fig.7 – Evolução de obras de reabilitação e construção nova em Portugal no período de 1995 a 2012 [6].	9
Fig.8 – Valores máximos impostos para as necessidades de aquecimento, arrefecimento e energia primária, de grandes intervenções segundo REH [1].	14
Fig.9 – Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis de elementos opacos [1].	14
Fig.10 – Casas tradicionais do Minho [14].	18
Fig.11 – Casas típicas da zona serrana do Noroeste Português [15].	18
Fig.12 – Esquema da casa tradicional do Minho [16].	18
Fig.13 – Casas tradicionais transmontanas [17 e 18].	20
Fig.14 – Esquema da casa tradicional transmontana [16].	20
Fig.15 – Casas típicas da Beira Interior [19 e 20].	22
Fig.16 – Esquema da casa tradicional da Beira Interior [16].	22
Fig.17 – Casas tradicionais do Alentejo [21].	24
Fig.18 – Esquema da casa tradicional do Alentejo [16].	24
Fig.19 – Casas tradicionais do Algarve [22 e 23].	26
Fig.20 – Esquema da casa tradicional do Algarve [16].	26
Fig.21 – Casas tradicionais do Ribatejo [24].	27
Fig.22 – Esquema da casa tradicional do Ribatejo [16].	28
Fig.23 – Casa tradicional litoral centro português.	29
Fig.24 – Limites de conforto para a estação de arrefecimento da Norma 15251 [28].	40
Fig.25 – Resultados obtidos para a temperatura máxima interior em função da inércia térmica e graus de ventilação [44].	43

Fig.26 – Redução da temperatura máxima interior em função da variação da temperatura exterior [44].	44
Fig.27 – Planta do piso -1 e 0 do edifício.....	46
Fig.28 – Alçado Sul do Apartamento 1 e 2.	46
Fig.29 – Alçado Nascente do Apartamento 2.	47
Fig.30 – Alçado Poente do Apartamento 1 e alçado Sul dos Apartamentos.....	47
Fig.31 – Interior do Apartamento 2 (paredes sem isolamento).....	47
Fig.32 – Interior do Apartamento 1 (paredes com isolamento na caixa-de-ar).	47
Fig.33 – Identificação das soluções construtivas.....	49
Fig.34 – Sensores para medir a temperatura do ar e a humidade relativa, interior e exterior, e planta com a sua localização.	50
Fig.35 – Medição da temperatura do ar e humidade relativa exterior <i>in situ</i> . a) <i>radiation shield</i> ; b) sensor de medição de temperatura do ar e humidade relativa dentro do <i>radiation shield</i>	50
Fig.36 – Exemplo do equipamento do método do gás traçador.	51
Fig.37 – Ensaios da medição do caudal de ventilação mecânica nos apartamentos.	52
Fig.38 – Medição do fluxo de calor <i>in situ</i> (sistema de aquisição de dados, fluxímetros e termopares).	53
Fig.39 – Registos da temperatura do ar exterior medida <i>in situ</i> – 2012/2013.	54
Fig.40 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar exterior medida <i>in situ</i> e na estação meteorológica de Cabeceiras de Basto.	55
Fig.41 – Registos da humidade relativa exterior medida <i>in situ</i>	56
Fig.42 – Probabilidade acumulada da humidade relativa exterior medida <i>in situ</i>	57
Fig.43 – Resultados do ensaio do gás traçador para o Apartamento 1 (gráfico superior) e Apartamento 2 (gráfico inferior).	58
Fig.44 – Resultados dos ensaios para o cálculo do caudal de extração mecânica dos Apartamentos.	59
Fig.45 – Resultados do registo da temperatura do ar interior e exterior durante a estação de aquecimento em flutuação livre.....	61
Fig.46 – Temperatura do ar interior média mensal durante a estação de aquecimento.	61
Fig.47 – Distribuição da temperatura do ar interior do Apartamento 1 monitorizada durante a estação de aquecimento.	62
Fig.48 – Distribuição da temperatura do ar interior do Apartamento 2 monitorizada durante a estação de aquecimento.	62
Fig.49 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na estação de aquecimento em flutuação livre.	63

Fig.50 – Registos da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento contínuo entre o dia 7 a 19 de Janeiro de 2013..... 64

Fig.51 – Distribuição da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento em regime contínuo entre o dia 10 e 19 de Janeiro de 2013..... 65

Fig.52 – Registos da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime contínuo entre o dia 21 de Fevereiro e 2 de Março de 2013. 66

Fig.53 – Distribuição da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 2 medida durante o período de aquecimento em regime contínuo entre o dia 21 de Fevereiro e 2 de Março de 2013..... 66

Fig.54 – Registo da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento em regime intermitente entre o dia 27 de Janeiro e 9 de Fevereiro de 2013. 68

Fig.55 – Distribuição da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 1 monitorizada durante o período de aquecimento em regime intermitente entre o dia 27 de Janeiro e 9 de Fevereiro de 2013. 68

Fig.56 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida no quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento em regime intermitente entre o dia 27 de Janeiro e 9 de Fevereiro de 2013..... 69

Fig.57 – Registos da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime intermitente entre os dias 4 e 13 de Abril de 2013..... 70

Fig.58 – Distribuição da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 2 medida durante o período de aquecimento em regime intermitente entre os dias 4 e 13 de Abril de 2013. 70

Fig.59 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida no quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime intermitente entre os dias 4 e 13 de Abril de 2013..... 71

Fig.60 – Resultados da temperatura do ar interior durante a estação de arrefecimento. 72

Fig.61 – Temperatura média mensal do ar interior e exterior durante a estação de arrefecimento..... 73

Fig.62 – Distribuição da temperatura do ar interior do Apartamento 1 medida durante a estação de arrefecimento..... 73

Fig.63 – Distribuição da temperatura do ar interior do Apartamento 2 medida durante a estação de arrefecimento..... 74

Fig.64 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na estação de arrefecimento. 74

Fig.65 – Registos da temperatura do ar interior da sala/cozinha do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013. 76

Fig.66 – Distribuição da temperatura do ar interior da sala/cozinha do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013. 76

Fig.67 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na sala/cozinha do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013..... 77

Fig.68 – Registos da temperatura do ar interior da sala/cozinha do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013. 78

Fig.69 – Distribuição da temperatura do ar interior da sala/cozinha do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.	78
Fig.70 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na sala/cozinha do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.....	79
Fig.71 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na sala/cozinha e quarto do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.....	81
Fig.72 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na sala/cozinha e quarto do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.....	81
Fig.73 – Avaliação do Conforto do Apartamento 1 e 2 durante a estação de aquecimento.	82
Fig.74 – Avaliação do conforto do Apartamento 1 e 2 durante a estação de aquecimento com ocupação.	83
Fig.75 – Avaliação do conforto do quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento em regime contínuo.....	83
Fig.76 – Avaliação do conforto do quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime contínuo.....	84
Fig.77 – Avaliação do conforto do Apartamento 1 durante a estação de arrefecimento.....	85
Fig.78 – Avaliação do conforto do Apartamento 2 durante a estação de arrefecimento.....	85
Fig.79 – Avaliação do conforto do Apartamento 1 e 2 durante a estação de arrefecimento.....	86
Fig.80 – Avaliação do conforto da sala/cozinha do Apartamento 1 e 2 durante a estação de arrefecimento no período entre 13 e 23 de Agosto de 2013.	86
Fig.81 – Avaliação do conforto da sala/cozinha do Apartamento 1 e 2 durante a estação de arrefecimento no período entre 13 e 23 de Agosto de 2013 com ocupação.....	87
Fig.82 – Avaliação do conforto da sala/cozinha e do quarto Apartamento 1 durante a estação de arrefecimento no período entre 29 de Julho e 30 de Setembro de 2013.	88
Fig.83 – Avaliação do conforto da sala/cozinha e do quarto do Apartamento 2 durante a estação de arrefecimento no período entre 29 de Julho e 30 de Setembro de 2013.	88
Fig.84 – Valor diário do coeficiente de transmissão térmica e do fluxo de calor medido <i>in situ</i>	89
Fig.85 – Esquema do processo de cálculo do WUFI Plus [adaptado de 54].....	97
Fig.86 – Exemplo de um <i>output</i> relativo às condições higrotérmicas da envolvente de uma parede orientada a Norte, constituída por um pano de granito com 75 cm de espessura.	98
Fig.87 – Exemplo de um <i>output</i> relativo ao clima interior de uma zona térmica de simulação.....	98
Fig.88 – Exemplo de um <i>output</i> relativo ao consumo energético de uma zona térmica de simulação.....	98
Fig.89 – Balanço térmico para uma zona do programa WUFI Plus [54].....	99
Fig.90 – Modelação do edifício em estudo.	101
Fig.91 – Modelação do Apartamento 1, à direita (com isolamento dentro da caixa-de-ar) e do Apartamento 2, à esquerda (sem isolamento).....	101

Fig.92 – Espaços não úteis – “ <i>attached zones</i> ”.....	102
Fig.93 – Exemplo das janelas e portas dos elementos restantes.....	102
Fig.94 – “ <i>Remaining elements</i> ” da modelação do edifício.....	102
Fig.95 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do período de validação do Apartamento 1 na estação de aquecimento.	103
Fig.96 – Radiação global e velocidade do vento do período de validação do Apartamento 1 na estação de aquecimento.....	103
Fig.97 – Rumo do vento e precipitação do período de validação do Apartamento 1 na estação de aquecimento.....	104
Fig.98 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do período de validação do Apartamento 2 na estação de aquecimento.	104
Fig.99 – Radiação global e velocidade do vento do período de validação do Apartamento 2 na estação de aquecimento.....	105
Fig.100 – Rumo do vento e precipitação do período de validação do Apartamento 2 na estação de aquecimento.....	105
Fig.101 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do período de validação dos Apartamentos na estação de arrefecimento.....	106
Fig.102 – Radiação global e velocidade do vento do período de validação dos Apartamentos na estação de arrefecimento.	106
Fig.103 – Rumo do vento e precipitação do período de validação dos Apartamentos na estação de arrefecimento.....	107
Fig.104 – Exemplo de um elemento construtivo usado na simulação do programa WUFI Plus (Fonte: WUFI Plus).....	107
Fig.105 – Exemplo de definição de um perfil diário para o sistema de aquecimento (Fonte: WUFI Plus).....	110
Fig.106 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de aquecimento entre o dia 5 e 15 de Fevereiro de 2013.....	112
Fig.107 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de aquecimento entre o dia 5 e 8 de Fevereiro de 2013.....	113
Fig.108 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de aquecimento entre o dia 12 e 15 de Fevereiro de 2013.....	113
Fig.109 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 2 na estação de aquecimento.....	114
Fig.110 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 2 na estação de aquecimento entre os dias 2 e 5 de Abril de 2013.....	114
Fig.111 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 2 na estação de aquecimento entre os dias 6 e 11 de Abril de 2013.....	115
Fig.112 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de arrefecimento.....	116
Fig.113 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de arrefecimento.....	117

Fig.114 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 2 na estação de arrefecimento.....	117
Fig.115 – Modelação geométrica do Apartamento 1 para os estudos de sensibilidade.	121
Fig.116 – Esquema das simulações realizadas no estudo de sensibilidade final.	123
Fig.117 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade do Porto.	124
Fig.118 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade de Bragança.	124
Fig.119 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade de Lisboa.	125
Fig.120 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade de Coimbra.	125
Fig.121 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade de Évora.	125
Fig.122 – Temperatura do ar interior dos cenários reabilitados, na estação de aquecimento, para a cidade do Porto.	129
Fig.123 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados da cidade do Porto.	131
Fig.124 – Temperatura do ar interior dos cenários reabilitados, na estação de aquecimento, para a cidade de Bragança.	132
Fig.125 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.	134
Fig.126 – Percentagem de tempo de desconforto térmico, dos cenários reabilitados na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.	135
Fig.127 – Temperatura média do ar interior, dos cenários reabilitados na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.	136
Fig.128 – Temperatura do ar interior correspondente ao percentil 5%, $T_{5\%}$, dos cenários reabilitados na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.	137
Fig.129 – Representação gráfica dos parâmetros analisados – percentagem de tempo de desconforto, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 5%, para as cinco cidades estudadas.	138
Fig.130 – Consumo energético, na estação de aquecimento, para a cidade do Porto.	139
Fig.131 – Custos de aquecimento, por mês, para a cidade do Porto.	140
Fig.132 – Consumo energético, na estação de aquecimento, para a cidade de Bragança.	141
Fig.133 – Custos de aquecimento, por mês, para a cidade de Bragança.	142
Fig.134 – Consumo energético, na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.	143
Fig.135 – Consumo energético, por m ² , na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.	143

Fig.136 – Representação gráfica do consumo energético total e por m ² , da estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.	144
Fig.137 – Representação gráfica da variação da temperatura para o cálculo do IDT - I.	145
Fig.138 – Exemplo do Índice de Desconforto Térmico de Inverno, IDT – I, para um dado edifício. ...	145
Fig.139 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para a cidade do Porto.	146
Fig.140 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para o período de ocupação do quarto principal, para a cidade do Porto.....	147
Fig.141 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I) para a cidade de Bragança.	148
Fig.142 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), por mês, para o período de ocupação do quarto principal, para a cidade de Bragança.	149
Fig.143 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para as cinco cidades estudadas. ...	150
Fig.144 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para o período de ocupação do quarto principal, para as cinco cidades estudadas.	151
Fig.145 – Representação gráfica do Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para o edifício-tipo e para o período de ocupação do quarto principal, das cinco cidades estudadas.	152
Fig.146 – Avaliação do conforto térmico, segundo a Norma EN 15251 [28], para a cidade do Porto.	153
Fig.147 – Avaliação do conforto térmico, segundo a Norma EN 15251 [28], para a cidade de Bragança.	155
Fig.148 – Percentagem de tempo de desconforto, para a categoria II da Norma EN 15251 [28], para as cinco cidades estudadas.	156
Fig.149 – Percentagem de tempo de desconforto, para a categoria III da Norma EN 15251 [28], para as cinco cidades estudadas.	157
Fig.150 – Representação gráfica da percentagem de tempo de desconforto, para o nível II e III da Norma EN 15251 [28], durante o Inverno, das cinco cidades estudadas.....	158
Fig.151 – Temperatura do ar interior dos cenários reabilitados, para a estação de arrefecimento, para a cidade do Porto.	159
Fig.152 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade do Porto.....	161
Fig.153 – Temperatura do ar interior dos cenários reabilitados, para a estação de arrefecimento, para a cidade de Bragança.	162
Fig.154 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.....	163
Fig.155 – Percentagem de tempo de desconforto dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.....	165
Fig.156 – Temperatura média do ar interior dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.....	166

Fig.157 – Temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%, $T_{95\%}$, dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.	167
Fig.158 – Representação gráfica dos parâmetros analisados – percentagem de tempo de desconforto, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%, para as cinco cidades estudadas.	168
Fig.159 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados com 1RPH e 4RPH, para a cidade do Porto.....	169
Fig.160 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados com 1RPH e 4RPH, para a cidade de Bragança.....	170
Fig.161 – Percentagem de tempo de desconforto dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.....	171
Fig.162 – Temperatura média do ar interior dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.	172
Fig.163 – Temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95% dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.	173
Fig.164 – Representação gráfica dos parâmetros analisados – Percentagem de tempo de desconforto, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%, para as cinco cidades estudadas.	174
Fig.165 – Índice de Desconforto Térmico de Verão (IDT – V), por mês, para a cidade do Porto.	175
Fig.166 – Índice de Desconforto Térmico de Verão (IDT – V), por mês, para a cidade de Bragança.	176
Fig.167 – Índice de Desconforto Térmico de Verão IDT – V, para as cinco cidades estudadas.	177
Fig.168 – Índice de Desconforto Térmico de Verão IDT – V, para o período de ocupação do quarto principal, para as cinco cidades estudadas.	178
Fig.169 – Representação gráfica do Índice de Desconforto Térmico de Verão IDT – V, para o edifício-tipo e para o período de ocupação do quarto principal, das cinco cidades estudadas.	179
Fig.170 – Avaliação do conforto térmico, segundo a Norma EN 15251 [28], para a cidade do Porto.	181
Fig.171 – Percentagem de tempo de desconforto, na categoria II da Norma EN 15251 [28], para as cinco cidades estudadas.	182
Fig.172 – Percentagem de tempo de desconforto, na categoria III da Norma EN 15251 [28], para as cinco cidades estudadas.	183
Fig.173 – Quarto principal do edifício-tipo, utilizado para o cálculo da temperatura média radiante.	184
Fig.174 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para cidade do Porto.	185
Fig.175 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para a cidade do Porto.	185

Fig.176 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para a cidade do Porto. 186

Fig.177 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade do Porto. 187

Fig.178 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados na cidade do Porto. 187

Fig.179 – Exemplo dos resultados obtidos no WUFI Plus: a) temperatura do ar interior e exterior e b) consumo de energia para o edifício-tipo. 192

Fig.180 – Limites de conforto do Modelo A: a) estação de aquecimento; b) estação de arrefecimento. 194

Fig.181 – Limites de conforto do Modelo B para a estação de arrefecimento. 194

Fig.182 – Resultados do exemplo de aplicação para a categoria de desconforto 10%. 201

Fig.183 – Resultados do exemplo de aplicação para a categoria de desconforto 50%. 201

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Edifícios para habitação familiar, por tipo de obra, no período entre 2001 e 2012 [6].	10
Quadro 2 – Proporção da reabilitação do edificado relativamente às construções novas de edifícios concluídos para habitação familiar, no período entre 2001 e 2012 [6].	11
Quadro 3 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do Minho.	17
Quadro 4 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais de Trás-os-Montes.	19
Quadro 5 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais da Beira Interior.	21
Quadro 6 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do Alentejo.	23
Quadro 7 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do Algarve.	25
Quadro 8 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do Ribatejo e Estremadura.	27
Quadro 9 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do centro litoral português.	28
Quadro 10 – Valores das trocas térmicas entre um indivíduo e o meio para várias atividades [27]. ...	33
Quadro 11 – Valores de resistência térmica de algumas peças de vestuário [27].	34
Quadro 12 – Valores de temperaturas de projeto segundo a Norma EN 15251 [28].	39
Quadro 13 – Descrição das soluções construtivas de envolvente dos Apartamentos.	48
Quadro 14 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar exterior.	55
Quadro 15 – Variáveis estatísticas da humidade relativa exterior.	56
Quadro 16 – Potência medida <i>in situ</i> dos radiadores elétricos.	60
Quadro 17 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior durante a estação de aquecimento em flutuação livre.	63
Quadro 18 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, do quarto do Apartamento 1, durante a estação de aquecimento em regime de aquecimento contínuo entre o dia 10 e 19 de Janeiro de 2013.	65
Quadro 19 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, do quarto do Apartamento 2, durante a estação de aquecimento em regime de aquecimento contínuo entre o dia 21 de Fevereiro e 2 de Março de 2013.	67
Quadro 20 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, do quarto do Apartamento 1, durante a estação de aquecimento em regime de aquecimento intermitente entre o dia 27 de Janeiro e 9 de Fevereiro de 2013.	69
Quadro 21 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, do quarto do Apartamento 2, durante a estação de aquecimento em regime de aquecimento intermitente entre os dias 4 e 13 de Abril de 2013.	71
Quadro 22 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior durante a estação de arrefecimento.	75

Quadro 23 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, da sala/cozinha do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.....	77
Quadro 24 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, da sala/cozinha do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.....	80
Quadro 25 – Registos diários do fluxo de calor medido <i>in situ</i> e respetivo <i>U</i>	90
Quadro 26 – Necessidades brutas de aquecimento.	91
Quadro 27 – Equações relativas ao balanço térmico de uma zona de simulação no WUFI Plus.....	100
Quadro 28 – Características principais dos materiais utilizados no modelo numérico desenvolvido no WUFI Plus.	108
Quadro 29 – Valores das condições de aquecimento, arrefecimento, ventilação e desumidificação consideradas na validação do modelo.....	109
Quadro 30 – Condições iniciais das simulações higrotérmicas.....	110
Quadro 31 – Condições consideradas para a validação do modelo.	111
Quadro 32 – Alterações construtivas e de utilização do modelo numérico dos estudos de sensibilidade.	120
Quadro 33 – Valores de calor convectivo e radiante, humidade, produção de CO ₂ e atividade humana associados ao nível de ocupação.	121
Quadro 34 – Perfil de ocupação do apartamento para os estudos de sensibilidade – número de pessoas.	121
Quadro 35 – Opções consideradas no estudo de sensibilidade alargado e no estudo final.....	122
Quadro 36 – Modo de funcionamento do sistema de aquecimento e do sistema de ventilação.	123
Quadro 37 – Valores médios, mínimos e máximos, para a estação de aquecimento e arrefecimento das cidades estudadas.	126
Quadro 38 – Características das simulações realizadas para cada cidade na estação de aquecimento.	128
Quadro 39 – Características das simulações realizadas para cada cidade na estação de arrefecimento.	128
Quadro 40 – Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para a cidade do Porto.....	130
Quadro 41 – Temperatura do ar interior mínima, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados da cidade do Porto.	131
Quadro 42 – Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.....	133
Quadro 43 – Temperatura do ar interior mínima, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados da cidade de Bragança.	134
Quadro 44 – Custos totais de aquecimento para a cidade do Porto.	140
Quadro 45 – Custos totais de aquecimento para a cidade de Bragança.	142

Quadro 46 – Percentagem de tempo e respetivo número de horas de desconforto para a cidade do Porto.....	154
Quadro 47 – Percentagem de tempo e respetivo número de horas de desconforto para a cidade de Bragança.....	155
Quadro 48 – Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados da cidade do Porto.....	160
Quadro 49 – Temperatura do ar interior máxima, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados da cidade do Porto.....	161
Quadro 50 – Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.....	163
Quadro 51 – Temperatura do ar interior máxima, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.....	164
Quadro 52 – Percentagem de tempo e respetivo número de horas de desconforto para a cidade do Porto.....	181
Quadro 53 – Diferença entre a temperatura média radiante e a do ar interior, dos cenários reabilitados, para o percentil 50.....	186
Quadro 54 – Diferença entre a temperatura média radiante e a do ar interior, dos cenários reabilitados, para o percentil 50.....	188
Quadro 55 – Cenários reabilitados considerados no estudo de sensibilidade e suas parametrizações.....	193
Quadro 56 – Número de horas de desconforto, de cada localidade estudada, na estação de aquecimento.....	195
Quadro 57 – Parâmetros do modelo de otimização.....	198
Quadro 58 – Temperatura do ar interior e energia consumida de quatro cenários exemplificativos.....	200
Quadro 59 – Símbolos da percentagem de desconforto e do consumo energético dos cenários reabilitados.....	203
Quadro 60 – Resultados para Lisboa utilizando o Modelo A.....	204
Quadro 61 – Resultados para o Porto utilizando o Modelo B.....	205
Quadro 62 – Resultados para Bragança utilizando o Modelo B.....	206
Quadro 63 – Resultados para Lisboa utilizando o Modelo B.....	207
Quadro 64 – Resultados para Coimbra utilizando o Modelo B.....	208
Quadro 65 – Resultados para Évora utilizando o Modelo B.....	209
Quadro 66 – Síntese dos resultados do estudo de sensibilidade.....	215

SÍMBOLOS E SIGLAS

A – Área [m^2]

A_{env} – Área do envidraçado [m^2]

A_{pav} – Área de pavimento [m^2]

Aq – instantes de tempo da estação de aquecimento

$Aq/|Aq|$, percentagem de instantes de tempo, na estação de aquecimento, fora dos limites de conforto [%]

$Aq/|Ar|$, percentagem de instantes de tempo, na estação de arrefecimento, fora dos limites de conforto [%]

Aq/Nt , percentagem de instantes de tempo, da estação de aquecimento, fora dos limites de conforto nos resultados globais [%]

Ar – instantes de tempo da estação de arrefecimento

Ar/Nt , percentagem de instantes de tempo, da estação de arrefecimento, fora dos limites de conforto nos resultados globais [%]

C – Capacidade térmica [$Wh/(m^3°C)$]

c – Concentração do gás traçador [ppm]

c_0 – Concentração inicial do gás traçador [ppm]

clo – Unidade de medição da resistência térmica do vestuário

CO_2 – Dióxido de Carbono

c_p – Calor específico [$J/kg°C$]

e – Espessura [m]

$E_{s,t}$ – consumo de energia no cenário s no instante t

$E_{s,t}$ – consumo de energia no cenário s no instante t [W]

$f.o - opt.$, Diferença entre o valor da função objetivo de um cenário reabilitado (simulação) com o valor da função objetivo da solução ótima [w]

$f.o.$, função objetivo - somatório da energia consumida [w]

f_{frame} – Fator de redução devido à caixilharia

g_{\perp} - Fator solar do vidro

GD – Graus dias [$°C$]

HR – Humidade Relativa [%]

HR_{max} – Humidade relativa máxima [%]

$HR_{média}$ – Humidade relativa média [%]

HR_{min} – Humidade relativa mínima [%]

Hs – instantes de tempo da estação de aquecimento

I – Radiação solar [W/m^2]

I_{cl} – Resistência térmica do vestuário [$\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$]

L – Carga térmica que atua sobre o corpo [W/m^2]

L – valor fictício máximo para a temperatura, 50°C

m – Massa do elemento [kg/m^2]

M – Taxa metabólica [W/m^2]

met – Unidade de medição da taxa de metabolismo

mt – Massa total do elemento [kg/m^2]

NBA – Necessidades brutas de aquecimento [kWh]

N_s – número de simulações

N_t – número de instantes de tempo

N_v – Necessidades nominais de arrefecimento máximas admissíveis

N_{vc} – Necessidades nominais de arrefecimento

°C – graus centígrados

P – percentagem admissível em cada estação [%]

Percent, percentagem de instantes fora dos limites de conforto durante todo o ano (resultados globais) [%];

Percent, percentagem de instantes fora dos limites de conforto durante todo o ano (resultados globais) [%]

q – Caudal volúmico do ar [m^3/s]

$Q_{componente}$ – Fluxo térmico da envolvente opaca [W]

$Q_{envidraçado}$ – Fluxo térmico dos envidraçados [W]

Q_i – Fluxo de calor por unidade de área [W/m^2]

Q_T – Perdas de calor pelo envidraçado [W]

Q_{IWQ} – Fluxo térmico dos elementos interiores [W]

Q_n – Poder emissivo de um corpo negro [W/m^2]

Q_{RLT} – Fluxo térmico dos sistemas de aquecimento [W]

Q_T – Perdas de calor pelo envidraçado [W]

Q_{vent} – Balanço térmico da ventilação [W]

$Q_{ventilação}$, fluxo térmico da ventilação [W]

R – Resistência térmica [$\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$]

s – simulação

SF_6 – Hexafluoreto de enxofre

$SHGC$ – Coeficiente de ganhos solares

SO_2 – Dióxido de enxofre

t – instante de tempo

T_{conf} – Temperatura de conforto [°C]

T_e – Temperatura do ar exterior [°C]

T_{ext_t} – Temperatura exterior no instante t [°C]

T_i – Temperatura interior [°C]

T_m – Temperatura exterior média mensal [°C]

T_{max} – Diferença entre a temperatura máxima exterior e interior [°C]

$T_{max,in}$ – Temperatura máxima interior [°C]

$T_{max,out}$ – Temperatura máxima exterior [°C]

T_{max_t} – temperatura máxima que a temperatura do ar interior poderá atingir no instante de tempo t [°C]

T_{min_t} – temperatura mínima que a temperatura do ar interior poderá atingir no instante de tempo t [°C]

T_{mp} – Temperatura exterior exponencialmente ponderada [°C]

T_{mr} – Temperatura média radiante [°C]

T_{neut} – Temperatura neutra [°C]

T_{n-i} – Temperatura média exterior do dia i anterior [°C]

T_{oc} – Temperatura operativa de conforto [°C]

T_{op} – Temperatura operativa [°C]

T_p – Temperatura de superfície [°C]

$T_{s,t}$ – temperatura do ar interior no cenário s no instante t [°C]

U – Coeficiente de transmissão térmica [$W/m^2°C$]

U_{env} – Coeficiente de transmissão térmica do envidraçado [$W/m^2°C$]

U_{wdn} – Coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite do envidraçado [$W/m^2°C$]

V – Volume [m^3]

V_a – Velocidade do ar [m/s]

ΔHR – Diferença entre a humidade relativa máxima e mínima [%]

δ_p – Permeabilidade ao vapor de água [$kg/ms Pa$]

ΔT – Amplitude térmica [°C]

ε – Emissividade

θ_0 – Temperatura superficial da envolvente [°C]

θ_∞ – Temperatura do fluido fora da camada limite [°C]

θ_a – Temperatura exterior [°C]

θ_i – Temperatura do ar interior [°C]
 θ_{imax} – Temperatura do ar interior máxima [°C]
 θ_{imin} – Temperatura do ar interior mínima [°C]
 θ_{rm} – Temperatura média ponderada exterior [°C]
 θ_s – Temperatura superficial [°C]
 λ – Condutibilidade térmica [W/m°C]
 ρ – Massa volúmica [kg/m³]
 ε – Pequena tolerância 1,0E-6

ABREVIATURAS

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*
DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia
EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FF – Fator de forma
IDT – I – Índice de Desconforto Térmico de Inverno
IDT – V – Índice de Desconforto Térmico de Verão
ISO – *International Organization for Standardization*
LFC – Laboratório de Física das Construções
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
OCDE – Organização de Cooperação e Desenvolvimento Económico
PMV – *Predicted Mean Vote*
PPD – *Predicted Percentage of Dissatisfied*
RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RECS – Regulamento do Desempenho Energético de Edifícios de Comércio e Serviços
REH – Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RPH – Renovações por hora

1.

OBJETIVOS E ESTRATÉGIA

1.1. ENQUADRAMENTO

O desenvolvimento industrial das sociedades influenciou profundamente o modo de vida, os costumes e os hábitos das pessoas. Uma das consequências da industrialização, foi a fuga das pessoas do meio rural para o meio urbano. Esta fuga é consequente da procura de melhores condições de vida, oferecidas em meios urbanos, a vários níveis, nomeadamente económico, social e cultural. Assim, o meio rural cada vez mais esquecido e desabitado, deixou edifícios rurais com qualidade construtiva sem qualquer utilização.

No entanto, o mundo rural é uma parte importante da nossa história que não pode nem deve cair no esquecimento. Para além do património, dos costumes, das paisagens, da gastronomia, faz parte o património edificado corrente (edifícios de habitação) que é o objeto central desta tese.

Torna-se assim importante perspetivar a viabilidade da reabilitação destes edifícios, sem por em causa as exigências mínimas de conforto e a eficiência energética, contribuindo de forma positiva para o crescimento da economia da construção, do equilíbrio sociocultural do mundo rural e para o desenvolvimento do turismo que será um dos setores de atividade económica a ser incentivado num futuro próximo.

Os edifícios rurais possuem um valor arquitetónico ímpar, sendo o reflexo da região que integram, dos seus costumes e do seu modo de vida. Os edifícios identificam a região através das suas formas geométricas, materiais utilizados, elementos construtivos e ornamentais e disposição do espaço interior. Assim sendo, é necessário saber quais as estratégias de adaptabilidade e de reabilitação destes edifícios, que em grande parte se encontram abandonados.

Esta necessidade constitui a motivação para o presente estudo, pois tendo estes edifícios características distintas da maioria dos edifícios de habitação urbanos antigos e totalmente diferentes das novas construções, importa saber se os requisitos impostos pelos regulamentos em vigor, especialmente o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação [1], é adequada, ou, pelo contrário, conduz a uma descaracterização arquitetónica e do funcionamento tradicional destes edifícios. Alterando profundamente as soluções construtivas das suas envolventes sem que se reflita objetivamente na melhoria do conforto do seu ambiente térmico e consumo energético. Importa assim, perceber e demonstrar se o caminho imposto pelo regulamento [1] é o mais correto, ou se há outras vias que mantenham as suas características construtivas, sem que o conforto térmico e necessidades energéticas do edifício, que o REH [1] padroniza, sejam completamente postas em causa, aliadas a um custo de reabilitação mais contextualizado com o panorama económico do País, ao abrigo de uma abordagem exigencial e não prescrita.

Este estudo vai avaliar diferentes processos de reabilitação de paredes de pedra de elevada espessura e massa: um seguindo os principais requisitos do REH [1] no que respeita às paredes de envolvente exterior, isolando-as pelo seu interior, e outro que não altera profundamente as soluções construtivas originais das paredes mas em que se otimiza a inércia térmica e se promove a ventilação noturna. Comparam-se numericamente e experimentalmente as consequências destas duas opções no conforto e no consumo energético.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

A construção de edifícios novos tem marcado a tendência do setor da construção em Portugal nas últimas décadas, relegando a reabilitação para um plano secundário. Com a atual situação económica do país, em que as pessoas deixaram de ter acesso fácil ao crédito bancário e desta forma não têm a possibilidade de adquirir tão facilmente uma habitação nova, como era corrente num passado muito recente, a construção nova perde importância. Por outro lado, o edificado existente necessita de obras de reabilitação, sendo que os edifícios rurais, objeto deste estudo, as necessitam em grande escala. Sabe-se, também, que a reabilitação de edifícios existentes é, muitas vezes, incompatível com a regulamentação que, na generalidade dos casos foi concebida para edifícios novos [2].

Desta forma pretende-se com o presente estudo contribuir para uma abordagem metodológica para elaboração de projetos de reabilitação de edifícios rurais, que garantam bons índices de conforto térmico e reduzidas necessidades energéticas, sem que para isso haja uma descaracterização arquitetónica e construtiva. Para tal, considera-se essencial cumprir os seguintes objetivos fundamentais:

- Caracterizar experimentalmente o desempenho térmico de edifícios rurais reabilitados: através da medição *in situ* da temperatura do ar e humidade relativa interior, e caudal de ventilação;
- Validação do programa de simulação dinâmica (com a confrontação dos resultados deste com os da monitorização);
- Simulação do comportamento térmico de edifícios rurais reabilitados, em regime dinâmico: através de um programa informático avançado, WUFI Plus;
- Realização de estudos paramétricos com base no programa de simulação higrotérmica (WUFI Plus): avaliar o impacto dos fatores mais importantes no comportamento dos edifícios rurais reabilitados no conforto térmico e consumo energético;
- Otimização do comportamento higrotérmico de edifícios rurais reabilitados: através do código de modelação matemática e otimização GAMS. Desenvolveu-se um modelo para a otimização do desempenho térmico de edifícios rurais reabilitados tendo em consideração os fatores mais importantes que o influenciam, avaliando os efeitos nos parâmetros de conforto e consumo energético.

Para cumprir os objetivos fundamentais desenvolveram-se as seguintes tarefas:

- Estudar a problemática da reabilitação de edifícios com base nos dados estatísticos do anuário da construção e dos censos 2011, caracterizando o panorama da reabilitação no país e o número de edifícios rurais existentes em Portugal;
- Caracterizar os edifícios rurais portugueses: conhecer as características construtivas, sociais, culturais e económicas que motivaram a sua forma e construção para as diferentes regiões de Portugal;

- Estudar o conforto térmico: conhecer os fatores que influenciam o conforto térmico nos edifícios e nos modelos de quantificação de conforto térmico e quantificação do conforto térmico dos edifícios rurais reabilitados;
- Estudar a importância da inércia térmica: que é uma característica dos edifícios rurais portugueses. É importante perceber o seu efeito no ambiente interior dos edifícios, em termos de conforto térmico e na influência no consumo energético;
- Estudar a ventilação noturna: entender os efeitos que a ventilação noturna pode ter no conforto térmico dos edifícios, tendo em vista a sua aplicação aos edifícios rurais portugueses;
- Monitorizar, durante um ano, o edifício-tipo, obtendo medições *in situ*, da temperatura do ar interior, humidade relativa interior e caudal de ventilação, que permitiram caracterizar a estação de aquecimento e arrefecimento e validar o modelo numérico utilizado;
- Modelar numericamente o edifício caso de estudo, validando o modelo numérico através da comparação dos resultados numéricos com os experimentais, da temperatura do ar interior, de forma a poder realizar os estudos paramétricos;
- Simulação de diversos cenários reabilitados, para cinco localidades de Portugal (Porto, Bragança, Lisboa, Coimbra e Évora), com diferentes combinações de isolamento térmico nas paredes exteriores, regime de aquecimento e ventilação noturna no Verão;
- Elaboração de um modelo matemático de otimização, com base nos resultados do estudo paramétrico, através do código GAMS.

1.3. ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

A tese de doutoramento que resultou do presente trabalho de investigação está dividida em sete capítulos.

O capítulo 1 contém uma introdução geral do trabalho, enquadrando-o na realidade socioeconómica portuguesa, apresenta-se também os objetivos principais do trabalho, bem como a estratégia a seguir para os alcançar.

O capítulo 2 é dedicado à caracterização dos edifícios rurais reabilitados, aborda-se: o panorama da reabilitação de edifícios em Portugal; a eficiência energética em edifícios rurais; a caracterização do edificado tradicional rural português; o conforto térmico dos edifícios e o papel da ventilação e da inércia térmica nos edifícios. A análise do panorama da reabilitação baseia-se nos dados do anuário da construção e dos censos 2011, elaborando uma projeção do número de edifícios que o estudo engloba e o seu estado de conservação. A problemática da eficiência energética dos edifícios rurais, incide nas exigências que o REH [1] determina para este tipo de edifícios. Na elaboração da caracterização do edificado rural português apresentam-se as razões em que se baseia a sua conceção, os vários tipos de edifícios rurais existentes em Portugal e as suas características construtivas. No subcapítulo do conforto térmico analisam-se os fatores que o influenciam, modelos que o caracterizam e métodos de quantificação do conforto térmico para edifícios. Relativamente ao contributo da ventilação noturna e inércia térmica, o objetivo passa por refletir sobre o efeito da ventilação na melhoria do conforto térmico dos edifícios e do efeito combinado da ventilação noturna e inércia térmica para o arrefecimento no Verão.

O capítulo 3 apresenta a campanha experimental levada a cabo no edifício-tipo. Este capítulo inclui a caracterização do edifício (envolvente, equipamento, espaços, etc.). Definem-se os objetivos da monitorização e a forma como se procedeu, descrevendo o tipo de sensores de medição de temperatura

e humidade relativa e a sua localização, bem como a forma como se calculou o caudal de ventilação, salienta-se ainda a medição de fluxo de calor de uma parede de elevada espessura e grande massa. Os resultados da temperatura do ar interior obtidos estão divididos em: estação de aquecimento (regime de flutuação livre, aquecimento contínuo e aquecimento intermitente) e estação de arrefecimento.

O capítulo 4 é referente à simulação numérica do desempenho térmico, apresenta-se, descreve-se e caracteriza-se o *software* escolhido (WUFI Plus) para o desenvolvimento do estudo e as motivações da sua escolha. Neste capítulo apresentam-se os resultados da validação do modelo numérico desenvolvido escolhido, comparando os resultados experimentais com os resultados simulados da temperatura do ar interior em dois períodos do ano, na estação de aquecimento e na estação de arrefecimento.

O capítulo 5 é dedicado à quantificação do desempenho térmico de edifícios rurais em função do clima e da sua envolvente. Desenvolveram-se estudos paramétricos de fatores condicionantes do desempenho térmico destes edifícios para diversas localizações do País. Os resultados incidem no conforto térmico e no consumo energético.

O capítulo 6 destina-se à otimização do conforto térmico e consumo energético, apresenta-se a forma como se desenvolveu o modelo de otimização e sua resolução, através do código GAMS, e os respetivos resultados.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões parciais e globais obtidas da elaboração da tese de doutoramento e são ainda identificadas perspetivas futuras.

2.

CONFORTO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RURAIS REABILITADOS

2.1. PROBLEMÁTICA DA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

2.1.1. PATRIMÓNIO EDIFICADO EXISTENTE

No mundo desenvolvido é reconhecida a importância cultural e socioeconómica do património arquitetónico e da sua salvaguarda. Em Portugal, este tem sido um setor que tem registado pouco desenvolvimento [3].

A reabilitação, em sentido lato, consiste na recuperação e beneficiação geral de áreas degradadas ao nível físico e morfológico, bem como na revitalização socioeconómica e funcional. Em Portugal observa-se um progressivo consenso sobre a importância cultural e a necessidade socioeconómica de reabilitar um património urbano e rural de extraordinário valor, mas que se vem degradando há décadas.

Particularizando, esta problemática aos edifícios rurais, é conhecido que, com o desenvolvimento industrial das sociedades, a alteração dos hábitos e modos de vida das pessoas se foram consequentemente transformando. Durante a segunda metade do século XX a população urbana teve um crescimento exponencial. Na década de cinquenta a população urbana não ultrapassava os 200 milhões de cidadãos, mas em finais do século XX registava cerca de 3 mil milhões prevendo-se que em 2025 sejam cerca de 5 mil milhões e em 2050 cerca de 7 mil milhões que corresponderá a 70% da população mundial.

A migração em grande escala para as cidades originou um crescimento desmesurado dos aglomerados urbanos, criando problemas sociais, económicos, políticos, institucionais, demográficos e culturais, levando, ainda, ao êxodo das zonas rurais e ao seu abandono.

Em Portugal este cenário não foi exceção, as cidades cresceram, e deu-se a desertificação das zonas rurais. Neste contexto de abandono e degradação os edifícios também foram afetados, pelo que necessitam ser reabilitados. No entanto, é necessário entender que os elementos caracterizadores do mundo rural se alteraram. Nos dias de hoje a sua atividade deixou de ser essencialmente agrícola e com os tempos outras potencialidades têm sido desenvolvidas, verificando-se que o potencial, do turismo e da função residencial pode ser economicamente valorizado.

Aliado a estes fatores, é reconhecido que o modelo de desenvolvimento, o construir de novo, é pouco sustentável, esquecendo-se o património existente. É preciso uma nova cultura na abordagem deste problema, que tem causas e consequências de natureza ambiental, económica e social.

É possível reabilitar as construções mais antigas, de forma a introduzir-lhes as alterações que respondam às exigências atuais dos utilizadores. As necessidades e exigências regulamentares atuais são muito

diferentes, sendo necessário encontrar equilíbrios e soluções de compromisso que permitam olhar para o edificado como uma oportunidade para se valorizar esse património, com custos menores do que construir de novo, mas de forma a poder concorrer com a oferta da nova edificação [4].

Os Censos 2011 [5] permitem fazer uma previsão, aproximada, do número de edifícios, que o presente estudo engloba, e o seu estado de conservação. Realçando que os edifícios em estudo possuem um peso significativo no edificado português, o que obriga a que se reflita sobre o seu papel e a sua importância económica, cultural e social, estudando a melhor forma de os reabilitar.

O Quadro 2.03 dos Censos 2011 [5] apresenta o número de edifícios, segundo a época de construção, por principais materiais utilizados na sua construção. Na Figura 1 mostram-se os resultados para Portugal continental e na Figura 2 para a zona Norte de Portugal Continental.

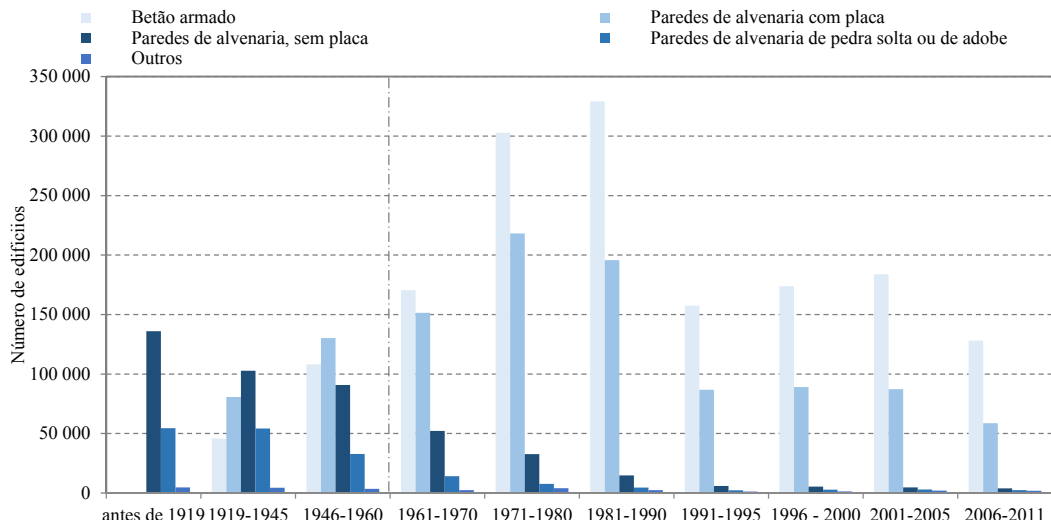


Fig.1 – Número de edifícios segundo a época de construção em Portugal Continental [5].

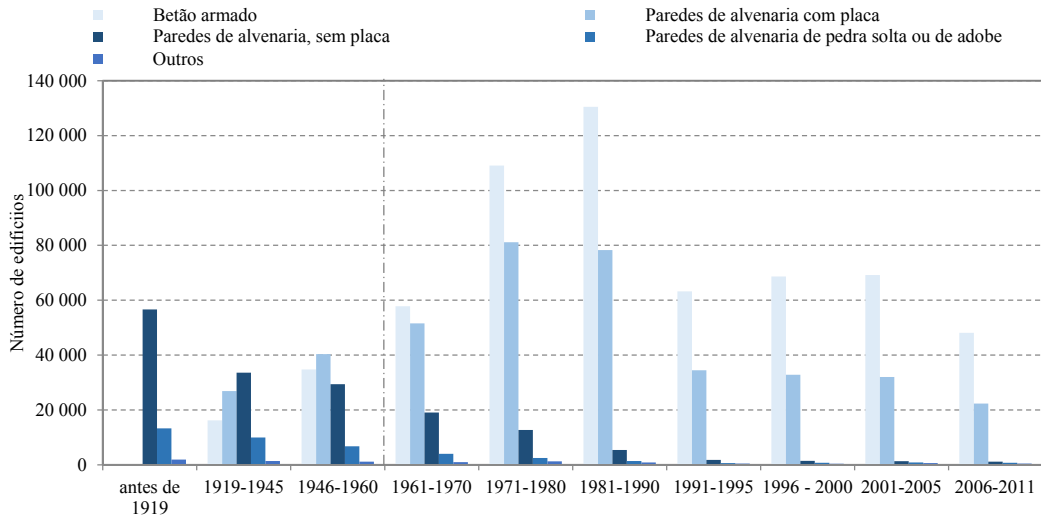


Fig.2 – Número de edifícios segundo a época de construção na zona Norte de Portugal Continental [5].

Analisando os dados dos gráficos para os períodos temporais antes de 1919, 1919 – 1945 e 1946 – 1960, pois o edificado em estudo e seus métodos construtivos são típicos destas épocas, e contabilizando os edifícios de paredes de alvenaria sem placa e paredes de alvenaria de pedra solta ou adobe, verifica-se que para Portugal Continental contabilizaram-se cerca de 470 mil edifícios. Na zona Norte o número contabilizado é de cerca de 150 mil edifícios.

O Quadro 2.06 dos Censos 2011 [5], apresenta o número de edifícios, segundo a época de construção, por estado de conservação. Na Figura 3 apresentam-se os resultados para Portugal Continental e na Figura 4 para a zona Norte de Portugal Continental.

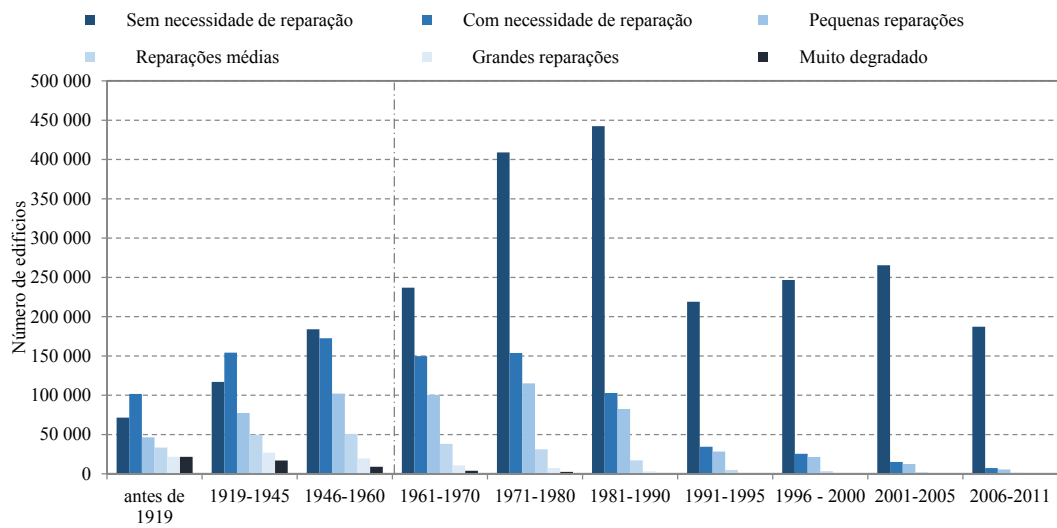


Fig.3 – Número de edifícios segundo a época de construção por estado de conservação em Portugal Continental [5].

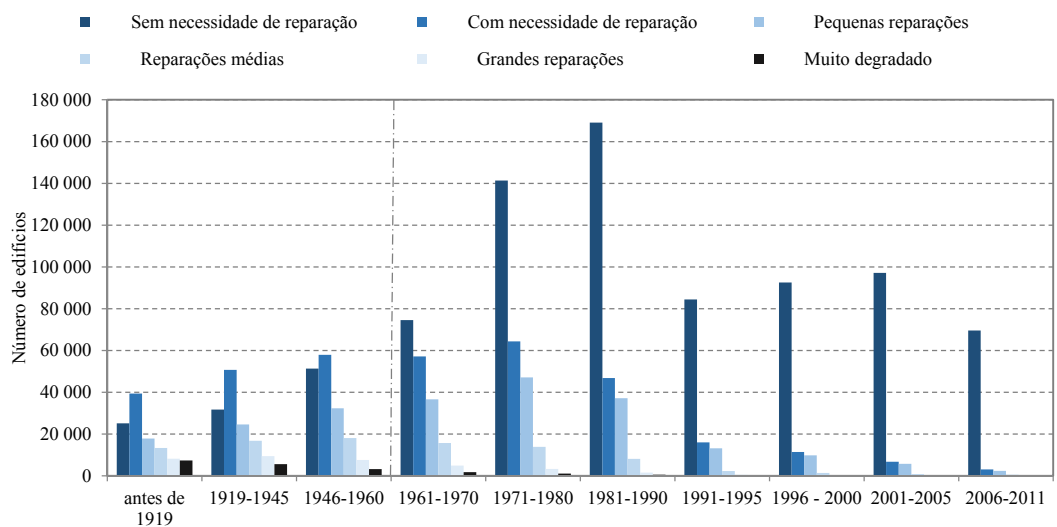


Fig.4 – Número de edifícios segundo a época de construção por estado de conservação na zona Norte de Portugal Continental [5].

Analisando os períodos, antes de 1919, 1919 – 1945 e 1946 – 1960, verifica-se que para os edifícios construídos nestas três épocas, em Portugal continental, aproximadamente: 430 mil possuem necessidades de reparação; 225 mil edifícios necessitam de pequenas reparações; 135 mil de reparações médias e 70 mil de grandes reparações. Destaca-se ainda que cerca de 48 mil edifícios encontram-se muito degradados.

Relativamente à região Norte, para os mesmos períodos de tempo, para os edifícios construídos nestas três épocas, aproximadamente: 150 mil possuem necessidades de reparação; 75 mil necessitam de pequenas reparações; 50 mil de reparações médias e 25 mil de grandes reparações. Por fim realça-se, que cerca de 16 mil edifícios encontram-se muito degradados.

Outro dado demonstrativo, da importância do presente estudo, é relativo à forma como as famílias ocupam os alojamentos. Nas Figuras 5 e 6 apresentam-se os resultados para Portugal Continental e Norte do país, respetivamente.

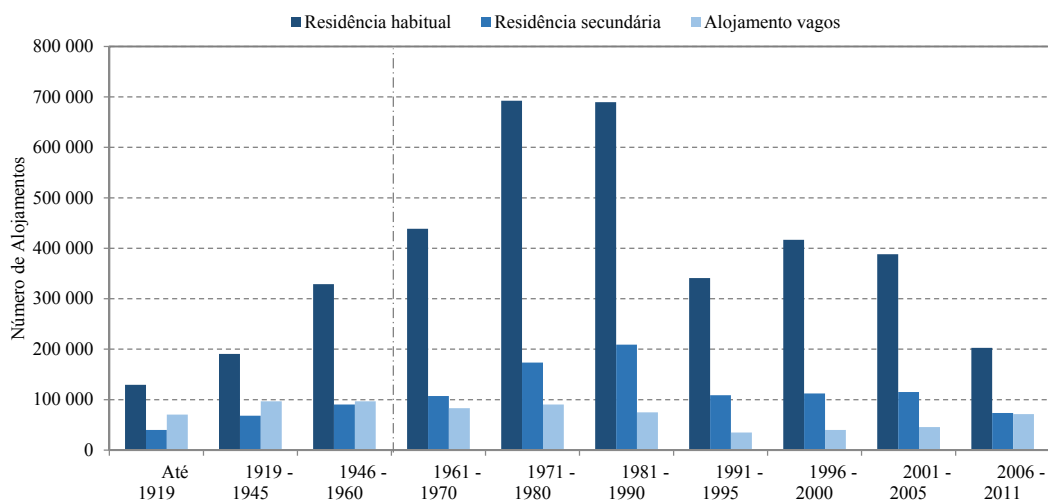


Fig.5 – Número de alojamentos segundo o tipo de ocupação por época de construção para Portugal Continental [5].

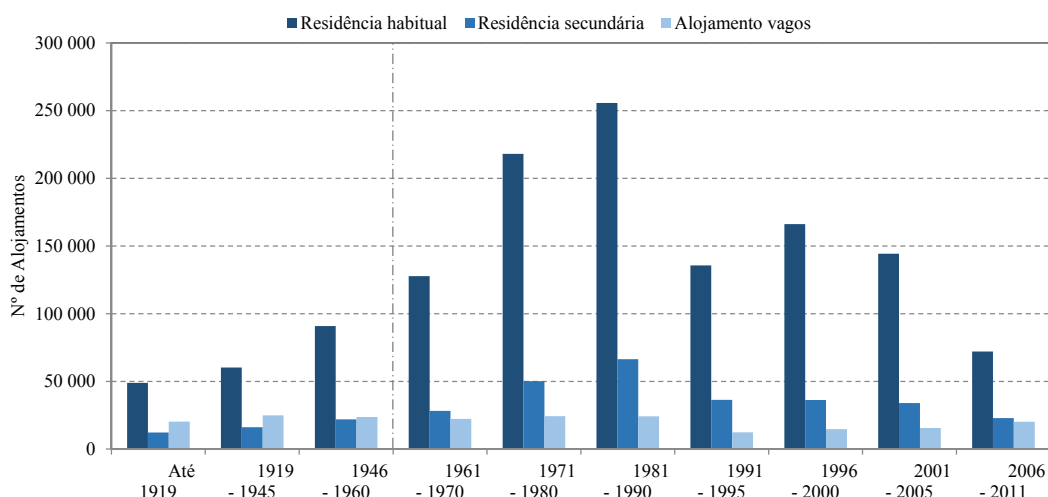


Fig.6 – Número de alojamentos segundo o tipo de ocupação por época de construção para o Norte de Portugal Continental [5].

Em Portugal Continental, para o período em análise, aproximadamente: 650 mil alojamentos são de residência habitual; 200 mil são de residência secundária e 265 mil encontram-se vagos.

Na zona Norte, aproximadamente: 200 mil são de residência habitual; 50 mil são de residência secundária e 70 mil encontram-se vagos.

Em suma, é difícil quantificar o número exato de edifícios que este estudo engloba, no entanto, pelos dados recolhidos é possível afirmar que, em Portugal Continental, existem cerca de 470 mil edifícios com estas características construtivas. Na zona Norte existem cerca de 150 mil edifícios. Quantificar, o número de edifícios rurais que necessitam de obras de reabilitação é impossível, pois os dados (Censos) não o especificam, no entanto, sabe-se que são centenas de milhares a necessitar de obras de reabilitação.

Para além destes dados, salienta-se a existência de milhares destes edifícios vagos, que poderão ser um meio de crescimento das zonas rurais fixando a população, que por razões económicas e sociais, poderá ter que deixar as cidades, ou então proporcionando novas oportunidades de criação de valor e de negócio, como é o caso do turismo rural.

Fica patente que este estudo abrange centenas de milhares de edifícios que fazem parte da história das regiões onde estão implantados, e que a sua reabilitação deve ser encarada como um fator de progresso e criação de valor das mesmas, bem como de uma parte do sector da construção, sendo uma mais-valia para as populações e regiões rurais. E que a sua degradação extrema, levando ao seu desaparecimento, é um caminho que em nada beneficiará as regiões rurais e, conseqüentemente, o País.

2.1.2. REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS EXISTENTES EM PORTUGAL

Os últimos dados oficiais, relativos à construção, fornecidos pelo Instituto Nacional de Estatística [6] datam de 2012 e demonstram que a reabilitação é um caminho esquecido pelo sector. De acordo com o publicado concluíram-se, em 2012, 25931 edifícios em Portugal, sendo que destes, 6950 corresponderam a obras de reabilitação do edificado, o que significa que 26,8% das obras concluídas dizem respeito à reabilitação, verificando-se um ligeiro aumento relativamente ao ano de 2011. Realça-se que as obras de reabilitação possuem maior peso em setores de serviços e comércio do que na habitação. É nas obras destinadas ao comércio que a reabilitação tem um maior peso no ano de 2012, sendo de 48,7%. A indústria, é igualmente um setor que apresenta um peso considerável na reabilitação sendo de 38,9%.

Na Figura 7 apresenta-se a evolução do panorama da construção em Portugal, para o setor dos edifícios, observando-se a evolução das obras de reabilitação do edificado e construções novas desde o ano 1995 até ao ano de 2012.

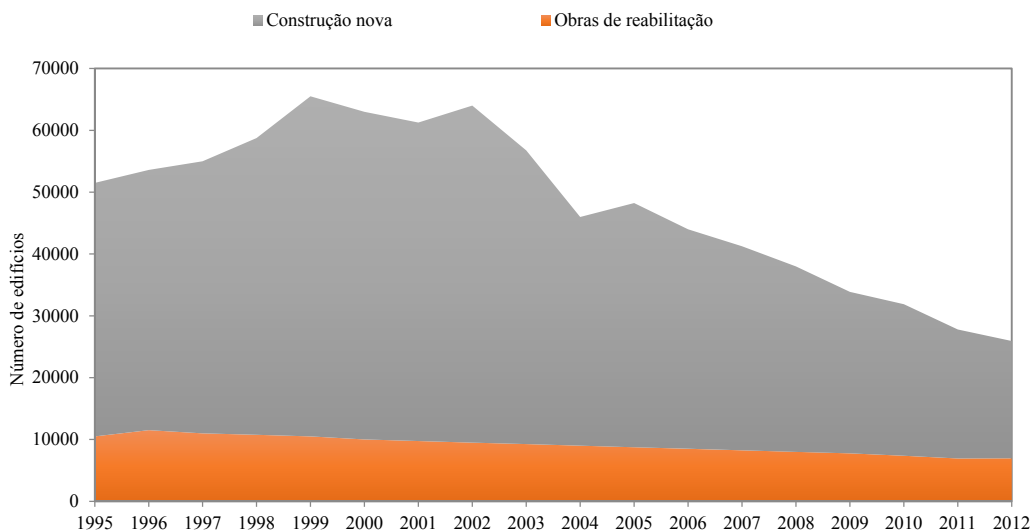


Fig.7 – Evolução de obras de reabilitação e construção nova em Portugal no período de 1995 a 2012 [6].

Analisando a variação dos dados relativos às obras de reabilitação, encontramos um cenário de estabilidade até 2000, sendo perceptível o início de um período de quebra, a partir de 2002, que se prolonga até 2010. No ano de 2011 há um aumento das obras de reabilitação. Em 2012 a tendência mantém-se, no entanto, apesar das obras de reabilitação continuarem a crescer, este crescimento é quase nulo.

Tendo em conta a evolução das obras de reabilitação do edificado conclui-se que o esforço do investimento em obras do setor habitacional tem sido, predominantemente, orientado para a construção nova em detrimento das obras de reabilitação, apesar da necessidade de reparações de diferente grau dos edifícios, na generalidade do país.

Decorrente dos Censos de 2001 referentes à habitação, esperava-se um aumento sustentado da importância das obras de reabilitação, com um crescimento significativo deste segmento da construção. Os dados registados apontavam uma idade média dos edifícios a nível nacional próxima dos 34 anos, sendo que 19% foram construídos entre 1991 e 2001. As necessidades de reparação atingiam cerca de 38,1% dos edifícios e 2,9% apresentavam um estado de degradação elevado. O número estimado dos fogos a exigir médias, grandes ou muito grandes reparações, rondava os 800 000 fogos [7].

Apesar das necessidades de reabilitação do edificado existente a construção em Portugal tem sido orientada para a construção de edifícios novos. Comparando o número de edifícios para habitação familiar em que se realizaram obras de reabilitação, com o número de edifícios resultantes de construção nova, para habitação familiar, conclui-se que, a proporção entre ambos apresenta um valor médio de 21,8% no período compreendido entre 2001 e 2012, registando-se, contudo, um aumento progressivo desta proporção nos últimos anos, tendo atingido o seu valor máximo em 2012, cerca de 32%.

Os Quadros 1 e 2 apresentam os valores relativos à construção de edifícios novos e reabilitados para habitação familiar, por tipo de obra, no período entre 2001 e 2012, numa perspetiva global e por região, onde se refletem as ideias mencionadas anteriormente.

Quadro 1 – Edifícios para habitação familiar, por tipo de obra, no período entre 2001 e 2012 [6].

	2001		2002		2003		2004		2005		2006	
	Const. Nova	Reab. do edificado	Const. Nova	Reab. do edificado	Const. Nova	Reab. do edificado	Const. Nova	Reab. do edificado	Const. Nova	Reab. do edificado	Const. Nova	Reab. do edificado
Portugal	43276	8082	46579	7852	40710	7549	32712	6651	34011	6715	30122	6511
Norte	17008	2844	17678	2788	15456	2600	11730	2212	11720	2059	10028	1960
Centro	12394	2811	13725	2746	12058	2466	9742	2041	9793	2040	8528	1930
Lisboa	5286	242	5998	285	4700	393	4167	486	4341	697	4392	846
Alentejo	3703	1119	3834	988	3492	959	2934	906	3081	893	2815	776
Algarve	2830	406	3024	476	2707	507	2236	460	2880	463	2332	471
Açores	848	381	1073	291	1128	329	910	304	1096	312	1045	283
Madeira	1207	279	1247	278	1169	295	993	242	1100	251	982	245

Continua na página seguinte.

Quadro 1 (continuação) – Edifícios para habitação familiar, por tipo de obra, no período entre 2001 e 2012 [6].

	2007		2008		2009		2010		2011*		2012*	
	Const.	Reab. do	Const	Reab. do	Const	Reab. do	Const	Reab. do	Const	Reab. do	Const.	Reab. do
	Nova	edificado	Nova	edificado	Nova	edificado	Nova	edificado	Nova	edificado	Nova	edificado
Portugal	28728	6259	26099	5589	22031	5292	20082	5167	19499	4722	14713	4660
Norte	9706	1878	9125	1710	7852	1743	7816	1860	6498	1647	6144	1746
Centro	8184	1756	7409	1640	6197	1536	5898	1499	6584	1376	4461	1396
Lisboa	4376	1002	3817	808	3200	757	2512	627	2242	573	1647	532
Alentejo	2681	718	2258	696	1945	555	1605	542	2019	523	1144	423
Algarve	2017	465	1801	374	1572	354	1217	332	1009	308	669	311
Açores	873	254	950	205	612	191	440	153	625	149	314	116
Madeira	891	186	739	156	653	156	594	154	522	146	334	136

*Informação com base nas estimativas das obras concluídas.

Quadro 2 – Proporção da reabilitação do edificado relativamente às construções novas de edifícios concluídos para habitação familiar, no período entre 2001 e 2012 [6].

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Portugal	18,7	16,9	18,5	20,3	19,7	21,6	21,8	21,4	24,0	25,7	24,0	32,0
Norte	16,7	15,8	16,8	18,9	17,6	19,5	19,3	18,7	22,2	23,8	25,0	28,0
Centro	22,7	20,0	20,5	21,0	20,8	22,6	21,5	22,1	24,8	25,4	21,0	31,0
Lisboa	4,6	4,8	8,4	11,7	16,1	19,3	22,9	21,2	23,7	25,0	26,0	32,0
Alentejo	30,2	25,8	27,5	30,9	29,0	27,6	26,8	30,8	28,5	33,8	26,0	37,0
Algarve	14,3	15,7	18,7	20,6	16,1	20,2	23,1	20,8	22,5	27,3	31,0	46,0
Açores	44,9	27,1	29,2	33,4	28,5	27,1	29,1	21,6	31,2	34,8	24,0	37,0
Madeira	23,1	22,3	25,2	24,4	22,8	24,9	20,9	21,1	23,9	25,9	28,0	41,0

Dos dados avaliados é patente que a reabilitação não tem crescido significativamente. Isto apesar, do envelhecimento decorrente do uso, da falta de manutenção e conservação e da desadequação dos edifícios às necessidades contemporâneas. Estes fatores aliados a políticas desajustadas, como a inexistência de uma lei de rendas adequada no passado e o aumento do poder de compra sustentado por créditos bancários que possibilitam a compra de casa nova, conduzem a uma degradação progressiva dos edifícios, espaços exteriores e centros urbanos, pois a habitação nova é opção preferida em detrimento de edifícios a reabilitar.

Compreende-se, assim, que a reabilitação deva ocupar a centralidade no âmbito da política das cidades, vilas e aldeias, mobilizando instrumentos que a complementem e a reforcem. A reabilitação é importante e uma necessidade na sociedade atual. A provar esta importância, em Maio de 2009, os vinte e oito países da União Europeia assinaram a Declaração de Viena, que defende o investimento do estado no setor do património, proporcionando postos de trabalho, relançando a economia permitindo a criação de

valor, em maior escala que da construção de novos edifícios. Para além deste aspeto, sabe-se que o património encontra-se no seio das comunidades, estimulando a coesão social, bem como o sentido de identidade e de pertença a um lugar [7].

O incentivo à reabilitação repercute-se em três áreas fundamentais:

- Económica: a reabilitação/restauro/conservação requerem uma grande quantidade de mão-de-obra e conduzem à criação de postos de trabalho, particularmente nas pequenas e médias empresas. Os subsídios ao setor público e incentivos fiscais na área do património atraem o investimento do setor privado a um rácio que poderá atingir 1:7. O investimento em património produz um impacto direto no crescimento do turismo cultural que, por sua vez, conduz a benefícios económicos e sociais a longo prazo [7];
- Ambiental: é ponto assente que os materiais, bem como as técnicas de construção rurais são amigos do ambiente. A recuperação de edifícios históricos não só preserva a energia incorporada e os recursos materiais utilizados no passado, como minimiza a produção de materiais novos, mais caros e potencialmente mais prejudiciais do ponto de vista ecológico [7];
- Sociocultural: a tomada de consciência e interesse pelo património continuam a aumentar, indiferentes à incerteza económica, as pessoas preocupam-se com o património. A história e o património estão intimamente associados ao sentido de identidade local, nacional e mundial. A partilha do património é uma componente chave da coesão social e do sentido de comunidade e de integração. Os lugares históricos constituem um facto importante em termos de qualidade de vida, sendo o património uma das principais razões que levam à escolha do local de residência e de trabalho [7].

É, assim, importante que o setor da reabilitação progrida, por um lado na reutilização dos centros degradados das cidades, vilas e aldeias, em termos económicos, ambientais e socioculturais, e que seja, também, um fator de repovoamento de zonas rurais anexas às grandes cidades e do interior do país.

Os edifícios rurais constituem um importante legado arquitetónico, cultural e social, para além disso, podem possuir condições de habitabilidade devidamente adaptados de acordo com os padrões de exigência atuais, sendo importante estudá-los para compreender quais as estratégias e formas de os reabilitar.

2.1.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A energia é um bem importante para melhorar a qualidade de vida e combater a pobreza. O seu consumo, é um indicador, que define a qualidade de vida das populações e a qualidade do ambiente global das cidades. A energia está ligada a todos os fatores de desenvolvimento condicionando o bem-estar dos cidadãos, nomeadamente ao nível da saúde, educação, produtividade e oportunidades económicas [8].

Em Portugal, as importações energéticas, totalizaram 6,2 mil milhões de euros no ano de 2013, valor que representa cerca de 6,9% do PIB, produto interno bruto [9].

O problema energético do país reflete-se através da dependência da economia relativamente à energia fóssil, facto que não é positivo para o desenvolvimento do país, porque afeta a competitividade da economia, o endividamento externo, os investimentos públicos e privados e também as condições ambientais, através da emissão de gases com efeitos de estufa. Aspetos que não devem constituir uma obsessão e uma justificação fácil para forçar a aplicação de medidas e soluções incorretas. É necessário,

portanto, aprender a viver com a dependência energética exterior, minimizando os seus impactos e procurando reduzir os consumos pela via da sua inteligente utilização.

Esta problemática também se põe nos restantes países europeus, onde os edifícios são grandes consumidores de energia, o que obrigou a União Europeia, em 2002, a emitir a Diretiva Comunitária 2002/91/CE, atualizada em 2012, conhecida por EPBD, *Energy Performance of Buildings Directive* [10]. Os seus objetivos principais passam por:

- Enquadramento geral para uma metodologia de cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios;
- Aplicação dos requisitos mínimos para o desempenho energético dos novos edifícios;
- Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos edifícios existentes que sejam sujeitos a importantes obras de renovação;
- Certificação energética dos edifícios;
- Inspeção regular de caldeiras e instalações de ar condicionado nos edifícios e, complementarmente, avaliação da instalação de aquecimento quando as caldeiras tenham mais de 15 anos [10].

Em Portugal, no dia 20 de Agosto de 2013, foi publicado o decreto-lei nº 118/2013 [1], diploma que transpõe a diretiva comunitária [10] para a ordem jurídica portuguesa e revê a portuguesa consubstanciando-se em melhorias ao nível da sistematização e âmbito de aplicação ao incluir, num único diploma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) [1] e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) [11], atendendo, simultaneamente, aos interesses inerentes à aplicabilidade integral e utilidade deste quadro legislativo, e aos interesses de simplificação e clareza na produção legislativa de carácter predominantemente técnico [1].

O capítulo III deste decreto-lei é dedicado ao novo Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, REH [1], e, segundo o artigo 22º, tem como objetivo:

- *“Estabelecer os requisitos para os edifícios de habitação, novos ou sujeitos a intervenções, bem como os parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético, em condições nominais, de todos os edifícios de habitação e dos seus sistemas técnicos, no sentido de promover a melhoria do respetivo comportamento térmico, a eficiência dos seus sistemas técnicos e a minimização do risco de ocorrência de condensações superficiais nos elementos da envolvente”*.

Relativamente à reabilitação, o REH [1] exige que quando um imóvel careça de uma intervenção, na sua reabilitação, de valor superior a 25% do seu custo de referência, as suas exigências legais no âmbito construtivo, garantam pelo menos uma classe energética C.

Dividem-se, então, em dois grupos as exigências no âmbito da certificação energética da reabilitação de edifícios antigos:

- Aos imóveis que não necessitem de obras de reabilitação, renovação ou requalificação, ou cujo valor não ultrapasse 25% do custo de referência, exige-se um certificado energético, de carácter unicamente informativo, onde os valores máximos admissíveis pelo REH [1] podem ser ultrapassados;
- Os edifícios que necessitam de uma intervenção de valor superior a 25% do custo de referência, exige-se uma declaração de conformidade regulamentar vinculativa, onde os valores máximos impostos pelo REH [1] não podem ser ultrapassados.

Segundo a portaria nº 349 – B/2013 de 29 de Novembro, os valores máximos impostos, aquando de uma grande intervenção, variam consoante o ano de construção, como consta na tabela I.04 da referida portaria, e que se apresenta na Figura 8.

Ano de construção	N_{ic}/N_i	N_{vc}/N_v	N_{tc}/N_t
Anterior a 1960	Não aplicável	Não aplicável	1,50
Entre 1960 e 1990	1,25	1,25	1,50
Posterior a 1990	1,15	1,15	1,50

Fig.8 – Valores máximos impostos para as necessidades de aquecimento, arrefecimento e energia primária, de grandes intervenções segundo REH [1].

Atendendo a que os edifícios em estudo, são, na sua grande maioria anteriores a 1960, apenas teriam que verificar a imposição de $N_{ic}/N_i \leq 1,50$. Numa primeira análise parece existir, neste regulamento [1], maior permissibilidade para a questão das intervenções de reabilitação em comparação com o regulamento anterior, RCCTE [12], porém, na mesma portaria, o ponto 2.2, dedicado à envolvente opaca, a tabela I.05, apresenta os coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis de elementos opacos (ver Figura 9).

$U_{m\acute{a}x}$ [W/(m ² .°C)]		Zona Climática		
		I1	I2	I3
Elemento da envolvente em contacto com o exterior ou espaços não úteis com $b_{tr} > 0.7$	Elementos verticais	1,75	1,60	1,45
	Elementos horizontais	1,25	1,00	0,90
Elemento da envolvente em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos verticais	2,00	2,00	1,90
	Elementos horizontais	1,65	1,30	1,20

Fig.9 – Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis de elementos opacos [1].

Assim sendo, a maior flexibilidade apresentada no REH [1] relativamente ao RCCTE [12], no que respeita à reabilitação, não é suficiente.

Estas exigências poderão originar intervenções profundas nos elementos construtivos dos edifícios, interferindo com a sua génese, modificando elementos característicos que os diferencia e que outrora proporcionavam condições de habitabilidade e salubridade aos utentes dos edifícios.

O REH [1] prevê uma exceção na legislação referente a edifícios localizados em zonas históricas ou em edifícios classificados. A maioria dos edifícios em estudo localizam-se em zona rural, estando fora das zonas em regime de exceção. E tal como os edifícios que se encontram em regime de exceção, é também importante preservar as suas características.

As soluções de melhoria dos elementos construtivos consistem, essencialmente, na aplicação de isolamento térmico em paredes, pavimentos e coberturas em contacto com o exterior ou com espaços não úteis e renovação dos vãos envidraçados e suas proteções.

No âmbito dos sistemas, as intervenções baseiam-se na otimização dos sistemas de preparação de águas quentes sanitárias e na integração de energias renováveis.

A aplicação destas metodologias, nomeadamente as de carácter construtivo, criam situações que devem ser alvo de reflexão, sobretudo, o uso de materiais correntes, como o isolamento térmico pelo interior. Estes possuem um coeficiente de transmissão térmica baixo, mas com impacto negativo pela sua reduzida massa específica, refletindo-se diretamente na inércia térmica dos edifícios. A inércia térmica

é uma propriedade essencial no conforto térmico do ambiente interior destes edifícios, por possibilitar a preservação de uma temperatura constante, evitando grandes amplitudes térmicas.

Perante este cenário, o uso de sistemas construtivos com aplicação do isolamento térmico pelo exterior, torna-se uma solução atrativa e vantajosa, mas que compromete e anula o valor cultural destes edifícios, expressão da cultura e valores da região onde estão inseridos.

No que respeita aos sistemas de aquecimento, arrefecimento e preparação de águas quentes sanitárias, as restrições e aspetos de compatibilidade são diminutas, sendo, sobretudo, ao nível arquitetónico, devendo-se escolher aplicações que evitem ao máximo a descaracterização do edifício.

Fica assim evidente a importância de estudar, na ótica do desempenho térmico, os edifícios rurais, no sentido de se demonstrar que são funcionais perante as exigências atuais, protegendo a sua origem construtiva e autenticidade arquitetónica.

Deve ainda referir-se a publicação do Regime Excepcional para a Reabilitação Urbana, RERU, em Abril de 2014, que aparentemente flexibiliza, no domínio térmico a reabilitação de edifícios, mas que não será abordado nesta tese.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS RURAIS PORTUGUESES

A casa popular portuguesa é um dos mais significativos e relevantes aspetos da humanização da paisagem, evidenciando diversos condicionalismos fundamentais (geográficos, económicos, sociais, históricos e culturais) das respetivas áreas e das pessoas que a constroem e habitam. Construtivamente, as características mais marcantes são: a utilização de materiais locais (onde há pedra constrói-se em pedra e onde não há constrói-se em terra, madeira ou outros materiais correntes) e a adaptação das soluções construtivas ao clima [13].

Segundo Ernesto Veiga de Oliveira *et al.* [13] a casa popular divide-se em:

- Casas térreas e casas de andar (sobrado) ou casas torres;
- Casas-blocos e casas de pátio (aberto ou fechado);
- Casas de pedra (granito, xisto ou calcário);
- Casas de outros materiais (taipa, adobe, tijolo, madeira, etc.).

Na casa sobrada, em zona rural, o piso térreo era destinado ao gado e arrumações, o andar destinava-se à habitação das pessoas. Este tipo de casa era característica do Entre Douro-e-Minho, Trás-os-Montes, Beira Transmontana, Beira Alta e Beira Baixa, região de Coimbra e terras saloias dos arredores de Lisboa.

A casa bloco típica, englobava as características gerais das casas sobradas ou de andar. Para além destas características possuía um certo número de dependências ou anexos específicos e independentes, de dimensões mais ou menos reduzidas, para gados e arrumações, cortes ou estábulos, palheiros, sequeiros ou espigueiros, eiras cobertas e lojas, que se distribuíam à volta de um amplo espaço aberto, terreiro ou quinteiro, e que integravam o complexo da lavoura [13].

Este tipo de casas rurais pertenciam às regiões onde a pedra ficava à vista, pedras de granito ou xisto, por vezes até combinado, ou calcário, conforme a região. Granito ou xisto refere-se à zona Norte, calcário nos distritos de Coimbra e Lisboa.

A casa térrea era construída com taipa, adobe e tijolo, o que não permitia construir em altura, mas que permitia uma arquitetura ágil. Em determinadas regiões constituía a forma habitacional normal e característica, que definia o estilo arquitetónico dessa área e exprimia verdadeiramente a vida doméstica e económico-profissional da população da região [13]. Era, de um modo geral, pequena e singela. Sendo, fundamentalmente, a casa do Sul, da Estremadura, Ribatejo, Alentejo e Algarve. Era também a casa do litoral central de Portugal, das zonas ribeirinhas de certas partes das regiões de Aveiro, Pombal e Leiria – a casa das terras gandaresas – compreendidas entre o rio Vouga e o rio Mondego, e das regiões da Apúlia e Fão, no Minho Litoral [13].

Nos subcapítulos seguintes analisa-se mais pormenorizadamente os estilos de casa e suas características.

2.2.1. CASA DE ANDAR (SOBRADO)

2.2.1.1. Região Minhota

A região Minhota está implantada num clima temperado, fresco e muito pluvioso. É uma região predominantemente granítica. No Quadro 3 apresenta-se uma descrição dos elementos construtivos característicos das casas tradicionais do Minho.

Quadro 3 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do Minho.

Elemento	Descrição
Pavimento	O pavimento no piso de rés-do-chão era constituído por grandes lajes de pedra ou em terra batida, posteriormente, o pavimento em terra batida foi substituído por materiais cerâmicos. No piso de andar o pavimento era em soalho de madeira.
Paredes exteriores	As paredes exteriores, em várias regiões do Minho, eram duplas, construía-se um aparelho exterior e outro interior, independentes, ligados pontualmente por peças que iam de face a face, com o nome de “juntouros”, deixando entre si um vazio ou espaço preenchido com material diverso. Noutras zonas, as paredes eram constituídas por grandes blocos quadrangulares de perpianho, dispostos em fiadas horizontais, todos da mesma altura em cada fiada e apenas com as juntas caiadas ou pintadas.
Cobertura	A cobertura deste tipo de casas, Normalmente, era de quatro águas, sendo também usual de duas e três águas. O sistema de cobertura mais antigo era o de colmo ou de outros materiais vegetais assentes num travejamento de madeira, sendo este sistema típico das zonas serranas. Nas terras baixas, predominavam os telhados de telha canudo que foram progressivamente substituídos pela telha marselha. Interiormente as coberturas eram forradas nos quartos e sala através de painéis de madeira e estuque. Na cozinha a cobertura era construída em telha vã, desta forma o fumo das lareiras era evacuado facilmente do interior das casas.
Portas e janelas	As portas e janelas eram construídas em madeira. Executadas de forma manual e artesanal não conferindo uma impermeabilidade ao ar perfeita. As janelas possuíam portadas interiores de madeira garantindo assim uma proteção eficaz face à radiação solar.
Outros elementos	Originalmente a chaminé não era um elemento usual, sendo o fumo das lareiras extraído através da telha vã e fendas naturais ou feitas intencionalmente na cobertura (telhas levantadas). A varanda era um elemento de destaque nestas casas, grande, aberta, longa e corrida, de pedra ou madeira, situava-se ao longo de uma das fachadas mais compridas, recoberta pela aba da cobertura das casas, que desse lado descia muito abaixo pousando em pilares de madeira ou em colunas de pedra. Por vezes a varanda era fechada com uma fachada de perpianho ou em tabique. Em alguns casos não existia varanda, mas sim um patim alpendrado no cimo da escada exterior.
Interior	Interiormente a casa do Noroeste era de uma simplicidade de estilo correspondente ao exterior. A sala era uma dependência de natureza fundamentalmente cerimonial. A cozinha era o compartimento essencial da casa, o local onde decorre toda a vida de relação familiar. Situando-se ou no rés-do-chão ou no andar.

Nas Figura 10 e 11 apresentam-se exemplos das casas típicas da região analisada, sendo os exemplos da Figura 11 relativos à zona serrana.



Fig.10 – Casas tradicionais do Minho [14].



Fig.11 – Casas típicas da zona serrana do Noroeste Português [15].

Na Figura 12 apresenta-se um esboço da casa minhota assinalando-se alguns aspetos característicos referidos anteriormente.



Fig.12 – Esquema da casa tradicional do Minho [16].

2.2.1.2. Região Transmontana

A casa popular transmontana, embora incluída na categoria geral da casa nortenha, de pedra, de rés-do-chão e de andar funcionalmente distintos e com varanda e escada exterior, apresentava aspetos muito diversos da casa da região Minhota. No Quadro 4 apresentam-se os elementos construtivos característicos e que diferenciam as casas transmontanas das restantes.

Quadro 4 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais de Trás-os-Montes.

Elemento	Descrição
Pavimento	O pavimento no piso de rés-do-chão era construído de forma idêntica ao das casas da região Minhota, sendo que neste caso o granito era substituído por xisto. No piso de andar o pavimento era construído em soalho de madeira.
Paredes exteriores	As paredes exteriores eram construídas em pedra de xisto e granito dispostas umas em cima das outras de uma forma não muito ordenada. Por vezes as paredes apenas eram constituídas por este aparelho de pedras podendo ser rebocadas, outras vezes, eram compostas pelas pedras de xisto argamassadas com barro, podendo ter reboco ou não.
Cobertura	As coberturas predominantes eram de duas águas, sendo também frequentes as de quatro águas. Tal como no Minho o sistema mais antigo é o de colmo, os restantes sistemas são em telha cerâmica e em placas de xisto. Pelo interior as casas mais antigas não possuíam qualquer espécie de forro, sendo em telha vã. Nas casas mais recentes a cobertura era forrada nos quartos e sala através de madeira e estuque. A cobertura da cozinha era sempre construída em telha vã.
Portas e janelas	As portas e janelas eram construídas em madeira seguindo a descrição da região Minhota.
Outros elementos	A varanda era o elemento que vincava a originalidade destas casas. Neste caso, a varanda não tinha um lugar definido. Nas casas com currais laterais, a varanda situava-se na fachada que dava para esse lado. Se os currais ou pátio se situassem no meio da casa, a varanda corria ao longo das três ou quatro fachadas circundando a casa ao nível do andar. Nas casas contíguas umas às outras, as varandas geralmente encontravam-se na fachada principal. A varanda era sempre coberta pela cobertura ou por um seu prolongamento. Pela sua função e forma geral, a varanda transmontana aproximava-se da varanda minhota. Servindo de refúgio no Verão, de repouso noturno, e de agasalho no Inverno. Porém, a varanda minhota era longa e assentava normalmente em grandes pilares e padieiras de granito, a transmontana era toda construída em madeira. A chaminé, tal como na região do Minho, não era usual, sendo o fumo escoado pelas aberturas na cobertura e pelas janelas e portas. Nas casas mais recentes a chaminé era um elemento usual.
Interior	Interiormente, a casa transmontana não apresentava quaisquer particularidades distintas. Tal como a região Minhota, a cozinha era a divisão principal.

Na Figura 13 apresentam-se fotografias da casa tradicional transmontana.



Fig.13 – Casas tradicionais transmontanas [17 e 18].

Na Figura 14 apresenta-se o esquema das casas tradicionais transmontanas evidenciando as características referidas anteriormente.



Fig.14 – Esquema da casa tradicional transmontana [16].

2.2.1.3. Região da Beira Interior

A casa popular típica da região da Beira Interior rural, tinha aspetos gerais iguais aos da casa nortenha. Era uma construção de piso térreo e andar sobrado, de planta retangular, de pedra geralmente à vista e sem reboco, em blocos rudes. No Quadro 5 apresentam-se as características construtivas, dos principais elementos, das casas da região da Beira Interior.

Quadro 5 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais da Beira Interior.

Elemento	Descrição
Pavimento	<p>O pavimento, tal como nas casas anteriormente caracterizadas, podia ser constituído, no piso de rés-do-chão, por lajes de pedra ou terra batida que foi sendo substituído por materiais como argamassa ou elementos cerâmicos.</p> <p>No piso de andar o pavimento era construído em soalho de madeira.</p>
Paredes exteriores	<p>As paredes exteriores eram construídas em pedra de xisto, dispostas de forma idêntica às da zona transmontana, ou em granito, executadas como na zona minhota, dependendo do tipo de pedra predominante nas zonas em que as casas se inseriam. Nas casas de três pisos ou mais, o sistema construtivo era diferente das referidas anteriormente. Neste tipo de casas apenas as paredes do piso de rés-do-chão eram construídas em pedra, sendo as restantes em tabique ou taipa.</p>
Cobertura	<p>As coberturas de duas águas predominavam, embora também eram habituais as de quatro águas. As coberturas em telha cerâmica eram as mais usuais, porém nas zonas de xisto também era habitual as coberturas serem revestidas por este material. As telhas e pedras de xisto assentavam num ripado de madeira.</p>
Portas e janelas	<p>As portas e janelas seguiam o modelo das regiões descritas anteriormente. Porém, era usual executar-se uma moldura caiada em torno delas, aspeto que não se verificava nas zonas do Minho e Trás-os-Montes.</p>
Outros elementos	<p>Na região da Beira Interior, a varanda já não é um elemento diferenciador como na região do Minho e Trás-os-Montes. Muitas casas não possuíam varanda, sendo este elemento usual na zona da Serra da Estrela. Era construída em madeira e corrida ao longo da fachada.</p> <p>As escadas exteriores deixavam de estar presentes na maioria das casas desta região, aproveitando-se o desnível do terreno para o acesso dos vários pisos. Quando se construía a escada exterior, era executada na frontaria da casa.</p> <p>A chaminé, tal como nas regiões anteriores, só nas casas mais recentes é que era construída.</p>
Interior	<p>O interior das casas, que se assemelhava com as casas da zona minhota e transmontana, não apresentava grandes diferenças destas.</p> <p>Nas casas a Sul da Serra da Gardunha, o interior era organizado de forma diferente, destacando-se o uso do rés-do-chão, que nesta zona deixa de ser para o abrigo dos animais, sendo também para uso habitacional.</p> <p>Nas habitações com três pisos ou mais, o piso de rés-do-chão era utilizado para os animais, o intermédio ou intermédios para habitação, sendo o último piso para armazenar os produtos agrícolas.</p>

Na Figura 15 apresentam-se alguns exemplos da casa beirã em que é possível descortinar alguns aspetos referidos no Quadro 5.



Fig.15 – Casas típicas da Beira Interior [19 e 20].

Na Figura 16 apresenta-se um esquema da casa tradicional da Beira Interior evidenciando as suas características.



Fig.16 – Esquema da casa tradicional da Beira Interior [16].

2.2.2. CASA TÉRREA

2.2.2.1. Região do Alentejo

A casa tradicional alentejana era, em geral, térrea e correspondia nas suas linhas essenciais à construção do Sul. No Quadro 6 apresentam-se os elementos construtivos característicos da casa tradicional do Alentejo.

Quadro 6 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do Alentejo.

Elemento	Descrição
Pavimento	O pavimento da casa alentejana, em tempos mais antigos, era executado em terra batida. Este tipo de pavimento foi progressivamente substituído por pedra calcetada miúda, tijolo ou ladrilho cerâmico.
Paredes exteriores	As paredes exteriores eram construídas por materiais de grande plasticidade, designadamente por tijolos e taipa. As paredes caiavam-se pelo interior e exterior.
Cobertura	As coberturas predominantes eram de duas águas, possuindo pouca inclinação. Pelo exterior revestiam-se por telha cerâmica. Pelo interior eram forradas por canas.
Portas e janelas	As portas e janelas eram construídas em madeira. As janelas eram de pequena dimensão e em pequeno número. Por vezes não existia mais nenhuma abertura na fachada principal para além da porta de entrada. Era também usual, em vez de possuírem janelas, possuírem alguns postigos espalhados pelas fachadas.
Outros elementos	A chaminé era o elemento característico fundamental das casas alentejanas. De elevadas dimensões, situava-se na fachada frontal ficando paralela ao cume da cobertura. As suas elevadas dimensões, faziam com que se criassem diferenças de pressão, no interior da casa, incrementando um movimento de ar, que nos dias quentes ajudava a manter uma temperatura do ar interior agradável aos seus utentes.
Interior	No Baixo Alentejo, por vezes, possuíam uma planta em que as divisões se sucediam umas às outras. Outras vezes existia, a meio da largura do edifício, uma parede que sobe até à cobertura, fazendo o cume, os compartimentos ficavam atrás e à frente dessa parede.

Na Figura 17 e no esquema da Figura 18 pode constatar-se os pormenores referidos anteriormente.



Fig.17 – Casas tradicionais do Alentejo [21].

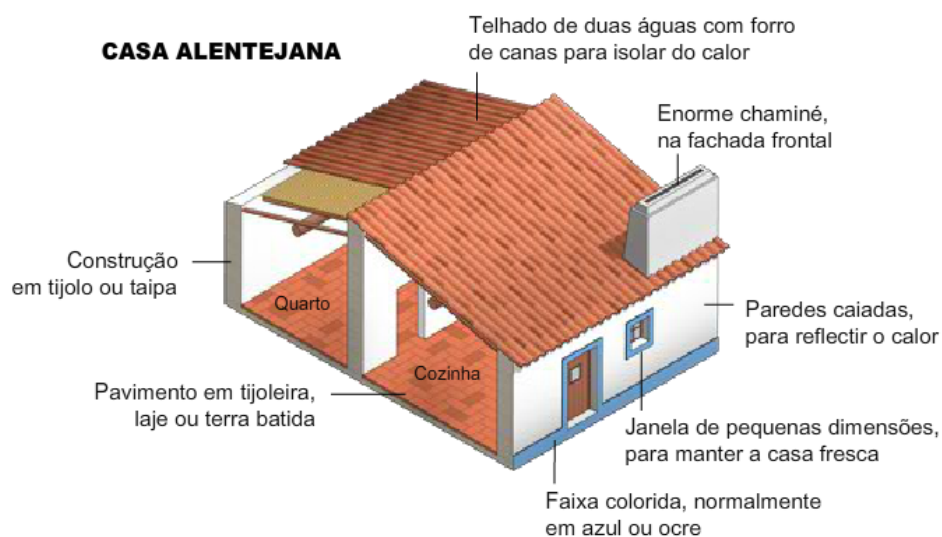


Fig.18 – Esquema da casa tradicional do Alentejo [16].

2.2.2.2. Região do Algarve

A planície alentejana termina com a serra algarvia. Com esta fronteira natural as habitações ganham novos contornos. Apesar do litoral ocidental, zona despida e ventosa, que se prolonga até à costa Sul, a casa pouco diferia da dos montes alentejanos, as restantes zonas do algarve apresentavam uma casa típica constituída por elementos construtivos que se descrevem no Quadro 7.

Quadro 7 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do Algarve.

Elemento	Descrição
Pavimento	O pavimento possuía a mesma constituição como o das casas da região alentejana. Em outros tempos era em terra batida, tendo sido substituído para pedra calcetada miúda, ladrilho cerâmico ou tijolo.
Paredes exteriores	As paredes exteriores da casa algarvia eram construídas em tijolo ou alvenaria de calcário. Tal como as casas alentejanas caiavam-se interiormente e exteriormente.
Cobertura	A cobertura nas casas algarvias era um elemento característico que as diferenciava, rotundamente, do resto do país. Na zona do sotavento algarvio a cobertura inclinada era substituída por terraço com o nome de açoteia. As açoteias eram compostas por abóbodas que constituíam a cobertura dos compartimentos interiores. As casas do barlavento possuíam coberturas inclinadas, e tal como na região alentejana a inclinação era pequena, sendo forradas, interiormente, com canas para proteger do calor.
Portas e janelas	Nas casas algarvias as janelas possuíam dimensões maiores que nas casas alentejanas, Sendo usual um sistema composto por duas janelas e uma porta na fachada frontal. Um aspeto diferenciador era o emolduramento destes elementos em cantaria.
Outros elementos	A chaminé e as platibandas eram os elementos característicos das casas algarvias. As chaminés algarvias primavam por possuir formas elaboradas bem diferentes das formas simples verificadas nas outras regiões do país. A sua ornamentação, era também, bastante cuidada e variada. Tal como no Alentejo, a chaminé era um meio de climatização passiva do ambiente interior. Relativamente às platibandas, estas eram decoradas de forma cuidada e original sendo um elemento exclusivo das casas tradicionais do Algarve.
Interior	As casas antigas da zona central do Algarve, repetiam uma planta que mostra para a frente uma sala para a qual abrem as portas de duas alcovas situadas no fundo. Da sala passava-se para a cozinha e ao lado ou atrás estava a cabana ou estábulo. Mais recente e muito mais vulgar era o tipo de casa que apresentava uma planta com dois quartos de dormir para a frente e a cozinha e a sala para trás. A última forma deste tipo de casa, num modelo muito uniforme que se repetia com insistência, não só pelo centro e oriente algarvio, mas também pelo barlavento, tinha o andar térreo coberto integralmente por uma laje de betão que fazia à frente a açoteia ou varanda e atrás o pavimento do andar.

Na Figura 19 e no esquema da Figura 20 apresentam-se vários exemplos da casa algarvia.



Fig.19 – Casas tradicionais do Algarve [22 e 23].

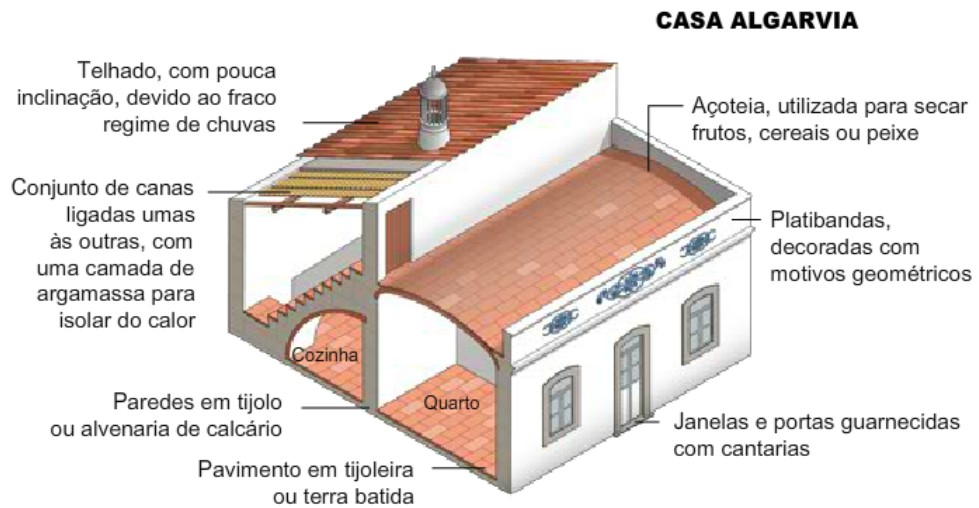


Fig.20 – Esquema da casa tradicional do Algarve [16].

2.2.2.3. Região do Ribatejo e Estremadura

As casas da região ribatejana e estremenha ora se aproximavam da alentejana, ora possuíam uma feição regional mais definida. No Quadro 8 evidenciam-se as características dos seus elementos construtivos característicos.

Quadro 8 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do Ribatejo e Estremadura.

Elemento	Descrição
Pavimento	O pavimento das casas típicas do Ribatejo, tal como nas restantes zonas analisadas, Alentejo e Algarve, era em terra batida, regada com aguada de barro, que progressivamente foi sendo substituído por materiais cerâmicos.
Paredes exteriores	A construção das paredes exteriores era em tijolo ou em adobe. As paredes eram caiadas ou rebocadas por ambos os lados.
Cobertura	A cobertura apresentava uma inclinação superior à das casas da região Alentejana e Algarvia. Era revestida por telha cerâmica assente em ripado de madeira. Geralmente a cobertura era de duas águas.
Portas e janelas	As portas e janelas, frequentemente em madeira, eram de maior dimensão que no Alentejo. O sistema janela – porta – janela era o sistema característico na fachada principal.
Outros elementos	As chaminés eram alongadas e perpendiculares ao cume da cobertura. Os embasamentos das paredes da fachada frontal e as molduras das janelas eram elementos característicos destas casas.
Interior	Quando possuíam dois pisos, no térreo situava-se a cozinha e a sala, enquanto que, no sobrado ficavam os quartos.

Nas fotografias da Figura 21 e no esquema da Figura 22 é possível constatar as particularidades relatadas.



Fig.21 – Casas tradicionais do Ribatejo [24].



Fig.22 – Esquema da casa tradicional do Ribatejo [16].

2.2.2.4. Região do Centro Litoral Português

Por quase toda a orla litoral do centro do país, desde Aveiro até Leiria, divulgou-se um género de casa que, à parte de pequenas diferenças locais mais ou menos sensíveis, mostrava evidentes características comuns. Tratava-se duma casa térrea, com uma fachada simples com as paredes em adobe, com uma cobertura de duas águas, com o cume paralelo à fachada. No Quadro 9 apresentam-se os elementos construtivos característicos destas casas.

Quadro 9 – Elementos construtivos característicos das casas tradicionais do centro litoral português.

Elemento	Descrição
Pavimento	O pavimento das casas do centro litoral era construído em soalho de madeira.
Paredes exteriores	A construção das paredes exteriores era em adobe, caiadas ou rebocadas apenas na fachada principal.
Cobertura	A cobertura era simples, geralmente de duas águas, quase sempre em telha marselhesa, assente em ripado de madeira.
Portas e janelas	Uma das marcas características destas casas era a fachada frontal, composta por o sistema de janela – porta – janela, mantendo nesta fachada uma geometria proporcional e cuidada entre estes elementos.
Interior	Interiormente destacava-se o andar sobrado que as casas do centro litoral português possuíam sob a cobertura. Com um pé direito diminuto, este local da casa, servia para armazenar os produtos agrícolas. O piso de rés-do-chão era utilizado para habitação na sua totalidade.

Nas fotografias da Figura 23 é possível constatar as características referidas deste tipo de casas.



Fig.23 – Casa tradicional litoral centro português.

A casa tradicional portuguesa e sua arquitetura reflete e caracteriza a região onde se insere, tanto ao nível da sua disposição interior, como dos materiais usados.

2.3. CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico interior é um elemento essencial para o bem-estar dos utentes dos edifícios.

Desde sempre se procurou estabelecer boas condições de conforto nas habitações e nos espaços onde se desenvolve a atividade profissional. Vitruvius [25], no século primeiro antes de cristo, já referia a necessidade de se considerar o clima no projeto de edificações por razões de conforto e de saúde. Porém, até à revolução industrial, o conforto térmico não era uma questão importante devido à inexistência de meios que proporcionavam o bem-estar. Até então, quando estava frio acendia-se uma lareira, e quando estava calor o melhoramento do conforto térmico era feito através do vestuário. Com a industrialização a preocupação com as condições do ambiente foi crescendo, principalmente, devido a questões relacionadas com a saúde e a produtividade dos trabalhadores.

Matias [26] refere que nos Estados Unidos da América no período de 1913 a 1923, Houghten e Yaglon, procuraram definir um intervalo de conforto, através de estudos efetuados, em laboratório, com condições controladas. No Reino Unido a principal preocupação residia no estabelecimento de limites das condições do ambiente de trabalho, efetuando-se estudos empíricos envolvendo trabalhadores fabris, estudos levados a cabo por Vanon, Warner e Bedford. Nos anos sessenta, o desenvolvimento das tecnologias mecânicas de controlo do ambiente, assim como o aumento dos padrões de vida, tornaram comum em vários países a utilização de sistemas de ar condicionado [26].

Até aos meados dos anos setenta o conforto higrotérmico de Inverno nos edifícios conseguiu-se, principalmente, à custa de um desperdício acentuado de energia, pelo que é importante estabelecer novos requisitos e estudarem-se alternativas.

2.3.1. FATORES QUE INFLUENCIAM O CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico de um edifício assenta em seis fatores, segundo a Norma desenvolvida pela ASHRAE [27], *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, designadamente [27]:

- Temperatura do ar;
- Temperatura média radiante;
- Humidade do ar;
- Velocidade do ar;
- Atividade metabólica;
- Resistência térmica do vestuário.

Estes fatores podem subdividir-se em duas categorias principais, ambiental e pessoal. Dos fatores ambientais fazem parte a temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e humidade do ar. Dos fatores pessoais fazem parte a atividade metabólica e a resistência térmica do vestuário. Para além destas duas categorias é importante referir outra, que engloba os fatores subjetivos, que são de carácter social e psicológico, relacionados com a diferença de perceção e na resposta aos estímulos sensoriais, fruto de vivências térmicas passadas e das expectativas dos utentes relativamente aos espaços que ocupam.

A fim de se perceber melhor os fatores, elencados atrás, e o seu papel no conforto térmico, analisam-se de seguida cada um destes.

2.3.1.1. Temperatura do ar

A temperatura do ar é um dos parâmetros mais importantes do conforto térmico. Por se associar à sensação das trocas de calor entre o organismo e o meio ambiente devido ao gradiente térmico existente entre eles.

Considera-se temperatura do ar, a temperatura de bolbo seco do ar, expressa em °C. O REH [1] estabelece, para os edifícios de habitação, como temperatura de conforto de referência, 18°C para a estação de aquecimento e 25°C para a estação de arrefecimento.

No presente estudo, este parâmetro foi medido *in situ*, através de sensores de medição de temperatura, servindo os dados recolhidos para avaliar o conforto térmico do edifício-tipo através do modelo de avaliação de conforto preconizado pela Norma EN 15251 [28].

2.3.1.2. Temperatura média radiante

A temperatura média radiante é expressa em °C e define-se como sendo a temperatura uniforme da superfície de um compartimento virtual, no qual as trocas de calor por radiação entre as superfícies desse compartimento e o corpo humano são iguais às trocas de calor por radiação que ocorrem no espaço real, calcula-se através da média ponderada das temperaturas superficiais dos elementos das envolventes do espaço onde se encontra o ocupante, incluindo o efeito da radiação solar incidente [26].

A Norma EN 7726 [29] estabelece duas equações para o cálculo da temperatura média radiante, através da medição das temperaturas das superfícies, nos seis sentidos de orientação, sendo calculada consoante a posição da pessoa, sentada ou em pé, determinando-se assim a temperatura média radiante. As equações são as seguintes:

- Posição sentada:

$$T_{mr} = 0,13(T_p [cima] + T_p [baixo]) + 0,185(T_p [dir.] + T_p [esq.] + T_p [frente] + T_p [trás]) \quad (1)$$

- Posição em pé:

$$T_{mr} = 0,06(T_p [cima] + T_p [baixo]) + 0,22(T_p [dir.] + T_p [esq.] + T_p [frente] + T_p [trás]) \quad (2)$$

Sendo que:

- T_p , temperatura da superfície [°C].

É com base nestas expressões que se calculou a temperatura média radiante para os casos de estudo. Os valores da temperatura de superfície foram conseguidos através de simulação numérica utilizando o programa WUFI Plus.

2.3.1.3. Humidade do ar

A humidade do ar expressa-se em termos absolutos ou relativos. A humidade absoluta, expressa-se geralmente sob a forma de pressão parcial de vapor de água, nas unidades *Pa*, é um parâmetro fundamental na determinação das perdas de calor por evaporação do corpo humano para o meio ambiente [26].

Com uma humidade relativa elevada a possibilidade de evaporação superficial do corpo é reduzida constituindo um constrangimento térmico para o indivíduo, principalmente em ambientes com temperatura elevada.

Segundo a Norma EN ISO 7730 [30] em ambientes térmicos moderados e para atividades ligeiras dos utentes, a influência da humidade sobre a perceção térmica é pouco significativa. Sendo que um acréscimo de 10% da humidade relativa do ar tem o mesmo efeito que um aumento de 0,3°C na sua temperatura. Pelo contrário, em ambientes com temperaturas elevadas, valores de humidade elevados têm uma influência significativa nas condições de conforto térmico.

Os valores de humidade relativa situados no intervalo de 30 a 60% são indicados para os edifícios, pois, desta forma, não possuem grande influência na perceção térmica dos utentes permitindo prevenir outros efeitos frequentemente observados em ambientes interiores, como o desenvolvimento de ácaros, condensações e bolores (humidades elevadas), eletricidade estática, secagem das mucosas do nariz e da boca (humidade baixa) [31].

Segundo Fanger *et al.* [32] a humidade pode causar desconforto térmico por duas razões, a primeira devido a um elevado nível de humidade na pele, a segunda devido a um insuficiente arrefecimento das membranas mucosas no sistema respiratório superior através da inalação de ar húmido quente.

Para a quantificação da humidade relativa nos edifícios existem vários tipos de equipamentos, como por exemplo higrómetros e psicrómetros. A ASHRAE 55 [27] e a Norma EN 7730 [30] através do método preconizado estabelecem limites de conforto para o Verão e para o Inverno.

2.3.1.4. Velocidade do ar

A velocidade do ar intervém na determinação das trocas de calor por convecção e na variação das perdas de calor por evaporação ao nível do corpo humano [26]. A percepção pode ser influenciada, quer de uma perspetiva global, quer de uma perspetiva localizada (correntes de ar) [30].

A velocidade do ar é uma grandeza definida pela sua intensidade e direção, geralmente difícil de quantificar devido às flutuações rápidas que sofre, quer em termos de intensidade, quer de direção [26].

Em ambientes térmicos quentes a velocidade do ar pode possibilitar uma redução da sensação de calor. Porém, para ambientes húmidos e atividades ligeiras, uma velocidade do ar baixa, pode provocar situações de desconforto térmico aos utentes dos espaços.

2.3.1.5. Atividade metabólica

Ao efetuar-se uma atividade está-se a produzir calor, que varia consoante o tipo de atividade, sendo dissipado através de mecanismos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente.

As trocas térmicas efetuam-se por condução, convecção, radiação e evaporação. As que se efetuam por evaporação consideram-se húmidas, as restantes secas. O calor proveniente das trocas secas denomina-se sensível, e deve-se às diferenças de temperatura entre o corpo humano e o ambiente que o rodeia. O calor proveniente das trocas húmidas denomina-se calor latente.

Segundo Rodrigues *et al* [33], o balanço térmico pode ser traduzido pela seguinte equação:

$$\text{Metabolismo} = \text{trocas}(\text{condução} + \text{convecção} + \text{radiação} + \text{evaporação}) \quad (3)$$

A atividade física desenvolvida por uma pessoa pode ser quantificada pela taxa de metabolismo que representa a produção de energia obtida pelo organismo através do consumo de alimentos por unidade de tempo, J/s^{-1} [33].

Para o mesmo nível de atividade a taxa de metabolismo varia, principalmente, com a área corporal de uma pessoa, pelo que pode ser definida nas unidades W/m^2 .

De forma a simplificar-se a análise da taxa de metabolismo, a unidade mais utilizada é designada por *met*, sendo que 1 met corresponde à taxa de metabolismo, por unidade de área corporal, de um indivíduo em posição sentada e em estado de repouso, $1 \text{ met} = 58,15 \text{ W/m}^2$.

No Quadro 10 apresentam-se alguns exemplos de atividades e correspondentes taxas metabólicas.

Quadro 10 – Valores das trocas térmicas entre um indivíduo e o meio para várias atividades [27].

Atividade	[W/m ²]	[met]
Dormir	40	0,7
Descanso	45	0,8
Sentado	60	1,0
Relaxado	70	1,2
Caminhada 0,9 m/s, 3,2 km/h	115	2
Caminhada 1,2 m/s, 4,3 km/h	150	2,6
Caminhada 1,8 m/s, 6,8 km/h	220	3,8
Atividades de arquivamento	70 – 80	1,2 – 1,4
Caminhar pelo escritório	100	1,7
Levantar objetos	120	2,1
Conduzir automóveis	60 – 115	1,0 – 2,0
Cozinhar	95 – 115	1,6 – 2,0
Limpeza da casa	115 – 200	2,0 – 3,4
Dançar	140 – 255	2,0 – 2,4
Tênis	210 – 270	3,6 – 4,0
Basquetebol	290 – 440	5,0 – 7,6

2.3.1.6. Resistência térmica do vestuário

As peças de vestuário são responsáveis pela proteção do corpo humano, evitando as trocas de calor entre este e o ambiente. Esta proteção quantifica-se pela resistência térmica do vestuário, I_{vest} , expressa em $m^2\text{°C}/W$, caracterizando o isolamento entre a pele e a superfície exterior do vestuário. A unidade em que se expressa a resistência térmica do vestuário é a *clo*, sendo 1 *clo* equivalente a uma resistência térmica de $0,155 m^2\text{°C}/W$. A resistência térmica do vestuário, apresentada em *clo*, refere-se à superfície global do corpo, incluindo zonas do corpo sem roupa como, por exemplo as mãos e a cara. O valor total da resistência térmica do vestuário é dado pelo somatório dos valores das resistências térmicas correspondentes a cada uma das peças de roupa.

O valor mais baixo para a resistência térmica do vestuário é 0 *clo*, correspondente a uma pessoa sem roupa. O valor máximo é de 4 *clo*.

No Quadro 11 apresentam-se exemplos do valor da resistência térmica do vestuário.

Quadro 11 – Valores de resistência térmica de algumas peças de vestuário [27].

Vestuário	Resistência térmica [clo]	Resistência térmica [m ² C/W]
Sem roupa	0	0
Calções	0,1	0,016
Vestuário tropical	0,3	0,047
Vestuário leve de Verão	0,5	0,078
Vestuário de trabalho	0,7	0,124
Vestuário de Inverno para ambiente interior	1,0	0,155
Fato completo	1,5	0,233

É de realçar que estes valores são valores médios. Permanentemente existem inúmeros tipos de tecidos, o que faz com que o valor da resistência térmica do vestuário varie.

O papel do vestuário pode ir mais além do que a proteção térmica. Newsham [34], conclui que o ajustamento do vestuário num ambiente condicionado através de meios mecânicos pode providenciar uma poupança de energia e pode ser visto como um meio para ajustar o conforto térmico em ambientes térmicos desconfortáveis.

2.3.1.7. Outros Fatores

A perceção do conforto térmico também depende de questões socioculturais e psicológicas relacionadas com diferenças na perceção e na resposta a estímulos sensoriais, fruto de vivências térmicas passadas e da expectativa dos utentes relativamente aos espaços que ocupam [26].

Características como o sexo, a idade, estado socioeconómico, são exemplos de condicionantes subjetivas de conforto térmico.

A idade pode influenciar na preferência térmica das pessoas, o metabolismo das pessoas mais idosas é mais lento, o que interfere na perceção do conforto térmico [27].

Quanto ao género dos utilizadores dos espaços, os do género feminino preferem, muitas vezes, ambientes com temperaturas mais elevadas, aspeto que pode explicar-se pela resistência térmica do vestuário [27].

2.3.2. MODELO DE FANGER

Povl Ole Fanger desenvolveu um modelo para prever o conforto térmico, que ficou conhecido como o modelo de Fanger. O modelo baseia-se no *PMV*, *Predicted Mean Vote*. Foi estabelecido em experiências efetuadas em universidades dinamarquesas e norte americanas durante a década de 1960.

Neste estudo participaram 1300 pessoas, através das quais foi possível estabelecer uma relação entre o resultado do balanço energético do corpo e a tendência para o conforto ou para o desconforto térmico.

Fanger propôs, assim, um modelo que permite prever a sensação térmica de um grupo de pessoas. Para realizar esta previsão, baseou-se na premissa de que as sensações experimentadas eram uma função do esforço fisiológico impostas pelo ambiente. Definiu este aspeto como a diferença entre a produção interna de calor e as perdas térmicas para o ambiente, mantendo os valores de conforto para a temperatura da pele e a secreção de suor de uma pessoa em níveis aceitáveis. Foram assim propostos valores de temperatura da pele e da secreção de suor para o conforto térmico. Valores obtidos através de experiências em câmaras climáticas, em que a taxa de secreção de suor e a temperatura da pele eram medidas em pessoas que estavam em estado de conforto para várias taxas metabólicas. Conjuntos ótimos de condições ambientais para o conforto térmico foram deduzidos a partir da taxa metabólica e da resistência térmica do vestuário.

Desta forma o modelo de Fanger segue a seguinte metodologia [35]:

- Definir parâmetros: catalogar os dados individuais das pessoas e as características de cada ambiente;
- Equação de conforto: obtidos os parâmetros aplicam-se à equação de conforto térmico de forma a determinar o valor armazenado de energia;
- Cálculo do *PMV*: com base no valor armazenado de energia do corpo calcula-se o *PMV*, que consiste numa escala quantitativa das sensações de calor e frio;
- Cálculo das insatisfações, *PPD*: em função do *PMV* calculam-se as insatisfações *PPD*.

O modelo de Fanger considera as seguintes variáveis do ar/espacos [35]:

- Temperatura do ar;
- Humidade do ar;
- Velocidade do ar;
- Temperatura média radiante.

E as seguintes variáveis pessoais [35]:

- Vestuário;
- Metabolismo.

Apesar de este método ser utilizado e mencionado por normas internacionais como ASHRAE 55 [27] e EN 7730 [30], apresenta alguns inconvenientes, como Nicol *et al.* [36] referem:

- Em primeiro lugar, é necessário assumir que as condições no edifício se aproximam do estado estacionário da câmara climática;
- É necessário conhecer o isolamento térmico das roupas dos ocupantes do edifício, tal como a sua taxa metabólica média. Para edifícios onde se desenvolve um número de atividades diferentes no mesmo espaço gera-se um problema adicional.

Estas duas variáveis são difíceis de medir, e na ausência do conhecimento preciso das mesmas, a tendência tem sido para se estimar valores. Outra questão fundamental tem sido levantada por Nicol *et al.* [36] sobre a premissa em que se baseia a equação *PMV*. Esta equação baseia-se na suposição de que

a sensação térmica é função da carga térmica do corpo, expressando-se em forma de desvio de um estado de neutralidade térmica. Isto é diferente dos critérios de conforto na equação expressa em função do equilíbrio térmico, temperatura média da pele e secreção de suor. Existe, assim, uma contradição interna quando se aplica a pessoas que não se encontram em neutralidade térmica que vestem diferentes tipos de vestuário para uma única carga térmica, podendo ocorrer diferentes níveis de sensação térmica e resposta fisiológica.

Desta forma perante estes condicionalismos, este método não será utilizado para, no presente estudo, se avaliar o conforto térmico.

2.3.3. MODELO ADAPTATIVO

O modelo adaptativo de conforto térmico baseia-se na teoria de Nicol e Humphreys, estabelecendo que, se uma mudança ocorre de modo a gerar uma situação de desconforto, as pessoas reagem de maneira a tentar restaurar as situações de conforto [36].

Para voltar a restituir o conforto térmico estas medidas baseiam-se, sobretudo, nas seguintes ações:

- Através do ajuste de vestuário, mas também através da postura ou das atividades;
- Alteração das condições ambientais para os utentes do espaço satisfazerem as suas necessidades. Englobam-se neste tipo de ações, nomeadamente abrir uma janela, fechar os dispositivos de oclusão solar, mudar de posição para um lugar mais confortável do edifício e o incremento de equipamentos de climatização.

É notório que a teoria de base do modelo adaptativo prevê que as condições de conforto térmico resultam de um processo dinâmico, no qual o utilizador mantém uma interação física e psicológica com o ambiente, sendo imprescindível considerar a sua capacidade e necessidade de se adaptar, quer através da interação com o edifício e os seus sistemas, quer devido aos seus hábitos sociais e culturais.

As condições nos edifícios estão em alteração contínua. Mesmo em edifícios com climatização, mudanças contínuas nas cargas de aquecimento derivadas da mudança de utentes, temperaturas exteriores e a entrada de radiação solar, refletem-se nas variações internas de temperatura. São também inevitáveis variações das condições térmicas em diferentes partes de um compartimento, sobretudo, devido ao seu pé direito, configuração, número de paredes e janelas em contacto com o exterior. Relativamente às pessoas, também alteram as suas roupas com as mudanças de estações, e a sua taxa metabólica varia consoante as suas atividades. Desta forma, a temperatura baseada num estado estacionário de transferência de calor e as condições de conforto controladas de uma câmara climática podem ser capazes de avaliar as mudanças do valor médio da sensação térmica ao longo de grandes períodos, mas não podem avaliar adequadamente múltiplas mudanças adaptativas. Se, por um instante, alguns ajustamentos visam reduzir o desconforto térmico, então o modelo do estado estacionário pode perpetuar um desconforto maior do que o que atualmente existe.

No caso de edifícios ventilados naturalmente e onde os ocupantes interagem continuamente com os edifícios, a incompatibilidade entre a previsão e o conforto real pode ser importante [36].

Sendo a adaptação térmica essencialmente dinâmica o conforto não é um produto que é fornecido aos utentes de um edifício, mas, sim, um objetivo que os utentes alcançam, desde que para isso sejam capazes de exercer o controlo necessário para o conseguir [36].

As condições ambientais necessárias para atingir este objetivo também se alteram com o tempo embora existam limites para a variedade de climas interiores que qualquer grupo de pessoas se possa adaptar, devido às suas experiências climáticas, sociais, *status* económico e social e à sua fisiologia [36].

De forma a haver uma adaptação ótima, os edifícios devem possibilitar às pessoas oportunidades de ajuste, de forma perceptível e em variados contextos. É importante referir alguns dos fatores que possibilitam as ações de adaptação dos utentes ao edifício, designadamente:

- Conforto e ambientes térmicos usuais;
- Adaptação das condições de conforto;
- Códigos de vestuário;
- Adaptação da temperatura durante o dia;
- Adaptação da temperatura ao longo de vários dias.

Os inconvenientes do modelo adaptativo prendem-se, sobretudo, com as mudanças de clima, dos padrões de conforto para os edifícios arrefecidos ou aquecidos passivamente e dos limites de simulação num ambiente em mudança de forma a conseguir prever-se o desempenho futuro dos edifícios em questão.

Analisando cada um dos inconvenientes, verifica-se que as mudanças de clima fazem com que um projetista preveja soluções a fim de manter o conforto térmico, isto é, a temperatura numa gama aceitável.

Um importante fator para alcançar o conforto térmico é o de que as populações locais entendam as condições térmicas que possam colocar em risco a sua saúde, sendo necessário a existência de ações/medidas de controlo para reagir à mudança climática.

Os problemas de conforto podem resultar em problemas de saúde se as alterações climáticas forem extremas, e as pessoas não possuírem os meios ou a compreensão das necessidades para combater os efeitos adversos. Um exemplo concreto, data do ano de 2003 em que uma inesperada onda de calor provocou a morte de 35000 pessoas na Europa. Por outro lado, a falta de adaptabilidade dos sistemas de climatização pode levar a falhas do funcionamento completo do edifício devido à falha do sistema quando não consegue fazer face às temperaturas extremas.

Os limites de simulação num ambiente em mudança levam à problemática da análise da relação entre os ocupantes e os edifícios. Presentemente, existem modelos físico-fisiológicos de simulação do corpo humano que contemplam o desafio da simulação nas respostas de conforto térmico. Da perspetiva do conforto adaptativo, os modelos de simulação eliminam ou simplificam as partes do modelo que lidam com a interação dos ocupantes com o edifício. Também os *softwares* de simulação térmica de edifícios, de uso comercial, apresentam estas lacunas. De forma a colmatar estas falhas é necessário recorrer a dados experimentais para criar modelos dinâmicos de construção. Um exemplo concreto é o de que não há uma temperatura exata para uma pessoa abrir uma janela, mas há uma probabilidade que cresce com o aumento da temperatura. Usando estas relações nas simulações assume-se que o objetivo é obter um intervalo das temperaturas interiores, ao invés de um valor preciso.

Como foi referido, o modelo adaptativo insere-se melhor nos objetivos do presente trabalho, sendo o escolhido para avaliar o conforto do edifício em estudo. Esta escolha baseia-se, sobretudo, na forma como o conforto é considerado dinâmico, variando com o clima, atividade física e vestuário, é também um método que na comunidade científica internacional reúne maior consenso em comparação com a abordagem de Fanger.

2.3.4. QUANTIFICAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO INTERIOR

A quantificação do conforto térmico, como já referido, depende de vários fatores, nomeadamente a temperatura do ar, velocidade do ar, humidade, vestuário e atividade. É importante referir que a sua quantificação não é exata, sendo a sensação de conforto variável de pessoa para pessoa. De forma a conseguir quantificar o conforto térmico elaboraram-se normas, com o objetivo de estabelecer as condições de conforto.

O conforto térmico baseia-se na fisiologia da termorregulação. Isto é, na capacidade que o ser humano tem em auto regular a temperatura corporal mantendo-a aproximadamente constante. O balanço térmico do corpo humano é definido pela relação da energia produzida no interior do corpo com as perdas térmicas para o exterior.

Com base nos modelos fisiológicos e em diversos estudos efetuados com pessoas em ambientes térmicos controlados, desenvolveram-se quatro normas de reconhecida importância, que se encontram em vigor. Estas normas são a ASHRAE 55 [27], EN 7730 [30], EN 15251 [28] e a Norma ISO/TS 14415 [38], normas que estabelecem recomendações e regras para se obter e avaliar condições de conforto térmico em ambientes interiores de edifícios.

A norma europeia EN 15251 [28] foi a selecionada para avaliar o conforto térmico do edifício em estudo. A Norma [28] possui um modelo adaptativo para edifícios não climatizados, regula a qualidade do ambiente interior em edifícios em termos térmicos, qualidade do ar, iluminação e ruído.

O âmbito da Norma [28] é o seguinte:

- Especificar os parâmetros e ou os critérios de impacto para o ambiente interior e como estes são considerados para ir ao encontro dos requisitos da EPBD [10];
- Especificar como estabelecer os parâmetros a ter em conta para o projeto térmico de edifícios e cálculo do seu desempenho energético;
- Especificar métodos para uma avaliação de longo prazo, do ambiente térmico obtido através de cálculos ou medições;
- Especificar os critérios de medição, que podem ser utilizados quando é necessário conferir o cumprimento dos requisitos através de uma inspeção;
- Identificar os parâmetros a serem utilizados em monitorizações e avaliações do ambiente interior de edifícios existentes;
- A Norma [28] aplica-se, principalmente, a edifícios não industriais, onde os critérios para o ambiente interior são definidos pelos ocupantes e onde a atividade desenvolvida não é a principal condicionante do ambiente interior. Esta Norma é aplicável aos seguintes tipos de edifícios: edifícios de habitação unifamiliar, edifícios de habitação multifamiliares, edifícios de escritórios, edifícios escolares, hospitais, hotéis, restaurantes, instalações desportivas e lojas comerciais;
- Especificar como as diferentes categorias de ambiente interior podem ser usadas. Contudo, não exige que sejam utilizadas. Estas são da responsabilidade da legislação nacional ou do projeto em questão;
- Os critérios recomendados na Norma [28] podem ser utilizados nos métodos de cálculo dos regulamentos nacionais, que poderão ser diferentes dos métodos referidos nesta Norma;
- A Norma [28] não prescreve métodos para projeto, mas fornece parâmetros de entrada para o projeto térmico de edifícios, ventilação e sistemas de iluminação;
- A Norma [28] não incluiu requerimentos para os fatores de desconforto local como é o caso da assimetria da temperatura radiante, diferença vertical de temperaturas e temperaturas das superfícies dos pavimentos.

As categorias de conforto térmico, estabelecidas pela Norma [28], para os edifícios, são as seguintes [28]:

- Categoria I – traduz um elevado nível de expectativa, é recomendada para espaços ocupados por pessoas muito frágeis e sensíveis com requisitos especiais, como, pessoas incapacitadas fisicamente, doentes, idosos e recém-nascidos;
- Categoria II – traduz um nível normal de expectativa e deverá se considerado para edifícios novos e reabilitados;
- Categoria III – traduz um nível aceitável de conforto e pode ser utilizado para edifícios existentes.

No anexo A da Norma EN 15251 [28] estabelecem-se as categorias para o projeto térmico de edifícios com sistemas mecânicos de aquecimento e arrefecimento, tendo em conta a influência dos seis parâmetros térmicos, vestuário, atividade, temperatura média do ar e radiante, velocidade do ar e humidade. No Quadro 12, apresenta-se categorias de conforto e valores de temperaturas para projeto de edifícios com sistemas mecânicos de aquecimento e arrefecimento, sendo a seguinte:

Quadro 12 – Valores de temperaturas de projeto segundo a Norma EN 15251 [28].

Tipo de edifício/espço	Categoria	Temperatura Operativa °C	
		Temperatura mínima para aquecimento (estação de aquecimento) ≈ 1 clo	Temperatura máxima para arrefecimento (estação de arrefecimento) $\approx 0,5$ clo
Edifícios residenciais: zonas úteis (quartos, sala, etc.), Atividade sedentária $\approx 1,2$ met	I	21	25,5
	II	20	26,0
	III	18	27,0
Edifícios residenciais: zonas não-úteis (quartos, sala, etc.), Atividade ligeira $\approx 1,5$ met	I	18	-
	II	16	-
	III	14	-
Escritório coletivo (<i>open plan office</i>), Atividade sedentária $\approx 1,2$ met	I	21	25,5
	II	20	26,0
	III	19	27,0
Sala de conferência, auditório, salas de aula, Atividade sedentária \approx 1,2 met	I	21	25,5
	II	20	26,0
	III	19	27,0
Café, restaurante, Atividade sedentária \approx 1,2 met	I	21	25,5
	II	20	26,0
	III	19	27,0

Para os edifícios sem sistemas mecânicos de arrefecimento, no anexo A da Norma [28], apresentam-se os limites de temperatura, para a estação de arrefecimento, ilustrados na Figura 24.

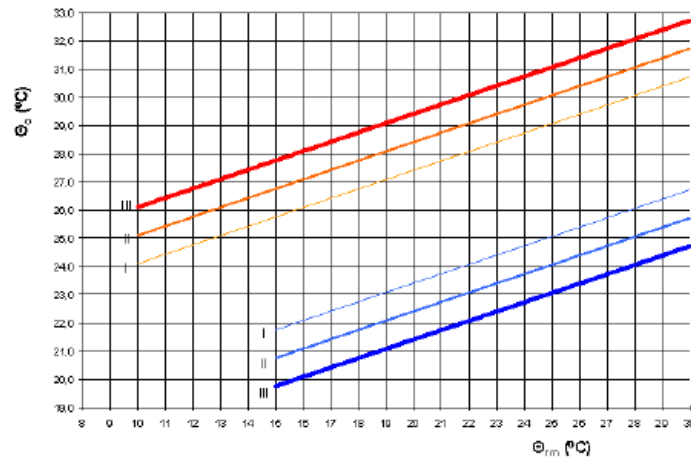


Fig.24 – Limites de conforto para a estação de arrefecimento da Norma 15251 [28].

As equações que representam as linhas do gráfico da Figura 24 são as seguintes:

Categoria I

$$\text{Limite superior: } \theta_{i\max} = 0,33 \times \theta_{rm} + 18,8 + 2 \quad (4)$$

$$\text{Limite inferior: } \theta_{i\min} = 0,33 \times \theta_{rm} + 18,8 - 2$$

Categoria II

$$\text{Limite superior: } \theta_{i\max} = 0,33 \times \theta_{rm} + 18,8 + 3 \quad (5)$$

$$\text{Limite inferior: } \theta_{i\min} = 0,33 \times \theta_{rm} + 18,8 - 3$$

Categoria III

$$\text{Limite superior: } \theta_{i\max} = 0,33 \times \theta_{rm} + 18,8 + 4 \quad (6)$$

$$\text{Limite inferior: } \theta_{i\min} = 0,33 \times \theta_{rm} + 18,8 - 4$$

Em que:

- θ_{rm} , temperatura média ponderada exterior [°C];
- θ_i , temperatura do ar interior mínima ou máxima admissível [°C].

Segundo a Norma [28] os limites de temperatura só se aplicam quando as condições térmicas do espaço possam ser reguladas pelos ocupantes do espaço, principalmente, através da abertura e fecho de janelas, podendo, no entanto, ser utilizada ventilação mecânica como forma de arrefecimento do espaço.

Este método aplica-se, apenas, a espaços onde os ocupantes desenvolvam atividades sedentárias com uma taxa metabólica entre 1,0 e 1,3 met.

Relativamente à estação de aquecimento, para temperaturas inferiores a 15°C, os valores a considerar são os mesmos para os edifícios com meios mecânicos de aquecimento (ver Quadro 12).

Os edifícios em estudo inserem-se na categoria II, pois trata-se de um edifício reabilitado, assim, para a estação de aquecimento a temperatura mínima de conforto será de 20°C, para a estação de arrefecimento será seguido o proposto pelos limites representados na Figura 24.

2.4. VENTILAÇÃO NOTURNA E INÉRCIA TÉRMICA

É importante dotar os edifícios de técnicas e meios capazes de garantir conforto e promover a eficiência energética tornando-os atrativos e funcionais. Estas técnicas e meios prendem-se, sobretudo, com a garantia da qualidade do ar interior, conforto térmico e acústico, consumo de energia, impacto ambiental e arquitetónico.

A ventilação é um meio capaz de aumentar a qualidade do ar interior de um edifício, conforto térmico e diminuir o consumo energético.

A ventilação é uma técnica de grande impacto e de simples aplicação, pode contribuir, benéficamente, das seguintes formas:

- Resolver os problemas de qualidade do ar interior, através da diminuição da concentração de agentes poluentes no interior dos edifícios;
- Aumentando o conforto térmico dos edifícios pela diminuição das temperaturas de pico diárias, na estação de arrefecimento, e provocando um atraso temporal no equilíbrio da temperatura;
- Diminuindo o consumo energético dos edifícios associado às necessidades de arrefecimento com a diminuição das temperaturas máximas interiores.

Segundo Santamouris [39], a ventilação pode contribuir significativamente para melhorar as condições térmicas interiores de aproximadamente 3 mil milhões de pessoas pertencentes à classe social média e baixa. Grande parte destas pessoas vive em edifícios deficientemente projetados, sofrendo, com isso, problemas de sobreaquecimento no Verão. Não possuindo, estas pessoas, meios adequados para solucionar estes problemas, a integração de sistemas de ventilação pode diminuir as necessidades de arrefecimento atenuando ou resolvendo por completo os problemas de sobreaquecimento. A ventilação diurna em climas amenos e a ventilação noturna em climas quentes têm provado ser benéficas e eficazes, mesmo que de forma parcial.

A ventilação afigura-se assim, como um processo, reconhecidamente, simples e económico.

Para projetar um sistema de ventilação num edifício é necessário ter em consideração algumas diretrizes. As taxas de ventilação variam consoante o propósito que se pretende. Para requisitos de qualidade do ar interior a taxa de renovação horária é inferior à necessária para a diluição de dióxido de carbono. Esta, por sua vez, é inferior à taxa de renovação requerida para eliminar odores corporais, que por sua vez, é inferior à taxa requerida para eliminar agentes poluentes, como fumo de tabaco, e à do ambiente interior. Por fim, a taxa de renovação horária para providenciar as condições de conforto interior, em termos de temperatura e humidade relativa, é superior às mencionadas [40].

O uso da ventilação para controlar as temperaturas interiores depende, sobretudo, do clima, localização e características do edifício de acordo com os estudos de Maria Kolokotroni e Mat Santamouris [41] e de Germano *et al.* [42].

A ventilação e a inércia térmica são duas estratégias passivas que, combinadas entre si, conduzem a um bom funcionamento térmico de um edifício.

A utilização da inércia térmica para a regulação do conforto térmico do ambiente interior é eficaz em edifícios com ventilação adequada. Um bom exemplo desta relação entre a inércia térmica e a ventilação é a técnica de arrefecimento passivo designada ventilação noturna.

Durante o Verão as temperaturas exteriores, no período noturno, são inferiores às temperaturas interiores nesse mesmo período. Este aspeto faz com que o calor armazenado ao longo do dia pela massa superficial se liberte aquecendo o ambiente, o que poderá, causar desconforto térmico. É necessário

encontrar uma forma de minimizar este aspeto contraproducente da inércia térmica dos edifícios. A ventilação noturna é um instrumento que possibilita a minimização do problema em causa.

A ventilação noturna é assim um meio que permite a dissipação do calor libertado pelos elementos construtivos, através do arrefecimento da sua massa superficial, usando para isso a temperatura do ar exterior. Segundo Goulart [43], este é o principal princípio da interação entre a ventilação noturna e inércia térmica.

Esta relação pode ser potenciada se o edifício estiver fechado durante o dia, evitando assim a entrada de calor nos compartimentos e mantendo, dentro do possível, uma temperatura uniforme ao longo do dia.

Shaviv *et al.* [44] efetuaram um estudo que tinha como objetivo quantificar a influência da massa térmica e da ventilação noturna na temperatura máxima interior de um edifício residencial durante o Verão em quatro cidades de Israel: Naharia, Geva Carmel, Tel Aviv e Gaza.

Foram definidos quatro níveis de massa térmica:

- Edifício sem massa térmica, sem inércia;
- Edifício com massa térmica média (paredes leves e pavimentos pesados), inércia média;
- Edifício com massa térmica média/elevada (pavimentos pesados, cobertura e paredes exteriores pesadas e paredes interiores leves), inércia média/forte;
- Edifício com massa térmica elevada, inércia forte.

Relativamente à ventilação os níveis considerados são os seguintes:

- Sem ventilação noturna;
- Ventilação noturna natural, 5 renovações horárias;
- Ventilação noturna forçada, 20 renovações horárias;
- Ventilação noturna forçada, 30 renovações horárias.

A amplitude térmica diária exterior (ΔT) característica, para as quatro cidades, é seguinte:

- Nahariya, $\Delta T = 9,5^{\circ}\text{C}$;
- Geva Carmel, $\Delta T = 8,8^{\circ}\text{C}$;
- Gaza, $\Delta T = 7,9^{\circ}\text{C}$;
- Tel Aviv, $\Delta T = 6,9^{\circ}\text{C}$.

Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 25, em que T_{maxin} é a temperatura máxima do ar interior registada.

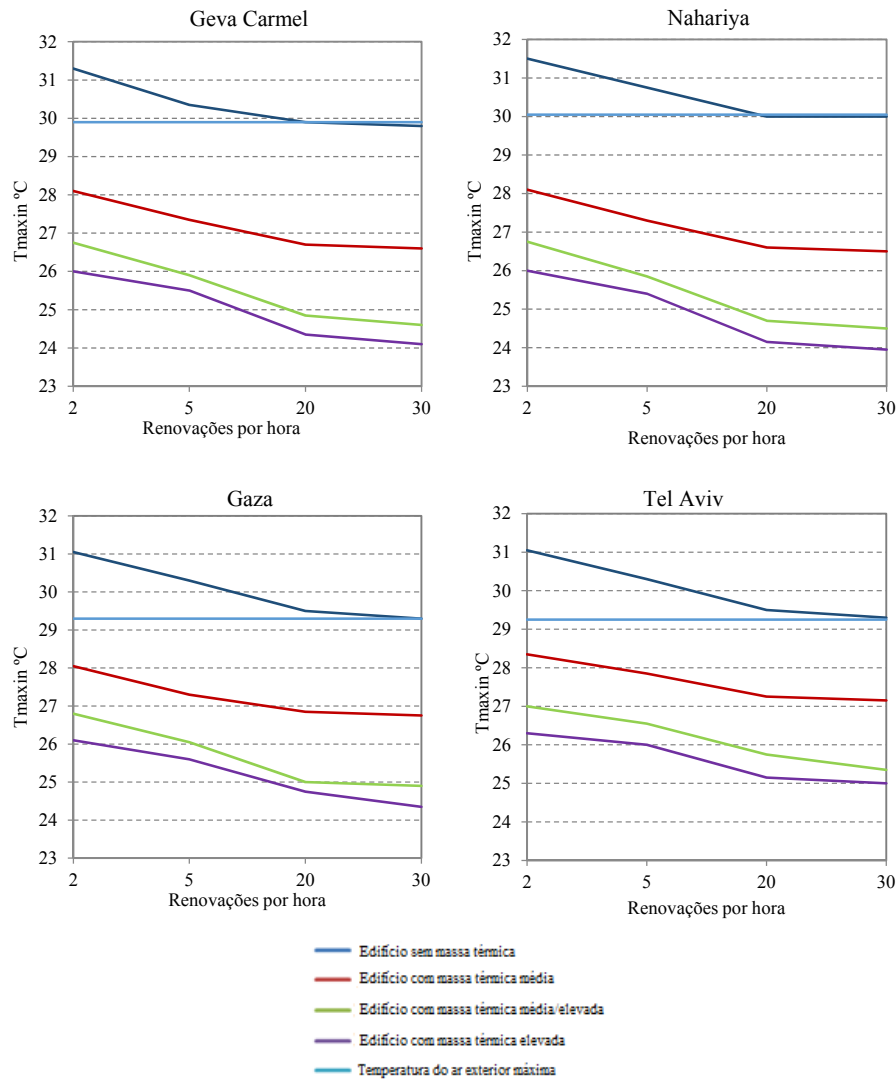


Fig.25 – Resultados obtidos para a temperatura máxima interior em função da inércia térmica e graus de ventilação [44].

Analisando a Figura 25, é perceptível a diminuição da temperatura máxima interior, mediante o aumento do valor das renovações horárias do ar para todas as tipologias de edifícios. Nos casos estudados a ventilação conduz a uma diminuição da temperatura do ar interior máxima. É entre duas e cinco renovações horárias que os valores de temperatura variam de forma mais significativa. Com apenas mais três renovações horárias verificam-se diminuições próximas de 1°C para os edifícios sem massa térmica e aproximadamente 0,5°C para os edifícios com massa térmica elevada. A partir das cinco renovações horárias a diminuição verifica-se, mas de forma menos acentuada, havendo uma tendência, para a partir das quinze renovações horárias, haver uma estabilização da temperatura do ar interior.

É importante referir, que os valores para as renovações horárias do ar devem ser vistos numa perspetiva teórica, uma vez que assegurar vinte ou trinta renovações horárias não é compatível com a garantia de conforto.

Dos resultados obtidos fica patente que a inércia térmica atuando juntamente com a ventilação possibilita um aumento do conforto térmico dos espaços interiores. Porém, como Shaviv *et al.* [44] referem, a inércia térmica juntamente com a ventilação noturna é um meio passivo de arrefecimento com eficiência comprovada, mas o seu bom funcionamento depende da amplitude da temperatura diária.

De forma a comprovar este facto, os autores resumiram os resultados obtidos através de um valor denominado T_{max} , valor que determina a diferença máxima entre a temperatura máxima do ar exterior e temperatura máxima do ar interior, sendo calculado através da seguinte equação:

$$T_{max} = T_{max,out} - T_{max,in} \quad (7)$$

Sendo:

- $T_{max,out}$, temperatura máxima do ar exterior [°C];
- $T_{max,in}$, temperatura máxima do ar interior [°C].

Na Figura 26 apresenta-se um gráfico que relaciona T_{max} com vários valores de amplitude térmica exterior, ΔT , para os edifícios com massa térmica elevada, definidos por H e com massa térmica média, definidos por M .

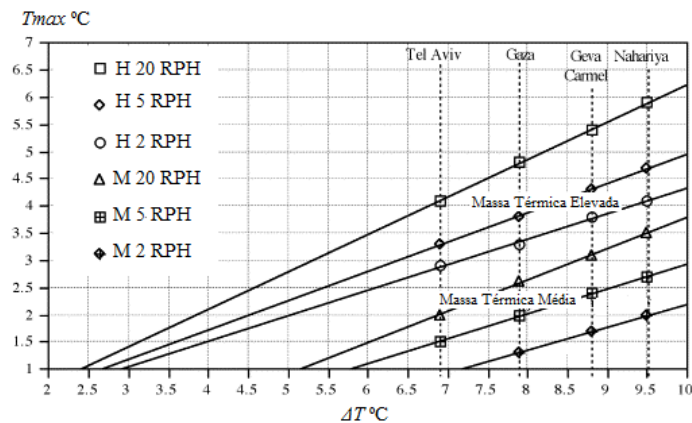


Fig.26 – Redução da temperatura máxima interior em função da variação da temperatura exterior [44].

Da Figura 26 destaca-se a relação linear entre a amplitude térmica, ΔT , e o valor T_{max} . Podendo assim prever-se a influência da inércia térmica e ventilação noturna no ambiente interior dos edifícios das respetivas cidades. Desta forma pode comprovar-se que, quanto maior é amplitude térmica diária maior é a redução da temperatura do ar interior, assim como quanto mais elevada é a massa térmica maior é a redução da temperatura do ar interior.

Em Portugal, na estação de arrefecimento o clima caracteriza-se por uma amplitude térmica diária relevante, podendo atingir 20°C em algumas regiões, sendo possível e desejável a implementação da ventilação noturna como uma estratégia eficaz da dissipação dos ganhos no interior dos edifícios, principalmente nos edifícios de habitação [45].

O tipo de utilização é outro fator importante a ter em conta, por exemplo, um edifício de habitação não tem as mesmas necessidades de arrefecimento que um ginásio. O comportamento dos ocupantes também influencia o processo de arrefecimento por ventilação. Por vezes, estes processos funcionam com o auxílio das janelas e outros dispositivos, devendo estes ser abertos para o processo de ventilação se realizar. Se os ocupantes não executarem os procedimentos corretamente a eficiência do sistema poderá ser posta em causa sendo o desconforto térmico uma realidade.

É evidente que a ventilação noturna possui um potencial único para melhorar as condições de conforto térmico e diminuir o consumo energético da estação de arrefecimento.

3. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RURAIS REABILITADOS

3.1. OBJETIVOS

A avaliação experimental do desempenho térmico do edifício em estudo é fundamental. Identificaram-se as soluções construtivas e quantificaram-se os parâmetros condicionadores do desempenho térmico dos apartamentos do edifício em estudo – Apartamento 1, com isolamento na caixa-de-ar das paredes de envolvente exterior, e Apartamento 2, sem isolamento nas paredes de envolvente exterior de grande massa e de elevada espessura.

O conhecimento da envolvente, das condições de funcionamento e da ocupação do edifício, possibilita: avaliar a temperatura do ar interior no Inverno e no Verão; verificar o efeito da ventilação noturna no Verão; quantificar o desconforto através do modelo da Norma EN 15251 [28] e validar o modelo numérico desenvolvido no WUFI Plus.

Assim sendo, os objetivos, estabelecidos para a avaliação experimental são os seguintes:

- Medir a temperatura do ar e humidade relativa exterior durante um ano, de forma: i) a conhecer em detalhe o clima local; ii) analisar o conforto térmico no Inverno e no Verão; iii) validar o modelo de simulação numérica criado com o WUFI Plus;
- Monitorizar a temperatura do ar interior, de cada apartamento, para caracterizar: i) desempenho dos apartamentos na estação de aquecimento, em regime de flutuação livre, em regime de aquecimento contínuo e em regime de aquecimento intermitente; ii) desempenho dos apartamentos na estação de arrefecimento; iii) avaliar o conforto térmico, de cada apartamento, para os períodos referidos, com base na Norma EN 15251 [28];
- Tendo em vista a validação do modelo de simulação numérica utilizado (WUFI Plus), mediu-se, o caudal de ventilação natural e o caudal de ventilação mecânica da sala/cozinha (equipamento de extração). Através do caudal de ventilação da sala/cozinha avaliar a importância do efeito da ventilação noturna no Verão.

Nos subcapítulos seguintes descreve-se o edifício e os procedimentos da monitorização higrotérmica e os resultados obtidos.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO MONITORIZADO

3.2.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

No presente subcapítulo apresenta-se o edifício-tipo em estudo. É um edifício tradicional do Minho, localizado em zona rural, com 2 pisos, piso -1 e 0. O piso -1 é constituído por espaços não úteis para arrumação. O piso 0 é constituído por dois apartamentos de tipologia T1: Apartamento 1 e Apartamento 2, e uma sala comum, independente dos apartamentos. Na Figura 27 apresentam-se as plantas dos dois pisos.

Ambos os apartamentos foram reabilitados, com uma estratégia de base distinta. A diferença, principal, consiste na forma como as paredes de envolvente interior e exterior foram reabilitadas. Enquanto as paredes exteriores do Apartamento 1 estão isoladas termicamente na caixa-de-ar (entre a parede existente e pano de tijolo cerâmico), as do Apartamento 2 não foram isoladas pelo facto de apresentarem uma elevada espessura e uma grande massa, superior a 1500 kg/m^2 . Para além deste aspeto, a área de envidraçados também foi, profundamente, alterada no Apartamento 1, sendo de 17 m^2 , o que origina uma relação A_{pav}/A_{env} , de $0,26$ ($A_{pav} = 65,7 \text{ m}^2$). O Apartamento 2 possui uma área de envidraçado muito reduzida, com $3,9 \text{ m}^2$, obtendo-se uma relação A_{pav}/A_{env} , de $0,06$ ($A_{pav} = 61,4 \text{ m}^2$).

Informação acerca da geometria, orientação e constituição das soluções construtivas podem ser visualizados nas Figuras 27 a 33 e Quadro 13.



Fig.27 – Planta do piso -1 e 0 do edifício.



Fig.28 – Alçado Sul do Apartamento 1 e 2.



Fig.29 – Alçado Nascente do Apartamento 2.



Fig.30 – Alçado Poente do Apartamento 1 e alçado Sul dos Apartamentos.



Fig.31 – Interior do Apartamento 2 (paredes sem isolamento).



Fig.32 – Interior do Apartamento 1 (paredes com isolamento na caixa-de-ar).

No Quadro 13 apresentam-se as descrições das soluções construtivas sendo identificadas na Figura 33.

Quadro 13 – Descrição das soluções construtivas de envolvente dos Apartamentos.

	Elementos	Descrição e valor de U [$W/m^2\text{°C}$]
Pavimentos	Pavimento em contacto com o exterior sem isolamento.	Laje de vigotas de betão pré-esforçado com 25 cm de espessura; camada de regularização, revestimento interior com soalho de madeira (sala/cozinha do Apartamento 1) ou ardósia (quarto de banho do Apartamento 1 e 2 e circulação do Apartamento 2). $U_{\text{soalho de madeira}} = 1,43 W/m^2\text{°C}$. $U_{\text{ardósia}} = 2,41 W/m^2\text{°C}$.
	Pavimento em contacto com o exterior com isolamento.	Revestimento exterior em gesso cartonado com uma espessura de 15 mm; isolamento térmico com 4 cm de espessura; laje de vigotas de betão pré-esforçado com 25 cm de espessura; camada de regularização; revestimento interior em soalho de madeira (quartos do Apartamento 1) ou ardósia (quarto do Apartamento 2). $U_{\text{soalho de madeira}} = 0,49 W/m^2\text{°C}$. $U_{\text{ardósia}} = 0,57 W/m^2\text{°C}$.
	Pavimento em contacto com o solo (Apartamento 2)	Lajetas de granito, 30 cm de espessura. $U = 3,61 W/m^2\text{°C}$.
Paredes	Paredes exteriores e em contacto com a sala comum (espaço não aquecido) do Apartamento 1.	Alvenaria de granito com 75 cm de espessura; caixa-de-ar com 5 cm de espessura; isolamento térmico com 5 cm de espessura; tijolo cerâmico com 11 cm de espessura; reboco tradicional de ligantes hidráulicos com 2 cm de espessura. $U_{\text{parede exterior}} = 0,39 W/m^2\text{°C}$, $U_{\text{parede interior}} = 0,38 W/m^2\text{°C}$.
	Paredes exteriores e em contacto com a sala comum (espaço não aquecido) do Apartamento 2.	Alvenaria de granito com 75 cm de espessura. $U_{\text{parede exterior}} = 2,28 W/m^2\text{°C}$, $U_{\text{parede interior}} = 1,89 W/m^2\text{°C}$.
Cobertura	Cobertura inclinada em contacto com o exterior do Apartamento 1 e 2.	Telha canudo cerâmica; isolamento térmico, com 6 cm de espessura; barreira para-vapor; laje em betão armado com 22 cm de espessura, revestimento interior em reboco pintado (Apartamento 1) ou por pintura sobre betão (Apartamento 2). $U = 0,44 W/m^2\text{°C}$.
Envidraçados	Envidraçado J1 e J2	Caixilharia em madeira com vidro duplo de baixa emissividade. $U_w = 3,30 W/m^2\text{°C}$
	Envidraçado J3, J4 e J6	Caixilharia em madeira com vidro duplo de baixa emissividade; proteção solar através de portadas interiores em madeira de cor clara. $U_{\text{wdn}} = 2,30 W/m^2\text{°C}$
	Envidraçados J5	Caixilharia em madeira com vidro duplo de baixa emissividade; proteção exterior através de estores venezianos metálicos de cor clara (cinzenta prateada). $U_{\text{wdn}} = 2,30 W/m^2\text{°C}$
	Envidraçado J7 e J8.	Caixilharia em madeira com vidro simples; proteção solar através de portadas interiores em madeira de cor clara. $U_{\text{wdn}} = 3,90 W/m^2\text{°C}$.
	Envidraçado J9	Caixilharia em madeira com vidro simples laminado. $U_w = 5,10 W/m^2\text{°C}$.
Portas	Porta exterior P1, P2, P3 e P4	Porta exterior em madeira. $U = 2,09 W/m^2\text{°C}$.



Fig.33 – Identificação das soluções construtivas.

3.2.2. PARÂMETROS MONITORIZADOS E DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE MONITORIZAÇÃO

O conhecimento das condições higrotérmicas dos edifícios rurais é de suma importância, por isso desenvolveu-se uma campanha experimental com o objetivo de avaliar: o desempenho térmico dos apartamentos, o nível de conforto térmico e validar o modelo de simulação em regime dinâmico.

A avaliação experimental no âmbito deste trabalho centra-se na monitorização dos seguintes parâmetros: temperatura do ar interior e exterior, humidade relativa interior e exterior, caudal de ventilação e fluxo de calor através de uma parede de fachada.

3.2.2.1. Medição da Temperatura do Ar e da Humidade Relativa

As medições, *in situ*, da temperatura do ar e da humidade relativa têm por objetivo caracterizar os seguintes períodos:

- Estação de aquecimento, compreende os meses de Janeiro a Maio e de Outubro a Dezembro;
- Estação de arrefecimento, compreende os meses de Junho a Setembro.

A meia-estação não foi estudada em profundidade, dada a maior dificuldade em tipificar os resultados obtidos.

Os registos da temperatura do ar interior e exterior serviram para validar o modelo numérico utilizado no presente trabalho (WUFI Plus) comparando os registos de temperatura do ar interior *in situ* com os resultados obtidos por simulação.

A monitorização da temperatura do ar, e da humidade relativa foi efetuada com recurso a sensores colocados nos compartimentos do edifício. Os equipamentos utilizados para este fim são da marca HOBO®. Segundo o fabricante, a temperatura a registar pode variar entre -20°C a 70°C, e a humidade relativa entre 5% a 95%, sendo a precisão, de 0,35°C, no intervalo de 0°C a 50°C, para a temperatura, e de aproximadamente 2,5%, no intervalo entre 10% a 90%, para a humidade relativa.

Na Figura 34 mostra-se o tipo de sensor utilizado e as suas localizações em planta.



Fig.34 – Sensores para medir a temperatura do ar e a humidade relativa, interior e exterior, e planta com a sua localização.

Para a medição da temperatura do ar e da humidade relativa exterior foi utilizado um “*radiation shield*” (Figura 35), instalado a 1 m do pavimento e 2,5 m da parede, de forma a obter medições que traduzam o clima da envolvente do edifício.

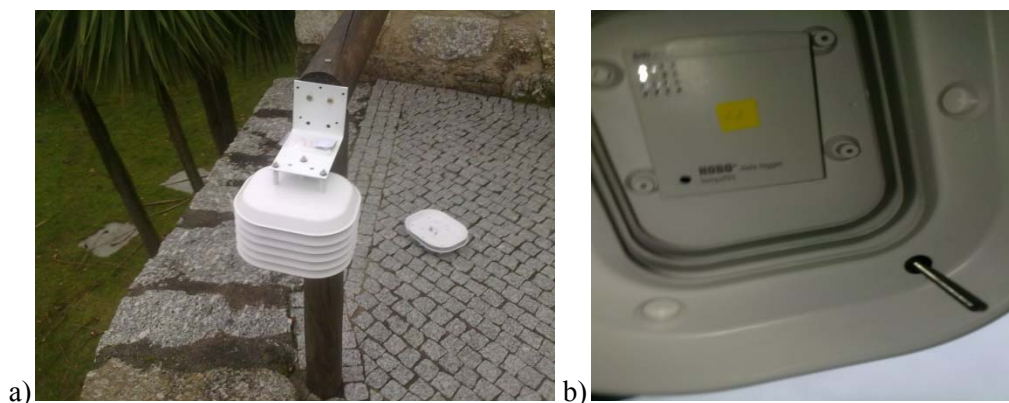


Fig.35 – Medição da temperatura do ar e humidade relativa exterior *in situ*. a) *radiation shield*; b) sensor de medição de temperatura do ar e humidade relativa dentro do *radiation shield*.

É importante referir que os sensores foram calibrados com recurso a uma câmara climática, estabelecendo-se diversos patamares de temperatura e humidade relativa durante 24 horas, este procedimento foi efetuado antes e depois das medições, verificando-se, assim, o perfeito funcionamento dos sensores. No anexo I apresentam-se os resultados da calibração anterior e posterior à medição *in situ*.

3.2.2.2. Medição do Caudal de Ventilação – Quartos

A medição do caudal de ventilação natural dos quartos dos apartamentos em estudo foi efetuada com a finalidade de dispor de um caudal, a introduzir no modelo numérico.

A medição do caudal de ventilação efetuou-se através do método do gás traçador – técnica do declive, utilizando-se, para a realização deste ensaio, o analisador de gás foto acústico da INNOVA do L.F.C. com capacidade para determinar a concentração de SF₆ (hexafluoreto de enxofre) em partes por milhão (ppm) [46].

A técnica escolhida, técnica do declive, baseia-se na libertação de uma quantidade de gás no espaço a medir, estabelecendo-se uma concentração inicial uniforme recorrendo a ventiladores. O decaimento da

concentração do gás ao longo do tempo é registado de forma a obter a renovação horária – técnica transiente. A curta duração do ensaio faz com que a taxa de renovação do ar obtida seja característica somente desse intervalo de tempo [46].

Para a análise de um compartimento admite-se que o regime é permanente (temperatura do ar exterior e vento estacionários – caudais aproximadamente constantes), que a concentração do gás traçador no exterior é nula e que não há emissão nem absorção de gás no interior. Nestas circunstâncias o balanço da massa do gás traçador pode expressar-se pela seguinte equação diferencial:

$$V \frac{\partial c(t)}{\partial t} = -qc(t) \Leftrightarrow c(t) = c_0 e^{-\frac{q}{V}t} \Leftrightarrow \frac{q}{V} = RPH = -\frac{\ln\left(\frac{c_0}{c(t)}\right)}{t} \quad (8)$$

Em que:

- V , volume do quarto [m^3];
- c , concentração do gás traçador [ppm];
- q , caudal volúmico do ar [m^3/s];
- c_0 a concentração inicial do gás traçador [ppm].

Desta forma, para o cálculo das infiltrações ou caudais de ventilação em espaços que possam ser considerados monozona, é suficiente introduzir gás traçador no espaço até existir uma concentração inicial uniforme, c_0 . De seguida regista-se a evolução da concentração inicial uniforme $\ln(c)$ versus tempo, que pela equação 8, é uma reta. O módulo do declive da reta, q/V , é a incógnita que permite o cálculo das renovações horárias, RPH . Este ensaio é regulado pelas Normas ISO 12569 e ASTM E741 – 00 [46].

Para o presente trabalho efetuaram-se dois ensaios, um para cada apartamento, no mesmo dia (1 de Março de 2013), de forma que, as condições climatéricas exteriores fossem tão constantes quanto possível. Na Figura 36 ilustram-se os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

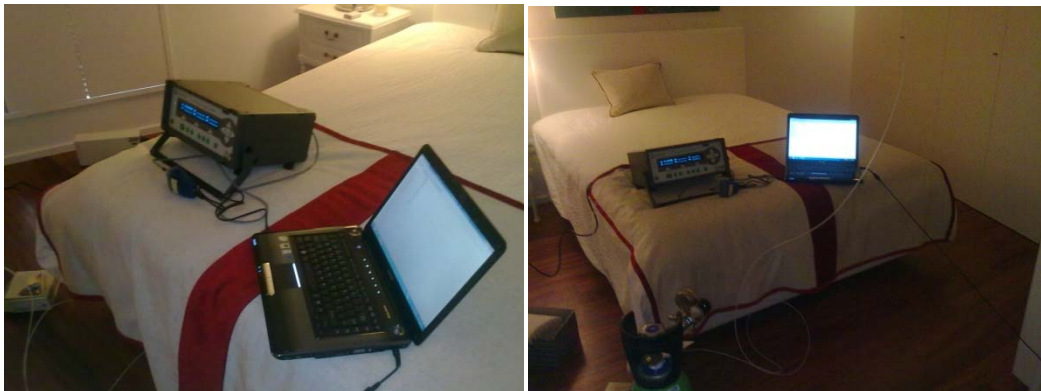


Fig.36 – Exemplo do equipamento do método do gás traçador.

3.2.2.3. Medição do Caudal de Ventilação – Sala/Cozinha

A avaliação da ventilação noturna como estratégia durante a estação de arrefecimento é essencial neste estudo. Tendo-se desenvolvido uma campanha de medições experimentais que visava caracterizar o sistema de ventilação mecânico, marca S&P modelo TD – 250/100 Silent, instalado nas salas/cozinhas dos dois apartamentos. Tal como para a ventilação dos quartos, o valor encontrado através desta medição serve para introduzir no modelo numérico que vai ser objeto de validação.

A medição do caudal de extração efetuou-se com um anemómetro (Figura 37). Colocaram-se os ventiladores mecânicos em funcionamento e registaram-se os valores de velocidade fornecidos pelo anemómetro.

Com este procedimento efetuaram-se os registos de velocidade para cada ventilador de cada apartamento e procedeu-se ao cálculo do caudal para cada um dos instantes, uma vez que, as medidas da secção do tubo de extração e ventilação eram conhecidas (100 mm de diâmetro).

Nas fotos da Figura 37 podem observar-se algumas fotografias obtidas durante os ensaios.



Fig.37 – Ensaios da medição do caudal de ventilação mecânica nos apartamentos.

3.2.2.4. Medição do Fluxo de Calor da Parede

A medição de fluxo de calor de uma parede exterior de grande espessura e massa efetuou-se com dupla finalidade: avaliar as trocas de calor entre a parede e o ambiente interior e calcular o coeficiente de transmissão térmica da parede em regime dinâmico para o poder comparar com valores tabelados – ITE 50 [47] e ITE 54 [48].

Este tipo de procedimento, já tinha sido adotado por Byrne *et al.* [49], que mediu *in situ* o comportamento térmico de um edifício e das paredes exteriores, em regime transiente e quase de equilíbrio, comparando-os com valores calculados segundo normas nacionais e simulados numericamente. Outro exemplo é o estudo elaborado por Gagliano *et al.* [50], que avaliou o comportamento térmico de um edifício histórico, com paredes de pedra, de grande massa, em condições dinâmicas e comparando os resultados obtidos *in situ* com resultados simulados numericamente.

Para efetuar a medição do fluxo de calor utilizaram-se dois fluxímetros colocados em faces opostas na mesma posição, um na superfície interior e o outro na superfície exterior. Juntamente com os fluxímetros colocou-se um termopar em cada superfície da parede, de forma a medir a temperatura superficial da mesma. Os fluxímetros e os termopares foram ligados a um sistema de aquisição de dados que permite uma leitura quase contínua dos valores da temperatura superficial interior e exterior e do fluxo de calor, com os quais se calculam os valores do coeficiente de transmissão térmica. Refira-se que se dispunha dos valores da temperatura do ar interior e exterior.

Na Figura 38 ilustra-se o processo descrito.



Fig.38 – Medição do fluxo de calor *in situ* (sistema de aquisição de dados, fluxímetros e termopares).

3.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

De seguida apresentam-se os resultados experimentais das diversas campanhas levadas a cabo *in situ*, entre Outubro de 2012 e Outubro de 2013, designadamente temperatura do ar interior e exterior, caudal de ventilação (quartos e sala/cozinha), fluxo de calor da parede para o ambiente interior e respetivo coeficiente de transmissão térmica, U .

3.3.1. CLIMA EXTERIOR

Os dados recolhidos com a medição do clima exterior *in situ*, permitem compreender, em pormenor e com rigor, a solicitação climática local e a validação do modelo de simulação numérica.

Na Figura 39 apresenta-se a variação da temperatura do ar exterior ao longo do ano das medições para Revelhe e Cabeceiras de Basto.

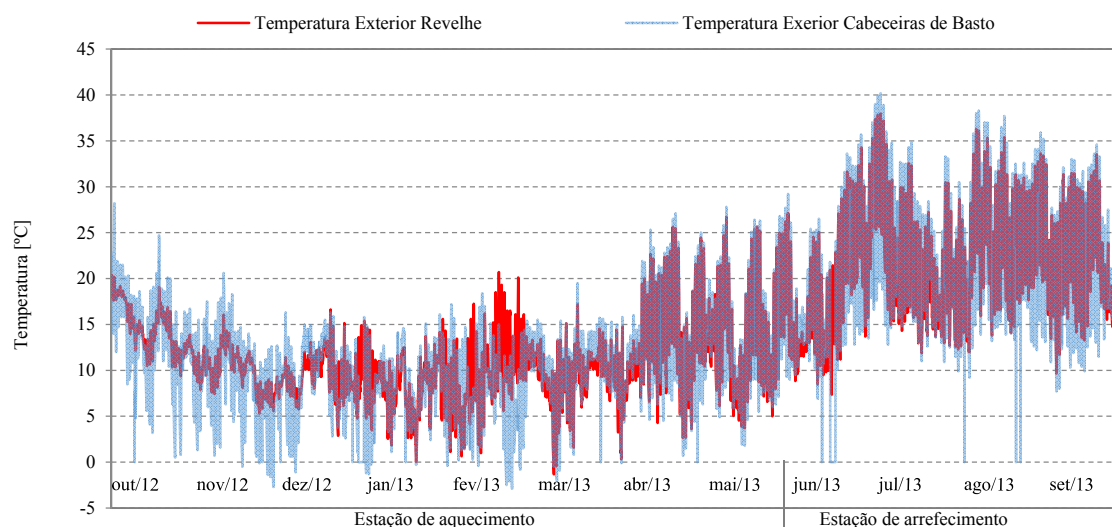


Fig.39 – Registos da temperatura do ar exterior medida *in situ* – 2012/2013.

No Quadro 14 apresenta-se a análise estatística da temperatura do ar exterior para Revelhe e Cabeceiras de Basto.

Quadro 14 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar exterior.

Variáveis estatísticas	Revelhe [°C]	Cabeceiras de Basto [°C]
Média	14,4	14,0
Máximo	38,0	40,2
Mínimo	-1,3	-2,9
Desvio Padrão	6,9	7,8
Mediana	13,2	12,8
Quartil 25	9,4	8,6
Quartil 75	18,7	18,1
Percentil 1%	2,3	-0,3
Percentil 5%	4,9	2,7
Percentil 95%	28,1	29,6
Percentil 99%	33,0	34,6

A fim de se completar a análise ao clima exterior apresenta-se, na Figura 40, a probabilidade acumulada da temperatura do ar exterior medida *in situ* e a da estação meteorológica de Cabeceiras de Basto.

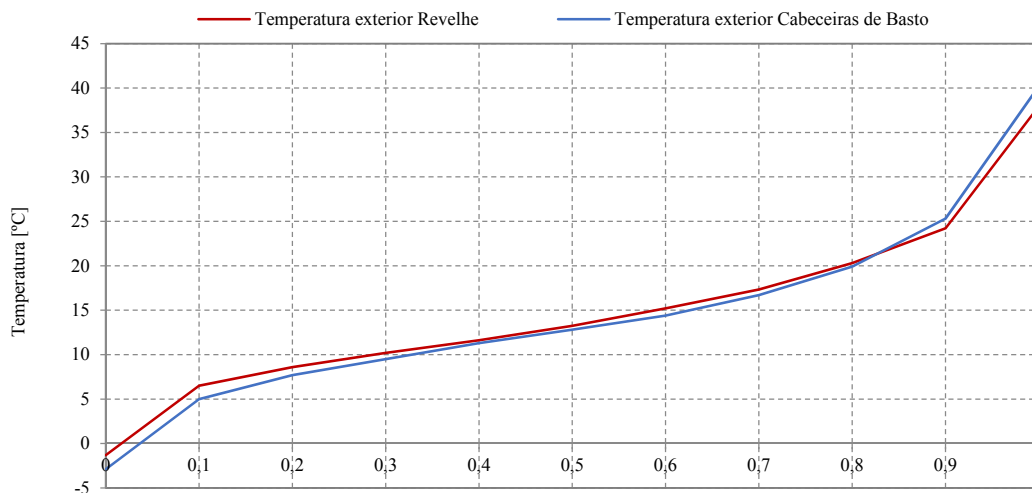


Fig.40 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar exterior medida *in situ* e na estação meteorológica de Cabeceiras de Basto.

Os resultados demonstram que, as diferenças entre a temperatura do ar exterior medida *in situ* e a registada na estação meteorológica de Cabeceiras de Basto são quase nulas. A temperatura do ar difere, com algum significado, no caso da mínima e máxima: o registo local (Revelhe – Fafe) registou uma temperatura do ar mínima de -1,3°C, e a de Cabeceiras de Basto registou a temperatura do ar mínima de -2,9°C; a temperatura do ar máxima registada na estação de Revelhe foi de 37,9°C, enquanto que, a registada na estação de Cabeceiras de Basto foi de 40,2°C.

No que se refere à humidade relativa exterior a Figura 41 mostra os registos obtidos durante a campanha experimental. Verifica-se que as medições obtidas *in situ*, seguem os padrões das medições da estação meteorológica de Cabeceiras de Basto.

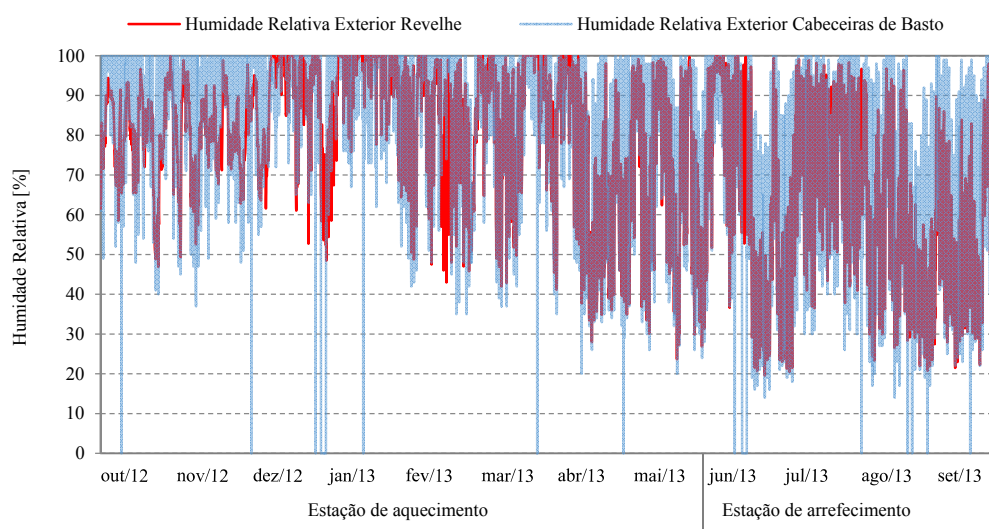


Fig.41 – Registos da humidade relativa exterior medida *in situ*.

No Quadro 15 apresentam-se as variáveis estatísticas da humidade relativa, para Revelhe e Cabeceiras de Basto.

Quadro 15 – Variáveis estatísticas da humidade relativa exterior.

Variáveis estatísticas	Revelhe [%]	Cabeceiras de Basto [%]
Média	75,1	80,6
Máximo	100,0	100,0
Mínimo	19,6	14,0
Desvio Padrão	20,8	22,0
Mediana	79,0	90,0
Quartil 25	61,1	66,0
Quartil 75	91,9	100
Percentil 1%	23,0	19,5
Percentil 5%	35,0	30,0
Percentil 95%	99,6	100,0
Percentil 99%	100,0	100,0

Verifica-se que as diferenças entre a humidade relativa exterior do clima local, Revelhe, e da estação meteorológica de Cabeceiras de Basto possuem uma diferença mais acentuada do que a verificada para a temperatura do ar. De forma a completar a análise, na Figura 42, apresenta-se a probabilidade acumulada da humidade relativa dos registos de Revelhe e de Cabeceiras de Basto.

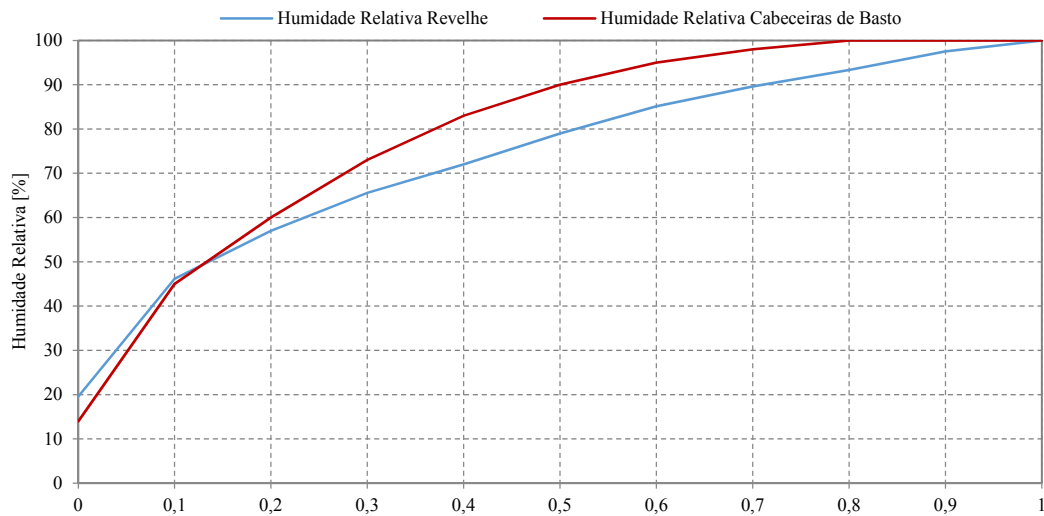


Fig.42 – Probabilidade acumulada da humidade relativa exterior medida *in situ*.

Dos resultados constata-se que para Revelhe, o valor mínimo é de 20%, enquanto que, o valor máximo é de 100% sendo o valor da mediana de 79%. Este valor da mediana revela que o clima é húmido, porque 50 % dos valores registados são superiores a 79%. Para Cabeceiras de Basto, o valor mínimo é de 14%, enquanto que, o valor máximo é de 100%, sendo a mediana de 90%.

A diferença entre os valores de humidade relativa, demonstra a dificuldade para efetuar uma análise higrotérmica do edifício, sendo esta uma das razões por se ter optado por uma análise apenas térmica.

Dos resultados obtidos, constata-se que se poderia ter utilizado os valores de Cabeceiras de Basto, no entanto, possuindo os valores locais, estes, como é lógico, são os mais adequados, por proporcionarem resultados com maior rigor.

3.3.2. CAUDAL DE VENTILAÇÃO – QUARTOS

Efetuar-se, em condições similares, em Março do ano de 2013, dois ensaios, um para cada apartamento. Ambos tinham o aquecimento ligado de forma a aumentar a diferença de temperatura entre o interior e o exterior, as portas, os envidraçados e proteções solares 100% ativadas, com a finalidade de se obter um valor comparável com as condições noturnas.

Na Figura 43 apresentam-se os valores obtidos ao longo do ensaio que permite calcular o caudal de ventilação.

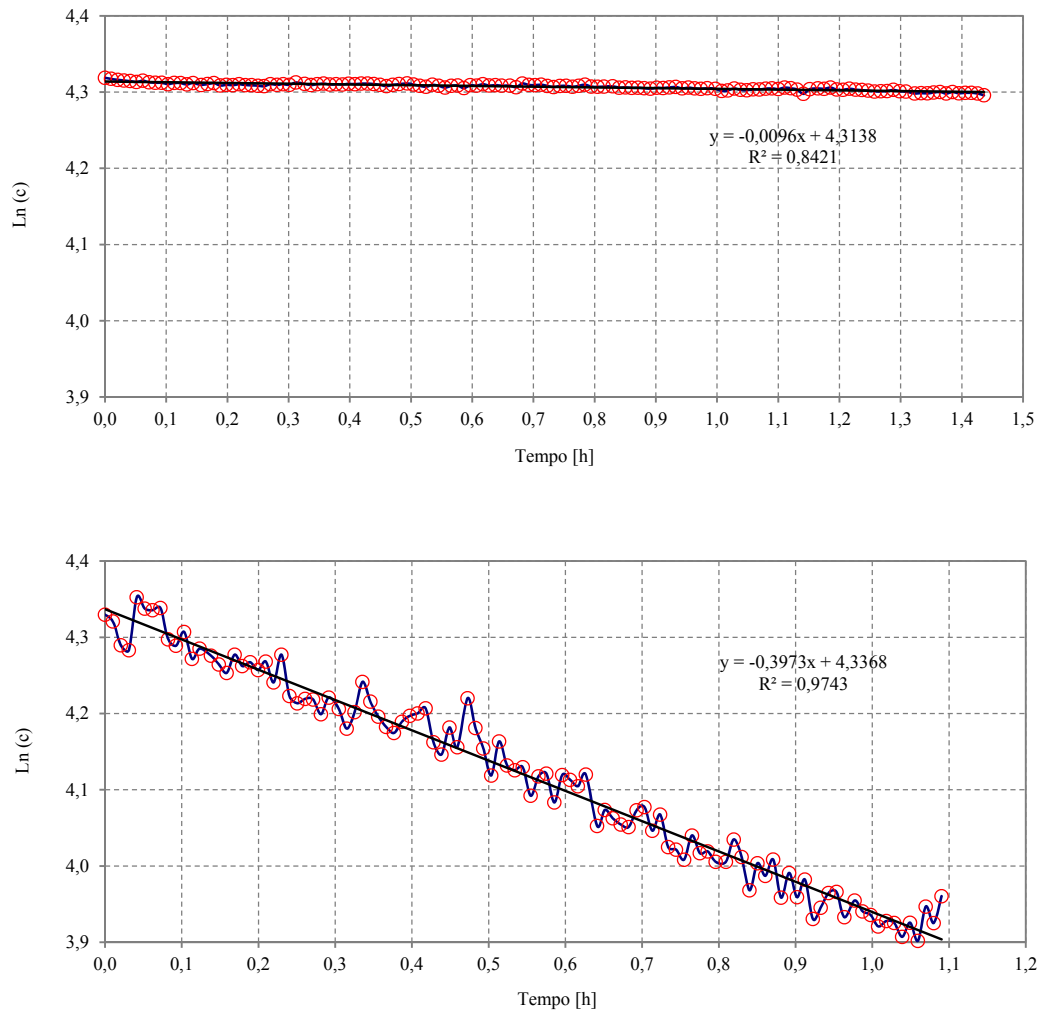


Fig.43 – Resultados do ensaio do gás traçador para o Apartamento 1 (gráfico superior) e Apartamento 2 (gráfico inferior).

Com base nos resultados das medições e através da equação 8 obteve-se um caudal de ventilação de 0,01 RPH (h^{-1}) para o Apartamento 1 e de 0,4 RPH (h^{-1}) para o Apartamento 2.

3.3.3. CAUDAL DE VENTILAÇÃO – SALA/COZINHA

A medição do caudal de ventilação na sala/cozinha efetuou-se em Agosto do ano de 2013. As condições criadas para a realização do ensaio foram similares em ambos os apartamentos: portas, envidraçados e proteções solares foram ativadas a 100% e colocados os ventiladores em funcionamento.

Com o anemómetro registou-se a velocidade instantânea. Obtida a velocidade e conhecido o diâmetro da conduta (100mm), calculou-se o caudal, Q , através da seguinte equação:

$$Q = U \times A \quad (9)$$

Em que:

- U , velocidade [m/s];
- A , área da secção [m²].

Efetuaram-se, para cada apartamento, noventa e nove medições ao longo de aproximadamente dez minutos, e determinou-se o caudal para cada uma delas. Com todos os instantes calculou-se o valor médio para cada apartamento. No Apartamento 1, o valor médio do caudal de ventilação mecânica apurado, foi de 174 m³/h, no Apartamento 2 foi de 193 m³/hora. O catálogo do fabricante refere, o valor de 180 m³/h para o caudal, verificando-se assim uma pequena diferença, entre os números apurados com o anemómetro e os que constam no catálogo do fabricante, adotando-se o valor de 180 m³/h, para a validação do modelo de simulação numérica.

Na Figura 44 ilustram-se os resultados do caudal de extração.

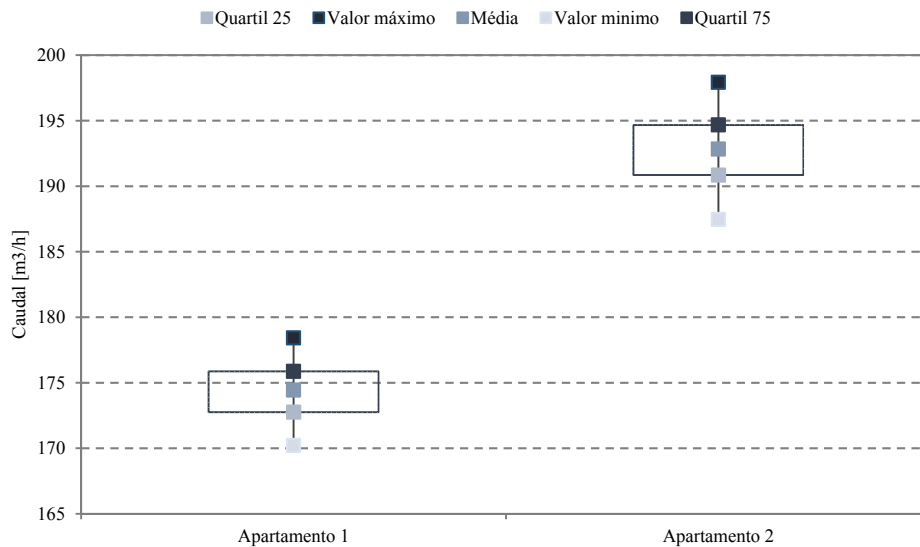


Fig.44 – Resultados dos ensaios para o cálculo do caudal de extração mecânica dos Apartamentos.

3.3.4. POTÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS DE AQUECIMENTO

Apesar da especificação dos equipamentos, efetuou-se a medição da potência de todos os aparelhos que constituem o sistema de aquecimento de ambos os apartamentos, no Quadro 16 apresentam-se os resultados.

Quadro 16 – Potência medida *in situ* dos radiadores elétricos.

Compartimento	Apartamento 1	Apartamento 2
Sala/cozinha	1000 W	-
Instalação sanitária	750 W	750 W
Quarto	2 x 800 W	1250 W
Hall	-	750 W

Estes foram os valores considerados no modelo de simulação numérica desenvolvido no WUFI Plus.

3.3.5. RESULTADOS DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

Sendo a temperatura do ar um parâmetro fundamental para avaliar o desempenho térmico de um edifício deste tipo efetuou-se uma campanha de monitorização termohigrométrica desenvolvida na estação de aquecimento correspondente ao período de Outubro de 2012 a Maio de 2013. Efetuaram-se registos de medições de 10 em 10 minutos ao longo da estação e em todos os compartimentos dos apartamentos, totalizando um número elevado de medições de temperatura do ar interior: cerca de 450 000 registos.

Em ambos os apartamentos, os registos foram feitos com os envidraçados encerrados e suas proteções ativadas a 100%, sendo apenas ocupados alguns fins-de-semana. Foram aquecidos durante um período de tempo com dois regimes: um regime contínuo durante 24 horas, e outro intermitente, durante 6 horas.

Os dados obtidos nos dois apartamentos foram analisados e estatisticamente tratados. Num primeiro momento a análise feita refere-se ao período de flutuação livre, entre Outubro e Dezembro de 2012 e entre Abril e Maio de 2013. Numa segunda fase, a análise é específica, e refere-se aos períodos de aquecimento dos apartamentos, entre Janeiro e Abril de 2013.

É importante referir que os apartamentos diferem, para além das soluções construtivas das paredes exteriores, na orientação e na relação A_{env}/A_{pav} (26% para o Apartamento 1 e 6% para o Apartamento 2). A análise crítica e as comparações dos resultados efetuadas devem ter estes factos em consideração, por ser decisiva a sua influência nos resultados.

3.3.5.1. Regime de Flutuação Livre da Temperatura do Ar Interior

Na Figura 45 apresenta-se as temperaturas do ar interior dos Apartamentos 1 e 2 ao longo dos meses da estação de aquecimento em regime de flutuação livre. A temperatura do ar interior flutuou livremente nos meses de Outubro, Novembro, Dezembro, Abril e Maio. Nos restantes meses o sistema de aquecimento esteve em funcionamento.

De referir que a temperatura do ar interior apresentada para cada apartamento é referente à média de todos os sensores de temperatura e humidade relativa, adotando-se este procedimento sempre que se apresentar a temperatura do ar interior dos apartamentos.

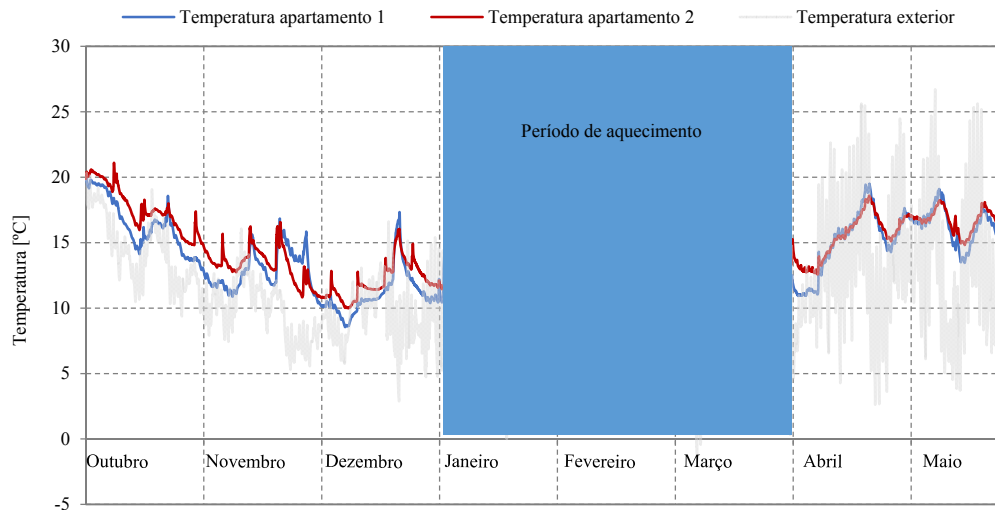


Fig.45 – Resultados do registo da temperatura do ar interior e exterior durante a estação de aquecimento em flutuação livre.

Verifica-se que a temperatura do ar interior dos dois apartamentos desenvolve-se de forma idêntica, sendo um pouco condicionada no Apartamento 2, devido à sua utilização nos fins-de-semana, revelando um pequeno acréscimo da temperatura do ar interior neste período de monitorização.

É notório que, em ambos os apartamentos, a temperatura de referência de conforto para a estação de aquecimento, 20°C, se atinge de forma pontual. Da análise dos resultados verifica-se que a temperatura do ar exterior influencia a temperatura do ar interior variando juntamente com esta ao longo da estação, como era expectável.

A Figura 46 corresponde à temperatura do ar interior média mensal dos Apartamentos, constatando-se o referido anteriormente: a temperatura do ar interior varia de forma idêntica nos dois Apartamentos, condicionada à temperatura do ar exterior, nos períodos em que o sistema de aquecimento está inativo.

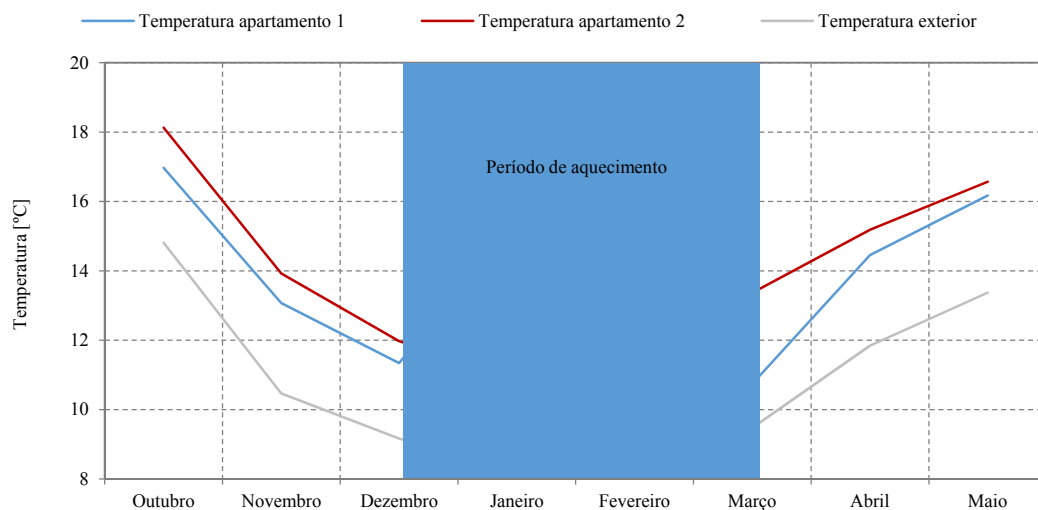


Fig.46 – Temperatura do ar interior média mensal durante a estação de aquecimento.

De forma a analisar-se detalhadamente o desempenho térmico apresentam-se, na Figura 47 e Figura 48, dois gráficos do tipo *boxplots* onde se ilustra a média, mediana, valor máximo, valor mínimo, quartil 25 e 75 para cada apartamento. Através da representação das *boxplots* é possível constatar a distribuição

da temperatura do ar interior, sendo que dentro de cada *boxplot* encontram-se 50% dos valores registados.

De forma a tornar a análise mais fidedigna, analisa-se, numa primeira fase, o período em que a temperatura do ar interior flutuou livremente, e posteriormente, numa segunda fase, o período em que o sistema de aquecimento esteve em funcionamento.

Assim sendo, a análise comparativa destes valores, para o período de Outubro a Dezembro do ano de 2012 e de Abril a Maio do ano de 2013, verifica-se que: as diferenças entre os quartis 25 e 75 são mais acentuadas no Apartamento 1, assim como a diferença entre o mínimo e o máximo valor mensal. Em ambos os apartamentos a média e a mediana diferem muito pouco uma da outra sendo quase coincidentes no caso de alguns meses.

Verifica-se, assim, que a amplitude térmica no Apartamento 1 é, em relação à do Apartamento 2, em termos médios mais elevada, o que demonstra que o Apartamento 1, é mais suscetível às alterações do clima exterior resultante da sua menor inércia térmica e maior área envidraçada.

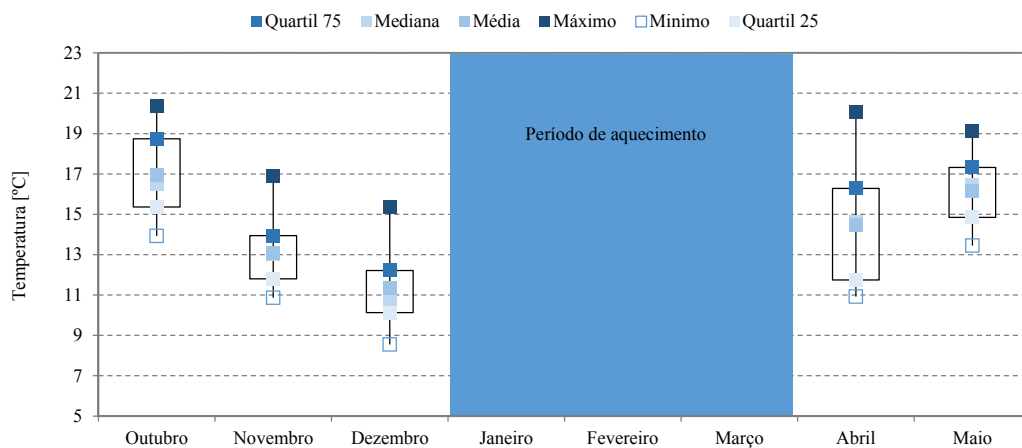


Fig.47 – Distribuição da temperatura do ar interior do Apartamento 1 monitorizada durante a estação de aquecimento.

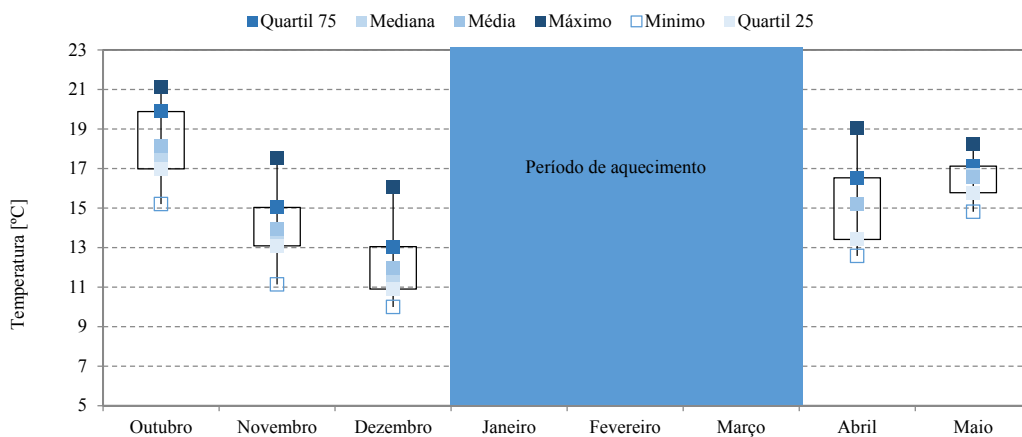


Fig.48 – Distribuição da temperatura do ar interior do Apartamento 2 monitorizada durante a estação de aquecimento.

A Figura 49 refere-se à probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, para os meses referidos. Em ambos, os valores são aproximados: o Apartamento 1 possui uma temperatura do ar interior que varia entre 8,6°C e 20,2°C, resultando uma amplitude térmica global de 11,6°C; o Apartamento 2 possui uma temperatura do ar interior que varia entre 10,0°C e 21,1°C, resultando uma amplitude térmica global de 11,1°C.

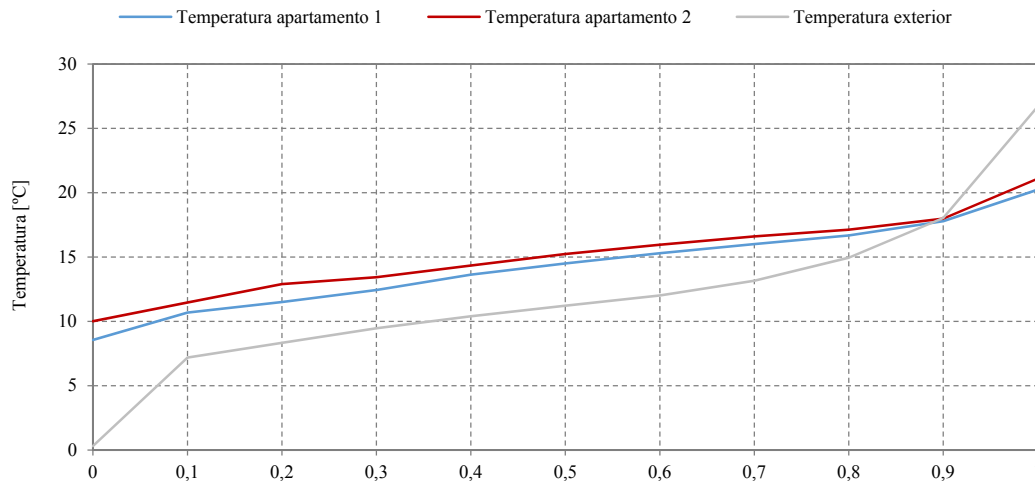


Fig.49 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na estação de aquecimento em flutuação livre.

A fim de completar a análise da temperatura do ar interior na estação de aquecimento apresentam-se, no Quadro 17, os valores das variáveis estatísticas mais importantes para cada um dos apartamentos.

Quadro 17 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior durante a estação de aquecimento em flutuação livre.

Variáveis estatísticas	Apartamento 1 [°C]	Apartamento 2 [°C]
Média	14,1	15,0
Máximo	20,2	21,1
Mínimo	8,6	10,0
Desvio Padrão	2,7	2,5
Mediana	14,5	15,2
Quartil 25	11,9	13,1
Quartil 75	16,4	16,9
Percentil 1%	8,6	10,1
Percentil 2%	8,8	10,5
Percentil 5%	9,2	10,9
Percentil 95%	18,9	19,4
Percentil 98%	19,4	20,2
Percentil 99%	19,5	20,4

Os resultados apresentados no Quadro 17 refletem um desempenho térmico global substancialmente melhor do Apartamento 2. O valor da temperatura do ar interior média é mais elevado, assim como da mediana, sendo a diferença entre estes valores, 0,2°C, muito próxima, o que reflete um comportamento mais equilibrado.

O Apartamento 1 apresenta uma diferença entre a média e mediana ligeiramente mais elevada, 0,4°C, evidenciando-se maior suscetibilidade térmica. Esta diferença, que não é substancial, deve-se à inércia térmica mais fraca e à maior área de envidraçados.

3.3.5.2. Regime de Aquecimento Contínuo

Efetuiu-se um período de aquecimento em regime contínuo para ambos os apartamentos. De referir, que a análise, para o período de aquecimento, é relativa ao quarto de cada apartamento. Esta opção deve-se ao facto do sistema de aquecimento, nestes compartimentos, ter funcionado de forma eficaz, não se tendo registado qualquer falha, como ocorreu noutros compartimentos dos apartamentos.

Na Figura 50 apresentam-se os resultados diários para o quarto do Apartamento 1. Do dia 7 ao dia 19 de Janeiro de 2013, o quarto foi aquecido de forma contínua.

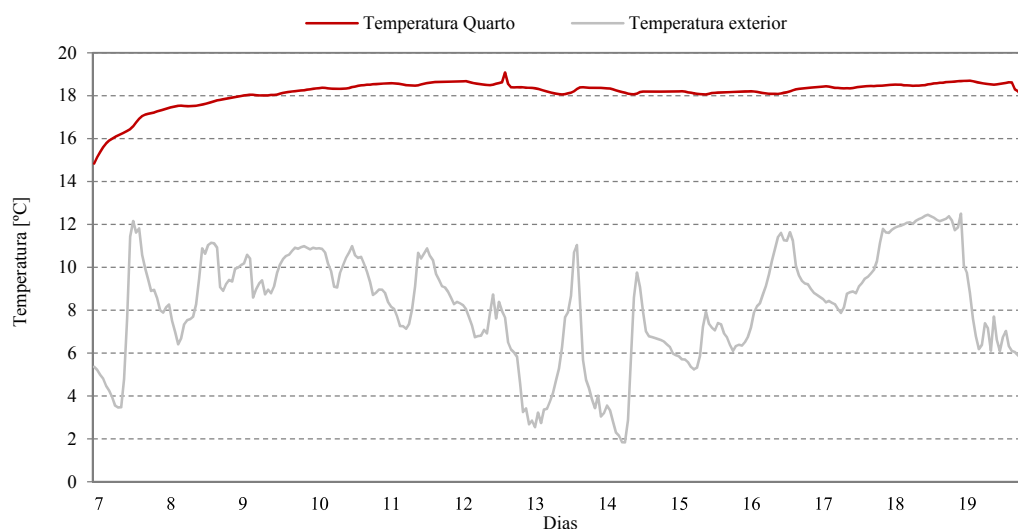


Fig.50 – Registos da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento contínuo entre o dia 7 a 19 de Janeiro de 2013.

Elaborou-se o gráfico tipo *boxplot*, Figura 51, para o período de aquecimento contínuo entre o dia 10 e o dia 19 de Janeiro de 2013, uma vez que nos dias anteriores ainda não se tinha alcançado um patamar de temperatura do ar interior quase constante.

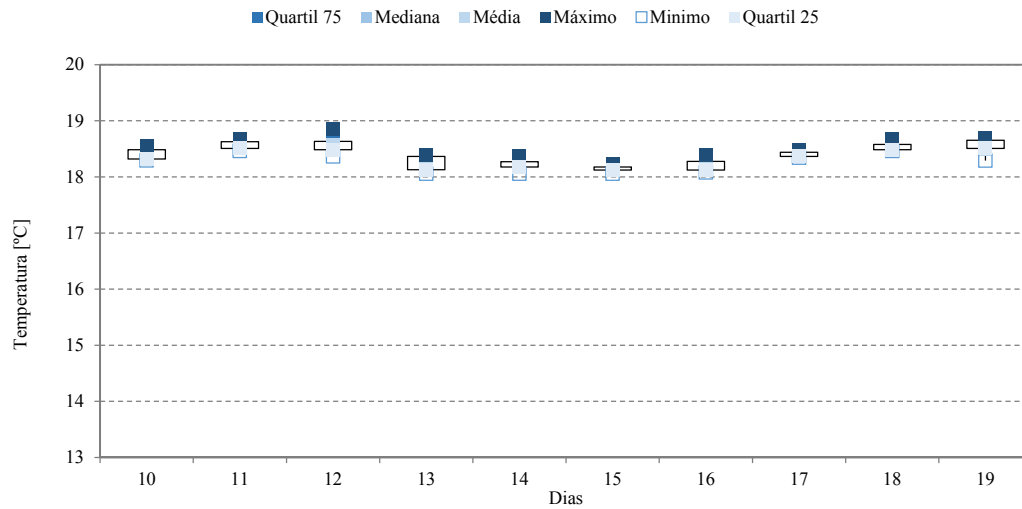


Fig.51 – Distribuição da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento em regime contínuo entre o dia 10 e 19 de Janeiro de 2013.

Da Figura 51 compreende-se que este período se caracteriza por um elevado equilíbrio de temperatura do ar interior, com uma variação de 1°C, e com a média e a mediana com valores quase idênticos.

No Quadro 18 apresentam-se os resultados principais para este período do quarto do Apartamento 1.

Quadro 18 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, do quarto do Apartamento 1, durante a estação de aquecimento em regime de aquecimento contínuo entre o dia 10 e 19 de Janeiro de 2013.

Variáveis estatísticas	Quarto – Apartamento 1 [°C]
Média	18,4
Máximo	19,1
Mínimo	17,7
Desvio Padrão	0,2
Mediana	18,4
Quartil 25	18,2
Quartil 75	18,5
Percentil 1%	18,0
Percentil 2%	18,1
Percentil 5%	18,1
Percentil 95%	18,7
Percentil 98%	18,7
Percentil 99%	18,7

Através dos resultados verifica-se que o aquecimento em regime contínuo proporcionou uma constância da temperatura do ar interior, com diminuta variação. Nestas condições o nível de conforto é aceitável estando acima da temperatura base de conforto estabelecida pelo REH [1].

Relativamente ao Apartamento 2, o período de aquecimento em regime contínuo decorreu desde o dia 15 de Fevereiro a 2 de Março de 2013, no entanto só entre o dia 21 de Fevereiro e 2 de Março se conseguiu ter o sistema a funcionar sem interrupções, pois derivado a falhas energéticas nos dias anteriores não foi possível. Na Figura 52 ilustra-se o período de aquecimento em regime contínuo para o Apartamento 2.

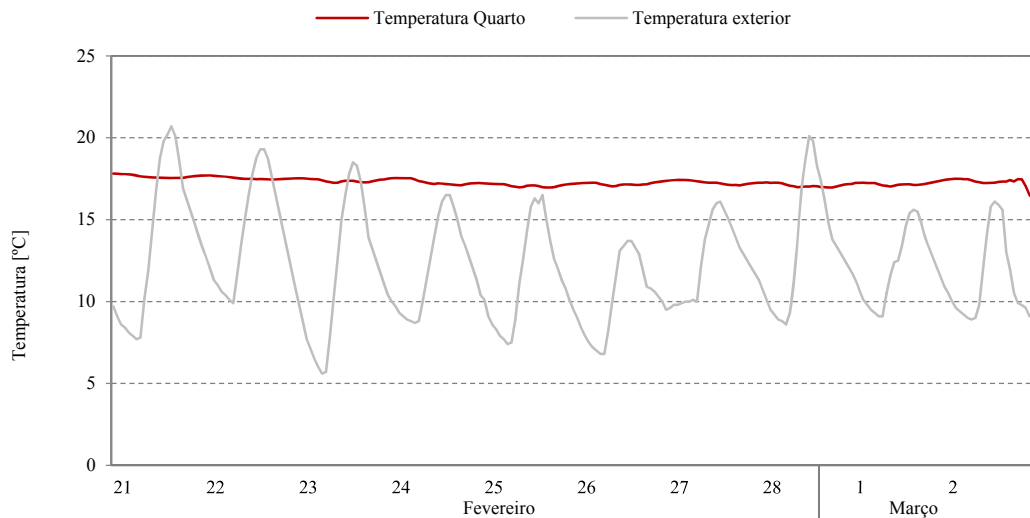


Fig.52 – Registos da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime contínuo entre o dia 21 de Fevereiro e 2 de Março de 2013.

Da análise da Figura 52 verifica-se, tal como para o Apartamento 1, uma temperatura do ar interior muito constante, as variações são diminutas. No gráfico tipo *boxplot*, (ver Figura 53) apresentam-se os dados para este intervalo de tempo, refletindo o referido.

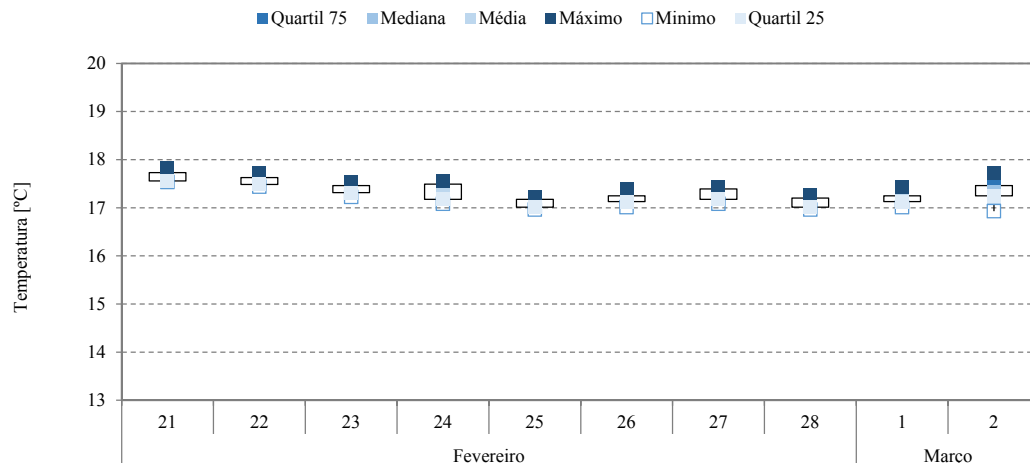


Fig.53 – Distribuição da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 2 medida durante o período de aquecimento em regime contínuo entre o dia 21 de Fevereiro e 2 de Março de 2013.

Da Figura 53 transparece um equilíbrio elevado, como se verificou no Apartamento 1. A temperatura do ar interior, neste período de tempo, não apresenta uma amplitude superior a 1°C, existindo uma proximidade muito diminuta e, em alguns dias, nula, entre os valores do quartil 25 e 75 e entre os valores da média e da mediana.

No Quadro 19 apresentam-se os resultados mais importantes da temperatura do ar interior para o quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime contínuo.

Quadro 19 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, do quarto do Apartamento 2, durante a estação de aquecimento em regime de aquecimento contínuo entre o dia 21 de Fevereiro e 2 de Março de 2013.

Variáveis estatísticas	Quarto – Apartamento 2 [°C]
Média	17,3
Máximo	17,8
Mínimo	16,1
Desvio Padrão	0,2
Mediana	17,3
Quartil 25	17,2
Quartil 75	17,5
Percentil 1%	16,7
Percentil 2%	17,0
Percentil 5%	17,0
Percentil 95%	17,7
Percentil 98%	17,8
Percentil 99%	17,8

De novo, os resultados do Quadro 19 refletem um comportamento muito regular da temperatura do ar interior. Este comportamento demonstra a efetividade do regime de aquecimento em contínuo. O nível de conforto é aceitável e próximo da temperatura de conforto de referência estabelecida pelo REH [1] (18°C) para a estação de aquecimento.

3.3.5.3. Regime de Aquecimento Intermitente

Realizou-se em ambos os apartamentos um período de aquecimento em regime intermitente (6 horas por dia). Tal como para o período de aquecimento em regime contínuo os resultados apresentados são relativos ao quarto de cada apartamento.

O período de aquecimento em regime intermitente do quarto do Apartamento 1, decorreu entre o dia 21 de Janeiro e o dia 15 de Fevereiro de 2013. Contudo, devido a falhas de energia e a uma ocupação entre o dia 10 e 12 de Fevereiro de 2013, optou-se por seleccionar o período de tempo entre o dia 27 de Janeiro e 9 de Fevereiro de 2013 para análise.

Na Figura 54 apresentam-se os resultados para o período de aquecimento intermitente do quarto do Apartamento 1.

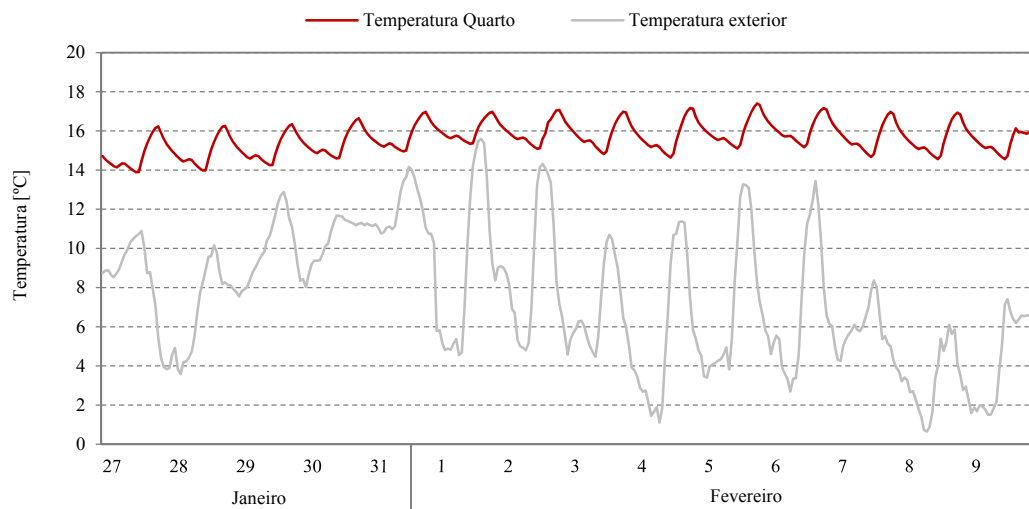


Fig.54 – Registo da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento em regime intermitente entre o dia 27 de Janeiro e 9 de Fevereiro de 2013.

Da Figura 54 constata-se, como era previsto, uma variação mais elevada da temperatura do ar interior e com registos mais baixos, em relação ao período de aquecimento em regime contínuo. A variação da temperatura do ar interior foi bastante semelhante para os vários dias analisados. De forma a aprofundar a análise deste período apresenta-se na Figura 55 o gráfico do tipo *boxplot* deste período.

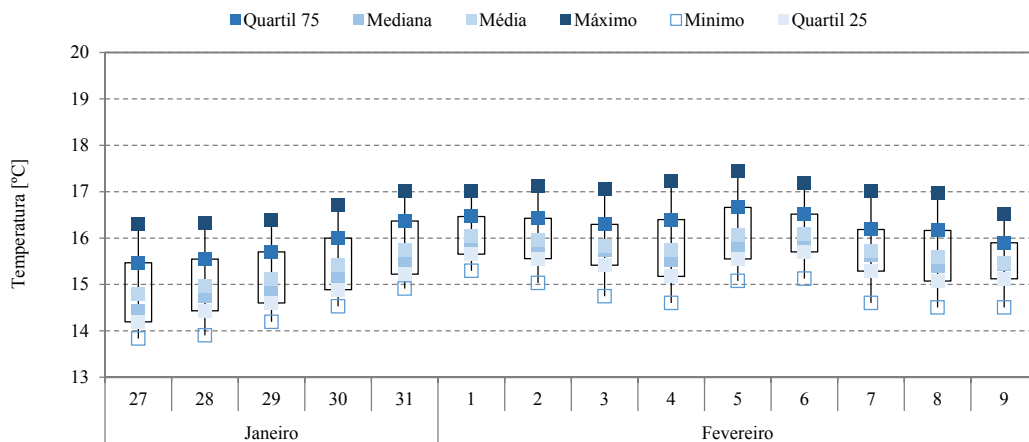


Fig.55 – Distribuição da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 1 monitorizada durante o período de aquecimento em regime intermitente entre o dia 27 de Janeiro e 9 de Fevereiro de 2013.

Da análise da Figura 55 constata-se, como já referido, que a variabilidade térmica, neste período, é maior do que no período de aquecimento em regime contínuo, contudo pode-se considerar que a variabilidade é equilibrada, pois a diferença, entre quartis e entre o valor máximo e mínimo, é inferior a 2,2°C, em média, ao longo dos catorze dias em análise.

Na Figura 56 apresenta-se a probabilidade acumulada da temperatura do ar interior no período em análise, constatando-se que a temperatura do ar interior varia entre os 13,8°C e os 17,4°C, resultando uma amplitude global de 3,6°C.

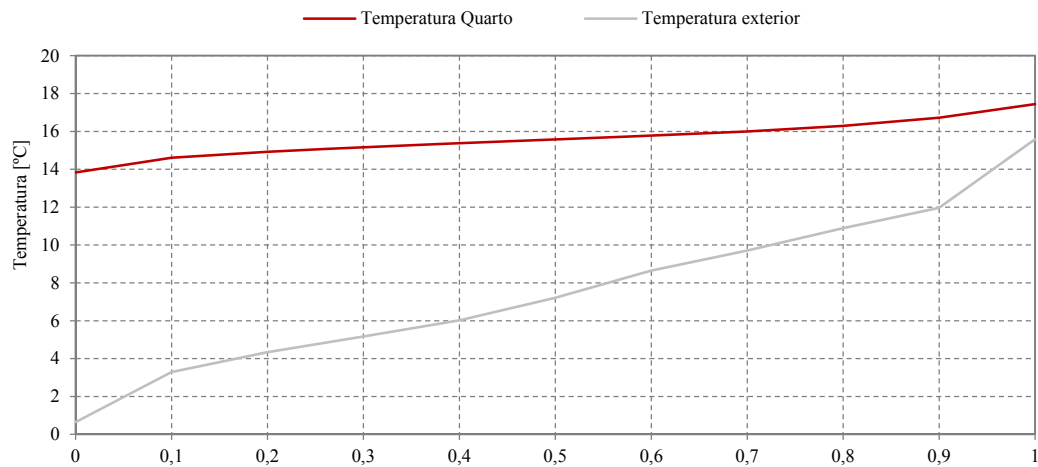


Fig.56 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida no quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento em regime intermitente entre o dia 27 de Janeiro e 9 de Fevereiro de 2013.

No Quadro 20 apresentam-se os principais valores estatísticos deste período.

Quadro 20 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, do quarto do Apartamento 1, durante a estação de aquecimento em regime de aquecimento intermitente entre o dia 27 de Janeiro e 9 de Fevereiro de 2013.

Variáveis estatísticas	Quarto – Apartamento 1 [°C]
Média	15,6
Máximo	17,4
Mínimo	13,8
Desvio Padrão	0,8
Mediana	15,6
Quartil 25	15,1
Quartil 75	16,2
Percentil 1%	14,0
Percentil 2%	14,1
Percentil 5%	14,3
Percentil 95%	16,9
Percentil 98%	17,1
Percentil 99%	17,2

Dos resultados verifica-se que o nível de conforto conferido por este regime de aquecimento não é eficaz. O valor da temperatura média do ar interior está abaixo da temperatura de referência de conforto do REH [1] (18°C).

No Apartamento 2 o regime de aquecimento em regime intermitente decorreu entre o dia 24 de Março e 13 de Abril de 2013. Deste período, selecionou-se o período entre o dia 4 e 13 de Abril para analisar

o desempenho térmico do Apartamento 2. Este período escolheu-se para evitar períodos de ocupação e falhas no sistema de aquecimento nos dias anteriores, podendo desvirtuar os registos de temperatura do ar interior. Na Figura 57 apresenta-se o registo de temperatura do ar interior referente ao período em análise.

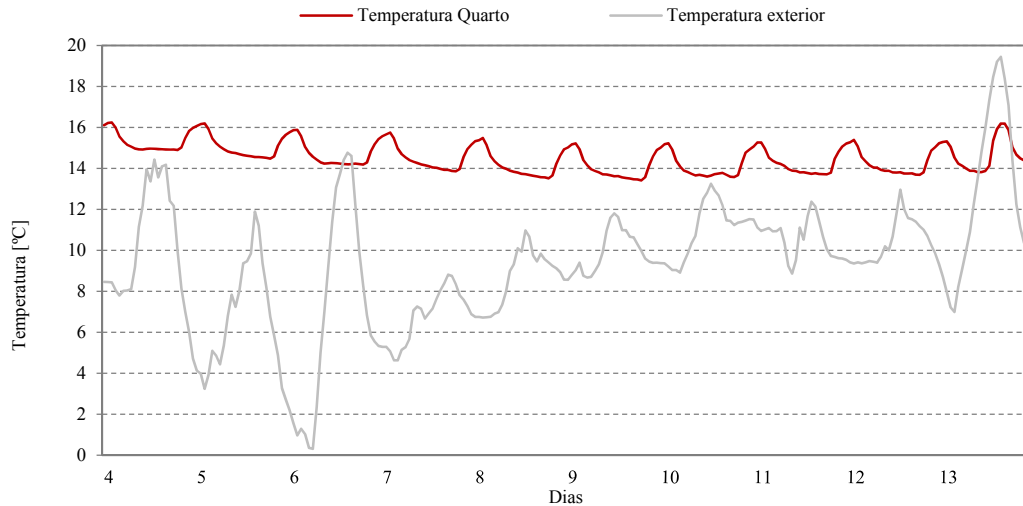


Fig.57 – Registos da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime intermitente entre os dias 4 e 13 de Abril de 2013.

Dos resultados depreende-se e reforça-se o já observado no Apartamento 1, a temperatura do ar interior apresenta uma amplitude diária mais elevada e uma média mais baixa, do que no período de aquecimento contínuo, como era expectável.

Na Figura 58 apresenta-se o gráfico tipo *boxplot* onde se constata uma diferença entre quartis, dos vários dias, bastante similar, refletindo um comportamento padrão para este período. A diferença entre os valores máximos e mínimos, também é, semelhante para os dias analisados subscrevendo o facto da temperatura do ar interior ter um comportamento diário idêntico.

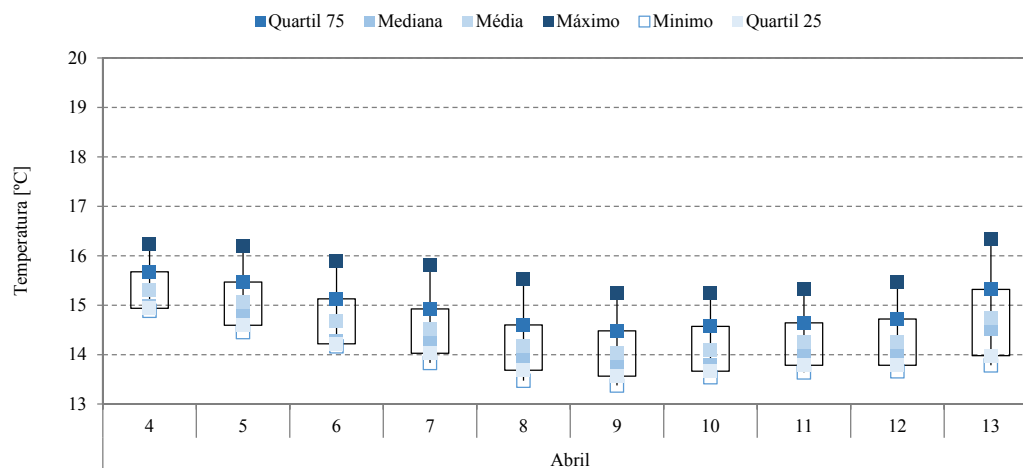


Fig.58 – Distribuição da temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 2 medida durante o período de aquecimento em regime intermitente entre os dias 4 e 13 de Abril de 2013.

Na Figura 59 apresenta-se a probabilidade acumulada da temperatura do ar interior para o período em análise. Variando a temperatura do ar interior entre 13,4°C e 16,3°C, resultando uma amplitude térmica global de 2,9°C.

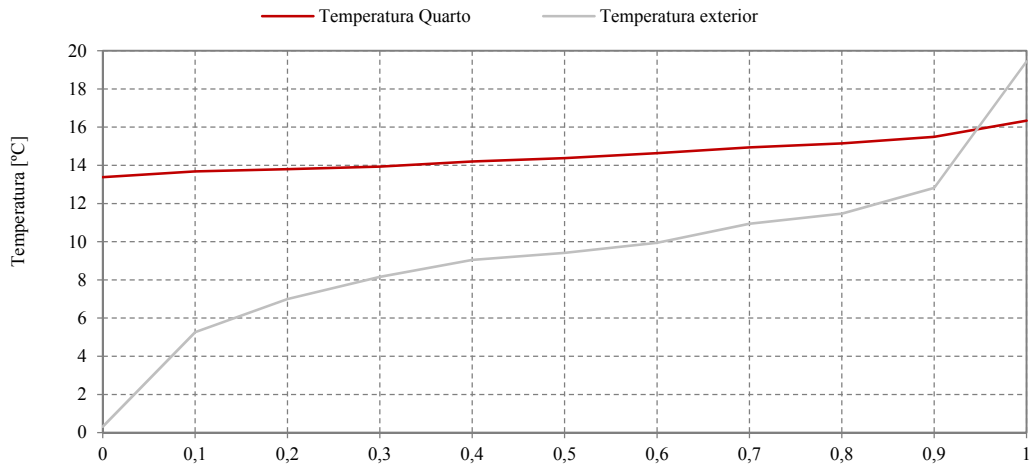


Fig.59 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida no quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime intermitente entre os dias 4 e 13 de Abril de 2013.

No Quadro 21 apresentam-se os resultados mais importantes da temperatura do ar interior para o quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime intermitente.

Quadro 21 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, do quarto do Apartamento 2, durante a estação de aquecimento em regime de aquecimento intermitente entre os dias 4 e 13 de Abril de 2013.

Variáveis estatísticas	Quarto – Apartamento 2 [°C]
Média	14,5
Máximo	16,3
Mínimo	13,4
Desvio Padrão	0,7
Mediana	14,4
Quartil 25	13,9
Quartil 75	15,0
Percentil 1%	13,5
Percentil 2%	13,5
Percentil 5%	13,6
Percentil 95%	15,9
Percentil 98%	16,2
Percentil 99%	16,2

Tal como para o Apartamento 1, este regime de aquecimento não demonstrou ser eficaz. A temperatura do ar interior média está abaixo dos 18°C não proporcionando um nível de conforto minimamente aceitável.

Dos resultados apresentados durante o período de aquecimento, constata-se que: é necessário utilizar sistemas de aquecimento para se atingir um nível de conforto mínimo, tanto para o apartamento com paredes isoladas como no apartamento sem isolamento nas paredes; a estabilização da temperatura do ar interior é possível no período de aquecimento em regime contínuo; a variação da temperatura, neste período de aquecimento, é igual em ambos os Apartamentos, cerca de 1°C; a temperatura do ar interior do Apartamento 1, com isolamento nas paredes, regista temperaturas próximas dos 18°C, enquanto que o Apartamento 2, regista uma temperatura do ar interior em torno dos 17°C, diferença explicável pelo efeito do caudal de ventilação, o Apartamento 2 possui um caudal de ventilação natural superior ao do Apartamento 1. E também porque o aquecimento com recurso ao radiador da sala/cozinha do Apartamento 2 esteve inoperacional, durante este período, devido a avaria.

3.3.6. RESULTADOS DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

No presente subcapítulo apresentam-se os resultados da temperatura do ar interior, durante a estação de arrefecimento. Efetuaram-se registos de 10 em 10 minutos para todos os compartimentos.

Neste período os envidraçados encontraram-se encerrados e as suas proteções ativadas a 100%, condições que só foram alteradas em consequência de alguns períodos de ocupação.

Entre o dia 29 de Junho e o dia 30 de Setembro de 2013, na sala/cozinha de cada um dos Apartamentos, acionou-se a ventilação noturna (extração forçada), que funcionou entre as 00 e as 09 horas de cada dia. A estratégia diferiu um pouco, no que toca à disposição dos elementos interiores, mais concretamente das portas de separação entre compartimentos. No Apartamento 1 as portas foram deixadas abertas entre os compartimentos, no Apartamento 2 as portas, entre compartimentos, estiveram encerradas, isolando-se o compartimento ventilado.

Para analisar os dados obtidos neste período de monitorização, apresentam-se os registos de temperatura do ar interior para toda a estação de arrefecimento e para um período em pormenor.

Na Figura 60 apresenta-se a temperatura do ar interior durante a estação de arrefecimento para os dois apartamentos.

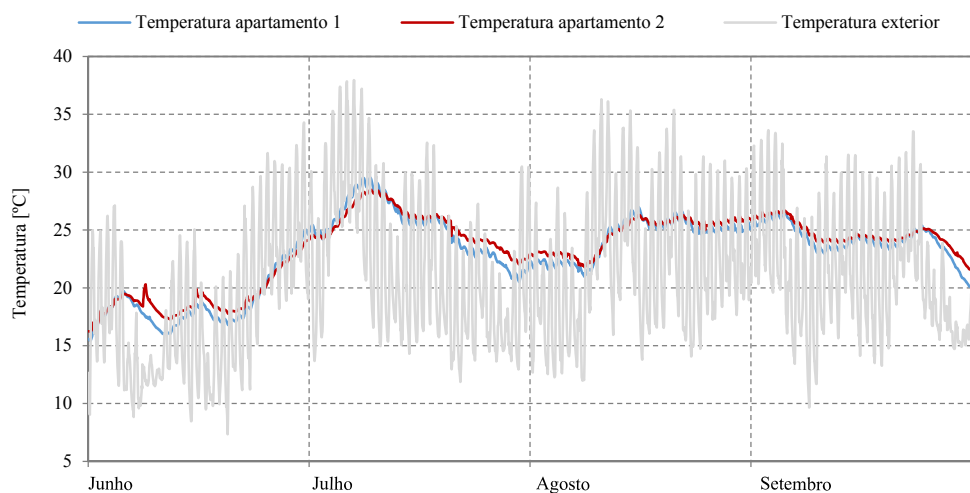


Fig.60 – Resultados da temperatura do ar interior durante a estação de arrefecimento.

Constata-se que o desenvolvimento da temperatura do ar interior é semelhante nos dois apartamentos, possuindo o Apartamento 1 uma amplitude térmica sazonal mais elevada.

Na Figura 61 apresenta-se a temperatura média mensal do ar interior dos dois apartamentos ao longo da estação de arrefecimento, como o já referido as diferenças de temperatura são mínimas, notando-se que o Apartamento 1 é mais suscetível às variações da temperatura do ar exterior.

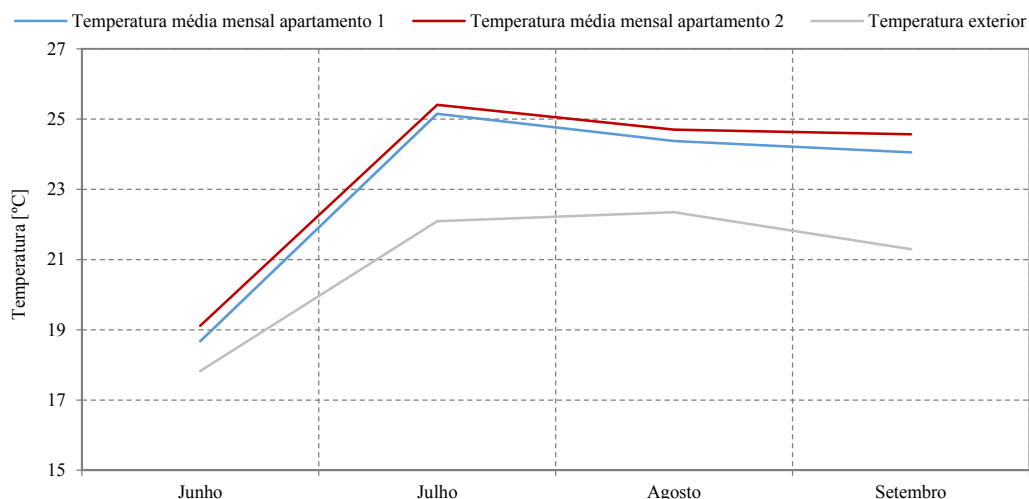


Fig.61 – Temperatura média mensal do ar interior e exterior durante a estação de arrefecimento.

Aprofundando a análise apresenta-se o gráfico do tipo *boxplot* (ver Figura 62) da temperatura do ar interior do Apartamento 1. Do gráfico verifica-se que o apartamento possui uma variabilidade da temperatura mais elevada, para os meses de Julho e Agosto, facto que se deve ao aumento da temperatura do ar exterior aliado a uma envolvente com uma elevada área de envidraçados e com menor inércia térmica, originando uma amplitude térmica maior. Por sua vez nos meses de Junho e Setembro a variabilidade de temperaturas do ar interior é menor, seguindo o padrão da temperatura do ar exterior.

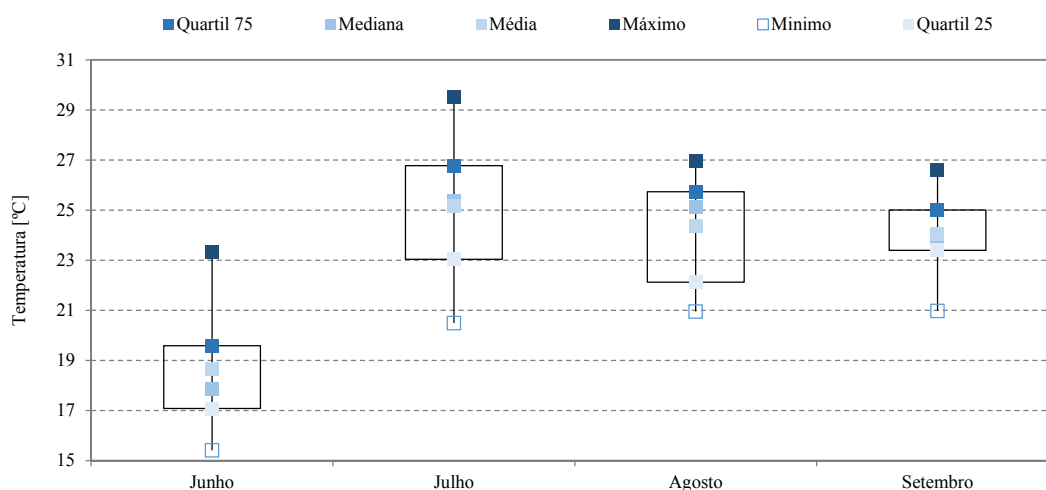


Fig.62 – Distribuição da temperatura do ar interior do Apartamento 1 medida durante a estação de arrefecimento.

Para o Apartamento 2 (ver Figura 63) verificou-se a tendência do Apartamento 1: para os meses de Julho e Agosto existe uma variabilidade de temperatura do ar interior mais elevada, sendo a diferença entre quartis maior. Nos meses de Junho e Setembro esta diferença diminui, verificando-se uma variabilidade

de temperatura do ar interior menor. Contudo, a diferença entre quartis é inferior à do Apartamento 1, refletindo-se a envolvente com menor área de envidraçados e com maior inércia térmica.

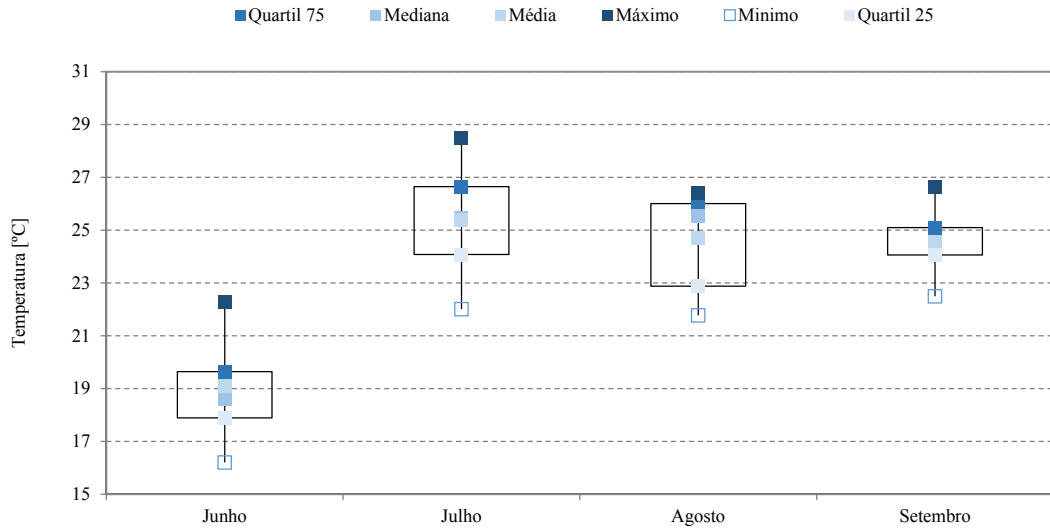


Fig.63 – Distribuição da temperatura do ar interior do Apartamento 2 medida durante a estação de arrefecimento.

A Figura 64 ilustra a probabilidade acumulada da temperatura do ar interior dos dois Apartamentos para a estação de arrefecimento.

Da sua leitura verifica-se que, no Apartamento 1, a temperatura do ar interior varia entre 15,4°C e 29,5°C, resultando uma amplitude térmica global de 14,1°C; para o Apartamento 2 a temperatura do ar interior varia entre 16,2°C e 28,5°C, resultando uma amplitude térmica global de 12,3°C.

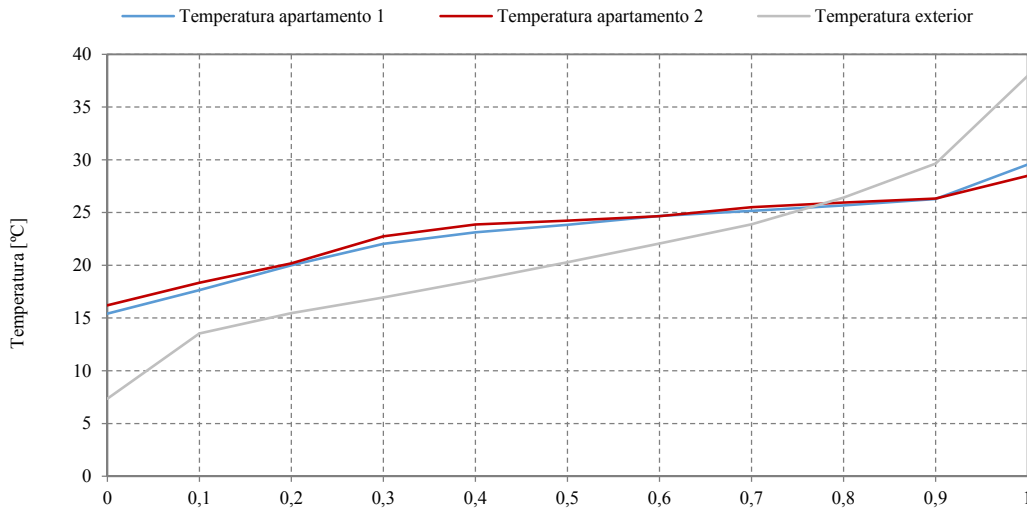


Fig.64 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na estação de arrefecimento.

A fim de completar a análise da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, apresenta-se, no Quadro 22, os valores das variáveis estatísticas, mais importantes, para cada apartamento.

Quadro 22 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior durante a estação de arrefecimento.

Variáveis Estatísticas	Apartamento 1 [°C]	Apartamento 2 [°C]
Média	23,1	23,5
Máximo	29,5	28,5
Mínimo	15,4	16,2
Desvio padrão	3,2	2,9
Mediana	23,8	24,2
Quartil 25	21,4	22,2
Quartil 75	25,4	25,7
Percentil 1%	16,1	16,9
Percentil 2%	16,4	17,4
Percentil 5%	17,1	17,9
Percentil 95%	27,4	27,1
Percentil 98%	28,8	28,1
Percentil 99%	29,1	28,3

Dos resultados apresentados verifica-se que o desempenho térmico dos dois apartamentos é similar, sendo difícil estabelecer qual o apartamento com o melhor comportamento térmico. Apesar do Apartamento 1 apresentar uma temperatura do ar interior média mais baixa, apresenta valores máximos e mínimos mais extremos. Demonstra-se assim, mais uma vez, a maior suscetibilidade do Apartamento 1 às variações climáticas exteriores, consequência das suas características construtivas – envolvente com menor inércia térmica e uma maior área de envidraçados. Tal como no período de aquecimento a média e a mediana voltam a ter valores aproximados, refletindo uma estabilidade da temperatura do ar interior.

3.3.6.1. Influência da Ventilação Noturna

Analisar a importância da ventilação noturna nestes edifícios era um dos objetivos deste trabalho. Durante o período ocorrido entre o dia 29 de Junho e o dia 30 de Setembro recorreu-se a um sistema de ventilação mecânica de extração para promover a ventilação noturna, nas salas/cozinha de cada um dos apartamentos.

No Apartamento 1 a estratégia seguida foi deixar as portas abertas de forma a existir um equilíbrio entre os vários compartimentos. No Apartamento 2 a estratégia foi isolar a sala/cozinha, fechando as portas de forma a criar uma zona independente.

Na Figura 65 analisa-se o desempenho térmico do Apartamento 1 para o período ocorrido entre o dia 13 e o dia 23 de Agosto de 2013. Este período foi escolhido uma vez que as condições climáticas exteriores são consideradas típicas, para o local onde o edifício em análise está implantado, avaliando-se assim o comportamento térmico dos dois Apartamentos num período típico de Verão.

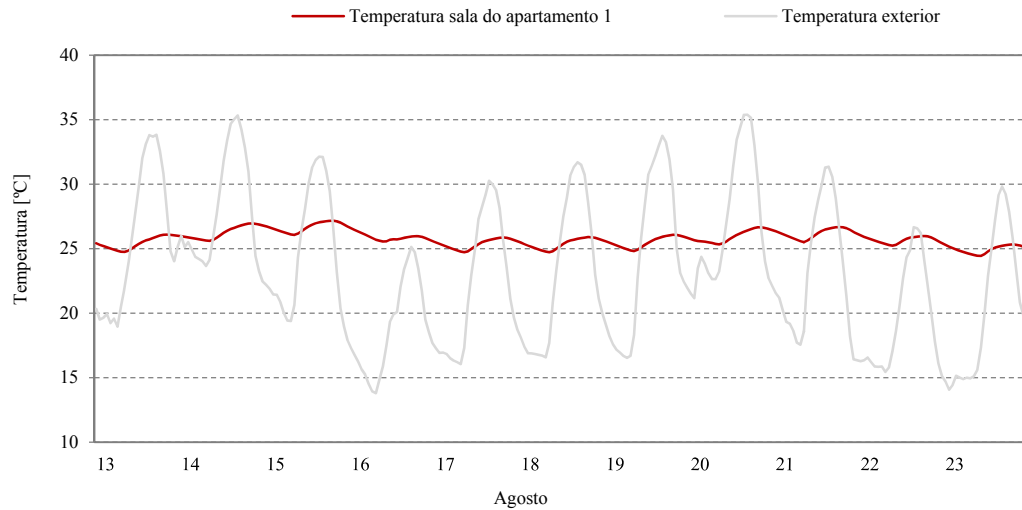


Fig.65 – Registos da temperatura do ar interior da sala/cozinha do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

Da Figura 65, percebe-se pela curva da temperatura do ar interior um desfasamento temporal médio entre a temperatura máxima, exterior e a interior, de 3 horas, e um amortecimento térmico médio, entre a temperatura máxima interior e exterior, de 5,1°C. Outro aspeto importante é o facto da temperatura de referência de conforto para o Verão, 25°C, quase não ser ultrapassada.

Na Figura 66 apresentam-se as medidas estatísticas para o período selecionado procedendo-se a uma análise detalhada.

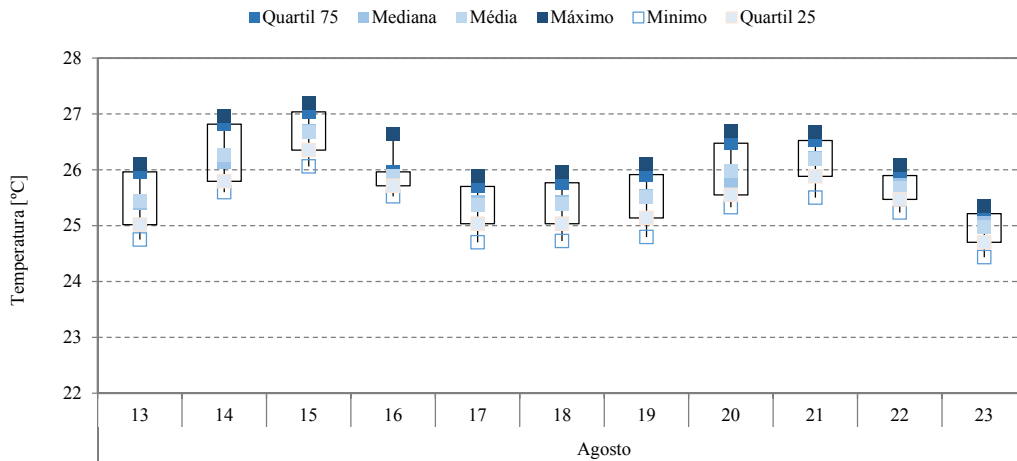


Fig.66 – Distribuição da temperatura do ar interior da sala/cozinha do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

Dos dados apresentados verifica-se uma estreita proximidade entre a mediana e a média evidenciando um equilíbrio da temperatura do ar interior dos dias analisados. A variabilidade de temperaturas registadas não é elevada, aumentando ou diminuindo segundo a amplitude térmica exterior, quanto maior, mais elevada é a diferença entre o registo máximo e mínimo, e do quartil 25 e 75 da temperatura do ar interior.

Na Figura 67 apresenta-se a probabilidade acumulada para o período em análise.

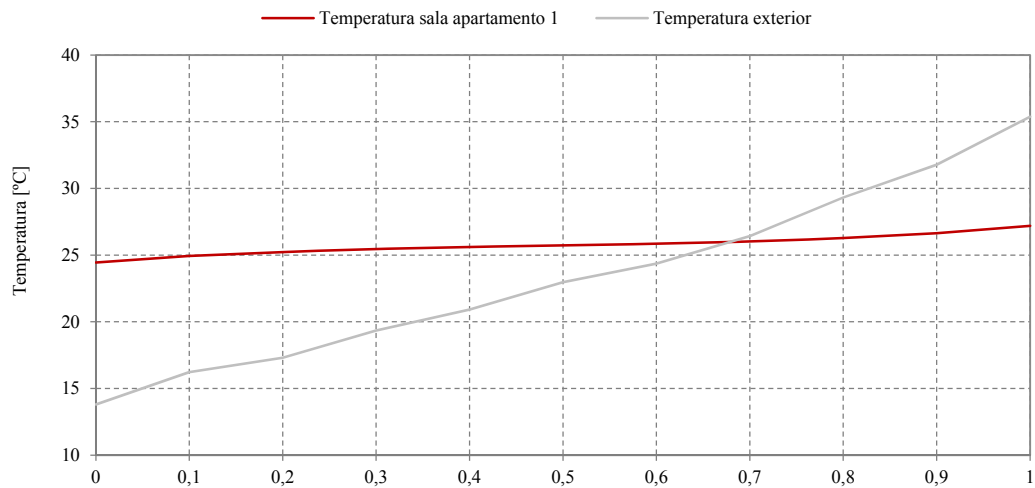


Fig.67 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na sala/cozinha do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

Verifica-se que: a temperatura do ar interior varia entre 24,4°C e 27,2°C, o que faz com que a amplitude térmica seja de 2,6°C; a temperatura de referência de conforto, 25°C, é ultrapassada em mais de 87% do tempo.

No Quadro 23 apresentam-se os resultados mais importantes da temperatura do ar interior para a sala/cozinha do Apartamento 1 durante o período de 13 a 23 de Agosto de 2013.

Quadro 23 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, da sala/cozinha do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

Variáveis Estatísticas	Sala/cozinha – Apartamento 1 [°C]
Média	25,1
Máximo	27,2
Mínimo	24,4
Desvio padrão	0,6
Mediana	25,7
Quartil 25	25,3
Quartil 75	26,1
Percentil 1%	24,6
Percentil 2%	24,7
Percentil 5%	24,8
Percentil 95%	26,9
Percentil 98%	27,0
Percentil 99%	27,1

Os resultados expressam as ideias já referidas. A menor inércia deste Apartamento permite variações de temperatura mais elevadas, verificando-se valores máximos e mínimos mais extremos, comprometendo o conforto térmico do espaço.

Na Figura 68 apresenta-se a temperatura do ar interior para o período ocorrido entre o dia 13 e o dia 23 de Agosto de 2013, na sala/cozinha do Apartamento 2.

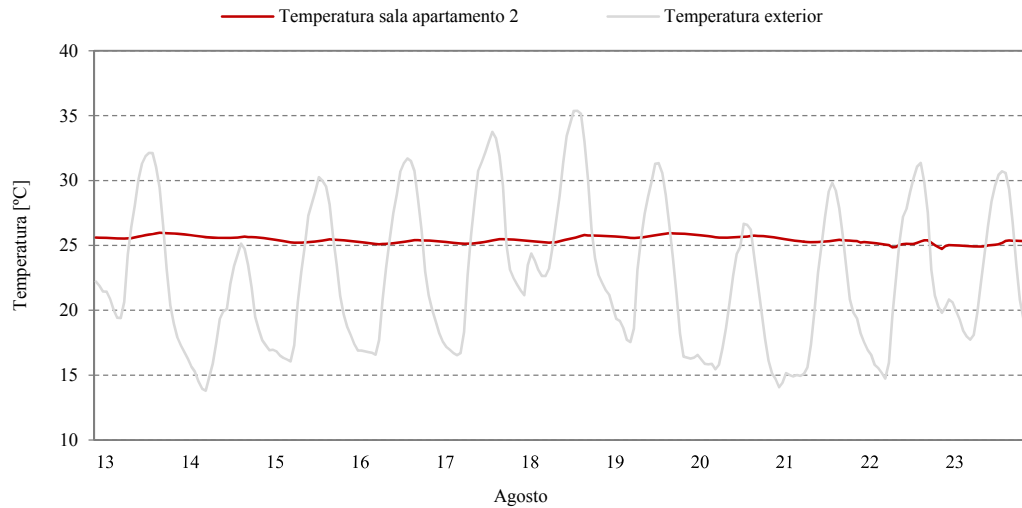


Fig.68 – Registos da temperatura do ar interior da sala/cozinha do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

Da análise dos resultados constata-se uma menor variação da temperatura do ar interior, ao longo dos vários dias, do que no Apartamento 1. Tal como no Apartamento 1, o limite de conforto estabelecido pelo REH [1] é ultrapassado. Verifica-se um desfaseamento temporal médio entre a temperatura do ar máxima exterior e interior de 2,6 horas, e um amortecimento térmico médio entre a temperatura do ar máxima exterior e interior de 5,4°C.

De forma a analisar detalhadamente o desempenho térmico do Apartamento 2, neste período, apresentam-se, na Figura 69, as variações das medidas estatísticas neste período.

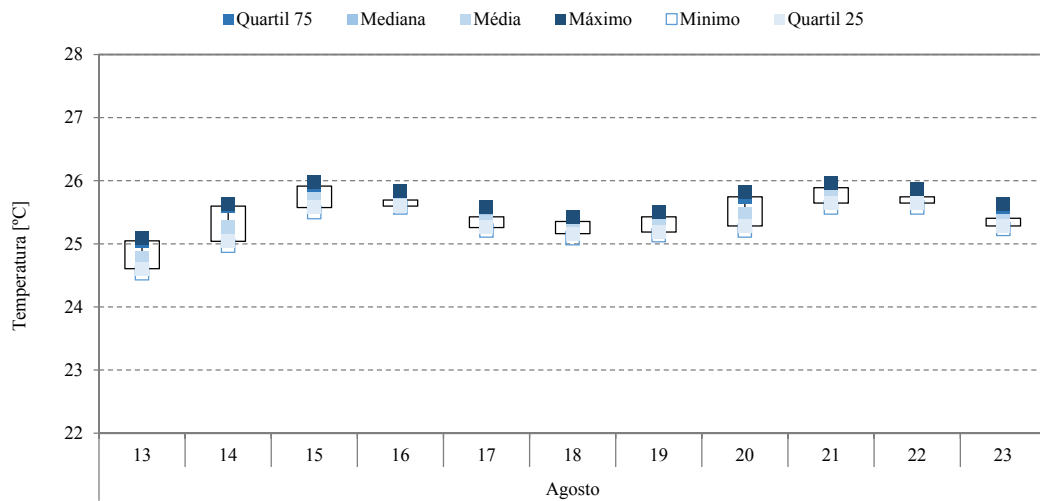


Fig.69 – Distribuição da temperatura do ar interior da sala/cozinha do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

Da leitura do gráfico verifica-se que a temperatura do ar interior possui uma amplitude térmica reduzida, havendo uma maior variabilidade de temperatura mediante a amplitude térmica exterior, quanto maior esta, maior a variação de temperaturas do ar interior. No entanto, os efeitos no Apartamento 2 são menos perceptíveis que no Apartamento 1, por ter uma envolvente exterior com maior inércia.

Na Figura 70 apresenta-se a probabilidade acumulada para a temperatura do ar interior do Apartamento 2 no período ocorrido entre o dia 13 e o dia 23 de Agosto de 2013.

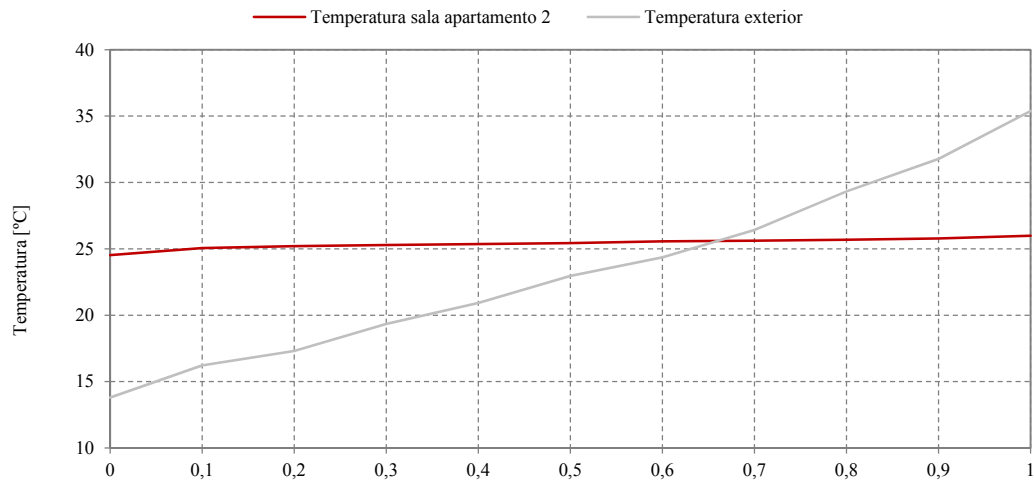


Fig.70 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na sala/cozinha do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

Da análise da Figura 70 verifica-se que a temperatura do ar interior varia entre 24,5°C e 26,0°C, resultando uma amplitude térmica de 1,5°C; a temperatura de referência é ultrapassada em mais de 90% do tempo.

No Quadro 24 apresentam-se os resultados mais importantes da temperatura do ar interior para a sala/cozinha do Apartamento 2 durante o período de 13 a 23 de Agosto de 2013.

Quadro 24 – Variáveis estatísticas da temperatura do ar interior, da sala/cozinha do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

Variáveis Estatísticas	Sala/cozinha – Apartamento 2 [°C]
Média	25,4
Máximo	26,0
Mínimo	24,5
Desvio padrão	0,3
Mediana	25,4
Quartil 25	25,2
Quartil 75	25,6
Percentil 1%	24,6
Percentil 2%	24,6
Percentil 5%	24,7
Percentil 95%	25,9
Percentil 98%	25,9
Percentil 99%	25,9

Os resultados apresentados no Quadro 24 demonstram que, apesar de a temperatura do ar interior média, ser um pouco mais elevada, do que no Apartamento 1, este Apartamento possui uma temperatura do ar interior mais constante e menor amplitude térmica. O fecho das portas, isolando a sala/cozinha dos restantes compartimentos, sem dúvida que influenciou os resultados, certamente que com as portas abertas a temperatura do ar interior registada teria sido mais baixa.

Mais uma vez se confirma que o desempenho térmico é bastante semelhante nos dois apartamentos. No entanto, tendo em conta a área de envidraçados e o nível de inércia térmica do Apartamento 1, os valores apresentados são influenciados pela ventilação noturna, uma vez que sem este meio os registos seriam mais elevados. Dos resultados destaca-se, também, a constância dos registos de temperatura do ar interior do Apartamento 2, evidenciando-se o papel da inércia térmica neste apartamento. A este facto não é alheia a relação entre a área de envidraçados e a do pavimento. No Apartamento 2, esta relação é de 6%, enquanto que, no Apartamento 1 é de 26%. Esta diferença reflete-se na amplitude térmica diária, que como se constatou é mais elevada neste Apartamento.

Como referido, a estratégia de ventilação noturna foi diferente nos dois apartamentos. No Apartamento 1 as portas entre compartimentos estavam abertas, por seu lado, no Apartamento 2, as portas entre compartimentos estavam fechadas. As Figuras 71 e 72 comparam, através da probabilidade acumulada, os resultados obtidos entre a sala/cozinha e o quarto de cada um dos Apartamentos, para o período ocorrido entre o dia 29 de Julho e o dia 30 de Setembro de 2013, comparando-se as diferenças da temperatura do ar interior entre compartimentos.

Na Figura 71 apresenta-se a probabilidade acumulada da sala/cozinha e do quarto do Apartamento 1. Os resultados confirmam uma variação quase nula entre os valores dos dois compartimentos, sendo nos extremos que se verifica alguma diferença, embora diminuta. Neste período o valor mínimo para a

temperatura do ar interior é de 19,85°C para a sala/cozinha e de 19,94°C para o quarto. O valor máximo, para a sala/cozinha é de 29,82°C e para o quarto é de 29,17°C. Destes valores resulta uma amplitude térmica global de 9,97°C para a sala/cozinha e 9,23°C para o quarto.

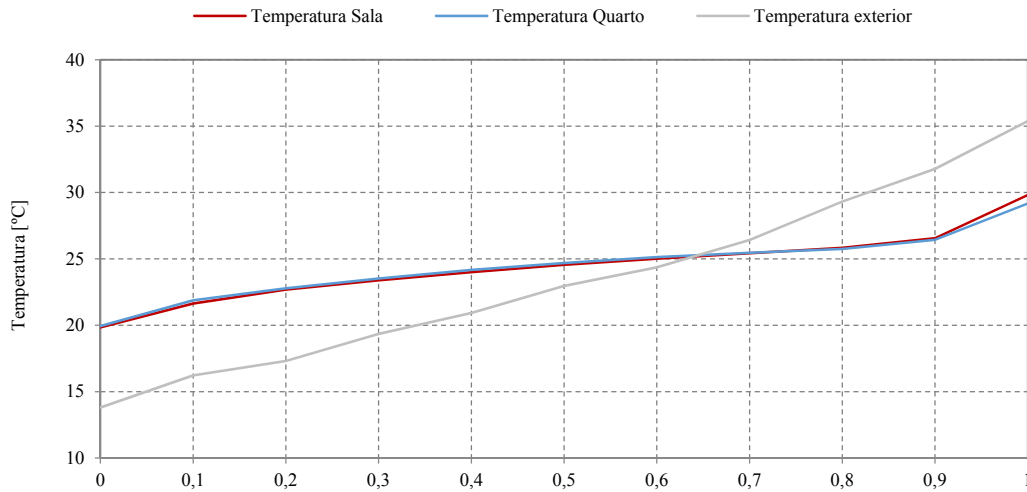


Fig.71 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na sala/cozinha e quarto do Apartamento 1 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

A Figura 72 refere-se ao mesmo período para o Apartamento 2. Verifica-se que as temperaturas do ar interior diferem, havendo claras diferenças entre o compartimento com ventilação noturna e o compartimento sem ventilação noturna. Registou-se uma temperatura do ar interior mínima de 21,6°C, na sala/cozinha, e de 22,2°C no quarto. A temperatura do ar interior máxima da sala/cozinha é de 28,1°C e a do quarto é de 29,6°C. Destas diferenças resulta uma amplitude térmica global de 6,5°C para a sala/cozinha e de 7,4°C para o quarto.

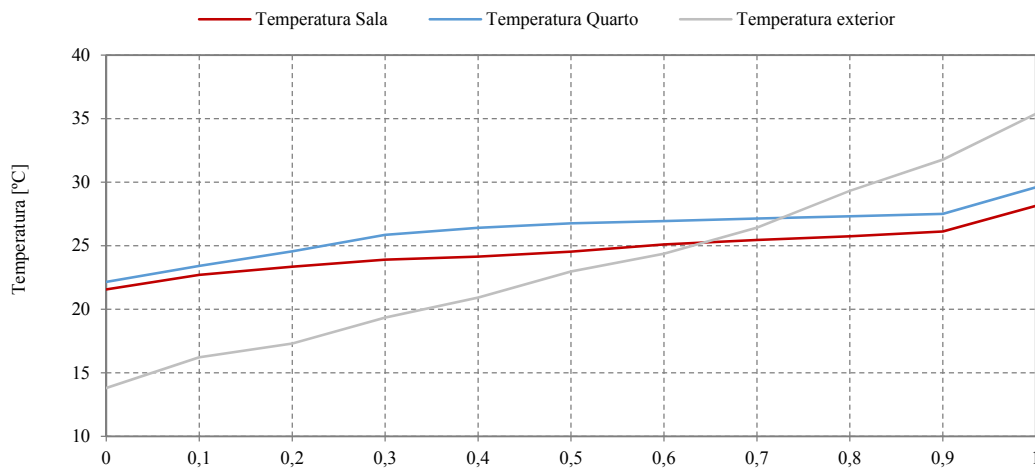


Fig.72 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior medida na sala/cozinha e quarto do Apartamento 2 durante o período de ventilação noturna entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

Através dos resultados, constata-se que a ventilação noturna proporciona uma diminuição da temperatura do ar interior levando a um desempenho térmico mais eficaz. Prova-se igualmente, que se trata de uma estratégia capaz de substituir, quase na totalidade, o recurso a meios mecânicos de arrefecimento.

3.3.7. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

Para avaliar o nível de conforto térmico recorreu-se à Norma EN 15251 [28], que estabelece três categorias de conforto: I, II e III. O edifício em análise enquadra-se na categoria II, que é a ajustada a edifícios novos ou reabilitados, como definido na Norma [28].

Para a estação de aquecimento a temperatura mínima de conforto, estabelecida pela Norma [28], é de 20°C. Elaboraram-se dois tipos de análise de conforto: uma análise para o período em que a temperatura do ar interior flutuou livremente, e outra, em que se analisam os períodos de aquecimento em regime contínuo e em regime intermitente. Por fim confrontam-se os resultados obtidos em cada um dos Apartamentos de forma a comparar o seu nível de conforto.

No período de flutuação livre da temperatura do ar interior do Apartamento 1, a temperatura esteve sempre abaixo dos 20°C obtendo-se uma percentagem de tempo de desconforto de 100%, como se constata na Figura 73. No Apartamento 2, os resultados possuem a mesma tendência que no Apartamento 1. O nível de desconforto, apesar de não ser de 100%, é bastante próximo, 98%, registando temperaturas médias (horárias) do ar interior abaixo do nível de conforto mínimo.

Na Figura 73 apresenta-se a comparação, entre os dois apartamentos, da avaliação do conforto térmico para os períodos em que a temperatura do ar interior flutuou livremente na estação de aquecimento.

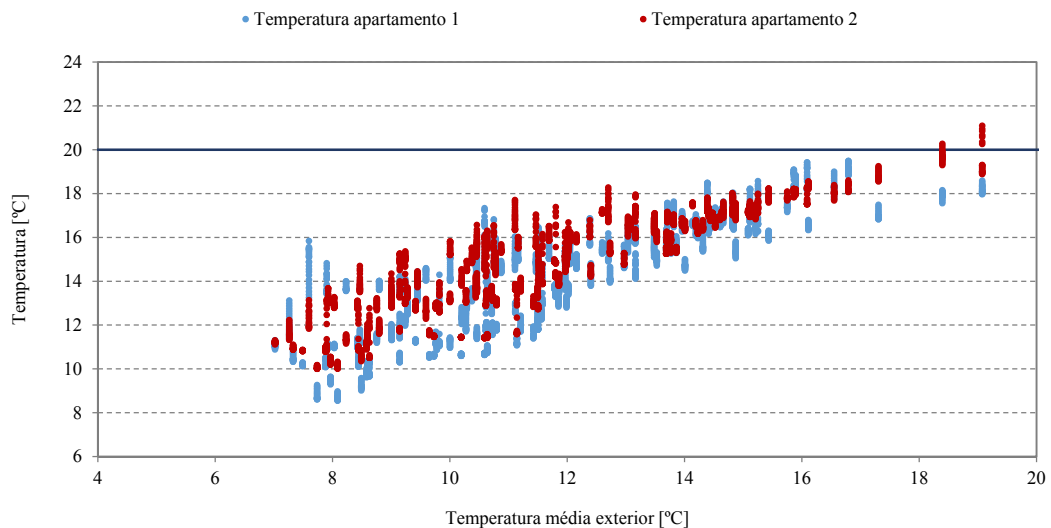


Fig.73 – Avaliação do Conforto do Apartamento 1 e 2 durante a estação de aquecimento.

Esta comparação vem realçar os factos já descritos: uma amplitude térmica mais elevada no Apartamento 1; a temperatura mínima de conforto apenas é atingida de forma pontual, no Apartamento 2; a influência da temperatura do ar exterior é notória em ambos.

A medição da temperatura do ar interior foi efetuada com os apartamentos desocupados. Assim na Figura 74 apresenta-se os valores da Figura 73, com mais 3°C, de forma a compreender o potencial efeito, ainda que de uma forma simplificada, dos ganhos internos associados à ocupação e equipamentos.

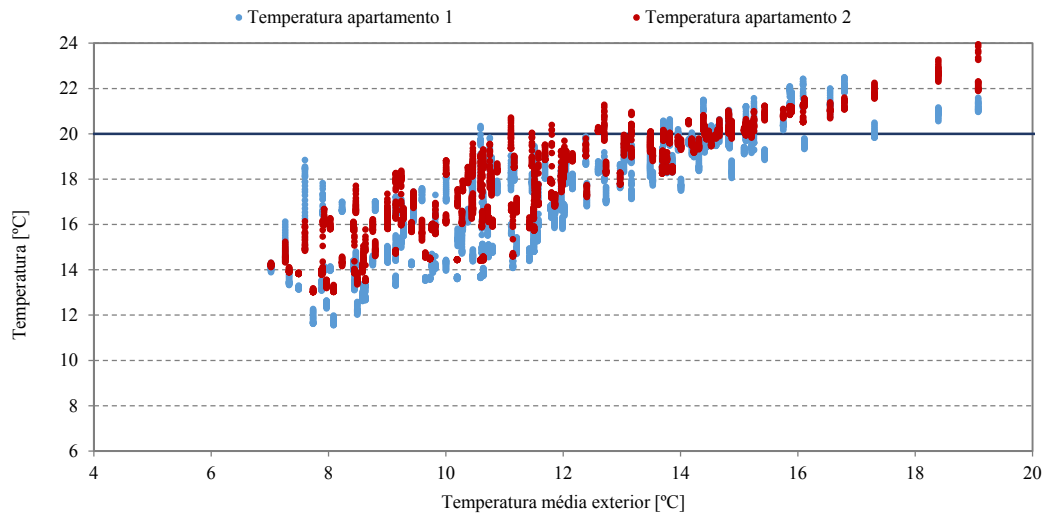


Fig.74 – Avaliação do conforto do Apartamento 1 e 2 durante a estação de aquecimento com ocupação.

Com este acréscimo de 3°C constata-se que o nível de conforto continua, em grande parte do tempo, abaixo do limite mínimo de conforto, no entanto, os registos abaixo de 15°C diminuíram drasticamente, verificando-se um nível de conforto superior em ambos os apartamentos, como seria expectável.

Na Figura 75, apresenta-se a avaliação do nível de conforto para o período com duas estratégias de aquecimento: aquecimento em regime contínuo – 10 a 19 de Janeiro de 2013 –, e para o período de aquecimento em regime intermitente – 27 de Janeiro a 9 de Fevereiro de 2013 para o quarto do Apartamento 1.

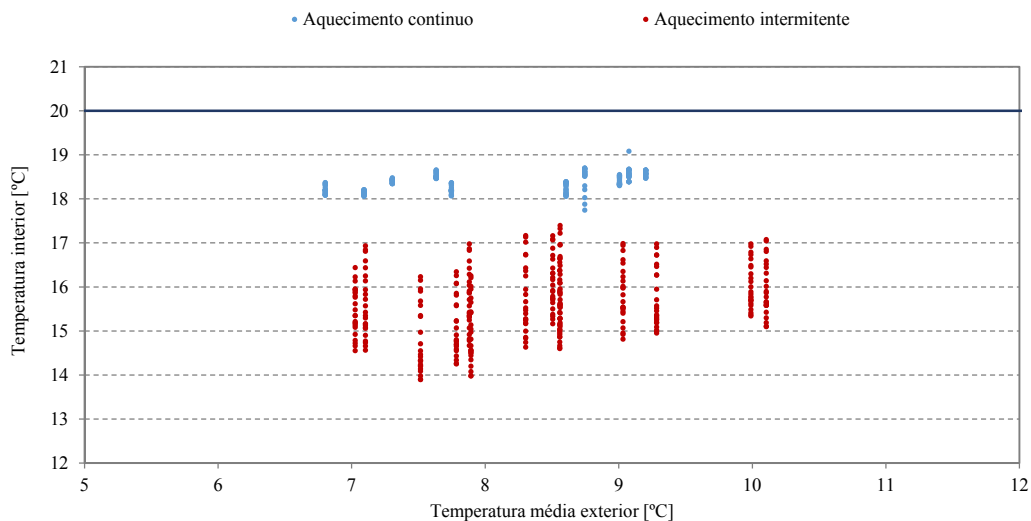


Fig.75 – Avaliação do conforto do quarto do Apartamento 1 durante o período de aquecimento em regime contínuo.

Analisando o gráfico, como já foi referido na análise da temperatura do ar interior, a variação diária da temperatura do ar interior no período de aquecimento contínuo é significativamente inferior em relação ao período de aquecimento intermitente. Verifica-se também que, o nível de desconforto, é mais elevado no período de aquecimento intermitente. Em ambos os períodos a temperatura mínima de conforto estabelecida pela Norma, 20°C, não é atingida, pois os registos da temperatura média horária do ar interior apresenta-se totalmente abaixo do limite mínimo de temperatura.

Na Figura 76 apresentam-se os resultados da avaliação dos níveis de conforto do quarto do Apartamento 2, para o período de aquecimento contínuo – de 21 de Fevereiro a 2 de Março de 2013 – e para o período de aquecimento intermitente – de 4 a 13 de Abril de 2013.

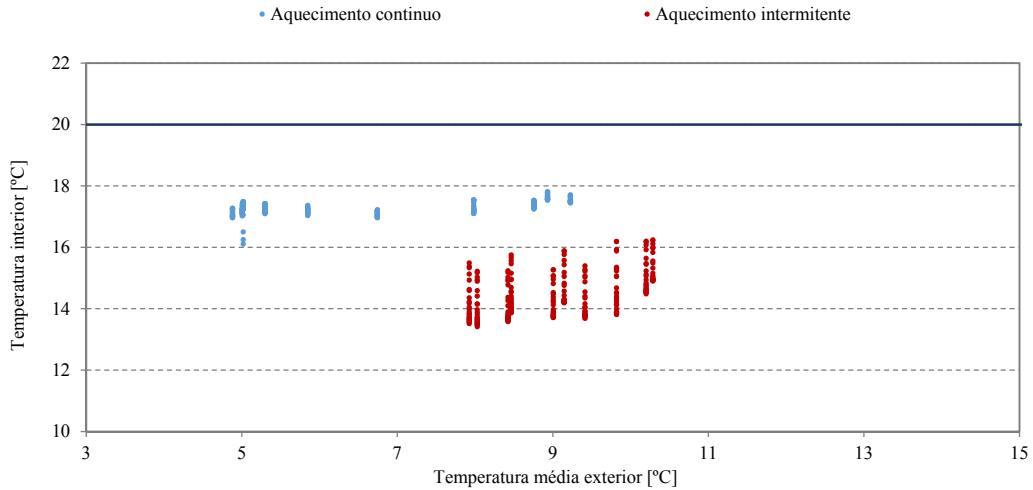


Fig.76 – Avaliação do conforto do quarto do Apartamento 2 durante o período de aquecimento em regime contínuo.

Analisando a Figura 76, verifica-se que o comportamento térmico do Apartamento 2 é similar ao do Apartamento 1, igualmente se constata que, no período de aquecimento contínuo, a variação da temperatura do ar interior é bastante inferior em relação ao período de aquecimento intermitente, como era expectável. O nível de desconforto é mais elevado no período de aquecimento intermitente, em ambos os períodos, a temperatura mínima de conforto não é atingida em nenhuma das estratégias de aquecimento.

3.3.8. AVALIAÇÃO DO CONFORTO NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

Relativamente à estação de arrefecimento, dado que o edifício não possui sistemas de arrefecimento mecânico, os limites de conforto variam consoante a temperatura do ar exterior, seguindo uma lógica de conforto adaptativo. Elaboraram-se duas análises, uma geral, para toda a estação, e outra específica para o período em que operou o sistema de ventilação noturna (extração) no período compreendido entre os dias 13 e 23 de Agosto de 2013.

Na Figura 77 apresenta-se a análise do conforto do Apartamento 1 ao longo da estação de arrefecimento.

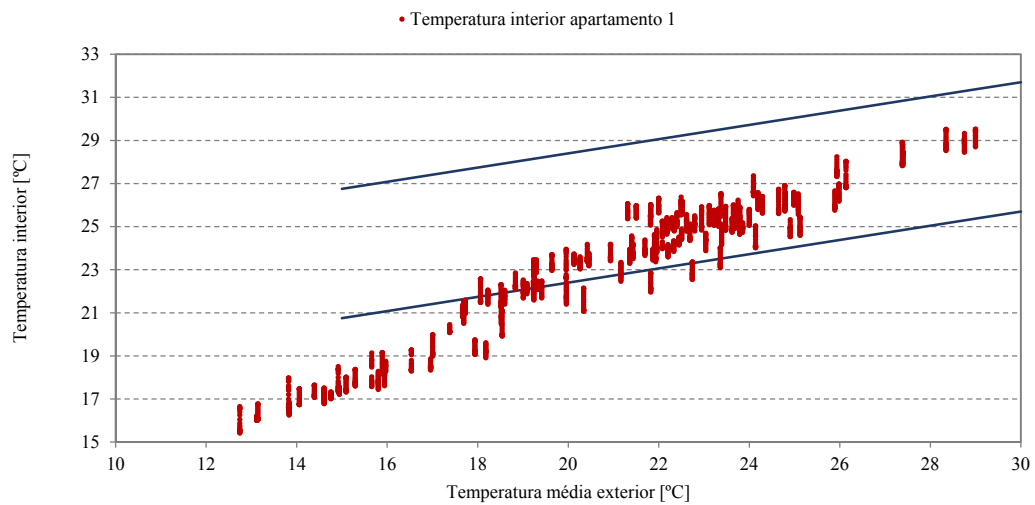


Fig.77 – Avaliação do conforto do Apartamento 1 durante a estação de arrefecimento.

Da análise da Figura 77, verifica-se que, em grande parte do tempo, a temperatura do ar interior se encontra dentro do intervalo adaptativo de conforto estabelecido pela EN 15251 [28]. No entanto, há um número considerável de horas em que a temperatura do ar interior está abaixo do limite de conforto, o que não pode ser considerado grave, comprometendo o método de avaliação de conforto da Norma [28]. Consta-se, igualmente, a existência de temperaturas interiores elevadas, verificando-se um número considerável de horas em que a temperatura do ar interior está acima dos 25°C. Para além disso, existem períodos em que a temperatura registada está acima dos 29°C, e, mesmo assim, dentro dos limites de conforto, facto que revela dúvidas sobre o intervalo definido pela Norma [28].

Para o Apartamento 2, Figura 78, as conclusões são semelhantes, a inadequação da Norma [28] volta a verificar-se, descurando o desconforto associado ao sobreaquecimento do edifício, com temperaturas do ar interior elevadas, acima de 27°C.

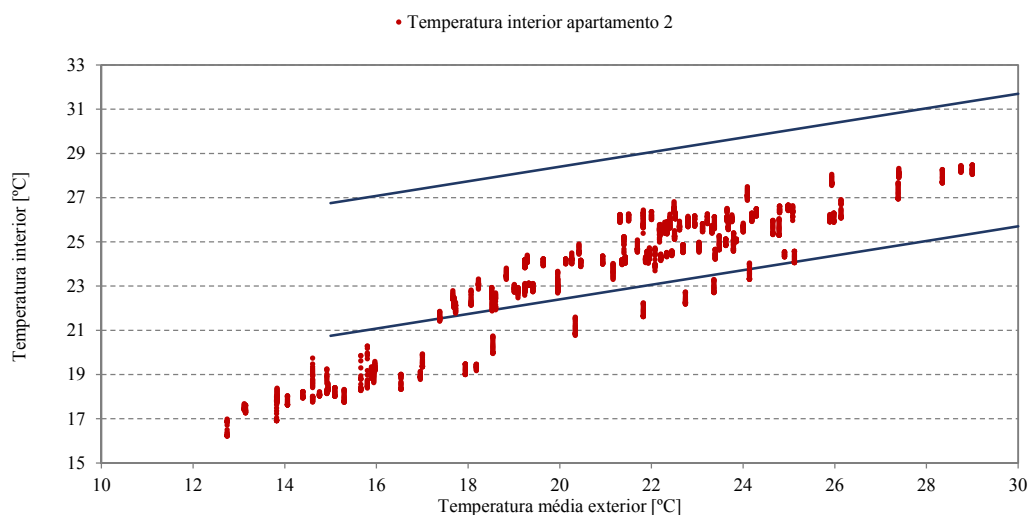


Fig.78 – Avaliação do conforto do Apartamento 2 durante a estação de arrefecimento.

Na Figura 79 comparam-se os dois apartamentos. Verifica-se claramente que o Apartamento 1 apresenta temperaturas do ar interior superiores às do Apartamento 2 e uma amplitude térmica diária mais elevada. Tal como na estação de aquecimento o Apartamento 1 regista temperaturas mais baixas e mais elevadas que o Apartamento 2, refletindo a menor inércia térmica.

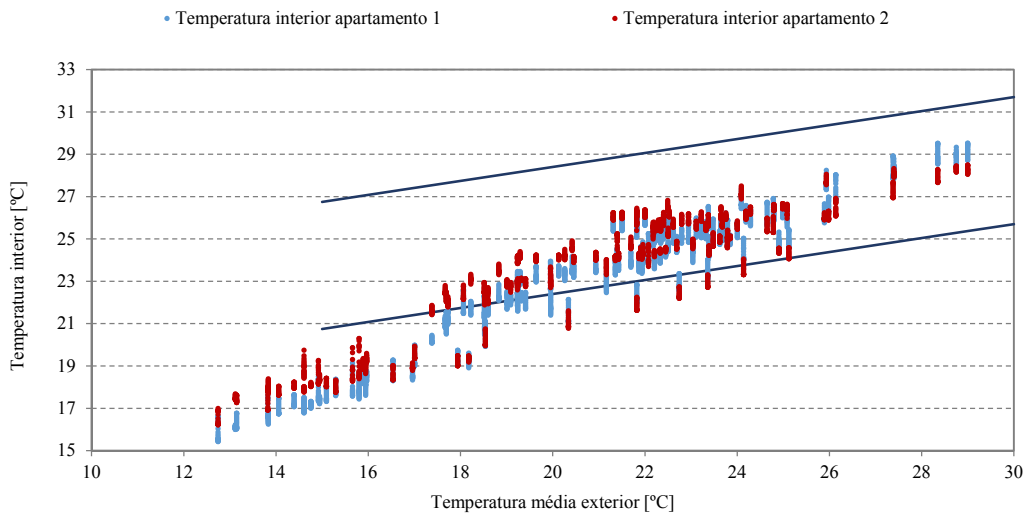


Fig.79 – Avaliação do conforto do Apartamento 1 e 2 durante a estação de arrefecimento.

A Figura 80 é referente ao período ocorrido entre o dia 13 e 23 de Agosto de 2013, apresentando a avaliação de conforto da sala/cozinha do Apartamento 1 e da sala/cozinha do Apartamento 2 durante esse período.

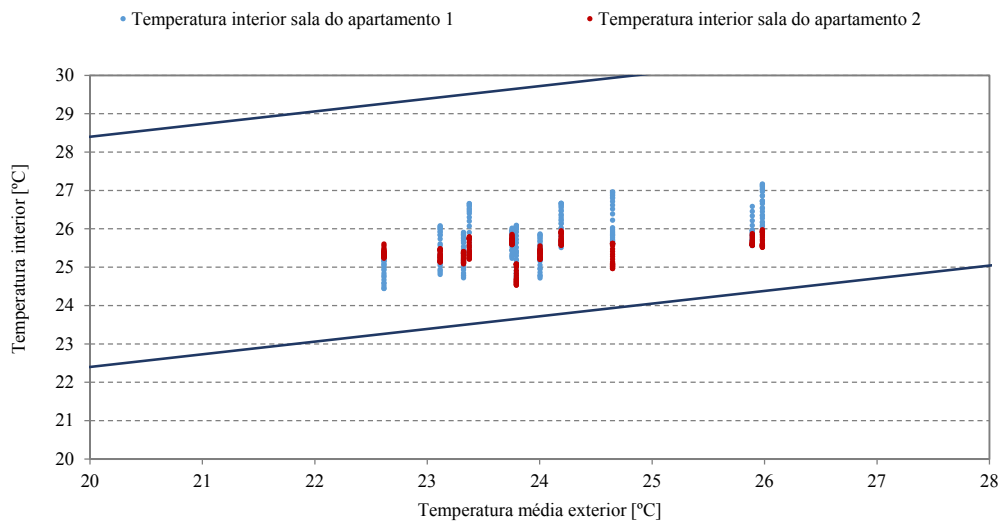


Fig.80 – Avaliação do conforto da sala/cozinha do Apartamento 1 e 2 durante a estação de arrefecimento no período entre 13 e 23 de Agosto de 2013.

De acordo com o método da Norma EN 15251 [28], para este período de tempo, a temperatura do ar interior dos Apartamentos está dentro do intervalo de conforto. A temperatura do ar interior é mais elevada no Apartamento 1, traduzindo-se, este facto, num desempenho térmico mais desfavorável. Tal como o já referido, o Apartamento 2 apresenta um registo de temperaturas mais estável do que o Apartamento 1.

Na estação de aquecimento, os apartamentos estavam desocupados pelo que não se teve em consideração os ganhos internos. Na Figura 81 apresentam-se os resultados com um incremento de 3°C, simulando, desta forma o efeito da ocupação.

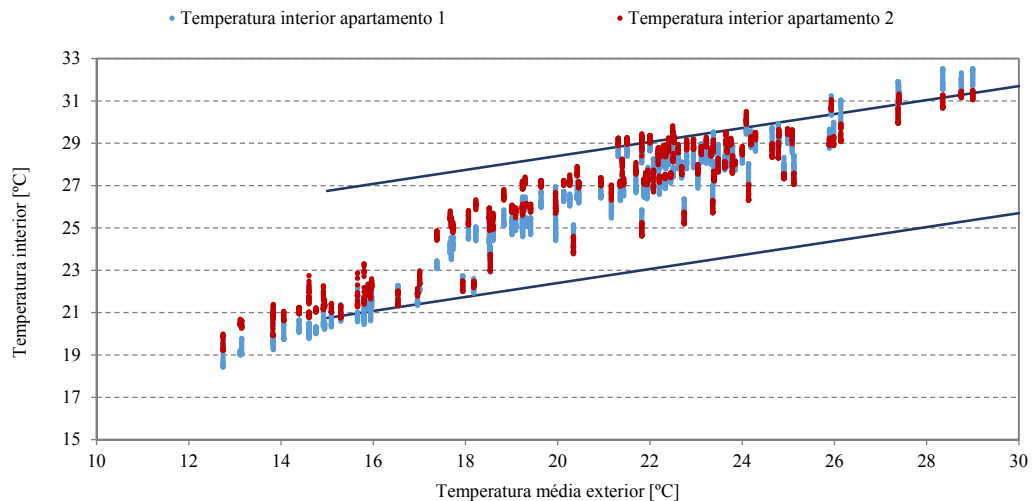


Fig.81 – Avaliação do conforto da sala/cozinha do Apartamento 1 e 2 durante a estação de arrefecimento no período entre 13 e 23 de Agosto de 2013 com ocupação.

Da análise da Figura 81, é perceptível a existência de períodos de sobreaquecimento. O Apartamento 1, apresenta picos, de temperaturas do ar interior, máximos, mais elevados.

3.3.8.1. Efeito da Ventilação Noturna

Como se demonstrou, a ventilação é uma técnica, de arrefecimento passivo, com enormes potencialidades. É importante o seu estudo, a fim de se compreender que benefícios que pode, ou não, proporcionar no edificado em estudo.

Como já referido, o processo de ventilação noturna seguiu estratégias diferentes nos dois apartamentos: para o Apartamento 1 foram deixadas as portas abertas, no Apartamento 2 as portas dos compartimentos foram encerradas de forma a isolar a sala/cozinha dos restantes compartimentos.

A Figura 82 avalia o desconforto do quarto e da sala/cozinha do Apartamento 1. Esta avaliação tem por finalidade verificar a uniformidade de condições e circulação livre do ar no Apartamento 1, ao deixar as portas abertas durante o processo de ventilação noturna. Tal como na análise da temperatura do ar interior, constata-se que o equilíbrio é o denominador comum neste Apartamento. As diferenças registadas são mínimas, sendo a temperatura do ar interior da sala/cozinha, em geral, um pouco mais elevada do que a do quarto, tendo grande influência, neste aspeto, a elevada área de envidraçados na sala/cozinha.

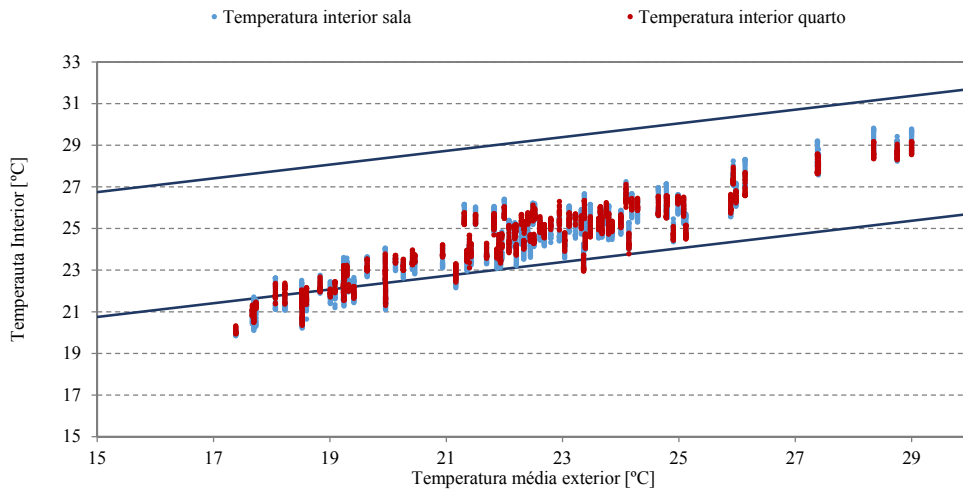


Fig.82 – Avaliação do conforto da sala/cozinha e do quarto Apartamento 1 durante a estação de arrefecimento no período entre 29 de Julho e 30 de Setembro de 2013.

Para o Apartamento 2, apresentam-se os resultados na Figura 83, onde as condições de ventilação foram distintas das utilizadas no Apartamento 1, isolando-se a sala/cozinha do resto do apartamento através do fecho das portas, criando uma zona isolada.

Analisando os registos, verificam-se temperaturas do ar interior mais elevadas no quarto, refletindo a existência de uma taxa de ventilação noturna reduzida neste compartimento. A influência da ventilação é notória, no caso da sala/cozinha, constatando-se temperaturas do ar interior mais baixas, o que proporciona mais conforto.

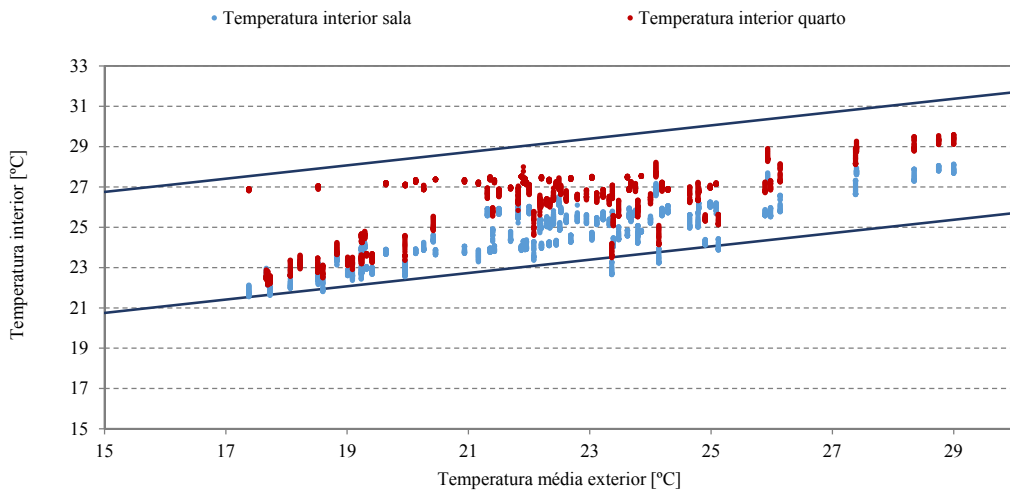


Fig.83 – Avaliação do conforto da sala/cozinha e do quarto do Apartamento 2 durante a estação de arrefecimento no período entre 29 de Julho e 30 de Setembro de 2013.

Da análise ao processo de ventilação noturna constata-se que, é significativa, a sua influência no controlo da temperatura do ar interior, proporcionando um arrefecimento que se reflete no nível de conforto. Pode afirmar-se que a ventilação noturna é um meio simples mas de grande eficácia, como se comprova nos resultados, contudo, para que a eficácia seja elevada, é necessário que as condições de funcionamento do sistema estejam salvaguardadas.

3.4. FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DA PAREDE EXTERIOR

A medição do fluxo de calor da parede efetuou-se durante o período de tempo decorrido entre os dias 19 e 28 de Março de 2013.

O registo dos valores resultantes da medição do lado exterior da parede devem avaliar-se com prudência devido ao facto de o fluxímetro exterior estar exposto a agentes climatéricos: vento, chuva e radiação solar. No entanto, na medição feita pelo lado interior da parede permitiu valores fiáveis.

Com os valores de fluxo da face exterior e interior da parede (temperatura do ar interior do quarto do Apartamento 2), quantificou-se o coeficiente de transmissão térmica da referida parede. Usando o método descrito pela Norma ISO 9869 [51], sendo a equação de cálculo do coeficiente de transmissão térmica dado por:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{i_j} - T_{e_j})} \quad (10)$$

Sendo:

- q_j , o fluxo de calor obtido nas medições [W/m^2];
- T_{i_j} , a temperatura do ar interior de um instante j [$^{\circ}\text{C}$];
- T_{e_j} , a temperatura do ar exterior de um instante j em [$^{\circ}\text{C}$].

Na Figura 84, apresentam-se os valores diários calculados do coeficiente de transmissão térmica para o período medido.

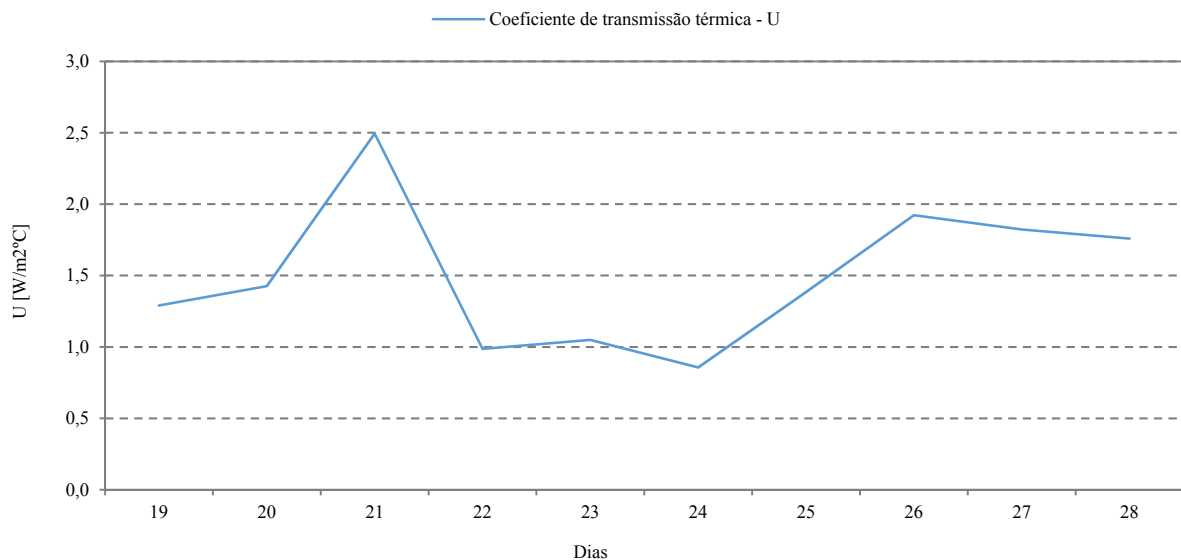


Fig.84 – Valor diário do coeficiente de transmissão térmica e do fluxo de calor medido *in situ*.

No Quadro 25, apresentam-se os valores obtidos para o coeficiente de transmissão térmica, U , obtidos através da equação 10.

Quadro 25 – Registos diários do fluxo de calor medido *in situ* e respetivo U .

	Dia	$\sum T_e$ [°C]	$\sum T_i$ [°C]	$\sum q$ [W/m ²]	U [W/m ² °C]	U Médio [W/m ² °C]	
Março	Com sol	19	982,6	2319,8	1725,5	1,3	
		20	1124,2	2353,9	1753,7	1,4	
		21	1839,4	2413,7	1432,4	2,5	1,4
		22	1380,7	2460,5	1065,8	1,0	
	23	1257,2	2448,5	1250,7	1,0	1,5	
	24	1207,9	2262,5	903,4	0,9		
	Sem sol	25	1499,4	2155,0	907,6		1,4
		26	1593,2	2117,5	1008,0		1,9
27		1535,4	2098,9	1025,0	1,8		
28		1507,9	2087,7	1019,7	1,8		

O valor obtido *in situ*, que é de um 1,5 W/m²°C, corresponde ao valor que está definido no ITE 54 [48]. Valor muito diferente do calculado com base na metodologia do ITE 50 [47], que é de 2,28 W/m²°C. O valor do ITE 54 [48] satisfaz os requisitos mínimos do REH [1], enquanto, que o do ITE 50 [47] não.

Sendo significativa a diferença, entre o valor obtido pelas medições *in situ* e do ITE 54 [48] e o obtido através do cálculo elaborado através do ITE 50 [47], quantificou-se, através do método de graus-dias, as quantidades brutas de aquecimento necessárias para a parede (1 m²), com o U obtido *in situ*, com o U do ITE 54 [48] e com o U calculado através dos valores do ITE 50 [47]. Para esse cálculo usou-se a seguinte equação:

$$NBA = U \times A \times GD \times 0,024 \quad (11)$$

Sendo:

- NBA , necessidades brutas de aquecimento [kWh];
- U , coeficiente de transmissão térmica [W/m²°C];
- A , área do elemento (considerado 1 m²) [m²];
- GD , graus dias [°C].

No Quadro 26 apresentam-se os resultados das necessidades brutas de aquecimento necessárias, durante os dias de ensaio, para o U medido *in situ* e para o U calculado através dos valores do ITE 50 [47] e ITE 54 [48]. Os graus-dias, para cada dia calcularam-se com base no exposto no parágrafo anterior, através da seguinte equação:

$$GD = \frac{\sum_j^n 18 - T_{e_j}}{24} \quad (12)$$

Sendo:

- T_{e_j} , temperatura do ar exterior do dia j [°C].

Quadro 26 – Necessidades brutas de aquecimento.

Dia	Graus-dias [°C]	Necessidades brutas de aquecimento – <i>U in situ</i>	Necessidades brutas de aquecimento – UITE 54	Necessidades brutas de aquecimento – UITE 50
		[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
19	11,2	0,3	0,4	0,6
20	10,2	0,3	0,4	0,6
21	5,2	0,3	0,2	0,3
22	8,4	0,2	0,3	0,5
23	9,3	0,2	0,4	0,5
24	9,6	0,2	0,4	0,5
25	7,6	0,3	0,3	0,4
26	6,9	0,3	0,3	0,4
27	7,3	0,3	0,3	0,4
28	7,5	0,3	0,3	0,4
Média		0,3	0,3	0,5

Analisando os resultados verifica-se que as necessidades brutas de aquecimento com o valor de U das paredes calculado com base nos valores do ITE 54 [48], que é análogo ao valor medido *in situ*, são 60% inferiores aos valores de U obtidos com base no ITE 50 [47].

3.5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A campanha de monitorização, *in situ*, dos parâmetros higrotérmicos e dos fatores que os influenciam é um ponto-chave do presente trabalho. Com os resultados obtidos caracteriza-se o desempenho térmico de dois apartamentos rurais reabilitados com soluções construtivas distintas que permitiram obter as seguintes conclusões:

- Temperatura do ar exterior:
 - A monitorização do clima exterior demonstrou que o edifício se situa num local onde o clima, para grande parte do ano, é de influência mediterrânica, mas sujeito a temperaturas que variam entre -1,0 e 38,0°C;
- Caudal de ventilação natural:
 - A medição do caudal de ventilação, através do método do gás traçador é eficaz, apesar de poder ser afetada por condições climatéricas exteriores. Os resultados obtidos foram de acordo com o esperado: o quarto do Apartamento 1 bastante hermético como desejado (0,01 RPH) e o quarto do Apartamento 2 com reduzida ventilação (0,4 RPH);
- Caudal de ventilação mecânica:
 - A medição do caudal de ventilação mecânica através de anemómetro revelou ser uma boa opção para este tipo de medições. A diferença com o valor, mencionado pelo fabricante do ventilador e valor medido, foi diminuta, 6 m³/h para a sala/cozinha do Apartamento 1 e 13 m³/h para a sala/cozinha do Apartamento 2. Estes valores são importantes como condição fronteira do modelo de simulação numérica;
- Temperatura do ar interior:
 - A medição da temperatura do ar interior, para a estação de aquecimento, no período de flutuação livre, revelou um melhor desempenho térmico por parte do Apartamento 2, que apresenta uma temperatura média do ar interior mais elevada, maior temperatura mínima e menor amplitude térmica diária;
 - A medição da temperatura do ar interior, para a estação de aquecimento, no período de aquecimento contínuo, demonstrou que o sistema de aquecimento é adequado e satisfatório. O Apartamento 1 apresentou melhores resultados, verificando-se uma temperatura média do ar interior de 18,4°C, enquanto, no Apartamento 2, foi de 17,3°C. Ambos os apartamentos possuem, neste período, uma reduzida amplitude térmica diária (Apartamento 1, 1,4°C e o Apartamento 2, 1,7°C);
 - A medição da temperatura do ar interior, para a estação de aquecimento, no período de aquecimento em regime intermitente (o sistema corrente nas famílias portuguesas) demonstrou um nível de eficácia baixo. A temperatura média registada é de 15,6°C no Apartamento 1 e de 14,5°C no Apartamento 2. É discutível se o esforço financeiro com este regime de aquecimento se traduz em conforto. Refira-se ainda que a diferença entre os valores máximos e mínimos é elevada, verificando-se para o Apartamento 1, uma amplitude térmica de 3,6°C, e para o Apartamento 2 de 2,9°C;
 - A medição da temperatura do ar interior na estação de arrefecimento, mostrou um comportamento bastante similar entre os dois apartamentos. A temperatura média obtida foi um pouco mais elevada no Apartamento 2 (mais 0,4°C) no entanto, o Apartamento 1 apresentou uma temperatura máxima mais elevada (1°C) e uma amplitude térmica superior. Verifica-se assim que o Apartamento

1 possui um desempenho térmico mais irregular, confirmando-se a sua maior suscetibilidade em relação à flutuação da temperatura exterior, fruto da sua menor inércia;

- Ventilação noturna:
 - O processo de ventilação noturna demonstrou ser eficaz em ambos os apartamentos. A ventilação noturna originou um desfasamento temporal médio, entre a temperatura máxima exterior e interior, de 3 horas, e um amortecimento térmico médio, entre as temperaturas referidas, de 5°C, em ambos os apartamentos;
- Avaliação do conforto:
 - A quantificação do desconforto térmico face aos critérios de conforto da Norma EN 15251 [28], no período de flutuação livre da estação de aquecimento, demonstrou que sem aquecimento o desconforto é 100% do tempo, no caso do Apartamento 1, e quase total, no Apartamento 2, 98% do tempo com desconforto. O isolamento térmico, por si só, não resolve os problemas de desconforto térmico;
 - A análise dos resultados da temperatura do ar interior para o período de flutuação livre, demonstra um comportamento térmico mais inconstante do Apartamento 1;
 - Os resultados da avaliação do desconforto térmico, nos períodos de aquecimento intermitente, mostraram que este regime de aquecimento não é eficiente em ambos os apartamentos. A amplitude térmica diária é elevada e o nível mínimo de conforto praticamente nunca é atingido;
 - A quantificação do desconforto térmico face aos critérios de conforto da Norma 15251 [28], na estação de arrefecimento, demonstrou ser desajustada. Esta conclusão deve-se ao facto da Norma [28] ser demasiado permissiva para as condições de sobreaquecimento, verificando-se que podem existir temperaturas de 30°C e estarem dentro dos limites de conforto;
- Coeficiente de transmissão térmica:
 - A medição do fluxo de calor de uma parede de elevada espessura e massa, permitiu calcular um valor de coeficiente de transmissão térmica que é de 1,5 W/m²°C, verificando-se que corresponde ao valor do ITE 54 [48], devendo utilizar-se este valor em vez do calculado através do ITE 50 [47]. A diferença entre os dois valores é de 0,78 W/m²°C.

4.

VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA UTILIZADO

4.1. OBJETIVOS

A validação do modelo de simulação numérica utilizado é de suma importância na presente tese, para, com ele, se desenvolver o estudo de sensibilidade para um conjunto de cenários de reabilitação em cinco localizações geográficas representativas do território nacional, avaliando-se e quantificando-se o conforto térmico e o consumo energético do edifício-tipo.

Os procedimentos de validação permitem compreender o programa de simulação dinâmica WUFI Plus, conhecer as suas potencialidades e limitações, demonstrando, que é uma ferramenta válida para o estudo do desempenho térmico de edifícios.

O objetivo da validação é o de validar o modelo numérico utilizado, através da comparação da temperatura medida *in situ*, durante a monitorização experimental, e da temperatura simulada.

Para o estudo da validação do modelo de simulação numérica utilizado adotou-se a seguinte metodologia:

- Análise da importância da simulação dinâmica evidenciando-se as vantagens que proporciona na conceção dos edifícios;
- Seleção da ferramenta de simulação numérica em regime dinâmico para a avaliação do desempenho térmico e consumo energético de edifícios de habitação;
- Apresentação do modelo matemático do WUFI Plus, e respetivas equações de balanço para uma zona térmica de simulação;
- Modelação geométrica do edifício-tipo simulado, estabelecendo-se as zonas térmica de simulação e condições fronteira da envolvente, do clima interior e do clima exterior;
- Validação do modelo numérico, comparando os valores da temperatura do ar interior simulados com os resultados da medição experimental, em dois períodos do ano, um para a estação de aquecimento e outro para a estação de arrefecimento;
- Discussão dos resultados, a fim de se validar o programa de simulação e verificar a sua capacidade para o desenvolvimento do estudo de sensibilidade.

De forma a cumprir os objetivos, os subcapítulos seguintes versam sobre: a importância da simulação dinâmica; escolha pela ferramenta de simulação WUFI Plus; modelo matemático do WUFI Plus; modelação geométrica e caracterização do edifício selecionado; validação do modelo numérico e discussão dos resultados

4.2. IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO DINÂMICA

Há uma procura incessante de métodos e meios que possibilitem a conceção de edifícios e espaços com maior fiabilidade, com garantia de qualidade. Neste contexto, na vertente da atividade de projeto de edifícios, a simulação numérica do desempenho térmico faz parte dessa estratégia de procura do rigor e na previsão e do controlo de qualidade do conforto térmico.

Surge assim a necessidade de simular o comportamento térmico de um edifício, de forma a avaliar o desempenho no que se refere ao conforto térmico e previsível consumo energético associado. Nos últimos anos foram desenvolvidas ferramentas de simulação de fenómenos de transferência de calor e humidade em edifícios, permitindo aos projetistas conceber projetos com mais qualidade e detalhe, possibilitando uma maior precisão do comportamento de soluções. As simulações baseiam-se num ano típico do clima local, tendo em conta a precipitação, temperatura do ar exterior, radiação solar (global, horizontal e vertical), humidade relativa, velocidade e direção do vento.

As principais vantagens da simulação térmica avançada são:

- Previsão mais precisa das cargas de climatização (aquecimento e arrefecimento);
- Previsão do consumo energético anual;
- Quantificação dos efeitos de parâmetros tais como o sombreamento, isolamento térmico, tipo de solução envidraçada, orientação, grau de ventilação e tipo de ocupação;
- Avaliação do conforto térmico através da análise da temperatura do ar interior.

O balanço higrotérmico considera o fluxo de calor normal por condução, convecção e radiação. Os fluxos de humidade acontecem por difusão, convecção e transporte líquido. Os fluxos de ar acontecem de forma natural, por forças externas ou mecânicas. A previsão do desempenho térmico requer algum conhecimento dos seguintes fatores [52]:

- Geometria do edifício;
- Condições fronteira;
- Propriedades dos materiais.

A geometria do edifício deve ser introduzida de forma detalhada. As condições fronteira são um fator importante nos resultados finais. Em geral é preciso conhecer:

- Ambiente interior (fontes de calor, temperatura de aquecimento e arrefecimento, etc.);
- Ambiente exterior (temperatura do ar exterior, humidade relativa exterior, radiação solar, etc.);
- Influência da interface entre camadas.

Relativamente às propriedades dos materiais, como é lógico, estes possuem uma importância extrema. As propriedades essenciais são:

- Massa específica;
- Porosidade;
- Calor específico;
- Condutibilidade térmica;
- Difusão e permeabilidade ao vapor.

A simulação numérica proporciona avaliar novas e variadas soluções construtivas otimizando as soluções especificadas, levando ao alcance dos melhores níveis de desempenho tendo em vista o conforto e eficiência energética dos edifícios.

A provar esta importância é a quantidade de *softwares* desenvolvidos para a realização desta tarefa. O Departamento de Energia dos Estados Unidos da América apresenta uma lista [53] com mais de 100 programas de simulação térmica.

Para o presente estudo, perante os objetivos propostos, optou-se pela utilização do programa WUFI Plus, as razões para esta escolha serão expostas nos parágrafos seguintes.

4.3. ESCOLHA DO PROGRAMA WUFI PLUS

O WUFI Plus combina a simulação energética com o cálculo da componente higrotérmica. Através da simulação com WUFI Plus pode avaliar-se o desempenho térmico de um edifício e calcular as suas necessidades energéticas. O algoritmo de cálculo é baseado no método dos volumes finitos. Este método trabalha a equação de calor diretamente, por aproximação das suas derivadas às de uma série de Taylor truncada, ou indiretamente, por aplicação do princípio da conservação da energia a pequenos volumes de controlo [54].

Na Figura 85 apresenta-se o processo de cálculo do WUFI Plus.

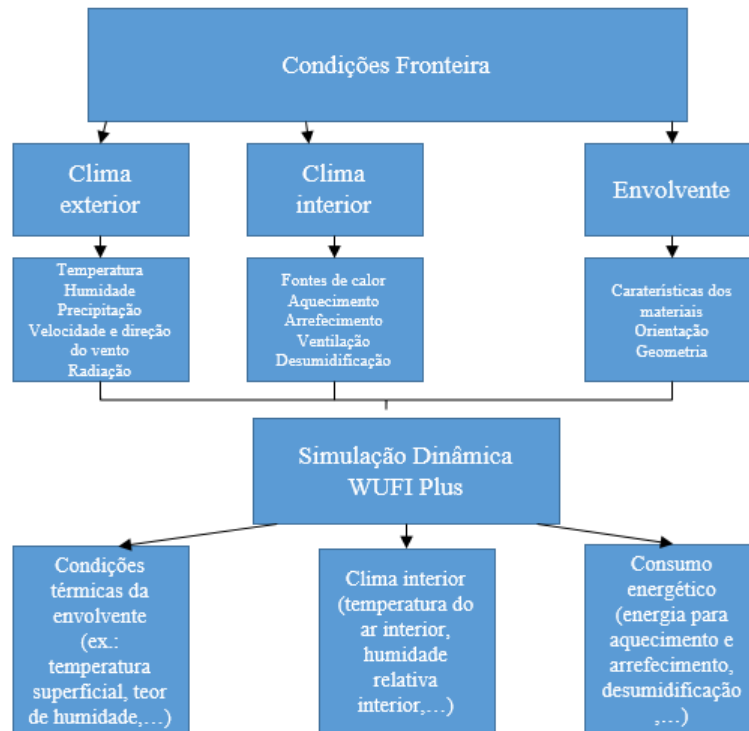


Fig.85 – Esquema do processo de cálculo do WUFI Plus [adaptado de 55].

Na Figura 86 apresenta-se um exemplo concreto de um *output* relativo às condições higrotérmicas da envolvente de uma parede orientada a Norte, constituída por um pano de granito com 75 cm de espessura.

Export of WUFIplus results: Zone 1, Component 1															
Calculation time: 1/1/2013 : 00 - 1/1/2014 : 00															
Export time: 1/1/2013 : 00 - 1/1/2014 : 00															
Values multiplied by 1															
Count of columns 16:															
1 - Date / Time															
2 - Time ascending [h], multiplied by 1															
3 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Solar radiation [W/m²]															
4 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Driving rain [Ltr/m²h]															
5 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Temperature (Granito Portugal, 0 cm) [°C]															
6 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Rel. humidity (Granito Portugal, 0 cm) [%]															
7 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Temperature (Granito Portugal, 36.287 cm) [°C]															
8 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Rel. humidity (Granito Portugal, 36.287 cm) [%]															
9 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Water Content (Granito Portugal, 36.287 cm) [kg/m³]															
10 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Temperature (Granito Portugal, 75 cm) [°C]															
11 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Rel. humidity (Granito Portugal, 75 cm) [%]															
12 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Water Content (Granito Portugal, 75 cm) [kg/m³]															
13 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Heat flux (outer surface) [W/m²]															
14 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Moisture flux (outer surface) [g/(h m²)]															
15 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Heat flux (inner surface) [W/m²]															
16 - 1: North (A0°, 9.77 m²): Moisture flux (inner surface) [g/(h m²)]															
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16
1/1/2013 : 01	1	0	0	14,572	43,4919	19,9839	7,2E-13	3,3E-16	20,0082	72,9236	0,12193	-244,299	0,24899	0,06272	-0,68161
1/1/2013 : 02	2	0	0	12,9673	49,6633	19,9326	9,6E-12	4,5E-15	20,0062	73,5975	0,12608	-194,182	0,14541	0,04758	-0,2642
1/1/2013 : 03	3	0	0	12,0517	53,1173	19,8369	6,8E-11	3,2E-14	20,0042	72,7071	0,12064	-168,792	0,11892	0,03265	-0,18331
1/1/2013 : 04	4	0	0	11,3392	55,5654	19,6981	3,4E-10	1,6E-13	20,001	71,9545	0,11631	-155,979	0,10411	0,00777	-0,15353
1/1/2013 : 05	5	0	0	10,8003	57,8655	19,524	1,3E-09	6,2E-13	19,9952	71,3642	0,11306	-145,006	0,09848	-0,03712	-0,13459
1/1/2013 : 06	6	0	0	10,2186	58,091	19,3232	4,4E-09	2E-12	19,9855	70,634	0,10922	-142,966	0,07322	-0,11169	-0,11567
1/1/2013 : 07	7	0	0	9,69413	58,5037	19,1037	1,3E-08	5,9E-12	19,971	70,0759	0,1064	-139,853	0,06711	-0,22327	-0,10598
1/1/2013 : 08	8	13,2	0	9,35182	58,6157	18,8719	3,3E-08	1,5E-11	19,9555	69,5212	0,1037	-138,796	0,05911	-0,34242	-0,09595

Fig.86 – Exemplo de um *output* relativo às condições higrotérmicas da envolvente de uma parede orientada a Norte, constituída por um pano de granito com 75 cm de espessura.

Na Figura 87 apresenta-se um exemplo concreto de um *output* relativo ao clima interior de uma zona térmica de simulação.

Export of WUFIplus results: Case 1																			
Calculation time: 1/1/2013 : 00 - 1/1/2014 : 00																			
Export time: 1/1/2013 : 00 - 1/1/2014 : 00																			
Values multiplied by 1																			
Count of columns 20:																			
1 - Date / Time																			
2 - Time ascending [h], multiplied by 1																			
3 - Z.1: Temperature of interior air [°C]																			
4 - Z.1: Rel. humidity of inner air [%]																			
5 - Z.1: Humidification [kg/h]																			
6 - Z.1: Dehumidification [kg/h]																			
7 - Z.1: Solar gains [kW]																			
8 - Z.1: Inner heat source convective [kW]																			
9 - Z.1: Heat exchange with opaque partitions [kW]																			
10 - Z.1: Heat exchange with windows [kW]																			
11 - Z.1: Heat flow ventilation [kW]																			
12 - Z.1: Moisture exchange with partitions [kg/h]																			
13 - Z.1: Inner moisture source [kg/h]																			
14 - Z.1: Ventilation natural [m³/h]																			
15 - Z.1: Ventilation mechanical [m³/h]																			
16 - Z.1: CO2-concentration [ppmv]																			
17 - Z.1: Inner heat source radiant [kW]																			
18 - Z.1: Mean surface temperature [°C]																			
19 - Z.1: Mean floor temperature [°C]																			
20 - Z.1: Mean ceiling temperature [°C]																			
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16	Col. 17	Col. 18	Col. 19	Col. 20
1/1/2013 : 01	1	20	73,281	0	0	0	0	-0,161	-0,221	-0,151	0,5714	0	31,712	0	906,98	0	19,655	19,717	19,655
1/1/2013 : 02	2	20	73,75	0	0	0	0	-0,149	-0,215	-0,147	0,2379	0	31,712	0	775,92	0	19,673	19,8	19,673
1/1/2013 : 03	3	20	72,813	0	0	0	0	-0,165	-0,213	-0,148	0,2219	0	31,712	0	676,06	0	19,661	19,793	19,661
1/1/2013 : 04	4	20	72,031	0	0	0	0	-0,18	-0,216	-0,148	0,2112	0	31,712	0	600,51	0	19,645	19,787	19,645
1/1/2013 : 05	5	20	71,406	0	0	0	0	-0,195	-0,218	-0,15	0,2005	0	31,712	0	541,92	0	19,632	19,782	19,632
1/1/2013 : 06	6	20	70,625	0	0	0	0	-0,216	-0,225	-0,154	0,2125	0	31,712	0	497,33	0	19,608	19,766	19,608
1/1/2013 : 07	7	20	70	0	0	0	0	-0,237	-0,231	-0,158	0,2085	0	31,712	0	463,03	0	19,586	19,756	19,586
1/1/2013 : 08	8	20	69,375	0	0	0,0406	0	-0,251	-0,235	-0,162	0,2139	0	31,712	0	436,27	0	19,572	19,762	19,572
1/1/2013 : 09	9	20	67,168	0	0	0,2668	0	-0,252	-0,212	-0,233	0,3673	0	63,423	0	403,76	0	19,594	19,792	19,594

Fig.87 – Exemplo de um *output* relativo ao clima interior de uma zona térmica de simulação.

Na Figura 88 apresenta-se um exemplo concreto de um *output* relativo ao consumo energético de uma zona térmica de simulação.

Export of WUFIplus results: Case 1			
Calculation time: 1/1/2013 : 00 - 1/1/2014 : 00			
Export time: 1/1/2013 : 00 - 1/1/2014 : 00			
Values multiplied by 1			
Count of columns 4:			
1 - Date / Time			
2 - Time ascending [h], multiplied by 1			
3 - Z.1: Heating power [kW]			
4 - Z.1: Cooling power [kW]			
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4
1/1/2013 : 01	1	0,532286	0
1/1/2013 : 02	2	0,511223	0
1/1/2013 : 03	3	0,524711	0
1/1/2013 : 04	4	0,544698	0
1/1/2013 : 05	5	0,561992	0
1/1/2013 : 06	6	0,59549	0
1/1/2013 : 07	7	0,626089	0
1/1/2013 : 08	8	0,643959	0

Fig.88 – Exemplo de um *output* relativo ao consumo energético de uma zona térmica de simulação.

Importa referir que, para o clima exterior, o WUFI Plus possui uma base de dados com os elementos necessários para a simulação. No entanto, é possível ao utilizador inserir os dados referentes à localização do edifício, o que foi realizado no presente caso.

Desta forma, para as necessidades do presente trabalho, o WUFI Plus ajusta-se perfeitamente, enumerando-se de seguida diversas premissas que sustentam a escolha para este programa:

- O Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto possui ligações privilegiadas com o Instituto Fraunhofer, sendo uma mais-valia na resolução de dúvidas e esclarecimentos que surgiram durante a sua exploração;
- Existem variadíssimos estudos elaborados com base em diversos programas de simulação numérica, sendo importante para o Laboratório de Física das Construções a validade científica do WUFI Plus para o caso específico em estudo;
- O WUFI Plus permite a manipulação de dados climáticos locais (radiação solar, temperatura do ar exterior, humidade relativa, etc.).

4.4. MODELO MATEMÁTICO DO WUFI PLUS

Para a definição do clima interior do edifício o programa WUFI Plus desenvolve o seu método de cálculo através do balanço térmico de uma zona, como se ilustra na Figura 89.

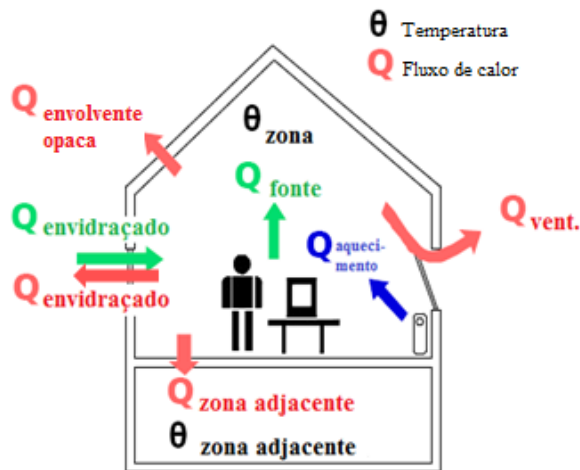


Fig.89 – Balanço térmico para uma zona do programa WUFI Plus [55].

No Quadro 27 apresentam-se equações relativas ao balanço térmico de uma zona térmica de simulação, da envolvente opaca e translúcida, representado na Figura 89.

Quadro 27 – Equações relativas ao balanço térmico de uma zona de simulação no WUFI Plus.

Equação balanço térmico de uma zona [W]	$\rho c V \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = Q_{envolventeopaca} + Q_{envidracado} + Q_{IWQ} + Q_{vent} + Q_{RLT}$ (13)
Envolvente opaca [W]	$Q_{envolventeopaca} = \sum A \times U \times (\theta_{se} - \theta_i)$ (14)
	$Q_{envidracado} = Q_T - Q_I$ (15)
Envolvente translúcida [W]	$Q_T = A_{env} \times U_{env} \times (\theta_a - \theta_i)$ (16)
	$Q_I = \gamma \times (f_{frame} \times SHGC \times A_w \times I)$ (17)
$Q_{envidracado}$, fluxo térmico dos envidraçados [W]	ρ , massa volúmica [kg/m ³]
$Q_{envolventeopaca}$, fluxo térmico da envolvente opaca [W]	c , calor específico [J/kg°C]
Q_{IWQ} , fluxo térmico dos elementos interiores [W]	$\partial \theta_i / \partial t$ derivada parcial da temperatura do ar interior em ordem ao tempo
$Q_{ventilação}$, fluxo térmico da ventilação [W]	Q_T , perdas de calor pelo envidraçado [W]
Q_{RLT} , fluxo térmico dos sistemas de aquecimento [W]	Q_I , ganhos solares pelo envidraçado [W]
V , volume [m ³]	A_w , área do envidraçado [m ²]
A , área da envolvente [m ²]	U_{env} , coeficiente de transmissão térmica do envidraçado [W/m ² °C]
U , coeficiente de transmissão térmica [W/m ² °C]	θ_a , temperatura do ar exterior [°C]
θ_{se} , temperatura superficial da envolvente exterior [°C]	θ_i , temperatura do ar interior [°C]
θ_i , temperatura do ar interior [°C]	$SHGC$, coeficiente de ganhos solares
γ , ganhos solares diretos no ar interior	I , radiação solar [W/m ²]
f_{frame} , fator de redução devido à caixilharia	
A_w , área de envidraçados [m ²]	

Verifica-se que as equações são compostas por múltiplas variáveis, que variam em função das condições de fronteira – envolvente, clima exterior e interior. De forma a facilitar a definição das variáveis para o processo de simulação, o programa WUFI Plus, tem uma base de dados de materiais, que o utilizador pode usar para a constituição das soluções construtivas dos edifícios, sendo também possível ao utilizador editar ou inserir os materiais e suas características. Para além disso possibilita a introdução de ficheiros climáticos e definição das condições interiores (temperatura de aquecimento e/ou de arrefecimento, ocupação, desumidificação, etc.).

4.5. MODELAÇÃO GEOMÉTRICA E CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO SELECIONADO

No presente subcapítulo descrevem-se os procedimentos essenciais e requisitos associados para a realização das simulações e opções tomadas para a validação do modelo utilizado, que é conseguida confrontando os resultados das medições experimentais com os resultados simulados.

Nas Figuras 90 e 91 apresenta-se a definição geométrica e volumetria do Apartamento 1 (com as paredes exteriores isoladas na caixa-de-ar) e do Apartamento 2 (sem isolamento nas paredes exteriores).

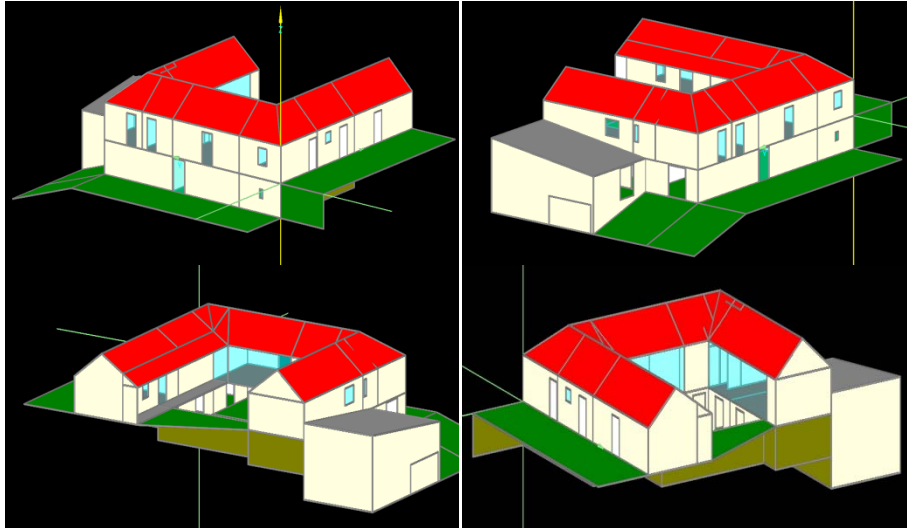


Fig.90 – Modelação do edifício em estudo.

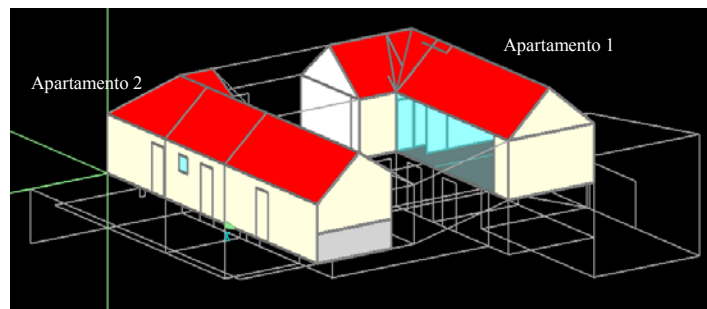


Fig.91 – Modelação do Apartamento 1, à direita (com isolamento dentro da caixa-de-ar) e do Apartamento 2, à esquerda (sem isolamento)

No Apartamento 1 foram consideradas quatro zonas de simulação, sala/cozinha, instalação sanitária e quartos. Para o Apartamento 2, consideraram-se, igualmente, quatro zonas de simulação, sala/cozinha, hall, instalação sanitária e quarto. As zonas térmicas definidas, são as zonas úteis e para as quais o programa calcula, sobretudo as temperaturas do ar interior, temperaturas superficiais, humidade relativa e consumo energético.

As zonas não aquecidas definem-se, no programa, na secção “*attached zones*”. No presente modelo consideraram-se duas zonas não aquecidas: sala comum, separando o Apartamento 1 e 2 pela parede do quarto de cada apartamento e um arrumo separado do Apartamento 2 pelo pavimento do hall e instalação sanitária, identificados na Figura 92.

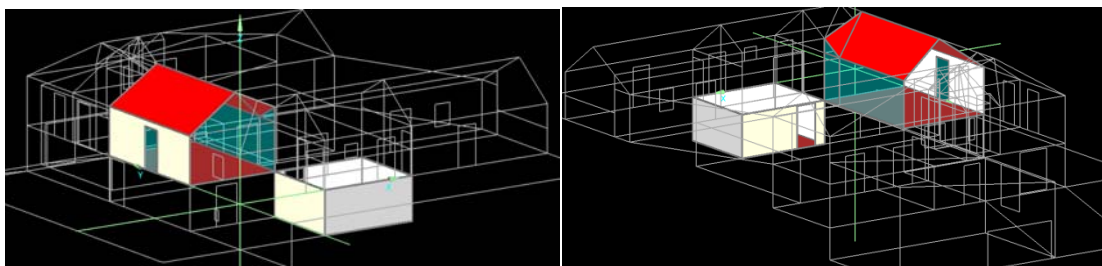


Fig.92 – Espaços não úteis – “attached zones”.

Os restantes elementos, denominados “*remaining elements*” pelo programa, são relativos, por exemplo, a palas, pátios, solo envolvente e muros. No modelo em consideração destacam-se, neste campo, os compartimentos do piso inferior, que possuem janelas e portas metálicas com perfurações em toda a sua área, sendo por isso, considerados fortemente ventilados, isto é espaços exteriores (Figura 93).



Fig.93 – Exemplo das janelas e portas dos elementos restantes.

Na Figura 94 apresentam-se os espaços considerados como exterior atendendo à forte ventilação.

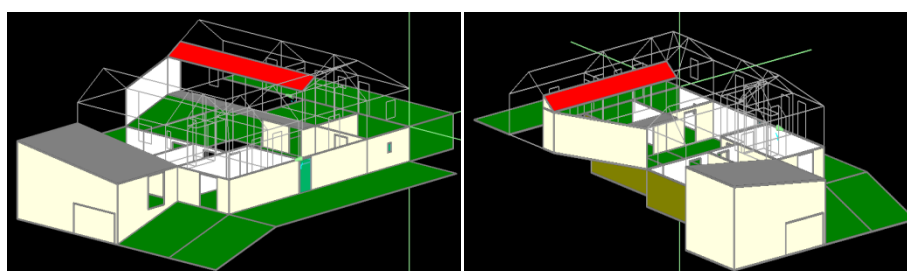


Fig.94 – “Remaining elements” da modelação do edifício.

Nos subcapítulos seguintes descrevem-se as várias etapas para o desenvolvimento do modelo de simulação dinâmica no programa WUFI Plus.

4.5.1. DADOS CLIMÁTICOS

Para a calibração do modelo, o ficheiro climático utilizado foi constituído através dos dados recolhidos *in situ* – temperatura do ar exterior e humidade relativa – e de dados fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera da estação meteorológica de Cabeceiras de Basto – radiação solar global, precipitação, rumo e intensidade do vento – uma vez que estes dados climáticos não foram medidos no local de estudo.

Com este conjunto de dados, através de uma folha de cálculo que o programa possui, construiu-se um ficheiro climático específico. Apresentam-se nas Figuras 95 a 103, os dados climáticos dos períodos considerados para a validação do modelo (para a estação de aquecimento 04 a 16 de Fevereiro de 2013 para o Apartamento 1 e 01 a 11 de Abril de 2013 para o Apartamento 2, e para a estação de arrefecimento

de 29 de Junho a 27 de Setembro de 2013 para os dois Apartamentos). Refere-se que, para o modelo partir de condições iniciais idênticas às do edifício monitorizado, incluíram-se na simulação dinâmica um período mais longo que o apresentado.

Na Figura 95 apresentam-se os valores da temperatura do ar e humidade relativa exterior para o período de validação do Apartamento 1 na estação de aquecimento.

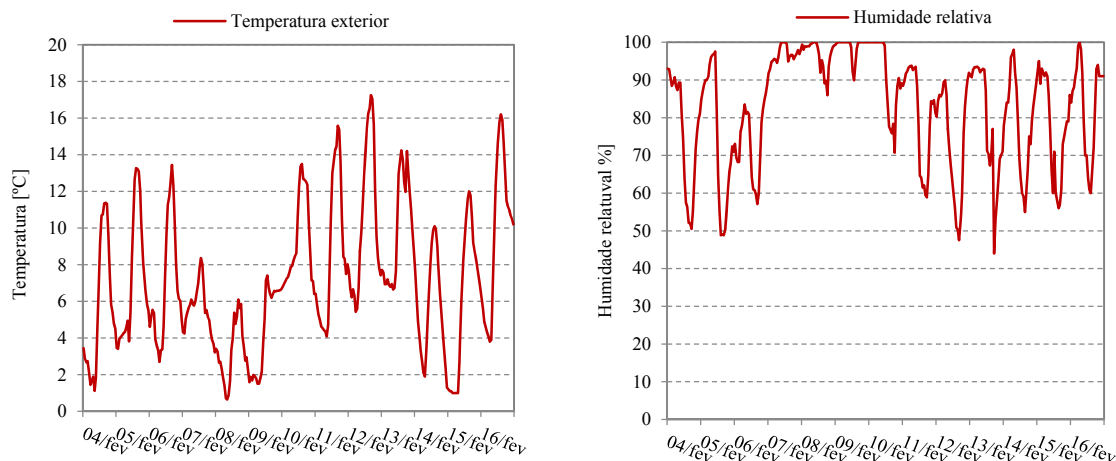


Fig.95 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do período de validação do Apartamento 1 na estação de aquecimento.

Na Figura 96 apresentam-se os valores da radiação global e velocidade do vento para o período de validação do Apartamento 1 na estação de aquecimento.

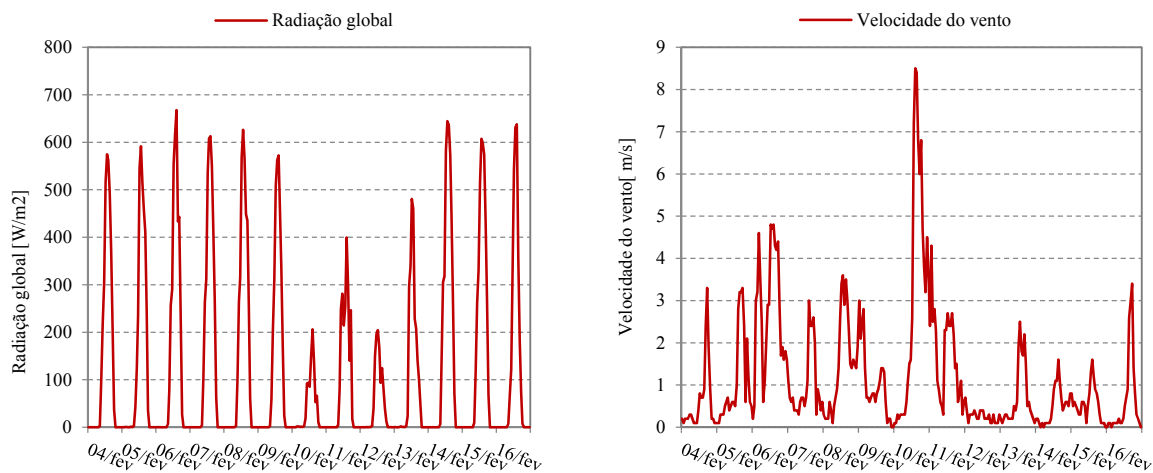


Fig.96 – Radiação global e velocidade do vento do período de validação do Apartamento 1 na estação de aquecimento.

Na Figura 97 apresentam-se os valores do rumo do vento e da precipitação para o período de validação do Apartamento 1 na estação de aquecimento.

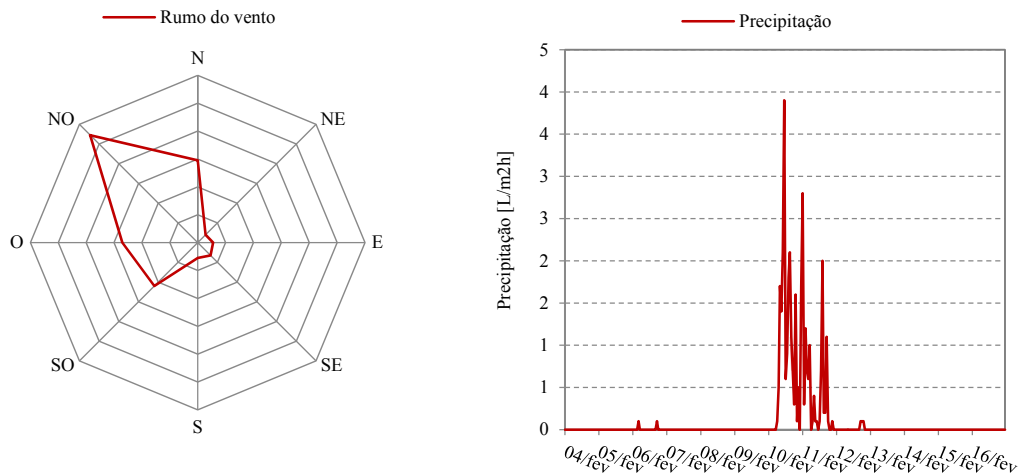


Fig.97 – Rumo do vento e precipitação do período de validação do Apartamento 1 na estação de aquecimento.

Na Figura 98 apresentam-se os valores da temperatura do ar e humidade relativa exterior para o período de validação do Apartamento 2 na estação de aquecimento.

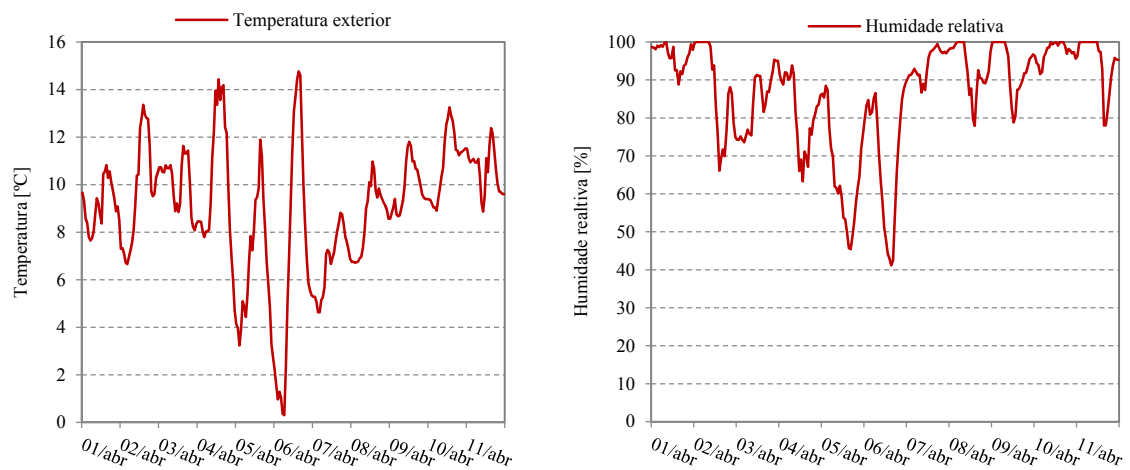


Fig.98 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do período de validação do Apartamento 2 na estação de aquecimento.

Na Figura 99 apresentam-se os valores da radiação global e velocidade do vento para o período de validação do Apartamento 2 na estação de aquecimento.

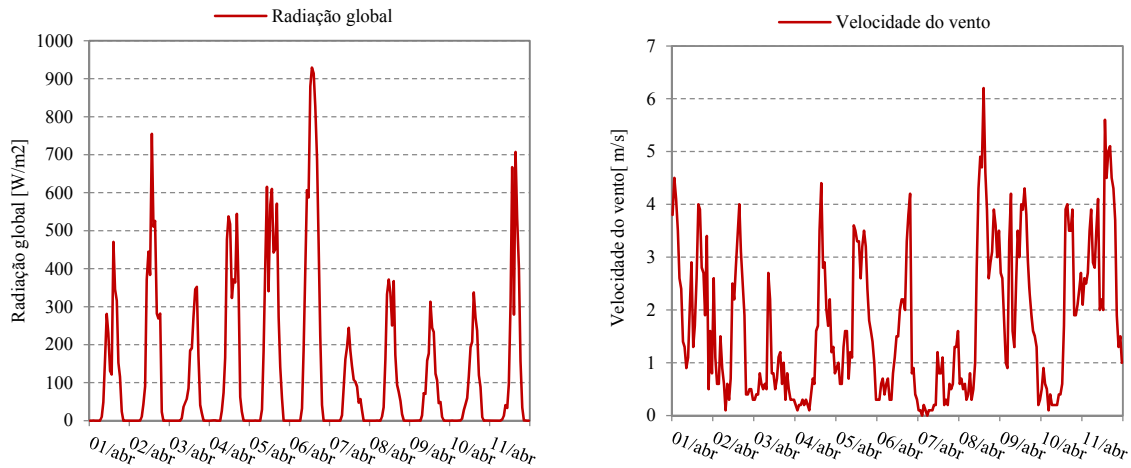


Fig.99 – Radiação global e velocidade do vento do período de validação do Apartamento 2 na estação de aquecimento.

Na Figura 100 apresentam-se os valores do rumo do vento e da precipitação para o período de validação do Apartamento 2 na estação de aquecimento.

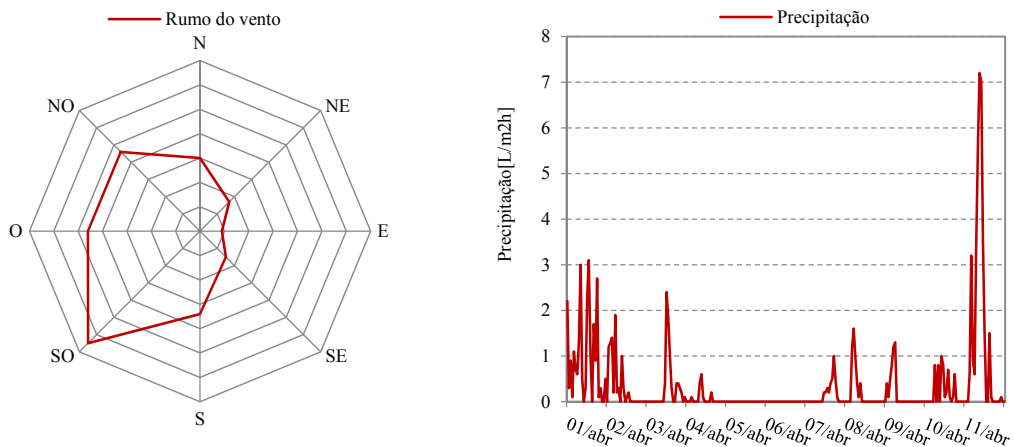


Fig.100 – Rumo do vento e precipitação do período de validação do Apartamento 2 na estação de aquecimento.

Na Figura 101 apresentam-se os valores da temperatura do ar e humidade relativa exterior para o período de validação dos Apartamentos na estação de arrefecimento.

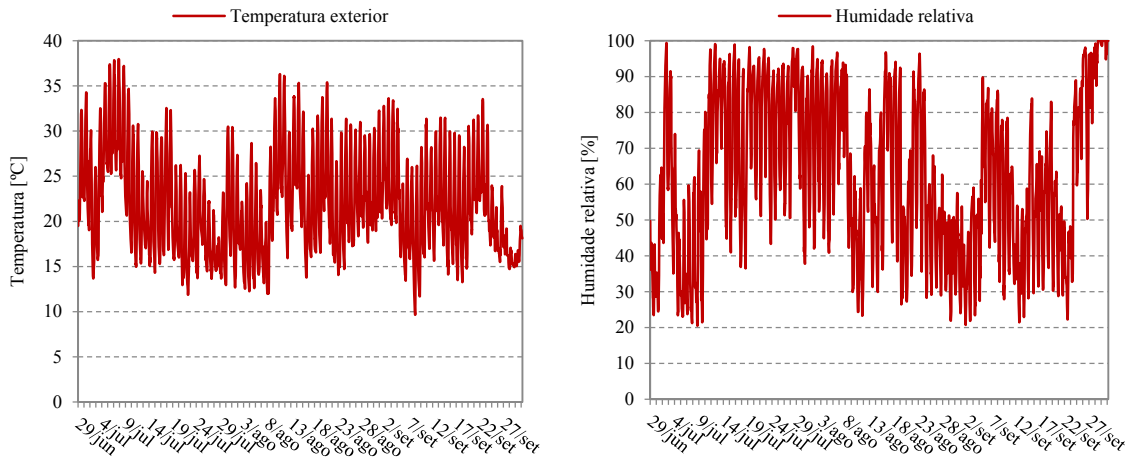


Fig.101 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do período de validação dos Apartamentos na estação de arrefecimento.

Na Figura 102 apresentam-se os valores da radiação global e velocidade do vento para o período de validação dos Apartamentos na estação de arrefecimento.

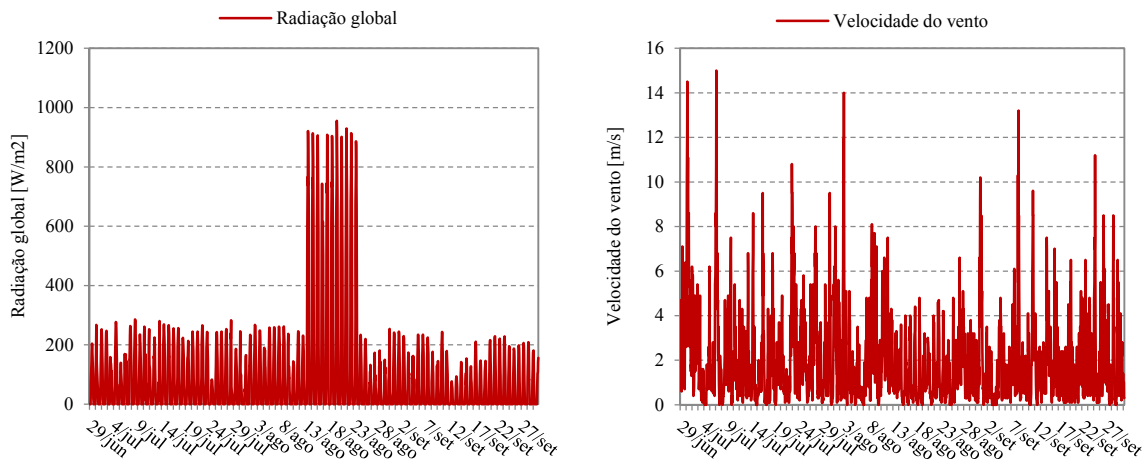


Fig.102 – Radiação global e velocidade do vento do período de validação dos Apartamentos na estação de arrefecimento.

Na Figura 103 apresentam-se os valores do rumo do vento e da precipitação para o período de validação dos Apartamentos na estação de arrefecimento.

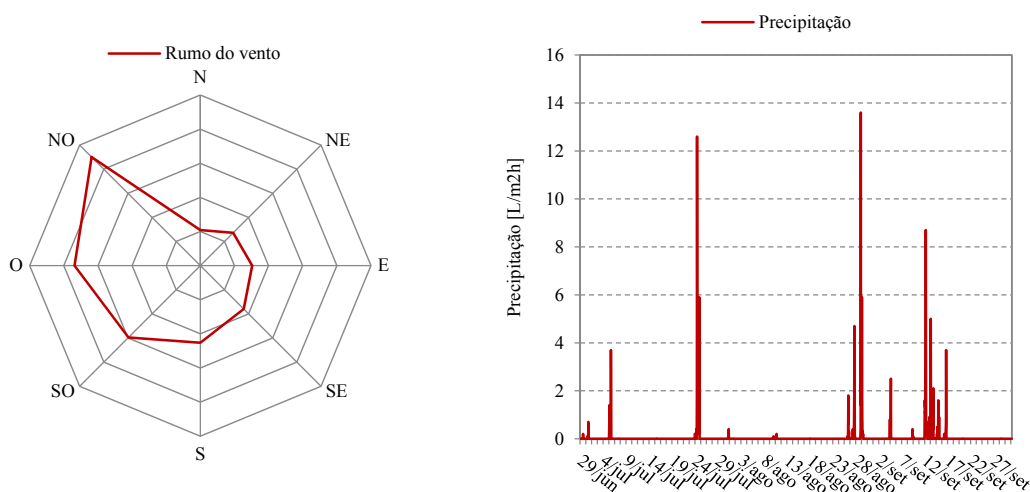


Fig.103 – Rumo do vento e precipitação do período de validação dos Apartamentos na estação de arrefecimento.

4.5.2. DEFINIÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

O programa WUFI Plus possui uma interface de fácil acesso e intuitiva ao utilizador, o que facilita a tarefa. Na Figura 104 apresenta-se um exemplo de solução construtiva para a parede exterior do Apartamento 1.

Resistência térmica: 2,63 m²k/W
 Coeficiente de transmissão térmica: 0,38 W/m²k



Espesura: 0,98 m

Nr.	Material/Camada do exterior para o interior	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Espesura [m]	Cor
1	Granito	2600	1000	2,8	0,75	
2	Espaço de ar de 50 mm	1,3	1000	0,28	0,05	
3	XPS	40	1500	0,03	0,05	
4	Tijolo cerâmico furado	1250	850		0,11	
5	Reboco	2104	776	1,373	0,02	

Fig.104 – Exemplo de um elemento construtivo usado na simulação do programa WUFI Plus (Fonte: WUFI Plus).

O WUFI Plus possui uma base de dados de materiais em que é possível seleccionar materiais e constituir as soluções construtivas a implementar. No caso de o material em questão não constar dessa base de dados ou as suas características não se ajustarem, o utilizador pode criar um material/solução nova ou editar as já existentes.

No Quadro 28 referem-se os materiais considerados nas simulações e as suas propriedades principais indispensáveis ao cálculo: densidade; porosidade; calor específico; condutibilidade térmica e fator de resistência à difusão do vapor de água.

Quadro 28 – Características principais dos materiais utilizados no modelo numérico desenvolvido no WUFI Plus.

Material	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg°C]	Condutibilidade térmica [W/m°C]	Porosidade [%]	Fator de resistência à difusão do vapor de água [-]
Granito	2600	1000	2,80	0,095	300
Cerâmica (tijolo, telhas)	1800	850	0,69	0,31	10
Poliestireno expandido extrudido (xps)	40	1500	0,037	0,95	450
Reboco	2104	776	1,37	0,22	76
Betão armado	2200	850	1,60	0,18	92
Madeira (soalho)	300	1500	0,05	0,80	12,50
Espaço de ar	1,3	1000	0,28	0,99	0,32
Ardósia	1900	850	1,70	0,24	10
Madeira (portas)	650	1500	0,13	0,47	200
Camada de regularização (argamassa)	1782	850	1,70	0,34	45,50

No anexo II apresentam-se a localização e constituição das soluções construtivas utilizadas na calibração do modelo.

4.5.3. OCUPAÇÃO E GANHOS INTERNOS

A contabilização dos ganhos térmicos internos é consequência da ocupação e de outras fontes internas como a iluminação. O programa WUFI Plus dispõe de uma ferramenta específica, conhecido no programa como “*Inner loads/Occupancy*”, que permite a quantificação e a definição de perfil de ocupação durante um período de tempo.

No processo de validação do modelo não se contabilizou os ganhos de calor internos (devidos a ocupação e outras fontes internas), uma vez que ambos os apartamentos só estavam ocupados ocasionalmente no período de fim-de-semana, períodos festivos (Natal, Carnaval e Páscoa) e de férias.

4.5.4. CONDIÇÕES DE AQUECIMENTO, ARREFECIMENTO, VENTILAÇÃO E DESUMIDIFICAÇÃO NA SIMULAÇÃO

As condições a definir, no WUFI Plus, pelo utilizador para acionar os meios de aquecimento, arrefecimento, ventilação e desumidificação são:

- Temperatura do ar interior mínima na estação de aquecimento;
- Temperatura do ar interior máxima na estação de arrefecimento
- Humidade relativa interior máxima;
- Caudal de Ventilação.

Diferentes condições podem ser atribuídas para vários períodos do ano, podendo definir diferentes perfis diários.

Os valores a introduzir, referentes à temperatura do ar interior, são os valores mínimos e os máximos para se efetuar o controlo dos meios de aquecimento e de arrefecimento, respetivamente. Os meios de climatização entram em funcionamento mediante o valor inserido. Para os parâmetros da humidade relativa, utiliza-se o mesmo procedimento, inserem-se os limites mínimos e máximos para ativar os meios de desumidificação.

Para a validação do modelo, o caudal de ventilação natural foi medido, como se referiu no subcapítulo 3.3.2, através do método do gás traçador. A ventilação mecânica efetuou-se, em ambos os apartamentos, através de um sistema de ventilação da marca S&P modelo TD – 250/100 Silent, instalados na sala/cozinha de cada um dos apartamentos durante os meses de Julho, Agosto e Setembro.

No Quadro 29 apresentam-se os valores dos parâmetros introduzidos no WUFI Plus para a validação do modelo numérico.

Quadro 29 – Valores das condições de aquecimento, arrefecimento, ventilação e desumidificação consideradas na validação do modelo.

Apartamento	Temperatura do ar interior mínima para aquecimento [°C]	Temperatura do ar interior para arrefecimento [°C]	Ventilação natural – permanente [RPH]	Ventilação mecânica de Julho a Setembro – 00 às 09 [m ³ /h]	Humidade Relativa [%]
1	20	Sem restrições	0,01	180	Sem restrições
2	20	Sem restrições	0,4	180	Sem restrições

O caudal dos ventiladores foi medido, *in situ*, obtendo-se um valor de 174 m³/h para o Apartamento 1 e de 193 m³/h para o Apartamento 2. No entanto, foi usado um valor de caudal de 180 m³, indicado na ficha técnica do fabricante.

4.5.5. DEFINIÇÃO DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO E VENTILAÇÃO

No programa existe um modelo destinado à definição dos sistemas de climatização e ventilação mecânica. No presente estudo foram utilizados o sistema de aquecimento elétrico, ventilação natural e ventilação mecânica no Verão (período noturno).

O WUFI Plus possibilita a definição de diferentes períodos de funcionamento podendo o utilizador constituir diversos perfis, variando o perfil durante um dia ou ao longo de vários meses ou anos.

Na Figura 105 apresenta-se um exemplo para um sistema de aquecimento elétrico em funcionamento.

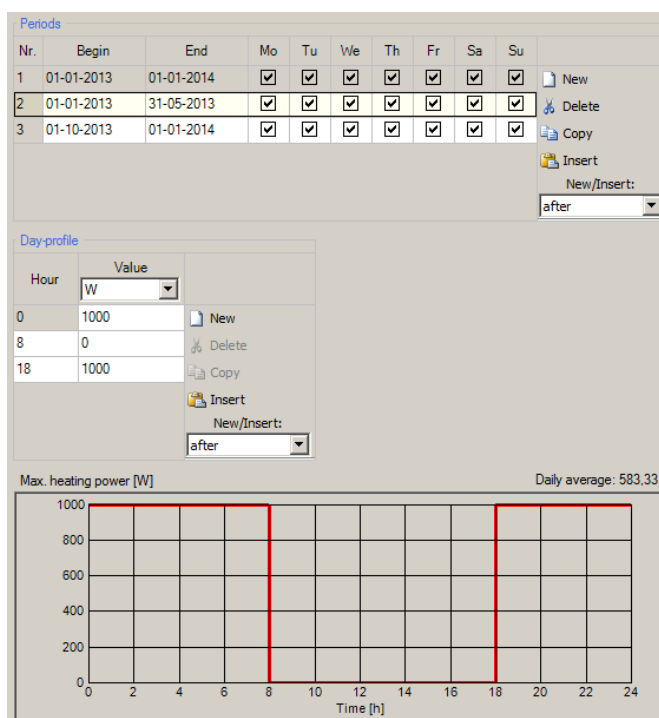


Fig.105 – Exemplo de definição de um perfil diário para o sistema de aquecimento (Fonte: WUFI Plus).

Para a validação do modelo criou-se um perfil diário de funcionamento do sistema de aquecimento e de ventilação, de acordo com o exposto nos subcapítulos 3.3.5.2., 3.3.5.3 e 3.3.6.1.

4.5.6. DEFINIÇÃO DE CONDIÇÕES INICIAIS DE SIMULAÇÃO

Neste campo são definidas as condições iniciais relativamente à temperatura do ar interior, humidade relativa e concentração de dióxido de carbono, do espaço interior. Igualmente se define, o modo como os ganhos solares são distribuídos nas superfícies interiores (ver Quadro 30).

Quadro 30 – Condições iniciais das simulações higrotérmicas.

Parâmetros	Valores iniciais
Temperatura do ar interior inicial [°C]	20
Humidade relativa inicial [%]	55
Concentração inicial de CO ₂ [ppmv]	1000
Distribuição dos ganhos solares nas superfícies interiores	Proporcional à área

4.6. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A validação do modelo numérico é uma tarefa crucial para que possa ser utilizado o modelo nos estudos paramétricos. A sua realização proporciona o conhecimento profundo do programa utilizado e o estudo de diversos parâmetros influenciadores do cálculo, tais como, as propriedades dos materiais, a potência de aquecimento e ou arrefecimento, proteções dos envidraçados, grau de ventilação e ganhos internos.

A validação do modelo numérico efetuou-se através da comparação dos valores da temperatura do ar interior obtidos experimentalmente com a temperatura do ar interior obtida por simulação numérica. Consideraram-se dois períodos para a validação do modelo numérico. Um para o período de aquecimento, que no Apartamento 1, decorreu entre o dia 4 e 16 de Fevereiro, e no Apartamento 2, entre o dia 1 e 11 de Abril. Período no qual, o sistema de aquecimento esteve em funcionamento em regime intermitente. O outro para o período de arrefecimento, igual para os dois apartamentos, considerando-se o período entre o dia 29 de Junho e 30 de Setembro. Neste período, nos dois apartamentos, esteve em funcionamento o sistema de ventilação mecânica durante a noite.

A opção por uma validação exclusivamente térmica e não higrotérmica deve-se a uma maior dificuldade de validar o modelo através dos valores de humidade relativa e ao facto da avaliação do conforto, feita através do método da Norma EN 15251 [28], necessitar apenas da temperatura do ar interior.

A validação do modelo numérico teve em atenção as condições de ocupação e utilização do edifício nesse período. No Quadro 31 sintetizam-se as condições.

Quadro 31 – Condições consideradas para a validação do modelo.

Condições (fatores)	Estação de aquecimento	Estação de arrefecimento
Proteção dos envidraçados	100% Ativadas	
Mobiliário	Introdução de elementos, estabelecendo-se o seu volume e massa	
Ocupação	Inexistente	
Ventilação natural	Valor obtido no ensaio do gás traçador	
Regime de ventilação mecânica	-	Intermitente
Regime de aquecimento	Intermitente, contínuo ou inexistente	-

Os resultados para a validação do modelo numérico na estação de aquecimento e arrefecimento expõem-se de seguida, organizando-se por:

- Temperatura do ar interior na estação de aquecimento, compara-se a temperatura do ar interior obtida numericamente com a obtida experimentalmente durante o período de aquecimento em regime intermitente;
- Temperatura do ar interior na estação de arrefecimento, compara-se a temperatura do ar interior obtida numericamente com a obtida experimentalmente durante os meses de Julho, Agosto e Setembro, período em que a ventilação noturna esteve em funcionamento;
- Discussão dos resultados, analisam-se os resultados obtidos para os períodos de validação verificando-se se os objetivos estabelecidos foram cumpridos.

4.6.1. TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

Para a validação do modelo numérico adotado durante a estação de aquecimento optou-se, por se considerar a temperatura do ar interior de uma zona térmica de simulação, selecionando os quartos de cada um dos apartamentos modelados.

Este compartimento teve um período de monitorização experimental particularmente cuidado, com os sistemas de aquecimento a operarem de acordo com o regime planeado, com ocupação ao fim-de-semana, tendo sido neste compartimento o caudal de ventilação natural medido.

O período de tempo selecionado para a validação do modelo foi, em ambos os apartamentos, o período de aquecimento em regime intermitente.

A simulação foi feita para um período de tempo mais longo do que os dias apresentados para a validação, a fim de permitir que as condições iniciais do modelo não influenciem os resultados, no período em análise. Neste período procedeu-se à estabilização das condições iniciais, aquecendo os apartamentos de forma contínua.

Na Figura 106 apresentam-se os resultados da validação do modelo numérico para esta estação de aquecimento para o Apartamento 1. O período utilizado para a validação do modelo foi o de 5 a 15 de Fevereiro de 2013, período em que o sistema de aquecimento funcionou em regime intermitente entre as 18:00 e as 00:00 horas. De referir que entre do dia 9 ao 11 do mesmo mês o apartamento esteve ocupado, não se considerando este período na validação do modelo numérico (região sombreada).

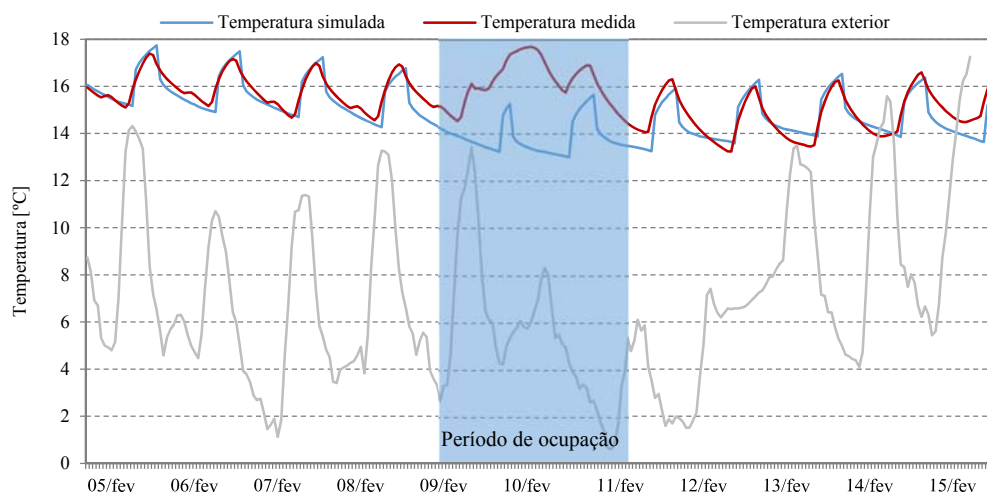


Fig.106 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de aquecimento entre o dia 5 e 15 de Fevereiro de 2013.

A comparação dos registos de temperatura do ar interior medida e dos resultados de simulação evidenciam uma boa aproximação, sendo as diferenças, entre os valores mínimos e máximos, muito próximas.

No modelo numérico a entrada em funcionamento do sistema de aquecimento (em regime intermitente) provoca, no início, um aumento rápido da temperatura do ar interior, registando-se, mais tarde, o seu aumento gradual característico da curva do modelo experimental, fenómeno que também se verifica, em sentido contrário, aquando da interrupção do funcionamento do sistema de aquecimento, pelas 00:00 horas, havendo um arrefecimento mais célere por parte do modelo numérico.

O decréscimo da temperatura do ar interior no modelo numérico é acentuado, numa primeira fase, após se ter desligado o sistema de aquecimento, verifica-se, mais tarde, uma diminuição mais gradual similar ao comportamento real do registo monitorizado.

Nas Figuras 107 e 108 apresenta-se a comparação, entre os resultados experimentais e os numéricos, para um período de tempo mais curto (entre os dias 5 a 8 e 12 a 15 de Fevereiro de 2013), bem como uma análise comparativa dos resultados.

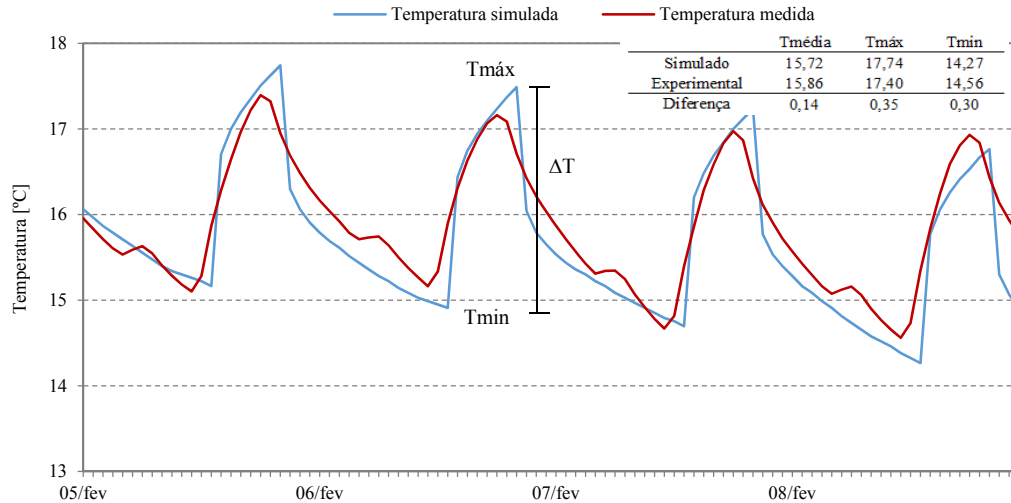


Fig.107 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de aquecimento entre o dia 5 e 8 de Fevereiro de 2013.

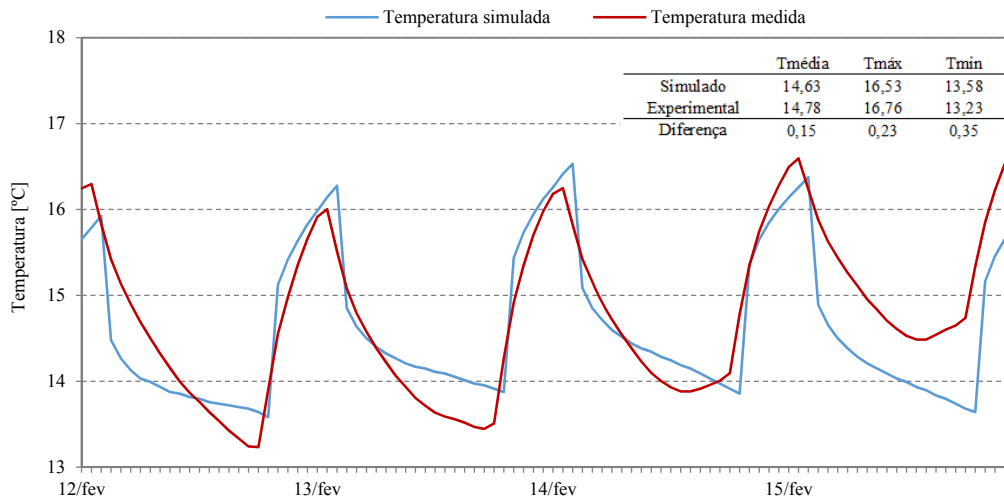


Fig.108 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de aquecimento entre o dia 12 e 15 de Fevereiro de 2013.

Da análise dos gráficos anteriores para os dois períodos analisados verifica-se que as diferenças são, em média, inferiores a 0,2°C, considerando-se, esta diferença, aceitável. Os dados estatísticos, apresentados nos quadros juntamente com os gráficos, completam a validação, verificando-se que a maior diferença nos valores máximos e mínimos é inferior a 0,4°C, e uma maior amplitude térmica diária do modelo simulado.

Para o Apartamento 2 (ver Figura 109) numa primeira análise verifica-se que os resultados obtidos não possuem uma proximidade em termos de evolução dos registos de temperatura do ar interior verificados para o Apartamento 1, constatando-se, assim, que a diferença entre as temperaturas mínimas do ar interior é maior, cerca de 0,5°C, contudo a diferença mais elevada das temperaturas máximas do ar interior é de 0,08°C.

A variação da temperatura do ar interior é distinta na fase de arrefecimento do espaço, registando uma diferença entre o modelo numérico e o experimental. Tal como no Apartamento 1, no modelo numérico verifica-se que, com o sistema de aquecimento em funcionamento, regista-se um aumento quase imediato da temperatura do ar interior em relação ao registo decorrente da monitorização. No arrefecimento as diferenças são mais acentuadas. O modelo numérico tem, pela análise dos registos, um arrefecimento mais rápido.

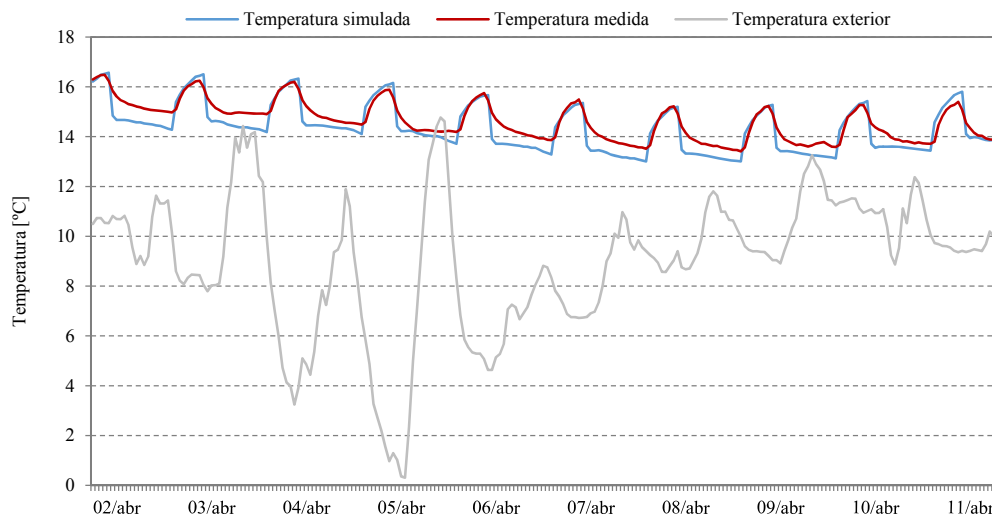


Fig.109 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 2 na estação de aquecimento.

Nas Figuras 110 e 111 pormenorizam-se os resultados, comparando-se os registos de temperatura do ar interior simulados e medidos e para um período de tempo mais curto, entre os dias 02 a 05 e 06 a 11 de Abril de 2013.

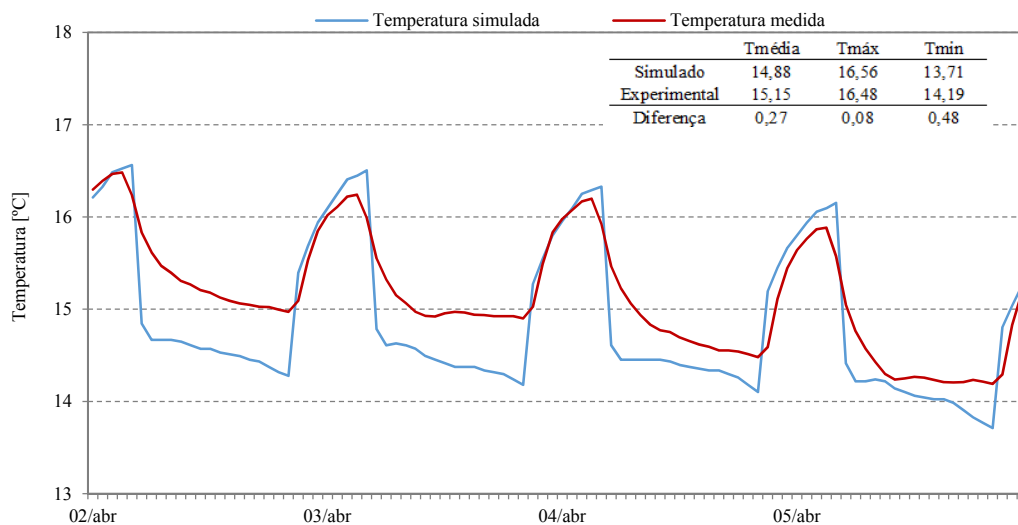


Fig.110 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 2 na estação de aquecimento entre os dias 2 e 5 de Abril de 2013.

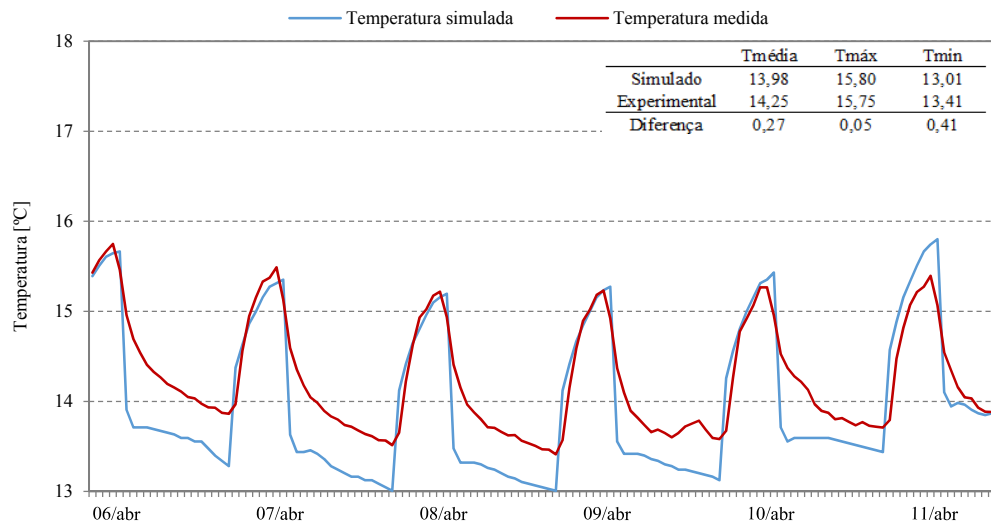


Fig.111 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 2 na estação de aquecimento entre os dias 6 e 11 de Abril de 2013.

Da análise dos registos nota-se que o modelo numérico apresenta uma amplitude térmica mais elevada, no entanto, esta diferença entre modelos é perfeitamente aceitável pelas diferenças, de cerca, $0,5^{\circ}\text{C}$ do registo de temperatura mínima do ar interior, $0,07^{\circ}\text{C}$ do registo da temperatura máxima do ar interior e $0,27^{\circ}\text{C}$ na temperatura média do ar interior.

Os resultados obtidos através do programa de simulação numérica avançada aproximaram-se, como era expectável, dos resultados da medição *in situ*. A diferença entre as temperaturas médias do ar interior, que é inferior a $0,3^{\circ}\text{C}$, comprova este facto. Contudo, há fatores que influenciaram os resultados, originando as diferenças verificadas, sendo importante destacar:

- Durante os fins-de-semana, os apartamentos estiveram ocupados. Sendo a ocupação de difícil simulação, assim, os resultados comparados foram de 2^a a 6^a feira de cada semana, período em que não havia qualquer tipo de ocupação;
- Considerou-se um valor constante do caudal natural de ventilação dos apartamentos, que foi calculado através do método do gás traçador – técnica do declive – e que, como é do conhecimento geral, tem condicionantes associadas à diferença de temperatura do ar interior e pressão entre o interior e o exterior. No entanto, se se considerasse um caudal de ventilação variável pressuponha medições *in situ* exaustivas, o que aumentaria, de forma significativa, o tempo desta tarefa;
- O facto de estarem fixos nas paredes dos apartamentos, os radiadores elétricos existentes, fez com que as zonas das paredes aquecessem primeiro do que o ambiente, originando-se, assim, trocas radiativas entre as paredes e o ambiente, o que fez com que o termóstato do aparelho entrasse em funcionamento (temperatura do ar interior alvo de 20°C para desligar) sem que fosse atingida a temperatura mínima do ar interior de conforto de forma plena em todo o compartimento. Esta situação é impossível de parametrizar no modelo de simulação;
- Por não serem, todos os dados climáticos utilizados para a validação, medidos, *in situ*, é possível imputar a esta situação diferenças nos resultados. *In situ* apenas foram medidos a temperatura e humidade relativa do ar, sendo os restantes dados climáticos obtidos através da estação meteorológica de Cabeceiras de Basto, que, apesar de estar a altitude similar, dista cerca de 20 km.

4.6.2. TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

A validação do modelo numérico, na estação de arrefecimento, focou-se nos resultados experimentais obtidos no compartimento (sala/cozinha) de cada um dos apartamentos, opção que se deve ao facto de cada um destes compartimentos terem sido submetidos, entre o dia 29 de Junho e o dia 30 de Setembro de 2013, a um processo de arrefecimento noturno através de ventilação mecânica (só extração).

Assim sendo, apresentam-se os resultados para validação do modelo numérico entre o dia 1 de Julho e 30 de Setembro de 2013. Na Figura 112 apresenta-se os resultados para o Apartamento 1. Numa primeira análise, constata-se que os resultados experimentais e numéricos são, de novo, muito próximos, no entanto, é perceptível, através de uma análise mais detalhada (zona sombreada da Figura 112), uma amplitude térmica diária mais elevada por parte do modelo numérico. A corroborar estes factos estão os dados estatísticos apresentados, verificando-se que, a diferença entre a temperatura máxima e mínima do ar interior, é mais elevada no modelo de simulação numérica.

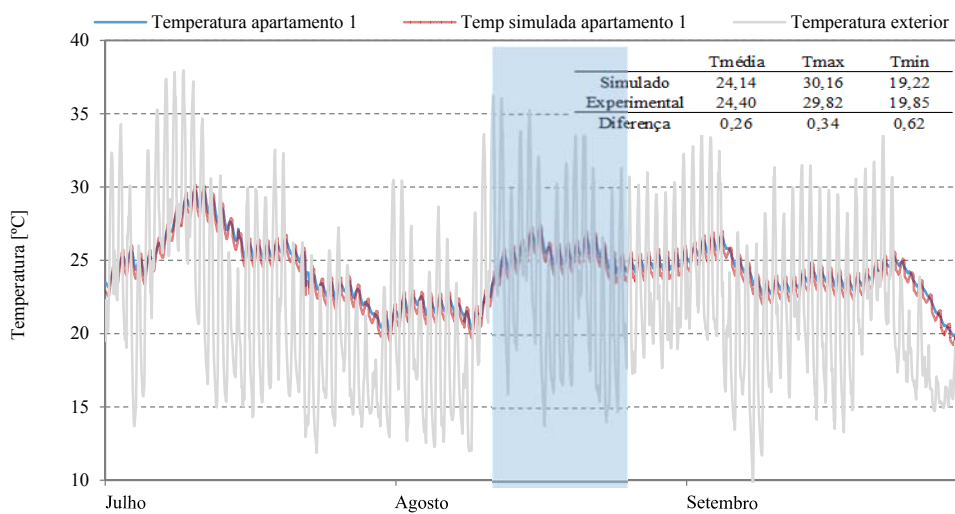


Fig.112 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de arrefecimento.

Na Figura 113 apresentam-se os resultados mais pormenorizados (região sombreada), sendo perfeitamente visível a diferença entre as curvas de temperatura do ar interior. A diferença máxima é sensivelmente de 1°C, para períodos em que a temperatura do ar exterior regista valores elevados, acima dos 35°C, e valores baixos, inferiores a 15°C.

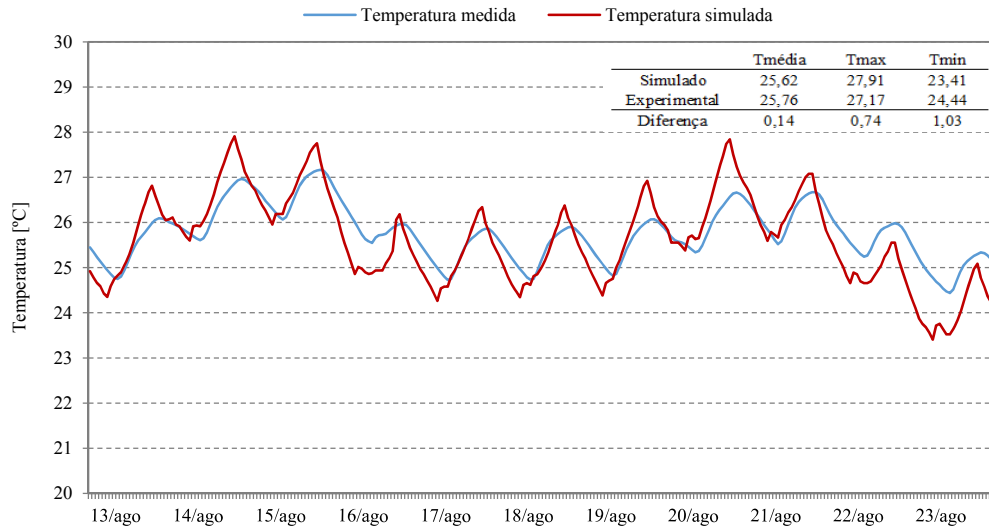


Fig.113 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 1 na estação de arrefecimento.

A Figura 114 é referente ao Apartamento 2. Tal como para o Apartamento 1, os resultados de ambos os modelos seguem a mesma configuração, verificando-se, igualmente, uma maior amplitude térmica diária no modelo numérico. Porém, neste apartamento a diferença entre a temperatura do ar interior máxima e mínima, do modelo numérico, é mais próxima da dos dados de monitorização.

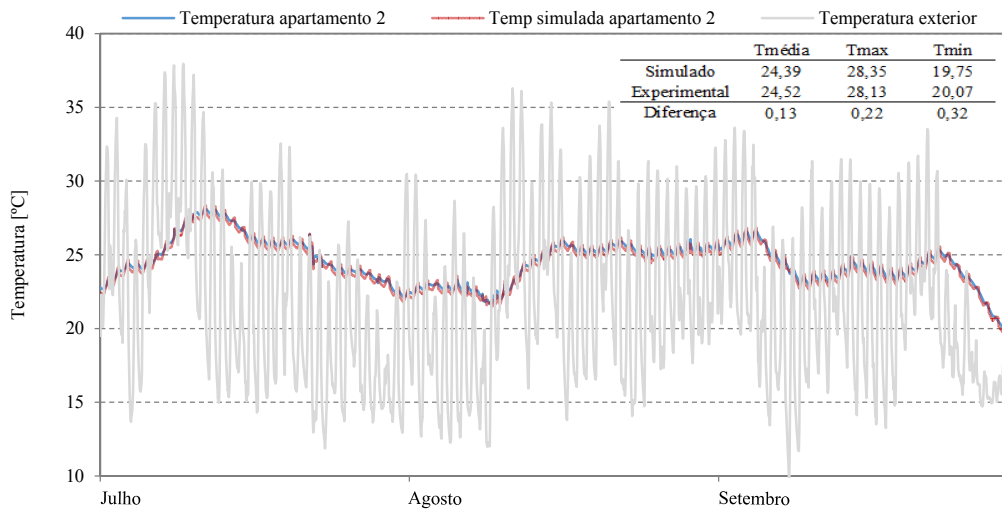


Fig.114 – Validação do modelo numérico para o Apartamento 2 na estação de arrefecimento.

Tal como o verificado no Apartamento 1 os resultados do modelo numérico apresentam uma variabilidade maior, verificando-se uma suscetibilidade térmica mais elevada no modelo numérico. De forma a alterar este comportamento, inseriram-se elementos referentes ao mobiliário existente nos compartimentos, para contabilizar a inércia associada à existência de mobiliário. Através desta ação constatou-se uma aproximação do modelo numérico ao experimental. Visto que o modelo do Apartamento 2 seguiu o mesmo padrão, do Apartamento 1, não se apresentam os resultados para um período mais curto.

Da análise dos registos de temperatura do ar interior constata-se que, tanto na estação de aquecimento como na de arrefecimento, o modelo numérico apresenta uma boa previsão do comportamento, para os dois apartamentos. Perante os resultados conseguidos e condicionantes discutidas, pode afirmar-se que o programa de simulação térmica WUFI Plus, é fiável para o desenvolvimento de estudos de

desempenho térmico de edifícios, correspondendo satisfatoriamente às necessidades exigidas pelos projetistas no apoio de soluções de conceção. De seguida faz-se uma síntese crítica dos resultados obtidos.

4.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A validação do modelo numérico utilizado para o edifício-tipo em estudo permitiu obter as seguintes conclusões:

- Para ambos os apartamentos obteve-se uma aproximação muito satisfatória. Em termos médios a diferença entre a temperatura do ar interior das medições experimentais e da simulação é inferior a 0,3°C;
- Na estação de aquecimento, para ambos os apartamentos, a aproximação dos registos de temperatura do ar interior medida experimentalmente e dos resultados do modelo numérico, é muito próxima. Os valores máximos e mínimos são frequentemente coincidentes, a diferença, em média, é inferior a 0,2°C no Apartamento 1 e 0,3°C no Apartamento 2;
- Na estação de arrefecimento, o ajuste entre valores medidos e simulados volta a ser próximo, com diferenças de temperatura média do ar interior inferiores a 0,2°C para os dois Apartamentos.

A validação do modelo numérico permite utilizar o programa WUFI Plus para elaborar os estudos paramétricos – capítulo 5 – com fiabilidade e que são apresentados no capítulo seguinte.

5. QUANTIFICAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS RURAIS EM FUNÇÃO DO CLIMA E DA ENVOLVENTE

5.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

A quantificação do desempenho térmico, usando modelos avançados de simulação numérica em função do clima e das características da envolvente, é uma tarefa importante, pois possibilita compreender quais os benefícios, quer no nível do conforto, quer no consumo energético de diferentes intervenções. No presente estudo pretende-se avaliar a importância do isolamento térmico das paredes da envolvente exterior de grande espessura, características do edifício rural, edifício-tipo, em diferentes regiões portuguesas (Porto, Lisboa, Bragança, Coimbra e Évora).

Recorreu-se ao programa WUFI Plus, para desenvolver o estudo de sensibilidade para o edifício-tipo em estudo.

Pretende-se com este estudo:

- Quantificar os efeitos do isolamento térmico das paredes de envolvente exterior no conforto térmico, na estação de aquecimento e arrefecimento, e no consumo energético;
- Quantificar o efeito da ventilação noturna, como estratégia de arrefecimento passivo, durante o período de Verão;
- Quantificar a diferença entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar interior num compartimento (quarto), de forma a avaliar se a utilização da temperatura do ar interior na avaliação do desempenho térmico é correto, ou se deveria ser utilizada a temperatura operativa.

De forma a cumprir os objetivos referidos desenvolveram-se as seguintes ações:

- Definiram-se 82 cenários de reabilitação a simular, obtidos através da combinação de 4 parâmetros que refletem as características diversas da parede de envolvente exterior, dos envidraçados e dos sistemas de aquecimento e ventilação;
- Efetuaram-se as simulações numéricas dos 82 cenários, e tendo como base a análise crítica dos resultados obtidos, selecionou-se um conjunto de 12 cenários de reabilitação. Sendo esta amostra considerada representativa dos 82 cenários;
- Executaram-se simulações numéricas, dos 12 cenários de reabilitação, para 5 localizações representativas do território nacional – Porto, Lisboa, Bragança, Coimbra e Évora;
- De forma a quantificar os efeitos do isolamento térmico nas paredes exteriores, avaliou-se e comparou-se o conforto térmico dos cenários reabilitados com isolamento na caixa-de-ar das paredes (entre a parede de granito existente e um pano de alvenaria cerâmica de 11 cm de espessura) e a parede de granito existente sem isolamento e sem o pano interior de alvenaria cerâmica, para a estação de aquecimento e arrefecimento, através de curvas de probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e de variáveis estatísticas – média,

mediana, percentil 1%, 2%, 5%, 95%, 98% e 99%, quartil 25 e 75 – através do modelo adaptativo da Norma EN 15251 [28] e de um Índice de Desconforto Térmico desenvolvido para o Inverno (IDT – I) e Verão (IDT – V);

- Calculou-se a energia de aquecimento necessária para a obtenção do conforto estabelecido pela Norma EN 15251 [28] para a Categoria II de conforto (edifícios reabilitados) nas cinco localizações representativas;
- Desenvolveu-se um estudo comparativo do desempenho térmico e do consumo energético dos cenários reabilitados e efetuada a representação gráfica dos indicadores de desempenho no mapa de Portugal. A representação gráfica dos resultados permitiu avaliar a influência do isolamento térmico, nas paredes de elevada espessura e massa, no conforto térmico e no consumo energético;
- Calculou-se a temperatura média radiante de um compartimento e comparou-se com a temperatura média do ar interior, para desta forma avaliar se existe diferenças entre as mesmas.

5.2. EDIFÍCIO-TIPO E CENÁRIOS DE REABILITAÇÃO

5.2.1. EDIFÍCIO-TIPO

O edifício-tipo utilizado no estudo de sensibilidade, para todas as cidades representativas consideradas, é o da validação do modelo numérico desenvolvido no WUFI Plus (capítulo 4). Optou-se por utilizar o Apartamento 1 para a presente tarefa, apesar dos modelos numéricos de cada apartamento terem sido validados.

Relativamente ao modelo validado efetuaram-se algumas alterações que se apresentam de forma sumária no Quadro 32.

Quadro 32 – Alterações construtivas e de utilização do modelo numérico dos estudos de sensibilidade.

Elementos	Opção
Envidraçados	Vidro duplo de baixa emissividade caixilharia em madeira; $A_{env}/A_{pav} = 15\%$
Proteção dos envidraçados	Portadas interiores em madeira
Perfil de ativação da proteção dos envidraçados	Ativada aos 26°C (temperatura do ar interior)
Pavimento	Com isolamento térmico em toda a sua área
Ocupação	Considerado um nível de atividade ligeiro

Os restantes elementos não foram alterados, mantendo-se as soluções construtivas descritas no Quadro 13 (subcapítulo 3.2.1). A descrição mais aprofundada dos elementos referidos no Quadro 32 apresenta-se no anexo III. Na Figura 115 evidencia-se a modelação geométrica do Apartamento 1 do edifício-tipo.

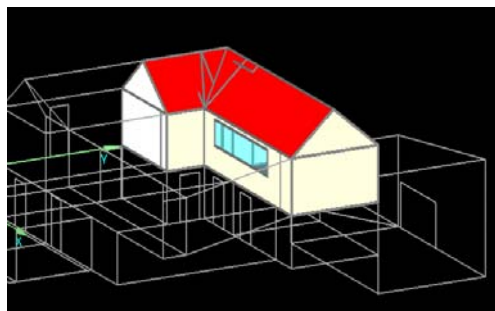


Fig. 115 – Modelação geométrica do Apartamento 1 para os estudos de sensibilidade.

Quanto à ocupação, consideraram-se dois regimes diferentes para os quartos e sala/cozinha, um para os dias da semana e outro para o fim-de-semana. O nível de atividade considerado foi de repouso, apresentando-se no Quadro 33 os valores referentes a este nível de atividade definidos por defeito no WUFI Plus.

Quadro 33 – Valores de calor convectivo e radiante, humidade, produção de CO₂ e atividade humana associados ao nível de ocupação.

Nível de ocupação	Calor convectivo [W]	Calor radiante [W]	Humidade [g/h]	Produção de CO ₂ [g/h]	Atividade humana [met]
1 Pessoa	80	41	59	36,3	1,16
2 Pessoas	160	82	118	72,6	2,32

O perfil de ocupação do apartamento para os dias da semana e fim-de-semana apresenta-se no Quadro 34.

Quadro 34 – Perfil de ocupação do apartamento para os estudos de sensibilidade – número de pessoas.

Compartimento	De 2 ^a a 6 ^a feira			Fim-de-semana	
	00 às 08 H	08 às 18 H	18 às 00 H	00 às 10 H	10 às 00 H
Sala/cozinha	-	-	2	-	2
Quarto principal	2	-	-	2	-
Quarto secundário	1	-	-	1	-

5.2.2. CENÁRIOS DE REABILITAÇÃO

O desenvolvimento do estudo de sensibilidade assentou em parâmetros influenciadores do conforto térmico e consumo energético, traduzindo-se num estudo alargado de diversos cenários de reabilitação do edifício-tipo.

A definição dos cenários de reabilitação resultou da combinação dos seguintes fatores: i) isolamento térmico pelo exterior, na caixa-de-ar ou sem isolamento, das paredes exteriores; ii) variação da relação área de envidraçados com a área de pavimento; iii) regime de aquecimento (contínuo, intermitente e sem aquecimento), e do iv) regime de ventilação. No Quadro 35 apresentam-se as variações dos parâmetros elencados para o estudo alargado (82 cenários) e para o estudo final (12 cenários).

Quadro 35 – Opções consideradas no estudo de sensibilidade alargado e no estudo final.

Elementos	Opções – estudo alargado 82 cenários de reabilitação	Opções – estudo final 12 cenários de reabilitação
Isolamento térmico nas paredes de envolvente exterior	Pelo lado exterior; Na caixa-de-ar das paredes; Sem isolamento.	Na caixa-de-ar das paredes; Sem isolamento.
Regime de aquecimento	Contínuo; Intermitente; Sem aquecimento	Contínuo; Intermitente; Sem aquecimento
Regime de ventilação no Inverno	Dia – 0,6 RPH; Noite – 0,3 RPH.	Dia – 0,6 RPH; Noite – 0,3 RPH.
Regime de ventilação no Verão	Dia – 0,6 RPH; Noite – 1, 4 e 6 RPH.	Dia – 0,6 RPH; Noite – 1 e 4 RPH.
A_{env}/A_{pav}	Solução base; +10%; -10%.	15%

A exclusão do estudo do efeito do isolamento térmico pelo exterior das paredes exteriores justifica-se por esta ação de reabilitação não ser adequada do ponto de vista arquitetónico. Outra exclusão assumida nos modelos do estudo final, foi a não consideração de uma caudal de ventilação com uma taxa de renovação de 6 RPH, durante o período noturno na estação de arrefecimento, deve-se a este valor ser demasiado elevado e dificilmente conseguido sem causar desconforto. Por outro lado, atendendo a que o processo de simulação numérica é uma tarefa complexa e demorada do ponto de vista computacional, simplificou-se o processo optando-se por fixar o valor da relação A_{env}/A_{pav} nos 15%.

Na Figura 116 esquematiza-se os 12 cenários do estudo de sensibilidade final, para cada região, simulados no WUFI Plus.

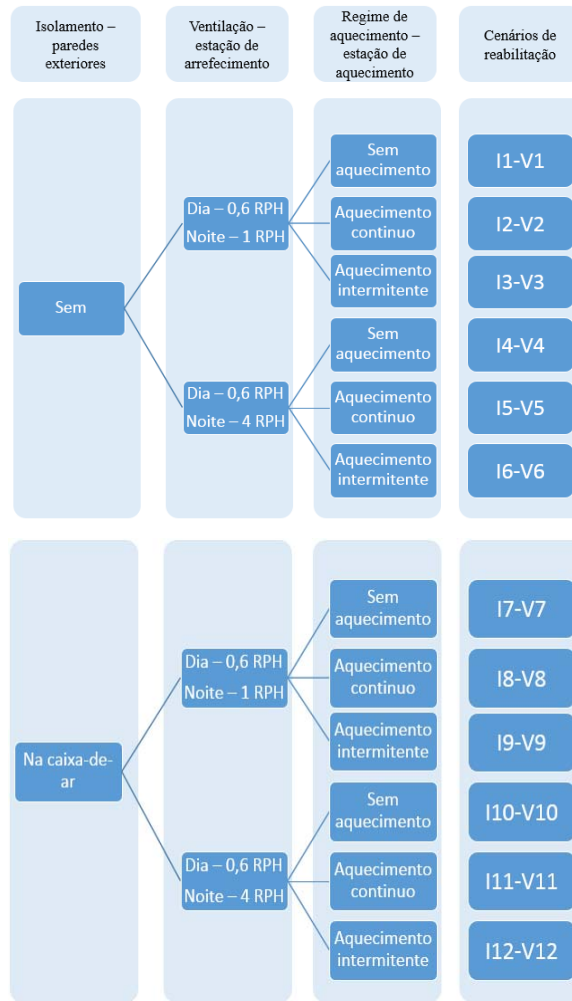


Fig.116 – Esquema das simulações realizadas no estudo de sensibilidade final.

O regime e modo de funcionamento, dos sistemas de aquecimento e ventilação, descrevem-se no Quadro 36. O sistema de aquecimento funciona mediante uma temperatura de referência, 20°C, e entra em funcionamento sempre que, no período estabelecido, se verifique uma temperatura do ar interior inferior.

Quadro 36 – Modo de funcionamento do sistema de aquecimento e do sistema de ventilação.

Período	Sistema de aquecimento		Sistema de ventilação	
	Regime contínuo	Regime intermitente	Dia: 08 às 00H	Noite: 00 às 08H
1 Jan. – 31 Maio	00 às 24 H	18 às 00 H	0,6 RPH	0,3 RPH
1 Jun. – 30 Set.	-	-	0,6 RPH	1 ou 4 RPH
1 Out. – 31 Dez.	00 às 24 H	18 às 00 H	0,6 RPH	0,3 RPH

5.2.3. DADOS CLIMÁTICOS

O *software* de simulação higrotérmica utilizado requer ficheiros climáticos de elevada precisão para, assim, se avaliar, de forma mais precisa, as condições de conforto e as necessidades energéticas dos edifícios localizados nas cidades do Porto, Lisboa, Bragança, Coimbra e Évora. Foram utilizados ficheiros climáticos do programa *Energy Plus* [56], que são disponibilizados de forma gratuita, tendo sido utilizados em diversos estudos análogos. Apresenta-se assim, a média diária da temperatura do ar e humidade relativa exterior das cidades estudadas.

Na Figura 117 representam-se a temperatura e humidade relativa, exterior média diária, para o Porto.

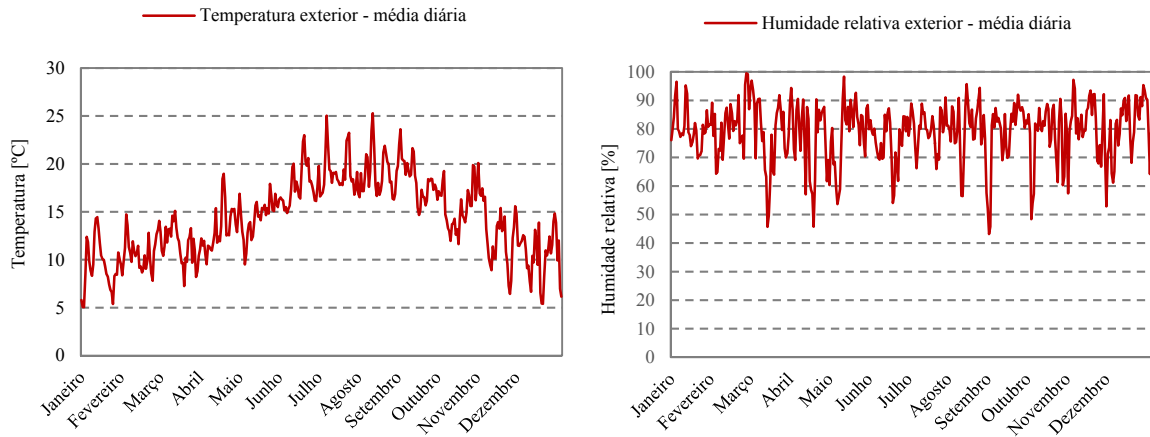


Fig.117 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade do Porto.

Na Figura 118 representam-se a temperatura do ar e humidade relativa, exterior média diária, para Bragança.

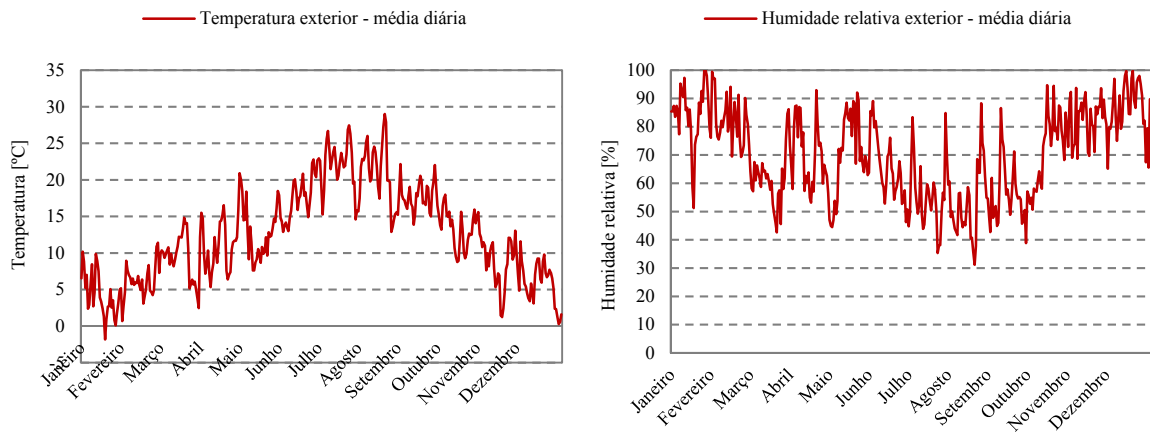


Fig.118 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade de Bragança.

Na Figura 119 representam-se a temperatura do ar e humidade relativa, exterior média diária, para Lisboa.

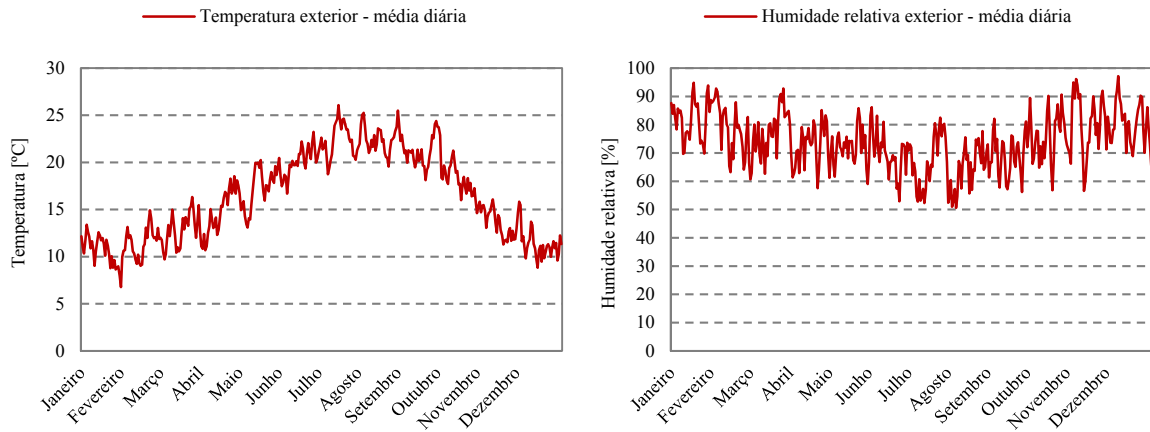


Fig.119 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade de Lisboa.

Na Figura 120 representam-se a temperatura do ar e humidade relativa, exterior média diária, para Coimbra.

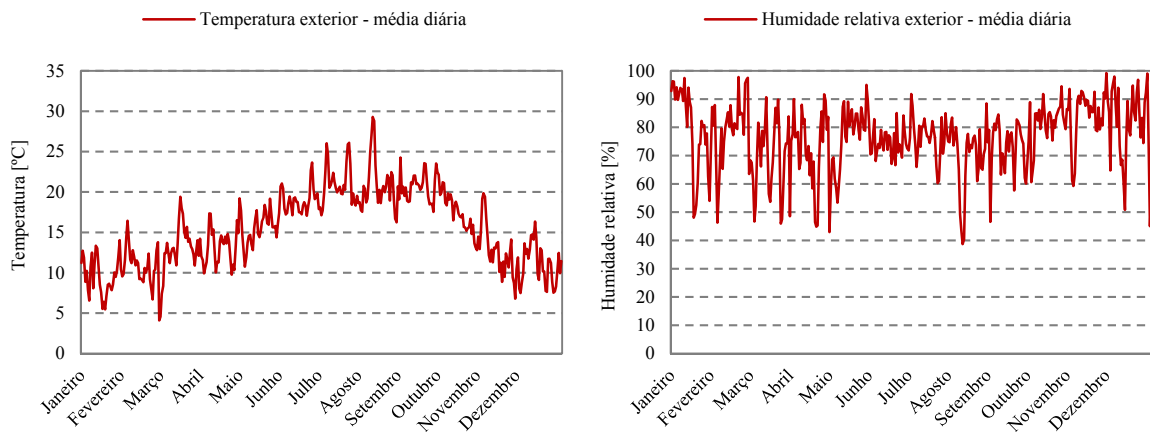


Fig.120 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade de Coimbra.

Na Figura 121 representam-se a temperatura do ar e humidade relativa, exterior média diária, para Évora.

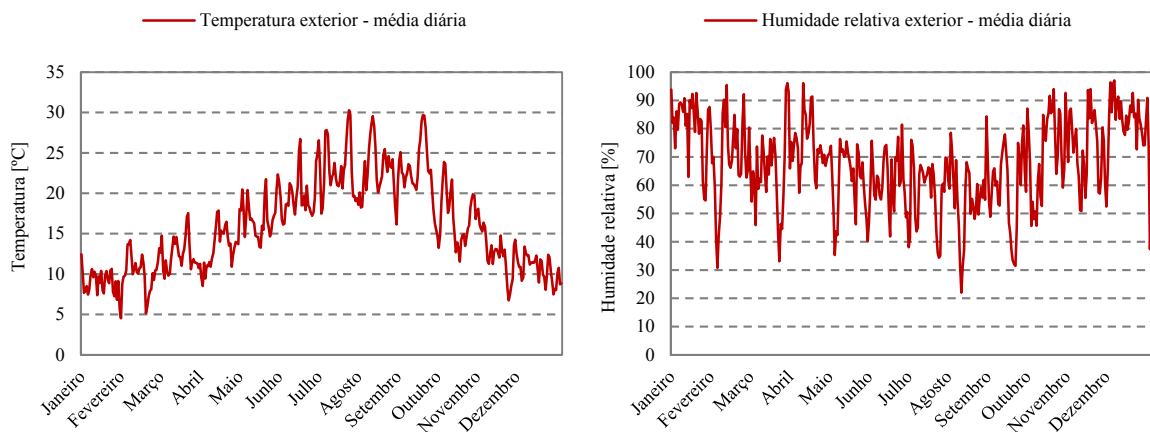


Fig.121 – Temperatura do ar e humidade relativa exterior do ano climático de referência da cidade de Évora.

No Quadro 37 apresentam-se os valores médios, mínimos e máximos da estação de aquecimento e arrefecimento de cada cidade.

Quadro 37 – Valores médios, mínimos e máximos, para a estação de aquecimento e arrefecimento das cidades estudadas.

	Porto		Bragança		Lisboa		Coimbra		Évora	
	Est. Aquec.	Est. Arref.	Est. Aquec.	Est. Arref.	Est. Aquec.	Est. Arref.	Est. Aquec.	Est. Arref.	Est. Aquec.	Est. Arref.
Temp. média [°C]	11,69	18,56	9,39	19,49	11,96	21,57	11,64	21,57	11,07	21,91
Temp. mínima [°C]	5,05	14,67	-1,82	12,89	6,78	16,69	4,10	16,26	4,55	13,26
Temp. máxima [°C]	20,09	25,28	20,91	29,01	16,32	26,07	19,84	29,29	17,85	30,28
HR média [%]	79,70	78,48	74,28	57,32	78,77	67,71	77,73	73,42	74,10	58,97
HR mínima [%]	45,71	43,21	42,62	31,21	56,58	50,58	44,92	38,75	30,79	22,00
HR máxima [%]	99,50	95,67	100,00	89,04	97,12	89,46	99,17	91,75	97,04	87,08

5.3. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE

5.3.1. ESTRATÉGIA ADOTADA

Desenvolveu-se um estudo de sensibilidade para doze cenários de reabilitação (ver Figura 116), em cinco localizações geográficas do território nacional, visando o conforto térmico e a eficiência energética de um edifício-tipo, no período de Inverno e no de Verão.

O conforto térmico depende de diversas variáveis, como referido no subcapítulo 2.3.1., destacando-se: a temperatura do ar; a temperatura média radiante; humidade relativa; velocidade do ar; nível de vestuário e atividade dos ocupantes. No presente trabalho assume-se a temperatura do ar interior como variável dominante, centrando-se, neste parâmetro, o desenvolvimento do estudo de sensibilidade.

Com base neste pressuposto, simulou-se a temperatura do ar interior das zonas térmicas de simulação do edifício-tipo (sala/cozinha, instalação sanitária e quartos). De forma a simplificar o estudo, calculou-se a média das temperaturas do ar interior destes compartimentos obtendo-se a temperatura do edifício-tipo.

O conforto térmico dos cenários reabilitados de cada localização geográfica, para o Inverno e para o Verão, foi avaliado através do estudo da probabilidade acumulada e dos valores, máximos, mínimos e médios, da temperatura do ar interior, quantificando-se o número de horas que as temperaturas de conforto são excedidos, 20°C para o Inverno (temperatura mínima de conforto) e 25°C para o Verão (temperatura máxima de conforto), e do modelo preconizado pela Norma EN 15251 [28]. Foram também quantificados o número de graus-hora de desconforto através de dois índices criados para o efeito, IDT – I, Índice de Desconforto Térmico de Inverno e IDT – V, Índice de Desconforto Térmico de Verão.

A eficiência energética, dos cenários reabilitados de cada localização geográfica, para o Inverno, foi avaliada calculando-se os consumos de energia de aquecimento para a obtenção do conforto térmico.

Para se elaborar a análise energética, do edifício-tipo simulado, considerou-se a instalação de um sistema de aquecimento com uma temperatura de funcionamento de 20°C (categoria II da Norma EN 15251 [28]). Ou seja, sempre que a temperatura do ar interior, de uma zona térmica, desça abaixo dos 20°C, o sistema de aquecimento entra em funcionamento.

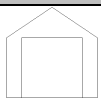





A temperatura média radiante, dos cenários de reabilitação de cada localização geográfica, avaliou-se calculando-se segundo o método preconizado na Norma EN 7726 [29]. De forma a simplificar o cálculo da temperatura média radiante, elaborou-se, apenas, para um compartimento (quarto) do edifício-tipo.

As análises para a avaliação e quantificação do desempenho térmico, organizam-se da seguinte forma:

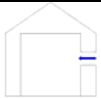

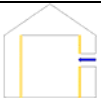
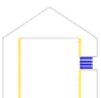
- No subcapítulo 5.3.2. apresenta-se a análise da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, para as cidades do Porto e Bragança. Os resultados de Lisboa, Coimbra e Évora, remetem-se para o anexo IV;
- No subcapítulo 5.3.3. apresenta-se o estudo de eficiência energética, através do consumo energético, na estação de aquecimento, para as cidades do Porto e Bragança. Os resultados para Lisboa, Coimbra e Évora, remetem-se para o anexo V;
- No subcapítulo 5.3.4. estuda-se o Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I) para as cidades do Porto e Bragança. Os resultados para Lisboa, Coimbra e Évora, remetem-se para o anexo VI;
- No subcapítulo 5.3.5. avalia-se o conforto térmico, durante o Inverno, de acordo com o método da Norma EN 15251 [28], para as cidades do Porto e Bragança. Os resultados para Lisboa, Coimbra e Évora, remetem-se para o anexo VII;
- No Subcapítulo 5.3.6. apresenta-se a análise da temperatura do ar interior na estação de arrefecimento nas cidades do Porto e Bragança. Os resultados para Lisboa, Coimbra e Évora, remetem-se para o anexo VIII;
- No subcapítulo 5.3.7. avalia-se a influência da ventilação noturna na temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, nas cidades do Porto e Bragança. Os resultados para Lisboa, Coimbra e Évora, remetem-se para o anexo IX;
- No subcapítulo 5.3.8. estuda-se o Índice de Desconforto Térmico de Verão (IDT – V) para as cidades do Porto e Bragança. Os resultados para Lisboa, Coimbra e Évora, remetem-se para o anexo X;
- No subcapítulo 5.3.9. avalia-se o conforto térmico, durante o Verão, de acordo com o método da Norma EN 15251 [28], para a cidade do Porto. Os resultados para Bragança Lisboa, Coimbra e Évora, remetem-se para o anexo XI;

Para a interpretação dos resultados ilustra-se, nos Quadros 38 e 39, de forma sucinta, as características das simulações efetuadas, para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Realça-se que, sempre que se menciona – com ou sem isolamento – durante a análise dos resultados, se refere ao isolamento, na caixa-de-ar, das paredes de envolvente exterior.

Quadro 38 – Características das simulações realizadas para cada cidade na estação de aquecimento.

Cenários reabilitados	Isolamento	Aquecimento
I1 		Inexistente
I2 	Inexistente	Contínuo
I3 		Intermitente
I7 		Inexistente
I8 	Na caixa-de-ar das paredes	Contínuo
I9 		Intermitente

Quadro 39 – Características das simulações realizadas para cada cidade na estação de arrefecimento.

Cenário reabilitado	Isolamento	Ventilação Noturna	Ventilação diurna
V1 	Inexistente	1 RPH	0,6 RPH
V4 		4 RPH	0,6 RPH
V7 	Na caixa-de-ar das paredes	1 RPH	0,6 RPH
V10 		4 RPH	0,6 RPH

5.3.2. TEMPERATURA DO AR INTERIOR – ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

A análise da temperatura do ar interior é importante para se quantificar os efeitos do isolamento térmico em paredes de grande espessura no ambiente interior. Desta forma, os resultados da temperatura do ar interior, referem-se a simulações sem isolamento ou com isolamento nas paredes, mantendo todas as outras premissas iguais.

A temperatura do ar interior, média da temperatura do ar interior das zonas térmicas de simulação, apresenta-se no gráfico das temperaturas horárias registadas ao longo dos meses da estação de aquecimento e no gráfico da probabilidade acumulada. De referir que as temperaturas do ar interior, de cada zona simulada, não apresentaram diferenças significativas entre si.

Os resultados de temperatura do ar interior apresentam-se, graficamente, nos subcapítulos seguintes para o Porto e Bragança e, no anexo IV, para Lisboa, Coimbra e Évora.

5.3.2.1. Porto

Na Figura 122 apresentam-se os resultados da variação da temperatura do ar interior para o Porto durante o período de aquecimento, com duração de 6,7 meses (4848 horas).

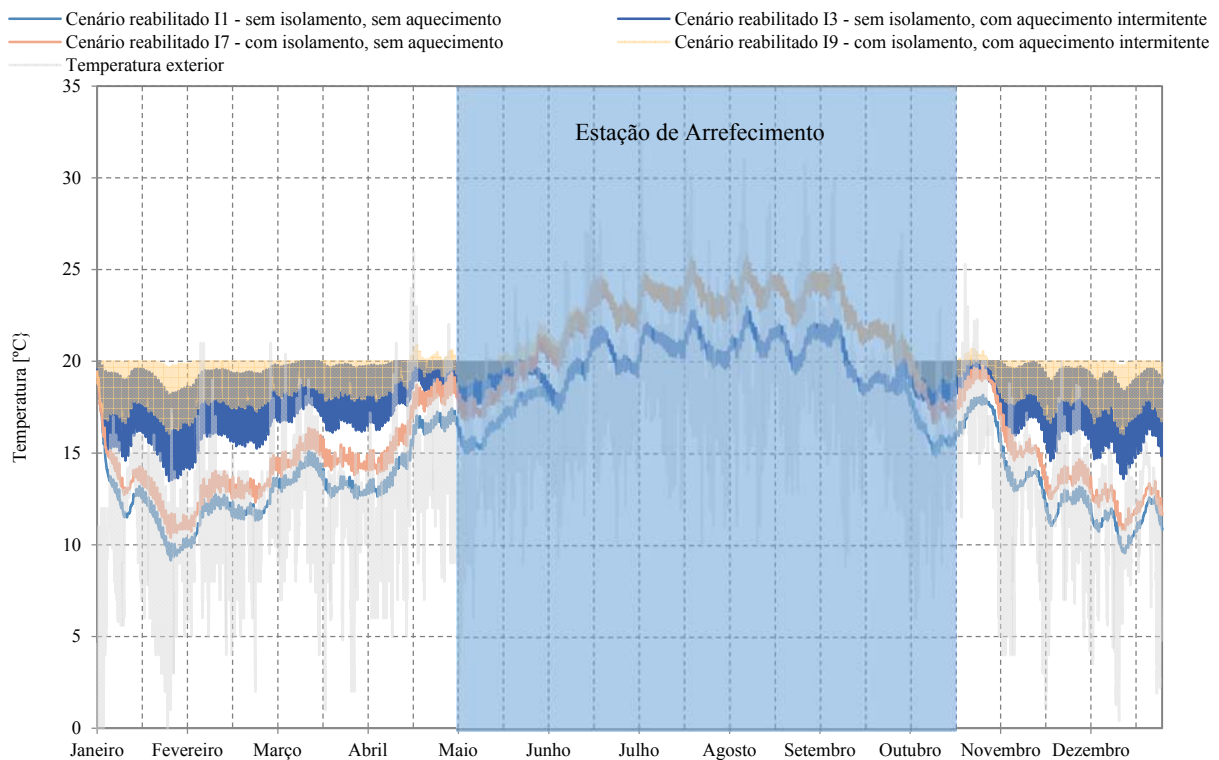


Fig.122 – Temperatura do ar interior dos cenários reabilitados, na estação de aquecimento, para a cidade do Porto.

A análise dos resultados obtidos por simulação permite concluir de forma global o seguinte:

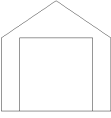



- O facto de isolar não produz alterações significativas na temperatura do ar interior, sendo a diferença menor que 2°C;

- O cenário reabilitado com aquecimento intermitente, sem isolamento, não permite atingir a temperatura de conforto (admitindo uma potência de aquecimento de 2000W em cada zona de simulação);
- O cenário reabilitado com aquecimento intermitente, com isolamento, I9, permite atingir a temperatura de conforto de forma pontual, permitindo flutuações diárias de, aproximadamente, 4°C, nos meses mais frios e de, aproximadamente, 1°C, nos meses mais quentes.

No Quadro 40 mostram-se os resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, destacando-se o seguinte:

- Sem recorrer a aquecimento nunca é atingido o conforto;
- Isolar, sem aquecimento, aumenta a temperatura do ar interior, em termos médios, 1,3°C;
- Isolar, com aquecimento intermitente, proporciona uma diminuição de 12% no tempo de desconforto, diminuindo de 90% para 82%, o número de horas abaixo dos 20°C.

Quadro 40 – Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para a cidade do Porto.

Cenários reabilitados				
				
	I1	I7	I3	I9
Tempo < 20°C	100% (4848h)	100% (4848h)	92% (4460h)	80% (3878h)
Média [°C]	13,27	14,57	17,48	18,76
Quartil 25 [°C]	11,81	12,97	16,26	17,97
Quartil 50 [°C]	12,94	14,25	17,27	18,64
Quartil 75 [°C]	14,43	15,77	18,99	19,95
Percentil 1% [°C]	9,57	10,85	14,06	16,57
Percentil 2% [°C]	9,68	10,93	14,26	16,72
Percentil 5% [°C]	10,06	11,25	14,82	17,03

A Figura 123 ilustra a comparação das probabilidades acumuladas da temperatura do ar interior dos cenários reabilitados apresentados no Quadro 40.

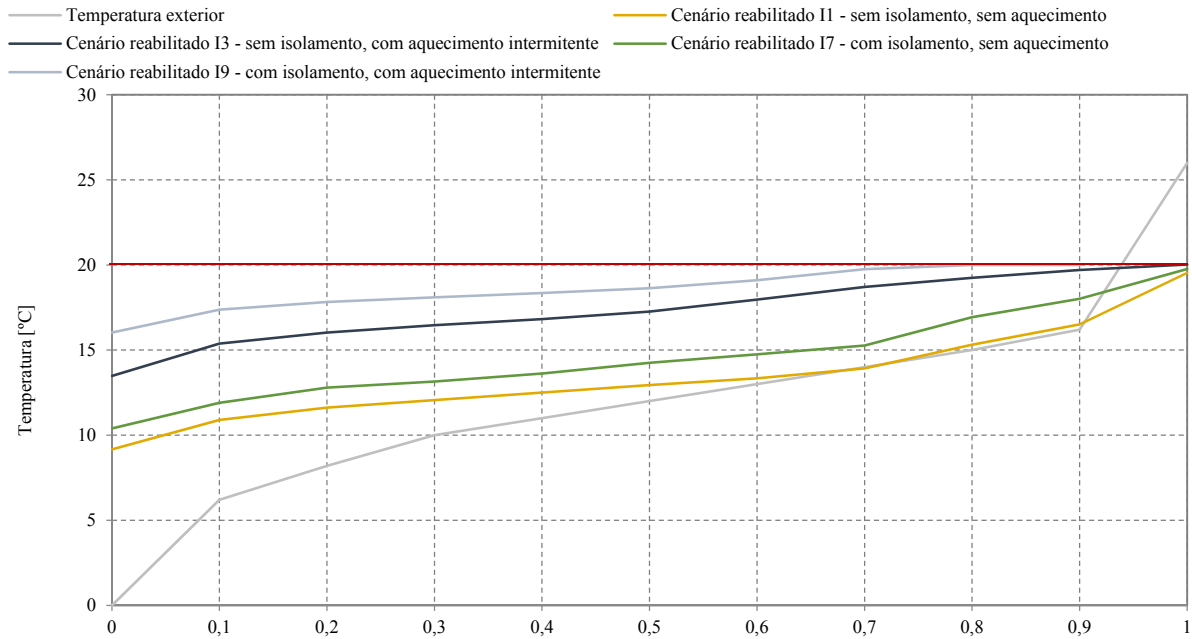


Fig.123 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados da cidade do Porto.

As curvas de probabilidade acumulada que se apresentam na Figura 123 mostram uma proximidade entre a temperatura do ar interior dos cenários reabilitados com e sem isolamento, refletindo um nível de conforto que difere menos de 1°C. No Quadro 41 apresentam-se as temperaturas mínimas para o Porto.

Quadro 41 – Temperatura do ar interior mínima, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados da cidade do Porto.

Cenários reabilitados				
	I1	I7	I3	I9
<i>T_{min}</i> [°C]	9,16	10,40	13,48	16,03

Dos resultados do Quadro 41 destaca-se que: a diferença entre os cenários, sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), é de 1,24°C, e que entre os cenários, com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), é de 2,55°C. Estes valores refletem ganhos, relativamente à temperatura do ar interior mínima, devido ao isolamento, que no caso dos cenários reabilitados, com aquecimento intermitente, são consideráveis.

Dos resultados constata-se que, para a cidade do Porto, durante a estação de aquecimento, a temperatura do ar interior nos cenários reabilitados com isolamento é superior às das simulações sem isolamento térmico, contudo, a diferença não é significativa. Em termos de temperatura média do ar interior é de 1,30°C, nos cenários sem aquecimento (I1, sem isolamento e I7, com isolamento), e 1,28°C, nos cenários com aquecimento intermitente (I3, sem isolamento e I9, com isolamento). A utilização de um regime de aquecimento intermitente, melhorou o desempenho térmico, porém, é inaceitável o tempo em que a

temperatura do ar interior se situa abaixo dos 20°C, 80% para I9 (com isolamento) e 92% para I3 (sem isolamento). O que significa que a utilização de isolamento térmico, na caixa-de-ar das paredes, proporcionou uma diminuição de 12% no tempo de desconforto.

5.3.2.2. Bragança

Na Figura 124 apresentam-se os resultados da variação da temperatura do ar interior para Bragança durante o período de aquecimento, com duração de 8 meses (5832 horas).

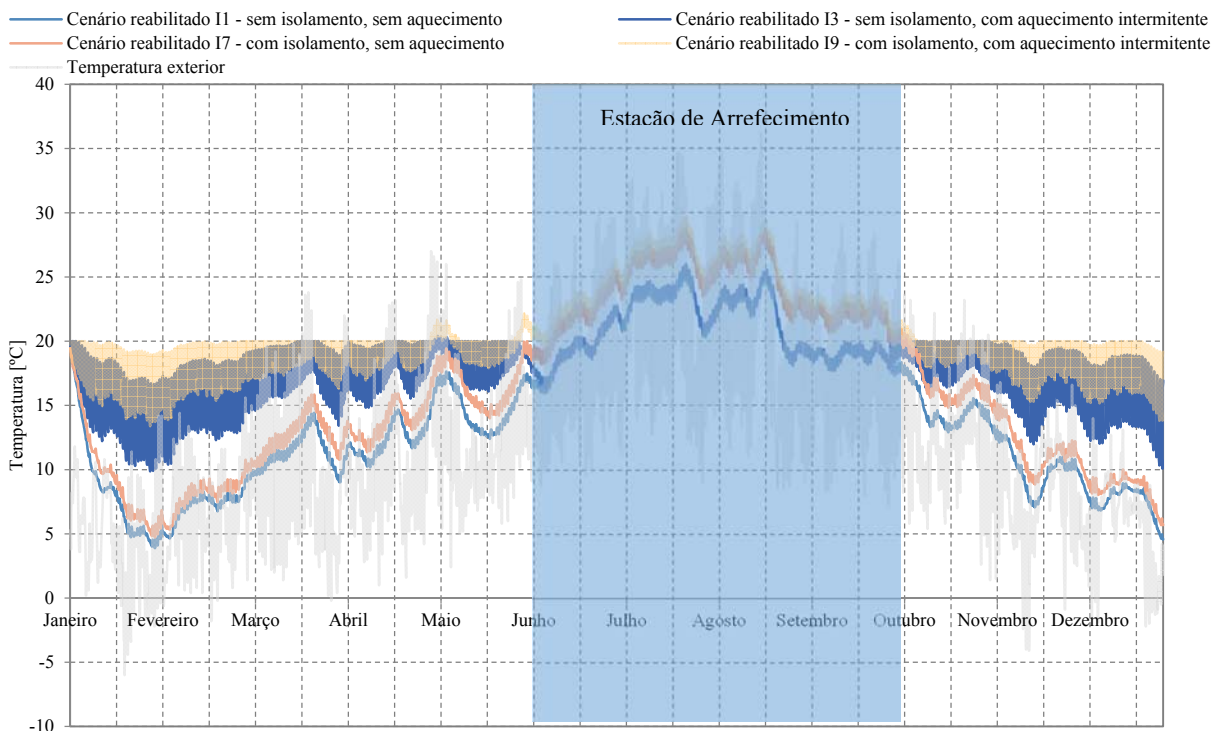


Fig.124 – Temperatura do ar interior dos cenários reabilitados, na estação de aquecimento, para a cidade de Bragança.

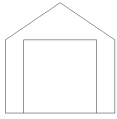



A análise dos resultados obtidos por simulação permite concluir de forma global o seguinte:

- O facto de isolar produz alterações na temperatura do ar interior, sendo, a diferença, menor que 2°C;
- O cenário de reabilitação com aquecimento intermitente, sem isolamento, não permite atingir a temperatura de conforto (admitindo uma potência de aquecimento de 2000W em cada zona de simulação);
- O cenário reabilitado com aquecimento intermitente, com isolamento, I9, permite atingir a temperatura de conforto de forma pontual, possuindo flutuações diárias de, aproximadamente, 6°C, nos meses mais frios e de, aproximadamente, 1°C, nos meses mais quentes.

No Quadro 42 mostram-se os resultados estatísticos da temperatura do ar interior na estação de aquecimento, destacando-se o seguinte:

- Tal como na cidade do Porto, sem recorrer a aquecimento nunca é atingido o conforto;
- Isolar, sem aquecimento, aumenta a temperatura do ar interior, em termos médios, 1,4°C e 1,8°C, nos cenários com aquecimento intermitente;
- Isolar, com aquecimento intermitente, proporciona ganhos de 12% no tempo de desconforto, diminuindo de 90% para 82% o número de horas abaixo dos 20°C.

Quadro 42 – Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.

Cenários reabilitados				
				
	I1	I7	I3	I9
Tempo < 20°C	100% (5832h)	98% (5715h)	92% (5365h)	80% (4666h)
Média [°C]	11,00	12,37	16,42	18,23
Quartil 25 [°C]	8,13	9,10	14,47	16,96
Quartil 50 [°C]	10,96	12,31	16,72	18,40
Quartil 75 [°C]	13,54	15,27	18,38	19,78
Percentil 1% [°C]	4,45	5,35	10,69	14,23
Percentil 2% [°C]	4,71	5,56	11,01	14,46
Percentil 5% [°C]	5,06	6,22	11,96	15,24

A Figura 125 ilustra a comparação das probabilidades acumuladas da temperatura do ar interior dos cenários reabilitados apresentados no Quadro 42.

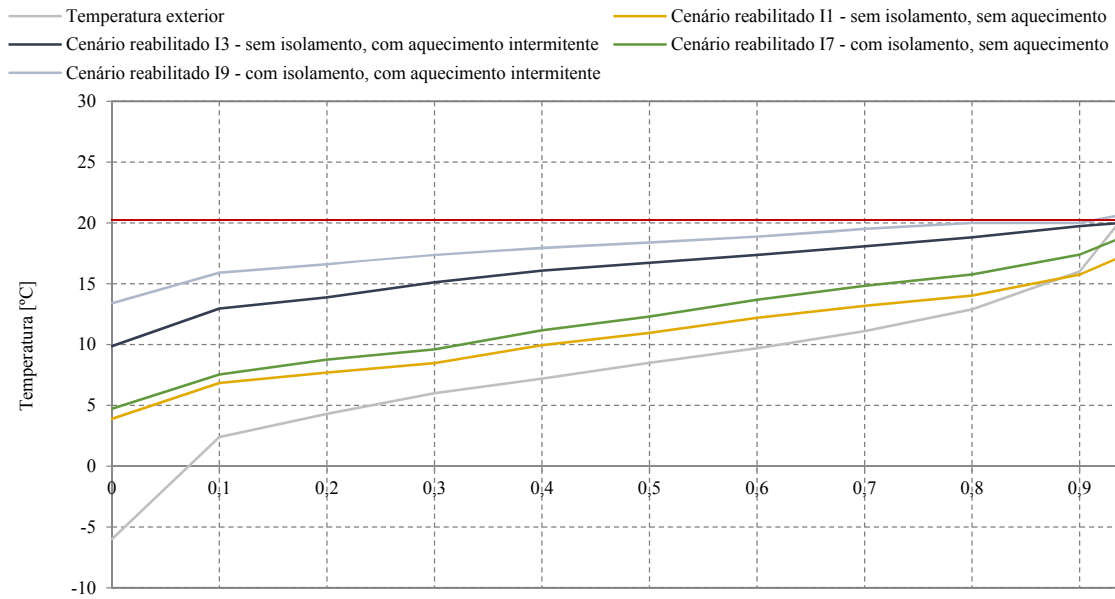


Fig.125 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.

As curvas de probabilidade acumulada, demonstram uma proximidade entre a temperatura do ar interior dos cenários reabilitados com e sem isolamento, refletindo-se num nível de conforto semelhante. Nos cenários sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), a diferença é, para todos os percentis, inferior a 1°C para toda a estação de aquecimento. Nos cenários com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), a diferença entre os percentis 0 e 40, é de aproximadamente 3°C, nos restantes esta diferença diminui sendo de aproximadamente 1,5°C.

No Quadro 43 apresentam-se as temperaturas do ar interior mínimas para Bragança.

Quadro 43 – Temperatura do ar interior mínima, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados da cidade de Bragança.

Cenários reabilitados				
	I1	I7	I3	I9
<i>T_{min}</i> [°C]	3,89	4,72	9,87	13,39

Dos resultados do Quadro 43 destaca-se que: a diferença entre os cenários sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), é de 0,83°C, e que entre os cenários, com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), é de 3,52°C.

Dos resultados constata-se que, para a região de Bragança, durante a estação de aquecimento, a temperatura do ar interior nos cenários reabilitados com isolamento é superior às das simulações sem isolamento térmico, mas tal como para o Porto, a diferença, em termos de temperatura média do ar interior, não é significativa. Sendo, nos cenários reabilitados, sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), de 1,30°C e que entre os cenários reabilitados com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), 1,81°C. O regime de aquecimento intermitente continua a não

ser eficaz verificando-se percentagens de desconforto elevadas, 80% para I9 (com isolamento) e 92% para I3 (sem isolamento). A aplicação de isolamento térmico proporcionou uma diminuição do tempo de desconforto de 12% para estes cenários reabilitados. Num clima como o de Bragança o uso de sistemas de aquecimento neste tipo de edifícios é fundamental para alcançar o conforto.

5.3.2.3. Influência da Localização no Território Nacional na Temperatura do Ar Interior da Estação de Aquecimento

Neste subcapítulo, estabeleceu-se uma análise comparativa do desempenho térmico na estação de aquecimento entre os cenários de reabilitação simulados (I1, I3, I7 e I9), para as 5 localizações geográficas do território nacional consideradas. Para tal, compararam-se os valores de três indicadores de desconforto: percentagem de tempo de desconforto (percentagem de tempo em que a temperatura do ar interior está abaixo dos 20°C), temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 5% ($T_{5\%}$).

Na Figura 126, apresentam-se os valores da percentagem de tempo de desconforto térmico na estação de aquecimento, para as cinco localizações do território nacional (Porto, Bragança, Lisboa, Coimbra e Évora), nos cenários reabilitados.

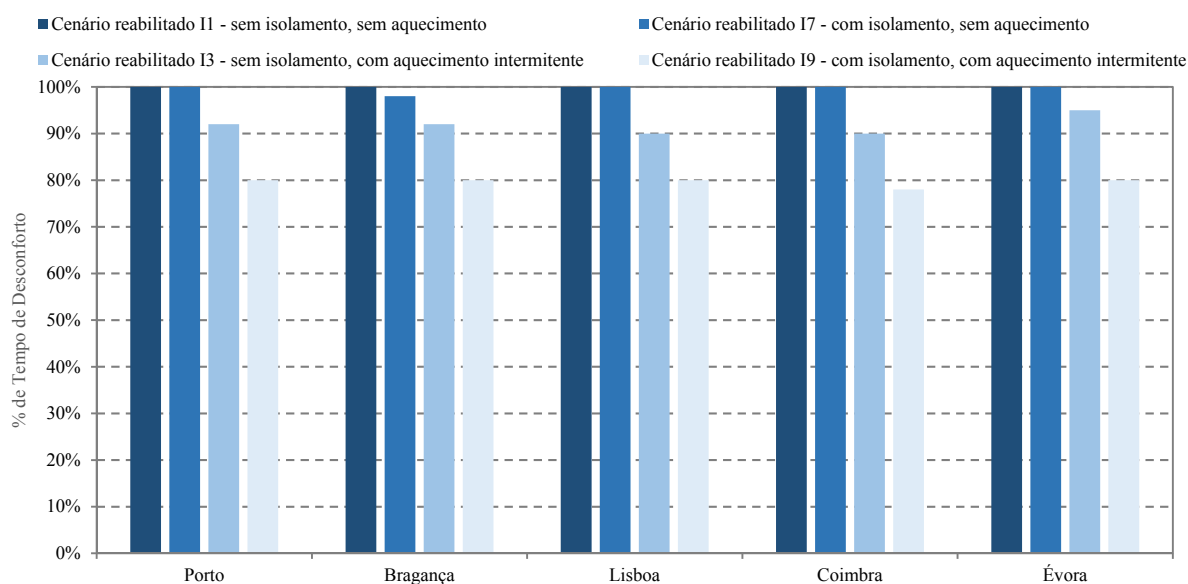


Fig. 126 – Percentagem de tempo de desconforto térmico, dos cenários reabilitados na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 126 verifica-se que:

- A percentagem de tempo de desconforto térmico, na estação de aquecimento, é idêntica para todas as localizações geográficas e sempre acima dos 78%;
- Nos cenários reabilitados com aquecimento intermitente, a diferença mais elevada, entre o cenário reabilitado, com e sem isolamento, é para Évora, onde o cenário reabilitado I7 (com isolamento) apresenta menos 15% de tempo de desconforto. A menor diferença verifica-se em Lisboa, menos 10% de tempo de desconforto;
- O uso de um sistema de aquecimento, em regime intermitente, melhora o desempenho térmico, no entanto, a percentagem de tempo de desconforto continua a ser elevada, sendo

inaceitável percentagens de tempo de desconforto acima dos 75%, como se verifica em todas as localizações estudadas, com ou sem isolamento.

Na Figura 127 apresenta-se a temperatura média do ar interior do apartamento na estação de aquecimento para todas as localizações estudadas.

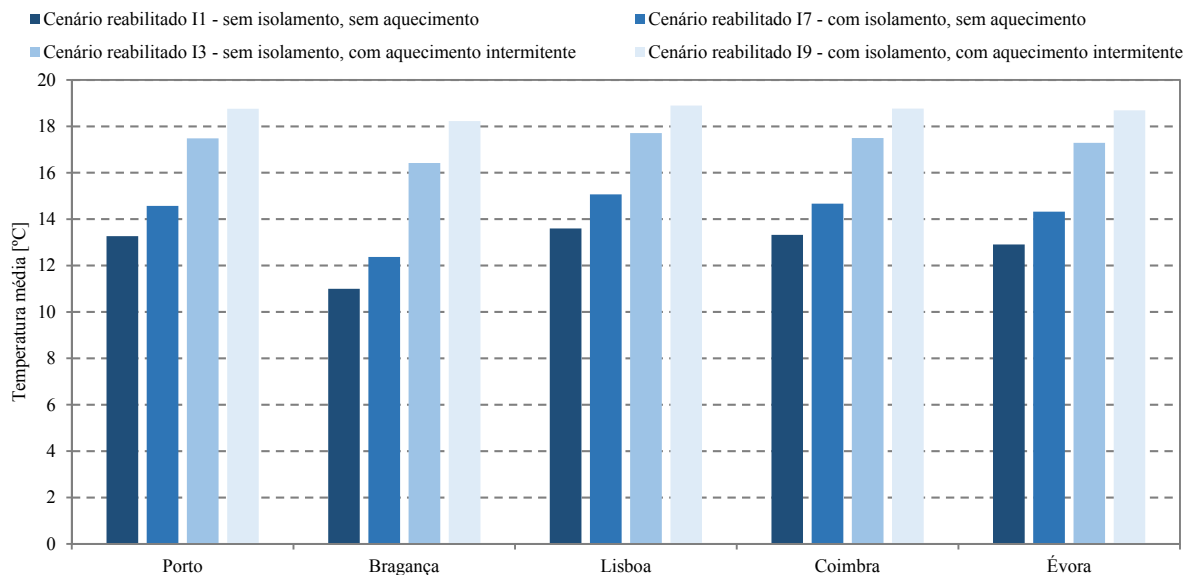


Fig.127 – Temperatura média do ar interior, dos cenários reabilitados na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 127 verifica-se que:

- O cenário reabilitado I9, com isolamento e aquecimento intermitente, possui, em todas as localizações, a temperatura média do ar interior mais elevada, tendo, em Bragança, o seu valor mínimo, 18,23°C, e, em Lisboa, o seu valor máximo, 18,90°C;
- O cenário reabilitado I1, sem isolamento e sem aquecimento, possui, em todas as localizações, a temperatura média do ar interior mais baixa, tendo, em Bragança, o seu valor mínimo, 11,00°C, e, em Lisboa, o seu valor máximo 13,60°C;
- A diferença entre o cenário reabilitado com aquecimento intermitente, com isolamento, I9 e sem isolamento, I3, é a mais elevada, sendo máxima em Bragança, 1,81°C, e mínima em Lisboa, 1,19°C;
- Nas simulações sem aquecimento, a diferença, entre o cenário reabilitado com isolamento, I17, e sem isolamento, I11, é máxima em Lisboa, 1,47°C, e mínima no Porto, 1,30°C.

Na Figura 128 apresenta-se a temperatura do ar interior correspondente ao percentil 5% ($T_{5\%}$) para a estação de aquecimento, de cada localização estudada.

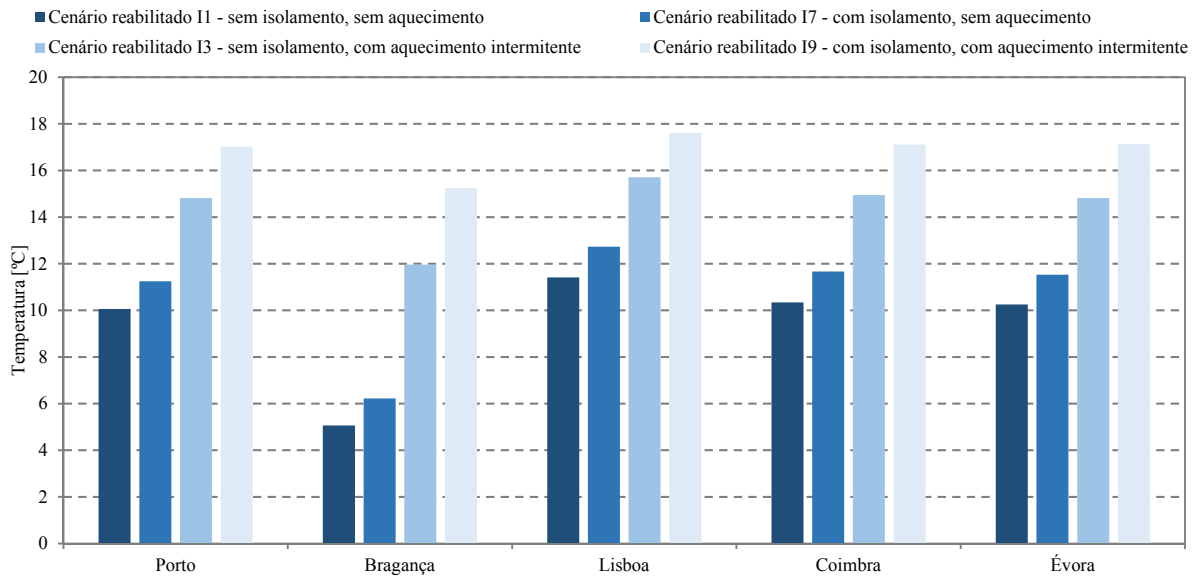


Fig. 128 – Temperatura do ar interior correspondente ao percentil 5%, $T_{5\%}$, dos cenários reabilitados na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 128 verifica-se que:

- O cenário reabilitado I9, com isolamento e aquecimento intermitente, possui, em todas as localizações, a $T_{5\%}$ mais elevada, tendo em Bragança o seu valor mínimo, 15,24°C, e em Lisboa o seu valor máximo, 17,61°C;
- O cenário reabilitado I1, sem isolamento e sem aquecimento, possui, em todas as localizações, a $T_{5\%}$ mais baixa, tendo em Bragança o seu valor mínimo, 5,06°C, e em Lisboa o seu valor máximo 11,41°C;
- A diferença entre os cenários reabilitados, com isolamento e sem isolamento, é mais elevada, nas simulações com aquecimento intermitente, sendo máxima em Bragança, 3,28°C, e mínima em Lisboa, 1,90°C;
- Nas simulações sem aquecimento, a diferença, entre cenários reabilitados, com isolamento e sem isolamento, é máxima em Coimbra, 1,33°C, e mínima em Bragança, 1,16°C.

Na Figura 129, apresenta-se a representação gráfica dos parâmetros analisados – percentagem de tempo de desconforto térmico no Inverno, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 5%.



Fig.129 – Representação gráfica dos parâmetros analisados – percentagem de tempo de desconforto, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 5%, para as cinco cidades estudadas.

Dos resultados pode concluir-se, de uma forma global, que:

- O isolamento térmico de paredes de elevada espessura, possibilita a obtenção de temperaturas do ar interior ligeiramente mais elevadas, e conseqüentemente mais próximas do conforto (20°C) na estação de aquecimento. No entanto, a diferença, para os cenários reabilitados sem isolamento, é diminuta, como comprovam as diferenças entre as temperaturas do ar interior médias, e $T_{5\%}$ dos cenários reabilitados de todas as localizações;
- O regime de aquecimento intermitente demonstrou não ser significativamente eficaz, tanto nos cenários reabilitados com isolamento como nos sem isolamento, a percentagem de tempo de desconforto continua elevada, assumindo um valor mínimo de 78%.

5.3.3. CONSUMO ENERGÉTICO NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

A quantificação do consumo energético é outro dos fatores em que se baseia a opção de isolar ou não as paredes de envolvente exterior. Através do WUFI Plus obtiveram-se os resultados de necessidade energética para os meses da estação de aquecimento, necessários para a obtenção do conforto térmico de Inverno, na categoria II da Norma EN 15251 [28]. Os resultados apresentados referem-se ao somatório da necessidade energética de cada zona térmica simulada, perfazendo o total da fatura energética do edifício-tipo.

Nos parágrafos seguintes apresentam-se os resultados da necessidade energética para o Porto e Bragança, sendo que para Lisboa, Coimbra e Évora apresentam-se no anexo V.

5.3.3.1. Porto

Na Figura 130 apresentam-se os resultados do consumo energético, para o Porto, durante o período de aquecimento, com duração de 6,7 meses (4848 horas).

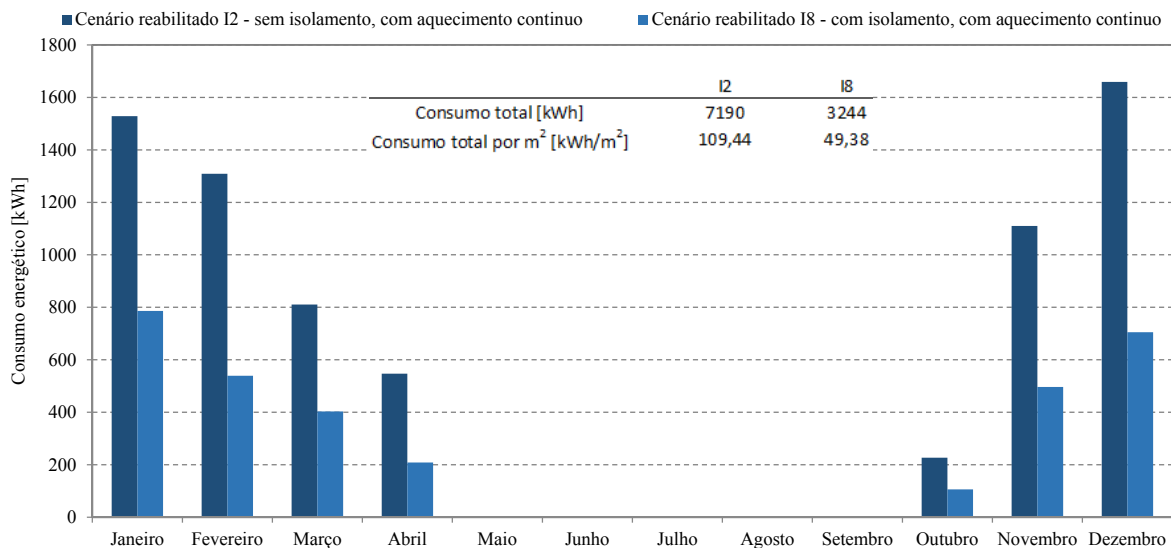


Fig.130 – Consumo energético, na estação de aquecimento, para a cidade do Porto.

Da análise da Figura 130 constata-se que:

- Dezembro é o mês com maior consumo energético para o cenário reabilitado I2 (sem isolamento) e Janeiro para o cenário reabilitado I8 (com isolamento);
- A aplicação de isolamento térmico, na caixa-de-ar das paredes de elevada espessura e massa, proporciona uma diferença de consumo considerável. Em termos de consumo total, é de 3946 kWh, e por m² é de 60,1 kWh/m²;
- A colocação de isolamento permite uma poupança energética de, aproximadamente, 55%.

Sendo do conhecimento geral, que o hábito de aquecer de forma contínua, não é prática corrente nas famílias portuguesas, tanto por razões económicas, como por razões culturais, é importante conhecer o seu custo. Na Figura 131, apresentam-se os custos mensais de energia para aquecimento no Porto, estabelecendo-se duas formas de aquecimento, eletricidade e gás natural (apesar de não ser usual redes de gás natural nas zonas rurais, quantificou-se o custo para este tipo de combustível pois é utilizado massivamente nas zonas onde as redes de gás natural existem).

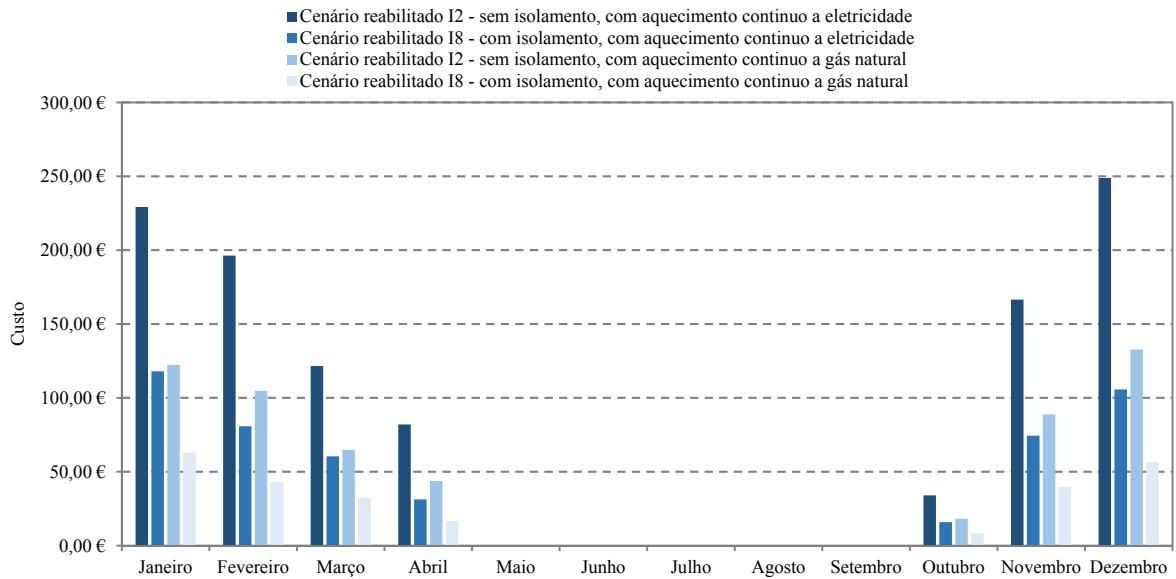
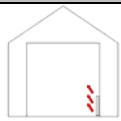
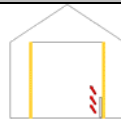


Fig.131 – Custos de aquecimento, por mês, para a cidade do Porto.

No Quadro 44 apresentam-se os custos totais de aquecimento e a diferença entre cenários sem e com isolamento.

Quadro 44 – Custos totais de aquecimento para a cidade do Porto.

Custos totais de aquecimento [€]						
	 I2		 I8		Diferença entre I2 e I8	
	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural
Custo total	1079 €	575 €	487 €	260 €	592 €	315 €
Custo total por m ²	16 €	7 €	9 €	4 €	9 €	5 €

Dos resultados da Figura 131 e do Quadro 44 destaca-se:

- Aquecendo com recurso a energia elétrica, a diferença de custo, entre o cenário I2 (sem isolamento) e I8 (com isolamento), é de 592 €. Por m² de área de pavimento, a diferença de custo, é de 9 €/m²;
- Aquecendo com recurso a gás natural, a diferença de custo, entre o cenário I2 (sem isolamento) e I8 (com isolamento), é de 315 €. Por m² de pavimento, a diferença de custo, é de 5 €/m²;

Os resultados refletem uma diferença importante entre o cenário reabilitado I8, com isolamento térmico, e o cenário reabilitado I2, sem isolamento. Os custos de aquecimento, para o cenário reabilitado I2, são aproximadamente o dobro. Com um regime de aquecimento em contínuo as paredes isoladas proporcionam vantagens significativas ao nível do custo de aquecimento.

5.3.3.2. Bragança

Na Figura 132 apresentam-se os resultados do consumo energético, de Bragança, durante o período de aquecimento, com duração de 8 meses (5832 horas).

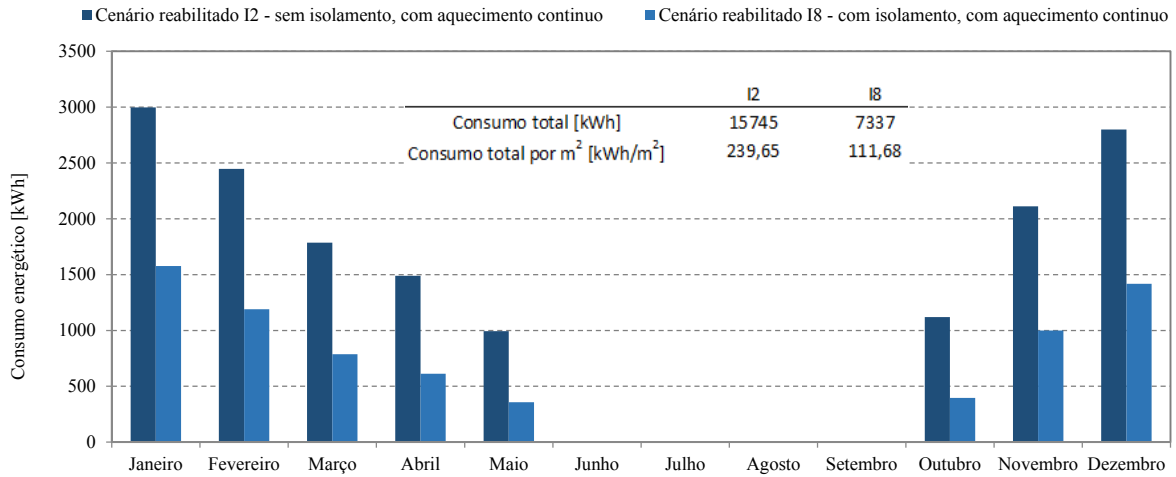


Fig.132 – Consumo energético, na estação de aquecimento, para a cidade de Bragança.

Da análise da Figura 132 constata-se que:

- Janeiro é o mês com maior consumo energético para os dois cenários reabilitados em análise;
- A aplicação de isolamento térmico, na caixa-de-ar das paredes de elevada espessura e massa, proporciona uma diferença de consumo considerável. Em termos de consumo total é de 8408 kWh, e por m², de área de pavimento, é de 127,97 kWh/m²;
- A colocação de isolamento permite uma poupança energética de, aproximadamente, 53%.

Na Figura 133 apresentam-se os custos mensais de energia para aquecimento em Bragança, estabelecendo-se duas formas de aquecimento baseados em fonte distinta, uma a eletricidade e outra a gás natural. Para a eletricidade considerou-se o preço de 0,15€/kWh e para o gás natural 0,08€/kWh.

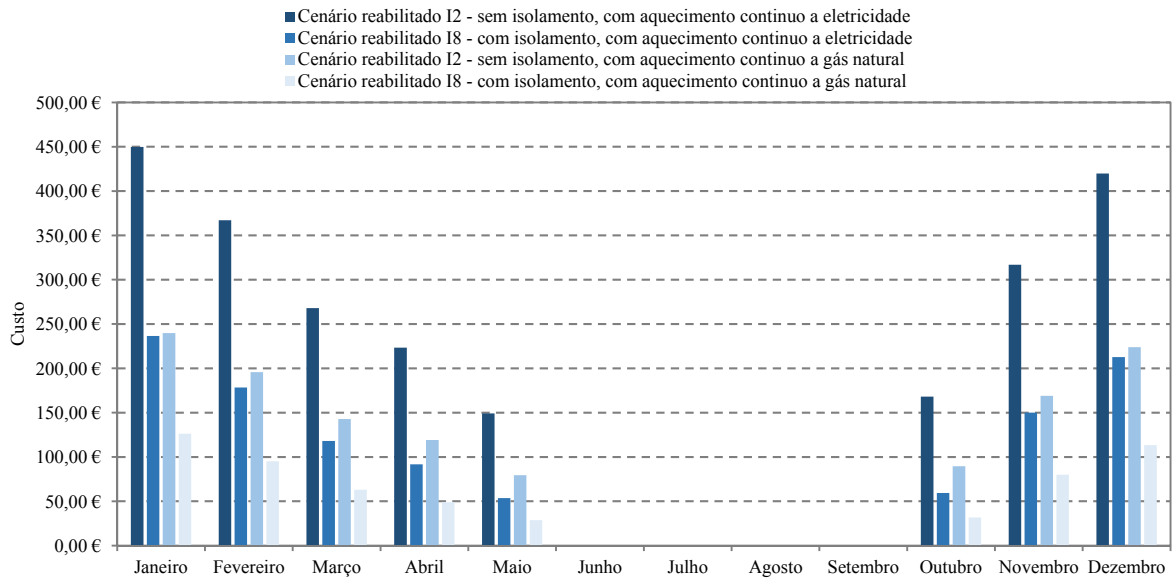
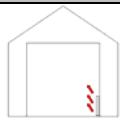
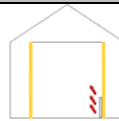


Fig.133 – Custos de aquecimento, por mês, para a cidade de Bragança.

No Quadro 45 apresentam-se os custos totais de aquecimento e a diferença entre cenários sem isolamento e com isolamento.

Quadro 45 – Custos totais de aquecimento para a cidade de Bragança.

Custos totais de aquecimento [€]						
	 I2		 I8		Diferença entre I2 e I8	
	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural
Custo total	2362 €	1260 €	1101 €	587 €	1261 €	673 €
Custo total por m ²	36 €	17 €	19 €	9 €	19 €	10 €

Dos resultados da Figura 133 e Quadro 45 destaca-se:

- Aquecendo com recurso a energia elétrica, a diferença de custo entre o cenário reabilitado I2 (sem isolamento) e I8 (com isolamento), é de 1261 €. Por m² de área de pavimento, a diferença de custo, entre o cenário reabilitado I2 (sem isolamento) e o I8 (com isolamento), é de 19 €/m²;
- Aquecendo com recurso a gás natural, a diferença de custos, entre o cenário reabilitado I2 (sem isolamento) e o I8 (com isolamento), é de 673 €. Por m² de área de pavimento, a diferença de custo, é de 10 €.

Os resultados para Bragança seguem a linha dos resultados da cidade do Porto, porém, devido ao clima mais rigoroso, as diferenças entre o cenário reabilitado I8, com isolamento térmico, e o cenário reabilitado I2, sem isolamento são maiores, constatando-se uma maior influência por parte do isolamento térmico.

5.3.3.3. Influência da Localização no Território Nacional no Consumo Energético

Realizou-se uma análise comparativa da eficiência energética, para a estação de aquecimento, entre os cenários de reabilitação simulados, para as 5 localizações geográficas do território nacional consideradas. Para tal, compararam-se os valores do consumo energético, total, e, por m², da área de pavimento, dos cenários reabilitados com um regime de aquecimento contínuo.

Na Figura 134 representam-se os valores de consumo energético total e na Figura 135 os valores de consumo energético por m² da área de pavimento, dos cenários reabilitados, I2, sem isolamento, e I8, com isolamento, para as cinco cidades na estação de aquecimento.

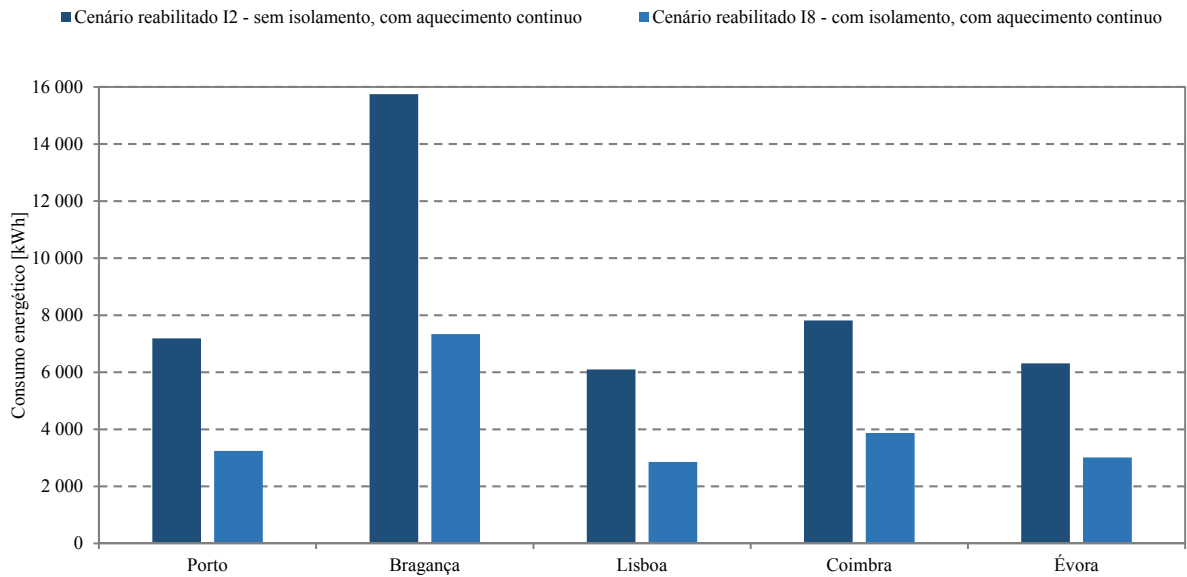


Fig.134 – Consumo energético, na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.

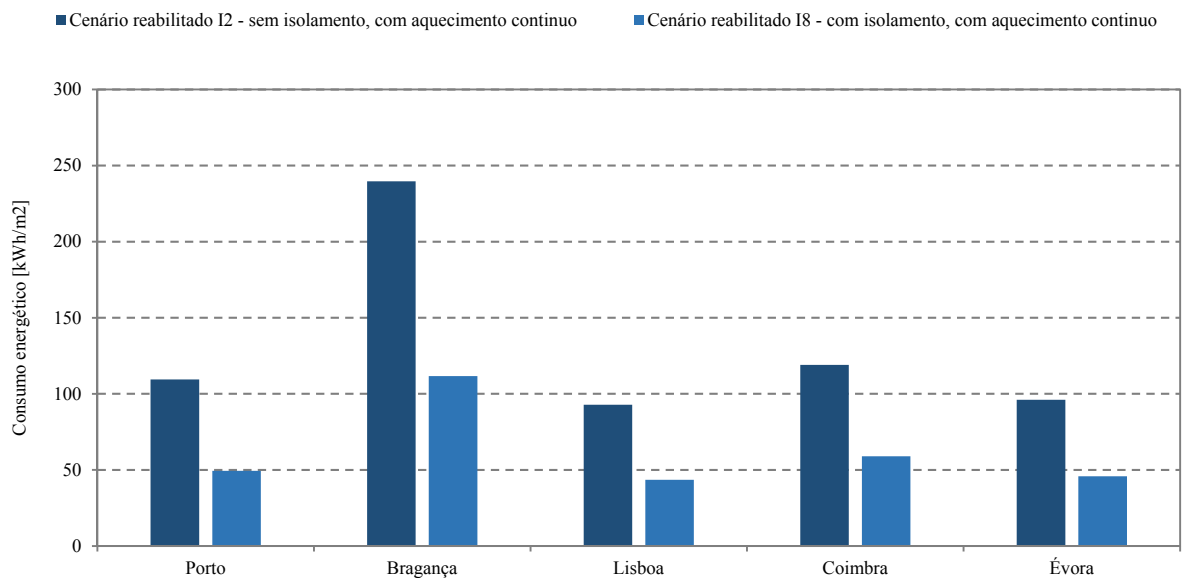


Fig.135 – Consumo energético, por m², na estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados das Figuras 134 e 135 verifica-se que:

- Isolar as paredes é fundamental em edifícios rurais com um regime de aquecimento contínuo;
- O consumo energético do cenário reabilitado I8, com isolamento térmico, é, em todas as localizações, o que conduz a menor consumo energético. A diferença entre o consumo do cenário reabilitado I8 (com isolamento) com o cenário reabilitado I2 (sem isolamento), é máxima em Bragança. Em termos de consumo total, a diferença é de 8408 kWh, e de consumo por m² de área de pavimento, a diferença, é de 127,97 kWh/m². Em Lisboa registou-se a diferença mais baixa, sendo, em termos de consumo total, de 3240 kWh e de consumo por m² de área de pavimento, de 49,32 kWh/m²;
- Bragança apresenta, com grande diferença, o maior consumo energético na estação de aquecimento, 15745 kWh, que pressupõe 239,65 kWh/m², por sua vez, Lisboa, é a localidade com o menor necessidade energética, 6100 kWh, que pressupõe 92,85 kWh/m²;
- A poupança energética, devida à colocação de isolamento térmico, na caixa-de-ar das paredes, é mínima para Coimbra, 50% e máxima para o Porto, 55%, para Bragança e Lisboa é de 53% e para Évora de 52%.

Na Figura 136 apresenta-se a representação gráfica do consumo energético por m², de todas as localizações consideradas.

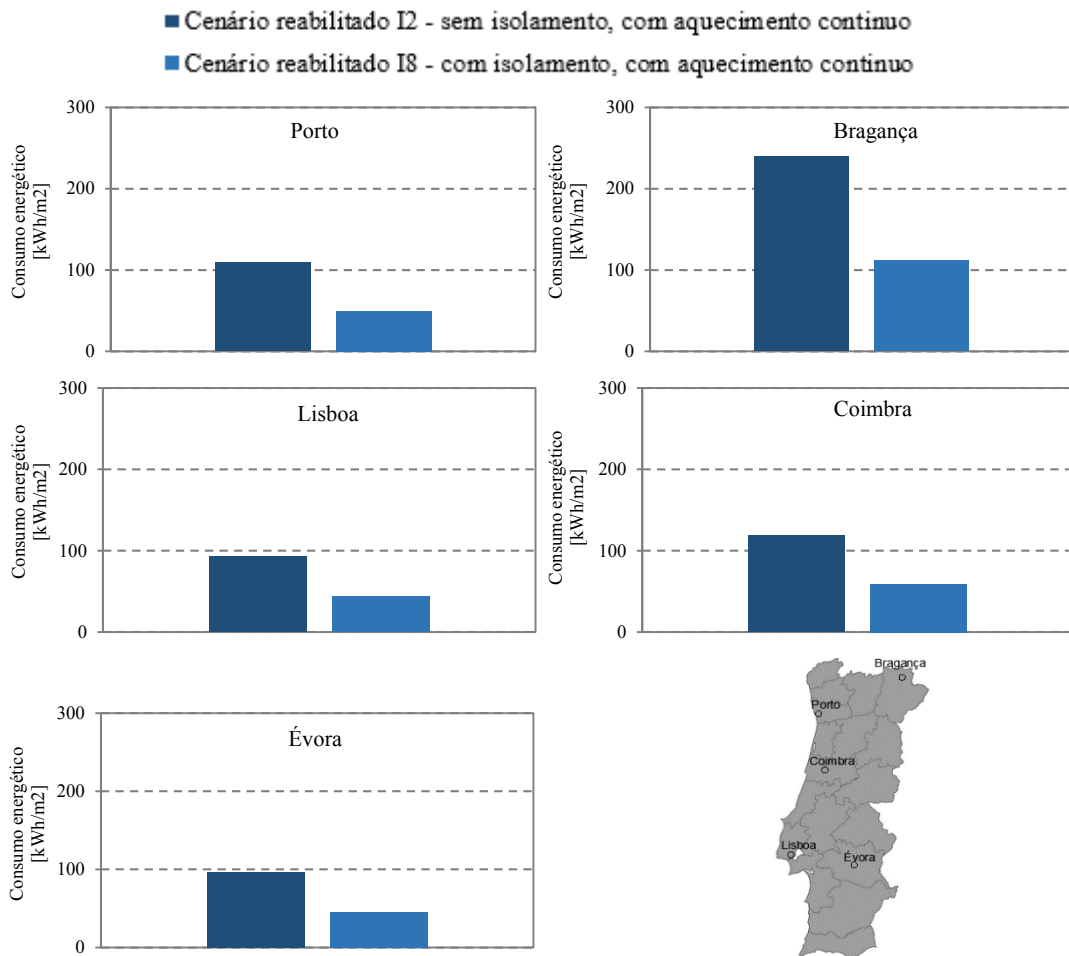


Fig.136 – Representação gráfica do consumo energético total e por m², da estação de aquecimento, para as cinco cidades estudadas.

Dos resultados pode concluir-se, de uma forma global, que:

- A severidade da estação de aquecimento de Bragança reflete-se no elevado consumo energético obtido nas simulações. Por outro lado, o menor consumo energético registado para a cidade de Lisboa, reflete o seu clima mais ameno, perante estes dados fica patente a influência do clima na eficiência energética dos edifícios.
- O isolamento térmico de paredes de elevada espessura (na caixa-de-ar), possibilita uma poupança energética considerável, nos cenários reabilitados em regime de aquecimento contínuo, sendo a diferença entre os cenários reabilitados com isolamento e sem isolamento de pelo menos 50%;

5.3.4. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO – ÍNDICE DE DESCONFORTO TÉRMICO DE INVERNO (IDT – I)

O desenvolvimento de um Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), que quantifica o somatório de graus-hora abaixo da temperatura de conforto de referência (20°C), é tido como importante, de forma a estabelecer um novo conceito de avaliação do desconforto térmico de um edifício. Para isso desenvolveu-se um método de cálculo, em que se considera que no intervalo $[t_i, t_{i+1}[$, referente a 1 hora, a temperatura do ar interior varia linearmente, como se exemplifica na Figura 137.

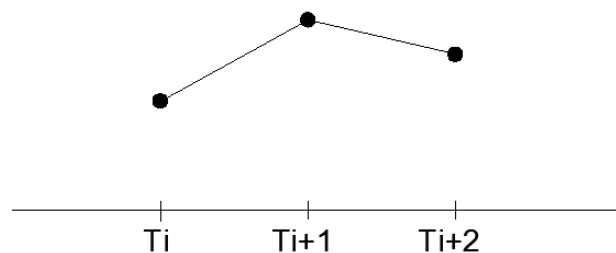


Fig.137 – Representação gráfica da variação da temperatura para o cálculo do IDT - I.

Tendo em consideração o descrito, ilustra-se na Figura 138 um exemplo do IDT – I para um dado edifício.

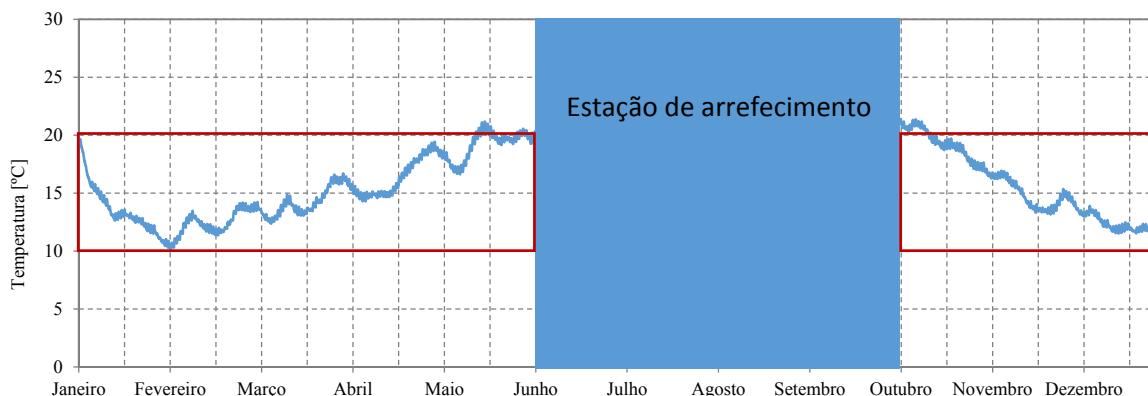


Fig.138 – Exemplo do Índice de Desconforto Térmico de Inverno, IDT – I, para um dado edifício.

Os resultados que se apresentam comparam os valores obtidos nas simulações dos cenários reabilitados sem isolamento térmico com os obtidos nas simulações dos cenários reabilitados com isolamento térmico nas paredes exteriores (I1, I3, I7 e I9). Mostram-se os resultados para o edifício-tipo na sua globalidade e para um compartimento em específico (quarto principal) para o período de ocupação, das 00h às 08h durante a semana e entre as 00h e as 10h no fim-de-semana.

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados para o Porto e Bragança. Os resultados de Lisboa, Coimbra e Évora são apresentados no anexo VI.

5.3.4.1. Porto

Nas Figuras 139 e 140 apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), do Porto, durante o período de aquecimento, 6,7 meses (4848 horas). A Figura 139 é relativa ao IDT – I para o edifício-tipo (média de todas as zonas térmicas).

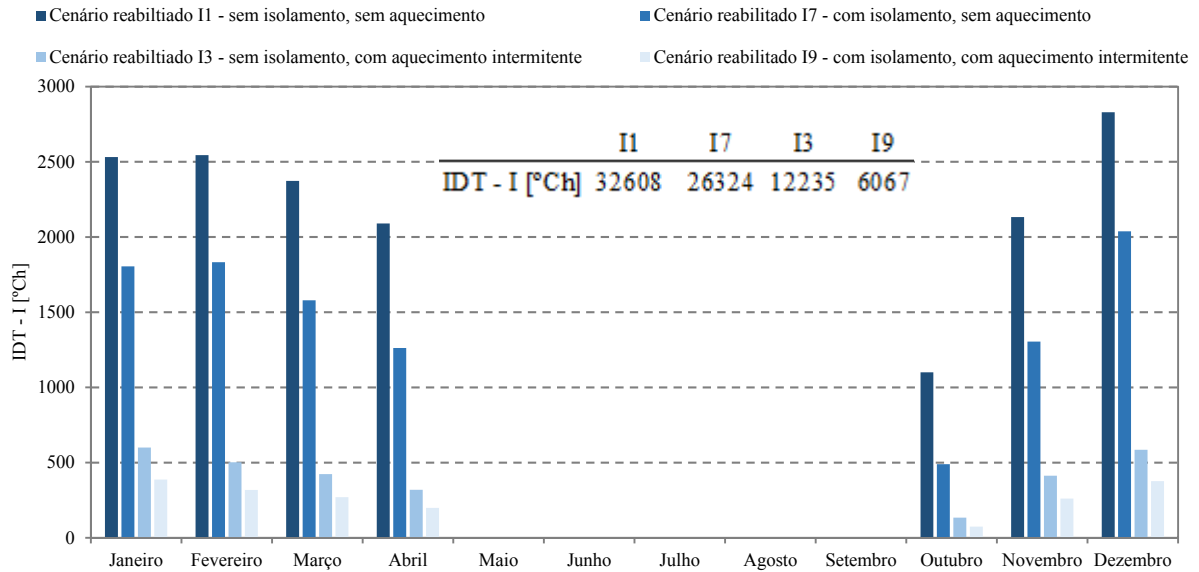


Fig.139 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para a cidade do Porto.

Dos resultados apresentados para o IDT – I, na Figura 139, destaca-se:

- O cenário reabilitado I1, sem isolamento e sem aquecimento, possui o IDT – I mais elevado para todos os meses da estação de aquecimento, enquanto o cenário reabilitado I9, com isolamento e aquecimento intermitente, possui o menor IDT – I;
- A diferença entre os cenários reabilitados sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), é de 6284°Ch, o que significa que a colocação de isolamento térmico permite reduzir o IDT – I em, aproximadamente, 19%. Entre os cenários reabilitados com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), a diferença é de 6168°Ch, o que significa que a colocação de isolamento proporcionou uma redução do IDT – I de, aproximadamente, 50%.

Na Figura 140 apresentam-se os resultados para o período de ocupação do quarto principal do edifício-tipo.

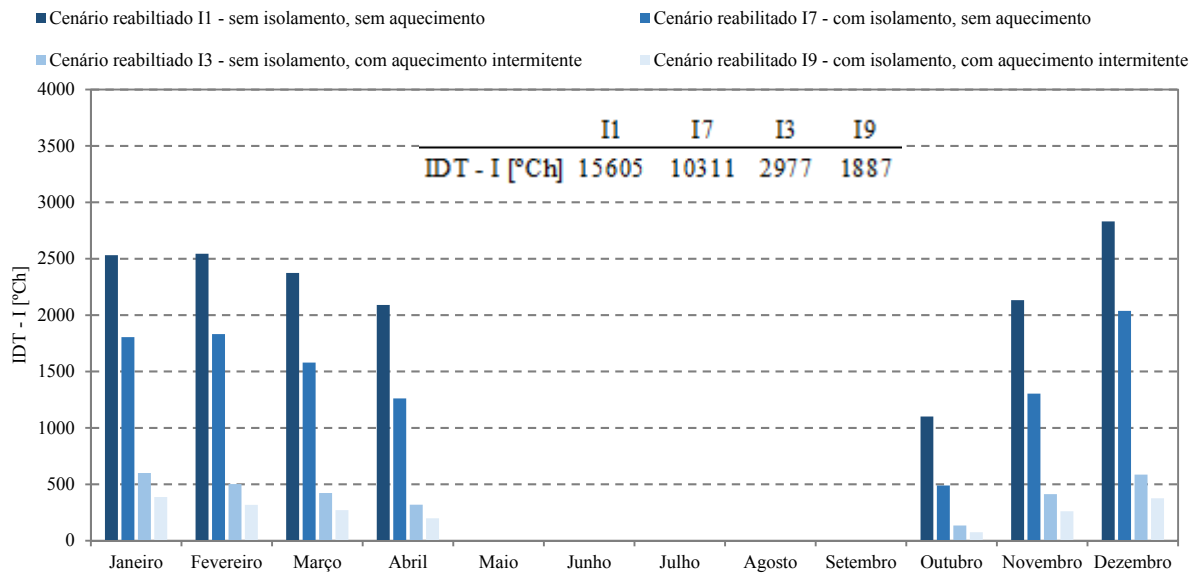


Fig.140 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para o período de ocupação do quarto principal, para a cidade do Porto.

Dos resultados apresentados para o IDT – I, na Figura 140, destaca-se:

- O cenário reabilitado I1, sem isolamento e sem aquecimento, possui o IDT – I mais elevado para todos os meses da estação de aquecimento, enquanto que, o cenário reabilitado I9, com isolamento e aquecimento intermitente, possui o IDT – I mais baixo;
- A diferença entre o valor de IDT – I dos cenários reabilitados sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), é de 5294°Ch, havendo uma diminuição do IDT – I de, aproximadamente, 34%. A diferença entre os cenários reabilitados com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), é de 1090°Ch, havendo uma diminuição do IDT – I de, aproximadamente, 37%.

Os resultados obtidos demonstram que os cenários reabilitados sem isolamento apresentam um IDT – I superior ao dos cenários reabilitados com isolamento, verificando-se, maior influência por parte do isolamento térmico quando combinado com um regime de aquecimento intermitente.

5.3.4.2. Bragança

Nas Figuras 141 e 142 apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), de Bragança, durante o período de aquecimento, 8 meses (5832 horas). A Figura 141 é relativa ao IDT – I para o edifício-tipo.

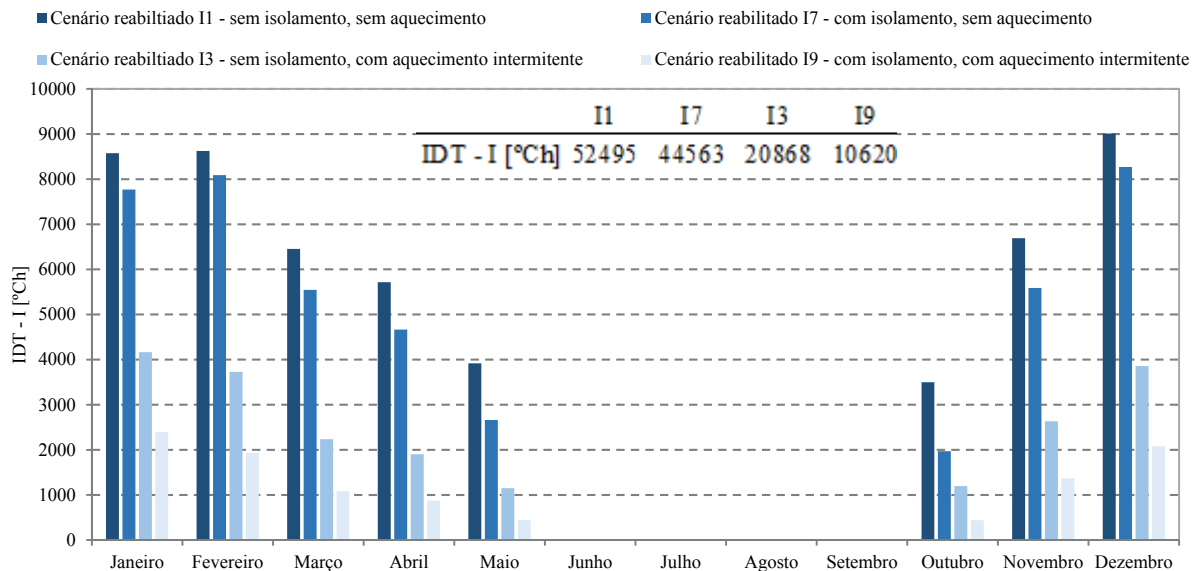


Fig.141 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I) para a cidade de Bragança.

Dos resultados apresentados para o IDT – I, na Figura 141, destaca-se:

- Para Bragança constata-se que os resultados possuem a mesma tendência que para o Porto, mas, devido ao rigor do clima, são mais gravosos;
- A diferença entre os cenários reabilitados sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), é de 7932°Ch, o que significa que a colocação de isolamento térmico permite reduzir o IDT – I em, aproximadamente, 15%. Entre os cenários reabilitados com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), a diferença é de 10248°Ch, o que significa que a colocação de isolamento térmico permite reduzir o IDT – I de, aproximadamente, 49%.

Na Figura 142 apresentam-se os resultados para o período de ocupação do quarto principal do edifício-tipo.

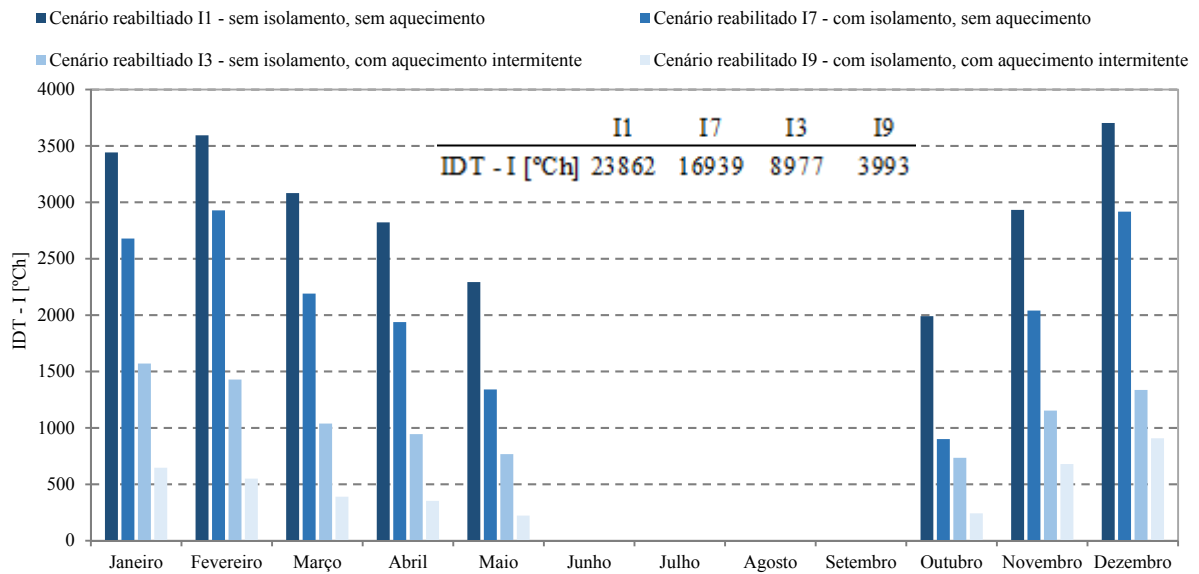


Fig.142 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), por mês, para o período de ocupação do quarto principal, para a cidade de Bragança.

Dos resultados apresentados para o IDT – I, na Figura 142, destaca-se:

- O cenário reabilitado I1, sem isolamento e sem aquecimento, possui o IDT – I mais elevado para todos os meses da estação de aquecimento, enquanto que, o cenário reabilitado I9, com isolamento e aquecimento intermitente, possui o IDT – I mais baixo;
- A diferença entre o valor de IDT – I, dos cenários reabilitados sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), é de 6923°Ch, havendo uma diminuição do IDT – I, devida à aplicação de isolamento, de aproximadamente, 29%. A diferença entre os cenários reabilitados com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), é de 4984°Ch, havendo uma diminuição do IDT – I, devida à aplicação de isolamento, de aproximadamente, 66%.

Os resultados obtidos demonstram, tal como para o Porto, que os cenários reabilitados sem isolamento apresentam um IDT – I superior ao dos cenários reabilitados com isolamento. Para Bragança o efeito do isolamento é mais notório verificando-se diferenças mais elevadas.

5.3.4.3. Influência da Localização no Território Nacional no Índice de Desconforto Térmico de Inverno – IDT – I

Realizou-se uma análise comparativa do Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para as cinco localizações geográficas do território nacional consideradas. Para tal, compararam-se os valores do IDT – I para o edifício-tipo em termos médios, Figura 143.

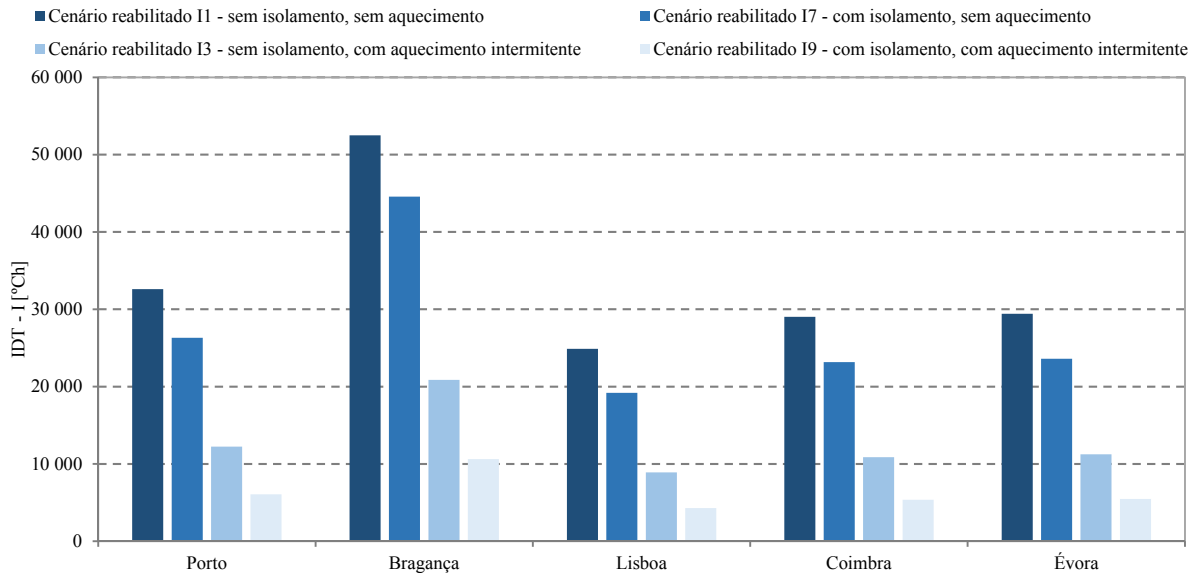


Fig.143 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 143 verifica-se que:

- Os cenários reabilitados sem isolamento possuem, em todas as localizações, maior IDT – I, sendo que o cenário reabilitado I1, sem isolamento e sem aquecimento, é o que possui o maior Índice de Desconforto Térmico de Inverno. O seu valor máximo, é referente à cidade de Bragança, com um valor de 52495°Ch. Lisboa possui o valor mínimo, registando 24885°Ch;
- A diferença, devido à aplicação de isolamento térmico, entre os cenários sem aquecimento, I7 (com isolamento) e I1 (sem isolamento), é máxima para Bragança e mínima para Lisboa. Os seus valores são de 7932°Ch para Bragança e 5698°Ch para Lisboa. Na diferença entre os cenários com aquecimento intermitente, I9 (com isolamento) e I3 (sem isolamento), o valor máximo é de 10248°Ch para Bragança e de 4605°Ch para Lisboa;
- A redução do IDT – I, devido à aplicação de isolamento térmico, entre os cenários reabilitados sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), é mínima para Bragança, 15% e máxima para Lisboa, 23%. Entre os cenários com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), o valor mínimo regista-se em Bragança, 49% e o máximo em Lisboa, 52%.

Na Figura 144, apresentam-se os valores do IDT – I para o período de ocupação do quarto, durante a estação de aquecimento.

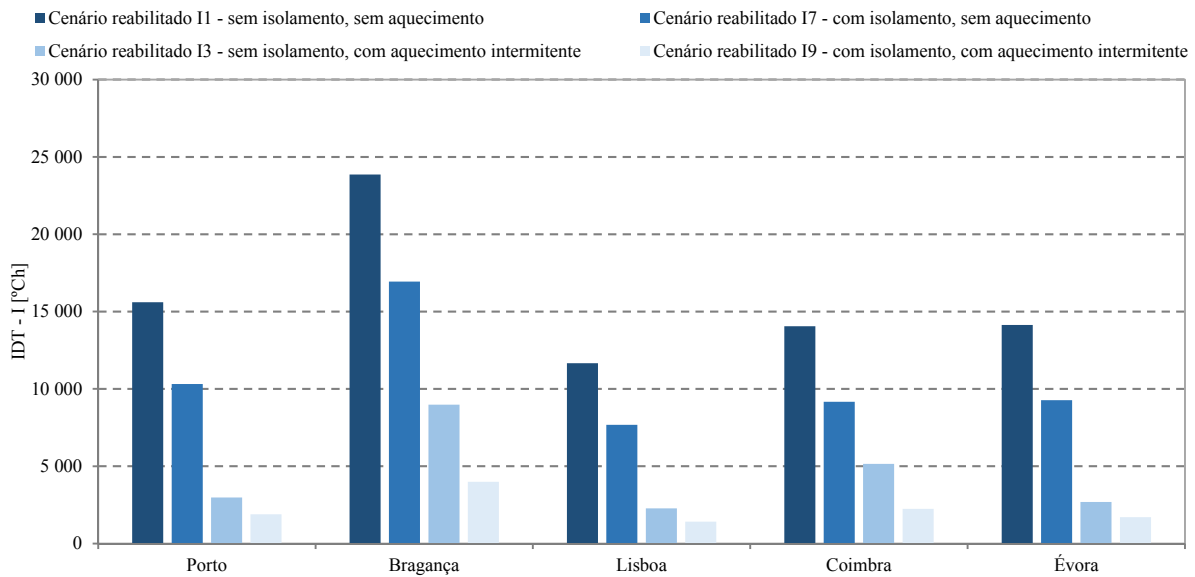


Fig.144 – Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para o período de ocupação do quarto principal, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 144 verifica-se que:

- O cenário reabilitado I1, sem isolamento e sem aquecimento, possui o maior IDT – I em todas as localidades. O seu valor máximo é referente à cidade de Bragança, tendo um valor de 23862°Ch. Lisboa possui o menor valor, com um IDT – I de 11660°Ch;
- A diferença entre os cenários sem aquecimento, I7 (com isolamento) e I1 (sem isolamento), é máxima para Bragança e mínima para Lisboa. Os seus valores são de 6923°Ch para Bragança e de 3985°Ch para Lisboa. Na diferença entre os cenários com aquecimento intermitente, I9 (com isolamento) e I3 (sem isolamento), o valor máximo é de 4984°Ch para Bragança e 857°Ch para Lisboa;
- A redução do IDT – I, entre os cenários reabilitados sem aquecimento, devido à colocação de isolamento, entre os cenários I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), é mínima para Bragança, 29% e máxima para Coimbra, 35%. Entre os cenários com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), o valor mínimo regista-se para o Porto e Évora, 37% e o máximo para Bragança e Coimbra, 66%.

Na Figura 145 apresenta-se a representação gráfica do IDT – I para o edifício-tipo e para o quarto durante o período de ocupação.

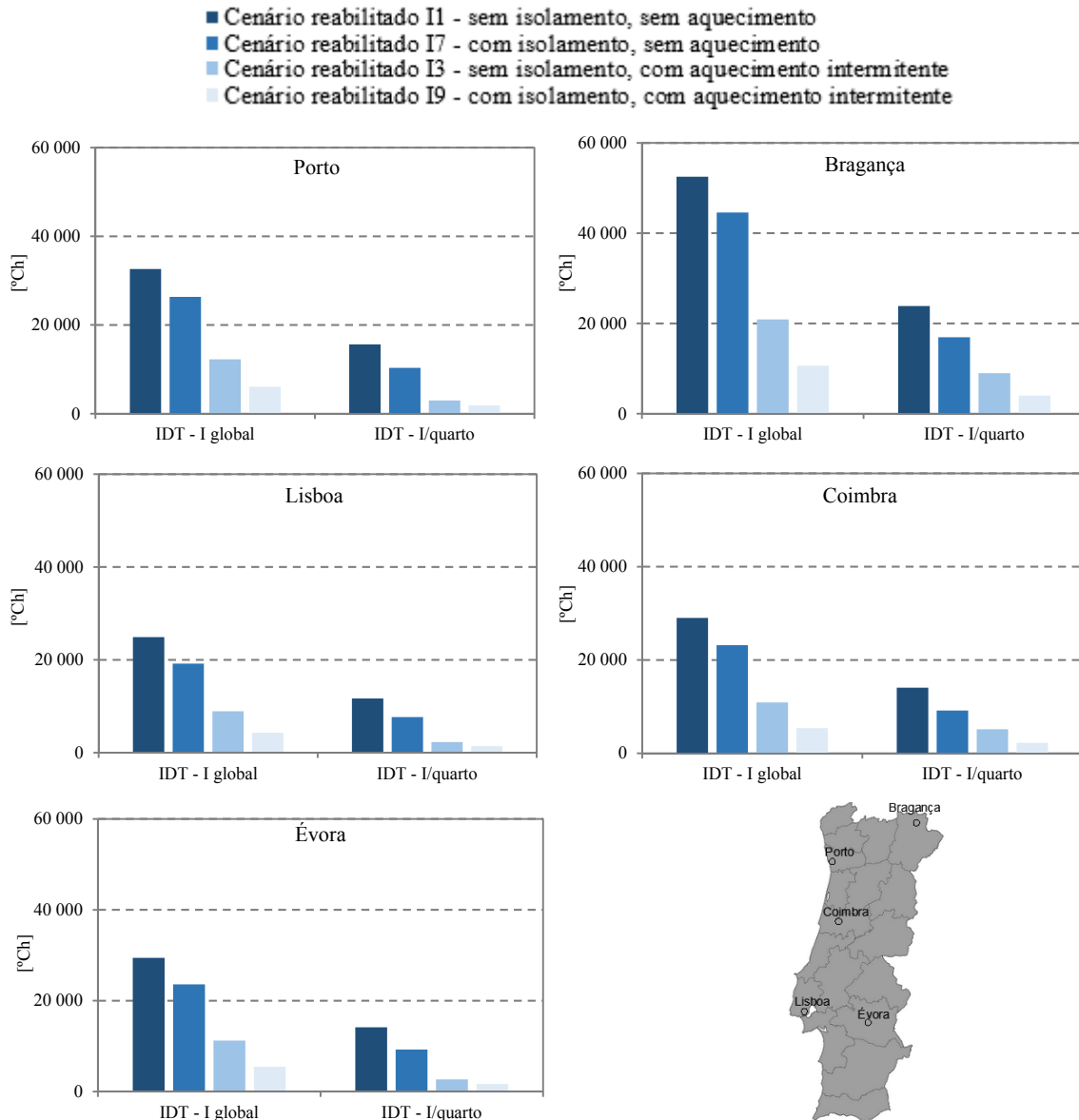


Fig.145 – Representação gráfica do Índice de Desconforto Térmico de Inverno (IDT – I), para o edifício-tipo e para o período de ocupação do quarto principal, das cinco cidades estudadas.

Dos resultados pode concluir-se, de uma forma global, que:

- O isolamento térmico, de paredes de elevada espessura conduz a um IDT – I menor, proporcionando um nível de conforto superior, na estação de aquecimento, em todas as localidades estudadas, contudo nenhum cenário possui um IDT – I nulo (situação ideal de conforto);
- A influência do isolamento térmico é, como seria de esperar, maior na localidade de Bragança, cidade com um clima mais rigoroso na estação de aquecimento, como indicam as diferenças entre o IDT – I dos cenários com isolamento e sem isolamento. Por sua vez, Lisboa foi a cidade em que o efeito do isolamento teve menor impacto, existindo uma maior proximidade entre os valores dos cenários com e sem isolamento;
- O IDT – I ideal, igual a zero, não se alcança sem um regime de aquecimento em contínuo. Os cenários com um regime de aquecimento intermitente, com e sem isolamento, possuem um IDT – I menor, porém, longe do ideal.

5.3.5. AVALIAÇÃO DO CONFORTO – MÉTODO DA NORMA EN 15251

A utilização do método da Norma EN 15251 [28] tem como objetivo verificar o nível de conforto entre cenários de reabilitação diferentes, para assim, constituir, juntamente com os anteriores, um fator de sustentação da opção de isolar ou não as paredes de grande espessura.

Nas secções seguintes apresentam-se os resultados para Porto e Bragança, para a categoria II e III de conforto, estabelecidas pela Norma [28]. No anexo VII apresentam-se os resultados das cidades de Lisboa, Coimbra e Évora.

5.3.5.1. Porto

No presente subcapítulo apresenta-se o estudo do conforto térmico para a cidade do Porto, Figura 146. Os pontos representados são os resultados horários da estação de aquecimento para o edifício-tipo.

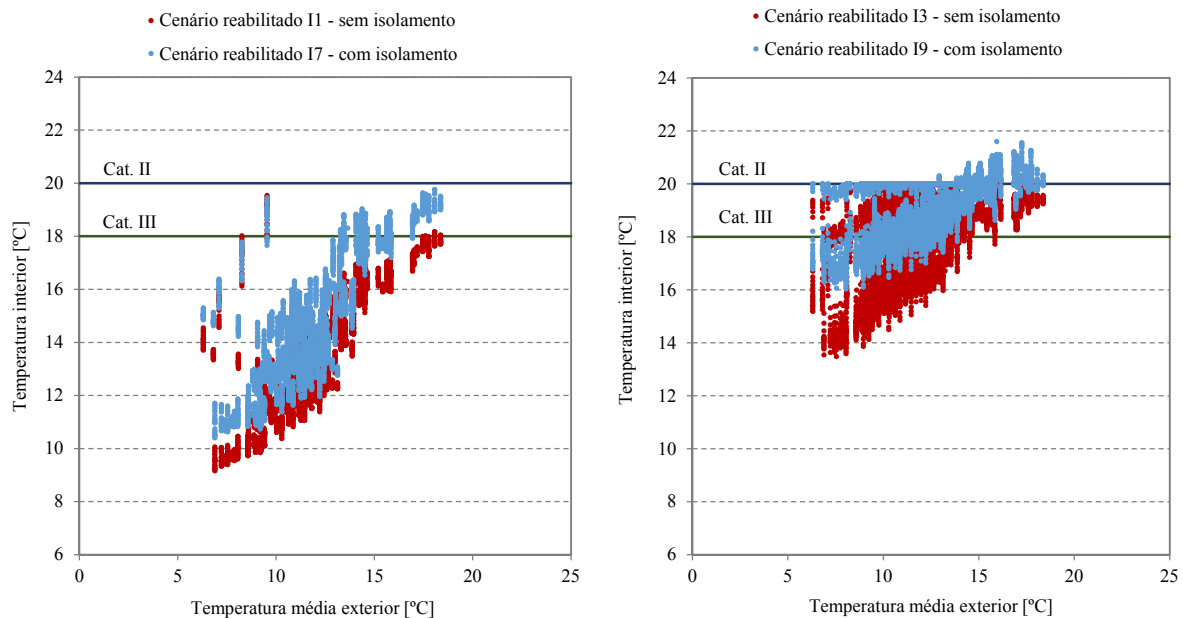






Fig.146 – Avaliação do conforto térmico, segundo a Norma EN 15251 [28], para a cidade do Porto.

Os resultados obtidos demonstram uma similitude entre os cenários com isolamento e sem isolamento. No entanto, os cenários reabilitados com isolamento apresentam um desempenho térmico um pouco superior. Os registos de temperatura estão mais próximos dos limites de conforto contendo mais pontos dentro das categorias de conforto consideradas. A percentagem de tempo de desconforto é demasiado elevada em todos os cenários reabilitados. De forma a quantificar os factos referidos apresenta-se no Quadro 46, a percentagem correspondente ao número de horas de desconforto dos cenários reabilitados em análise.

Quadro 46 – Percentagem de tempo e respetivo número de horas de desconforto para a cidade do Porto.

Categoria de conforto		Cenários reabilitados			
		 I1	 I7	 I3	 I9
II	% Tempo fora dos limites de conforto	100%	100%	92%	80%
	Número de horas fora dos limites de conforto	4848	4848	4460	3878
III	% Tempo fora dos limites de conforto	99%	90%	60%	26%
	Número de horas fora dos limites de conforto	4813	4360	2932	1273

Dos resultados do Quadro 46 destaca-se:

- A diferença do número de horas de desconforto é de 582 horas, cerca de 12%, para a categoria II, entre os cenários reabilitados com um regime de aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento). Os cenários reabilitados sem aquecimento, com e sem isolamento, apresentam 100% de desconforto;
- A diferença do número de horas de desconforto é de 453 horas, cerca de 9%, para a categoria III, entre os cenários reabilitados sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), entre os cenários reabilitados com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), é de 1659 horas, cerca de 34%.

Conclui-se, assim, que para um patamar de conforto mais exigente (categoria II), a aplicação de isolamento não proporciona vantagens consideráveis, no entanto para a categoria III de conforto, a percentagem de desconforto do cenário reabilitado I3, sem isolamento com aquecimento intermitente, é claramente superior ao do cenário reabilitado I9, com isolamento e aquecimento intermitente. Nos cenários reabilitados sem aquecimento, o cenário reabilitado I7, com isolamento, possui um nível de desconforto inferior ao do cenário reabilitado I1, sem isolamento, no entanto, a diferença não é significativa, nem o nível de desconforto aceitável.

5.3.5.2. Bragança

No presente subcapítulo apresenta-se o estudo do desconforto térmico para a cidade de Bragança (ver Figura 147). Os pontos representados são os resultados horários da estação de aquecimento para o edifício-tipo.

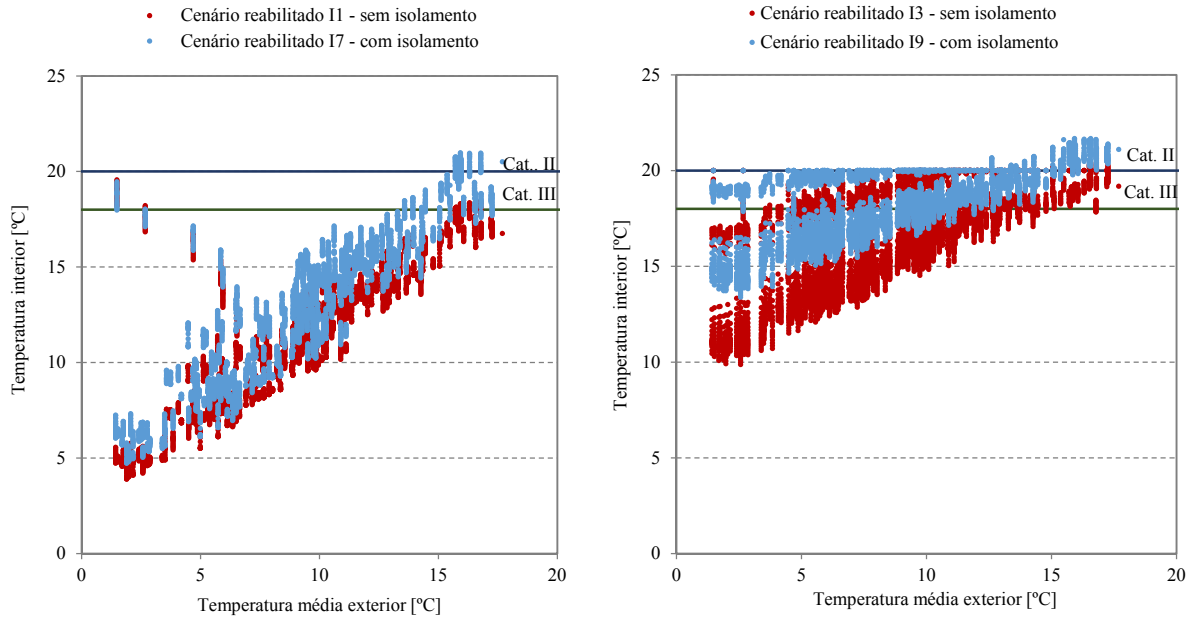


Fig.147 – Avaliação do conforto térmico, segundo a Norma EN 15251 [28], para a cidade de Bragança.

Tal como para a cidade do Porto, a mancha de pontos dos cenários reabilitados com isolamento está mais próxima dos limites de conforto, contendo mais pontos dentro das categorias de conforto consideradas. A percentagem de tempo de desconforto volta a ser demasiado elevada em todos os cenários reabilitados. De forma a confrontar os resultados, apresenta-se no Quadro 47 a percentagem e correspondente número de horas de desconforto dos cenários reabilitados em análise.

Quadro 47 – Percentagem de tempo e respetivo número de horas de desconforto para a cidade de Bragança.

		Cenários reabilitados			
Categoria de conforto					
		I1	I7	I3	I9
II	% Tempo fora dos limites de conforto	100%	98%	92%	80%
	Número de horas fora dos limites de conforto	5832	5717	5365	4666
III	% Tempo fora dos limites de conforto	99%	92%	69%	41%
	Número de horas fora dos limites de conforto	5755	5381	4007	2401

Dos resultados do Quadro 47 destaca-se que:

- A diferença do número de horas de desconforto é de 696 horas, cerca de 12%, para a categoria II, entre os cenários reabilitados com um regime de aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), para os cenários reabilitados sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento), verifica-se uma diferença de 115 horas, cerca de 2%;
- A diferença do número de horas de desconforto é de 437 horas, cerca de 7%, para a categoria III, entre os cenários reabilitados sem aquecimento, I1 (sem isolamento) e I7 (com isolamento). Entre os cenários reabilitados com aquecimento intermitente, I3 (sem isolamento) e I9 (com isolamento), é de 1606 horas, cerca de 28%.

Os resultados verificados demonstram, tal como para a cidade do Porto, que numa categoria de conforto mais exigente (II), os benefícios proporcionados pelo isolamento térmico não são substanciais. Na categoria III, menos exigente, as melhorias são mais evidentes, sendo nos cenários reabilitados com aquecimento intermitente, mais relevantes, contudo ainda longe de um nível aceitável. Nos cenários reabilitados sem isolamento a melhoria entre o cenário reabilitado com isolamento, I7, e o sem isolamento, I1, tal como para o caso do Porto, é insignificante.

5.3.5.3. Influência da Localização no Território Nacional na Quantificação do Desconforto Térmico Pela Norma EN 15251

Tendo por base a Norma EN 15251 [28] quantificou-se o período de tempo em que há desconforto térmico, na estação de aquecimento, nos cenários de reabilitação simulados, nas 5 localizações geográficas do território nacional consideradas. Para tal, comparam-se os valores da percentagem de tempo fora dos limites da categoria II, destinada a edifícios reabilitados, e III, destinada a edifícios existentes, da referida Norma [28].

Na Figura 148 representam-se os valores da percentagem de desconforto, para a categoria II, dos cenários reabilitados I1, I3, I7 e I9, para as localizações consideradas.

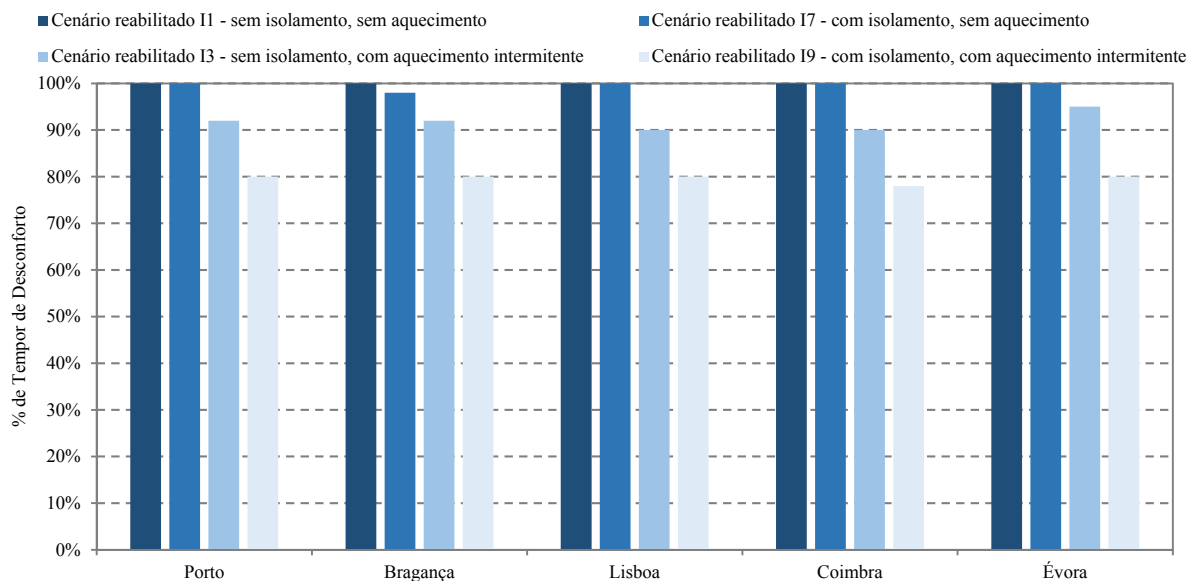


Fig. 148 – Percentagem de tempo de desconforto, para a categoria II da Norma EN 15251 [28], para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 148 verifica-se que:

- A percentagem de tempo de desconforto térmico apresentada para todos os cenários reabilitados, em todas as localizações estudadas, é extremamente elevada, sendo o melhor registo de 78% (Coimbra);
- O regime de aquecimento intermitente proporciona melhorias no nível de conforto, sendo mais visível no cenário com isolamento térmico, no entanto, a percentagem de tempo de desconforto térmico fica longe de um mínimo admissível;
- A melhoria no conforto imposta pelo isolamento térmico só tem impacto no cenário reabilitado com aquecimento, sendo máxima na região de Évora, 15%, e mínima, em Lisboa, 10%.

Na Figura 149 representam-se os valores da percentagem de tempo de desconforto, para a categoria III, dos cenários reabilitados I1, I3, I7 e I9, para as localizações consideradas.

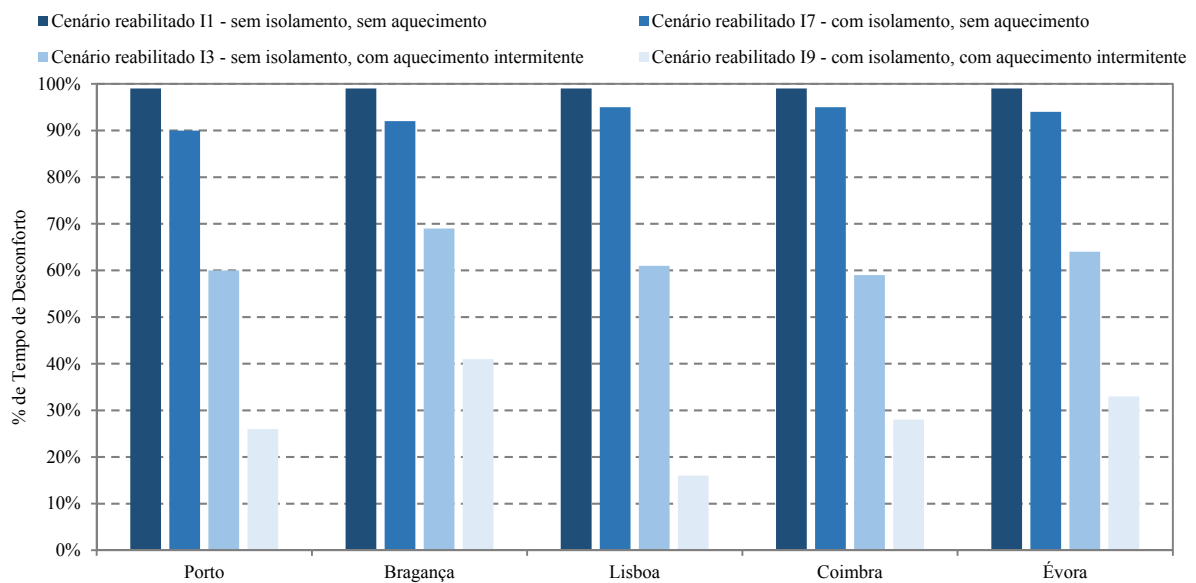


Fig. 149 – Percentagem de tempo de desconforto, para a categoria III da Norma EN 15251 [28], para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 149 verifica-se que:

- A percentagem de tempo de desconforto apresentada, contínua, para os cenários reabilitados sem aquecimento, com e sem isolamento, a ser extremamente elevada em todas as localizações estudadas;
- O regime de aquecimento intermitente, mesmo para uma categoria de conforto menos exigente, continua a ter percentagens de tempo de desconforto inaceitáveis. No entanto, para Lisboa, a percentagem de tempo de desconforto poderá estar próxima de ser satisfatória, 16% no cenário I9 (com isolamento);
- A colocação de isolamento térmico permite, nos cenários reabilitados sem aquecimento, uma melhoria que varia entre, 4% para Bragança e Lisboa, e 9% para o Porto;
- A colocação de isolamento térmico permite, nos cenários reabilitados com aquecimento intermitente, uma melhoria que varia entre, 28% para Bragança e 45% para Lisboa.

Na Figura 150 apresenta-se a representação gráfica da percentagem de desconforto, para a categoria II e III pela Norma EN 15251 [28], de todas as localizações consideradas.

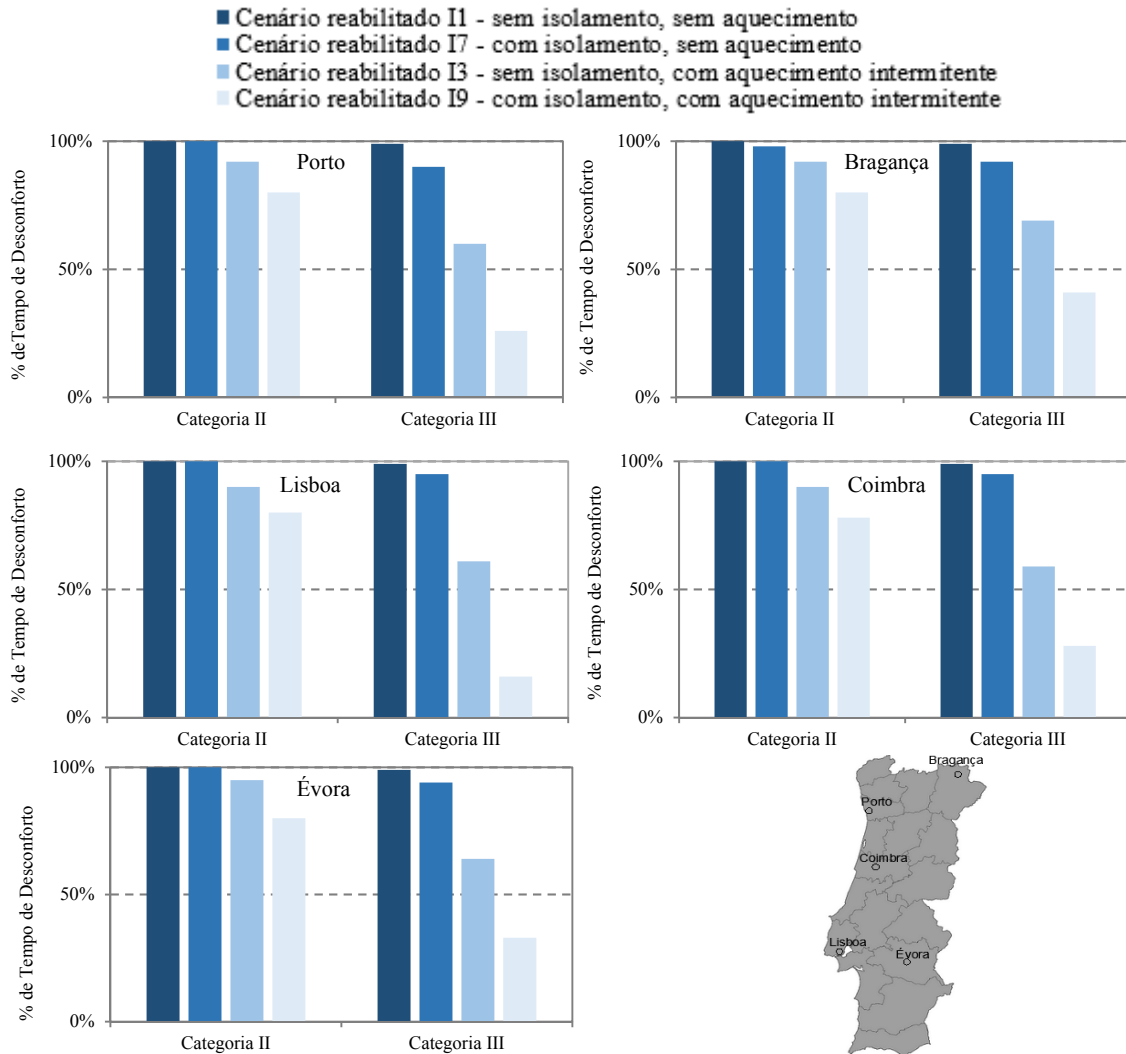


Fig. 150 – Representação gráfica da percentagem de tempo de desconforto, para o nível II e III da Norma EN 15251 [28], durante o Inverno, das cinco cidades estudadas.

Dos resultados pode concluir-se, de uma forma global, que:

- Na categoria de conforto II, indicada para edifícios reabilitados, o isolamento térmico de paredes de elevada espessura, possibilitou uma ligeira melhoria no nível de conforto para os cenários reabilitados com um regime de aquecimento intermitente, em todas as localidades. Nos cenários reabilitados sem aquecimento, esta melhoria só se verificou em Bragança, porém, sem expressão;
- Na categoria de conforto III, indicada para edifícios existentes, o isolamento térmico de paredes de elevada espessura, proporcionou um nível de desconforto menor para todas as localidades. No entanto, nos cenários reabilitados sem aquecimento, as diferenças são mínimas. Nos cenários com um regime de aquecimento intermitente, as diferenças são mais elevadas, sendo que, com exceção de Lisboa, em que o nível de desconforto está próximo de um nível mínimo admissível, a percentagem de desconforto continua a ser inaceitável.

5.3.6. TEMPERATURA DO AR INTERIOR – ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

Apresentam-se, no presente subcapítulo, os resultados para a temperatura do ar interior, da estação de arrefecimento, das localizações de Porto e Bragança, remetendo para o anexo VIII os resultados das localizações de Lisboa, Coimbra e Évora.

Tal como para a estação de aquecimento, a temperatura do ar interior da estação de arrefecimento, é a média da temperatura do ar interior das zonas de simulação térmica. Apresentam-se as temperaturas horárias do ar interior registadas ao longo dos meses da estação de arrefecimento e a sua probabilidade acumulada para as cinco cidades em estudo. Refere-se que as temperaturas, de cada zona térmica simulada, não apresentaram grandes diferenças entre si. Ao longo do processo de simulação constatou-se que os resultados, na estação de arrefecimento, entre os cenários de reabilitação com aquecimento (intermitente e contínuo) e sem aquecimento, mas com o mesmo nível de ventilação noturna, diferiam de forma diminuta. De forma a simplificar a análise dos resultados das simulações, apresenta-se a temperatura do ar interior dos cenários de reabilitação V1, V4, V7 e V10, para a estação de arrefecimento.

5.3.6.1. Porto

Na Figura 151 apresentam-se os resultados da variação da temperatura do ar interior para o Porto, durante o período de arrefecimento, com duração de 4 meses (2928 horas).

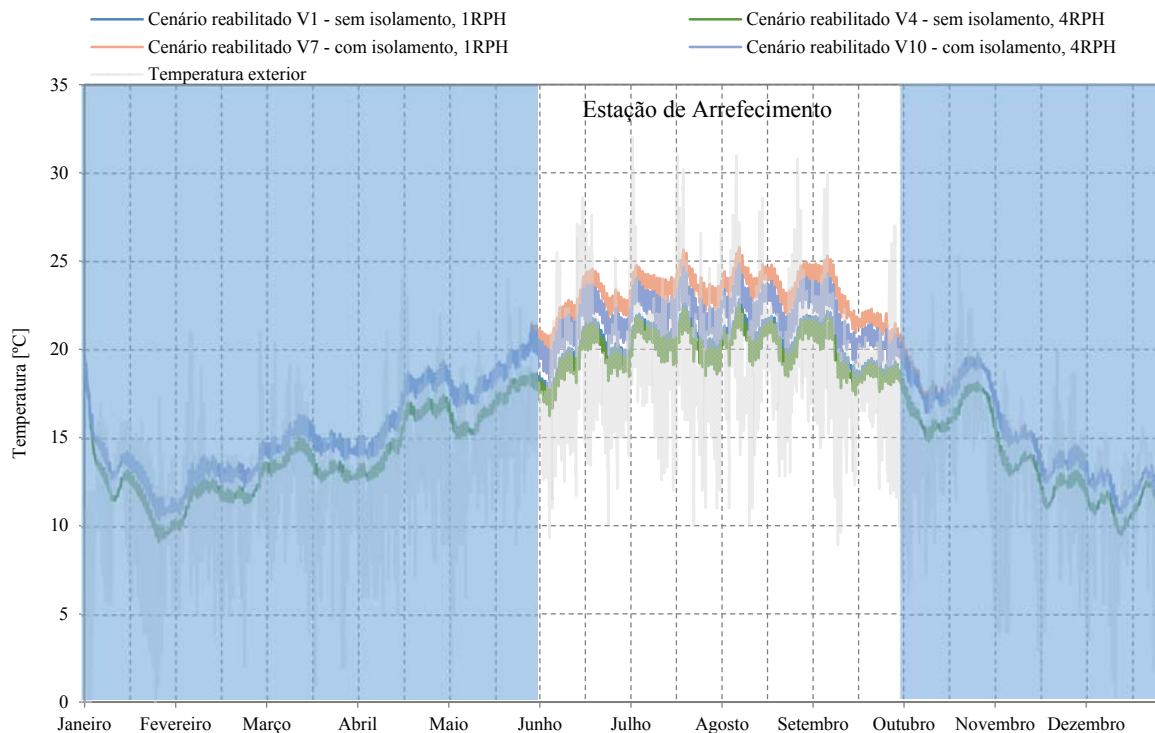


Fig.151 – Temperatura do ar interior dos cenários reabilitados, para a estação de arrefecimento, para a cidade do Porto.

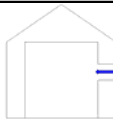
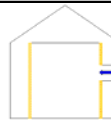


A análise dos resultados obtidos por simulação permite concluir de forma global o seguinte:

- O facto de isolar, na estação de arrefecimento, produz alterações na temperatura do ar interior, conduzindo a um aumento da mesma;
- O cenário reabilitado com isolamento e 1 RPH, V7, possui a temperatura do ar interior mais elevada, possuindo alguns períodos de sobreaquecimento (temperatura do ar interior acima dos 25°C);
- O cenário reabilitado sem isolamento e 4 RPH, V4, possui a temperatura do ar interior mais baixa, nunca se verificando o fenómeno de sobreaquecimento.

No Quadro 48, mostram-se os resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, destacando-se o seguinte:

- A não colocação de isolamento, nos cenários com 1 RPH, faz reduzir a temperatura média do ar interior em 2,71°C e em 2,03°C nos cenários com 4 RPH;
- Para a cidade do Porto, um cenário com um caudal de ventilação noturna de 1 RPH, sem isolamento, possui o nível de conforto ideal na estação de arrefecimento. Com a colocação de isolamento térmico na caixa-de-ar das paredes, deverá assegurar-se um caudal de ventilação noturna de 4 RPH;
- Não isolar as paredes com 1 RPH, durante a noite, proporciona um tempo de sobreaquecimento de 8%. Por sua vez, não isolar, com uma taxa de renovação noturna de 4 RPH, leva à eliminação dos períodos de sobreaquecimento na sua totalidade.

Quadro 48 – Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados da cidade do Porto.

Cenários reabilitados				
				
	V1	V7	V4	V10
% Tempo > 25°C	0%	8% (234h)	0%	1% (29h)
Média [°C]	20,37	23,08	19,91	21,94
Quartil 25 [°C]	19,53	22,20	18,98	20,96
Quartil 50 [°C]	20,59	23,32	20,04	22,05
Quartil 75 [°C]	21,30	24,01	20,90	22,90
Percentil 95% [°C]	21,89	24,74	21,55	23,78
Percentil 98% [°C]	22,18	25,05	21,85	24,04
Percentil 99% [°C]	22,43	25,28	22,03	24,26

A Figura 152 ilustra a comparação das probabilidades acumuladas da temperatura do ar interior dos cenários reabilitados apresentados no Quadro 48.

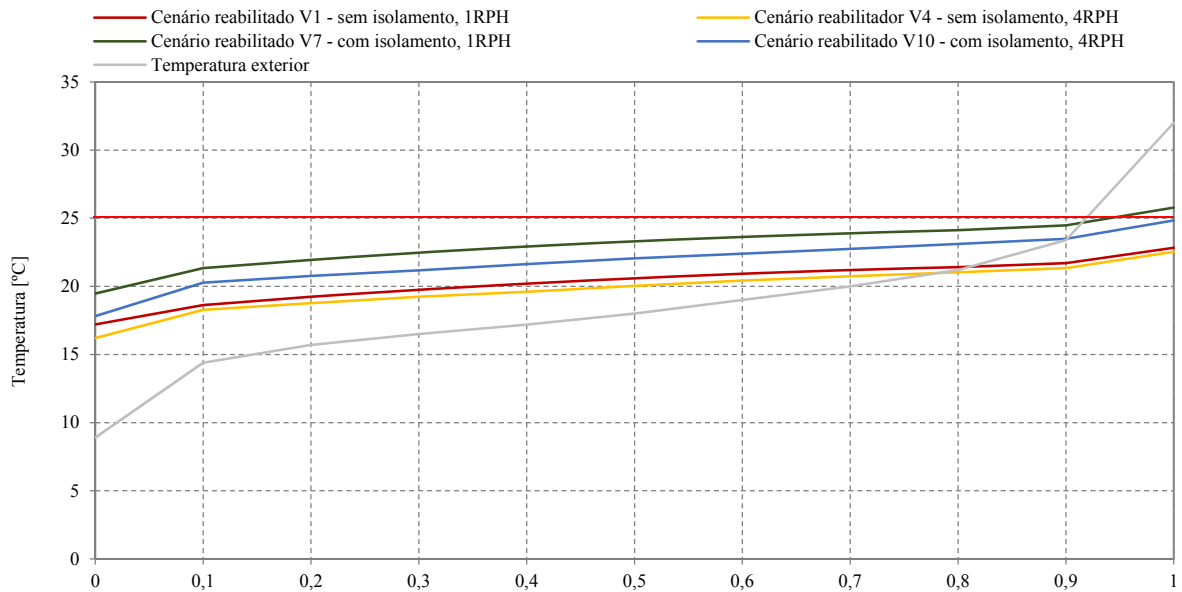


Fig.152 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade do Porto.

As curvas de probabilidade acumulada demonstram o referido anteriormente, os cenários reabilitados sem isolamento registam, de forma bem evidente, uma temperatura do ar interior mais baixa do que a dos cenários reabilitados com isolamento. Verifica-se igualmente, que para a cidade do Porto, o sobreaquecimento não é um problema. Só no cenário reabilitado V7, com isolamento e um caudal de ventilação noturna de 1 RPH, se verifica uma percentagem de tempo de desconforto elevada (8%), nos restantes cenários o sobreaquecimento é inexistente ou considerado admissível (1% no cenário V10).

O valor da temperatura do ar interior máxima (T_{max}) para a cidade do Porto apresenta-se no Quadro 49.

Quadro 49 – Temperatura do ar interior máxima, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados da cidade do Porto.

Cenários reabilitados				
	V1		V7	
	V4		V10	
T_{max} [°C]	22,84	25,79	22,54	24,84

Dos resultados do Quadro 49 destaca-se: a diferença entre os cenários com um caudal de ventilação noturna de 1RPH, V7 (com isolamento) e V1 (sem isolamento), é de 2,95°C, e entre os cenários com um caudal de ventilação noturna de 4RPH, V10 (sem isolamento) e V4 (com isolamento), é de 2,30°C. As diferenças verificadas demonstram que o isolamento das paredes de elevada espessura produz um aumento da temperatura do ar interior, porém, para o Porto, os efeitos no conforto térmico são praticamente nulos porque a temperatura do ar interior quase não excede os 25°C.

Os resultados demonstram que, para a cidade do Porto durante a estação de arrefecimento, a temperatura do ar interior, nos cenários reabilitados com isolamento na caixa-de-ar das paredes, é superior à dos

cenários reabilitados sem isolamento térmico. No entanto, o nível de conforto térmico nos cenários com isolamento só é preocupante para o cenário V7, com 1 RPH.

5.3.6.2. Bragança

Na Figura 153 apresentam-se os resultados da variação da temperatura do ar interior para Bragança, durante o período de arrefecimento, com duração de 4 meses (2928 horas).

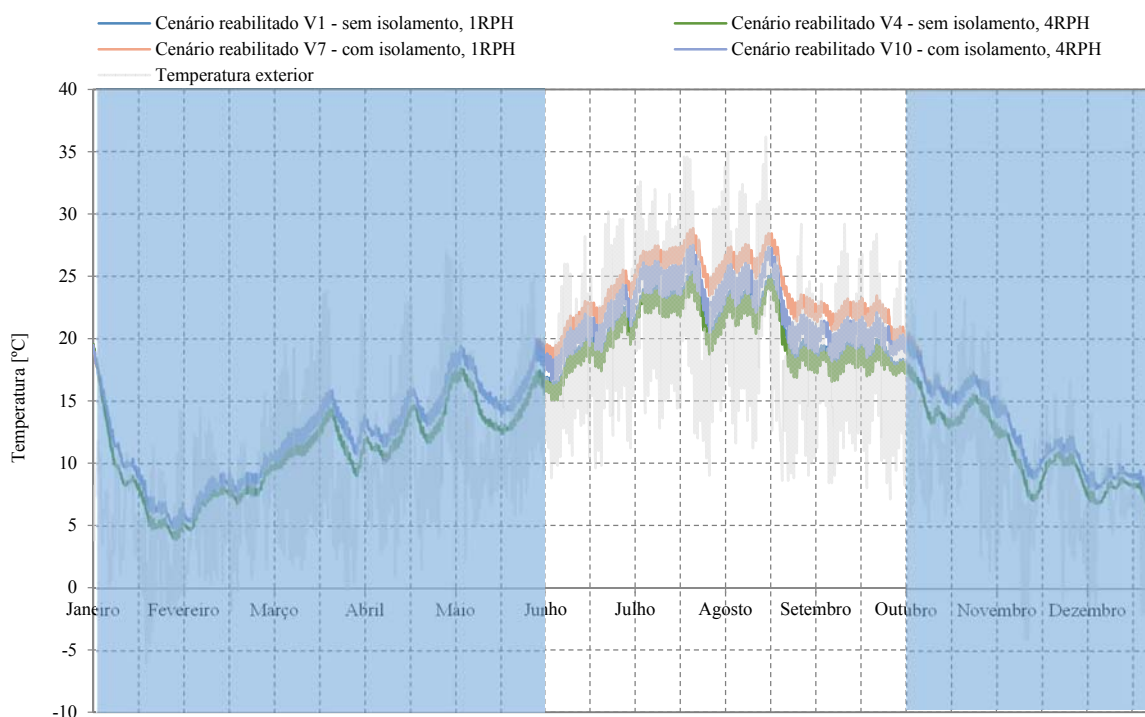


Fig.153 – Temperatura do ar interior dos cenários reabilitados, para a estação de arrefecimento, para a cidade de Bragança.

A análise dos resultados obtidos por simulação permite constatar, de forma global, o seguinte:

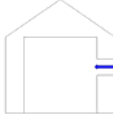

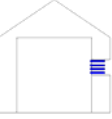

- O facto de se isolar, na estação de arrefecimento, produz alterações na temperatura do ar interior, havendo, tal como para o Porto, um aumento da mesma;
- O cenário reabilitado com isolamento e 1 RPH, V7, possui a temperatura do ar interior mais elevada, sendo recorrente o fenómeno de sobreaquecimento (temperatura do ar interior acima dos 25°C);
- O cenário reabilitado sem isolamento e 4 RPH, V4, regista a temperatura do ar interior mais baixa, verificando-se a existência de períodos de sobreaquecimento de forma pontual.

No Quadro 50 apresentam-se os resultados estatísticos da temperatura do ar interior na estação de arrefecimento, destacando-se o seguinte:

- A não colocação de isolamento, nos cenários com 1 RPH, faz reduzir a temperatura média do ar interior em 3,82°C e em 2,13°C nos cenários com 4 RPH;
- Para a cidade de Bragança os cenários reabilitados com isolamento, tanto com 1 RPH como com 4 RPH, no período noturno, possuem uma percentagem de tempo de desconforto elevada, 40% e 20%, respetivamente, refletindo os efeitos negativos do isolamento na estação de arrefecimento;

- Não isolar com 1 RPH proporciona, durante a noite, uma redução de 35%, na percentagem de tempo de desconforto, em relação ao cenário reabilitado com isolamento e 1 RPH. Por sua vez, não isolar com 4 RPH, durante a noite, proporciona uma redução de 18%, na percentagem de tempo de desconforto, em relação ao cenário reabilitado com isolamento e 4 RPH.

Quadro 50 – Resultados estatísticos da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.

Cenários reabilitados				
	 		 	
	V1	V7	V4	V10
Tempo > 25°C	5% (146h)	40% (1171h)	2% (59h)	20% (586h)
Média [°C]	20,82	23,84	20,16	22,29
Quartil 25 [°C]	18,98	21,97	18,28	20,38
Quartil 50 [°C]	20,34	23,43	19,57	21,71
Quartil 75 [°C]	23,19	26,27	22,38	24,51
Percentil 95% [°C]	24,41	27,61	23,85	26,13
Percentil 98% [°C]	24,92	28,14	24,49	26,87
Percentil 99% [°C]	25,10	28,36	24,69	27,14

A Figura 154 ilustra a comparação das probabilidades acumuladas da temperatura do ar interior dos cenários reabilitados apresentados no Quadro 50.

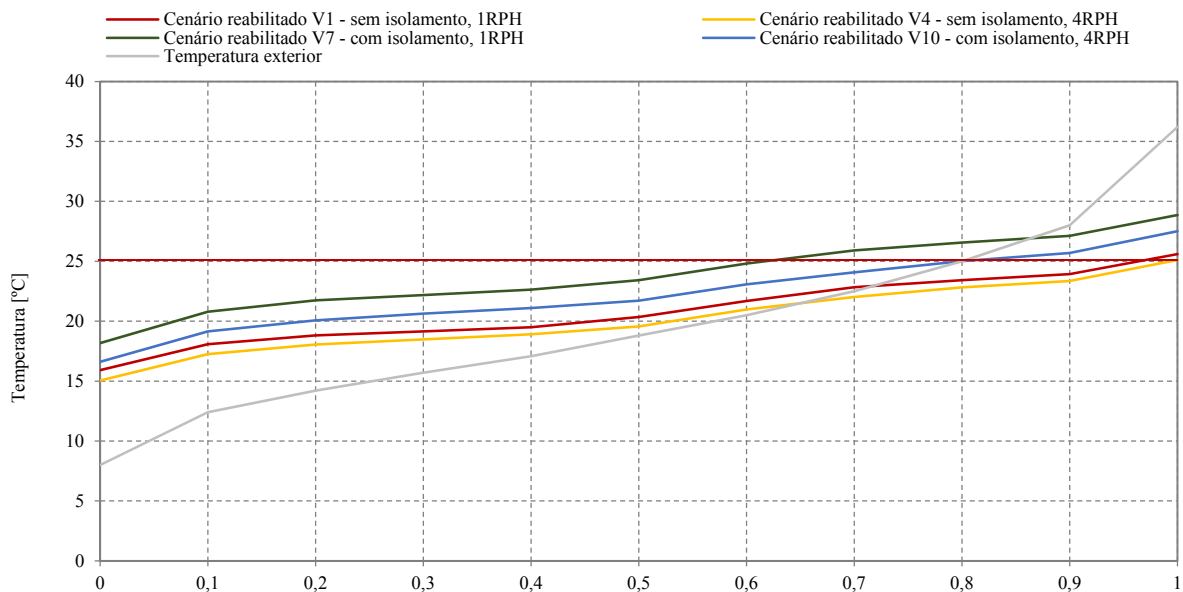


Fig.154 – Probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.

As curvas de probabilidade acumulada confirmam os dados extraídos do Quadro 50, os cenários reabilitados sem isolamento registam, de forma bem evidente, uma temperatura do ar interior mais baixa que os cenários reabilitados com isolamento. O tempo que estes cenários reabilitados estão em desconforto é perfeitamente admissível. O cenário V7, com isolamento e 1 RPH, apresenta um nível de desconforto mais elevado. Ao contrário do Porto, onde um incremento da ventilação noturna quase que eliminava o sobreaquecimento, para Bragança, isto não se verifica, com o cenário reabilitado V10, com isolamento e 4 RPH, a apresentar uma percentagem elevada (20%) de tempo de sobreaquecimento

O valor da temperatura do ar interior máxima (T_{max}) para a cidade de Bragança apresenta-se no Quadro 51.

Quadro 51 – Temperatura do ar interior máxima, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade de Bragança.

Cenários reabilitados				
	V1	V7	V4	V10
T_{max} [°C]	25,60	28,86	25,11	27,51

Dos resultados do Quadro 51 destaca-se: a diferença entre os cenários com um caudal de ventilação noturna de 1 RPH, V7 (com isolamento) e V1 (sem isolamento), é de 3,26°C e de 2,40°C entre os cenários com um caudal de ventilação de 4 RPH, V10 (com isolamento) e V4 (sem isolamento). É notória a influência negativa da colocação do isolamento na caixa-de-ar das paredes nas temperaturas máximas atingidas nos cenários reabilitados com isolamento, sendo muito superiores às dos cenários reabilitados sem isolamento.

Os resultados demonstram que, para a cidade de Bragança, o isolamento das paredes de elevada espessura conduz a um aumento da temperatura do ar interior que leva a períodos elevados de desconforto, 40% de tempo de sobreaquecimento para o cenário V7 (1 RPH) e 20% para o cenário V10 (4 RPH). A ventilação noturna minora o problema mas não o resolve na totalidade.

5.3.6.3. Influência da Localização no Território Nacional na Temperatura do Ar Interior da Estação de Arrefecimento

Estabeleceu-se uma análise comparativa do desempenho térmico da estação de arrefecimento, entre os cenários de reabilitação simulados, para as 5 localizações geográficas do território nacional consideradas. Para tal, compararam-se os valores dos seguintes indicadores de desconforto: percentagem de tempo de desconforto (percentagem de tempo em que a temperatura do ar interior está acima dos 25°C), temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%.

Na Figura 155 apresentam-se os valores da percentagem de desconforto térmico na estação de arrefecimento, para as cinco localizações do território nacional (Porto, Bragança, Lisboa, Coimbra e Évora), nos cenários reabilitados V1, V4, V7 e V10.

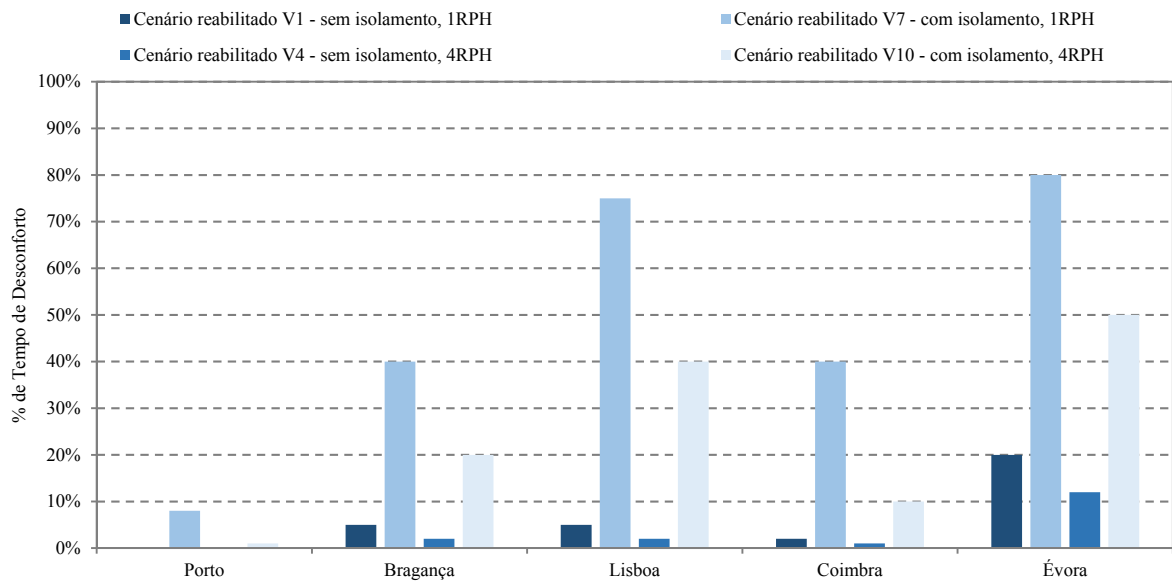


Fig.155 – Percentagem de tempo de desconforto dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 155 verifica-se que:

- A percentagem de tempo de desconforto na estação de arrefecimento é, em todas as localizações, mais elevada para o cenário reabilitado V7 (com isolamento térmico e com 1 RPH), sendo a cidade de Évora, com um valor de 80%, o cenário mais gravoso. A cidade do Porto, com 8%, é o cenário menos gravoso;
- O cenário reabilitado V4, sem isolamento e com 4 RPH, é para todas as localidades, o que apresenta uma percentagem de tempo de desconforto mais baixa. Évora com 12% é o pior resultado e o Porto com 0%, o melhor;
- O isolamento das paredes de elevada espessura, faz com que a diferença de percentagem de tempo de desconforto entre cenários reabilitados, com e sem isolamento, seja considerável. Esta diferença, entre os cenários reabilitados com 1 RPH, V7 (com isolamento) e V1 (sem isolamento), é máxima para Lisboa, com uma diferença de 70%, e mínima para o Porto, com uma diferença de 8%. Entre os cenários reabilitados com 4 RPH, V10 (com isolamento) e V4 (sem isolamento), a diferença, é máxima em Lisboa e Évora, com um valor de 38%, e mínima no Porto, sendo de apenas 1%.

Na Figura 156 apresenta-se a temperatura média do ar interior, na estação de aquecimento, para todas as localizações estudadas.

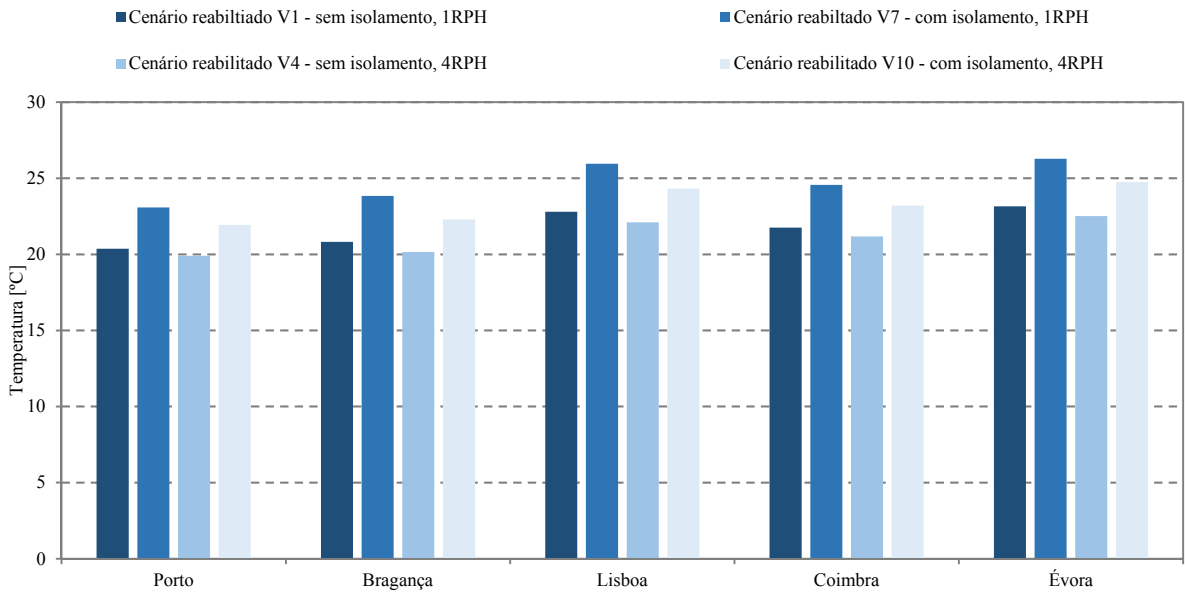


Fig.156 – Temperatura média do ar interior dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 156 verifica-se que:

- O cenário reabilitado V7, com isolamento térmico e 1 RPH, apresenta, para todas as localizações, a temperatura média do ar interior mais elevada, tendo em Évora o seu valor máximo, 26,28°C, e no Porto o seu valor mínimo, 23,08°C. Este mesmo cenário apresenta, para Lisboa uma temperatura média do ar interior acima dos 25°C;
- O cenário reabilitado V4, sem isolamento e com 4 RPH, apresenta, para todas as localizações, a temperatura média do ar interior mais baixa, tendo em Évora o seu valor máximo, 22,52°C, e no Porto o seu valor mínimo 19,91°C;
- A diferença entre os cenários reabilitados, com isolamento e sem isolamento, é mais elevada, nas simulações com 1 RPH, sendo máxima em Lisboa, 3,15°C, e mínima no Porto, 2,71°C;
- Entre os cenários reabilitados com 4 RPH, a diferença, entre cenários reabilitados com isolamento e sem isolamento, é máxima em Évora, 2,23°C, e mínima no Porto e Coimbra, 2,03°C.

Na Figura 157 apresenta-se a temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%, $T_{95\%}$, para a estação de arrefecimento, de cada localização estudada.

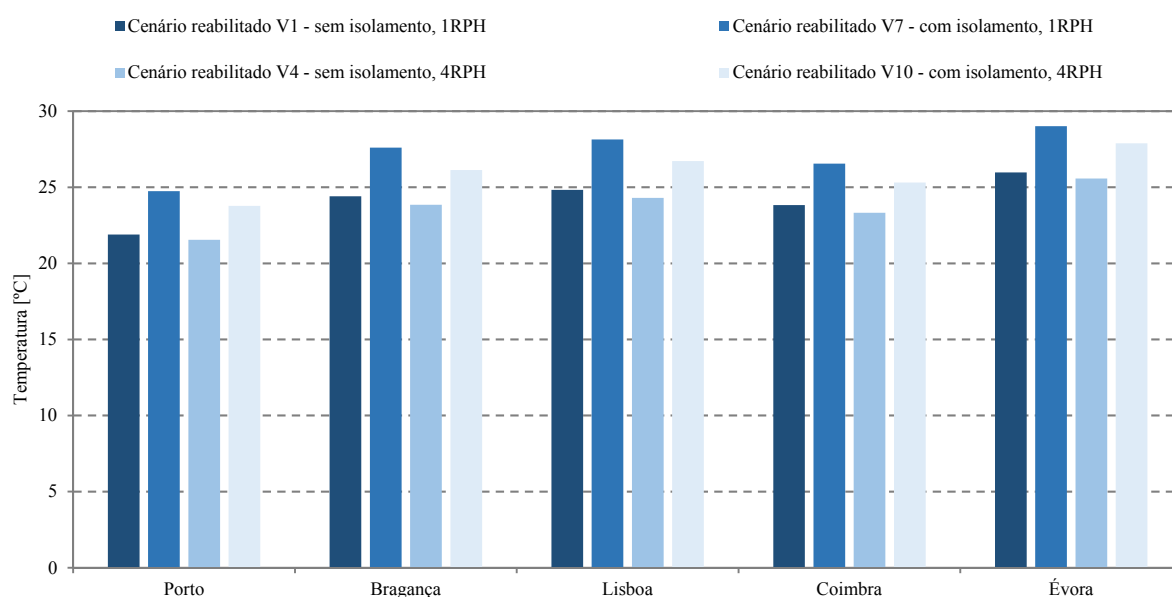


Fig.157 – Temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%, $T_{95\%}$, dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 157 verifica-se que:

- O cenário reabilitado V7, com isolamento e 1 RPH, apresenta, para todas as localizações, a $T_{95\%}$ mais elevada, tendo em Évora o seu valor máximo, 29,01°C, e no Porto o seu valor mínimo, 24,74°C;
- O cenário reabilitado V4, sem isolamento e com 4 RPH, apresenta, para todas as localizações, a $T_{95\%}$ mais baixa, tendo em Évora o seu valor máximo, 25,57°C, e no Porto o seu valor mínimo 21,55°C;
- A diferença entre os cenários reabilitados, com isolamento e sem isolamento, é, nas simulações com 1 RPH, máxima em Lisboa, 3,31°C, e mínima em Coimbra, 2,72°C;
- Nos cenários reabilitados com 4 RPH, a diferença, entre cenários com isolamento e sem isolamento, é máxima em Évora, 2,32°C, e mínima em Coimbra, 1,99°C.

Na Figura 158 apresenta-se a representação gráfica dos parâmetros analisados – percentagem de tempo de desconforto no Verão, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%.



Fig.158 – Representação gráfica dos parâmetros analisados – percentagem de tempo de desconforto, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%, para as cinco cidades estudadas.

Dos resultados pode concluir-se, de uma forma global, que:

- O isolamento térmico de paredes de elevada espessura, na caixa-de-ar, na estação de arrefecimento, proporciona temperaturas mais elevadas. Este facto verifica-se em todas as localidades estudadas, e apenas para o Porto, os efeitos são menos nefastos, como comprovam as diferenças entre as temperaturas médias e $T_{95\%}$ dos cenários reabilitados de todas as localizações;
- Para Évora e Lisboa, um cenário de reabilitação com isolamento e com uma ventilação noturna baixa, 1 RPH, é inaceitável, por se verificarem temperaturas acima dos 25°C, em 75% e 80% do tempo, respetivamente, fazendo com que a temperatura média do ar interior esteja acima dos 25°C. Para as restantes localidades, este cenário de reabilitação possui um desempenho térmico melhor. No entanto, continua a ser inadmissível a percentagem de tempo de desconforto;
- A cidade do Porto é a única que tem, para os cenários com isolamento (cenário reabilitado V10), uma percentagem de tempo de desconforto aceitável.

5.3.7. TEMPERATURA DO AR INTERIOR – EFEITO DA VENTILAÇÃO NOTURNA

Verificar o nível de eficácia da ventilação, noturna durante a estação de arrefecimento, é um dos objetivos deste trabalho. Para o conseguir, parametrizou-se este fator. Considerando-se um cenário reabilitado com um caudal de 1 RPH e outro com 4 RPH, para o período entre as 00 e 09 Horas, durante a estação de arrefecimento, como se referiu na definição dos cenários do Quadro 39.

Através dos gráficos de probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, comparam-se os resultados, entre as simulações, para o edifício-tipo com diferentes níveis de ventilação.

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados para cidades do Porto e Bragança, sendo que no anexo IX apresentam-se os resultados de Lisboa, Coimbra e Évora.

5.3.7.1. Porto

Na Figura 159 apresentam-se os resultados da variação da temperatura do ar interior para o Porto, durante o período de arrefecimento, com uma duração de 4 meses (2928 horas).

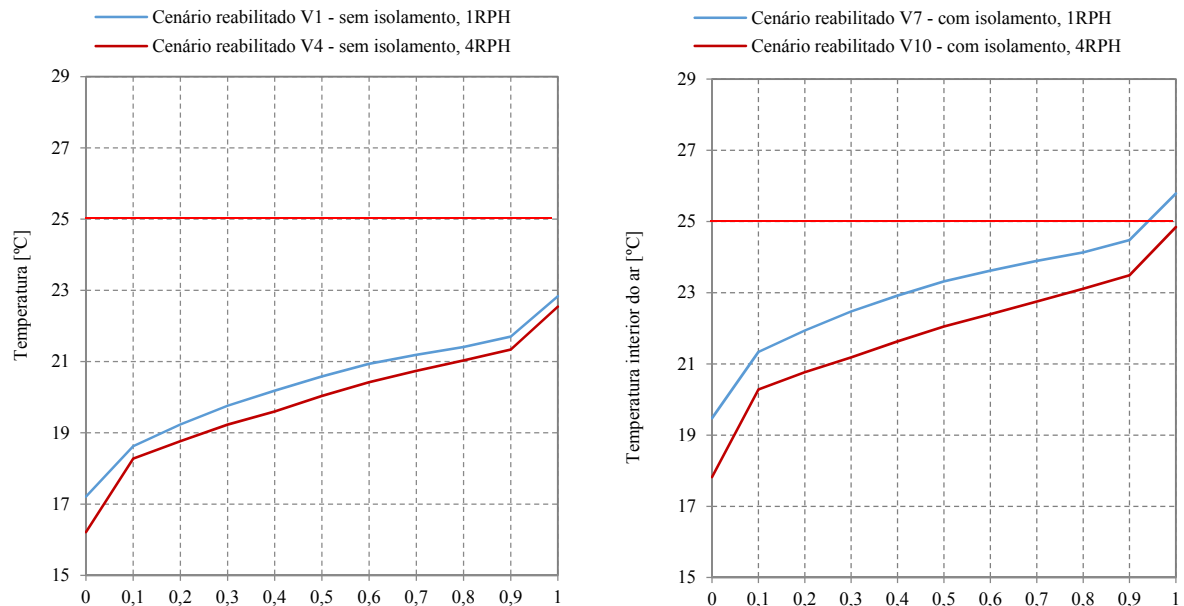


Fig.159 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados com 1RPH e 4RPH, para a cidade do Porto.

Da análise dos valores de temperatura do ar interior verifica-se que:

- Através da ventilação noturna, no caso dos cenários com isolamento, consegue-se a eliminação da percentagem de tempo de desconforto quase na totalidade, passando de 8% para 1%. Os cenários reabilitados sem isolamento, não apresentam qualquer problema de sobreaquecimento;
- O incremento da ventilação noturna tem mais influência nos cenários reabilitados com isolamento térmico. A diferença média da temperatura do ar interior nos diversos percentis é de 0,5°C, entre os cenários sem isolamento, V1 (1 RPH) e V4 (4 RPH), e de 1,19°C, entre os cenários com isolamento, V7 (1 RPH) e V10 (4 RPH);
- O cenário reabilitado V1, sem isolamento térmico na caixa-de-ar e com 1 RPH, possui uma temperatura do ar interior máxima de 22,84°C e o cenário reabilitado V4, sem isolamento

com 4 RPH, de 22,64°C, conduzindo a uma diferença de 0,2°C. Nos cenários reabilitados com isolamento, a temperatura máxima do ar interior do cenário V7 (1 RPH) é de 25,79°C, e a do cenário V10 (4 RPH) de 24,84°C, sendo a diferença entre os dois cenários de 0,95°C.

Dos resultados conclui-se que, para a região do Porto, durante a estação de arrefecimento: o uso da ventilação noturna fez com que as temperaturas conducentes a situações de sobreaquecimento fossem eliminadas na totalidade; o uso de um nível de ventilação elevado, 4 RPH, apenas se adequa a edifícios com isolamento na caixa-de-ar, nos edifícios sem isolamento não introduz vantagens, pois o nível de conforto, com 1 RPH, revelou-se suficiente e adequado.

5.3.7.2. Bragança

Na Figura 160 apresentam-se os resultados da variação da temperatura do ar interior para Bragança, durante o período de arrefecimento, 4 meses (2928 horas).

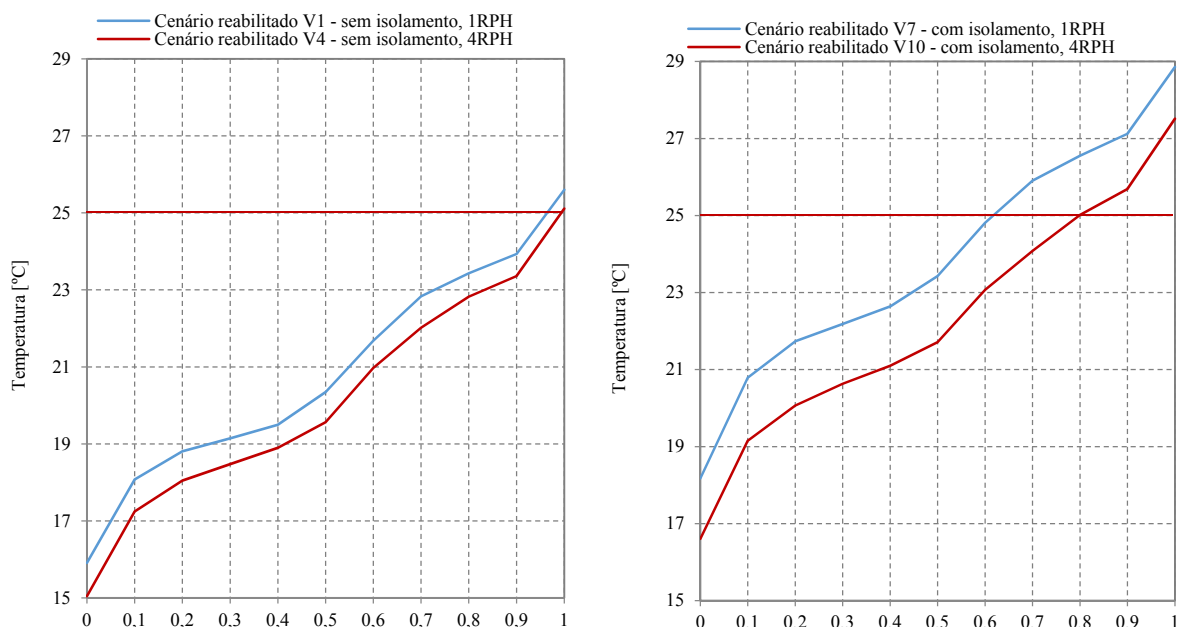


Fig.160 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados com 1RPH e 4RPH, para a cidade de Bragança.

Da análise dos valores de temperatura do ar interior verifica-se que:

- Através da ventilação noturna consegue-se a eliminação dos instantes de sobreaquecimento, quase na totalidade, nos cenários de reabilitação sem isolamento, e uma diminuição considerável nos cenários com isolamento. Passando, no caso dos cenários reabilitados com isolamento, de uma percentagem de tempo de desconforto de 40% para uma de 20% e nos cenários sem isolamento de 5% para 2%;
- O incremento da ventilação noturna tem mais influência nos cenários reabilitados com isolamento térmico. Este facto é refletido pelas diferenças de temperatura do ar interior dos respetivos percentis, sendo que a diferença média é de 0,7°C, entre os cenários sem isolamento térmico, V1 (1 RPH) e V4 (4 RPH), e de 1,6°C, entre os cenários com isolamento térmico, V7 (1 RPH) e V10 (4 RPH);
- O cenário reabilitado V1, sem isolamento e 1 RPH, possui uma temperatura máxima do ar interior de 25,6°C e o cenário reabilitado V4, sem isolamento e 4 RPH, de 25,11°C,

conduzindo a uma diferença de 0,49°C. Nos cenários reabilitados com isolamento, a temperatura máxima do ar interior do cenário V7 (1 RPH) é de 28,86°C e a do cenário V10 (4RPH) de 27,51°C, sendo a diferença entre os dois cenários de 1,35°C.

Dos resultados conclui-se que, para Bragança, durante a estação de arrefecimento: o uso da ventilação noturna proporciona a redução do tempo de percentagem de desconforto, quase na totalidade, para os cenários reabilitados sem isolamento térmico e em 40% nos cenários reabilitados com isolamento; o isolamento na caixa-de-ar das paredes de elevada espessura e massa, em Bragança, na estação de arrefecimento, é prejudicial para o conforto, o desconforto térmico existe mesmo com um nível de ventilação noturna elevado (4RPH).

5.3.7.3. Influência da Localização no Território Nacional na Temperatura do Ar Interior na Estação de Arrefecimento – Efeito da Ventilação Noturna

Estabeleceu-se uma análise comparativa do desempenho térmico da estação de arrefecimento entre os cenários de reabilitação simulados, para as 5 localizações geográficas do território nacional consideradas. Para tal, compararam-se os valores dos seguintes indicadores de desconforto: percentagem de tempo de desconforto (percentagem de tempo em que a temperatura do ar interior está acima dos 25°C); temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%.

Na Figura 161 apresentam-se os valores da percentagem de tempo de desconforto na estação de arrefecimento, para as cinco localizações do território nacional (Porto, Bragança, Lisboa, Coimbra e Évora), nos cenários reabilitados V1, V4, V7 e V10.

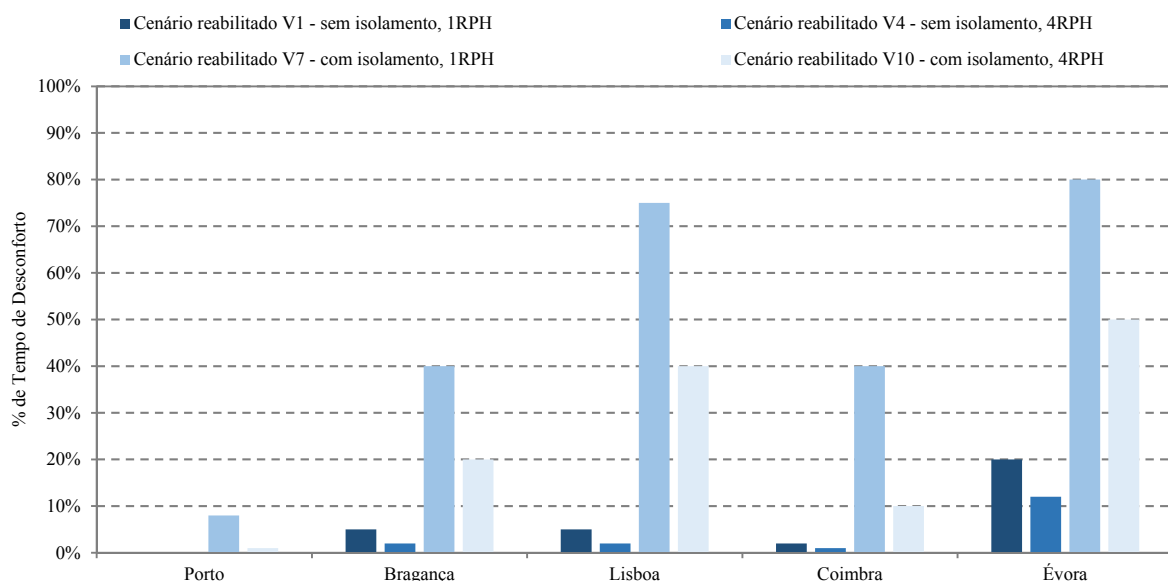


Fig.161 – Percentagem de tempo de desconforto dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 161 verifica-se que:

- A ventilação noturna faz com que a diferença de percentagem de tempo de desconforto entre cenários reabilitados, com 1 RPH e 4 RPH, seja considerável nos cenários com isolamento na caixa-de-ar. Nos cenários sem isolamento, para todas as localidades, a diferença verifica-se, mas sem significativa expressão;

- A diferença entre os cenários sem isolamento, V1 (1 RPH) e V4 (4 RPH), é máxima para Évora, com uma diferença de 8%, e mínima para o Porto, com uma diferença nula. Entre os cenários com isolamento, V7 (1 RPH) e V10 (4 RPH), a diferença é máxima para Lisboa, com um valor de 35%, e mínima no Porto, com um valor de 7%.

Na Figura 162 apresenta-se a temperatura média do ar interior na estação de aquecimento para as localidades estudadas.

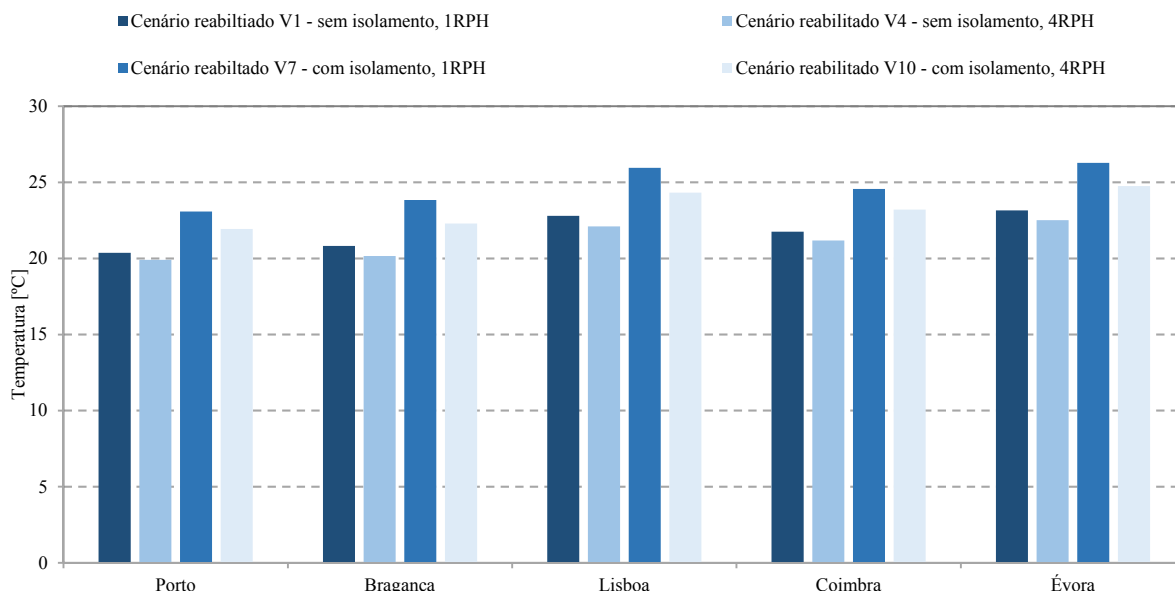


Fig.162 – Temperatura média do ar interior dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 162 constata-se que:

- A temperatura média do ar interior dos cenários reabilitados, com e sem isolamento, com 1 RPH é, em todas as localidades, superior à dos cenários reabilitados com 4 RPH;
- A diferença entre os cenários reabilitados, com 1 RPH e 4 RPH, sem isolamento, é máxima para a cidade de Lisboa, com um valor de 0,7°C, e mínima para o Porto, com um valor de 0,46°C. Para os cenários com isolamento, a diferença entre os cenários que têm 1 RPH com os que têm 4 RPH, é máxima para Lisboa, 1,63°C, e mínima para o Porto, 1,14°C.

Na Figura 163 apresenta-se a temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%, $T_{95\%}$, para a estação de arrefecimento, de cada localização estudada.

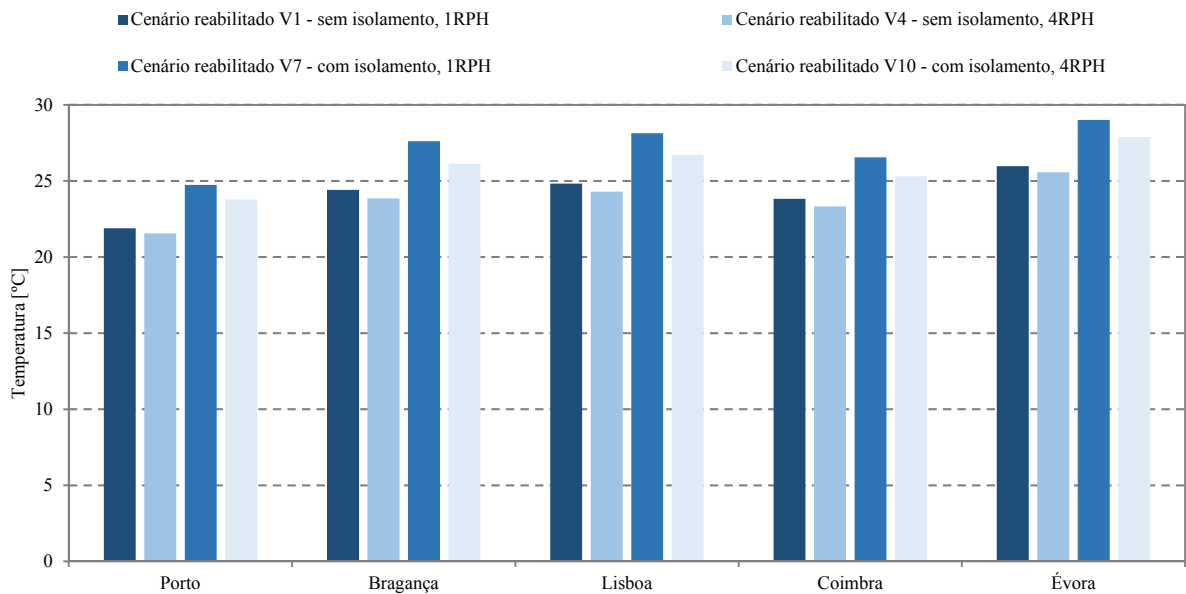


Fig.163 – Temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95% dos cenários reabilitados, na estação de arrefecimento, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 163 verifica-se que:

- Os cenários reabilitados com 1 RPH, com ou sem isolamento, apresentam, para todas as localizações, a $T_{95\%}$ mais elevada;
- Nos cenários sem isolamento, V1 (1 RPH) e V4 (4 RPH), a diferença entre as suas $T_{95\%}$, é máxima para a cidade de Bragança, com um valor de 0,56°C, e mínima para a cidade do Porto, com um valor de 0,34°C. Para os cenários com isolamento, V7 (1 RPH) e V10 (4 RPH), a diferença entre as suas $T_{95\%}$, é máxima para a cidade de Lisboa, sendo de 1,42°C, e mínima para a cidade do Porto, com um valor de 0,96°C.

Na Figura 164 apresenta-se a representação gráfica dos parâmetros analisados – percentagem de tempo de desconforto no Verão, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%.

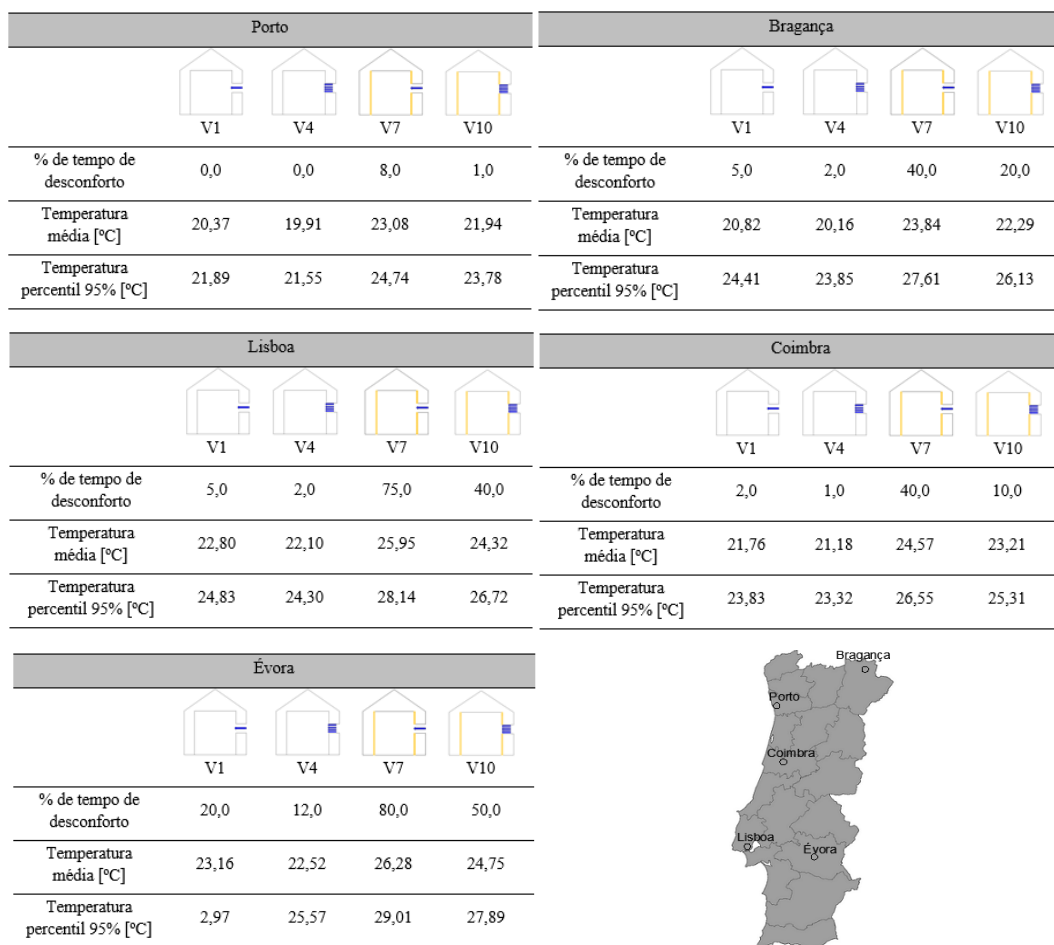


Fig.164 – Representação gráfica dos parâmetros analisados – Percentagem de tempo de desconforto, temperatura média do ar interior e temperatura do ar interior correspondente ao percentil 95%, para as cinco cidades estudadas.

Dos resultados pode concluir-se, de uma forma global, que:

- A ventilação noturna provou ser uma estratégia passiva de arrefecimento. A sua utilização proporciona uma diminuição das temperaturas interiores, em todas as localidades, e em todos os cenários reabilitados. A sua utilização proporciona uma diminuição da temperatura do ar interior, que, em termos de temperatura média do ar interior, nos cenários sem isolamento, varia entre 0,46°C e 0,7°C, e que, entre os cenários reabilitados com isolamento, varia entre 1,14°C e 1,63°C;
- A eficiência da ventilação noturna, em todas as localidades, tem mais evidência nos cenários reabilitados com isolamento na caixa-de-ar das paredes exteriores. Este aspeto é realçado, para além do fator referido no ponto anterior, pela diminuição da percentagem de tempo de desconforto resultante do incremento do caudal de ventilação nestes cenários. Esta diminuição é considerável, sendo máxima para Lisboa, com 35% e mínima para o Porto, com 7%. Évora e Coimbra apresentam uma redução de 30% e Bragança de 20%;
- Para a cidade do Porto, verifica-se não ser necessário um caudal de ventilação elevado, nos cenários de reabilitação sem isolamento.

5.3.8. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO – ÍNDICE DE DESCONFORTO TÉRMICO DE VERÃO (IDT – V)

Para a estação de arrefecimento elaborou-se uma avaliação do desconforto análoga à de Inverno, através do índice de desconforto térmico de Verão, IDT – V, que representa os graus-hora acima da temperatura de referência de conforto, 25°C. Sendo o método de cálculo idêntico ao explicado para a estação de aquecimento, subcapítulo 5.3.4., alterando-se o valor de referência, neste caso, para 25°C e contabilizando os graus acima deste valor. Tal como para a estação de aquecimento, calculou-se o Índice de Desconforto Térmico de Verão, IDT – V, do apartamento durante as 24 horas e do quarto principal durante o seu período de ocupação, durante a semana das 00 às 08 horas e fim-de-semanas das 00 às 10 horas.

Os resultados apresentados comparam os valores obtidos entre as simulações, sem e com isolamento térmico nas paredes, e com diferentes caudais de ventilação noturna, 1 RPH e 4 RPH.

Nas secções seguintes apresentam-se os resultados para o Porto e Bragança e no anexo X para Lisboa, Coimbra e Évora.

5.3.8.1. Porto

Na Figura 165 apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Verão (IDT – V), para o Porto, durante o período de arrefecimento, 4 meses (2928 horas).

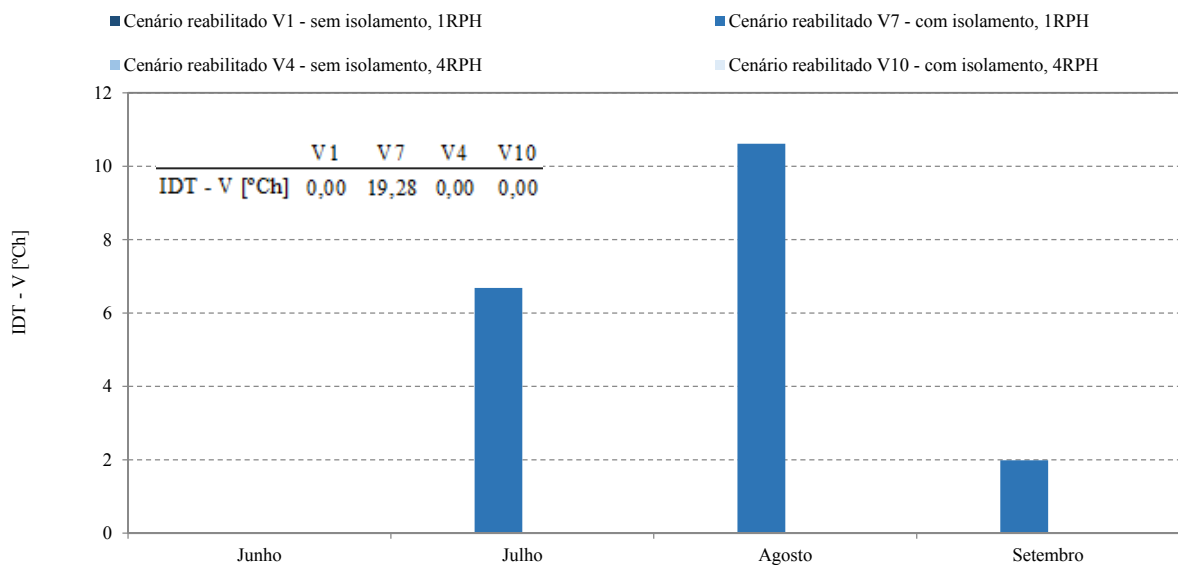


Fig.165 – Índice de Desconforto Térmico de Verão (IDT – V), por mês, para a cidade do Porto.

Dos resultados apresentados para o IDT – V, na Figura 165, destaca-se:

- A quantificação do IDT – V para a cidade do Porto mostrou que o sobreaquecimento só tem expressão no cenário reabilitado V7, que possui isolamento na caixa-de-ar e 1 RPH;
- O cenário reabilitado V7, com isolamento e 1 RPH, é o único cenário que apresenta valores para o IDT – V, tendo mais 19,28°Ch que o cenário V1, sem isolamento e com 1 RPH;
- De forma a verificar o efeito da ventilação, comparando o cenário reabilitado V7 com o V10, com isolamento e 4 RPH, constatou-se que o aumento do grau de ventilação, de 1 RPH para 4 RPH, anula o risco de sobreaquecimento.

Para o período de ocupação do quarto principal verificou-se um IDT – V nulo em todos os cenários reabilitados.

Os resultados observados mostram, que, para a cidade do Porto, os cenários reabilitados sem isolamento não têm problemas de conforto térmico no Verão, sendo desnecessário um caudal de ventilação noturna elevado para se garantir o conforto térmico. Para os cenários reabilitados com isolamento, a ventilação é essencial, de forma a eliminar o risco de sobreaquecimento, verificando-se que o IDT – V tem uma redução de 100% quando se implementa uma ventilação noturna de 4 RPH.

5.3.8.2. Bragança

Na Figura 166 apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Verão (IDT – V), de Bragança, durante o período de arrefecimento, com duração de 4 meses (2928 horas).

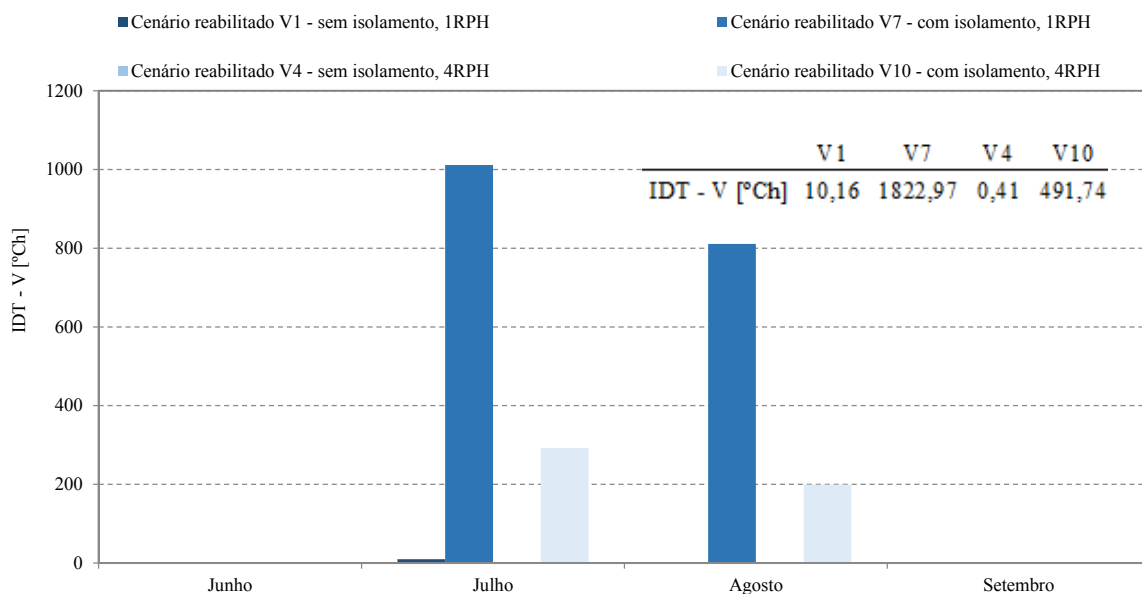


Fig.166 – Índice de Desconforto Térmico de Verão (IDT – V), por mês, para a cidade de Bragança.

Dos resultados apresentados para o IDT – V, na Figura 166, destaca-se:

- O cenário reabilitado V7 (1 RPH) e V10 (4 RPH), ambos com isolamento na caixa-de-ar, apresentam o IDT – V mais elevado. Os cenários sem isolamento, V1 (1 RPH) e V4 (4 RPH), possuem valores aceitáveis;
- Calculando a diferença entre os cenários com isolamento e sem isolamento, verifica-se que o cenário reabilitado V7, com isolamento e 1 RPH, apresenta mais 1812,81°Ch que o cenário reabilitado V1, sem isolamento e com 1 RPH. O cenário reabilitado V10, com isolamento e 4 RPH, apresenta mais 491,33°Ch que o cenário reabilitado V4, sem isolamento e com 4 RPH;
- Calculando a diferença entre os cenários com 1 RPH e 4 RPH, verifica-se que o cenário reabilitado V1 (1 RPH) apresenta mais 9,75°Ch que o cenário reabilitado V4 (4 RPH), ambos sem isolamento. O cenário reabilitado V7 (1 RPH) apresenta mais 1331,23°Ch que o cenário reabilitado V10 (4 RPH), estes cenários possuem isolamento térmico;
- A aplicação de um caudal de ventilação noturna de 4 RPH, faz com que haja uma diminuição do IDT – V de, aproximadamente, 96%, nos cenários sem isolamento e de, aproximadamente, 73% nos cenários com isolamento.

Para o período de ocupação do quarto principal o IDT – V dos cenários sem isolamento é nulo. Nos cenários com isolamento, apenas, no cenário reabilitado V7, com isolamento e 1 RPH, se verificou sobreaquecimento, com um IDT – I de 41,84°CCh. Estes resultados são demonstrativos do potencial da ventilação noturna.

Os resultados observados mostram, que, para Bragança na estação de arrefecimento, os cenários reabilitados sem isolamento proporcionam um desempenho térmico superior. Este facto reflete-se na diferença do IDT – V, constatando-se diferenças importantes, entre os cenários reabilitados com e sem isolamento e com 1 RPH, sendo de 1813°CCh. A diferença para os cenários com e sem isolamento e com 4 RPH, em Bragança, ao contrário do Porto, é significativa, sendo de 491°CCh, ficando patente a necessidade de arrefecimento nos cenários com isolamento. O efeito da ventilação noturna, para os cenários reabilitados sem isolamento, é eficaz, eliminando, praticamente, na sua totalidade o risco de sobreaquecimento. Nos cenários reabilitados com isolamento, a ventilação noturna produz uma diminuição do índice IDT – V de 1331°CCh. É importante realçar que, para o período de ocupação do quarto, a eliminação do risco de sobreaquecimento é 100% eficaz obtendo-se um IDT – V de 0°CCh, situação ideal.

5.3.8.3. Influência da Localização no Território Nacional no Índice de Desconforto Térmico de Verão – IDT – V

Efetuuou-se uma análise comparativa do Índice de Desconforto Térmico de Verão, entre os cenários de reabilitação simulados, para as 5 localizações geográficas do território nacional estudadas.

Na Figura 167 apresentam-se os valores do índice IDT – V para as cinco localizações do território nacional (Porto, Bragança, Lisboa, Coimbra e Évora), nos cenários reabilitados V1, V4, V7 e V10.

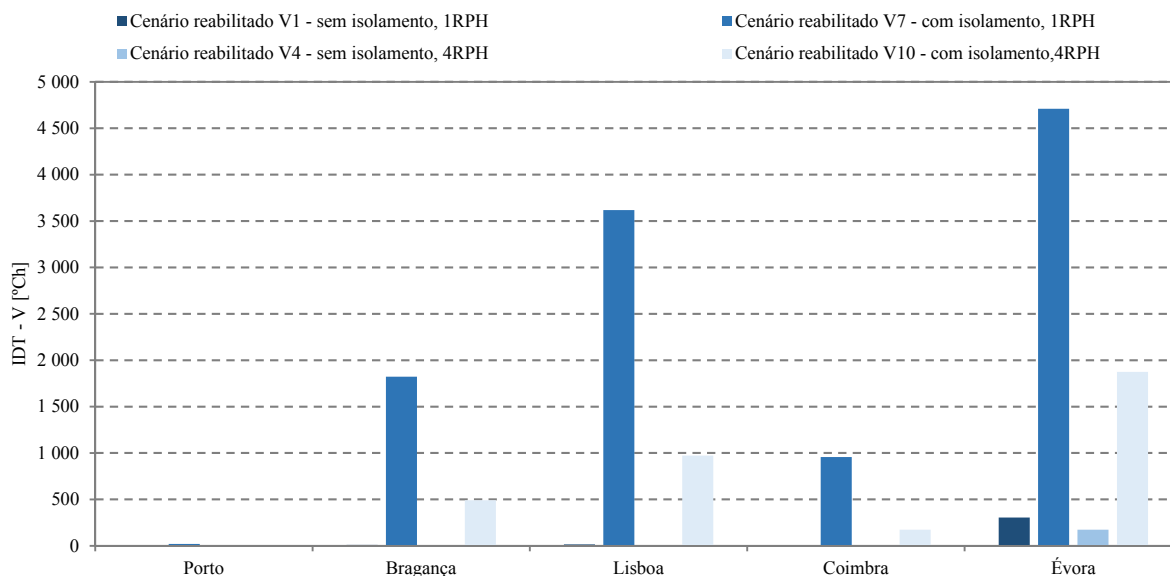


Fig.167 – Índice de Desconforto Térmico de Verão IDT – V, para as cinco cidades estudadas.

Da análise do confronto de resultados da Figura 167 verifica-se que:

- Em todas as cidades, o cenário reabilitado V7, com isolamento na caixa-de-ar e 1 RPH, possui o IDT – V mais elevado, destacando-se o valor de Évora e Lisboa, cidades em que o isolamento térmico na caixa-de-ar provoca situações de sobreaquecimento prolongado,

no interior dos edifícios, obtendo-se um índice IDT – V de, 4709°C_h e 3618°C_h, respetivamente. A cidade do Porto apresenta o valor mais baixo, 19,28°C_h;

- O aumento da ventilação noturna de 1 RPH para 4 RPH demonstrou ser mais importante nos cenários reabilitados com isolamento. A provar este facto está a diminuição significativa do IDT – V. Para o Porto a diminuição é de 100%, para Coimbra é de 80%, para Bragança e Lisboa é de 73% e para Évora é de 60%. Nas cidades de Évora, Lisboa e Bragança, apesar da diminuição, o IDT – V continua a apresentar valores inaceitáveis, sendo de 1875°C_h, 972°C_h e 492°C_h, respetivamente. Em Coimbra a ventilação levou a um valor de IDT – V de 173°C_h, bastante mais aceitável. Para o Porto a ventilação resolveu os problemas de sobreaquecimento verificando-se um IDT – V nulo;
- Os cenários reabilitados sem isolamento, apresentam, no cenário mais crítico, V1 (1 RPH), para Porto, Bragança, Lisboa e Coimbra, um IDT – V aceitável, variando, de um valor nulo para o Porto, situação ideal, a um valor de 15,76°C_h para Lisboa, porém, com o incremento da ventilação noturna anulam-se. Para Évora, os cenários sem isolamento apresentam um IDT – V menor que os cenários com isolamento, porém, nem com um caudal de ventilação de 4 RPH os problemas de sobreaquecimento se resolvem na totalidade, verificando-se um valor do índice IDT – V de 305,49°C_h para o cenário V1 (1 RPH) e 174,16°C_h (4 RPH) para o cenário V4.

Na Figura 168, apresentam-se os valores do IDT – V, dos cenários reabilitados V1, V4, V7 e V10, para o período de ocupação do quarto do edifício-tipo, para as 5 localizações do território nacional (Porto, Bragança, Lisboa, Coimbra e Évora).

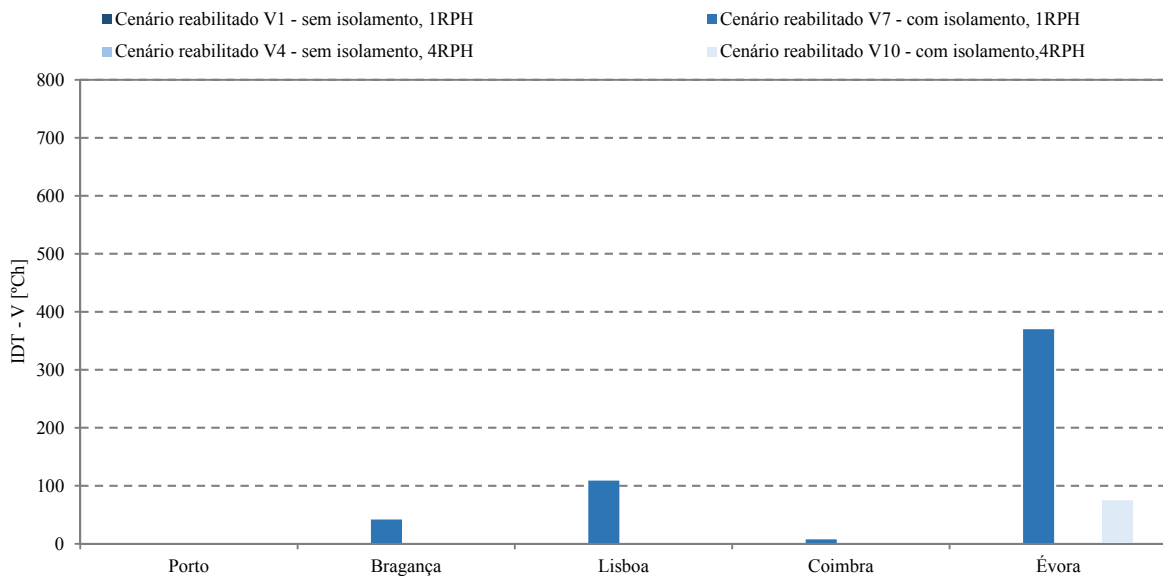


Fig.168 – Índice de Desconforto Térmico de Verão IDT – V, para o período de ocupação do quarto principal, para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 168 verifica-se que:

- Apenas os cenários reabilitados com isolamento, V7 (1 RPH) e V10 (4 RPH), apresentam valores para o Índice de Desconforto Térmico de Verão. Sendo que o cenário reabilitado V10 apenas os apresenta para Évora e Lisboa, sendo os valores de, 74,84°C_h e 0,84°C_h, respetivamente. Por sua vez, o cenário reabilitado V7 apresenta um IDT – V que para

Bragança é de 41,84°C_h, para Lisboa é de 108,90°C_h, para Coimbra é de 7,51°C_h e para Évora é de 369,87°C_h;

- A implementação de um caudal de ventilação noturna de 4 RPH elimina o risco de sobreaquecimento para todas as cidades. Exceto em Évora, onde o índice IDT – V passa de 369,87°C_h para 74,84°C_h.

Na Figura 169 apresenta-se a representação gráfica do IDT – V para o edifício-tipo e para o período de ocupação do quarto.

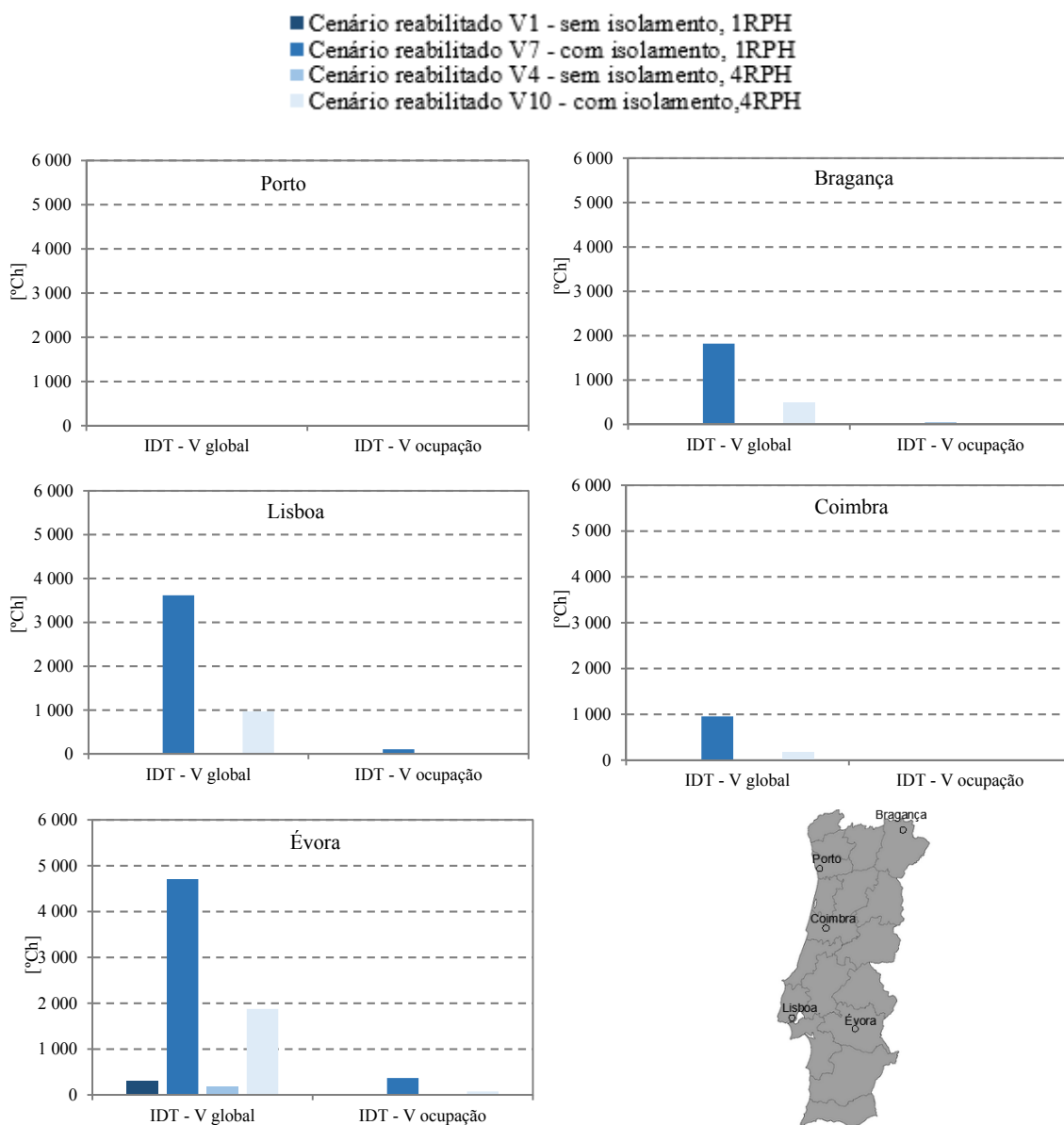


Fig. 169 – Representação gráfica do Índice de Desconforto Térmico de Verão IDT – V, para o edifício-tipo e para o período de ocupação do quarto principal, das cinco cidades estudadas.

Dos resultados pode concluir-se, de uma forma global, que:

- Os cenários reabilitados com isolamento térmico na caixa-de-ar das paredes exteriores apresentam um IDT – V mais elevado em todas as cidades estudadas, sendo o cenário V7, com uma ventilação noturna de 1 RPH, o cenário mais gravoso. A cidade do Porto

apresenta, para este cenário reabilitado, o valor mais baixo, 19,28°CCh e a cidade de Évora o mais elevado, 4709,24°CCh;

- Os cenários reabilitados, sem isolamento e com uma ventilação noturna de 1 RPH, com exceção de Évora, apresentam valores aceitáveis, verificando-se um valor nulo no Porto, e máximo em Lisboa 15,76°CCh. Com um caudal de ventilação noturna de 4 RPH elimina-se o risco de sobreaquecimento, com exceção de Évora;
- A cidade de Évora, como seria expectável apresenta um índice IDT – V elevado em todos os cenários, a ventilação noturna minora o problema mas não o resolve, sendo necessária a aplicação de outras medidas de arrefecimento. O nível do IDT – V de Lisboa, para os cenários reabilitados com isolamento na caixa-de-ar, também assume valores de uma ordem de grandeza elevada, e tal como em Évora é necessário recorrer a outras formas de arrefecimento para além da ventilação noturna;
- No período de ocupação do quarto, o IDT – V, apenas existe para os cenários com isolamento na caixa-de-ar. Para o cenário V7, os valores obtidos no Porto (nulo) e Coimbra (7,25°CCh), são perfeitamente admissíveis, para Bragança (41,84°CCh), Lisboa (108,90°CCh) e Évora (369,87°CCh) os valores revelam um risco elevado de sobreaquecimento. O incremento da ventilação noturna, de 1 RPH para 4 RPH, proporciona, com exceção de Évora, a anulação do problema de sobreaquecimento, alcançando-se o valor ótimo do IDT – V, 0,00°CCh. Para Évora, a ventilação noturna minora o problema mas não o resolve, sendo necessário adotar outras estratégias de arrefecimento.

5.3.9. AVALIAÇÃO DO CONFORTO – MÉTODO DA NORMA EN 15251

Através do método da Norma EN 15251 [28] avaliou-se o nível de conforto dos cenários de reabilitação tendo como objetivo perceber a influência do efeito combinado do isolamento térmico com o grau de ventilação nas paredes de elevada espessura e massa. Foram consideradas duas categorias de conforto, categoria II, que segundo a Norma [28], é para edifícios reabilitados, e categoria III, ajustada aos edifícios existentes.

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados para o Porto. No anexo XI apresentam-se os resultados para Bragança, Lisboa, Coimbra e Évora.

5.3.9.1. Porto

Na Figura 170 apresentam-se os resultados para o Porto, durante o período de arrefecimento, com duração de 4 meses (2928 horas).

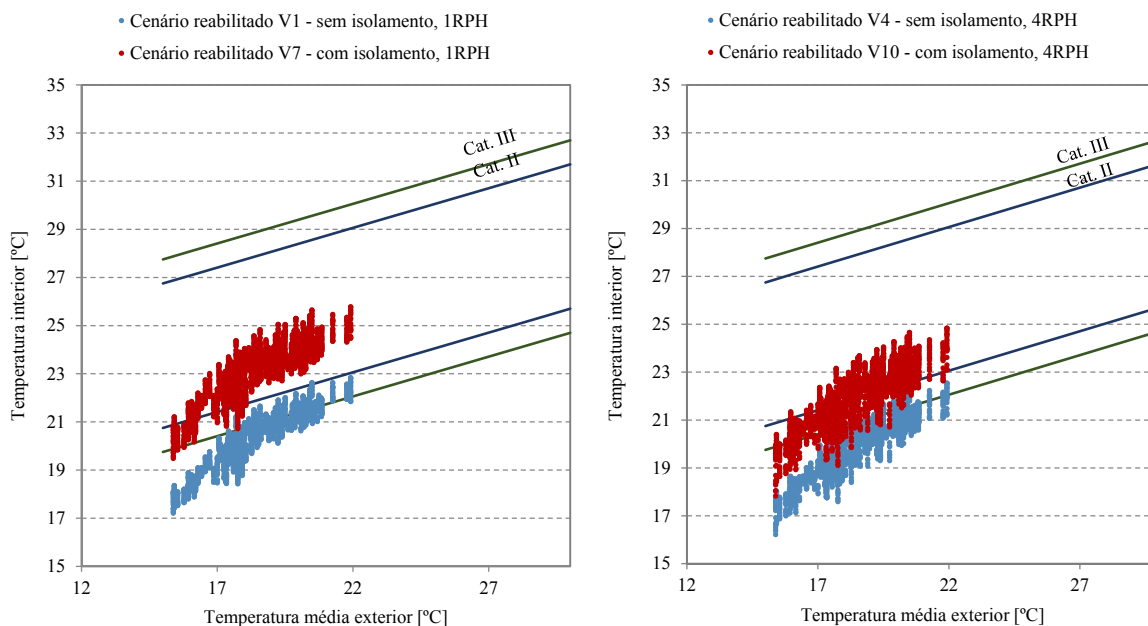


Fig.170 – Avaliação do conforto térmico, segundo a Norma EN 15251 [28], para a cidade do Porto.

Dos resultados obtidos constata-se a existência de um elevado número de horas fora dos limites de conforto (abaixo do limite mínimo de conforto), o que levaria a uma situação de frio na estação de arrefecimento, por outro lado, temperaturas acima de 25°C estão dentro dos limites de conforto, podendo mesmo, existir temperaturas interiores acima dos 31°C, que poderão estar dentro dos limites de conforto. Estes factos são bastante criticáveis e reveladores de um desajuste da Norma [28] para a avaliação do conforto térmico na estação de Verão. No Quadro 52, apresenta-se a percentagem de tempo e respetivo número de horas de desconforto em relação ao modelo adaptativo.

Quadro 52 – Percentagem de tempo e respetivo número de horas de desconforto para a cidade do Porto.

		Cenários reabilitados			
Categoria de conforto		V1	V7	V4	V10
II	% Tempo fora dos limites de conforto	100%	12%	100%	47%
	Número de horas fora dos limites de conforto	2925	341	2928	1380
III	% Tempo fora dos limites de conforto	75%	1%	93%	13%
	Número de horas fora dos limites de conforto	2208	17	2733	394

Dos resultados Quadro 52 destaca-se:

- A diferença do número de horas de desconforto, para a categoria II, entre o cenário reabilitado V1 e V7 é de 2654 horas. Entre o cenário reabilitado V4 e V10 é de 1548 horas;
- A diferença do número de horas de desconforto, para a categoria III, entre o cenário reabilitado V1 e V7 é de 2191 horas. Entre o cenário reabilitado V4 e V10 é de 2339 horas;

Como se comprova através da análise dos resultados do Quadro 52, a Norma [28] é totalmente desajustada, os cenários com temperaturas interiores mais elevadas (paredes isoladas na caixa-de-ar) são os que possuem o melhor desempenho, no entanto, na realidade, verifica-se o oposto.

5.3.9.2. Influência da Localização no Território Nacional Segundo a Norma EN 15251

Realizou-se uma análise comparativa, do nível de conforto através da Norma EN 15251 [28], para a estação de arrefecimento, dos cenários de reabilitação simulados, nas cinco localizações geográficas do território nacional consideradas. Através dos resultados obtidos e já comentados, conclui-se que o método poderá estar desajustado por permitir temperaturas demasiado elevadas, contudo, optou-se por apresentar os resultados das cinco cidades. Na Figura 171 compararam-se os valores da percentagem de horas fora dos limites da categoria II, destinada a edifícios reabilitados. E, na Figura 172, compararam-se os valores da referida percentagem na categoria III, destinada a edifícios existentes, da referida Norma [28].

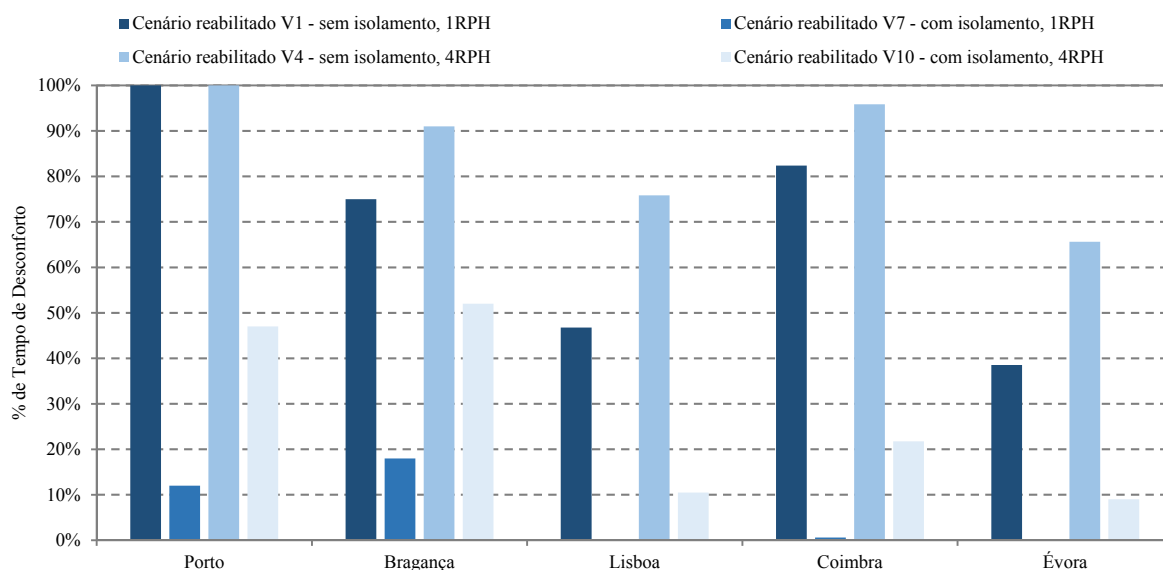


Fig.171 – Percentagem de tempo de desconforto, na categoria II da Norma EN 15251 [28], para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados da Figura 171 verifica-se que:

- De acordo com o método da Norma EN 15251 [28], o cenário reabilitado V4, sem isolamento e com 4 RPH, é o mais desconfortável em todas as localidades estudadas. A sua percentagem de tempo de desconforto máxima é de 100% na cidade do Porto. A mínima foi conseguida, para o cenário V1, sem isolamento e com 1 RPH, é de 65,64%, para a cidade de Évora;

- O cenário reabilitado V7, com isolamento na caixa-de-ar e 1 RPH, é o que apresenta menos percentagem de tempo de desconforto em todas as cidades estudadas. O seu valor máximo regista-se para a cidade do Porto, 12%, e o mínimo para Évora, 0,03%.

Na Figura 172 representam-se os valores da percentagem de tempo de desconforto, para a categoria III, dos cenários reabilitados V1, V4, V7 e V10, para as localizações consideradas.

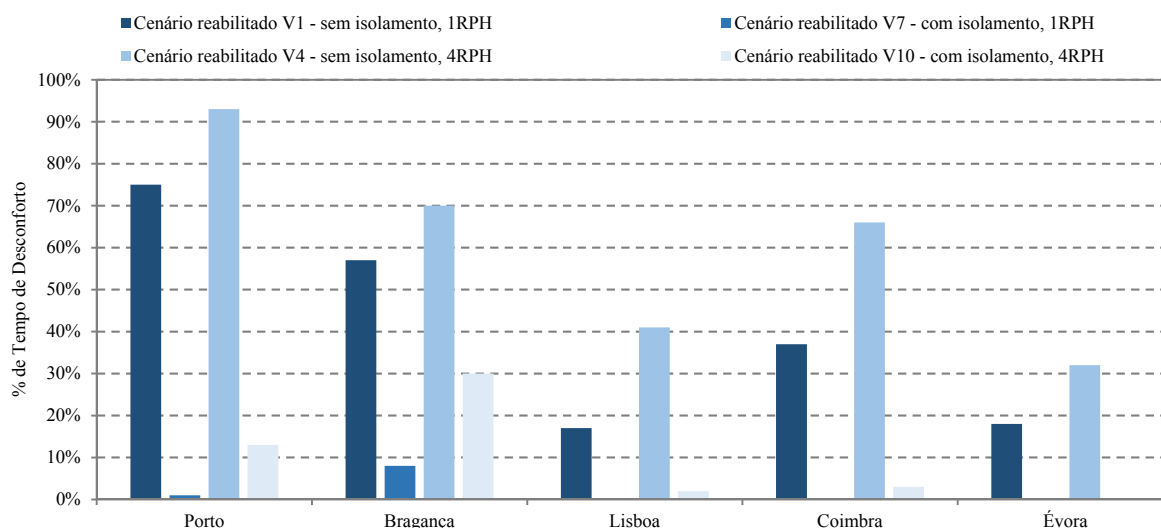


Fig.172 – Percentagem de tempo de desconforto, na categoria III da Norma EN 15251 [28], para as cinco cidades estudadas.

Da análise dos resultados Figura 172 verifica-se que:

- A tendência constatada para a categoria II mantém-se para a categoria III, o cenário reabilitado V4, sem isolamento e com 4 RPH, de acordo com o método da Norma [28], continua a ser o mais desconfortável para as diferentes localizações estudadas, com uma percentagem de tempo de desconforto máxima, para a cidade do Porto, de 93%, e uma percentagem mínima de 32% para a cidade de Évora;
- O cenário V7, com isolamento e 1 RPH, segundo a Norma [28], é o que tem melhor desempenho térmico, com uma percentagem de tempo de desconforto máxima de 8%, para a cidade de Bragança e uma percentagem mínima de quase 0% para Lisboa, Coimbra e Évora.

Através dos resultados fica provado o desajuste da Norma [28] na avaliação do conforto térmico na estação de arrefecimento. Para ambas as categorias de conforto o cenário reabilitado com melhor desempenho é o V7, com isolamento térmico e 1 RPH. Este cenário é o que apresenta o maior número de horas acima dos 25°C em todas as cidades. Segundo a Norma [28], para as cidades de Évora e Lisboa, que apresentam uma temperatura média do ar interior acima dos 25°C, não existem instantes de desconforto. Com base nas observações feitas, optou-se por não se apresentar o mapa com os resultados obtidos.

5.3.10. TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE

Irão ser avaliados e comparados os resultados relativos à temperatura média radiante e à temperatura do ar interior de um compartimento. Considerando paredes de grande espessura sem isolamento, e com isolamento na caixa-de-ar. Refira-se que a cobertura e pavimento estão isolados em todos os casos. Através deste procedimento pretende verificar-se a utilização da temperatura do ar interior para a análise do desempenho térmico do edifício em estudo, em vez da temperatura operativa (média entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante), é correto.

Para se atingir este objetivo, utilizou-se o método da Norma EN 7726 [29], que já foi referido no subcapítulo 2.3.1.2., que especifica o cálculo da temperatura média radiante:

- Posição sentada:

$$T_{mr} = 0,13(T_p [cima] + T_p [baixo]) + 0,185(T_p [dir.] + T_p [esq.] + T_p [frente] + T_p [trás]) \quad (18)$$

- Posição em pé:

$$T_{mr} = 0,06(T_p [cima] + T_p [baixo]) + 0,22(T_p [dir.] + T_p [esq.] + T_p [frente] + T_p [trás]) \quad (19)$$

Sendo que:

- T_p , temperatura da superfície [°C].

Através do processo de simulação desenvolvido no WUFI Plus, calculou-se, para o quarto principal do edifício-tipo (Figura 173), a temperatura média radiante dos vários cenários reabilitados.



Fig.173 – Quarto principal do edifício-tipo, utilizado para o cálculo da temperatura média radiante.

Calculou-se a T_{mr} para as posições sentada e em pé, verificando-se que a diferença era muito pequena. Assim, optou-se por utilizar os resultados para a posição sentada, pois o quarto é um compartimento de descanso.

De modo a avaliar a diferença, entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar interior, apresenta-se a probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante. De forma a simplificar o processo, e visto que o comportamento do WUFI Plus foi igual em todas as localidades, apresentam-se os resultados para a cidade do Porto, para a estação de aquecimento e arrefecimento, e, no anexo XII os resultados para Bragança, Lisboa, Coimbra e Évora. Os cenários reabilitados analisados, para a estação de aquecimento e arrefecimento, são os mesmos que se consideraram nos subcapítulos anteriores.

5.3.10.1. Estação de Aquecimento

Apresentam-se os resultados, de probabilidade acumulada da temperatura média radiante e temperatura do ar interior, para a cidade do Porto na estação de aquecimento, Figuras 174, 175 e 176.

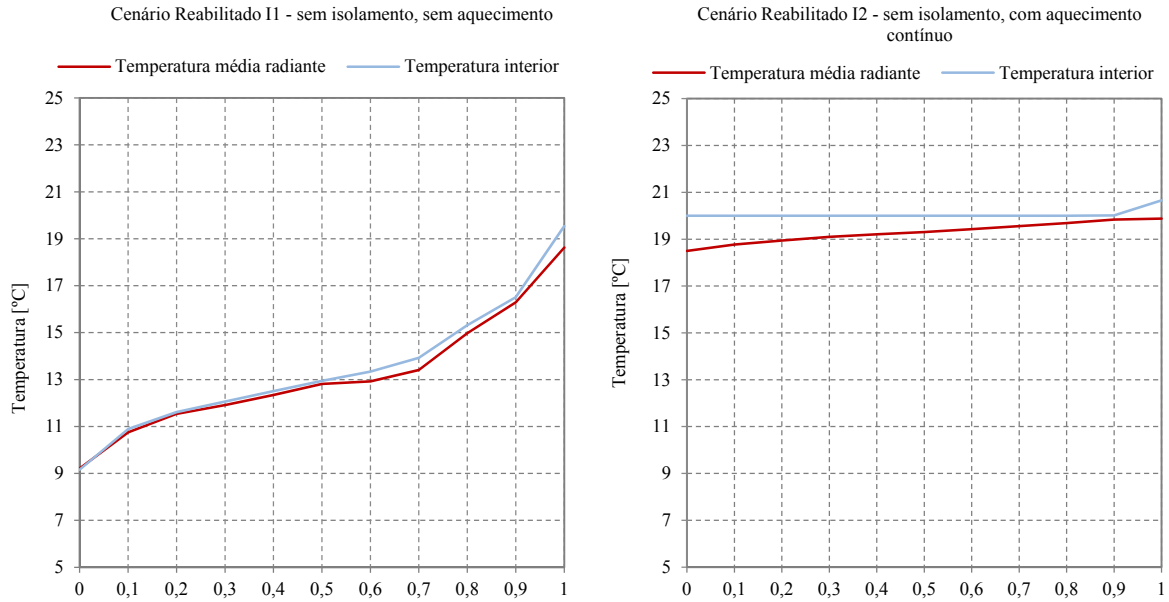


Fig.174 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para cidade do Porto.

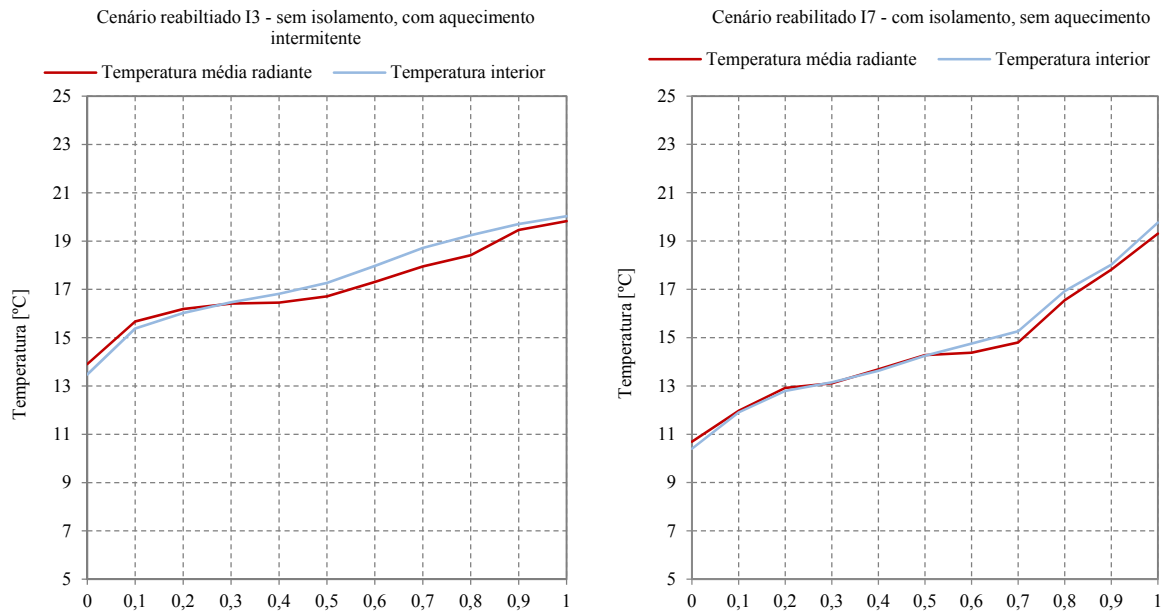


Fig.175 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para cidade do Porto.

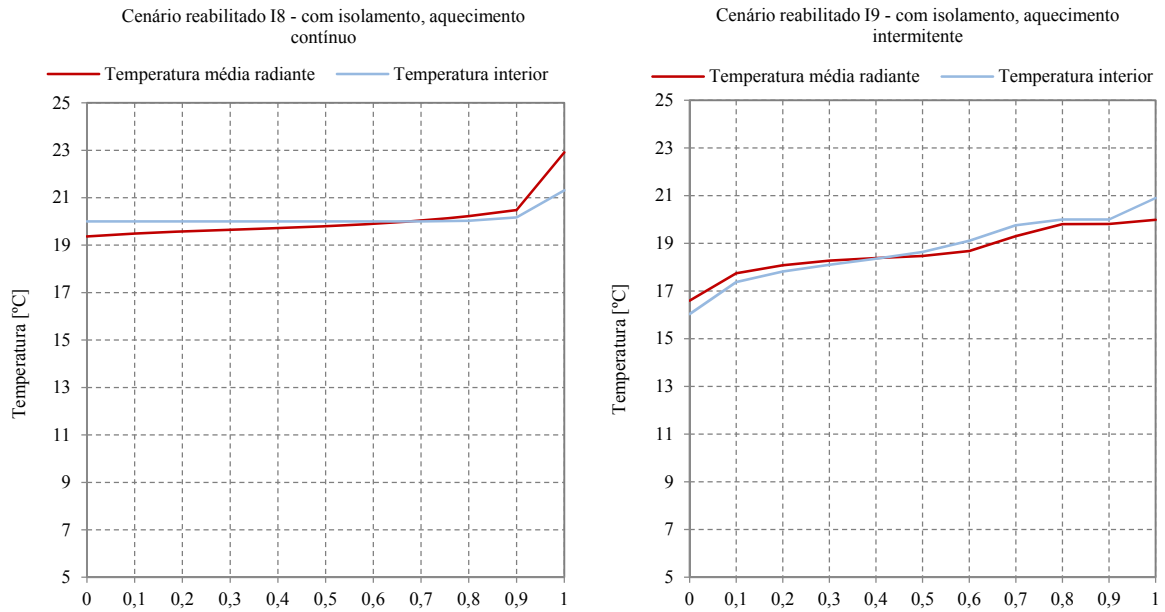


Fig.176 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de aquecimento, dos cenários reabilitados para a cidade do Porto.

No Quadro 53 apresentam-se as diferenças, entre a temperatura média radiante e a do ar interior, para o percentil 50.

Quadro 53 – Diferença entre a temperatura média radiante e a do ar interior, dos cenários reabilitados, para o percentil 50.

Percentil	I1	I7	I2	I8	I3	I9
50	0,13	0,02	-0,69	-0,20	-0,55	-0,17

Dos resultados verifica-se que a diferença máxima é de 0,69°C no caso do cenário reabilitado I2, sem isolamento e com aquecimento contínuo, e a mínima é de 0,02°C, registando para o cenário reabilitado I7, com isolamento e sem aquecimento.

Constata-se que as diferenças entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar interior, para a estação de aquecimento, não são significativas, considerando-se correto a utilização da temperatura do ar interior em vez da temperatura operativa na análise do desempenho térmico.

5.3.10.2. Estação de Arrefecimento

Apresentam-se, nas Figuras 177 e 178, os resultados, da probabilidade acumulada da temperatura média radiante e temperatura do ar interior, para a cidade do Porto na estação de arrefecimento.

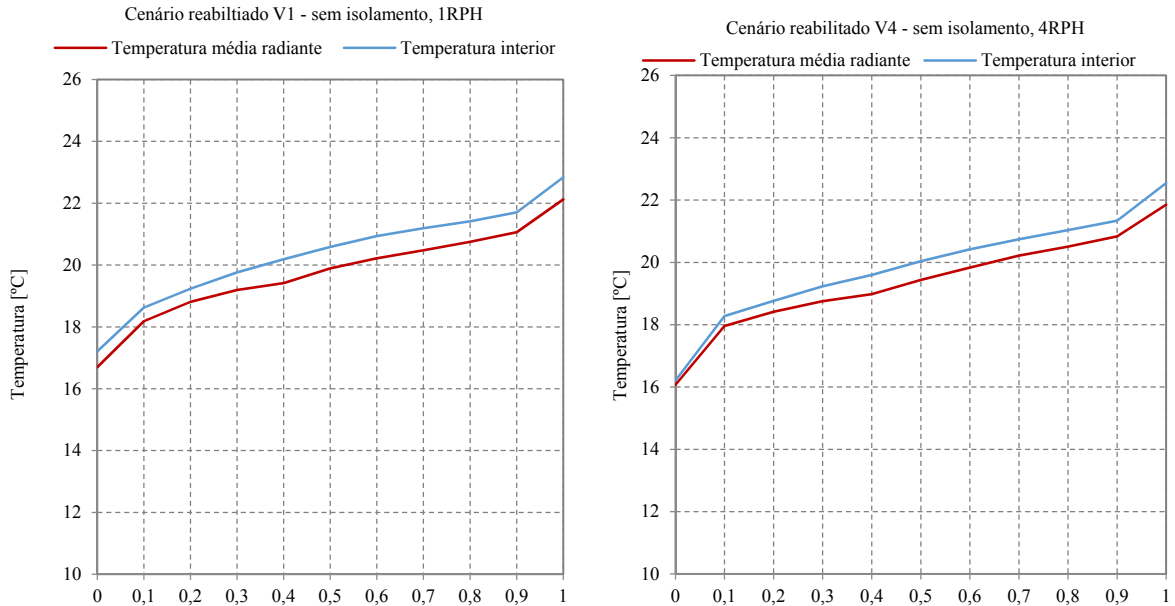


Fig.177 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados para a cidade do Porto.

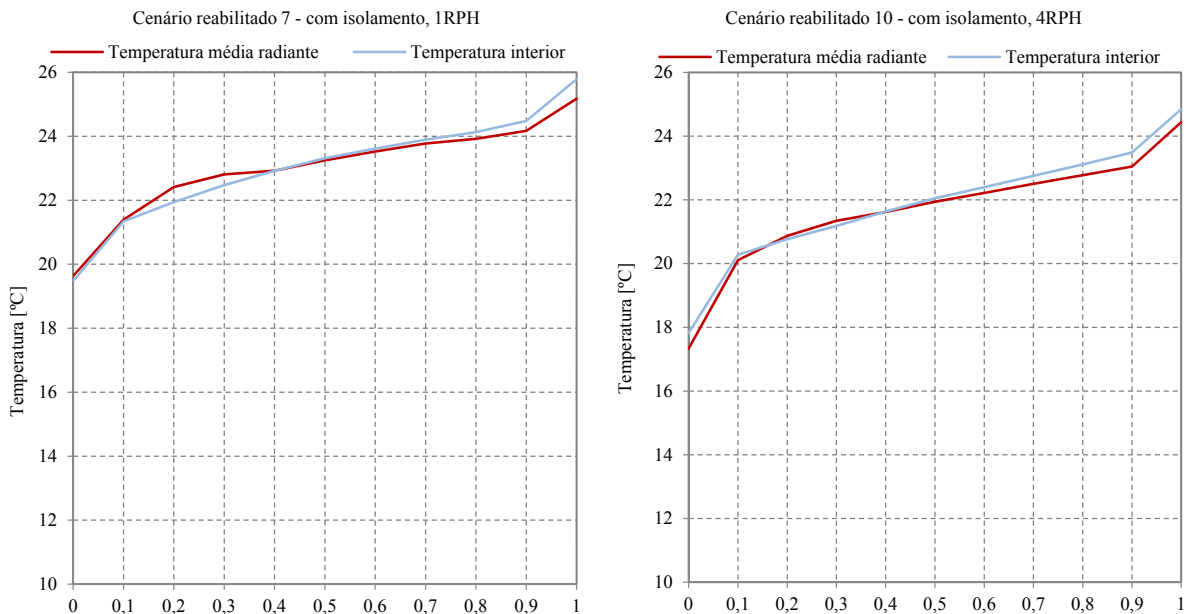


Fig.178 – Comparação da probabilidade acumulada da temperatura do ar interior e da temperatura média radiante, na estação de arrefecimento, dos cenários reabilitados na cidade do Porto.

No Quadro 54 apresentam-se as diferenças, entre a temperatura média radiante e a do ar interior, para o percentil 50.

Quadro 54 – Diferença entre a temperatura média radiante e a do ar interior, dos cenários reabilitados, para o percentil 50.

Percentil				
	V1	V7	V4	V10
50	-0,70	-0,01	-0,60	-0,01

Dos resultados verifica-se que a diferença máxima é de 0,70°C no caso do cenário reabilitado V1, sem isolamento com 1 RPH, e a mínima é de 0,01°C, registando no caso do cenário reabilitado V7, com isolamento e 1 RPH, e V10, com isolamento e 4 RPH.

À semelhança da estação de aquecimento, as diferenças entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, não são significativas, considerando-se correto a utilização da temperatura ar interior em vez da temperatura operativa na análise do desempenho térmico.

5.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A quantificação do desempenho térmico de edifícios rurais em função do clima, do local de implantação e da sua envolvente é uma tarefa chave. No estudo de sensibilidade avaliaram-se as consequências de isolar as paredes de grande espessura, no conforto térmico e no consumo energético, bem como a influência da ventilação noturna.

Dos resultados obtidos conclui-se que:

- Temperatura do ar interior:
 - Na estação de aquecimento o isolamento na caixa-de-ar, proporciona um aumento da temperatura do ar interior que é benéfico para o conforto térmico;
 - A utilização de um sistema de aquecimento em regime intermitente, apesar de melhorar o desempenho térmico, não proporciona níveis de conforto aceitáveis, verificando-se percentagens de tempo de desconforto acima de 75% para todas as localizações;
 - Na estação de aquecimento a aplicação de isolamento térmico, nas paredes exteriores, possibilitou um aumento da temperatura média do ar interior inferior a 2°C;
 - Na estação de arrefecimento, o isolamento, das paredes de elevada espessura, é nefasto para o conforto térmico. Em termos de percentagem de tempo de desconforto, verificou-se, nos cenários com 1 RPH (ventilação noturna) uma diferença, entre os cenários com e sem isolamento, mínima para o Porto, 8% e máxima para Lisboa, 70%. Nos cenários com 4 RPH, o valor mínimo, da diferença da percentagem de tempo de desconforto, registou-se para o Porto, 1%, e o máximo para Lisboa e Évora, 38%;
 - Na estação de arrefecimento, a aplicação de isolamento térmico, nas paredes de elevada espessura e massa, aumentou a temperatura do ar interior entre 2 a 3,2°C de acordo com o clima exterior das cidades estudadas;

- Consumo energético:
 - Utilizando um regime de aquecimento contínuo, é fundamental isolar as paredes. As diferenças registadas, no consumo energético dos cenários sem isolamento e com isolamento refletem este facto. O acréscimo do consumo de energia pode atingir 8408 kWh em Bragança;
- Índice de Desconforto Térmico de Inverno e Verão:
 - A quantificação do Índice de Desconforto Térmico de Inverno, IDT – I, que quantifica o somatório de graus-hora abaixo da temperatura de conforto de referência (20°C), mostrou que a aplicação de isolamento térmico, nos cenários sem aquecimento, faz variar este parâmetro entre 5698°Ch (Lisboa) e 7932°Ch (Bragança). Nos cenários com aquecimento intermitente esta variação é entre 4605°Ch (Lisboa) e 10248°Ch (Bragança);
 - A quantificação do Índice de Desconforto Térmico de Verão IDT – V, que quantifica o somatório de graus-hora acima da temperatura de conforto de referência (25°C), mostrou que a aplicação de isolamento térmico com 1 RPH (ventilação noturna) conduz a valores elevados deste parâmetro, destacando-se o valor de Évora e Lisboa, 4709°Ch e 3618°Ch, respetivamente;
 - O cálculo do IDT – V no período de ocupação do quarto, com ventilação noturna, demonstrou que este processo de arrefecimento leva ao conforto térmico, exceto nos cenários reabilitados com isolamento, V7 (1 RPH) e V10 (4 RPH);
- Avaliação do conforto térmico:
 - A quantificação do tempo de desconforto térmico, da estação de aquecimento, face aos critérios de conforto da Norma EN 15251 [28] (categoria II de conforto), demonstrou que para os cenários sem aquecimento e com aquecimento intermitente o desconforto é inaceitável;
 - A Norma [28] pode ser demasiado permissiva para avaliação do conforto no Verão;
- Ventilação noturna:
 - A ventilação noturna, na estação de arrefecimento demonstrou ser eficiente, principalmente nos cenários reabilitados com as paredes isoladas, atendendo que maior inércia das paredes reduz a eficácia da ventilação noturna. Os benefícios proporcionados pela ventilação noturna foram máximos, para Lisboa, com uma diminuição, da percentagem de tempo de desconforto, de 35% e mínima para o Porto, 7%;
 - A variação da temperatura média do ar interior quando há ventilação noturna (4 RPH) foi inferior a 1°C, para os cenários sem isolamento térmico. Nos cenários com isolamento térmico a variação está compreendida entre 1,1°C e 1,6°C;
 - O uso de um caudal de ventilação noturna mais elevado (4 RPH), provocou uma diminuição do IDT – V, sendo mais importante nos cenários reabilitados com isolamento. Para estes cenários, o efeito de arrefecimento foi bastante relevante levando a diminuições do IDT – V acima dos 60%, consoante a localização;
- A comparação entre a temperatura média radiante calculada utilizando as temperaturas superficiais fornecidas pelo WUFI Plus e a temperatura do ar interior simulada no WUFI Plus demonstrou que a diferença é diminuta. A diferença máxima na estação de

aquecimento e arrefecimento foi de 0,7°C, sendo perfeitamente válido o uso da temperatura do ar interior na presente tese.

6. Otimização do Conforto dos Edifícios Rurais Reabilitados

6.1. OBJETIVOS

Um dos maiores desafios da atualidade é a otimização de processos nas mais diversas áreas do conhecimento humano [57]. A necessidade crescente da melhoria do conforto e conseqüente consumo de energia faz da otimização uma ferramenta indispensável no estudo do comportamento térmico dos edifícios.

Gouda *et al.* [58] refere-se à otimização em engenharia como o processo de procura dos “melhores” valores possíveis para um conjunto de variáveis de um sistema satisfazendo diversas restrições. O termo “melhores” indica que existe um ou mais objetivos de projeto que requerem ser otimizados (por maximização ou por minimização). Num processo de otimização as variáveis são selecionadas para descrever o sistema. O objetivo refere-se a uma quantidade que o decisor quer que seja tão alto (um máximo) ou tão baixo (um mínimo) quanto possível. Uma restrição refere-se a uma quantidade que indica uma limitação relativamente a um aspeto das capacidades tecnológicas do sistema.

A otimização (minimização) do consumo de energia e a garantia do conforto térmico de edifícios rurais reabilitados é objeto de estudo, sendo os seguintes objetivos propostos:

- Estabelecer um modelo de otimização que determine a solução construtiva de reabilitação que melhor se adequa à reabilitação de um edifício rural, minimizando o consumo energético e garantindo o conforto térmico;
- Aplicar o modelo a um edifício rural tipo localizado em cinco cidades distintas de Portugal, de forma a obter a melhor estratégia de reabilitação para cada localização.

O modelo de otimização para além de obter a solução ótima, no que se refere ao consumo de energia, fornece também todas as outras soluções construtivas admissíveis, isto é, as soluções que embora satisfaçam as restrições impostas no modelo não têm associado um consumo energético inferior ao da solução ótima. Para a engenharia civil, esta característica do modelo é bastante útil uma vez que define outras boas soluções.

Com base nestes objetivos os parágrafos seguintes são dedicados à descrição do modelo desenvolvido, resultados obtidos e sua discussão.

6.2. MODELO DESENVOLVIDO

A otimização é uma matéria objeto de múltiplos estudos na área da térmica de edifícios, referindo-se a título de exemplo: Asad *et al.* [59] através da combinação dos programas TRNSYS, GenOpt e uma técnica de otimização Tchebycheff, desenvolvida em Matlab, otimiza o custo de reabilitação, a economia de energia e o conforto térmico de um edifício residencial; Chatrelle *et al.* [60] desenvolveram um processo de otimização multiobjectivo para um edifício escolar. Estabelecidos os objetivos e as restrições os autores desenvolveram um método baseado na otimização multicritério com o auxílio dos programas TRNSYS e MultiOpt; Magnire & Haghighat [61], de modo análogo, elaboraram um estudo onde otimizaram o consumo energético e o conforto térmico de um edifício residencial.

O Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto através de um estudo elaborado por Almeida [46], desenvolveu estudos para otimizar o comportamento higrotérmico de edifícios escolares, para isso, criou duas funções de avaliação de desempenho que caracterizam a eficiência energética e o conforto térmico durante o período de arrefecimento. Por outro lado, Ramos *et al.* [62] desenvolveram um modelo matemático, para otimizar a resistência térmica da envolvente de edifícios escolares, através da espessura ótima de isolamento térmico a colocar nos elementos construtivos constituintes do edifício em estudo. A formulação matemática desse modelo conduziu a um programa de programação linear cuja resolução foi obtida através do *software* comercial GAMS.

O código GAMS é um *software* de otimização avançado que possui vários *solvers* que permitem resolver de forma bastante eficaz e eficiente, problemas de programação quer linear quer não linear. Além disso, como permite que o utilizador introduza valores para diferentes parâmetros que influenciam o processo, torna-se num dos códigos de excelência para resolver qualquer problema de otimização. Constata-se assim, que o código GAMS é uma importante ferramenta capaz de alcançar o objetivo de minimizar o consumo de energia para um determinado nível de exigência de conforto – principal objetivo do modelo desenvolvido.

Este modelo utiliza como parâmetros a temperatura do ar interior e exterior e o consumo energético obtidos através das simulações numéricas realizadas no WUFI Plus (capítulo 5). Na Figura 179 apresentam-se resultados obtidos através do WUFI Plus referentes à temperatura do ar interior e exterior (8760 horas) e ao consumo energético.

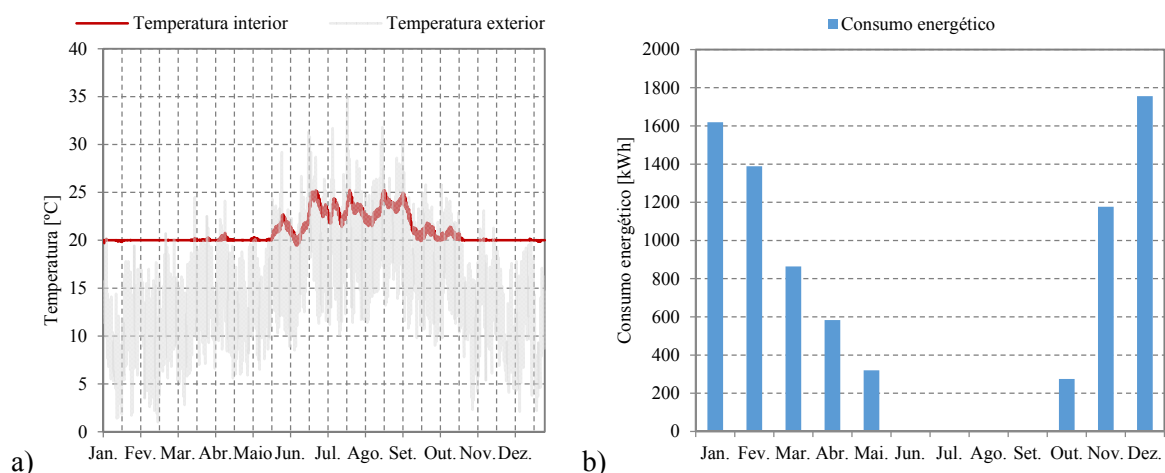














Fig.179 – Exemplo dos resultados obtidos no WUFI Plus: a) temperatura do ar interior e exterior e b) consumo de energia para o edifício-tipo.

No Quadro 55 apresentam-se os esquemas dos doze cenários reabilitados para a estação de aquecimento e arrefecimento e suas parametrizações.

Consideraram-se cenários reabilitados em que as paredes não têm isolamento, ou, pelo contrário, se isolam na caixa-de-ar (entre a parede existente e o pano de alvenaria cerâmica), combinando com cenários sem aquecimento, com aquecimento em regime contínuo ou em regime intermitente e com uma ventilação noturna, durante a estação de arrefecimento (com 1 RPH ou 4 RPH).

Quadro 55 – Cenários reabilitados considerados no estudo de sensibilidade e suas parametrizações.

Cenários reabilitados	Isolamento	Aquecimento	Ventilação noturna	Cenários reabilitados	Isolamento	Aquecimento	Ventilação noturna
 <p>Cenário 1</p>	Sem isolamento	Sem aquecimento	1 RPH	 <p>Cenário 4</p>	Sem isolamento	Sem aquecimento	4 RPH
 <p>Cenário 2</p>		Contínuo		 <p>Cenário 5</p>		Contínuo	
 <p>Cenário 3</p>		Intermitente		 <p>Cenário 6</p>		Intermitente	
 <p>Cenário 7</p>	Isolamento na caixa-de-ar	Sem aquecimento	1 RPH	 <p>Cenário 10</p>	Isolamento na caixa-de-ar	Sem aquecimento	4 RPH
 <p>Cenário 8</p>		Contínuo		 <p>Cenário 11</p>		Contínuo	
 <p>Cenário 9</p>		Intermitente		 <p>Cenário 12</p>		Intermitente	

6.2.1. LIMITES DE CONFORTO

O principal objetivo da otimização é minimizar o consumo de energia, dos cenários reabilitados do Quadro 55, tendo em conta o nível de desconforto térmico avaliado segundo dois modelos. O Modelo A avalia o conforto segundo a Norma EN 15251 [28], enquanto, o Modelo B utiliza limites pré-estabelecidos pelo utilizador.

Considerou-se a categoria de conforto II, da Norma EN 15251 [28], referente a edifícios reabilitados. Para este nível e para a estação de aquecimento, o limite mínimo de conforto é de 20°C, enquanto, para a estação de arrefecimento (edifício sem sistemas de arrefecimento), os limites de conforto variam consoante a temperatura média do ar exterior (modelo adaptativo). Na Figura 180 ilustram-se os limites impostos.

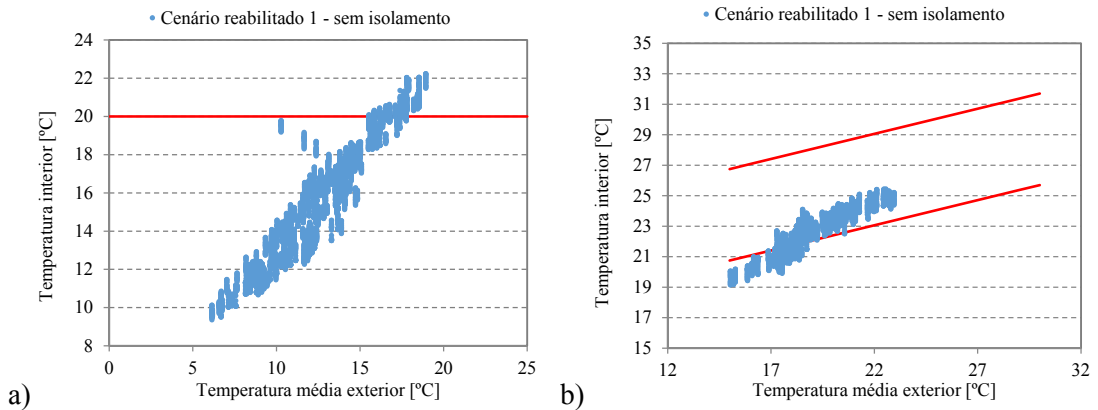


Fig.180 – Limites de conforto do Modelo A: a) estação de aquecimento; b) estação de arrefecimento.

No Modelo B, os limites de conforto estabelecidos para a estação de aquecimento foram os mesmos do Modelo A, enquanto para a estação de arrefecimento, o limite mínimo escolhido é de 15°C e o máximo 26°C, que procura dar um peso mais realista ao período de Verão.

Na Figura 181 ilustram-se os limites do Modelo B definidos para a estação de arrefecimento.

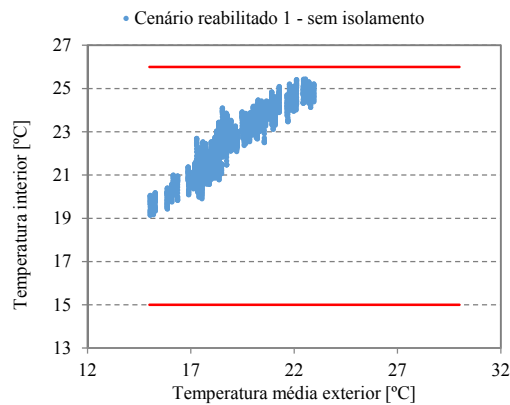


Fig.181 – Limites de conforto do Modelo B para a estação de arrefecimento.

A utilização do Modelo B deve-se à constatação do desajuste por parte do método da Norma 15251 [28] para a avaliação do conforto na estação de arrefecimento, conforme se analisou e discutiu no subcapítulo 5.3.9.

6.2.2. CATEGORIAS DE CONFORTO

Estabeleceram-se três categorias de exigência de conforto, que limitam o número de horas de desconforto do Modelo A e B, quer na estação de aquecimento quer na estação de arrefecimento:

- Categoria 1 – 1% do tempo em desconforto;
- Categoria 2 – 5% do tempo em desconforto;
- Categoria 3 – 10% do tempo em desconforto.

A estação de arrefecimento é igual para todas as cidades e decorre entre 1 de Junho e 30 de Setembro, perfazendo um total de 2928 horas. Isto é, na categoria 1 são admissíveis 29 horas de desconforto, na categoria 2, 146 horas e na categoria 3, 293 horas.

A estação de aquecimento é variável de cidade para cidade. No Quadro 56 apresentam-se os números de horas de desconforto, para esta estação, em cada uma das categorias para cada cidade estudada.

Quadro 56 – Número de horas de desconforto, de cada localidade estudada, na estação de aquecimento.

Número de Horas de Desconforto na Estação de Aquecimento					
Categoria	Porto (4848 horas)	Bragança (5832 horas)	Lisboa (3889 horas)	Coimbra (4344 horas)	Évora (4152 horas)
1 – 1%	49 horas	58 horas	39 horas	43 horas	42 horas
2 – 5%	242 horas	292 horas	195 horas	217 horas	208 horas
3 – 10%	484 horas	584 horas	390 horas	434 horas	416 horas

6.2.3. MODELO MATEMÁTICO

O modelo desenvolvido e apresentado neste subcapítulo tem como objetivo principal a determinação da solução construtiva ótima de reabilitação de um edifício rural. Pretende-se determinar, de entre vários cenários possíveis de reabilitação simulados numericamente no WUFI Plus, o cenário que para além de utilizar o menor consumo energético garante que os limites de conforto pré-estabelecidos para as diferentes categorias de conforto sejam cumpridos nos instantes de tempo considerados.

Na formulação matemática, subjacente ao modelo proposto, para cada uma das simulações s , obtidas pelo WUFI Plus, é atribuída uma variável binária x_s que irá assumir o valor 1, se s for a simulação que consome menor energia para garantir o conforto térmico pretendido, caso contrário toma o valor 0.

O objetivo principal do modelo é obter a simulação s que utiliza a menor energia possível. Se $E_{s,t}$ for a energia gasta pela simulação s no instante de tempo t então a função objetivo apresenta a seguinte forma:

$$\text{Minimizar } \sum_s \left(x_s \sum_t E_{s,t} \right) \quad (20)$$

A existência de uma (e apenas uma) solução nessas condições é verificada impondo a seguinte restrição:

$$\sum_s x_s = 1 \quad (21)$$

Para garantir que numa simulação s os limites de conforto pré-estabelecidos estão a ser verificados em cada instante de tempo t , é necessário impor que a temperatura do ar interior $T_{s,t}$ satisfaça a seguinte restrição:

$$T_{\min,t} \leq T_{s,t} \leq T_{\max,t} \quad (22)$$

em que, $T_{\min,t}$ e $T_{\max,t}$ representam, respetivamente, a temperatura do ar interior mínima e máxima que a temperatura do ar interior poderá atingir no instante de tempo t .

No entanto, uma vez que o modelo permite que exista uma pequena percentagem de instantes de tempo, para cada estação (aquecimento e arrefecimento), que possa estar fora das categorias de conforto definidas, é necessário contabilizar para cada simulação o número de vezes que esse desconforto ocorre. Deste modo, um conjunto adicional de variáveis binárias y e de restrições é incorporado no modelo.

Em relação às variáveis binárias y , cada componente $y_{s,t}$ irá assumir o valor 0 se para a simulação s no instante de tempo t a temperatura do ar interior $T_{s,t}$ satisfaz os limites de conforto, caso contrário irá

tomar o valor 1. Para que estas condições nas variáveis y sejam satisfeitas, o seguinte conjunto de restrições deve ser imposto no modelo:

$$T_{s,t} - T \max_t \leq Ly_{s,t} \quad (23)$$

$$T_{s,t} - T \min_t \geq -Ly_{s,t} \quad (24)$$

$$(T_{s,t} - T \max_t - \varepsilon)(T_{s,t} - T \min_t + \varepsilon)y_{s,t} \geq 0 \quad (25)$$

em que, L é um número positivo suficientemente grande ($L=50$) e ε é um número positivo relativamente pequeno ($\varepsilon=1,0e-04$).

Para verificar se cada simulação s possui, para cada estação (aquecimento e arrefecimento), uma percentagem P de instantes de tempo que estão fora dos limites de conforto, dois novos vetores w e v de variáveis binárias são incorporados no modelo. Cada variável w_s irá assumir o valor 1, se a simulação s tiver menos do que $P\%$ de instantes de tempo em desconforto em cada estação, caso contrário irá tomar o valor 0. O vetor v está relacionado apenas com a estação de arrefecimento e se a simulação s tiver menos do que $P\%$ de instantes de tempo em desconforto, nessa estação, então a componente s de v , v_s irá assumir o valor 1.

O conjunto de restrições que é explicitado a seguir define as condições referidas no parágrafo anterior.

$$w_s \leq 1 + \bar{P} - \frac{1}{|Ar|} \sum_{t \in Ar} y_{s,t} \quad (26)$$

$$w_s \leq 1 + \bar{P} - \frac{1}{|Aq|} \sum_{t \in Aq} y_{s,t} \quad (27)$$

$$v_s \left(1 + \frac{1}{|Ar|} \right) \geq \bar{P} - \frac{1}{|Ar|} \left(\sum_{t \in Ar} y_{s,t} - 1 \right) \quad (28)$$

$$(w_s - v_s + 1) \left(1 + \frac{1}{|Aq|} \right) \geq \bar{P} - \frac{1}{|Aq|} \left(\sum_{t \in Aq} y_{s,t} - 1 \right) \quad (29)$$

em que $\bar{P} = \frac{P}{100}$.

De salientar que cada componente do vetor w que possua o valor 1 corresponde a uma simulação onde o conforto térmico, nas condições estabelecidas, está assegurado.

Para completar a formulação matemática do modelo basta acrescentar as restrições que obrigam a que a solução ótima x_s seja uma simulação que para além de minimizar o consumo energético garanta o conforto térmico, isto é:

$$x_s \leq w_s \quad (30)$$

De acordo com a descrição das restrições e da função objetivo apresentadas neste subcapítulo, o modelo pode ser formulado como o seguinte programa linear 0-1.

$$\text{Minimizar } \sum_s \left(x_s \sum_t E_{s,t} \right) \quad (31)$$

Sujeito a:

$$\sum_s x_s = 1 \quad (32)$$

$$T_{s,t} - T \max_t \leq L y_{s,t} \quad (33)$$

$$T_{s,t} - T \min_t \geq -L y_{s,t} \quad (34)$$

$$(T_{s,t} - T \min_t + \varepsilon)(T_{s,t} - T \max_t - \varepsilon) y_{s,t} \geq 0 \quad (35)$$

$$w_s \leq 1 + \bar{P} - \frac{1}{|Ar|} \sum_{t \in Ar} y_{s,t} \quad (36)$$

$$w_s \leq 1 + \bar{P} - \frac{1}{|Aq|} \sum_{t \in Aq} y_{s,t} \quad (37)$$

$$v_s \left(1 + \frac{1}{|Ar|} \right) \geq \bar{P} - \frac{1}{|Ar|} \left(\sum_{t \in Ar} y_{s,t} - 1 \right) \quad (38)$$

$$(w_s - v_s + 1) \left(1 + \frac{1}{|Aq|} \right) \geq \bar{P} - \frac{1}{|Aq|} \left(\sum_{t \in Aq} y_{s,t} - 1 \right) \quad (39)$$

$$x_s \leq w_s \quad (40)$$

$$x_s \in \{0,1\}, y_{s,t} \in \{0,1\}, v_s \in \{0,1\} \text{ e } w_s \in \{0,1\} \quad (41)$$

com $\bar{P} = \frac{P}{100}$, $s \in \{1, \dots, Ns\}$ e $t \in \{1, \dots, Nt\}$

Neste programa de otimização os parâmetros do problema têm os seguintes significados (Quadro 57).

Quadro 57 – Parâmetros do modelo de otimização.

Parâmetros do modelo de otimização
Nt – número de instantes de tempo
Ns – número de simulações
$E_{s,t}$ – consumo de energia na simulação s no instante t [W]
$Text_t$ – Temperatura do ar exterior no instante t [W]
$T_{s,t}$ – temperatura do ar interior na simulação s no instante t [°C]
$Tmax_t$ – temperatura máxima que a temperatura do ar interior poderá atingir no instante de tempo t [°C]
$Tmin_t$ – temperatura mínima que a temperatura do ar interior poderá atingir no instante de tempo t [°C]
Ar – instantes de tempo da estação de arrefecimento – Verão
Aq – instantes de tempo da estação de aquecimento – Inverno
P – percentagem de instantes de tempo que pode estar fora dos limites de conforto em cada estação [%]
ε – pequena tolerância 1,0E-6
L – valor fictício, 50°C

Convém salientar que os parâmetros $Tmin_t$ e $Tmax_t$, apresentados no Quadro 57, dependem, quer do instante de tempo, quer do Modelo A ou B considerado.

Assim para o modelo A, que respeita os limites da Norma EN 15251, tem-se:

$$Tmax_t = 18,8 + 0,33Text_t + kk, t \in Ar \quad (42)$$

$$Tmin_t = \begin{cases} 20, & t \in Aq \\ 18,8 + 0,33Text_t - kk, & t \in Ar \end{cases} \quad (43)$$

em que, $kk = 3$ (categoria II da Norma EN 15251 [28]).

Para o Modelo B, mantém-se para a estação de aquecimento as mesmas restrições do período de aquecimento do modelo A. No entanto, para a estação de arrefecimento, o limite inferior é de 15°C e o superior de 26°C, desta forma tem-se:

$$Tmax_t = 26, t \in Ar \quad (44)$$

e,

$$Tmin_t = \begin{cases} 20, & t \in Aq \\ 15, & t \in Ar \end{cases} \quad (45)$$

As variáveis binárias do problema e as suas definições são apresentadas a seguir:

- x_s , variável que toma o valor 1 ou 0 conforme a simulação s é ótima ou não;
- $y_{s,t}$, variável que toma o valor 0 se para a simulação s , a temperatura do ar interior no instante de tempo t satisfaz os limites de conforto, caso contrário toma o valor 1;

- w_s , variável que toma o valor 1 se a simulação s tem menos do que $P\%$ de instantes de tempo em desconforto para cada uma das estações consideradas, caso contrário toma o valor 0;
- v_s , variável que se a simulação s tem menos do que $P\%$ de tempo em desconforto na estação de arrefecimento toma o valor 1.

Pode concluir-se que o programa contém $3 N_s N_t + 5 N_s + 1$ restrições e $N_s (N_t + 3)$ variáveis binárias. Além disso como o problema é um programa linear 0-1 é possível usar um código de programação linear inteira mista para a sua resolução, como por exemplo o solver Cplex da coleção GAMS que é utilizado neste estudo.

De seguida apresenta-se um exemplo de aplicação do modelo de otimização desenvolvido.

6.2.4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Elaborou-se um exemplo limitado de aplicação, para facilitar a perceção do modelo de otimização, uma vez que, os resultados das simulações elaboradas no WUFI Plus possuem um tamanho considerável, 8760 registos de temperatura do ar e consumo de energia horários, o que torna complexo a apresentação de tais resultados.

Considerou-se uma amostra de vinte instantes, dez para a estação de aquecimento e dez para a estação de arrefecimento para um conjunto de quatro cenários reabilitados. Nesta aplicação optou-se por considerar o Modelo B. Neste modelo a estação de aquecimento, tem um limite mínimo de conforto de 20°C. Na estação de arrefecimento o limite mínimo é de 15°C e o máximo 26°C. Consideraram-se duas categorias de desconforto, 10% e 50%.

No Quadro 58 apresentam-se os valores da temperatura do ar interior e da energia consumida (arredondado a 2 casas decimais) de cada cenário, fornecidos ao modelo de otimização. Convém referir que os valores a negrito estão fora dos limites de conforto.

Como se pode observar, o cenário reabilitado 1 possui 2 instantes fora dos limites de conforto na estação de aquecimento (20% de desconforto no Inverno e 0% no Verão), o cenário reabilitado 2 possui 1 instante fora dos limites de conforto de cada estação (10% de desconforto para o Inverno e para o Verão), o cenário reabilitado 3 possui 3 instantes fora dos limites de conforto na estação de arrefecimento (0% de desconforto no Inverno e 30% de desconforto no Verão) e o cenário reabilitado 4 possui 5 instantes fora dos limites de desconforto na estação de aquecimento e 3 na estação de arrefecimento (50% de desconforto no Inverno e 30% no Verão). Em termos energéticos, o cenário reabilitado 3 é o que possui um consumo energético mais elevado, 11,60 Wh, seguido do cenário 2 com 9,60 Wh, depois o cenário 1 com 3,72 Wh finalmente o cenário 4 com um consumo nulo.

Quadro 58 – Temperatura do ar interior e energia consumida de quatro cenários exemplificativos.

	Instantes [horas]	Temperatura do ar interior dos cenários reabilitados [°C]				Energia consumida dos cenário reabilitados [Wh]			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Estação de aquecimento	1	20,50	21,00	22,00	21,40	0,96	0,99	1,19	0,00
	2	21,00	20,50	21,50	21,00	0,90	0,93	1,13	0,00
	3	20,80	20,20	21,00	20,80	0,00	0,93	1,13	0,00
	4	20,50	20,50	21,50	20,50	0,00	0,96	1,16	0,00
	5	19,80	21,00	22,10	20,10	0,00	0,99	1,19	0,00
	6	20,30	21,00	22,30	19,80	0,96	0,99	1,19	0,00
	7	20,50	20,50	22,50	19,60	0,90	0,93	1,13	0,00
	8	20,20	19,50	23,00	19,50	0,00	0,93	1,13	0,00
	9	20,10	20,20	23,40	19,60	0,00	0,96	1,16	0,00
	10	19,90	21,00	24,50	19,50	0,00	0,99	1,19	0,00
Estação de arrefecimento	11	20,40	24,50	26,30	20,20	0,00	0,00	0,00	0,00
	12	21,00	25,50	26,15	20,80	0,00	0,00	0,00	0,00
	13	25,00	26,50	26,10	24,80	0,00	0,00	0,00	0,00
	14	25,50	25,99	25,99	26,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	15	24,00	24,00	24,00	26,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	16	23,00	23,00	23,00	26,60	0,00	0,00	0,00	0,00
	17	25,00	25,00	25,00	24,80	0,00	0,00	0,00	0,00
	18	24,50	24,50	24,50	24,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	19	25,50	24,00	25,50	25,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	20	25,00	25,00	25,00	24,80	0,00	0,00	0,00	0,00
					$\Sigma = 3,72$	$\Sigma = 9,60$	$\Sigma = 11,60$	$\Sigma = 0,00$	

Os resultados obtidos para cada categoria de desconforto são visualizados através de um ficheiro (.txt) de saída e que se apresentam nas Figuras 182 (categoria de desconforto 10%) e Figura 183 (categoria de desconforto 50%).

```

Percentagem    10.00

SOLUCAO OPTIMA:

Simulacao  2

Valor da funcao objectivo =    9.59546

Instantes de tempo onde nao sao satisfeitos os limites de conforto:

    8
    13

SIMULACOES ADMISSIVEIS (AS SOLUCOES QUE VERIFICAM TODAS AS RESTRICOES):

Simulacao  f.o.      f.o-opt Percent  Aq/NT  Ar/NT  Aq/|Aq|  Ar/|Ar|
    2        9.5955    0.0000  10.00   5.00   5.00  10.00  10.00
    
```

Fig.182 – Resultados do exemplo de aplicação para a categoria de desconforto 10%.

```

Percentagem    50.00

SOLUCAO OPTIMA:

Simulacao  4

Valor da funcao objectivo =    0.00000

Instantes de tempo onde nao sao satisfeitos os limites de conforto:

    6
    7
    8
    9
   14
   15
   16
   10

SIMULACOES ADMISSIVEIS (AS SOLUCOES QUE VERIFICAM TODAS AS RESTRICOES):

Simulacao  f.o.      f.o-opt Percent  Aq/Nt  Ar/Nt  Aq/|Aq|  Ar/|Ar|
    4        0.0000    0.0000  40.00  25.00  15.00  50.00  30.00
    1        3.7200    3.7200  10.00  10.00   0.00  20.00   0.00
    2        9.5955    9.5955  10.00   5.00   5.00  10.00  10.00
    3       11.5955   11.5955  15.00   0.00  15.00   0.00  30.00
    
```

Fig.183 – Resultados do exemplo de aplicação para a categoria de desconforto 50%.

Como se evidencia nas figuras anteriores o ficheiro indica:

- “Percentagem” – percentagem de desconforto admissível;
- “SOLUCAO OTIMA” – indica qual o cenário reabilitado ótimo;
- “Valor da funcao objectivo” – valor referente ao consumo energético da solução ótima;
- “Instantes de tempo onde nao sao satisfeitos os limites de conforto” – horas em que a temperatura do ar interior ultrapassou os limites de conforto;
- SIMULACOES ADMISSIVEIS (AS SOLUCOES QUE VERIFICAM TODAS AS RESTRICOES) – todos os cenários reabilitados que verificam as restrições estipuladas por ordem crescente de consumo energético;
- “Simulação” – identifica, através do número, cenário reabilitado admissível;
- *f.o.*, função objetivo – somatório da energia consumida [Wh];
- *f.o – opt.*, Diferença entre o valor da função objetivo de um cenário reabilitado (simulação) com o valor da função objetivo da solução ótima [Wh];
- *Percent*, percentagem de instantes fora dos limites de conforto durante todo o ano (resultados globais) [%];
- *Aq/Nt*, percentagem de instantes de tempo, da estação de aquecimento, fora dos limites de conforto nos resultados globais [%];
- *Ar/Nt*, percentagem de instantes de tempo, da estação de arrefecimento, fora dos limites de conforto nos resultados globais [%];
- *Aq/|Aq|*, percentagem de instantes de tempo, na estação de aquecimento, fora dos limites de conforto [%];
- *Ar/|Ar|*, percentagem de instantes de tempo, na estação de arrefecimento, fora dos limites de conforto [%].

Verifica-se que o modelo cumpre o objetivo principal proposto que é minimizar o consumo energético para uma dada categoria de desconforto de Inverno e Verão, através de um processo rápido. O tempo de computação é diminuto, como se refere nos quadros de resultados do subcapítulo seguinte.

A minimização da energia, objetivo principal, é bem elucidativa no exemplo da Figura 183, em que se impôs uma percentagem de desconforto de 50%. Em todos os cenários considerados as restrições impostas pelo modelo de otimização são sempre verificadas, uma vez que, a percentagem de instantes de desconforto de cada cenário, para cada estação, é não superior a 50%. Porém, o cenário reabilitado 4, apesar de ter o maior número de instantes fora dos limites de conforto, é o que possui menor consumo energético (0 Wh). Logo este cenário é o ótimo para P=50%.

Quando a percentagem de desconforto passa para 10%, os cenários reabilitados 1, 3 e 4 não satisfazem as restrições impostas pelo modelo de otimização, uma vez que, possuem mais do que 10% de instantes de tempo em desconforto, pelo menos para uma das estações. O único cenário que satisfaz essas restrições é o cenário 2 cujo consumo energético é de 9,6 Wh.

No subcapítulo seguinte apresentam-se os resultados experimentais para as diversas cidades estudadas.

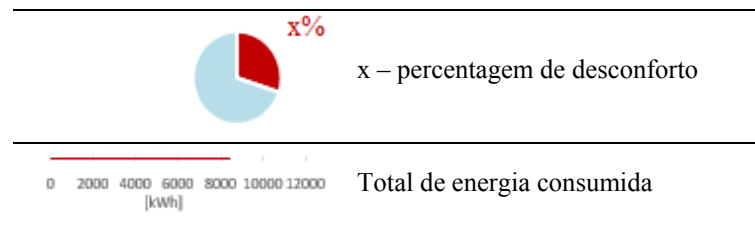
6.3. RESULTADOS DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A experiência computacional foi realizada num computador intel (R) Core (TM) 2 DUO CPU 2.4 GHZ com 2 GB de memória RAM. Para resolver o problema de programação linear 0 – 1 foi utilizado o solver CPLEX da coleção GAMS.

Os resultados apresentados têm por base as simulações efetuadas no capítulo 5. Os resultados dividem-se em três categorias de exigência de conforto, 1%, 5% e 10%. Estas percentagens são relativas ao número de horas que os limites de conforto podem ser ultrapassados na estação de aquecimento e na estação de arrefecimento. São apresentados os resultados para as cinco localizações consideradas – Porto, Lisboa, Bragança, Coimbra e Évora.

Para tornar mais perceptíveis os resultados do modelo, no Quadro 59, apresenta-se o significado dos símbolos relativos à percentagem de desconforto e ao consumo energético para cada cenário reabilitado no Modelo A e B.

Quadro 59 – Símbolos da percentagem de desconforto e do consumo energético dos cenários reabilitados.



6.3.1. RESULTADOS DO MODELO A

Os resultados obtidos com o Modelo A refletem o constatado no capítulo 5. Ou seja, o método de avaliação de conforto da Norma EN 15251 [28] é desajustado para a estação de arrefecimento. A enorme flexibilização da Norma [28] quanto à temperatura máxima de Verão faz com que o cenário reabilitado com temperaturas mais elevadas (cenário reabilitado 8, com isolamento e 1 RPH de ventilação noturna de Verão), seja o ótimo, do ponto de vista energético somado de Inverno e Verão, nas cidades de Lisboa, Coimbra e Évora. Nas cidades do Porto e Bragança nenhum cenário reabilitado respeitou os níveis de exigência de conforto estabelecidos. Assim sendo, a título de exemplo no Quadro 60, apresenta-se os resultados da cidade de Lisboa.

Quadro 60 – Resultados para Lisboa utilizando o Modelo A.

Cidade	Soluções	Resultados Modelo A (tempo de computação 2,9 segundos)			
		Categoria 1 – 1% de tempo desconforto	Categoria 2 – 5% de tempo desconforto	Categoria 3 – 10% de desconforto	
Lisboa	Ótima	Cenário reabilitado 8	Estação de aquec. 0,00% / 100,00%	Estação de aquec. 0,00% / 100,00%	Estação de aquec. 0,00% / 100,00%
			Estação de arref. 0,07% / 99,93%	Estação de arref. 0,07% / 99,93%	Estação de arref. 0,07% / 99,93%
	Admissível	Cenário reabilitado 11	Estação de aquec. 0,00% / 100,00%	Estação de aquec. 0,00% / 100,00%	Estação de aquec. 0,00% / 100,00%
			Estação de arref. 9,19% / 90,81%	Estação de arref. 9,19% / 90,81%	Estação de arref. 9,19% / 90,81%

(1) Desconforto relativo ao não cumprimento do limite inferior de conforto.

Apenas se apresenta os resultados do Modelo A para a cidade de Lisboa, atendendo ao facto de não se considerar adequado.

O cenário de reabilitação ótimo, usando o Modelo A, apresenta isolamento na caixa-de-ar, sem ventilação noturna e aquecimento contínuo, o que só se justifica pela fragilidade do modelo de conforto utilizado que despreza o Verão.

6.3.2. RESULTADOS DO MODELO B

Nos Quadros 61, 62, 63, 64 e 65 apresentam-se os resultados para o Modelo B das cidades estudadas.

Quadro 61 – Resultados para o Porto utilizando o Modelo B.

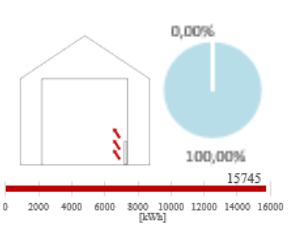
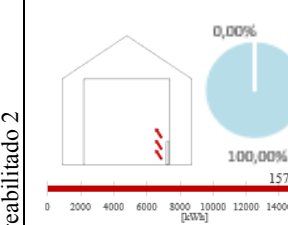
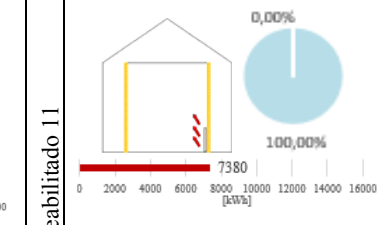
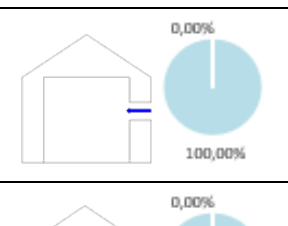
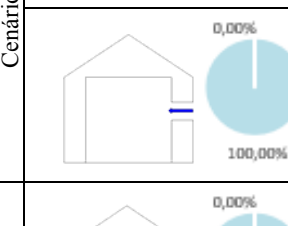
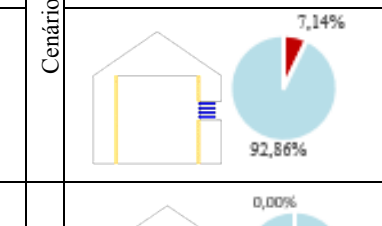
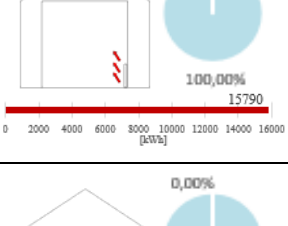
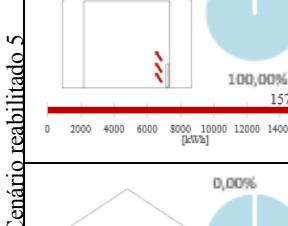
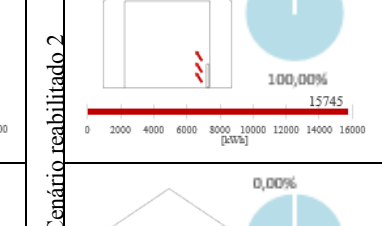
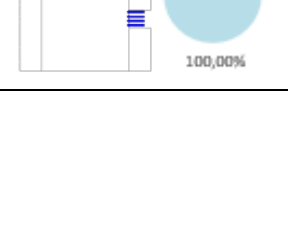

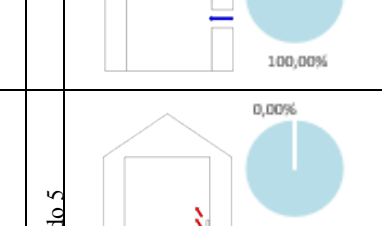
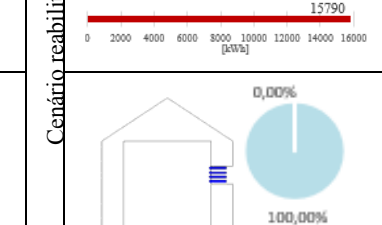

Cidade	Soluções	Resultados Modelo B (tempo de computação 3,5 segundos)			
		Categoria 1 – 1% de desconforto	Categoria 2 – 5% de desconforto	Categoria 3 – 10% de desconforto	
Porto	Ótima	Estação de aquec.	<p>Cenário reabilitado 8</p>	<p>Cenário reabilitado 8</p>	<p>Cenário reabilitado 8</p>
		Estação de arref.	<p>Cenário reabilitado 8</p>	<p>Cenário reabilitado 8</p>	<p>Cenário reabilitado 8</p>
	Admissíveis	Estação de aquec.	<p>Cenário reabilitado 11</p>	<p>Cenário reabilitado 11</p>	<p>Cenário reabilitado 11</p>
		Estação de arref.	<p>Cenário reabilitado 11</p>	<p>Cenário reabilitado 11</p>	<p>Cenário reabilitado 11</p>
		Estação de aquec.	<p>Cenário reabilitado 2</p>	<p>Cenário reabilitado 2</p>	<p>Cenário reabilitado 2</p>
		Estação de arref.	<p>Cenário reabilitado 2</p>	<p>Cenário reabilitado 2</p>	<p>Cenário reabilitado 2</p>
		Estação de aquec.	<p>Cenário reabilitado 5</p>	<p>Cenário reabilitado 5</p>	<p>Cenário reabilitado 5</p>
		Estação de arref.	<p>Cenário reabilitado 5</p>	<p>Cenário reabilitado 5</p>	<p>Cenário reabilitado 5</p>

Dos resultados obtidos para o Porto constatou-se o seguinte:

- A solução ótima corresponde a soluções com isolamento na caixa-de-ar, aquecimento contínuo e sem ventilação, qualquer que seja a categoria de conforto (1%, 5% e 10%);
- Há três soluções admissíveis, cujo consumo de energia varia de 1 para 2;
- O cenário reabilitado 11 (isolamento, aquecimento contínuo e ventilação noturna de Verão), embora, não seja considerado ótimo, é uma boa alternativa a ter em consideração, pois é diminuta, a diferença, entre o consumo energético deste cenário e o do cenário ótimo.

No Quadro 62 apresentam-se os resultados do Modelo B para a região de Bragança.

Quadro 62 – Resultados para Bragança utilizando o Modelo B.

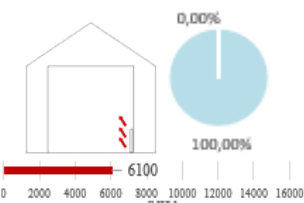
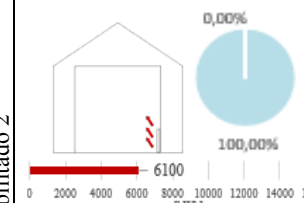
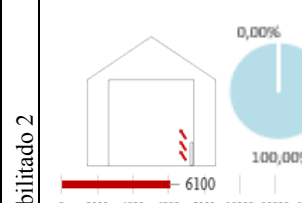
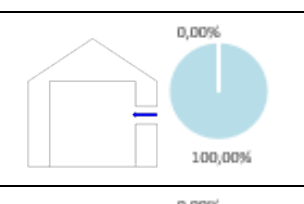
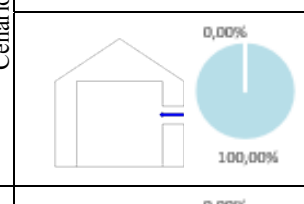
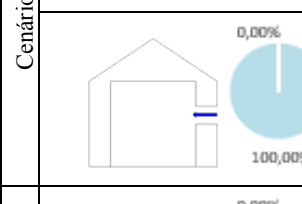
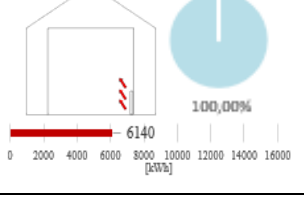
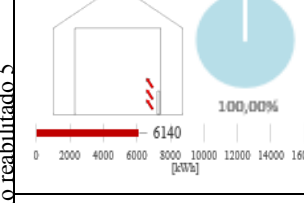
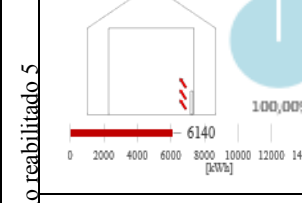
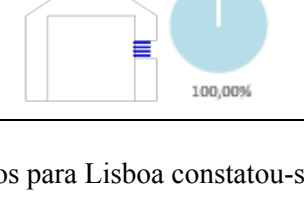

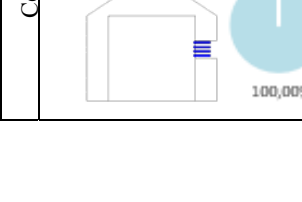
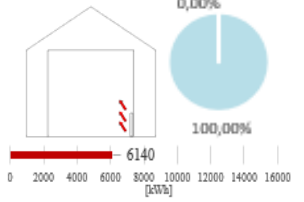
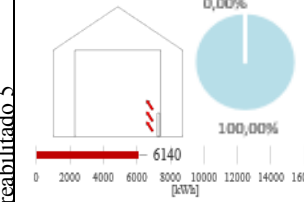
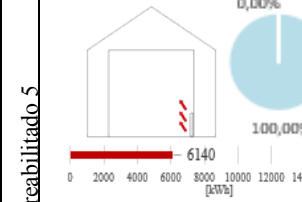
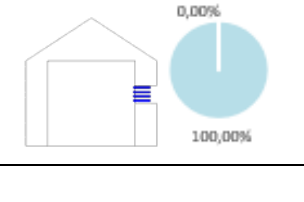
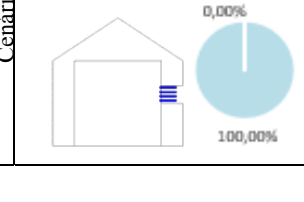
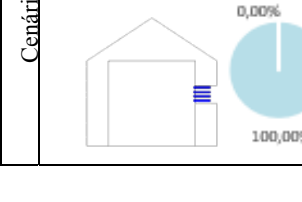
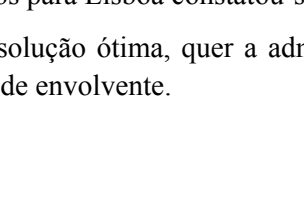
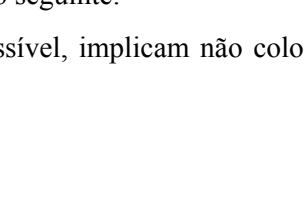
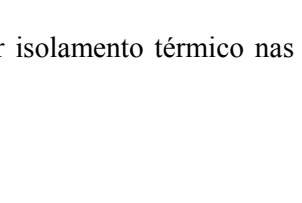


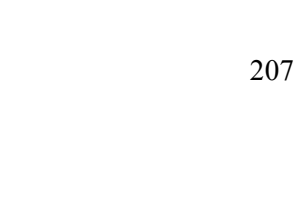
Cidade	Soluções		Resultados Modelo B (tempo de computação 4,4 segundos)		
			Categoria 1 – 1% de desconforto	Categoria 2 – 5% de desconforto	Categoria 3 – 10% de desconforto
Bragança	Ótima	Estação de aquec.	Cenário reabilitado 2 	Cenário reabilitado 2 	Cenário reabilitado 11 
		Estação de arref.	Cenário reabilitado 2 	Cenário reabilitado 2 	Cenário reabilitado 11 
	Admissíveis	Estação de aquec.	Cenário reabilitado 5 	Cenário reabilitado 5 	Cenário reabilitado 2 
		Estação de arref.	Cenário reabilitado 5 	Cenário reabilitado 5 	Cenário reabilitado 2 
		Estação de aquec.			Cenário reabilitado 5 
		Estação de arref.			Cenário reabilitado 5 

Dos resultados obtidos para Bragança constatou-se o seguinte:

- Apenas os cenários reabilitados sem isolamento nas paredes exteriores, com regime de aquecimento em contínuo e ventilação noturna de Verão (4 RPH), são os aceitáveis para as categorias de conforto mais exigentes;
- Em Bragança o Verão tem um peso muito significativo no conforto, o que condiciona a solução da envolvente;
- Para se obter conforto no Verão é necessário maximizar a inércia térmica, isto é, não colocar isolamento nas paredes. No entanto, do ponto de vista do consumo energético, isolar é fundamental;
- Isolando é necessário ventilação noturna de Verão (4 RPH).

No Quadro 63 apresentam-se os resultados do modelo B para a região de Lisboa.

Quadro 63 – Resultados para Lisboa utilizando o Modelo B.

Cidade	Soluções		Resultados Modelo B (tempo de computação 2,8 segundos)					
			Categoria 1 – 1% de desconforto		Categoria 2 – 5% de desconforto		Categorial 3 – 10% de desconforto	
Lisboa	Ótima	Estação de aquec.	Cenário reabilitado 2					
								
		Estação de arref.	Cenário reabilitado 2					
								
	Admissíveis	Estação de aquec.	Cenário reabilitado 5					
								
		Estação de arref.	Cenário reabilitado 5					
								

Dos resultados obtidos para Lisboa constatou-se o seguinte:

- Quer a solução ótima, quer a admissível, implicam não colocar isolamento térmico nas paredes de envolvente.

No Quadro 64 apresentam-se os resultados do Modelo B para a região de Coimbra.

Quadro 64 – Resultados para Coimbra utilizando o Modelo B.

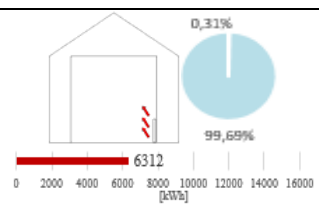
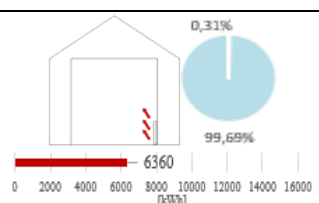
Cidade	Soluções	Resultados Modelo B (tempo de computação 3,1 segundos)			
		Categoria 1 – 1% de desconforto	Categoria 2 – 5% de desconforto	Categoria 3 – 10% de desconforto	
Coimbra	Ótima	Estação de aquec.			
		Estação de arref.			
	Admissíveis	Estação de aquec.			
		Estação de arref.			
		Estação de aquec.			
		Estação de arref.			

Dos resultados obtidos para Coimbra constatou-se o seguinte:

- Para um nível de conforto mais exigente o cenário de reabilitação ótimo não implica isolamento nem ventilação noturna, contudo, é necessário aquecimento contínuo. Para os restantes níveis o cenário ótimo possui isolamento, aquecimento contínuo e ventilação noturna de Verão (4 RPH);
- Isolando é necessário ventilação noturna de Verão (4 RPH).

No Quadro 65 apresentam-se os resultados do Modelo B para a região de Évora.

Quadro 65 – Resultados para Évora utilizando o Modelo B.

Cidade	Soluções		Resultados Modelo B (tempo de computação 3,0 segundos)		
			Categoria 1 – 1% de desconforto	Categoria 2 – 5% de desconforto	Categoria 3 – 10% de desconforto
Évora	Ótima	Estação de aquec.			Cenário reabilitado 2 
		Estação de arref.			
	Admissíveis	Estação de aquec.			Cenário reabilitado 5 
		Estação de arref.			

Dos resultados obtidos para Évora constatou-se o seguinte:

- Apenas na categoria 3 de conforto existem cenários que respeitam os limites estipulados;
- Níveis de conforto elevado exigem climatização;
- A ventilação noturna apenas diminui em cerca de 1% o desconforto.

6.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O modelo de otimização desenvolvido demonstrou ser uma ferramenta útil para a comparação de diferentes soluções de reabilitação de edifícios.

Dos resultados obtidos pode concluir-se que:

- A formulação do modelo como um programa linear 0 – 1, quando o problema é admissível, fornece sempre uma solução ótima associada a um cenário reabilitado que satisfaz os limites de conforto e que possui o menor consumo energético;
- O solver CPLEX utilizado para resolver estes problemas exigiu sempre um reduzido esforço computacional;
- O modelo B, embora correspondendo a um ajuste à Norma EN 15251 [28] com o objetivo de dar mais peso ao Verão pode não ser o mais adequado para fazer estudos de otimização que consideram o período de Verão e Inverno conjuntamente;
- Não estão ainda reunidas as condições para desenvolver estudos de otimização de consumo de energia com base em categorias de conforto;
- O isolamento térmico de paredes de elevada espessura e massa é favorável do ponto de vista da energia para aquecimento, mas conduz a uma diminuição do conforto de Verão. Deve referir-se que a quantificação deste princípio conduz a resultados diversos para as cidades em estudo;
- A ventilação noturna no Verão é recomendável em locais de grande amplitude térmica diária, sendo o seu benefício tanto maior quanto menor é a inércia.

A ocupação contínua ou intermitente (Verão ou Inverno) dos edifícios rurais, exige uma abordagem diferenciada na definição das soluções de reabilitação da envolvente.

7. CONCLUSÕES

7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os edifícios rurais portugueses constituem um legado arquitetónico, social e cultural das regiões onde se inserem, refletindo os costumes e as vivências dos seus habitantes, fazendo parte da história portuguesa. Contudo, estes edifícios, que de acordo com os Censos 2011 [5], são cerca de 470 mil em Portugal Continental, carecem, na sua grande maioria, de obras de reabilitação. Para além disso, a crise económica que o País atravessa pode levar a um regresso das pessoas ao mundo rural, procurando atividades como a agricultura, pecuária e turismo

É assim fundamental estudar as formas de reabilitação tendo em conta o conforto térmico e a eficiência energética, procurando implementar soluções construtivas, energeticamente sustentáveis, mas que favoreçam o conforto térmico nas condições correntes de utilização em Portugal.

Esta abordagem torna-se, ainda mais importante, devido à falta de um regulamento específico que enquadre estes edifícios.

Assim sendo desenvolveu-se o presente estudo de forma a cumprir os seguintes objetivos principais:

- Caracterizar experimentalmente o desempenho térmico de edifícios rurais reabilitados;
- Validação do programa de simulação dinâmica (com a confrontação dos resultados numéricos com os resultados experimentais *in situ*);
- Simular o comportamento térmico de edifícios rurais reabilitados, em regime dinâmico: através de um programa higrotérmico avançado, WUFI Plus;
- Realização de estudos paramétricos com base no programa de simulação higrotérmica (WUFI Plus) visando avaliar o impacto dos fatores mais importantes no comportamento dos edifícios rurais reabilitados, nomeadamente, o conforto térmico e consumo energético;
- Otimização do comportamento térmico de edifícios rurais reabilitados através do código de modelação matemática e otimização GAMS.

7.2. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

As principais conclusões, decorrentes das tarefas desenvolvidas ao longo da tese de doutoramento, são as seguintes:

- Medições experimentais:
 - A medição da temperatura do ar interior, para a estação de aquecimento, demonstrou que o isolamento, sem um regime de aquecimento contínuo, não traz benefícios evidentes. No período de aquecimento em flutuação livre verificou-se uma temperatura média de, 14,1°C no Apartamento 1 (com isolamento na caixa-de-ar das paredes duplas) e de 15,0°C, no Apartamento 2 (sem isolamento). No período de aquecimento em regime intermitente, a temperatura média registada foi de, 15,6°C no Apartamento 1 e 14,5°C no Apartamento 2;
 - A medição da temperatura do ar interior na estação de arrefecimento, mostrou um comportamento bastante similar entre os dois apartamentos. A temperatura média obtida foi um pouco mais elevada no Apartamento 2 (mais 0,4°C) no entanto, o Apartamento 1 apresentou uma temperatura máxima mais elevada (1°C) e uma amplitude térmica superior. Verifica-se assim que o Apartamento 1 possui um desempenho térmico mais irregular, confirmando-se a sua maior suscetibilidade em relação à flutuação da temperatura exterior, fruto da sua menor inércia;
 - O processo de ventilação noturna demonstrou ser eficaz em ambos os apartamentos. O desfaseamento temporal médio, entre a temperatura máxima exterior e interior, é da mesma ordem de grandeza para os dois apartamentos, 3 horas, assim como, o amortecimento térmico médio, 5°C;
 - A quantificação do tempo de desconforto, face aos critérios de conforto da Norma EN 15251 [28], mostrou que sem aquecimento e com aquecimento intermitente o conforto térmico não é alcançado;
 - Na estação de arrefecimento os resultados mostraram uma permissividade demasiado elevada por parte da Norma EN 15251 [28]. Verificando-se que podem existir temperaturas de 30°C e estarem dentro dos limites de conforto;
 - A medição do fluxo de calor de uma parede de elevada espessura e massa, demonstrou que os valores do coeficiente de transmissão térmica calculados através do ITE 50 [47] não são adequados, devendo utilizar-se os valores do ITE 54 [48], para edifícios existentes destas características;
- A validação do modelo, através da comparação dos resultados experimentais com os resultados simulados numericamente da temperatura do ar interior, é muito satisfatória. Em termos médios, a diferença entre a temperatura do ar interior das medições experimentais e da simulação, é inferior a 0,3°C;
- Estudo de sensibilidade:
 - O isolamento na caixa-de-ar das paredes de elevada espessura e massa, demonstrou, no Inverno, beneficiar o ambiente interior, contudo este benefício foi sempre inferior a 2°C (ver Quadro 66);
 - A utilização de um sistema de aquecimento, em regime intermitente, apesar de melhorar o desempenho térmico, não proporciona níveis de conforto aceitáveis, verificando-se percentagens de tempo de desconforto acima de 75% para todas as localizações (ver Quadro 66);

- Na estação de arrefecimento, o isolamento, das paredes de elevada espessura, é nefasto para o conforto térmico. A percentagem de tempo de desconforto, com isolamento na caixa-de-ar, é demasiado elevada, superior a 8% (ver Quadro 66);
- O aumento da temperatura, na estação de arrefecimento, devido ao isolamento na caixa-de-ar, nos cenários com uma ventilação noturna de 1 RPH são superiores a 2,5°C. Nos cenários com 4 RPH são superiores a 2,0°C (ver Quadro 66);
- Do ponto de vista energético, com um regime de aquecimento contínuo, é fundamental isolar as paredes. As diferenças registadas, do consumo energético do cenário reabilitado sem isolamento face ao cenário reabilitado com isolamento, são significativas (sendo a diferença máxima para Bragança, 8408 kWh), como se pode constatar nos resultados do Quadro 66;
- A quantificação do Índice de Desconforto Térmico de Inverno, IDT – I, que quantifica o somatório de graus-hora abaixo da temperatura de conforto de referência (20°C), demonstra que o isolamento térmico das paredes de elevada espessura e massa, proporciona um desempenho térmico mais eficaz, para a estação de aquecimento, como mostram os resultados do Quadro 66;
- A quantificação do Índice de Desconforto Térmico de Verão IDT – V, que quantifica o somatório de graus-hora acima da temperatura de conforto de referência (25°C), demonstra que o isolamento térmico na caixa-de-ar, das paredes de elevada espessura e massa, proporciona um desempenho térmico menos eficaz para a estação de arrefecimento, como mostram os resultados do Quadro 66;
- A quantificação do desconforto térmico, da estação de aquecimento, face aos critérios de conforto da Norma EN 15251 [28] (categoria II de conforto), demonstrou que, para os cenários sem aquecimento e com aquecimento intermitente, o desconforto é extremamente elevado, reforçando a ideia que só com aquecimento em regime contínuo há conforto e que o regime de aquecimento intermitente não é adequado;
- A quantificação do desconforto térmico, dos cenários reabilitados considerados, na estação de arrefecimento, demonstrou que a Norma EN 15251 [28] pode ser demasiado permissiva para avaliação do conforto no Verão, questionando-se se não deve ser reavaliada;
- A introdução de um caudal de ventilação noturna, de 4 RPH, na estação de arrefecimento, demonstrou ser eficiente, principalmente nos cenários com menor inércia. Os benefícios proporcionados refletem-se na diminuição da percentagem de tempo de desconforto, temperatura média e IDT – V (ver Quadro 66);
- A comparação entre a temperatura média radiante calculada utilizando as temperaturas superficiais (paredes, tetos e pavimentos) fornecidas pelo WUFI Plus e a temperatura do ar interior simulada no WUFI Plus demonstrou que a diferença é diminuta. A diferença máxima na estação de aquecimento e arrefecimento foi de 0,7°C, sendo perfeitamente válido o uso da temperatura do ar interior na presente tese.

No Quadro 66 apresentam-se os resultados de suporte às conclusões apresentadas.

Quadro 66 – Síntese dos resultados do estudo de sensibilidade.

Isolamento	Regime de aquecimento	Ventilação noturna – V [RPH]	Porto							Bragança							Lisboa							Coimbra							Évora						
			% de tempo de desconforto – Inverno	% de tempo de desconforto – Verão	Temperatura média – Inverno [°C]	Temperatura média – Verão [°C]	Consumo energético [kWh/m ²]	IDT – I [°Ch]	IDT – V [°Ch]	% de tempo de desconforto – Inverno	% de tempo de desconforto – Verão	Temperatura média – Inverno [°C]	Temperatura média – Verão [°C]	Consumo energético [kWh/m ²]	IDT – I [°Ch]	IDT – V [°Ch]	% de tempo de desconforto – Inverno	% de tempo de desconforto – Verão	Temperatura média – Inverno [°C]	Temperatura média – Verão [°C]	Consumo energético [kWh/m ²]	IDT – I [°Ch]	IDT – V [°Ch]	% de tempo de desconforto – Inverno	% de tempo de desconforto – Verão	Temperatura média – Inverno [°C]	Temperatura média – Verão [°C]	Consumo energético [kWh/m ²]	IDT – I [°Ch]	IDT – V [°Ch]							
Sem isolamento	Sem aquecimento	1	100	0	13,3	20,4	-	32608	0	100	5	11	20,8	-	52495	10	100	5	13,6	22,8	-	24885	16	100	2	13,2	21,8	-	29022	2	100	20	12,9	23,2	-	29420	305
		4		0		19,9		0	2		20,2		0		2	22,1		0		1		21,2	0		12		22,5		174								
	Aquecimento contínuo	1	0	0	20	20,4	109	0	0	0	5	20	20,8	240	0	10	0	5	20	22,8	93	0	16	0	2	20	21,8	119	0	2	0	20	20	23,2	96	0	305
		4		0		19,9		0	2		20,2		0		2	22,1		0		1		21,2	0		12		22,5		174								
	Aquecimento intermitente	1	92	0	17,5	20,4	-	12235	0	92	5	16,4	20,8	-	20868	10	90	5	17,7	22,8	-	8905	16	90	2	17,5	21,8	-	10881	2	95	20	17,3	23,2	-	11243	305
		4		0		19,9		0	2		20,2		0		2	22,1		0		1		21,2	0		12		22,5		174								
Isolamento na caixa-de-ar	Sem aquecimento	1	100	8	14,6	23,1	-	26324	19	98	40	12,4	23,8	-	44563	1823	100	75	15,1	26	-	19187	3618	100	40	14,7	24,6	-	23162	956	100	80	14,3	26,3	-	25593	4709
		4		1		21,9		0	20		22,3		492		40	24,3		972		10		25,3	173		50		24,8		1875								
	Aquecimento contínuo	1	0	8	20	23,1	49	0	19	0	40	20	23,8	112	0	1823	0	75	20	26	44	0	3618	0	40	20	24,6	59	0	956	0	80	20	26,3	46	0	4709
		4		1		21,9		0	20		22,3		492		40	24,3		972		10		25,3	173		50		24,8		1875								
	Aquecimento intermitente	1	80	8	18,8	23,1	-	6067	19	80	40	18,2	23,8	-	10620	1823	80	75	18,9	26	-	4300	3618	78	40	18,8	24,6	-	5365	956	80	80	18,7	26,3	-	5475	4709
		4		1		21,9		0	20		22,3		492		40	24,3		972		10		25,3	173		50		24,8		1875								

- Otimização:
 - Mesmo o Modelo B melhorado face à Norma EN 15251 [28] pode não ser o mais adequado para fazer estudos de otimização que consideram o período de Verão e Inverno conjuntamente;
 - O isolamento térmico de paredes de elevada espessura e massa é favorável do ponto de vista da energia para aquecimento, mas conduz a uma diminuição do conforto de Verão. Deve referir-se que a quantificação deste princípio conduz a resultados diversos para as cidades em estudo;
 - A ventilação noturna no Verão é recomendável em locais de grande amplitude térmica diária, sendo o seu benefício, tanto maior, quanto menor é a inércia.
- A localização do edifício em diferentes zonas climáticas condiciona as soluções e as condições de conforto e consumo de energia.

O grande objetivo da presente tese de doutoramento foi de quantificar o efeito do isolamento térmico, de paredes de elevada espessura, características dos edifícios rurais portugueses. De forma a responder à questão desenvolveram-se diversas tarefas, das quais resultaram as conclusões apresentadas.

Dos resultados experimentais, constata-se um comportamento térmico mais estável por parte do apartamento com as paredes sem isolamento, com uma amplitude térmica menor, tanto na estação de aquecimento como na estação de arrefecimento. Os registos das temperaturas, dos dois apartamentos, são idênticos, não se verificando ganhos, ao nível do desempenho térmico, por parte do apartamento com as paredes isoladas na caixa-de-ar cuja massa do pano interior é superior a 100 kg/m².

Dos estudos de sensibilidade, para o edifício-tipo, em diferentes localizações de Portugal, verificou-se que os cenários reabilitados, com isolamento na caixa-de-ar das paredes, possuem uma temperatura do ar interior mais elevada. Este facto é benéfico no Inverno. Contudo, os resultados demonstraram que sem um regime de aquecimento contínuo, a percentagem de tempo de desconforto e o IDT – I, continuam a ser elevados. O isolamento térmico, na caixa-de-ar das paredes de elevada espessura e massa, apenas é uma mais-valia aquando de um aquecimento em regime contínuo, pois a poupança energética é substancial.

O aumento da temperatura do ar interior, decorrente da aplicação do isolamento térmico, é, para a estação de arrefecimento, uma desvantagem. Principalmente em climas como o de Lisboa e Évora onde se registaram temperaturas médias do ar interior acima dos 25°C (cenários com um caudal de ventilação noturna no Verão de 1 RPH).

A ventilação noturna no Verão, demonstrou ser um meio de arrefecimento eficaz, minora o sobreaquecimento, conseguindo-se, através da implementação de um caudal de ventilação de 4 RPH, um nível de conforto admissível. Nos cenários reabilitados, com isolamento térmico na caixa-de-ar das paredes de envolvente, a ventilação noturna (4 RPH) demonstrou ser essencial para a obtenção do conforto.

Em suma, o grande benefício do isolamento térmico é sem dúvida a poupança energética que oferece aquando de um regime de aquecimento contínuo, o qual não é corrente nos edifícios residenciais portugueses. Sendo do conhecimento que as famílias portuguesas aquecem as suas casas de forma intermitente, esta vantagem perde importância. Neste contexto, os benefícios obtidos na estação de aquecimento podem não ser decisivos para o isolamento pelo interior ou na caixa-de-ar das paredes de elevada espessura e massa. Isto porque, na estação de arrefecimento, há longos períodos de sobreaquecimento.

7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente tese de doutoramento permitiu obter um conjunto significativo de conhecimento e perspetivar os seguintes trabalhos futuros:

- Elaborar estudos técnico-económicos para as diferentes soluções de reabilitação;
- Desenvolver estudos de sensibilidade tendo em consideração outras geometrias;
- Quantificar o desempenho higrotérmico dos diferentes espaços (flutuação da humidade relativa), que não foi convenientemente desenvolvido nesta tese;
- Elaborar um conjunto de recomendações técnicas sobre a forma de intervir na envolvente, constituindo uma base para uma regulamentação específica de reabilitação dos edifícios rurais.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação (REH)* Diário da República, I Série - A, Decreto-Lei nº 118/2013, Agosto, Lisboa, 2013.
- [2] Freitas, Vasco Peixoto de, *Reabilitação de Edifícios Escolares, Proceedings of Patorreb 2009 – 3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios*, Porto, 2009;
- [3] Aguiar, José; Appleton, João; Cabrita, António Reis, *Guião de Apoio à Reabilitação de Edifícios Habitacionais – Volume I*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1998;
- [4] Tomás, Miguel Nuno, *Reabilitação, Requalificação, Reciclagem*, Revista Ingenium – setembro e outubro, Lisboa, 2009;
- [5] <http://censos.ine.pt> consultado em Julho de 2014;
- [6] *Estatística da Construção e Habitação 2012.*, Lisboa, Instituto Nacional de Estatística, 2013;
- [7] *Estatística da Construção e Habitação 2011.*, Lisboa, Instituto Nacional de Estatística, 2012;
- [8] Santamouris, M., *Energy in the Urban Built Environment: The Role of Natural Ventilation*, Natural Ventilation in the Urban Environment: Assessment and Design, Editors Francis Allard and Cristian Ghiaus, Reino Unido, 2005;
- [9] *Fatura Energética Portuguesa - 2013*, Direção-Geral de Energia e Geologia, Lisboa, 2014;
- [10] <http://www.epbd-ca.eu>, consultado em Julho de 2014;
- [11] *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviço (RECS)* Diário da República, I Série - A, Decreto-Lei nº 118/2013, Agosto, Lisboa, 2013.
- [12] *Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (REH)*, Decreto-lei 80, 4 de abril de 2006, Lisboa, 2006;
- [13] De Oliveira, Ernesto Veiga; Galhano, Fernando, *Arquitetura Tradicional Portuguesa*, Dom Quixote, Lisboa, 2003;
- [14] <http://www.panoramio.com/photo/1929555>, consultado em Julho de 2014;
- [15] <http://no-geres2.blogspot.com/2010/06/pr4-trilho-do-rio-montalegre1262010.html>, consultado em Julho de 2014;
- [16] http://aeiou.expresso.pt/users/0/14/Casasportuguesas_b8b1275450588272da39327991c7bce1.swf, consultado em Julho de 2014;
- [17] http://www.rotaterrafrica.com/pageGen.asp?SYS_PAGE_ID=852078&patrimonio_id=1151&desc_ri_cao=Guadramil+-+Arquitetura+Tradicional+Popular, consultado Julho de 2014;
- [18] <http://vilafior.blogs.sapo.pt/90000.html>, consultado Julho de 2014;
- [19] <http://aldeiashistoricasdeportugal.blogspot.com/2009/03/passeando-pelas-ruas-da-antiga-vila-de.html>, consultado em Julho de 2014;
- [20] http://dalgodres.blogspot.com/2007_05_01_archive.html, consultado em Julho de 2014;
- [21] <http://entretediodiana.blogs.sapo.pt/2009/10/>, consultado em Julho de 2014;
- [22] http://thebestoflagos.blogspot.com/2008_12_01_archive.html, consultado em Julho de 2014;
- [23] <http://triplov.com/triplo2/2011/08/02/a-descoberta-dos-segredos-de-olhao/>, consultado em Julho de 2014;

- [24] <http://olhares.aeiou.pt/casa-tipica-ribatejana-foto3892044.html>, consultado em Julho de 2014;
- [25] Vitruvius, *Tratado da Arquitetura*, IST Press, Lisboa, 2006;
- [26] Matias, Luis Manuel Cordeiro, *Desenvolvimento de Um Modelo Adaptativo Para Definição das Condições de Conforto Térmico em Portugal*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa;
- [27] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE 55, 2004;
- [28] CEN - Comité Européen de Normalisation, 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*. CEN, Brussels, Belgium, 2007;
- [29] CEN - Comité Européen de Normalisation, EN 7726:2001 – *Ergonomics of the Thermal Environment – Instruments for Measuring Physical Quantities*, CEN, Brussels, Belgium 2001;
- [30] CEN – Comité Européen de Normalisation, EN 7730:2001 – *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*, CEN, Brussels, Belgium 2001;
- [31] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, ASHRAE 62, 1999;
- [32] Fanger, Povl Ole; Toftum, J., *Extension of the PMV Model to Non – Air Conditioned Buildings in Warm Climates*, Energy and Buildings, 2006;
- [33] Rodrigues, António Moret; Braga, Ana Marta e Piedade, Ana Canha da. *Térmica de Edifícios*. Lisboa, Orion, 2009;
- [34] Newsham, Guy R., *Clothing as a Thermal Comfort Moderator and the Effect on Energy Consumption*, Energy and Buildings, 1997;
- [35] Fanger, P., *Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Dinamarca, McGraw – Hill, 1970;
- [36] Nicol, Fergus; Roaf, Susan, *Progress on Passive Cooling: Advances in Passive Cooling – Adaptive Thermal Comfort and Passive Architecture*, Estados Unidos da América, 2007;
- [38] International Organization for Standardization, *Ergonomics of the Thermal Environment – Application of International Standards to People with Special Requirements*, ISO/TS 14415, 2005;
- [39] Santamouris, M., *Energy in the Urban Built Environment: The Role of Natural Ventilation*, Natural Ventilation in the Urban Environment: Assessment and Design, Editors Francis Allard and Cristian Ghiaus, Reino Unido, 2005;
- [40] Kolokotroni, M., Giannitsaris, I., Watkins, R., *The effect of the London Urban Heat Island on Building Summer Cooling Demand and Night Ventilation Strategies*, Universidade de Brunel, Middlesex, Reino Unido;
- [41] Kolokotroni, M., Santamouris, M., *Ventilation for Cooling*, Advances in Passive Cooling, Mat Santamouris Editor, Reino Unido, 2007;
- [42] Germano, M., Ghiaus, C., Roulet. C. A., *Natural Ventilation Potential*, Natural Ventilation in the Urban Environment: Assessment and Design, Editors Francis Allard and Cristian Ghiaus, Reino Unido, 2005;

- [43] Goulart, S., V., G., *Thermal Inertia and Natural Ventilation Optimisation of Thermal Storage as a Cooling Technique for Residential Buildings in Southern Brazil*, Architectural Association School of Architecture Graduate School, Brasil, 2004;
- [44] Shaviv E., Yezioro A., Capeluto, I. G., *Thermal Mass and Night Ventilation as Passive Cooling Design Strategy*, Instituto da Tecnologia de Israel, Faculdade de Arquitetura e planeamento de Haifa, Haifa, Israel, 2001;
- [45] Gonçalves, Hélder, Graça, João Mariz, *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisboa, 2004;
- [46] Almeida, Ricardo Manuel dos Santos Ferreira, *Avaliação do Desempenho térmico do Parque Escolar Reabilitado*, Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011;
- [47] Pina dos Santos, C., Matias, L., 2006. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. Informação Técnica Edifícios ITE 50*. Lisboa: LNEC, 2006;
- [48] Pina dos Santos, C., Rodrigues, R., 2010. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos Opacos da Envolvente dos Edifícios. Informação Técnica Edifícios ITE 54*. Lisboa: LNEC, 2010;
- [49] Byrne, A.; Byrne, B.; Davies, A.; Robinson, A. J.; *Transient and Quasi-Steady Thermal Behaviour of a Building Envelope due to Retrofitted Cavity Wall and Ceiling Insulation*, Energy and Buildings, 2013;
- [50] Gagliano, A.; Patina, F.; Nocera, F.; Signorello, C.; *Assessment of the Dynamic Thermal Performance of Massive Buildings*, Energy and Buildings, 2014;
- [51] International Organization for Standardization (ISO), *Thermal Insulation – Building Elements - In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance, ISO 9869*, 1994;
- [52] Delgado, J. M. P. Q., Ramos, N. M., M., Barreira, E., Freitas, V. P., *A Critical Review of Hygrothermal Models Used in Porous Building Materials*, Laboratório de Física de Construções, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2008;
- [53] http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename=subjects#B, consultado em Julho de 2014;
- [54] <http://www.fraunhofer.de/>, consultado em Julho de 2014;
- [55] *Fundamentals of WUFI Plus*, Fraunhofer Intitut für Bauphysic, Alemanha;
- [56] http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal, consultado em Julho de 2014;
- [57] Mundim, Kleber C.; Delavy, Vilma C. T.; *Otimização Global de Processos Usando o Método Generalized Simulated Annealing*, Revista Processos Químicos – julho/dezembro, 2008;
- [58] Gouda, M.M.; Danaher, S.; Underwood, C.P.; *Building Thermal Model Reduction Using Non Linear Constrained Optimization*, Building and Environment, Reino Unido, 2001;
- [59] Asadi, E., da Silva M.G., Antunes C.H., Dias L., *A Multi-Objective Optimization Model for Building Retrofit Strategies Using TRNSYS Simulations, GenOpt and MATLAB*. Building and Environment, 2012;

- [60] Chatrelle F.P., Lahmid H., Keilholz W., EL Mankibi M., Michel D., *Development os a Multicriteria Tool for Otimization the Renovation Buildings*, Applied Energy, 2011;
- [61] Magnier L, Haghghat F., *Multiobjective Optimization of Building Design Using TRNSYS Simulations, Genetic Alghorithm, and Artificial Neural Network*, Building and Environment, 2010;
- [62] Ramos N. M. M., Ribeiro I. M., Santos P., Delgado J. M. P. Q., Freitas V. P., *Optimization of Envelope Insulation for the Retrofit of an Educational Building*, Defect and Diffusions Forum, 2011;
- [63] [http:// www.dgge.pt](http://www.dgge.pt), consultado em Julho 2014;
- [64] Nicol, J. F.; Humphreys, M. A., *Adaptative Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings*, Energy and Buildings, 2002;
- [65] Bouden, C; Ghrab, N., *An Adaptive Thermal Comfort Model for the Tunisian Context: A Field Study Results*, Energy and Buildings, 2005;
- [66] Maldonado, E., Yannas, S., *et al.*, *Studies of the Thermal Performance of Buildings in Summer in Southern Europe*, International Journal of Solar Energy, 1997;
- [67] Liman, K., Allard, F., *Ventilation – Thermal Mass Subtask – Final Report*, Universidade de La Rochele, La Rochele, França, 1995;
- [68] *PASCOOL – Passive Cooling for Buildings*, 1995;
- [69] Balaras, C. A., *Ther Role of Thermal Mass on the Cooling Load of Buildings an Overview of Computational Methods*, Grupo de Conservação de Energia, Instituto de Meteorologia e Física da Atmosfera, Observatório Nacional de Atenas, Grécia, 1995;
- [70] Curado, António José Candeias, *Conforto Térmico e Eficiência Energética nos Edifícios Residenciais Reabilitados*, Plano de Tese Submetido Para a Satisfação Parcial dos Requisitos do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012;
- [71] EN ISO 13786:2007 – *Thermal Performance of Buildings Components – Dynamic Thermal Characteristics – Calculation Methods*, European Committee for Standardization, Bruxelas 2007;
- [72] Szokolay, S., *Passive and Low Energy Design for Thermal and Visual Confort*, Passive and Low Energy Ecotechniques, 3rd International PLEA Conference, Cidade do México, México, 1996;
- [73] Givoni, B., *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, Van Nostrand Reinhold, Estados Unidos da América, 1994;
- [74] Van der Maas, J., Florentzos, F., *et al.*, *Passive Cooling by Night VentilationI*, European Confrence on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Volume 2, Lyon, França, 1994;
- [75] Di Perna, C, Stazi, F., Ursini Casalena, A., D’ Orazio, M., *Influence of the Internal Inertia of the Building Envelope on Summertime Confort in Buildings With High Internal Heat Loads*, Departamento de Energia da Universidade Politécnica de Marche, Ancona, Itália, 2010;
- [76] Kontoleon, K., J., Bikas, D. K., *Modeling the Influence of Glazed Openings Percentage and Type of Glazing on the Thermal Zone Behavior*, Energy and Buildings, 2002;
- [77] Freitas, Filipe Robalinho, *Estudo de Sensibilidade dos Parâmetros que Influenciam a Quantificação das Necessidades de Arrefecimento*, Relatório de Projeto Submetido para Satisfação Parcial dos Requisitos do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008;

- [78] Balcomb, J. D., *Heat Storage and Distribution Inside Passive Solar Buildings*, Passive and Low Energy Architecture, Creta, Grécia, 1983;
- [79] Hoseggen, R., Mathisen, H. M., Hanssen, S., O., *The Effect of Suspended Ceilings on Energy Performance and Thermal Comfort*, Trondheim, Noruega, 2008;
- [80] Ferrari, S., *Building Envelope and Heat Capacity: Re – Discovering the Thermal Mass for Winter Energy Saving*, Politécnico de Milão, Itália, 2007;
- [81] Givoni, B., *Indoor Temperature Reduction by Passive Cooling Systems*, Universidade Ben – Gurion, Beer Sheva, Israel, 2009;
- [82] Artmann, N., Heinrich, M., Heiselberg, P., *Potential for Passive Cooling of Buildings by Night – Time Ventilation in Present and Future Climates in Europe*, 23rd International PLEA Conference, Genebra, Suíça, 2006;
- [83] Santamouris, M., Sfakianaki, A., Pavlou, K., *On the Efficiency of night Ventilation, Techniques Applied to Residential Buildings*, Grupo de Estudos do Ambiente de Edifícios, Departamento de Física Aplicada, Universidade de Atenas, Atenas, Grécia, 2010;
- [84] Blondeau, P., Spérandio, M., Allard, F., *Night Ventilation for Building Cooling in Summer*, Universidade de Larochele, La Rochelle, França, 1996;
- [85] Santamouris, M., Asimakopoulos, D., *Passive Cooling of Buildings*, James & James, Londres, Reino Unido, 1996;
- [86] Givoni, B., *Effectiveness of Mass and Night Ventilation in Lowering the Indoor Daytime Temperatures. Part I: Experimental Periods*, Escola de Artes e de Arquitetura, Los Angeles, Estados Unidos América, 1997.
- [87] Amaral, António Pinto da Silva, *Sistemas de Ventilação Natural e Mistos em Edifícios de habitação*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008;
- [88] Bruant M., Guarracino, G., Michel, P., Santamouris, M., Voeltzel, A., *Impacto of a Global of Bioclimatic Buildings in Terms of Energy Consumption in Buildings Performances*, Stephens & Associates, Bedford, Reino Unido, 1996;
- [89] Kolokotroni, M., Perera, M., D., Azzi, D., Virk, G., S., *An Investigation of Passive Ventilation Cooling and Control Strategies for an Educacional Building*, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, 2001;
- [90] Freitas, Ana Sara Stingl Leal Araújo de, *Avaliação do Comportamento Higrotérmico dos Revestimentos Exteriores de Fachadas Devido À Ação da Chuva Incidente*, Relatório de Projeto Submetido para Satisfação Parcial dos Requisitos do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011;
- [91] Augenbroe, Godfried; Malkawi, Ali; *Advanced Building Simulation*, Spon Press, Londres, Reino Unido, 2004;
- [92] Faustino, Ana M.; Júdice, Joaquim J.; Ribeiro, Isabel M.; Neves, A. Serra; *An Integer Programming Model for Truss Topology Optimization*, Investigação Operacional, Vol. 26 nº1, 2006;
- [93] Vale, Cecilia; Ribeiro, Isabel M.; Calçada, Rui; *Integer Programming to Optimize Tamping in Railway Tracks as Preventive Maintenance*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 137, 2012;
- [94] Givoni, B., *Man, Climate and Architecture*, Applied Science Publishers Ltd., Inglaterra, 1976;

- [95] Lechner, N., *Heating, Cooling, Lighting*, John Wiley & Sons, Nova York, Estados Unidos da América, 1991;
- [96] Orosa, J. A., Carpena, T., *Thermal Inertia Effect in Old Buildings*, Departamento de Energia e M. P., Universidade da Corunha, Espanha, 2009;
- [97] Baker, N.; Standeven, M, *Thermal Comfort for Free – Running Buildings*, Energy and Buildings, 1996;
- [98] Al – Sallal, K., A., *Sizing Windows to Achieve Passive Cooling, Passive Heating and Daylighting in Hot Arid Regions*, Renewable Energy, Vol.14, 1998;
- [99] Geros, V., Santamouris, M., Karatasou, S., Tsangrassoulis, A., Papanikolaou, N., *On the Cooling Potential of Night Ventilation Techniques in the Urban Environment*, Grupo de Estudos do Ambiente de Edifícios, Departamento de Física Aplicada, Universidade de Atenas, Atenas, Grécia, 2004;
- [100] Kubota, T., Chyee, D., T., H., Ahmad, S., *The Effects of Night Ventilation Technique on Indoor Thermal Environment for Residential Buildings in Hot Humid Climate of Malaysia*, Universidade de Hiroshima, Hiroshima, Japão, 2008;

ANEXO I. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA

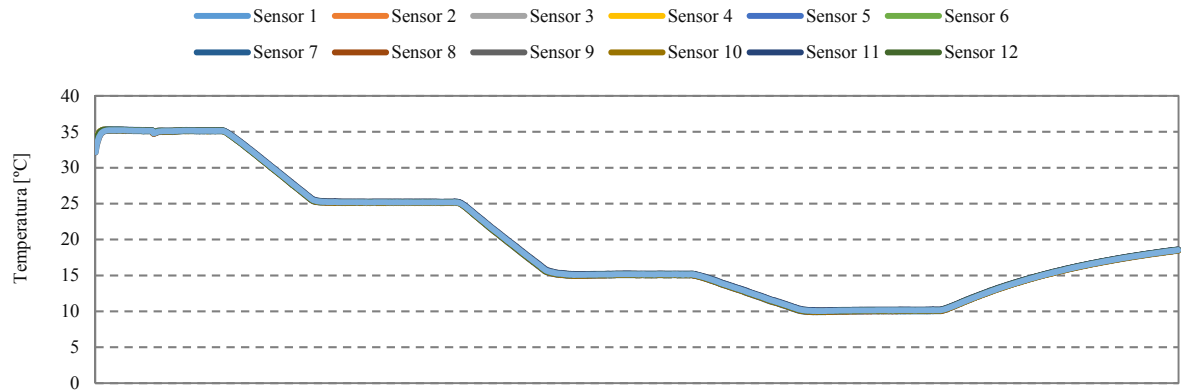
I.I. TEMPERATURA

I.II. HUMIDADE RELATIVA

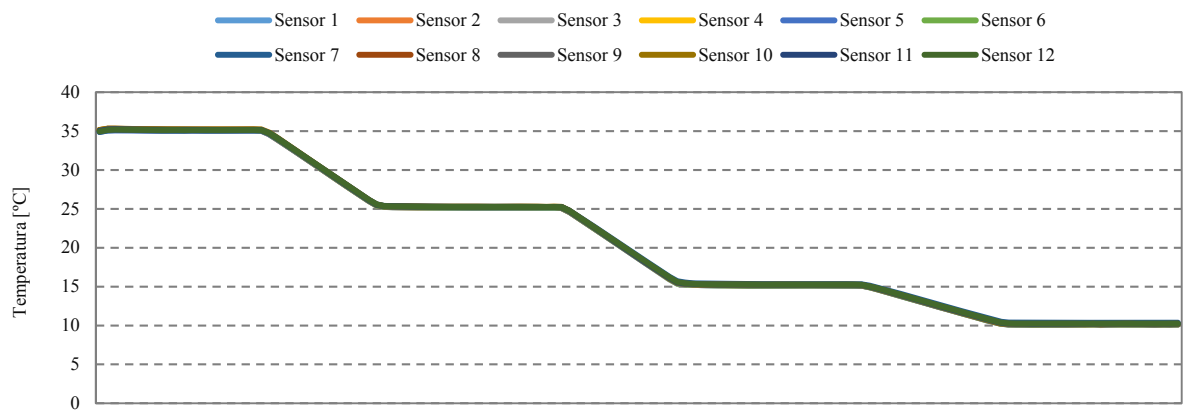
I.1 TEMPERATURA

A calibração dos sensores de medição da temperatura e humidade relativa foi elaborada na camara climática do Laboratório de Física das Construções – LFC – da FEUP.

Calibração Inicial

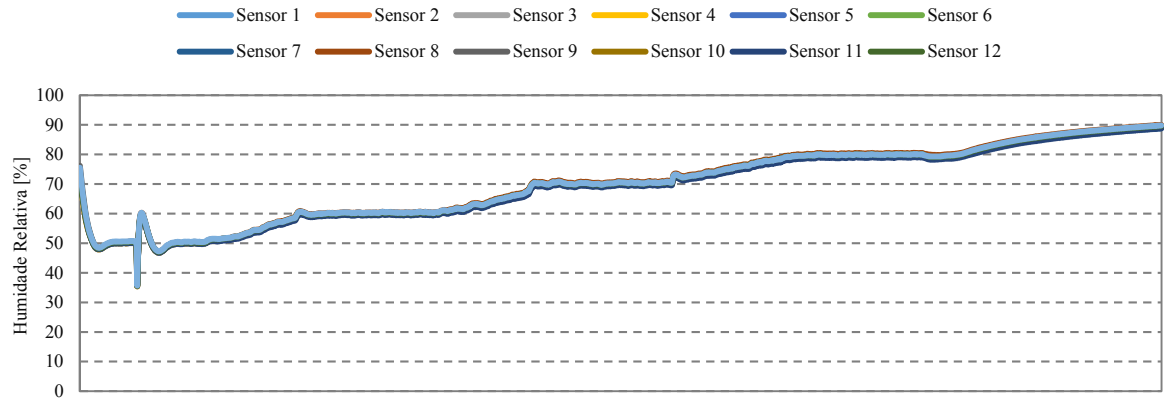


Calibração Final

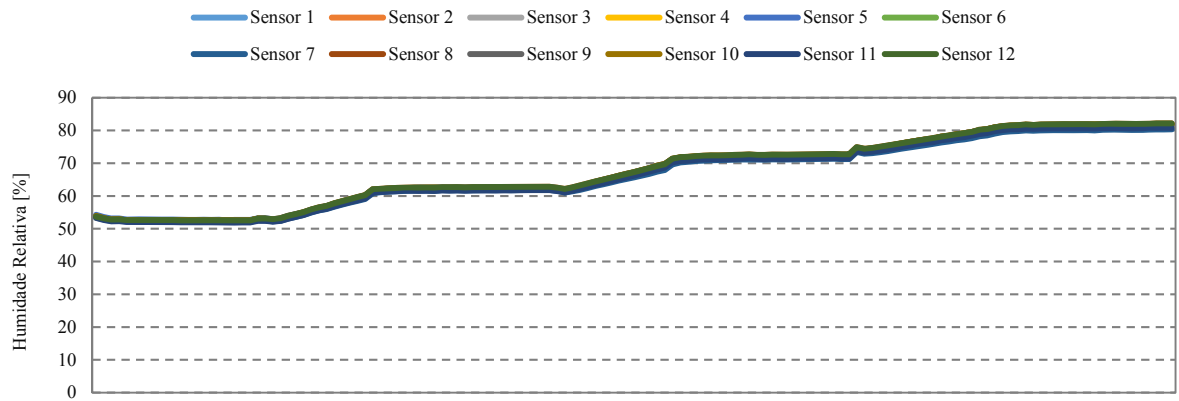


I.II. HUMIDADE RELATIVA

Calibração Inicial



Calibração Final



ANEXO II. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA A VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

No presente anexo apresentam-se as soluções construtivas consideradas para a validação do modelo de simulação numérica.

PAREDES DE ENVOLVENTE EXTERIOR								
PAREDE EXTERIOR – APARTAMENTO 1: <i>Granito, 75 cm; caixa de ar, 5 cm; poliestireno expandido extrudido, 5 cm; tijolo cerâmico, 11 cm de espessura; reboco tradicional, 2 cm. U=0,31 W/m²°C</i>								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	0,39
Granito	2600	1000	2,80	0,75	0	0,27		
Caixa de ar	1,3	1000	0,28	0,05	0	0,18		
Poliestireno expandido extrudido	40	1500	0,03	0,05	0	1,67		
Tijolo cerâmico de 11	650	850	0,13	0,11	72	0,27		
Reboco tradicional	2104	776	1,37	0,02	42	0,01		
resistência superficial interior							0,13	

PAREDES EXTERIORES – APARTAMENTO 2: <i>Granito, 75 cm. U=2,28 W/m²°C</i>								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	2,28
Granito	2600	1000	2,80	0,75	1950	-	0,27	
resistência superficial interior							0,13	

Legenda:

- ρ , massa volúmica [kg/m³];
- c , calor específico [J/kg];
- λ , condutibilidade térmica [W/m°C];
- e , espessura [m];
- m , massa [kg/m²];
- mt , massa total do elemento [kg/m²];
- R , resistência térmica [m²°C/W];
- U , coeficiente de transmissão térmica [W/m²°C].

PAREDES DE ENVOLVENTE INTERIOR								
PAREDE INTERIOR APARTAMENTO 1 – SALA COMUM: Granito, 75 cm; caixa de ar, 5 cm; poliestireno expandido extrudido, 5 cm; tijolo cerâmico, 11 cm de espessura; reboco tradicional, 2 cm. $U=0,31 \text{ W/m}^2\text{°C}$								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial interior							0,13	0,38
Granito	2600	1000	2,80	0,75	0	113,58	0,27	
Caixa de ar	1,3	1000	0,28	0,05	0		0,18	
Poliestireno expandido extrudido	40	1500	0,03	0,05	0		1,67	
Tijolo cerâmico de 11	650	850	0,13	0,11	72		0,27	
Reboco tradicional	2104	776	1,37	0,02	42		0,01	
resistência superficial interior							0,13	

PAREDE INTERIOR APARTAMENTO 2 – SALA COMUM: Granito, 75 cm. $U=1,89 \text{ W/m}^2\text{°C}$								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial interior							0,13	1,89
Granito	2600	1000	2,80	0,75	1950	-	0,27	
resistência superficial interior							0,13	



COBERTURA DE ENVOLVENTE EXTERIOR								
COBERTURA EXTERIOR – APARTAMENTO 1 E 2: <i>Poliestireno expandido extrudido, 6 cm; laje de betão armado, 22 cm; reboco tradicional, 2 cm. U=0,44W/m²°C.</i>								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	0,44
Poliestireno expandido extrudido	40	1500	0,03	0,06	2		2,00	
Tela permeável ao vapor	130	2300	2,3	0,003	0		0,00	
Laje de betão armado	2200	850	1,6	0,22	484		0,14	
resistência superficial interior							0,10	

Nota: Desprezaram-se as camadas externas ao Poliestireno expandido extrudido.

PAVIMENTOS DE ENVOLVENTE EXTERIOR								
PAVIMENTO EXTERIOR COM ISOLAMENTO – APARTAMENTO 1: <i>Reboco tradicional, 2 cm; poliestireno expandido extrudido, 4 cm; laje de betão armado, 25 cm; camada de regularização, 3 cm; soalho de madeira, 1,5 cm. U=0,49 W/m²°C</i>								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	0,49
Reboco tradicional	2104	776	1,37	0,02	0		0,01	
Poliestireno expandido extrudido	40	1500	0,03	0,04	0		1,33	
Laje de betão armado	2200	850	1,6	0,25	550	607,96	0,16	
Camada de regularização	1782	850	1,7	0,03	53		0,02	
Soalho de madeira	300	1500	0,05	0,02	5		0,30	
resistência superficial interior							0,17	

PAVIMENTO EXTERIOR - APARTAMENTO 1: Reboco tradicional, 2 cm; laje de betão armado, 25 cm; camada de regularização, 3 cm; soalho de madeira, 1,5 cm. $U=1,43 \text{ W/m}^2\text{°C}$

CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	1,43
Reboco tradicional	2104	776	1,37	0,02	42	650,04	0,01	
Laje de betão armado	2200	850	1,6	0,25	550		0,16	
Camada de regularização	1782	850	1,7	0,03	53		0,02	
Soalho de madeira	300	1500	0,05	0,02	5		0,30	
resistência superficial interior							0,17	

PAVIMENTO EXTERIOR COM ISOLAMENTO – APARTAMENTO 2: Reboco tradicional, 2 cm; poliestireno expandido extrudido, 4 cm; laje de betão armado, 25 cm; camada de regularização, 3 cm; ardósia, 1 cm. $U=0,57 \text{ W/m}^2\text{°C}$

CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	0,57
Reboco tradicional	2104	776	1,37	0,02	0	622,46	0,01	
Poliestireno expandido extrudido	40	1500	0,03	0,04	0		1,33	
Laje aligeirada	2200	850	1,6	0,25	550		0,16	
Camada de regularização	1782	850	1,7	0,03	53		0,02	
Ardósia	1900	850	0,60	0,01	19		0,02	
resistência superficial interior							0,17	

PAVIMENTO EXTERIOR SEM ISOLAMENTO – APARTAMENTO 2: Reboco tradicional, 2 cm; laje de betão armado, 25 cm; camada de regularização, 3 cm; ardósia, 1 cm. $U=2,41 \text{ W/m}^2\text{°C}$

CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	2,41
Reboco tradicional	2104	776	1,37	0,02	42	664,54	0,01	
Laje aligeirada de vigotas	2200	850	1,6	0,25	550		0,16	
Camada de regularização	1782	850	1,7	0,03	53		0,02	
Ardósia	1900	850	0,60	0,01	19		0,02	
resistência superficial interior							0,17	

PAVIMENTO EM CONTACTO COM O SOLO								
PAVIMENTO EM CONTACTO COM O SOLO - APARTAMENTO 2: Lajetas de granito, 30 cm . $U=3,61 \text{ W/m}^2\text{C}$								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² C/W]	U [W/m ² C]
resistência superficial exterior							0,00	3,61
Lajetas de granito	2600	1000	2,80	0,30	780	780	0,18	
resistência superficial interior							0,17	



ENVIDRAÇADOS DE ENVOLVENTE EXTERIOR							
VÃOS ENVIDRAÇADOS J1 e J2: <i>Vãos envidraçados verticais simples, vidro duplo incolor 4 a 8 mm + 6 mm + 5mm, caixilharia em madeira, sem quadrícula, sem dispositivo de oclusão noturna. $U_w=3,30 W/m^2°C$</i>							
Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	U_w [W/(m ² °C)]	U_{wdn} [W/(m ² °C)]		Fator solar do vidro g _s
					Dispositivo de oclusão noturna		
					Com elevada permeabilidade ao ar		
Simple (1 janela)	2 (vidro duplo)	fixa, giratória ou de correr	6	3,30	-		0,75

VÃOS ENVIDRAÇADOS J3, J4 e J6: <i>Vãos envidraçados verticais simples, vidro duplo incolor 4 a 8 mm + 6 mm + 5mm, caixilharia em madeira, sem quadrícula, dispositivo de oclusão noturna portadas interiores em MDF de cor clara. $U_{wdn}=2,30 W/m^2°C$</i>							
Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	U_w [W/(m ² °C)]	U_{wdn} [W/(m ² °C)]		Fator solar do vidro g _s
					Dispositivo de oclusão noturna		
					Com elevada permeabilidade ao ar		
Simple (1 janela)	2 (vidro duplo)	fixa, giratória ou de correr	6	-	2,30		0,35

VÃOS ENVIDRAÇADOS J5: <i>Vãos envidraçados verticais simples, vidro duplo incolor 4 a 8 mm + 6 mm + 5mm, caixilharia em madeira, sem quadrícula, dispositivo de oclusão noturna estores venezianos metálicos exteriores de cor clara. $U_{wdn}=2,80 W/m^2°C$</i>							
Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	U_w [W/(m ² °C)]	U_{wdn} [W/(m ² °C)]		Fator solar do vidro g _s
					Dispositivo de oclusão noturna		
					Com elevada permeabilidade ao ar		
Simple (1 janela)	2 (vidro duplo)	fixa, giratória ou de correr	6	-	2,30		0,35

VÃOS ENVIDRAÇADOS J7 e J8: *Vãos envidraçados verticais simples, vidro simples incolor 5 mm, caixilharia em madeira, sem quadricula, dispositivo de oclusão noturna portadas interiores em madeira de cor clara. $U_{wdn}=3,90 W/m^2°C$*

Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	U_w [$W/(m^2°C)$]	U_{wdn} [$W/(m^2°C)$]		Fator solar do vidro g_s
					Dispositivo de oclusão noturna		
					Com elevada permeabilidade ao ar		
Simplex (1 janela)	1 (vidro simples)	fixa, giratória ou de correr	-	-	3,90		0,87

VÃO ENVIDRAÇADO J9: *Vãos envidraçados verticais simples, vidro simples incolor 5mm, caixilharia em madeira, sem quadricula, sem dispositivo de oclusão noturna. $U_w=5,0 W/m^2°C$*

Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	U_w [$W/(m^2°C)$]	U_{wdn} [$W/(m^2°C)$]		Fator solar do vidro g_s
					Dispositivo de oclusão noturna		
					Com elevada permeabilidade ao ar		
Simplex (1 janela)	1 (vidro simples)	fixa, giratória ou de correr	-	5,10	-		0,87

PORTAS DE ENVOLVENTE EXTERIOR								
PORTAS EXTERIORES: <i>As portas da envolvente exterior são em madeira. $U=2,09 W/m^2°C$</i>								
CAMADA	ρ [kg/m^3]	C [J/kg]	λ [$W/m°C$]	e [m]	m [kg/m^2]	mt [kg/m^2]	R [$m^2°C/W$]	U [$W/m^2°C$]
resistência superficial exterior							0,04	2,09
madeira	650	1500	0,13	0,04	26	26	0,31	
resistência superficial interior							0,13	



ANEXO III. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS CONSIDERADAS NOS ESTUDOS DE SENSIBILIDADE

No presente anexo apresentam-se as soluções construtivas, do edifício objeto de estudo, consideradas nos estudos de sensibilidade.

PAREDES DE ENVOLVENTE EXTERIOR								
PAREDE EXTERIOR – COM ISOLAMENTO: <i>Granito, 75 cm; caixa de ar, 5 cm; poliestireno expandido extrudido, 5 cm; tijolo cerâmico, 11 cm de espessura; reboco tradicional, 2 cm. U=0,31 W/m²°C</i>								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	0,39
Granito	2600	1000	2,80	0,75	0	179,58	0,27	
Caixa de ar	1,3	1000	0,28	0,05	0		0,18	
Poliestireno expandido extrudido	40	1500	0,03	0,05	0		1,67	
Tijolo cerâmico de 11	1250	850	-	0,11	138		0,27	
Reboco tradicional	2104	776	1,37	0,02	42		0,01	
resistência superficial interior							0,13	

PAREDES EXTERIORES – SEM ISOLAMENTO: <i>Granito, 75 cm. U=2,28 W/m²°C</i>								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	2,28
Granito	2600	1000	2,80	0,75	1950	-	0,27	
resistência superficial interior							0,13	

PAREDES DE ENVOLVENTE INTERIOR								
PAREDE INTERIOR COM ISOLAMENTO APARTAMENTO – SALA COMUM, : Granito, 75 cm; caixa de ar, 5 cm; poliestireno expandido extrudido, 5 cm; tijolo cerâmico, 11 cm de espessura; reboco tradicional, 2 cm. $U=0,31 W/m^2°C$								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial interior							0,13	0,38
Granito	2600	1000	2,80	0,75	0	179,58	0,27	
Caixa de ar	1,3	1000	0,28	0,05	0		0,18	
Poliestireno expandido extrudido	40	1500	0,03	0,05	0		1,67	
Tijolo cerâmico de 11	1250	850	-	0,11	138		0,27	
Reboco tradicional	2104	776	1,37	0,02	42		0,01	
resistência superficial interior							0,13	

PAREDE INTERIOR SEM ISOLAMENTO APARTAMENTO – SALA COMUM: Granito, 75 cm. $U=1,89 W/m^2°C$								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial interior							0,13	1,89
Granito	2600	1000	2,80	0,75	1950	-	0,27	
resistência superficial interior							0,13	

COBERTURA DE ENVOLVENTE EXTERIOR								
COBERTURA EXTERIOR: Poliestireno expandido extrudido, 6 cm; laje de betão armado, 22 cm; reboco tradicional, 2 cm. $U=0,44W/m^2°C$.								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	0,44
Poliestireno expandido extrudido	40	1500	0,03	0,06	2	-	2,00	
Tela permeável ao vapor	130	2300	2,3	0,003	0		0,00	
Laje de betão armado	2200	850	1,6	0,22	484		0,14	
resistência superficial interior							0,10	

Nota: Desprezaram-se as camadas externas ao Poliestireno expandido extrudido.

PAVIMENTOS DE ENVOLVENTE EXTERIOR								
PAVIMENTO EXTERIOR: <i>Reboco tradicional, 2 cm; poliestireno expandido extrudido, 4 cm; laje de betão armado, 25 cm; camada de regularização, 3 cm; soalho de madeira, 1,5 cm. U=0,49 W/m²°C</i>								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	c [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	0,49
Reboco tradicional	2104	776	1,37	0,02	0	607,96	0,01	
Poliestireno expandido extrudido	40	1500	0,03	0,04	0		1,33	
Laje de betão armado	2200	850	1,6	0,25	550		0,16	
Camada de regularização	1782	850	1,7	0,03	53		0,02	
Soalho de madeira	300	1500	0,05	0,02	5		0,30	
resistência superficial interior							0,17	

ENVIDRAÇADOS DE ENVOLVENTE EXTERIOR						
VÃOS ENVIDRAÇADOS: <i>Vãos envidraçados verticais simples, vidro duplo incolor 4 a 8 mm + 6 mm + 5mm, caixilharia em madeira, sem quadrícula, dispositivo de oclusão noturna portadas interiores em mdf de cor clara. U_{wdn}=2,30 W/m²°C</i>						
Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	U_w [W/(m ² °C)]	U_{wdn} [W/(m ² °C)]	Fator solar do vidro g_s
					Dispositivo de oclusão noturna	
					Com elevada permeabilidade ao ar	
Simplex (1 janela)	2 (vidro duplo)	fixa, giratória ou de correr	6	-	2,30	0,35

PORTAS DE ENVOLVENTE EXTERIOR								
PORTAS EXTERIORES: <i>As portas da envolvente exterior são em madeira. U=2,09 W/m²°C</i>								
CAMADA	ρ [kg/m ³]	C [J/kg]	λ [W/m°C]	e [m]	m [kg/m ²]	mt [kg/m ²]	R [m ² °C/W]	U [W/m ² °C]
resistência superficial exterior							0,04	2,09
madeira	650	1500	0,13	0,04	26	26	0,31	
resistência superficial interior							0,13	

**ANEXO IV. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – TEMPERATURA DO AR
INTERIOR NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO**

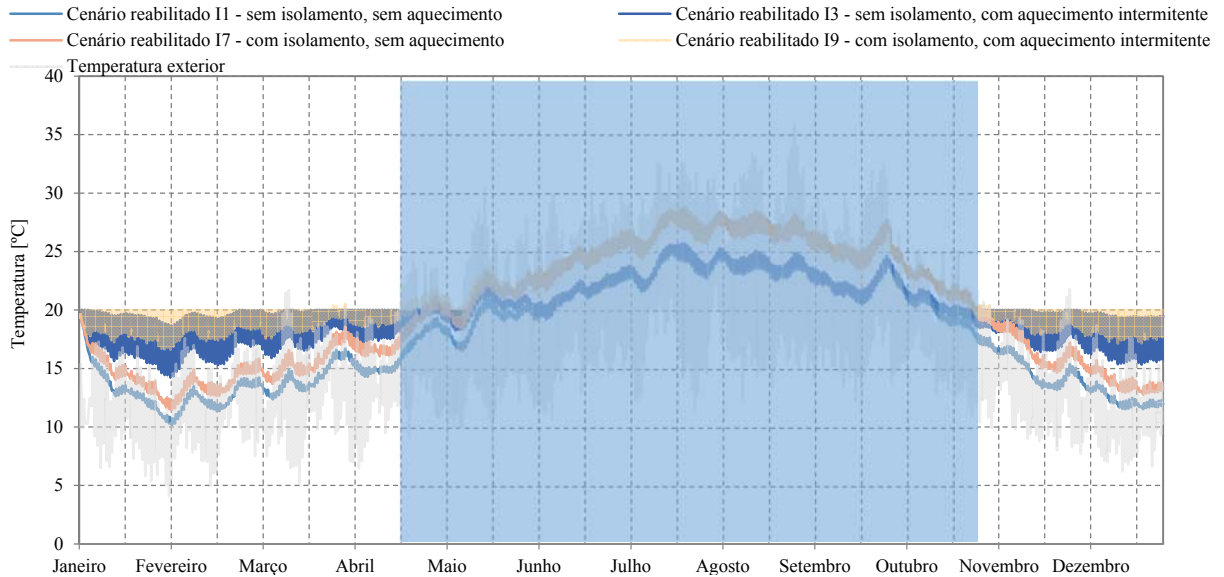
IV.I. LISBOA

IV.II. COIMBRA

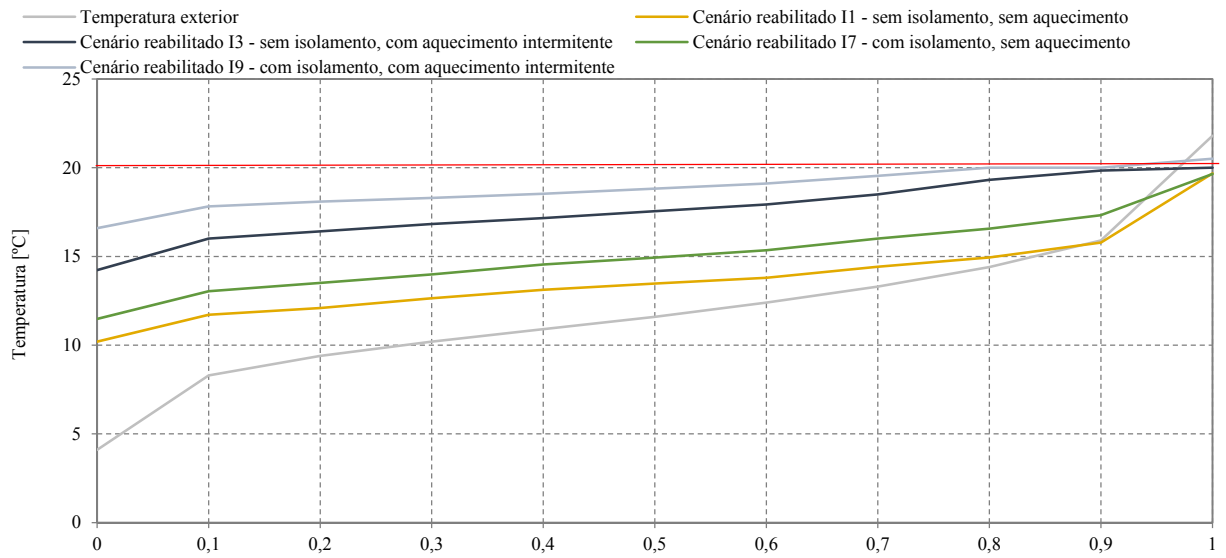
IV.III. ÉVORA

IV.I. Lisboa

O presente anexo é referente à temperatura do ar interior, para a estação de aquecimento da cidade de Lisboa, 5,3 meses (3889 horas).



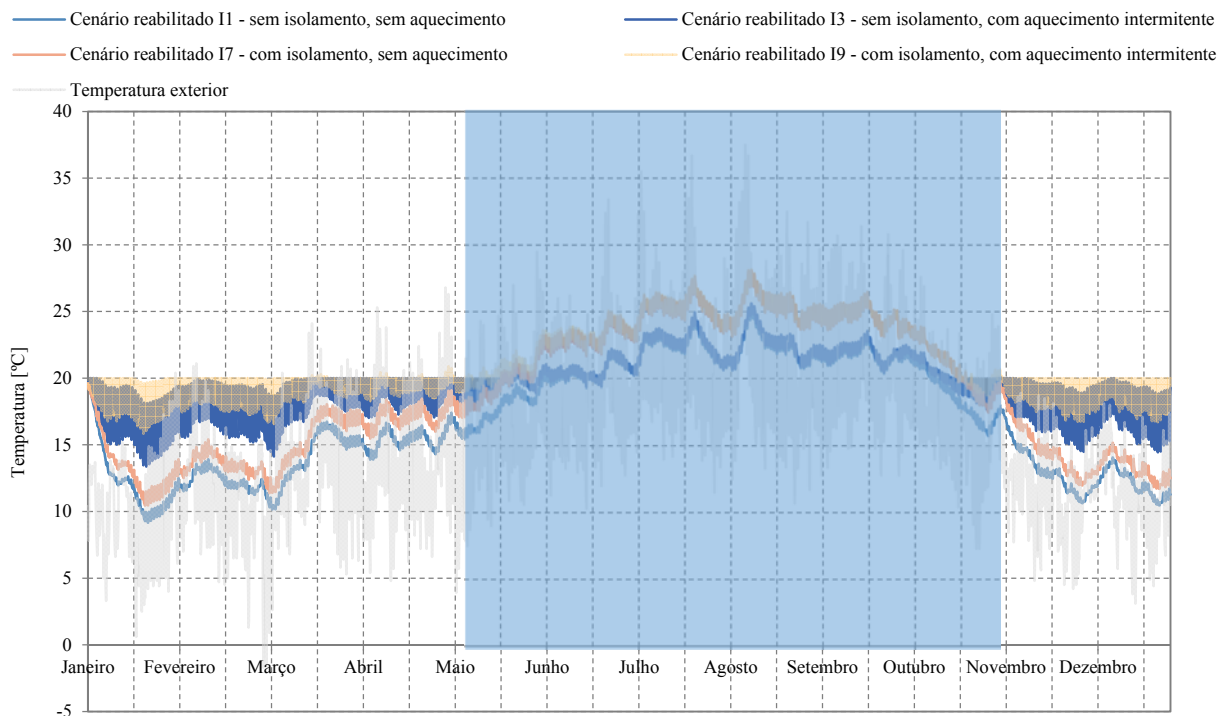
Cenários reabilitados				
	I1		I7	
Tempo > 20°C	100% (3889h)	100% (3889h)	90% (3500h)	80% (3111h)
Média [°C]	13,60	15,07	17,71	18,90
Quartil 25 [°C]	12,34	13,75	16,63	18,20
Quartil 50 [°C]	13,47	14,94	17,55	18,82
Quartil 75 [°C]	14,71	16,32	18,87	19,96
Percentil 1% [°C]	10,50	11,84	14,92	17,14
Percentil 2% [°C]	10,71	12,09	15,14	17,34
Percentil 5% [°C]	11,41	12,73	15,71	17,61



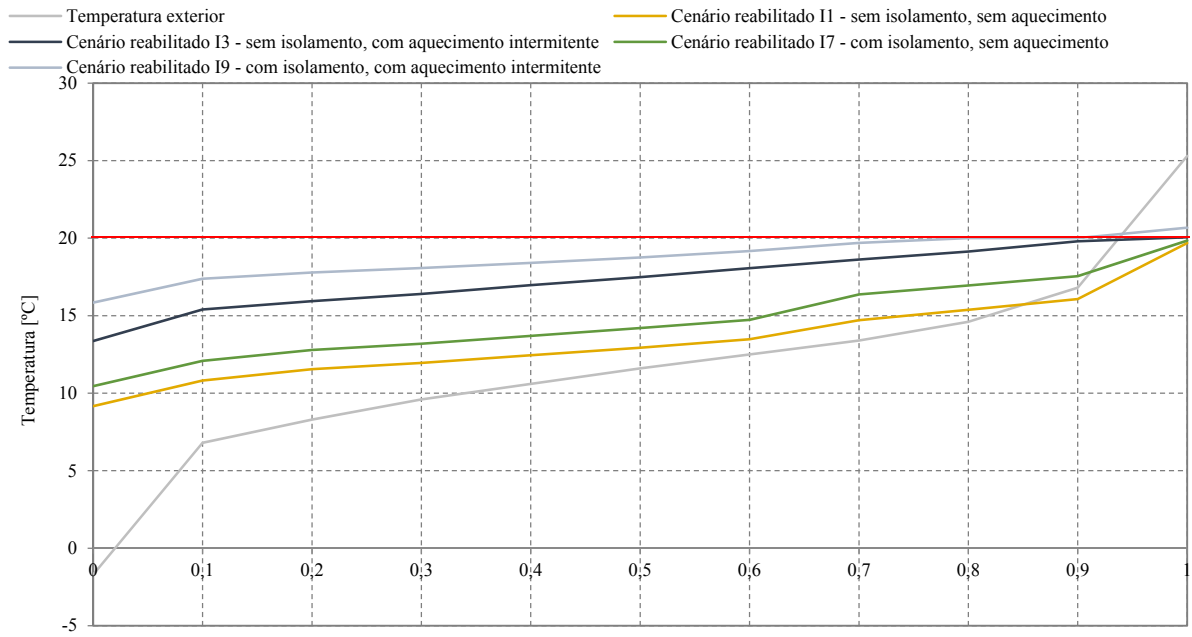
Cenários reabilitados				
	I1	I7	I3	I9
<i>T_{min}</i> [°C]	10,20	11,48	14,23	16,90

IV.II. Coimbra

O presente anexo é referente à temperatura do ar interior, para a estação de aquecimento da cidade de Coimbra, 6 meses (4344 horas).



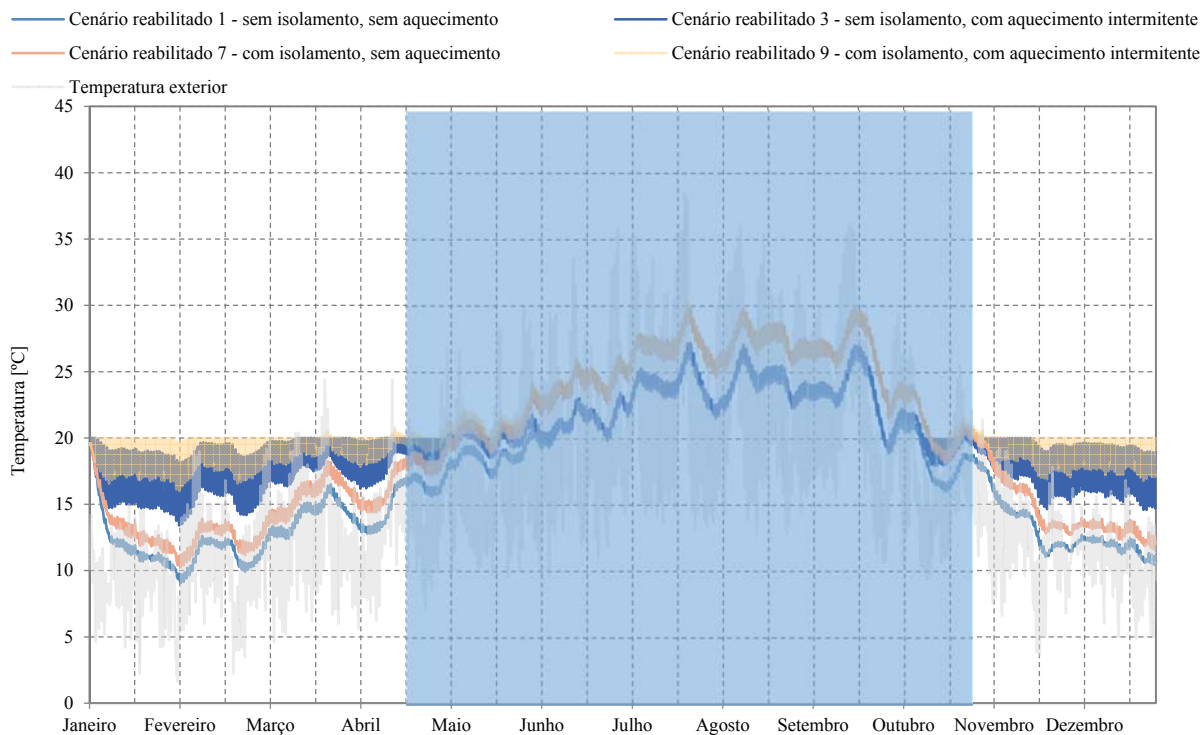
Cenários reabilitados				
	I1	I7	I3	I9
Tempo < 20°C	100%	100%	90%	78%
Média [°C]	13,32	14,67	17,50	18,77
Quartil 25 [°C]	11,79	12,99	16,16	17,92
Quartil 50 [°C]	12,93	14,20	17,48	18,75
Quartil 75 [°C]	15,07	16,65	18,85	19,91
Percentil 1% [°C]	9,52	10,87	14,13	16,66
Percentil 2% [°C]	9,76	11,09	14,44	16,83
Percentil 5% [°C]	10,34	11,67	14,95	17,11



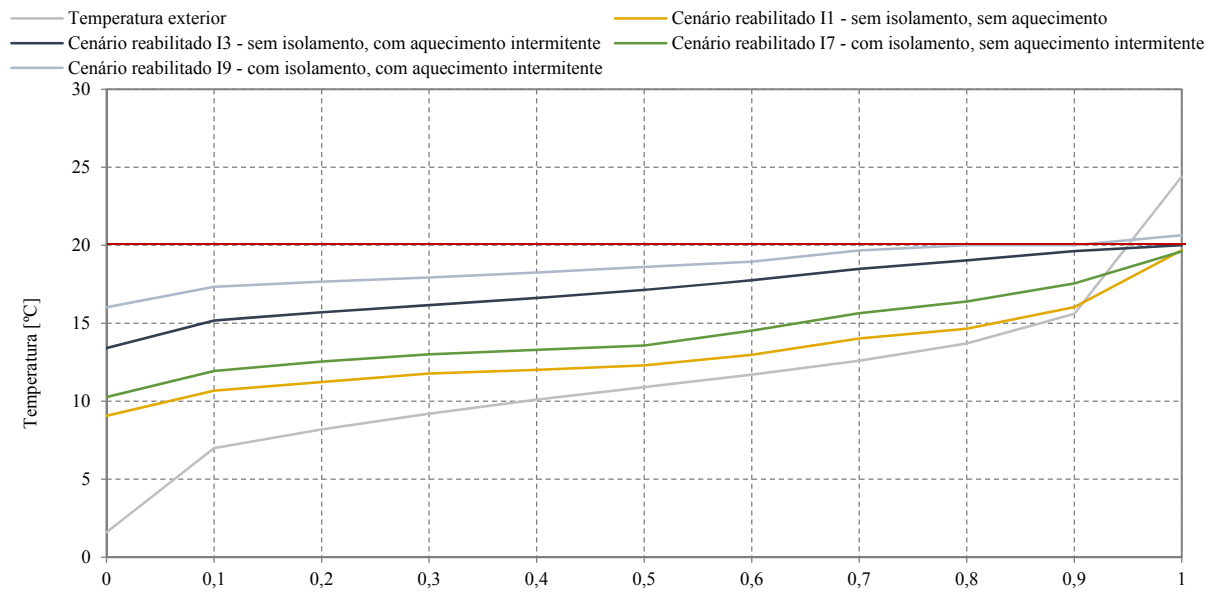
Cenários reabilitados				
	I1	I7	I3	I9
<i>T_{min}</i> [°C]	9,16	10,45	13,37	15,84

IV.III. Évora

O presente anexo é referente à temperatura do ar interior, para a estação de aquecimento da cidade de Évora 5,7 meses (4152 horas).



Cenários reabilitados				
	I1	I7	I3	I9
Tempo < 20°C	100% (4152h)	100% (4152h)	95% (3944h)	80% (3322h)
Média [°C]	12,91	14,32	17,29	18,69
Quartil 25 [°C]	11,48	12,83	15,95	17,80
Quartil 50 [°C]	12,30	13,58	17,14	18,61
Quartil 75 [°C]	14,33	16,01	18,82	19,89
Percentil 1% [°C]	9,46	10,68	14,17	16,76
Percentil 2% [°C]	9,71	11,05	14,49	16,90
Percentil 5% [°C]	10,25	11,53	14,82	17,13



Cenários reabilitados				
	I1	I7	I3	I9
<i>T_{min}</i> [°C]	9,07	10,26	13,41	16,02

**ANEXO V. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – CONSUMO ENERGÉTICO
NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO**

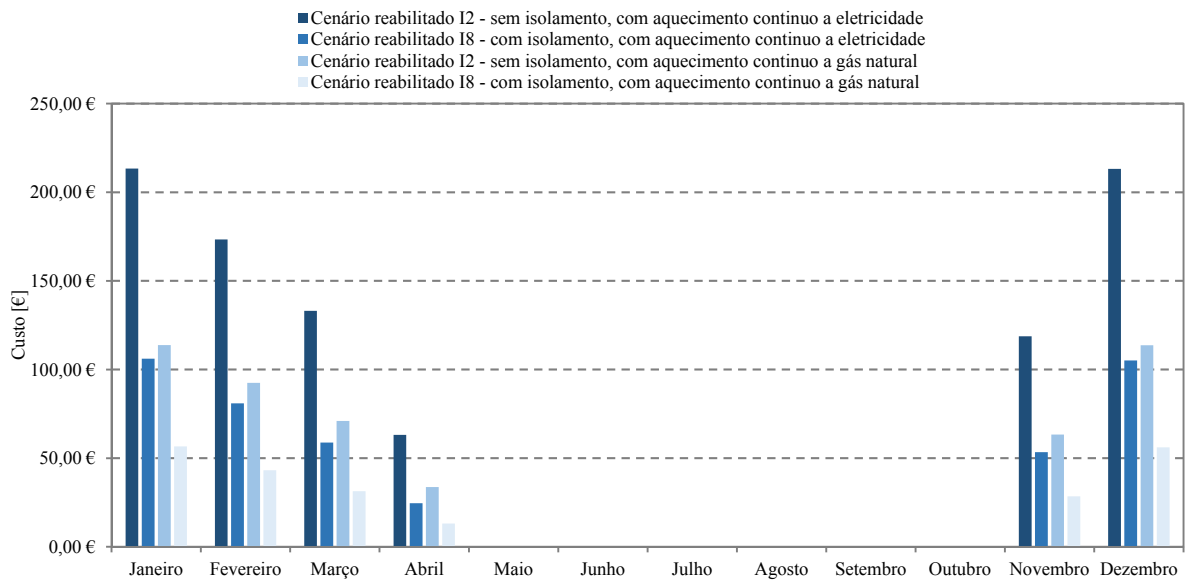
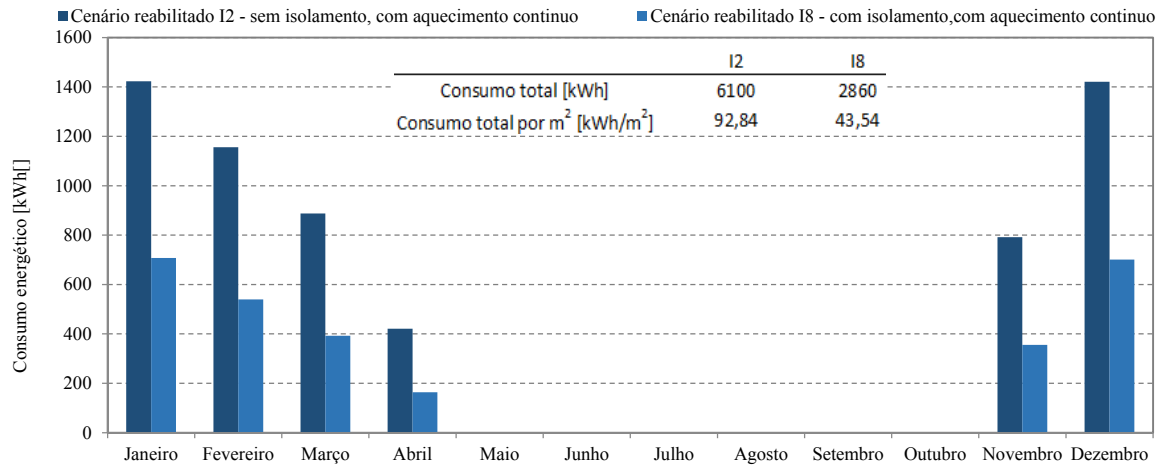
V.I. LISBOA

V.II. COIMBRA

V.III. ÉVORA

V.I. Lisboa

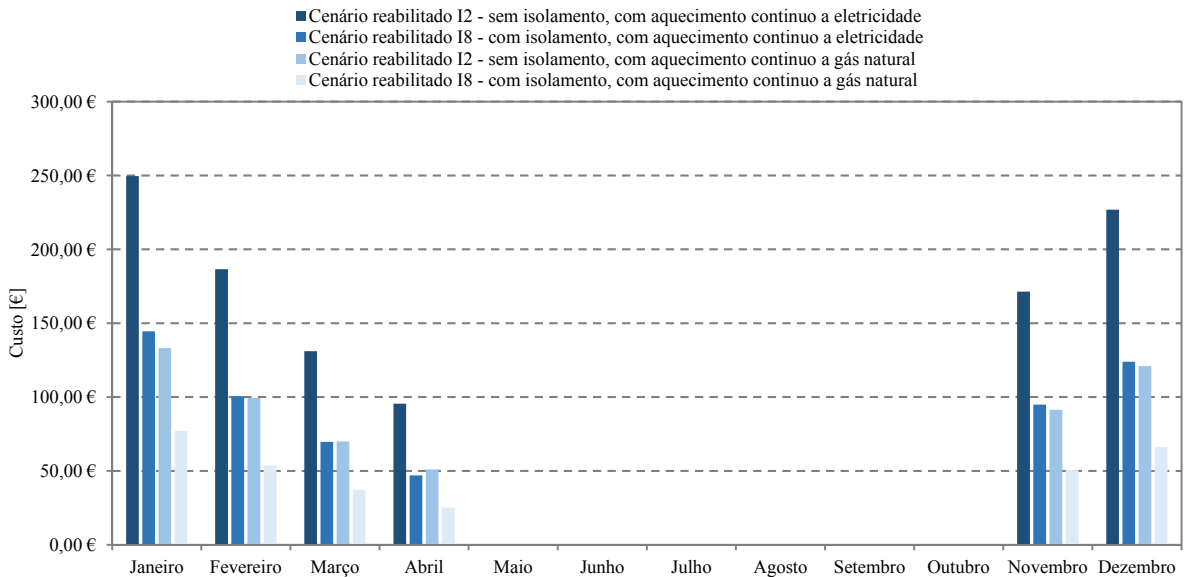
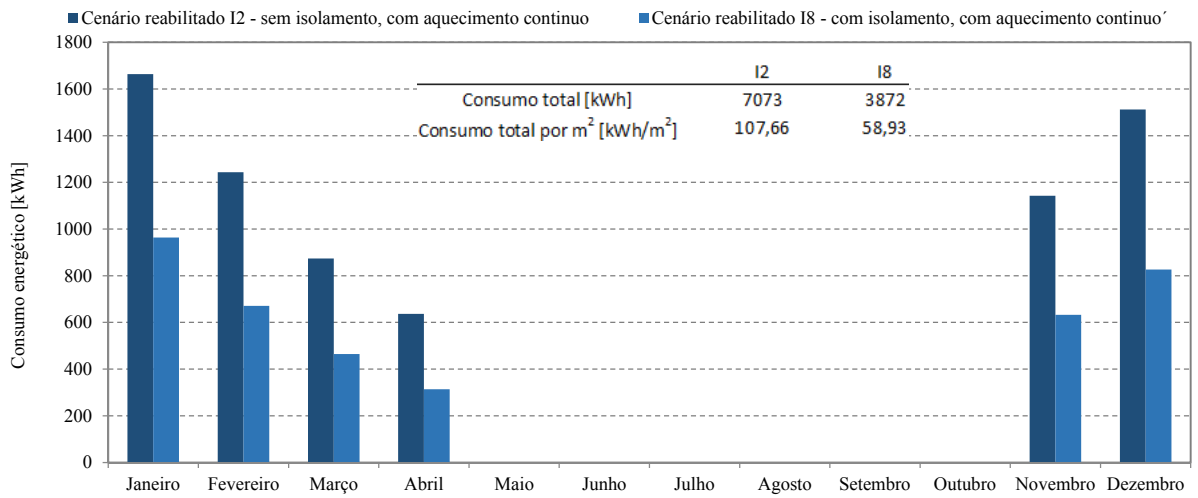
No presente anexo apresentam-se os resultados do consumo energético relativo à cidade de Lisboa.



Custos totais de aquecimento [€]						
	 I2		 I8		Diferença entre I2 e I8	
	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural
Custo total	915 €	488 €	429€	229€	486 €	259 €
Custo total por m ²	14 €	7 €	7 €	3 €	7 €	4 €

V.II. Coimbra

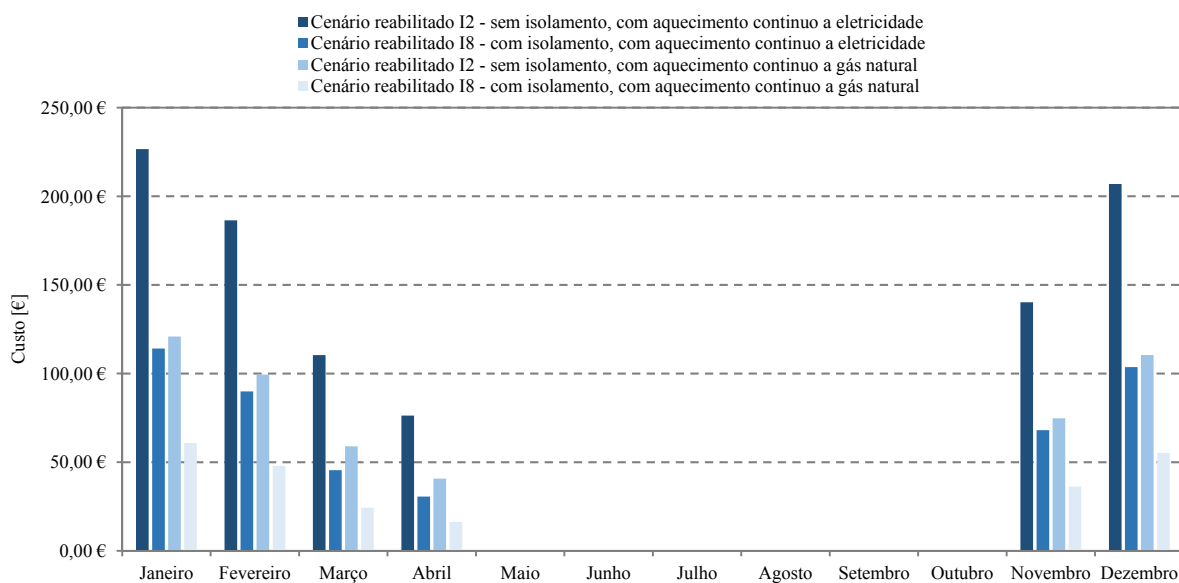
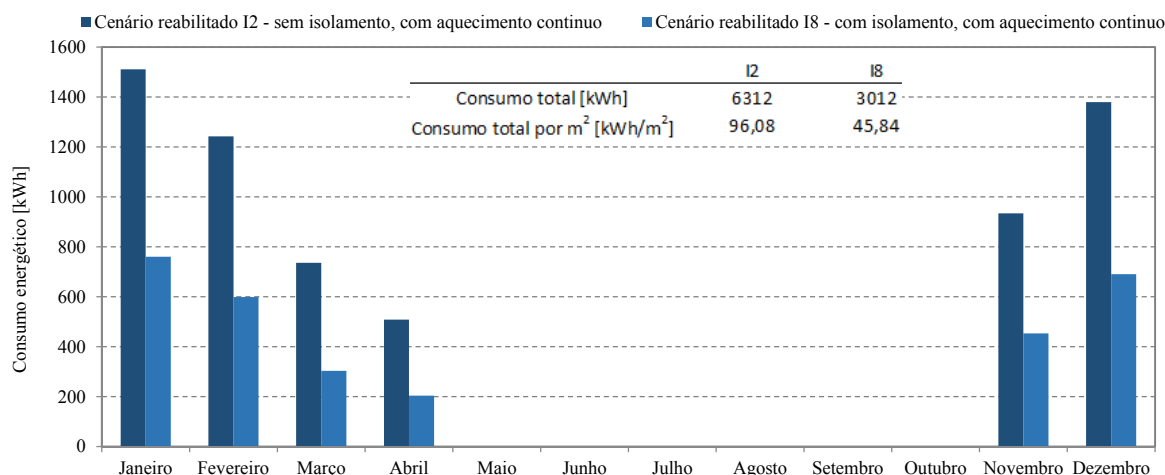
No presente anexo apresentam-se os resultados do consumo energético relativo à cidade de Coimbra.

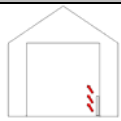
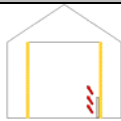


Custos totais de aquecimento [€]						
	 I2		 I8		Diferença entre I2 e I8	
	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural
Custo total	1061 €	566 €	581 €	310 €	480 €	256 €
Custo total por m ²	16 €	9 €	9 €	5 €	7 €	4 €

V.III. Évora

No presente anexo apresentam-se os resultados do consumo energético relativo à cidade de Évora.



Custos totais de aquecimento [€]						
	 I2		 I8		Diferença entre I2 e I8	
	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural	Eletricidade	Gás natural
Custo total	947 €	505 €	452 €	241 €	495 €	264 €
Custo total por m ²	14 €	7 €	8 €	4 €	7 €	4 €

**ANEXO VI. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – ÍNDICE DE
DESCONFORTO TÉRMICO DE INVERNO, IDT – I**

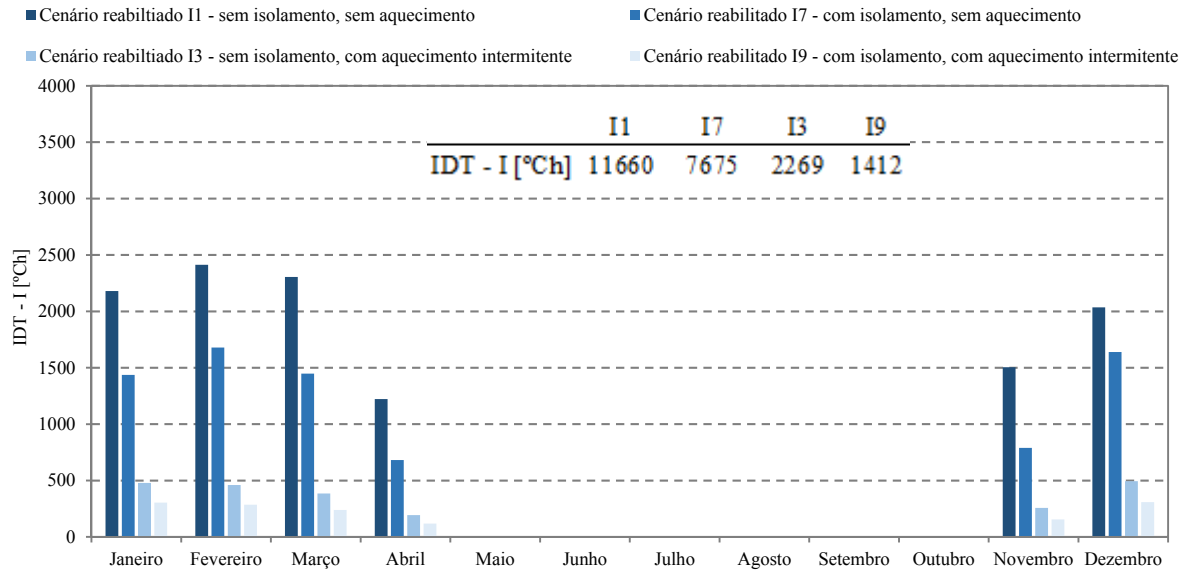
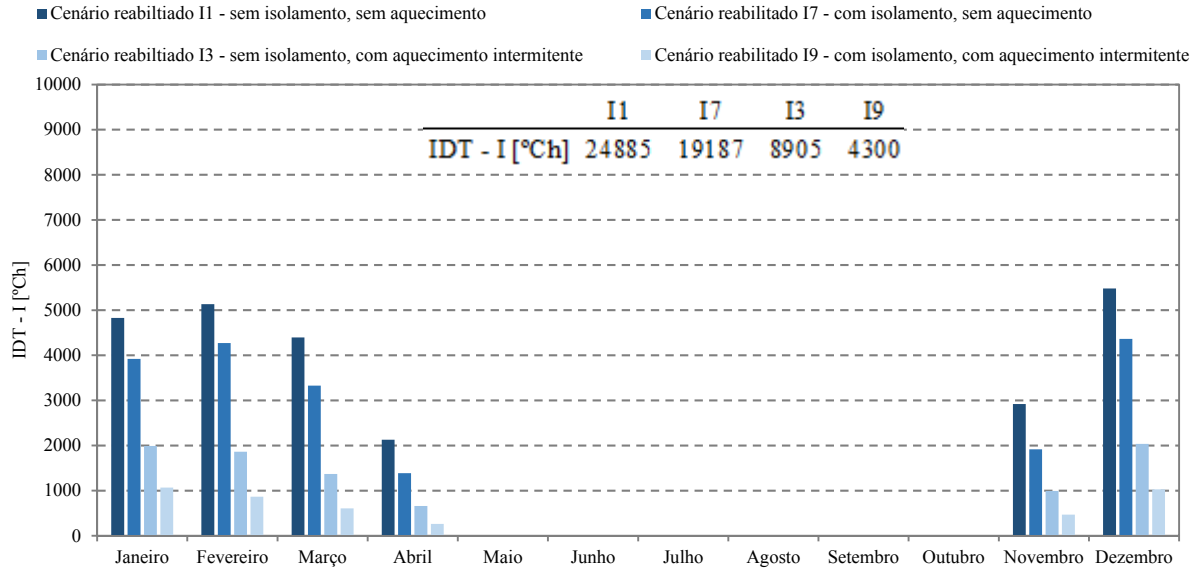
VI.I. LISBOA

VI.II. COIMBRA

VI.III. ÉVORA

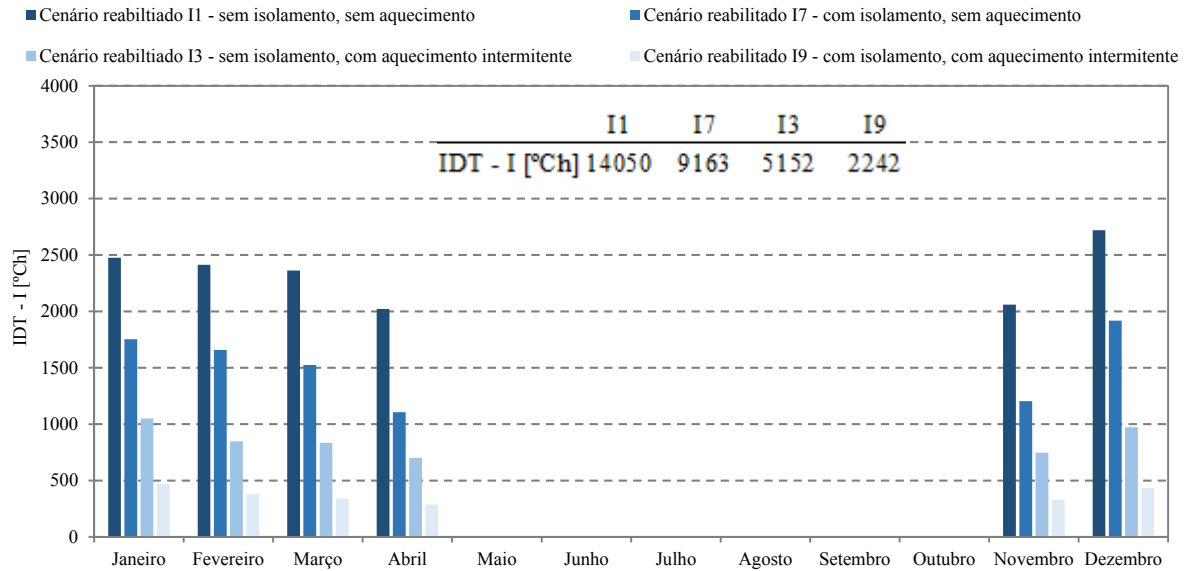
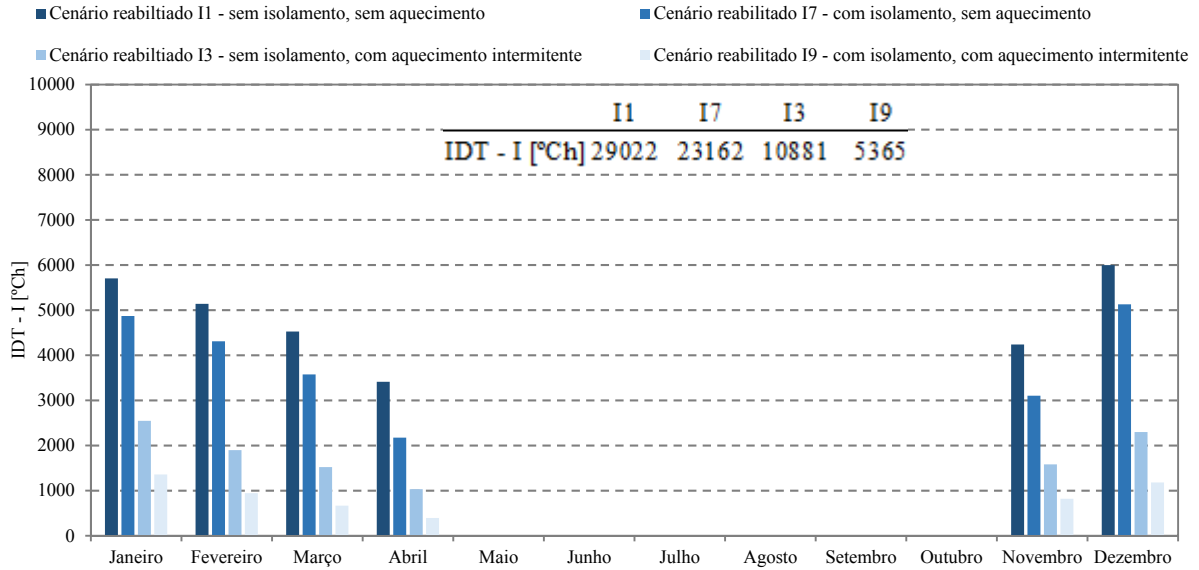
VI.I. Lisboa

No presente anexo apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Inverno da cidade de Lisboa.



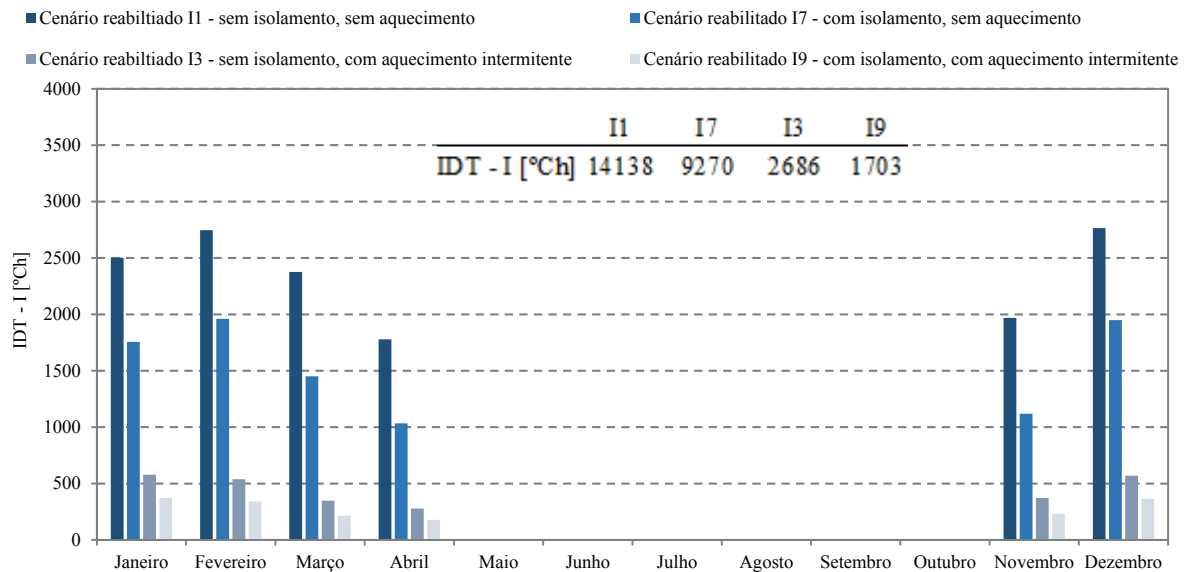
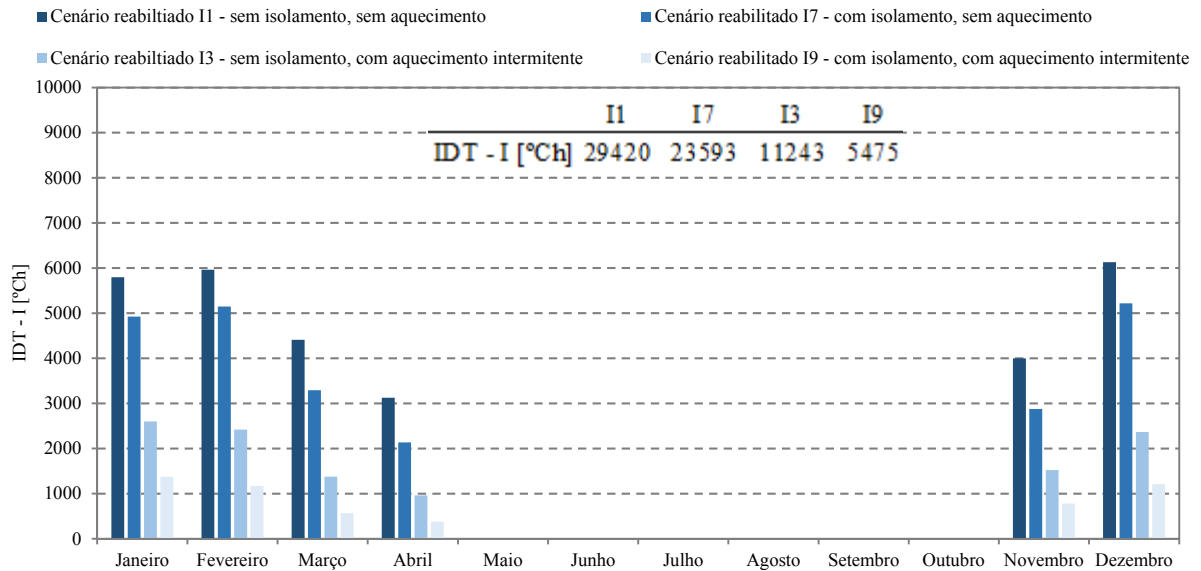
VI.II. Coimbra

No presente anexo apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Inverno da cidade de Coimbra.



VI.III. Évora

No presente anexo apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Inverno da cidade de Évora.



**ANEXO VII. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – AVALIAÇÃO DO
DESCONFORTO TÉRMICO NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO ATRAVÉS DA
NORMA EN 15251**

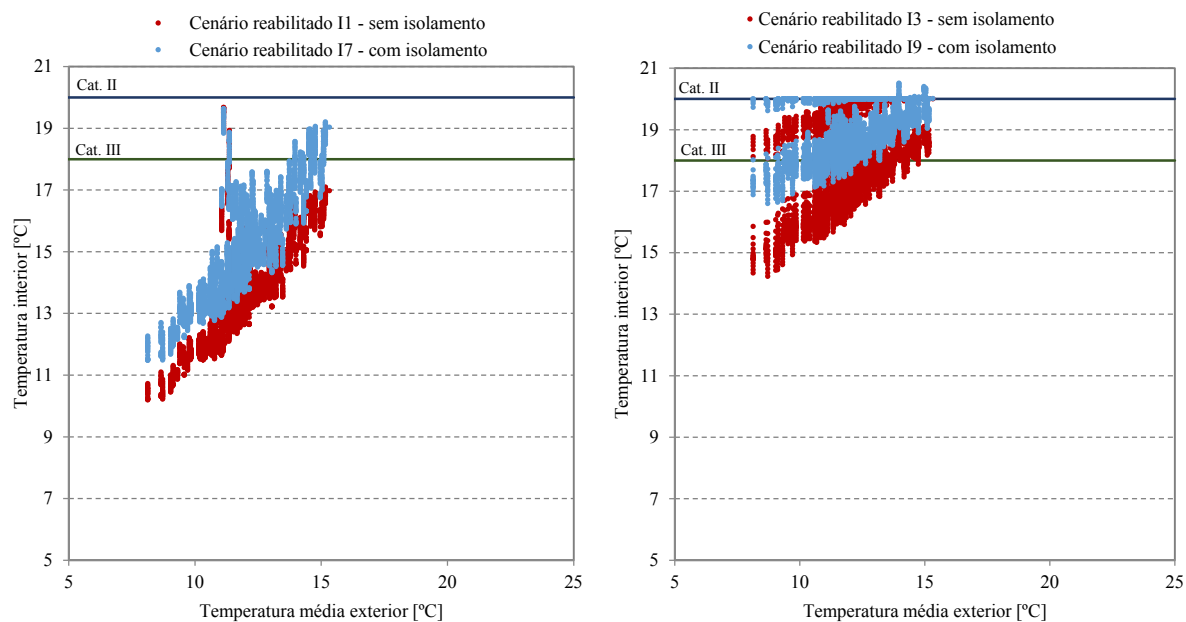
VII.I. LISBOA





VII.II. COIMBRA

VII.III. ÉVORA

VII.I. Lisboa

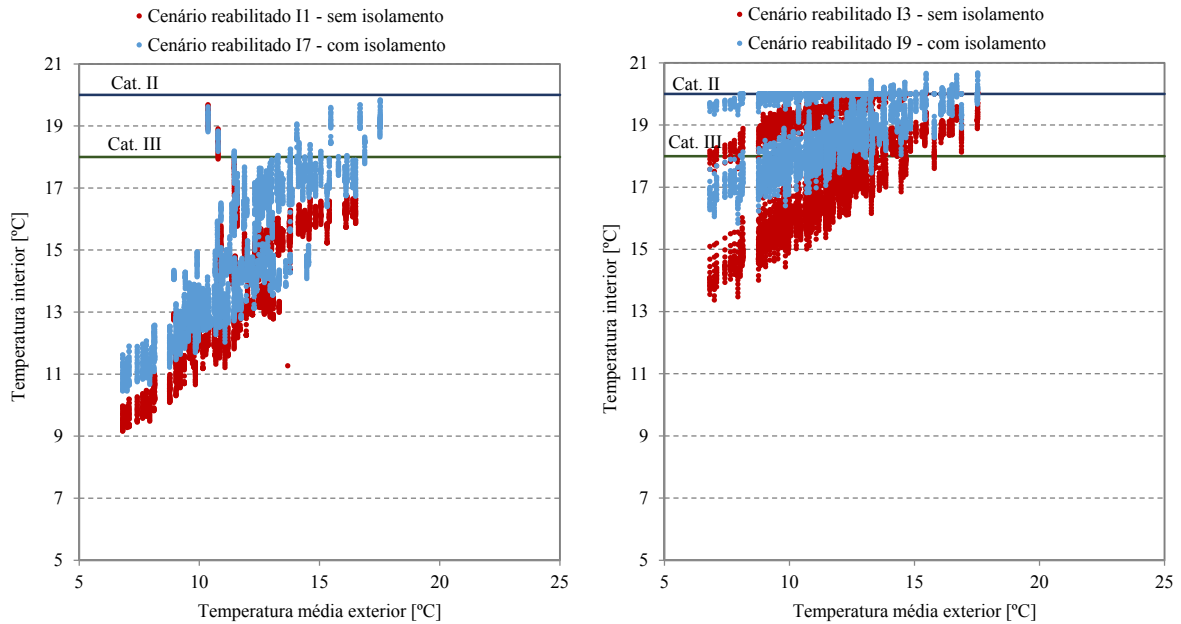
No presente anexo apresentam-se os resultados, da cidade de Lisboa para a estação de aquecimento, da análise do desconforto térmico segundo a Norma EN 15251 [28].







Cenários reabilitados					
Categoria de conforto		 		 	
		I1	I7	I3	I9
II	% Tempo fora dos limites de conforto	100%	100%	90%	80%
	Número de horas fora dos limites de conforto	3889	3889	3500	3111
III	% Tempo fora dos limites de conforto	99%	95%	61%	16%
	Número de horas fora dos limites de conforto	3846	3709	2421	626

VII.II. Coimbra

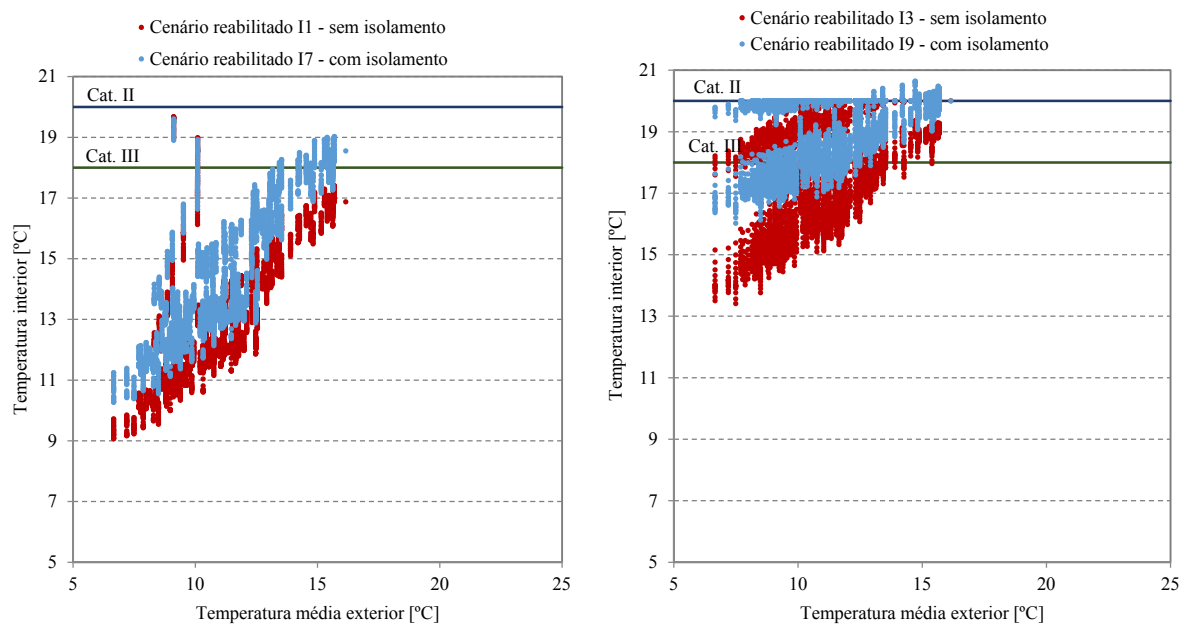
No presente anexo apresentam-se os resultados, da cidade de Coimbra para a estação de aquecimento, da análise do desconforto térmico segundo a Norma EN 15251 [28].



Cenários reabilitados					
Categoria de conforto		 		 	
		I1	I7	I3	I9
II	% Tempo fora dos limites de conforto	100%	100%	90%	78%
	Número de horas fora dos limites de conforto	4344	4344	3910	3388
III	% Tempo fora dos limites de conforto	99%	95%	59%	28%
	Número de horas fora dos limites de conforto	4296	4118	2555	1195

VII.III. Évora

No presente anexo apresentam-se os resultados, da cidade de Évora para a estação de aquecimento, da análise do desconforto térmico segundo a Norma EN 15251 [28].



Cenários reabilitados									
Categoria de conforto		I1		I7		I3		I9	
II	% Tempo fora dos limites de conforto	100%	100%	90%	80%				
	Número de horas fora dos limites de conforto	4152	4152	3944	3322				
III	% Tempo fora dos limites de conforto	99%	94%	64%	33%				
	Número de horas fora dos limites de conforto	4111	3891	2637	1361				

ANEXO VIII. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – TEMPERATURA DO AR INTERIOR NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

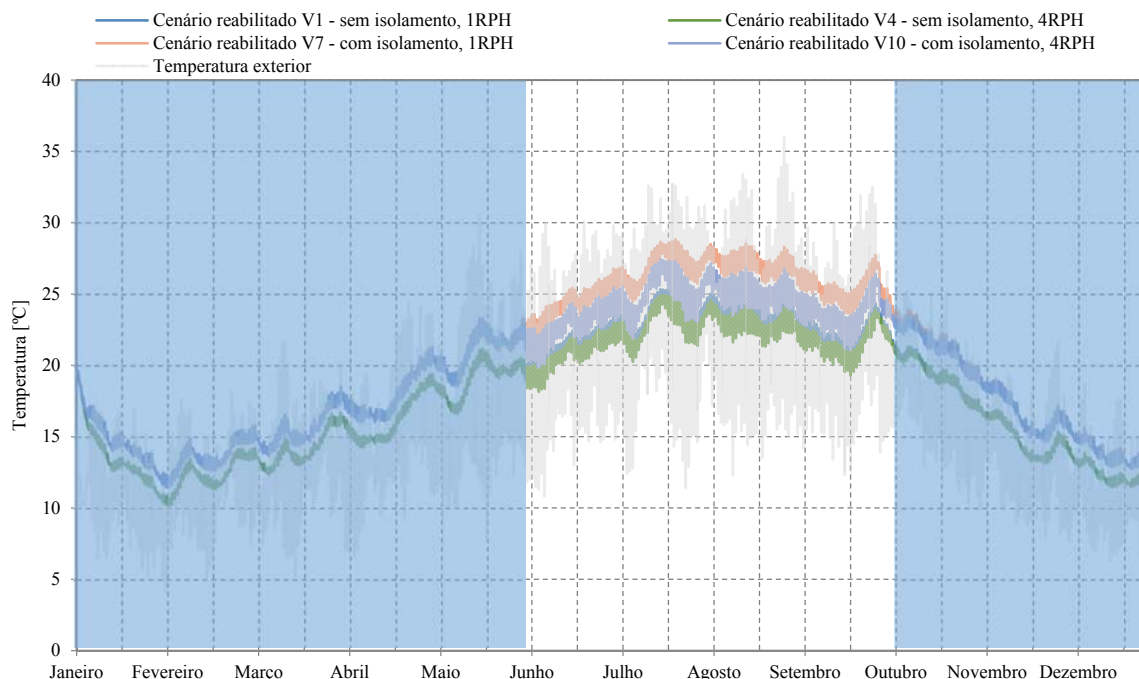
VIII.I. LISBOA

VIII.II. COIMBRA

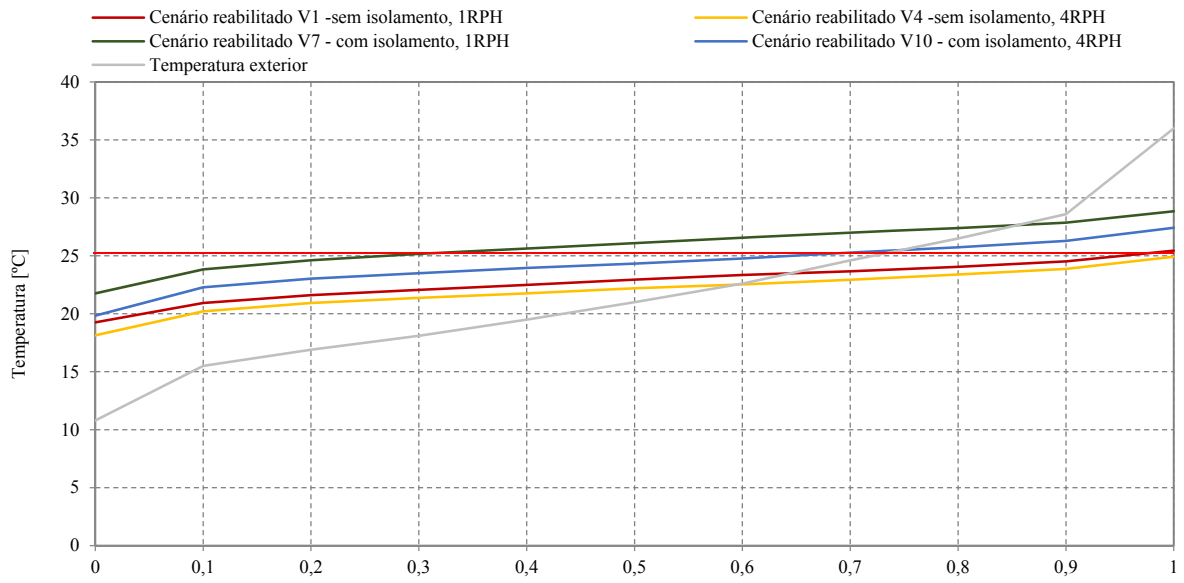
VIII.III. ÉVORA

VIII.I. Lisboa

No presente anexo apresentam-se os resultados da temperatura do ar interior da cidade de Lisboa na estação de arrefecimento, 4 meses (2928 horas).



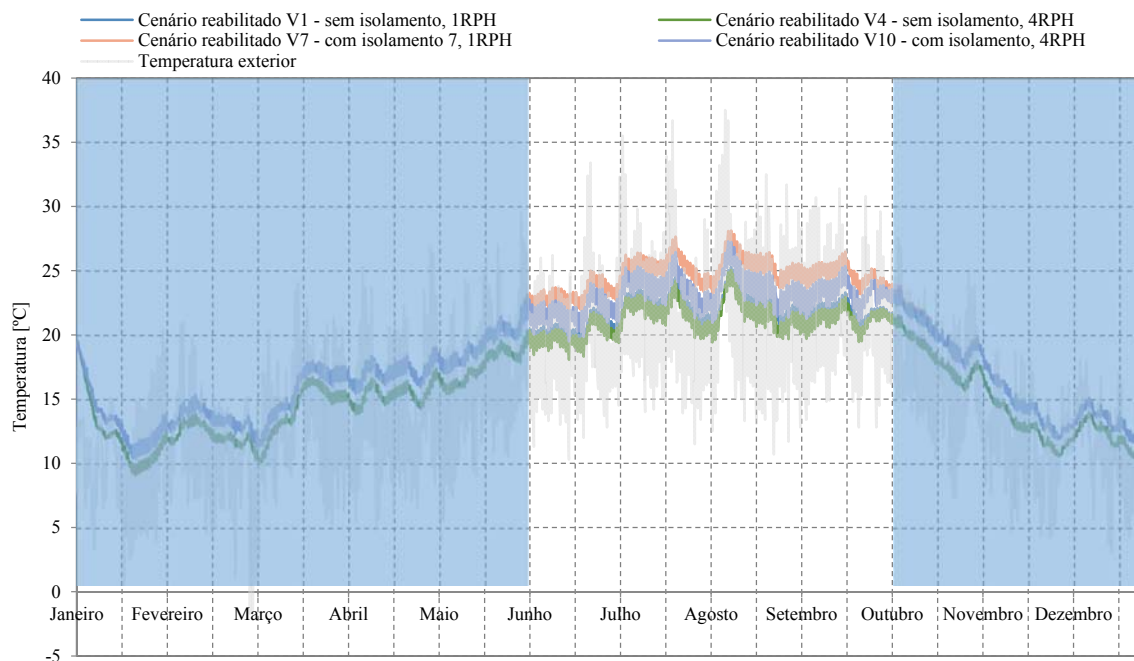
Cenários reabilitados				
	V1	V7	V4	V10
Tempo > 25°C	5% (146 horas)	75% (2196)	2% (59 horas)	40% (1171 horas)
Média [°C]	22,80	25,95	22,10	24,32
Quartil 25 [°C]	21,83	24,90	21,19	23,29
Quartil 50 [°C]	22,95	26,10	22,20	24,33
Quartil 75 [°C]	23,85	27,19	23,16	25,50
Percentil 95% [°C]	24,83	28,14	24,30	26,72
Percentil 98% [°C]	25,11	28,39	24,64	27,04
Percentil 99% [°C]	25,24	28,51	24,78	27,19



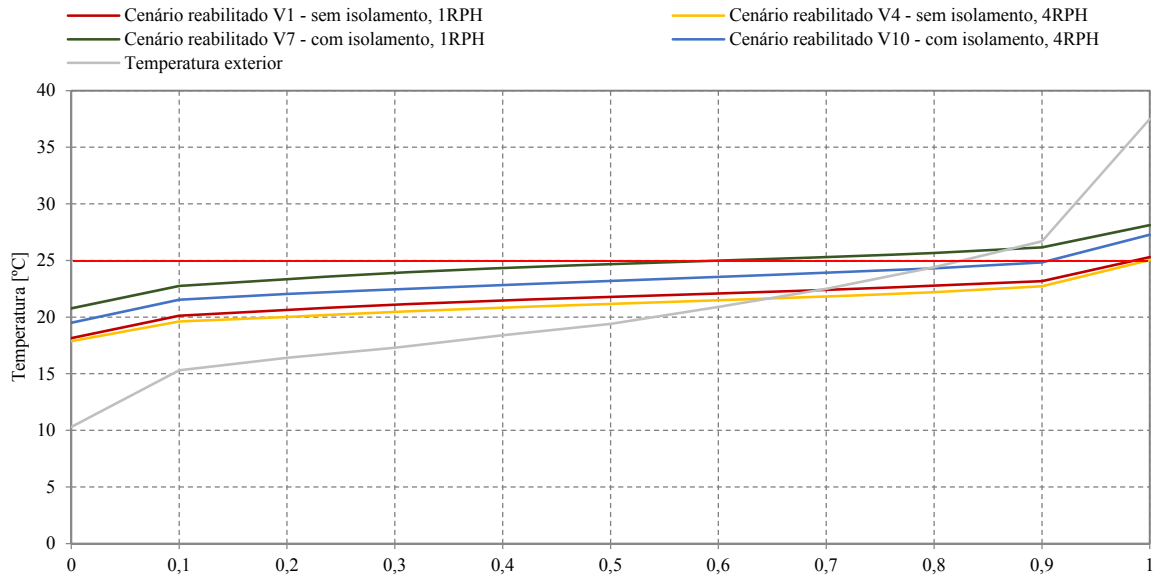
Cenários reabilitados				
	V1	V7	V4	V10
T_{max} [°C]	25,45	28,84	24,93	27,43

VIII.II. Coimbra

No presente anexo apresentam-se os resultados da temperatura do ar interior da cidade de Coimbra na estação de arrefecimento, 4 meses (2928 horas).



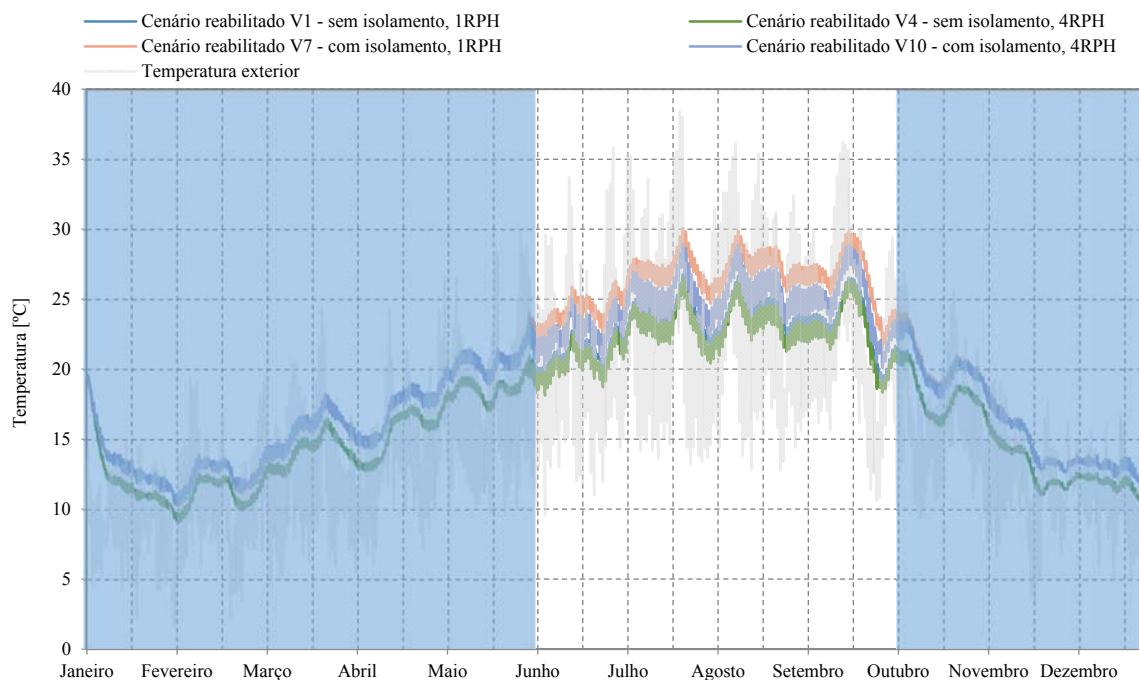
Cenários reabilitados				
	V1	V7	V4	V10
Tempo > 25°C	2% (59 horas)	40% (1171 horas)	1% (29 horas)	10% (293 horas)
Média [°C]	21,76	24,57	21,18	23,21
Quartil 25 [°C]	20,88	23,65	20,24	22,23
Quartil 50 [°C]	21,77	24,68	21,17	23,21
Quartil 75 [°C]	22,59	25,48	22,00	24,13
Percentil 95% [°C]	23,83	26,55	23,32	25,31
Percentil 98% [°C]	24,43	27,26	24,03	26,17
Percentil 99% [°C]	24,79	27,60	24,57	26,65

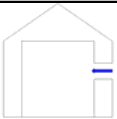

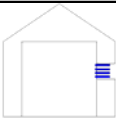
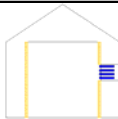


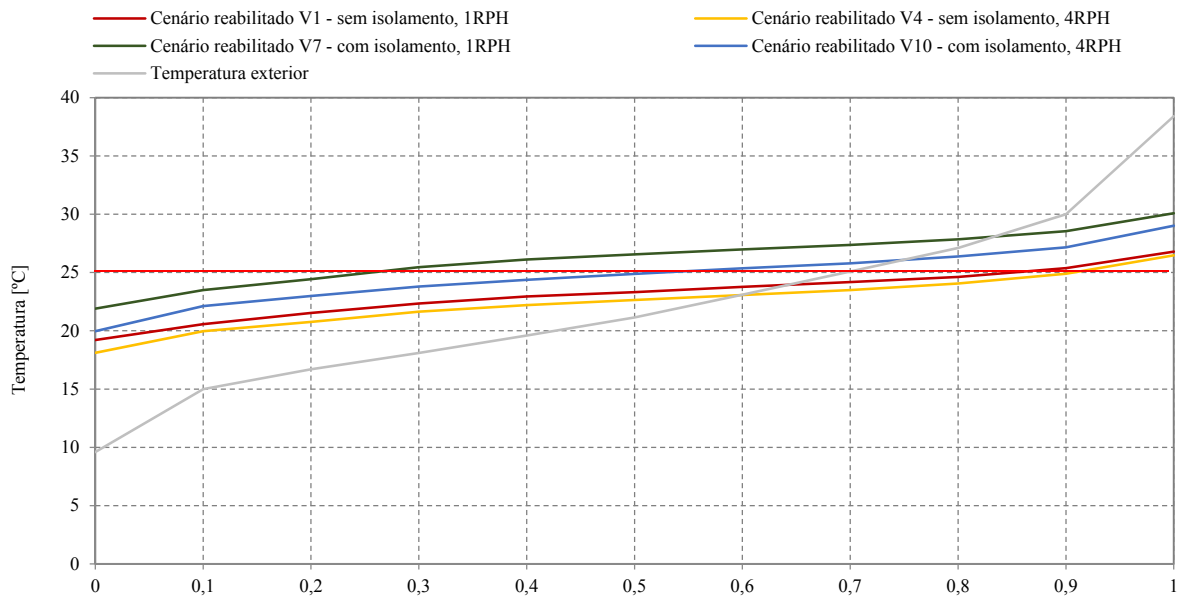
Cenários reabilitados				
	V1	V7	V4	V10
T_{max} [°C]	25,30	28,12	25,04	27,27

VIII.III. Évora

No presente anexo apresentam-se os resultados da temperatura do ar interior da cidade de Évora na estação de arrefecimento, 4 meses (2928 horas).



Cenários reabilitados				
	 V1		 V7	
Tempo > 25°C	20% (586 horas)	80% (2342 horas)	 V4	 V10
Média [°C]	23,16	26,28	22,52	24,75
Quartil 25 [°C]	21,97	24,97	21,30	23,42
Quartil 50 [°C]	23,32	26,56	22,64	24,89
Quartil 75 [°C]	24,42	27,57	23,77	26,04
Percentil 95% [°C]	25,97	29,01	25,57	27,89
Percentil 98% [°C]	26,29	29,45	25,98	28,38
Percentil 99% [°C]	26,47	29,62	26,18	28,58



Cenários reabilitados				
	V1	V7	V4	V10
T_{max} [°C]	26,78	30,08	26,47	29,02

**ANEXO IX. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – EFEITO DA VENTILAÇÃO
NOTURNA**

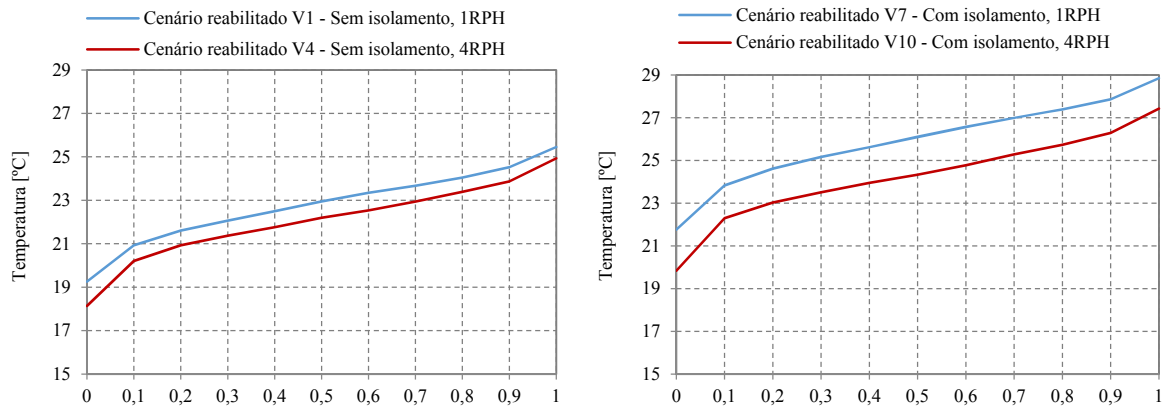
IX.I. LISBOA

IX.II. COIMBRA

IX.III. ÉVORA

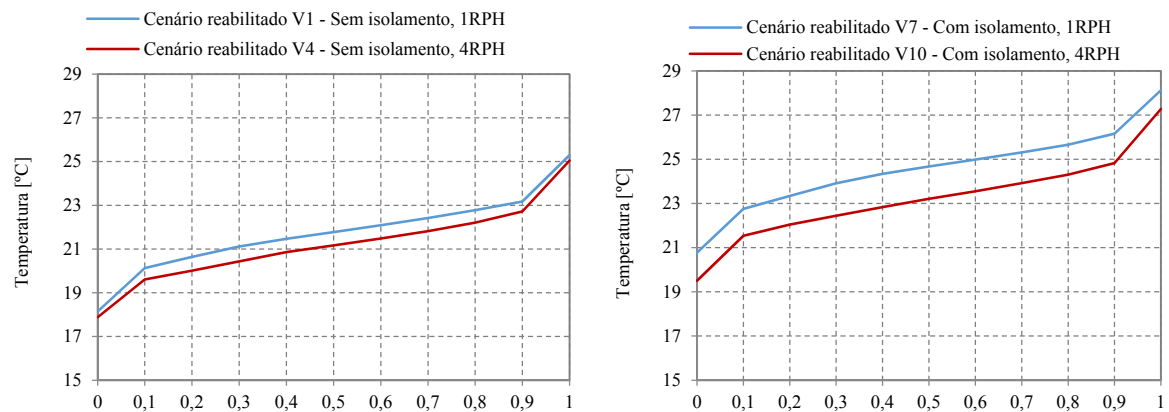
IX.I. Lisboa

No presente anexo apresentam os resultados do efeito da ventilação noturna para a cidade de Lisboa.



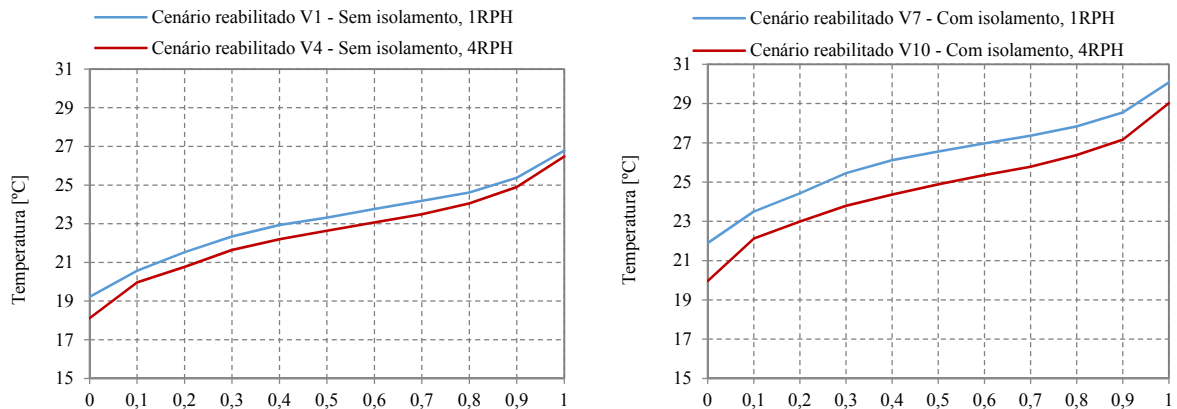
IX.II. Coimbra

No presente anexo apresentam os resultados do efeito da ventilação noturna para a cidade de Coimbra.



IX.III. Évora

No presente anexo apresentam os resultados do efeito da ventilação noturna para a cidade de Évora.



**ANEXO X. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – ÍNDICE DE
DESCONFORTO TÉRMICO DE VERÃO, IDT – V**

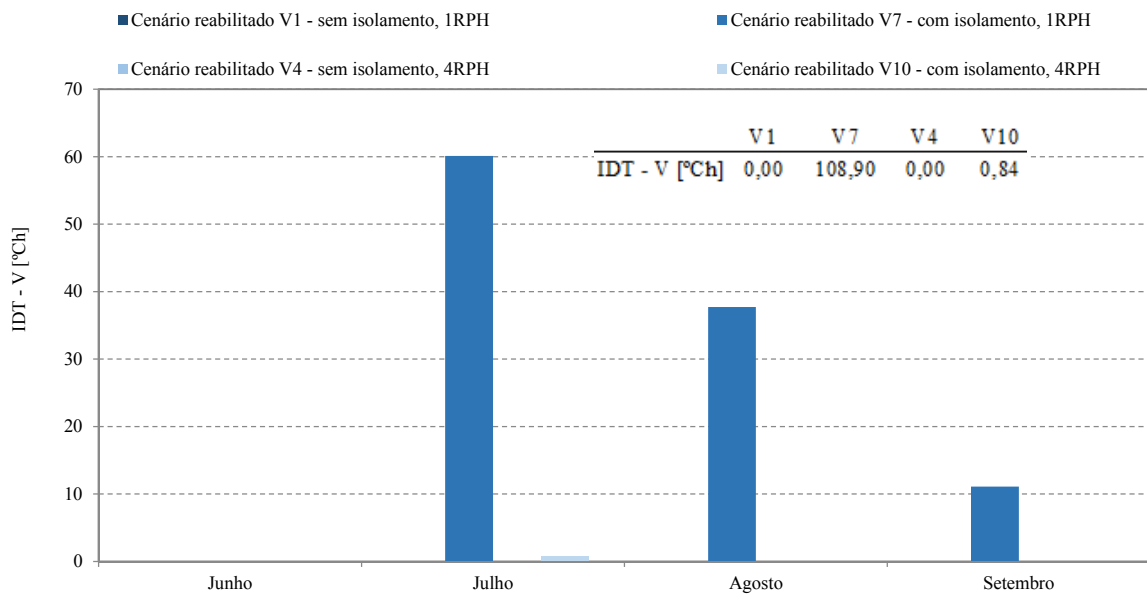
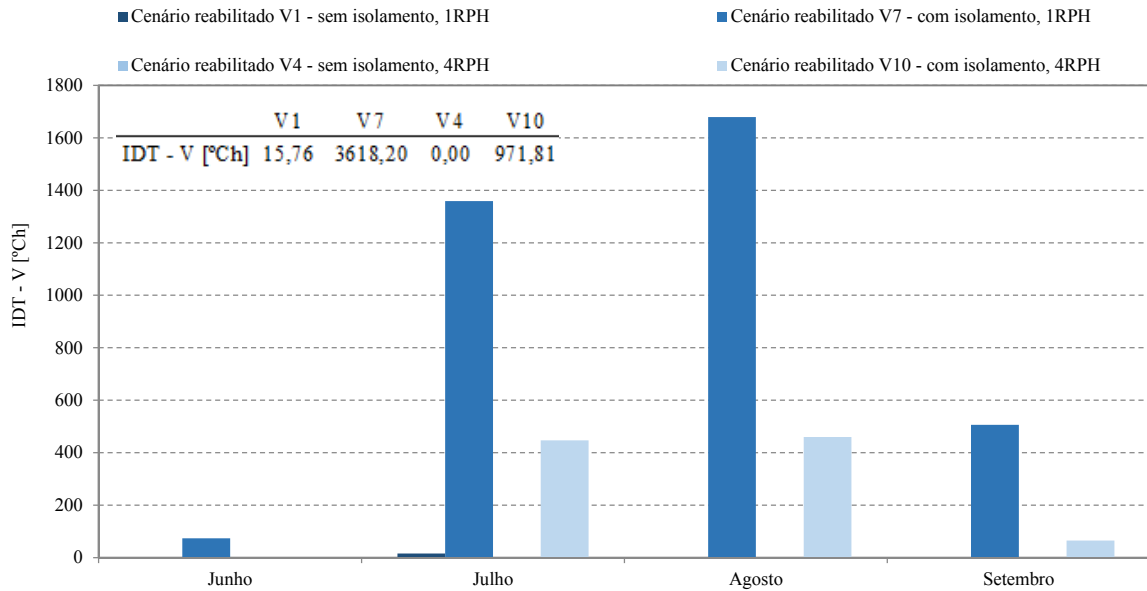
X.I. LISBOA

X.II. COIMBRA

X.III. ÉVORA

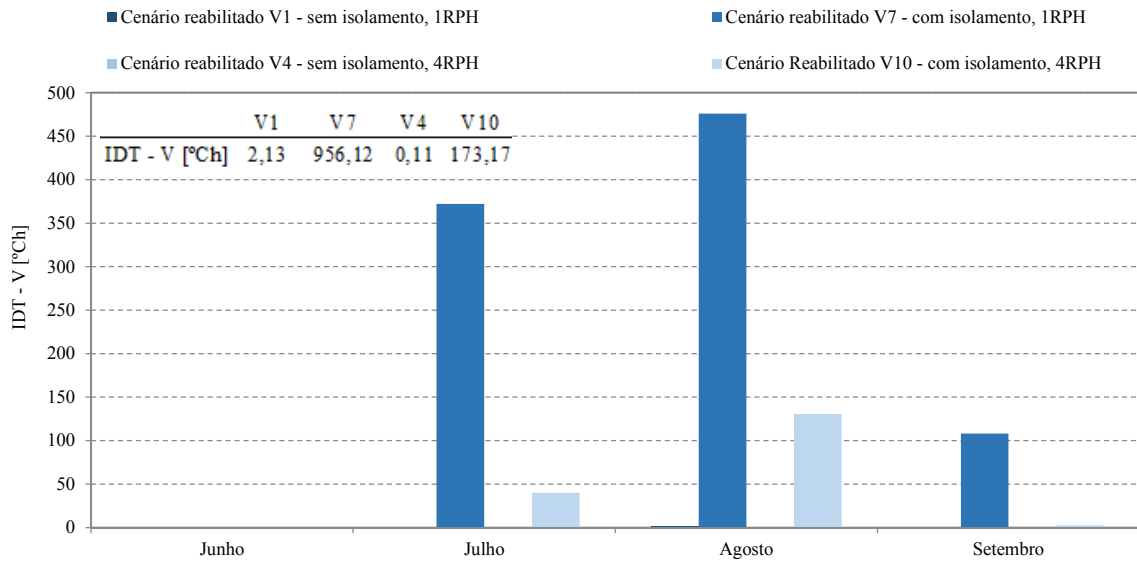
X.I. Lisboa

No presente anexo apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Verão, IDT – V para a cidade de Lisboa.



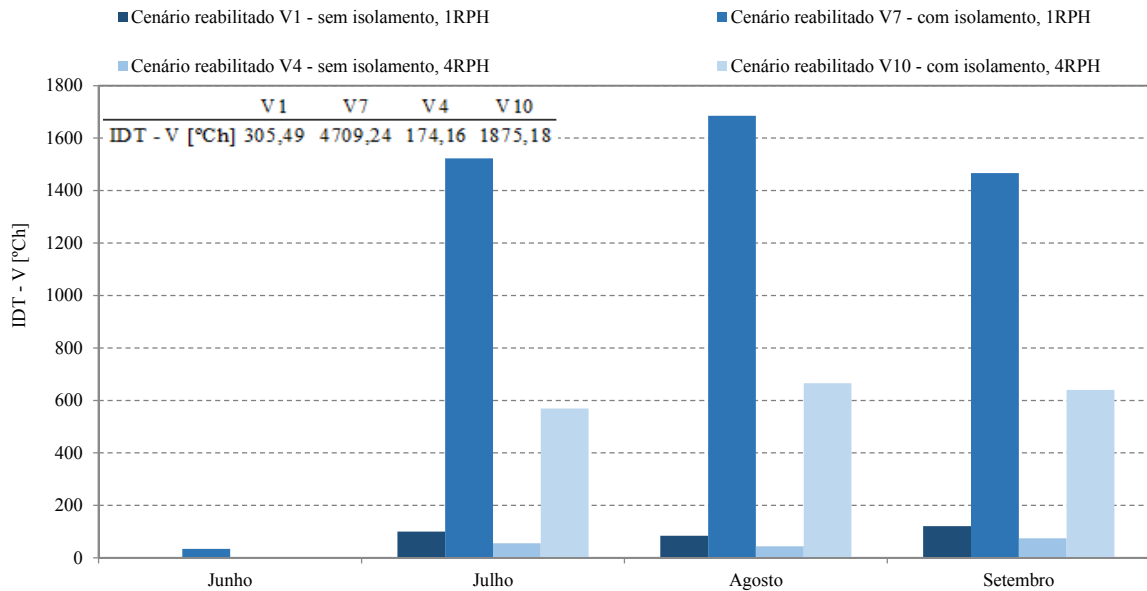
X.II. Coimbra

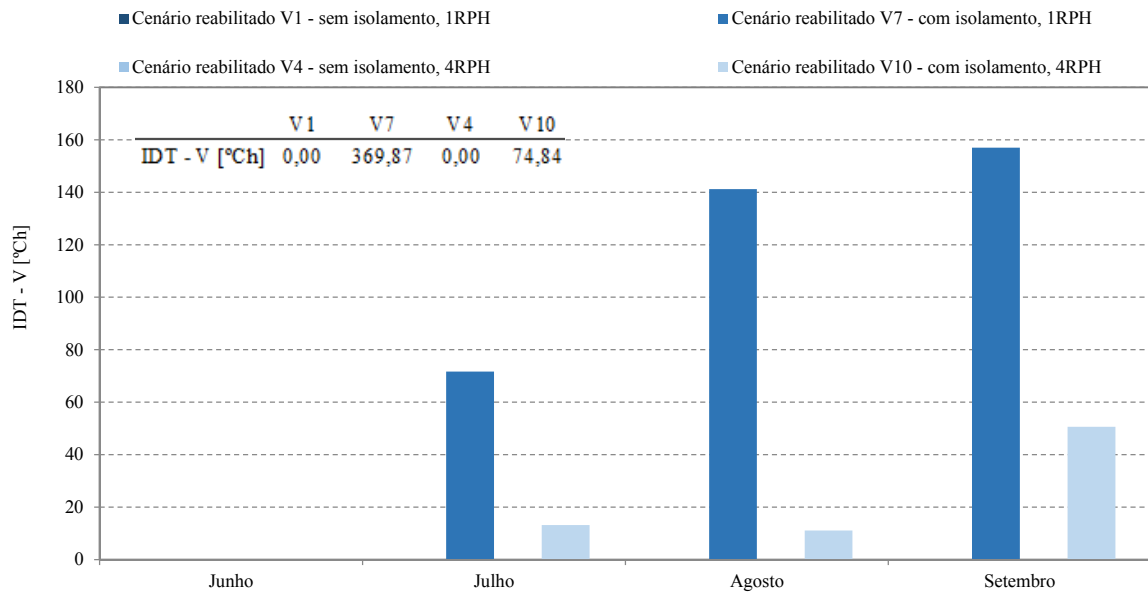
No presente anexo apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Verão, IDT – V para a cidade de Coimbra.



X.III. Évora

No presente anexo apresentam-se os resultados do Índice de Desconforto Térmico de Verão, IDT – V para a cidade de Évora





**ANEXO XI. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – AVALIAÇÃO DO
DESCONFORTO TÉRMICO NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO ATRAVÉS
DA NORMA EN 15251**

XI.I. BRAGANÇA

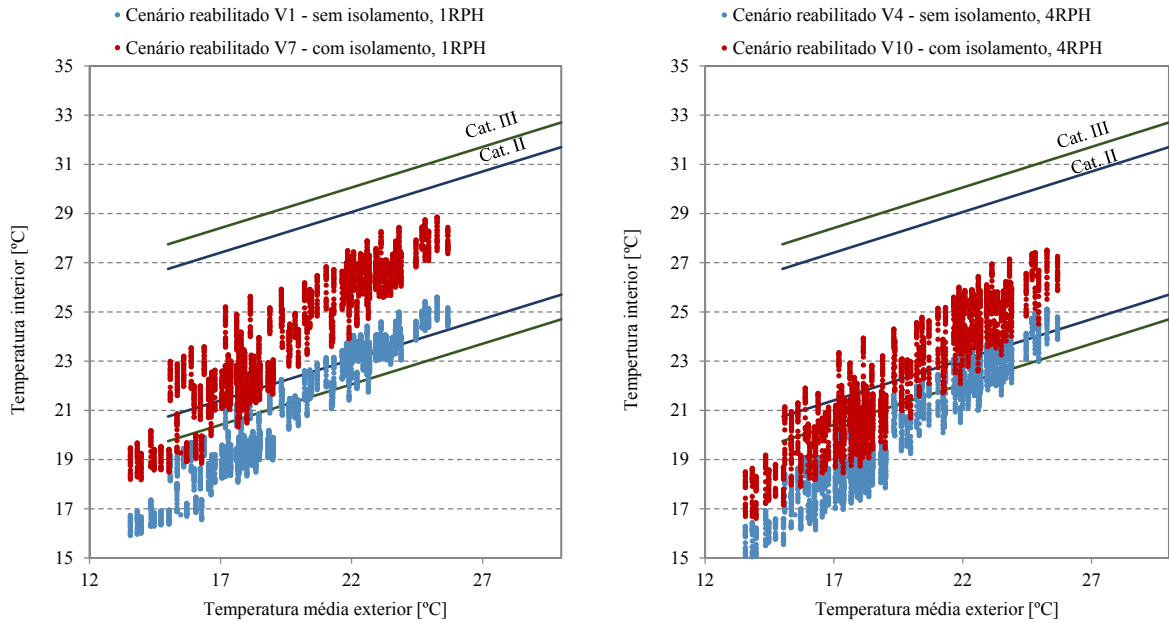
XI.II. LISBOA

XI.III. COIMBRA

XI.IV. ÉVORA

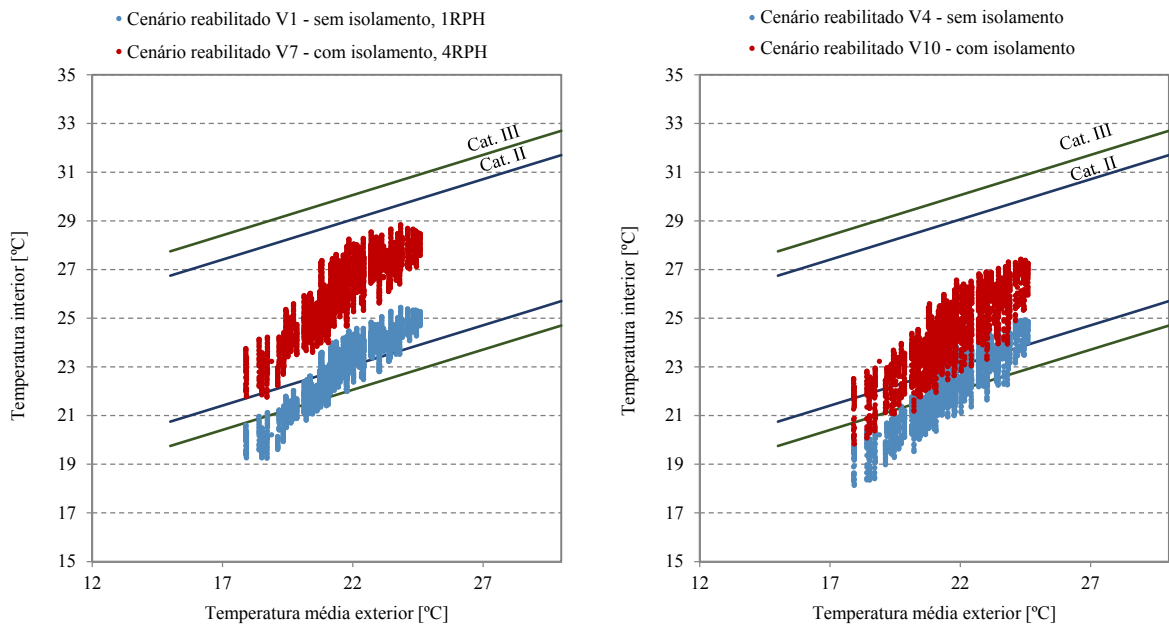
XI.I. Bragança

Apresenta-se no presente anexo os resultados da avaliação do desconforto térmico, através da Norma EN 15251 [28], para a cidade de Bragança.



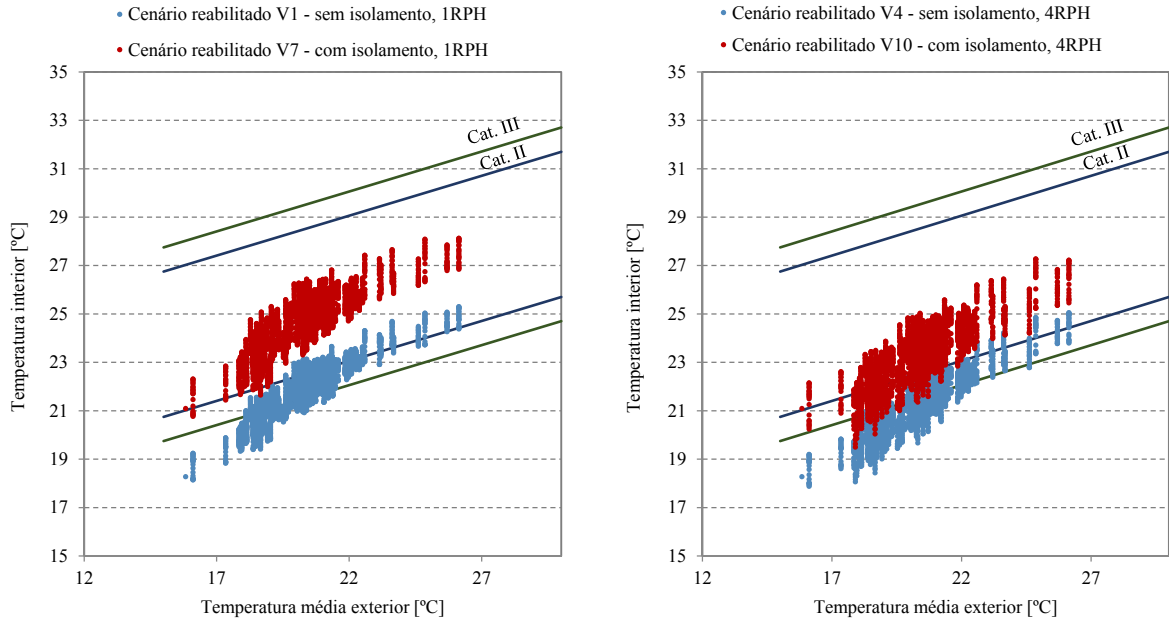
XI.II. Lisboa

Apresenta-se no presente anexo os resultados da avaliação do desconforto térmico, através da Norma EN 15251 [28], para a cidade de Lisboa.



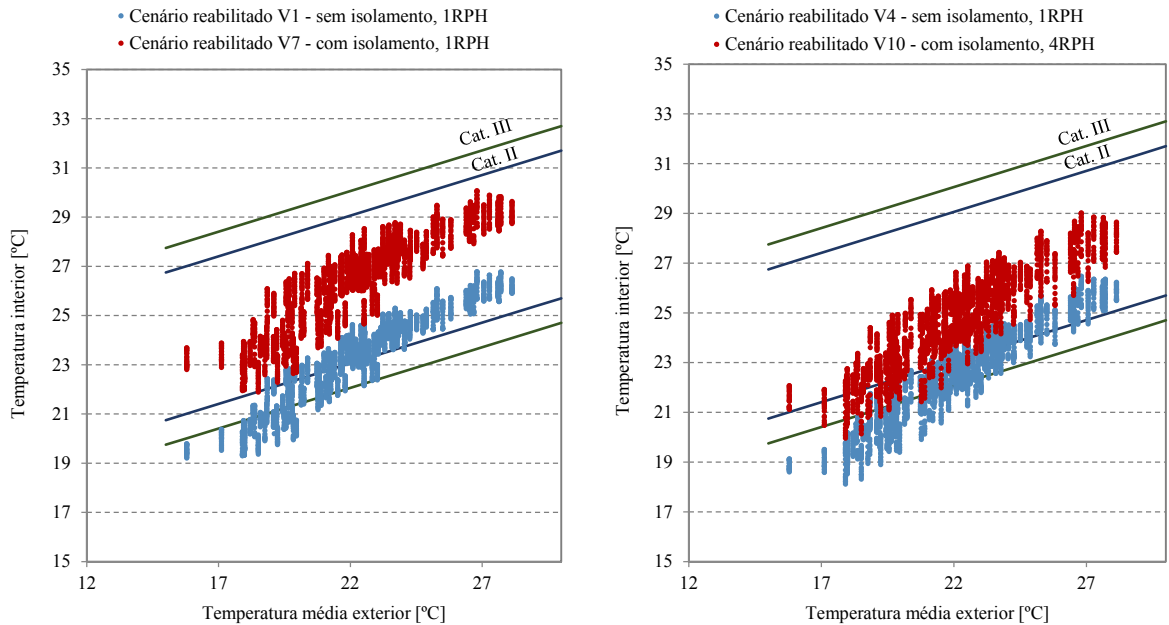
XI.III. Coimbra

Apresenta-se no presente anexo os resultados da avaliação do desconforto térmico, através da Norma EN 15251 [28], para a cidade de Coimbra.



XI.IV. Évora

Apresenta-se no presente anexo os resultados da avaliação do desconforto térmico, através da Norma EN 15251 [28], para a cidade de Évora.



**ANEXO XII. RESULTADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE – TEMPERATURA MÉDIA
RADIANTE VS TEMPERATURA DO AR INTERIOR**

XII.I. BRAGANÇA

XII.II. LISBOA

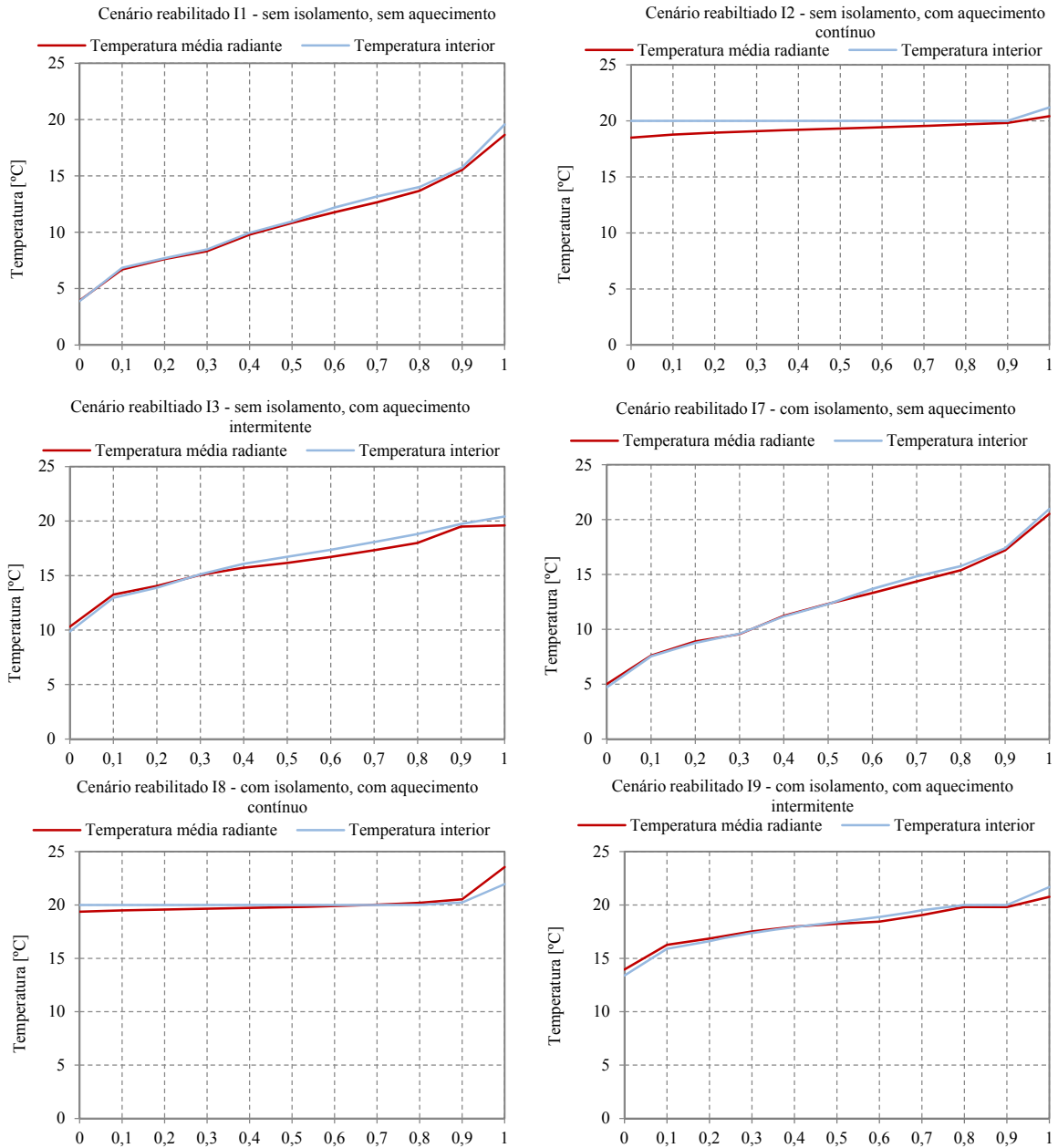
XII.III. COIMBRA

XII.IV. ÉVORA

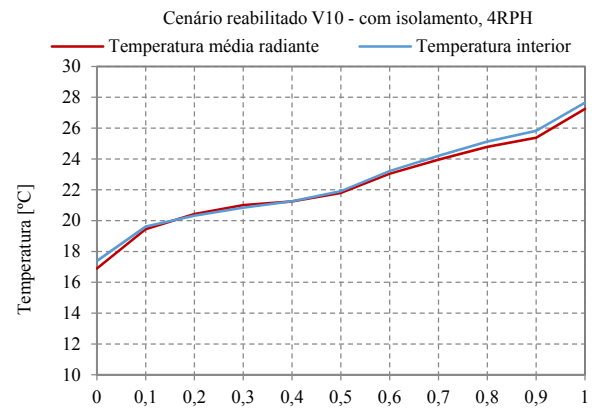
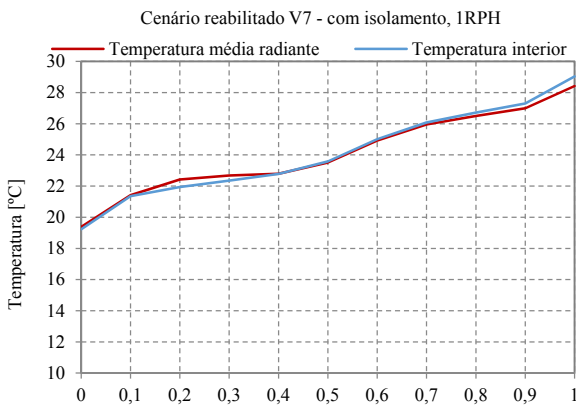
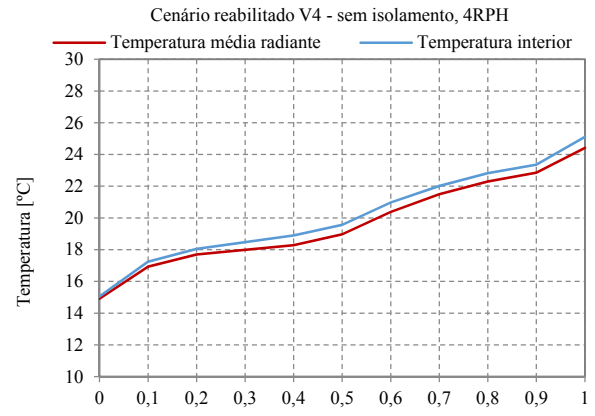
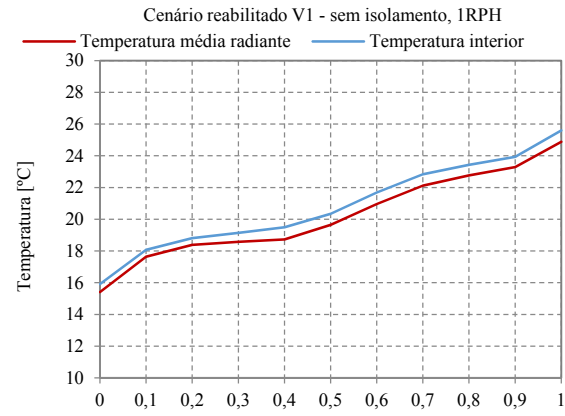
XII.I. Bragança

Apresenta-se no presente anexo os resultados da comparação entre a temperatura do ar interior e a temperatura média radiante para a cidade de Bragança.

Estação de aquecimento



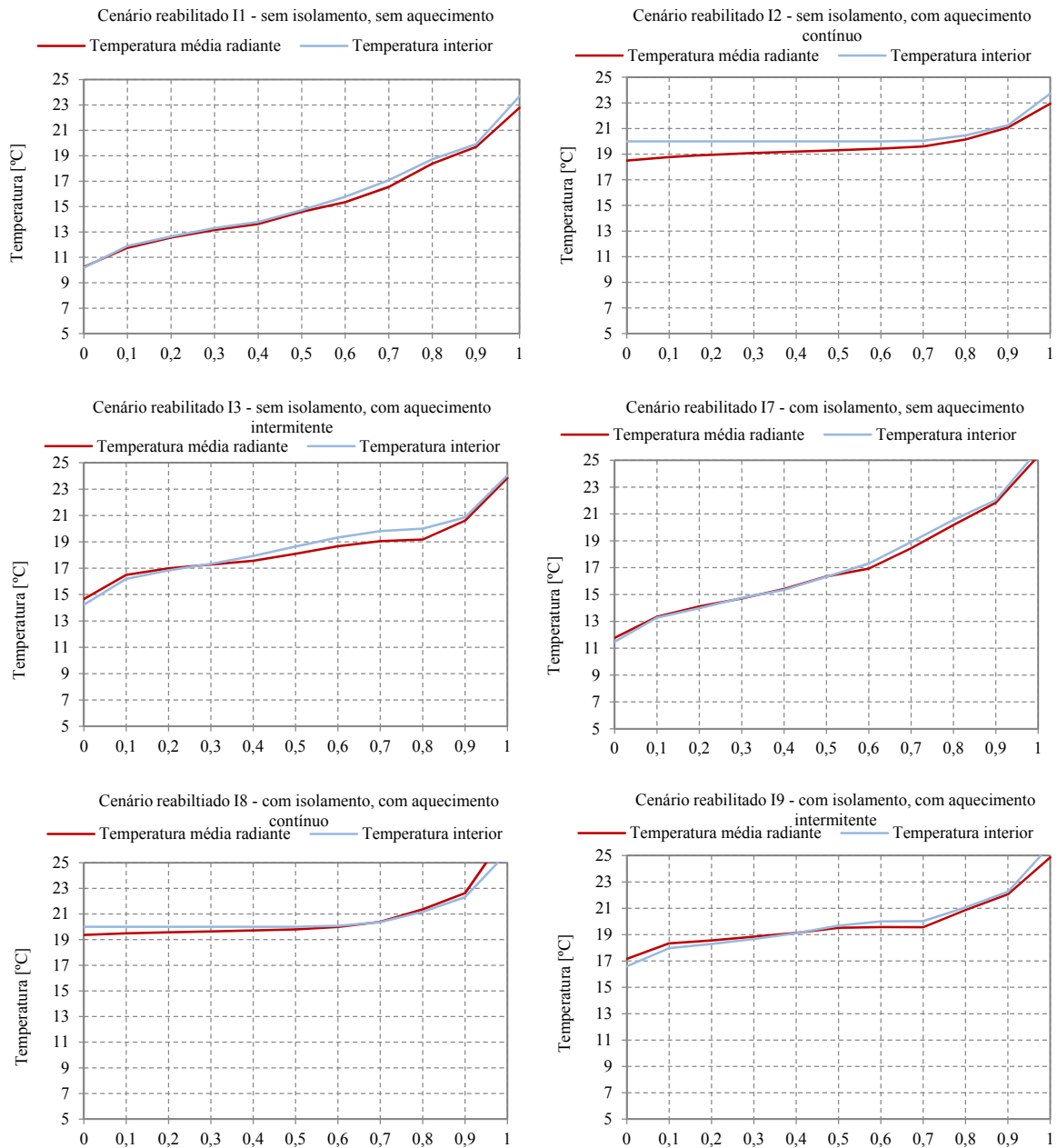
Estação de arrefecimento



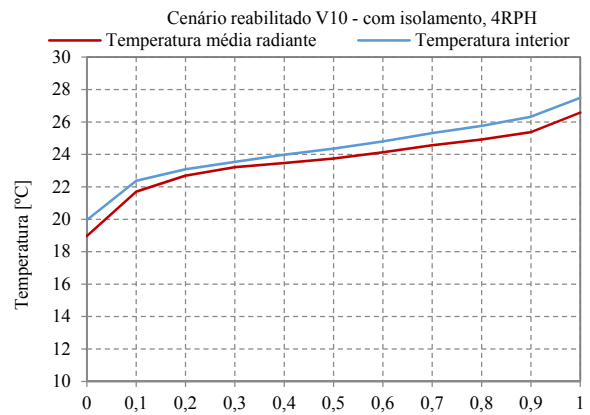
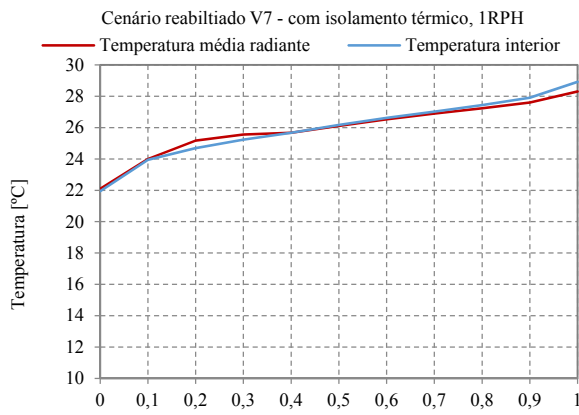
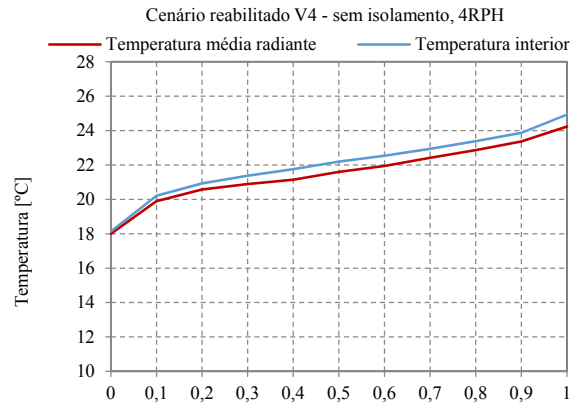
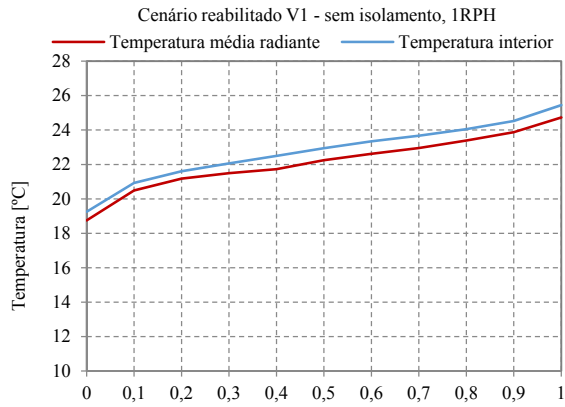
XII.II. Lisboa

Apresenta-se no presente anexo os resultados da comparação entre a temperatura do ar interior e a temperatura média radiante para a cidade de Lisboa.

Estação de aquecimento



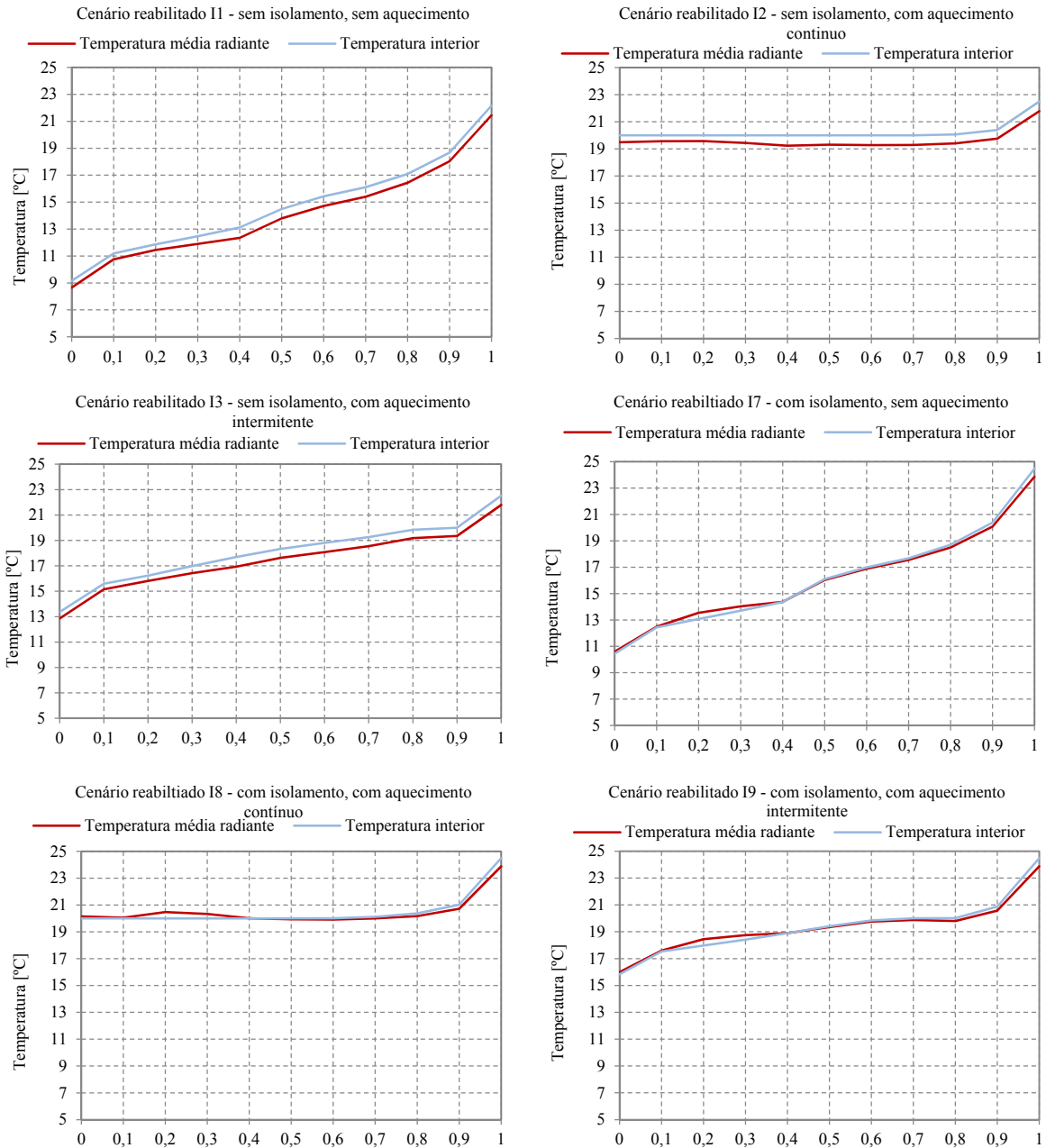
Estação de arrefecimento



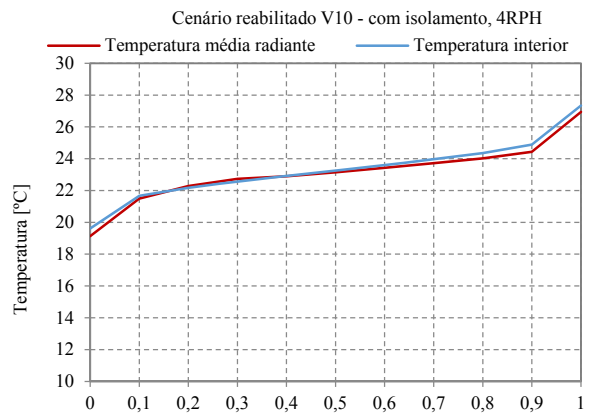
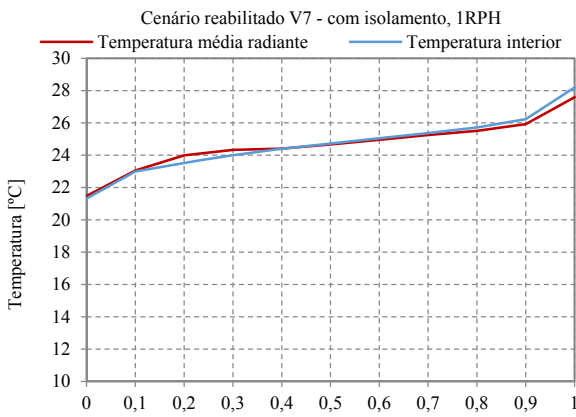
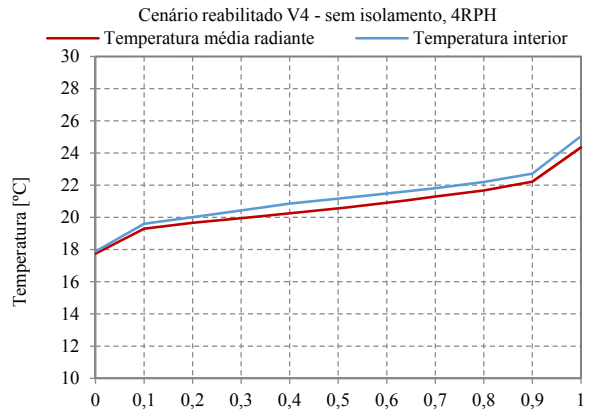
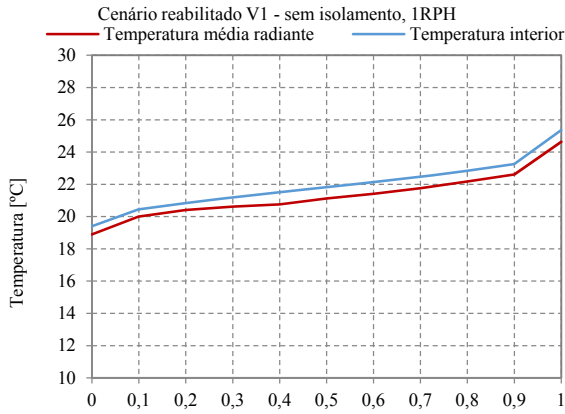
XII.III. Coimbra

Apresenta-se no presente anexo os resultados da comparação entre a temperatura do ar interior e a temperatura média radiante para a cidade de Coimbra.

Estação de aquecimento



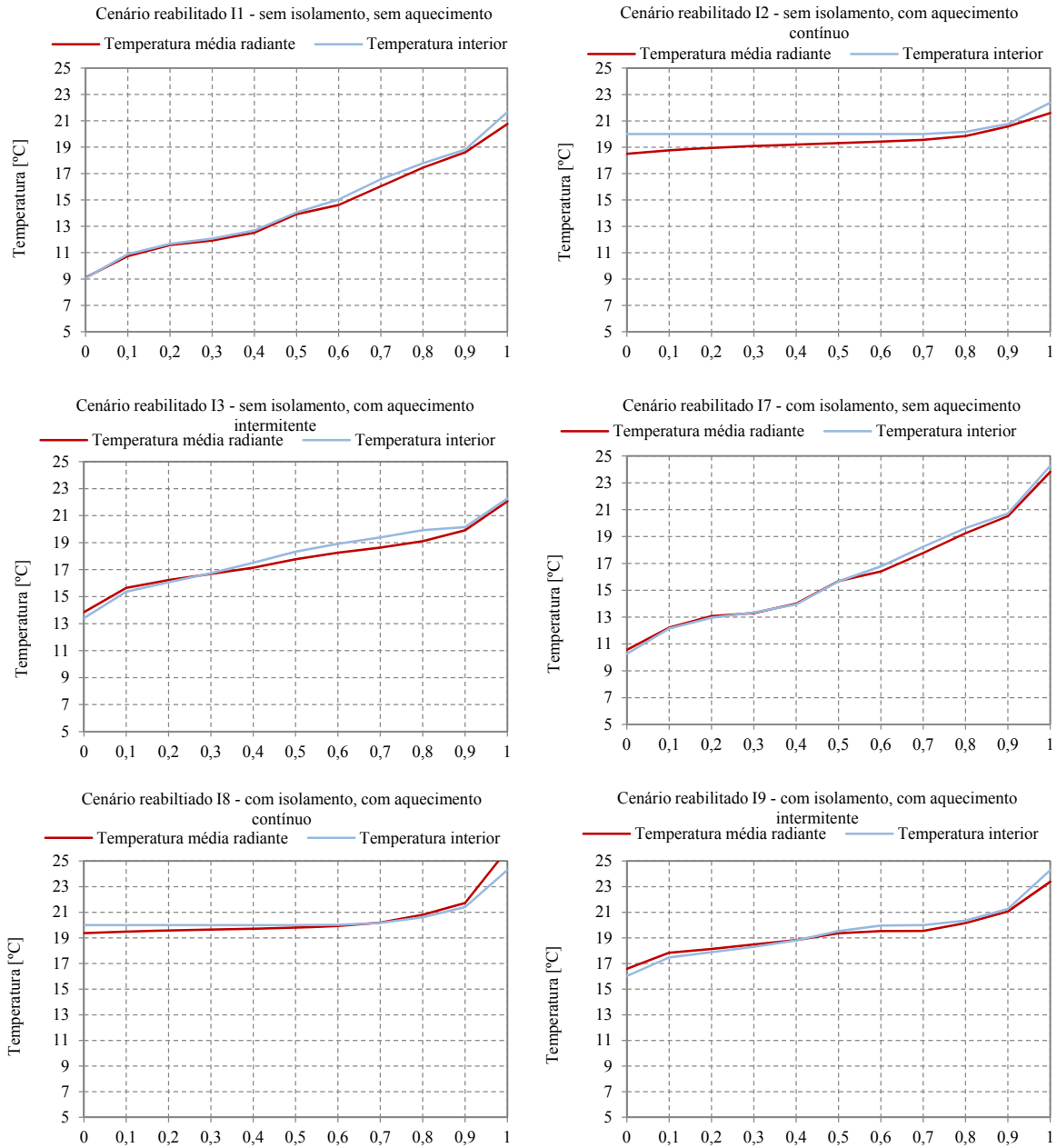
Estação de arrefecimento



XII.IV. Évora

Apresenta-se no presente anexo os resultados da comparação entre a temperatura do ar interior e a temperatura média radiante para a cidade de Évora.

Estação de aquecimento



Estação de arrefecimento

