



JOÃO BARTOLOMEU CATARINO ABRANTES

**Implicações do Conforto Térmico no
Consumo Energético – Uma Hipótese
de Modelo Adaptativo Aplicada ao
Verão**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Miguel José das Neves Pires
Amado, Professor Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Gouveia Aparício Bento Leal
Arguente: Prof. Doutor Vasco Nunes da Ponte Moreira Rato
Vogal: Prof. Doutor Miguel José das Neves Pires Amado

“Copyright” de João Bartolomeu Catarino Abrantes, FCT/UNL e UNL

“A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor”.

AGRADECIMENTOS

A complexidade inerente a uma dissertação envolve em diferentes etapas da sua realização várias pessoas que directa ou indirectamente possibilitam a finalização do trabalho. A todos aqueles que me permitiram finalizar este percurso académico desejo expressar o meu profundo agradecimento.

Em primeiro, ao Professor Doutor Miguel Pires Amado, meu orientador, pela disponibilidade que sempre demonstrou em apoiar o desenvolvimento deste tema, nomeadamente pela rápida resolução de dúvidas mesmo em períodos já tardios do dia. Ao Professor Doutor Vasco Moreira Rato pelas conversas de café que me direccionaram na investigação deste tema.

Ao Professor Doutor Daniel Aelenei e ao João Filipe dos Santos Afonso pela preciosa ajuda na descodificação do programa *EnergyPlus*.

À Carolina Leite Duarte pelas muitas horas de trabalho em conjunto na última etapa académica e ao seu tio, Eng.º João Duarte pela disponibilidade que demonstrou em fornecer dados técnicos da habitação que serviu de base a este estudo.

Aos meus chefes, Eng.º Ramiro Fonseca e Eng.^a Joana Colaço, que sempre me permitiram, em alturas mais difíceis, dedicar-me exclusivamente à conclusão deste meu outro trabalho.

Aos meus pais por todo o apoio e pela sapiência transmitida que me levou a nunca deixar de desistir. À minha namorada e companheira, Alexandra Lobato pela correcção da minha escrita e pelas muitas horas que passou ao meu lado.

Agradeço a todos os meus amigos que não podendo acompanhar-me nesta etapa da minha vida nunca se esqueceram de me apoiar.

RESUMO

O consumo de energia no sector doméstico registou apenas um ligeiro abrandamento nos últimos 20 anos e prevê-se, no contexto de arrefecimento económico, um agravamento do esforço financeiro de energia no sector residencial. O parque habitacional é um dos sectores de intervenção prioritária ao nível do desempenho térmico. Com a entrada no passado recente da Directiva Europeia da Performance Energética de Edifícios (EPBD), foi dado o primeiro passo neste sentido, introduzindo-se diversas medidas que limitam o consumo de energia primária nos edifícios. Porém as mesmas medidas só serão concretizáveis caso sejam garantidas exigências individuais de conforto térmico. É nesta medida que a análise do conforto térmico de edifícios em regime de funcionamento livre poderá contribuir na resolução do problema.

Este estudo procura analisar o impacto do conforto face às exigências energéticas numa habitação, utilizando para o efeito, modelos de avaliação de conforto térmico adaptativos associados a soluções passivas de arrefecimento, considerando a especificidade do clima português nos meses de Verão. Desta forma, o trabalho encontra-se estruturado em três grandes partes; primeiramente pela pesquisa bibliográfica que permitiu validar os modelos de conforto ambiental e todos os parâmetros a eles associados, seguindo-se a apresentação das diferentes soluções construtivas que permitem dar resposta às solicitações de aumento de conforto, reduzindo o consumo energético e por fim a simulação e análise destes dois últimos pontos numa habitação.

Espera-se que o presente trabalho contribua na orientação de estratégias à utilização de sistemas de climatização artificial no interior dos nossos lares.

Termos chave: Conforto térmico; Temperatura de conforto, Arrefecimento passivo, Ventilação Natural, Necessidades energéticas, Abordagem adaptativa.

ABSTRACT

The energy consumption in households has had only a slight slowdown in the last 20 years and is expected in the context of economic cooling, a worsening of the financial strain energy in the residential sector. The housing sector is a priority intervention at the level of thermal performance. With the entrance in the recent past of the European Directive of Energy Performance of Buildings (EPBD) has been taken the first step in this direction, by introducing various measures to limit the primary energy consumption in buildings. But the same measures will only be achievable if the individual requirements of thermal comfort are guaranteed. In this measures, the analysis of thermal comfort of buildings under free running can contribute to solve the problem.

This study seeks to analyze the impact of comfort in the housing energy demands, using for this purpose, adaptive models for evaluation of thermal comfort associated with passive cooling strategies, considering the specificity of the Portuguese climate in the summer months. The work is structured into three parts: first by the literature research to validate models of comfort and all parameters associated with them, followed by the presentation of different constructive solutions that allow to respond the requests for increased comfort and simultaneously to reduce energy consumption and finally the simulation and analysis of these last two points in a housing.

It is hoped that this work will contribute with alternatives to the use of artificial air-conditioning systems within our homes.

KeyWords: Thermal comfort; Comfort temperature; Passive cooling; Natural ventilation; Ideal loads; Adaptive control algorithm

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação e enquadramento do tema.....	1
1.2. Objectivo	2
1.3. Estrutura do trabalho	2
2. INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE CONFORTO TÉRMICO.....	5
2.1. Enquadramento.....	5
2.2. Conforto térmico	5
2.2.1. O Homem e o seu equilíbrio higrotérmico	6
2.2.2. Parâmetros que podem influenciar o conforto.....	11
2.2.3. O efeito da aclimatização	12
2.2.4. Adaptabilidade do vestuário entre géneros	13
2.3. Abordagens de conforto térmico	15
2.3.1. Abordagem analítica.....	15
2.3.2. Abordagem adaptativa.....	20
2.4. Normalização existente sobre conforto térmico	25
2.4.1. EN ISO 7730:2005	25
2.4.2. ANSI/ASHRAE-55:2004	27
2.4.3. EN 15251:2007.....	29
2.5. Implicações do consumo energético pela necessidade de conforto térmico.....	32
3. CONFORTO TÉRMICO E ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS	38
3.1. Geometria e orientação solar	38
3.2. A temperatura como referência no conforto ambiental	40
3.3. Parâmetros térmicos associados aos edifícios	41
3.3.1. Fenómenos de transmissão de calor	41
3.3.2. Transmissão de calor por condução	42
3.3.3. Transmissão de calor por convecção.....	43
3.3.4. Transmissão de calor por radiação	44

3.3.5.	Balço energético dos edifícios	46
3.4.	Sistemas passivos de arrefecimento	47
3.4.1.	Ventilação natural.....	48
3.4.2.	Sombreamentos e vãos envidraçados	50
3.4.3.	Massa térmica.....	52
3.4.4.	Redução de ganhos internos	53
3.5.	Síntese de estratégias bioclimáticas para o caso de Verão	53
4.	METODOLOGIA PARA A VALIDAÇÃO DO OBJECTO DE INVESTIGAÇÃO	55
4.1.	Caracterização do caso de estudo.....	55
4.2.	Análise do comportamento térmico dos edifícios pelo RCCTE.....	57
4.2.1.	Método de cálculo das necessidades de arrefecimento	58
4.2.2.	Cargas através da envolvente opaca exterior (ganhos e perdas).....	59
4.2.3.	Ganhos solares através dos vãos envidraçados Q_s	60
4.2.4.	Perdas devidas à renovação do ar Q_v	60
4.2.5.	Ganhos térmicos brutos resultantes de fontes internas Q_i	61
4.2.6.	Valores limite das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento N_v	61
4.2.7.	Valor máximo admissível de necessidades nominais globais de energia primária, N_t . 62	
4.3.	O programa <i>EnergyPlus</i>	62
4.3.1.	Parâmetros de simulação (<i>Simulation Parameters</i>).....	64
4.3.2.	Localização e clima (<i>Location and climate</i>).....	65
4.3.3.	Materiais e elementos da envolvente (<i>surface construction elements</i>)	65
4.3.4.	Zonas Térmicas e geometria (<i>Thermal Zone Description/Geometry</i>).....	66
4.3.5.	Actividades (<i>Schedules</i>)	67
4.3.6.	Ganhos Internos (<i>Space gains</i>).....	68
4.3.7.	Renovação de ar (<i>AirFlow</i>)	68
4.3.8.	Relatório de simulação (<i>Report</i>).....	68
4.4.	Modelo analítico - metodologia de Fanger (PMV e PPD)	68
4.5.	Modelo adaptativo	69
4.5.1.	ANSI/ASHRAE-55:2004	69

4.5.2.	SCATs/EN 15251:2007.....	70
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	72
5.1.	Zona climática V1 – Ficheiro climático do Porto	73
5.1.1.	Análise da variação da temperatura interior.....	73
5.1.2.	Análise das necessidades energéticas.....	76
5.1.3.	Índices e estratégias de conforto térmico	78
5.2.	Zona climática V2 – Ficheiro climático de Lisboa.....	80
5.2.1.	Análise da variação da temperatura interior.....	80
5.2.2.	Análise das necessidades energéticas.....	83
5.2.3.	Índices e estratégias de conforto térmico	85
5.3.	Zona climática V3 – Ficheiro climático de Évora.....	87
5.3.1.	Análise da variação da temperatura interior.....	87
5.3.2.	Análise das necessidades energéticas.....	90
5.3.3.	Estratégias de arrefecimento passivo.....	92
5.3.4.	Índices e estratégias de conforto térmico	95
6.	CONCLUSÃO.....	99
6.1.	Conclusões gerais.....	99
6.2.	Desenvolvimentos futuros.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	ANEXOS	109
	Anexo A – Figuras em anexo.....	111
	Anexo B – Mapa de valores Nominais (RCCTE)	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Trocas higrométricas entre o Homem e a sua envolvente	7
Fig. 2.2 - Carta Bioclimática de Olgyay	9
Fig. 2.3 – Carta Bioclimática Proposta por Givoni	10
Fig. 2.4 - Respostas de sensação térmica de sujeitos masculinos expostos a um ambiente de 23°C e 29°C antes e depois de expostos ao programa de aclimatização	13
Fig. 2.5 - Sensação térmica média de 6 homens e 6 mulheres, na escala ASHRAE ao adaptarem o vestuário em ordem a manter o conforto térmico.....	14
Fig. 2.6- Escala de temperatura efectiva normal para pessoas em repouso e normalmente vestidas....	16
Fig. 2.7 – Índices PMV pela escala ASHRAE e Bedford.....	18
Fig. 2.8 - Relação entre os índices PPD e PMV.....	19
Fig. 2.9 – Preferências térmicas em regime livre (A) e controlados termicamente (B).....	22
Fig. 2.10 - Relação entre temperatura de conforto Tc e temperatura exterior To.....	23
Fig. 2.11 - Distribuição geográfica dos edifícios que compõem a base de dados de conforto térmico da RP- 884	28
Fig. 2.12 - ACS proposto pela ASHRAE 55, aplicável em edifícios ventilados naturalmente.....	29
Fig. 2.13 - Limites de conforto superiores e inferiores para as temperaturas interiores de edifícios em regime de funcionamento livre, em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada	30
Fig. 2.14 - Correlação entre a temperatura de conforto e várias medidas da temperatura exterior.....	31
Fig. 2.15 - Taxa de dependência energética em Portugal (2000-2009).....	33
Fig. 2.16 - Evolução do consumo energético em Portugal (2000-2009).....	33
Fig. 2.17 - Reabilitações do edificado e construções novas em Portugal (1995-2010)	34
Fig. 2.18 - Consumo no sector doméstico (tep) e peso (%) do consumo do sector doméstico no consumo final de energia (1989-2009).....	35
Fig. 2.19 - Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de uso (2010)	36
Fig. 3.1 - Movimento de translação da Terra	38
Fig. 3.2 - Ângulos de altitude solar (γ), azimute solar (α) e incidência (θ)	39
Fig. 3.3 - Percurso do sol durante o dia ao longo do ano	39
Fig. 3.4 - Processos térmicos num edifício	42
Fig. 3.5 - Mecanismo de transferência de calor por convecção	44
Fig. 3.7 - Balanço térmico de um edifício	47
Fig. 3.8 - Esquemas de ventilação	50
Fig. 3.9 - Trocas de calor por radiação no vidro	52

Fig. 4.1 - Zonamento climático de Junho a Setembro em Portugal	55
Fig. 4.2 - Delimitação das envolventes que compõem a fracção autónoma	56
Fig. 4.3 - Diagrama representativo do funcionamento do <i>EnergyPlus</i>	64
Fig. 4.4 - Fracção autónoma modelada no <i>EnergyPlus</i>	65
Fig. 5.1 - Evolução da temperatura média diária	73
Fig. 5.2 - Evolução da temperatura média diária na "semana crítica"	74
Fig. 5.3 - Evolução da temperatura diária máxima.....	75
Fig. 5.4 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o RCCTE	77
Fig. 5.5 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a ASHRAE 55:2004	77
Fig. 5.6 - Resumo das necessidades energéticas	78
Fig. 5.7 - Temperatura de conforto e índices PMV	79
Fig. 5.8 - Evolução da temperatura média diária	80
Fig. 5.9 - Evolução da temperatura média diária horária	81
Fig. 5.10 - Evolução da temperatura diária máxima.....	82
Fig. 5.11 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o RCCTE.....	83
Fig. 5.12 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a ASHRAE-55:2004	84
Fig. 5.13 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a EN 15251:2007.....	84
Fig. 5.14 - Temperatura de conforto e índices PMV	86
Fig. 5.15 - Evolução da temperatura média diária.....	87
Fig. 5.16 - Evolução da temperatura média diária na "semana crítica"	88
Fig. 5.17 - Evolução da temperatura diária máxima.....	89
Fig. 5.18 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o RCCTE.....	90
Fig. 5.19 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a ASHRAE-55:2004	91
Fig. 5.20 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a EN 15251:2007.....	91
Fig. 5.21 - Evolução da temperatura exterior diária e necessidades energéticas.....	93
Fig. 5.22 - Evolução da temperatura exterior diária e necessidades energética	94
Fig. 5.23 - Temperatura exterior e índices PMV.....	95
Fig. 5.24 - Limites de temperatura de conforto e índices PMV	96
Fig. 5.25 - Temperatura de conforto e índices PMV	97
Fig. A.1 - Evolução das temperaturas média diárias em Lisboa.....	112
Fig. A.2 - Evolução das temperaturas média diárias no Porto.....	112
Fig. A.3 - Evolução das temperaturas médias diárias em Évora.....	113
Fig. A.4 - Evolução das temperaturas segundo o tipo de estratégia no Porto	115
Fig. A.5 - Evolução das temperaturas segundo o tipo de estratégia em Lisboa	115
Fig. A.6 - Evolução das temperaturas segundo o tipo de estratégia em Évora	116
Fig. A.7 - Evolução da temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o tipo de estratégia no Porto	116

Fig. A.8 - Evolução da temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o tipo de estratégia em Lisboa	117
Fig. A.9 - Evolução da temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o tipo de estratégia em Évora	117
Fig. B.1 - Classe energética da habitação em estudo	120

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Nível de metabolismo em função da actividade física desenvolvida.....	8
Quadro 2.2- Limites Confortáveis de Temperatura (Planilhas de Mahoney)	21
Quadro 2.3 - Efeito dos "erros" adaptativos	24
Quadro 2.4 - Resumo de normas ISO para a determinação de conforto térmico	26
Quadro 2.5 - Classificação de taxas metabólicas por actividade (ISO 8996)	26
Quadro 2.6 - Isolamento térmico segundo o tipo de vestuário de acordo com a norma ISO 9920.....	27
Quadro 2.7 - Temperaturas de conforto obtidas no projecto SCATs	31
Quadro 3.1 - Sensibilidade do corpo humano às velocidades de ar interior	49
Quadro 3.2 – Performances comparadas de vidro duplo utilizado em fachada.....	51
Quadro 4.1 - Valores limites das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento.....	61
Quadro 4.2 - Critérios de classificação de edifícios em regime livre e limites de temperaturas de conforto face à categoria do edifício	71
Quadro 5.1 - Comparativo do comportamento térmico (RCCTE vs EnergyPlus).....	72
Quadro 5.2 - Comparativo das temperaturas médias diárias [°C]	74
Quadro 5.3 - Limites das temperaturas interiores de conforto	75
Quadro 5.4 - Limites de temperatura de conforto médio mensal [°C]	76
Quadro 5.5 - Comparativo das temperaturas médias diárias [°C]	81
Quadro 5.6 - Limites das temperatura interiores de conforto [°C]	82
Quadro 5.7 - Limites de temperatura de conforto média mensal	83
Quadro 5.8 - Resumo das necessidades energéticas	85
Quadro 5.9 - Comparativo das temperaturas médias diárias [°C]	88
Quadro 5.10 - Limites das temperaturas interiores de conforto.....	89
Quadro 5.11 - Limites de temperatura de conforto médio mensal [°C]	90
Quadro 5.12 - Resumo das necessidades energéticas	92
Quadro A.1 - Resumo da temperatura interior média em Lisboa	113
Quadro A.2 - Resumo da temperatura interior média no Porto	114
Quadro A.3 - Resumo da temperatura interior média em Évora	114
Quadro B.1 - Zonamento climático	120
Quadro B.2 - Mapa de valores nominais	120

SIGLAS E SÍMBOLOS

EPBD – Directiva Europeia da Performance Energética de Edifícios

QAI – Qualidade do Ar Interior

SCE – Sistemas de Certificação Energética

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

ASHRAE – *American Society of Heating and Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

ISO – *International Organization for Standardization*

ACA – Algoritmo de Conforto Adaptativo

ACS – *Adaptive Comfort Standard*

SCAT's – *Smart Controls and Thermal Comfort*

FA – Fracção autónoma

PMV – Voto médio previsível

PPD – Percentagem previsível de insatisfeitos

TME – Temperatura média mensal do ambiente exterior

T_c – Temperatura de conforto

ET – Índice de temperatura efectiva

CET – Temperatura efectiva corrigida

ET* - Nova escala de temperatura efectiva

OT – Temperatura operativa

SET – Temperatura efectiva padrão

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e enquadramento do tema

Em 1997, com a assinatura do protocolo de Quioto, foi estabelecido um valor limite de emissão de CO₂ para cada um dos países que subscreveram o acordo, tendo sido associadas taxas a pagar, nos casos em que os valores fossem excedidos. Com esta medida pretendeu-se abrandar a tendência de crescimento das emissões no planeta [8].

O parque habitacional europeu apresenta, actualmente, uma baixa eficiência energética, sendo responsável por 40% do consumo energético total e por 1/3 das emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera [72]. A imposição da redução de consumos energéticos colocada pela assinatura do protocolo, obrigou a União Europeia a frequentes actualizações dos regulamentos que permitam rápidas alterações ao planeamento e construção de edifícios, de modo a aumentar a eficiência energética e a permitir o cumprimento das metas estipuladas. Foi ainda dada maior facilidade burocrática nos processos de actualização e aprovação dos regulamentos, para que rapidamente pudessem ter efeitos práticos.

Como tal, e seguindo a Directiva Europeia 2002/91/CE do desempenho energético dos edifícios [91], a situação do passado teria que ser invertida, sendo necessário desenvolver soluções e estratégias que permitam uma evolução da eficiência no consumo de energia. Em resposta, o Estado português criou nova regulamentação nacional, que transpõe o conteúdo europeu e associa no mesmo documento, as preocupações sobre a Qualidade do Ar interior (QAI) em edifícios (e as condições e execução da manutenção como requisito fundamental), o Sistema de Certificação Energética (SCE) [92], o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) [93] e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [94]. Todos estes regulamentos foram elaborados com base na técnica e na experiência.

Mas qual o impacto energético destes regulamentos ao fixarem temperaturas de conforto de referência uniformes ao longo de toda a estação convencional de arrefecimento?

O tema da presente dissertação enquadra-se na previsão de conforto térmico no interior dos edifícios por parte dos utilizadores e no impacto energético dessas mesmas acções.

Os algoritmos de conforto adaptativo poderão ser instrumentos alternativos e fiáveis na resposta a esta questão.

1.2. Objectivo

Conhecendo o impulso das duas últimas décadas do parque habitacional português, a Fracção Autónoma (FA) que serviu de base para a simulação enquadra-se num edifício plurifamiliar. Neste estudo procede-se à simulação de condições de conforto térmico numa habitação e a eficiência energética que daí advém em três cidades portuguesas, Porto, Lisboa e Évora.

Através do RCCTE, torna-se pertinente quantificar as necessidades energéticas da FA, de forma a cumprir o conforto térmico estipulado pelo regulamento.

De seguida, pretende-se verificar através do programa de análise térmica dinâmica (*EnergyPlus*), as temperaturas de conforto térmico propostas na norma norte-americana ASHRAE-55:2004 e na europeia EN 15251:2007 através da utilização de algoritmos de conforto adaptativo (ACA), baseados na técnica e na experiência. Os índices de conforto térmico encontrados na norma internacional EN ISO 7730:2005, servirão para aferir os resultados dos anteriores documentos.

Serão também implementadas soluções bioclimáticas de arrefecimento passivo, de forma a manter o conforto térmico, melhorando simultaneamente a eficiência energética em situação de temperaturas interiores demasiado elevadas.

Com vista a quantificar as temperaturas de conforto térmico e o desempenho energético associado avalia-se:

- funcionamento da fracção em regime livre dentro dos intervalos de conforto;
- adaptação do vestuário às temperaturas interiores;
- contribuição da ventilação natural enquanto estratégia de arrefecimento passivo;
- avaliação de correntes de ar, enquanto possível factor de desconforto;
- desempenho de vãos envidraçados na limitação de ganhos solares directos;
- avaliação dos resultados obtidos por ambos os modelos de conforto térmico adaptativo e, das necessidades energéticas para arrefecimento fora dos intervalos de conforto;

1.3. Estrutura do trabalho

A presente dissertação é constituída por seis capítulos. No Capítulo 1 efectua-se as notas introdutórias, enquadramento do tema e enunciam-se os objectivos e organização do trabalho.

No Capítulo 2 apresentam-se os fundamentos teóricos subjacentes à análise de conforto térmico dos edifícios, introduzindo-se os parâmetros de conforto térmico, as abordagens de previsão de conforto térmico (analítica e adaptativa) e as principais normas existentes sobre esta temática. Ainda neste capítulo, explana-se as implicações do conforto térmico no desempenho energético dos edifícios.

Para o Capítulo 3, reserva-se as estratégias de arrefecimento passivo que são tidas em conta, para posterior desenvolvimento do trabalho enquanto no Capítulo 4 será apresentada a metodologia de estudo, nomeadamente a definição de critérios de conforto térmico e necessidades energéticas segundo o RCCTE, a descrição do programa de simulação dinâmica (*EnergyPlus*) e a avaliação de conforto térmico através de normas internacionais.

O Capítulo 5 destina-se à apresentação dos resultados do estudo desenvolvido e as diferentes opções simuladas.

Por fim, no Capítulo 6, as principais conclusões e desenvolvimentos futuros, reflectidos pela análise dos resultados obtidos.

2. INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE CONFORTO TÉRMICO

2.1. Enquadramento

A capacidade do ser humano em adaptar-se às alterações do ambiente envolvente é bastante fraca, quando comparada com a restante vida animal. A maior ou menor necessidade de se proteger, obriga-o ir à procura de refúgios para sobreviver às condições adversas. A habitação funciona como a principal defesa do Homem face ao clima, alterando o ambiente, para o tornar mais próximo das suas condições de conforto, devendo ter a capacidade para reagir às condições ambientais exteriores, sendo capaz de absorver e irradiar, promovendo assim a estabilidade interior [64].

As práticas associadas à actividade da construção de edifícios dão origem a graves consequências ao nível de equilíbrio ambiental do planeta, nomeadamente, no esgotamento de recursos naturais não renováveis [8]. Em fase de utilização, o parque edificado apresenta elevados níveis de consumo energético, para garantir condições de conforto universalmente aceites. Torna-se necessário inverter esta tendência, com novos níveis de desempenho energético adoptados no contexto de sustentabilidade e no conhecimento científico dos parâmetros que influenciam o conforto térmico, de modo a oferecer ao utilizador final uma série de alternativas, ao invés de apenas controlar o termóstato.

No campo das acções a serem concretizadas, as soluções bioclimáticas surgem como factor relevante, pois decorrem da utilização de condições ambientais locais que poderão servir em benefício dos ocupantes no interior dos edifícios. A opção para cada um reagir dependerá de cada situação. É desta forma que resulta a interacção entre o sujeito e o ambiente que ocupa. Ainda neste contexto, a utilização de métodos expeditos de análise do conforto térmico torna-se especialmente importante, de forma a validar as soluções bioclimáticas adoptadas.

2.2. Conforto térmico

Os seres humanos são o centro da preocupação para um desenvolvimento sustentável, assegurando o seu direito a uma vida saudável e uma equilibrada gestão e consumo de recursos. O desconforto térmico é um indicador importante para a saúde porque funciona como primeiro sintoma de alerta. O indivíduo na sua acção faz todos os possíveis para controlar as condições de ambiente no local onde se encontra.

Na grande maioria dos climas dos países europeus, as amplitudes térmicas naturais vão para além dos limites de tolerância das pessoas. Contudo Portugal apresenta condições climáticas excepcionais; as temperaturas médias exteriores anuais correspondem exactamente àquelas consideradas confortáveis pelas pessoas (18 a 26°C), infelizmente esta maior valia não tem sido aproveitada nas

últimas décadas [95]. Criaram-se espaços interiores apenas para protecção da chuva e das amplitudes térmicas, que em algumas zonas se aproxima dos 0°C no Inverno e dos 40°C no Verão.

O conforto térmico baseia-se em critérios de aceitabilidade que, em muito, têm a ver com questões físicas, psicológicas e até mesmo sociais. Antes da discussão do tema, o termo deve ser claramente definido. Existem três abordagens que, apesar de divergentes, devem ser cuidadosamente equacionadas na demanda de condições óptimas de conforto;

- A definição **psicológica**; “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” [9].
- A definição **termofisiológica**; baseada na resposta dos receptores térmicos na pele e no hipotálamo. Neste sentido o conforto é definido como a mínima taxa dos sinais nervosos dos receptores [49].
- De acordo com a definição **energética**, o conforto térmico é alcançado quando as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente tendem a anular-se [27]. O balanço energético provoca alteração da temperatura da pele e da produção de suor, que por sua vez depende também da actividade metabólica.

De salientar que a temperatura média da pele desempenha um papel importante em todas as definições anteriormente descritas [38] e [51].

2.2.1. O Homem e o seu equilíbrio higrotérmico

Os animais homeotérmicos¹, para manterem a temperatura corporal constante, independentemente da temperatura do meio externo, utilizam oxigénio e alimentos para produzir energia. O ritmo a que esta produção ocorre é designado por metabolismo (M). A maioria da energia produzida e da energia dissipada é mensurável sob forma de calor. Parte da energia é utilizada pelo corpo para executar trabalho mecânico (W). Os ganhos de calor associados ao metabolismo (H) são dados por [35]:

$$H = M - W \quad (2.1)$$

W varia em situações normais² entre 0 a 20% de M , sendo de difícil quantificação na prática. H é uma relação da energia com o tempo e desta forma a sua unidade é o Watt. Para reduzir variações individuais na estimativa dos ganhos de calor associadas ao metabolismo em determinada actividade, o valor é correlacionado pela superfície (área) do corpo ou massa corporal (Wm^2). Normalmente são

¹ A homeotermia ou endotermia envolve a termorregulação, em que a temperatura corporal interna é regulada de forma bastante precisa através de processos metabólicos.

² Para actividades sedentárias W poderá ser considerado nulo.

assumidos valores de $1,8 \text{ m}^2$ e uma massa de 70 kg para os homens e $1,6 \text{ m}^2$ e uma massa de 60 kg para as mulheres [35].

Quanto maior a actividade metabólica, maior será a produção de calor originando vasodilatação, aumento da frequência cardíaca e circulação sanguínea. Este efeito de termo-regulação do organismo tem como consequência directa a produção de suor que, apesar de ser um mecanismo de arrefecimento corporal, poderá causar desconforto (roupa húmida). Pelo contrário, em climas frios se pouco calor for produzido, há vasoconstrição sanguínea, originando a diminuição da temperatura corporal e portanto, sensação de frio, principalmente nas extremidades do corpo. Sempre que o organismo necessite trabalhar excessivamente para manter este equilíbrio, ocorre fadiga e a consequente queda de rendimento das actividades numa primeira fase e, a longo prazo, algum tipo de dano físico (tonturas, desmaio, entre outros). Höppe [38], demonstrou que a adaptação do corpo ao calor, é muito mais rápida que ao frio. Para que o Homem tenha sensação de conforto higrotérmico, é fundamental um equilíbrio entre a temperatura corporal (aproximadamente $36,7^\circ\text{C}$) e a da sua envolvente (Figura 2.1) [10].

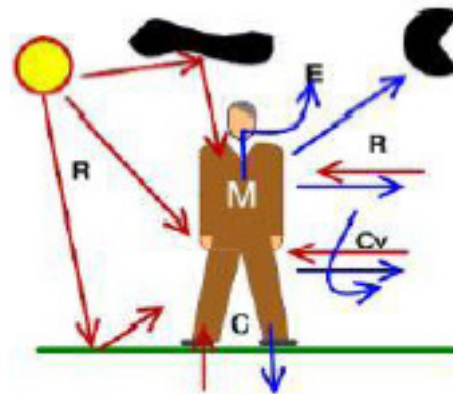


Fig. 2.1 - Trocas higrométricas entre o Homem e a sua envolvente [10]

Sendo essas trocas respectivamente:

M – Metabolismo, ou a produção de calor interna do corpo.

R – Trocas por radiação. Entre o Sol e o corpo e os demais corpos (paredes, etc.)

C – Trocas por condução, contacto. Entre o corpo e a superfície em que ele toca.

C_v – Trocas por convecção. Entre o corpo e o ar que se encontra em seu contacto directo.

E – Trocas por evaporação. Eliminação do calor pela troca pulmonar, na expiração através da pele, pelos poros.

A sensação de conforto térmico poderá estar associada a um estado de **neutralidade térmica**, quando a produção de calor interna do corpo for idêntica às trocas de calor entre organismo e o ambiente, anteriormente descritas.

$$M = R + C + C_v + E \quad (2.2)$$

Existe pois, uma contínua interacção entre o corpo e o ambiente que o envolve, consubstanciando-se em trocas de calor regidas pelas leis da física, influenciadas e condicionadas por factores ambientais, individuais e mecanismos de adaptação fisiológica [71].

As taxas de metabolismo adoptadas encontram-se disponíveis em muitos textos da especialidade, apresentando-se no Quadro 2.1 uma proposta de valores associados a algumas actividades típicas, que serviram para o desenvolvimento do presente trabalho.

Quadro 2.1 - Nível de metabolismo em função da actividade física desenvolvida [54]

Actividade	W	met*
Em repouso	80 - 100	0,8 – 1,0
Actividade sedentária	100 - 120	1,0 – 1,2
Trabalho leve	140 - 180	1,4 – 1,8
Trabalho oficial médio	200 - 300	2,0 – 3,0
Ginástica	300 - 400	3,0 – 4,0
Desporto de competição	400 - 600	4,0 – 6,0

* 1 met = 58,15 W/m², equivalente a uma pessoa sentada em situação de descanso; área média do corpo humano A = 1,75 m²

O rendimento de qualquer actividade possui então uma ligação com as condições higrométricas da sua envolvente e para serem conhecidos esses valores, foram realizadas várias pesquisas com inúmeras pessoas em situações distintas. Os resultados obtidos dos estudos foram transformados em gráficos de auxílio ao diagnóstico de conforto higrotérmico denominados por diagramas bioclimáticos. Estes interpretam os valores instantâneos de humidade e temperatura do ar em função de parâmetros de conforto. O gráfico de Olgyay (Figura 2.2) e o gráfico de Givoni (Figura 2.3) são os mais conhecidos [71].

Olgyay³, em 1963, foi o primeiro a propor um procedimento sistemático para adaptar o projecto de um edifício aos requisitos humanos e condições climáticas. Este procedimento baseia-se numa carta bioclimática, que apresenta a zona de conforto humano em relação à temperatura e humidade do ar

³ Victor Olgyay (1910-1970), húngaro, foi professor na escola de Arquitectura e Urbanismo da Universidade de Princeton, sendo um precursor na investigação da relação entre a Arquitectura e a Energia.

ambiente, temperatura radiante média, velocidade do ar, radiação solar e arrefecimento evaporativo [82].

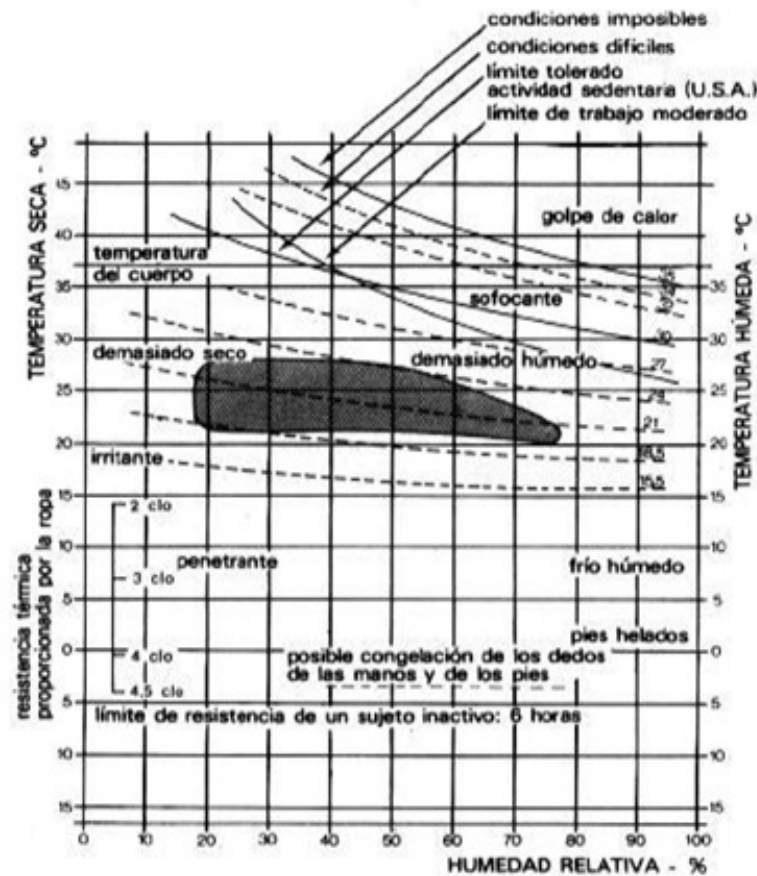


Fig. 2.2 - Carta Bioclimática de Olgay [64]

A banda ou zona de conforto térmico pode ser definida como a situação onde o homem depende da menor quantidade de energia para se adaptar ao ambiente e da actividade por si exercida. Não pode ser definida com exactidão mas é possível determinar valores entre os quais a maioria das pessoas se sente em conforto e valores a partir dos quais uma larga maioria se sente em desconforto [64].

Em 1969, Givoni concebeu uma nova carta bioclimática (Figura 2.3), para edifícios em que corrigia algumas limitações do diagrama idealizado por Olgay. Esta baseia-se em temperaturas internas do edifício, propondo estratégias construtivas para uma adequação do edifício ao clima, ao invés da carta de Olgay que apenas propõe a sua aplicação estritamente às condições externas [47], [82].

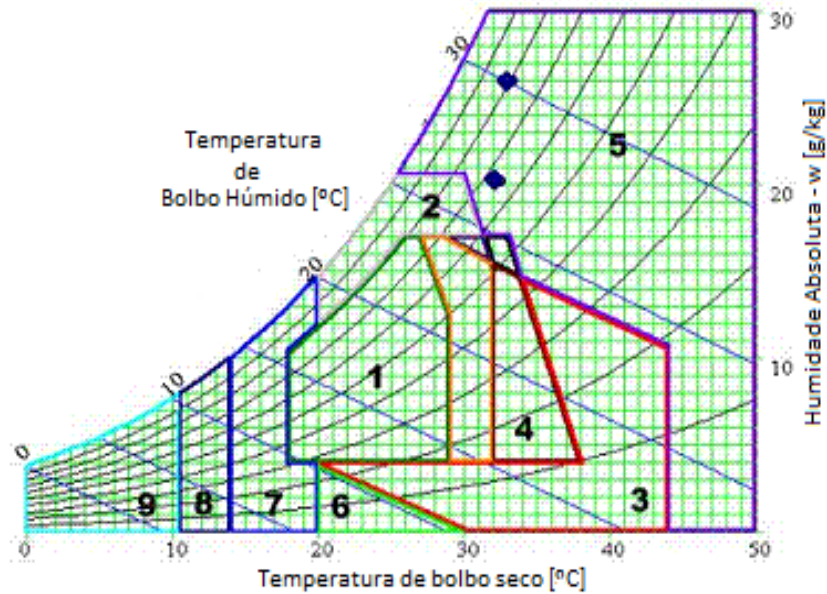


Fig. 2.3 – Carta Bioclimática Proposta por Givoni [29]

Sendo que:

- 1 – Zona de Conforto.
- 2 – Zona de Ventilação.
- 3 – Zona de Arrefecimento Evaporativo.
- 4 – Zona de Inércia Térmica para Arrefecimento.
- 5 – Zona de Ar Condicionado.
- 6 – Zona de Humidificação.
- 7 – Zona de Inércia Térmica e Aquecimento Solar Passivo.
- 8 – Zona de Aquecimento Solar Passivo.
- 9 – Zona de Aquecimento Artificial.

O diagrama de Givoni identifica “zonas” de conforto e/ou estratégias de arquitectura bioclimática em função dos valores de humidade e temperatura do ar que encontramos no local. Fora do polígono central n.º1, encontram-se situações climáticas associadas à sensação de desconforto higrotérmicas, que podem ser corrigidas ou minoradas se aplicarmos as respectivas estratégias [10].

2.2.2. Parâmetros que podem influenciar o conforto

Segundo a ASHRAE-55, os parâmetros que influenciam o conforto podem ser agrupados em três categorias:

Parâmetros Físicos ou Ambientais

Que incluem a temperatura ambiente (bolbo seco), a temperatura radiante média das superfícies interiores, a humidade relativa do ar, a velocidade do ar interior, a pressão atmosférica, a cromatografia da envolvente, odores, intensidade da luz e níveis de ruído.

O corpo humano reage com o ambiente através de trocas de calor entre o corpo e o meio e vice-versa, esta definição também é conhecida por balanço energético.

Parâmetros Individuais e Termofisiológicos

Estes incluem o isolamento térmico e a taxa metabólica, que poderão provocar pequenas diferenças na temperatura corporal em ambientes quentes ou frios. Quando o corpo se encontra quente, a taxa de produção de calor é aumentada devido a um maior número de reacções entre células. Por outro lado quando um corpo se encontra muito frio, este reage ao tremer na tentativa de aumentar os ganhos de calor associados ao metabolismo. Tal como já anteriormente foi referido, a produção de oxigénio acompanhada pela energia dos alimentos fazem aumentar o metabolismo, pelo que a análise da taxa de consumo de oxigénio poderia ser utilizada para estimar a produção de calor, contudo o recurso da medição deste parâmetro através de um modelo que utilizasse a calorimetria é de difícil aplicação prática, pois na maioria dos casos interferem com o normal desempenho dos sujeitos.

Aspectos Psicológicos

Rohles, num estudo publicado em 1980 [70] concluiu que, ao adicionar painéis de madeira, tapeçarias e mobiliário, sem qualquer alteração dos parâmetros térmicos, os ocupantes sentiam-se mais quentes quando lhes dito que a temperatura era mais elevada do que na realidade. Noutro estudo liderado por Peter Höppe [45], cerca de 250 alemães, foram entrevistados num solarengo e quente fim-de-semana. Utilizado o índice PMV⁴, em todas as situações, os valores obtidos foram de muito quente (+3). Contudo a maioria dos sujeitos responderam no inquérito que se sentiam bastante satisfeitos. Ao ser-lhes perguntado porque se sentiam tão confortáveis num dia quente, os sujeitos deram duas explicações; a primeira foi que, nos dias anteriores tinha estado um tempo frio e cinzento e a segunda, de que estavam a desfrutar um belo dia de sol, aproveitando os seus tempos livres.

⁴ O índice PMV varia entre -3 (muito frio) a +3 (muito quente), sendo o valor nulo o estado de neutralidade térmica. Este tema será abordado mais detalhadamente no desenvolvimento do trabalho.

Obviamente a dificuldade em considerar este parâmetro devido à sua subjectividade inerente, revela uma grande variação inter-individual. Contudo, este aspecto não deve ser descurado.

2.2.3. O efeito da aclimatização

Quando os indivíduos são sistematicamente expostos a ambientes quentes, as respostas fisiológicas ao calor tendem a mudar, nomeadamente uma produção de suor mais precoce como resposta. Este fenómeno é designado por **aclimatização**. É comum considerar-se que as populações que vivem em climas quentes apresentem diferentes respostas ao conforto daquelas que habitam em zonas mais temperadas. A tolerância de temperaturas mais elevadas deve-se à adaptação ao ambiente circundante [68].

O fenómeno da aclimatização, segundo Coles [22], é o “factor crítico que permite a uma pessoa resistir ao stress térmico com mínima tensão”, dos mecanismos fisiológicos termo-reguladores.

O mesmo autor menciona três fases, que ocorrem simultaneamente, durante o desenvolvimento contínuo da aclimatização ao calor:

Fase inicial - Ocorre durante uma determinada sequência de dias de exposição ao calor. Usualmente 33% dos resultados óptimos são obtidos em torno do 4º dia.

Fase intermédia - Quando o sistema cardio-vascular é estabilizado e as temperaturas internas e da pele já se encontram reduzidas. Normalmente, 44% dos resultados óptimos são atingidos no 8º dia, embora alguns especialistas considerem que 70% a 80% dos resultados possam ser obtidos entre o 7º e o 10º dia.

Fase Final - Caracterizada por redução na produção de suor e urina, além de outras compensações, para conservar os fluidos do corpo e restabelecer o equilíbrio térmico. Usualmente, mais de 65% dos resultados óptimos são obtidos no 10º dia, 93% no 18 dia e 99% no 21º dia.

Em alguns desportistas de alta competição, esta adaptação fisiológica é fundamental para a obtenção de resultados positivos em competições internacionais (onde o clima do país anfitrião é bastante diferente dos seus de origem). Num estudo realizado por Webb e Parsons [79], seis jovens voluntários masculinos foram expostos durante três horas a uma câmara térmica com roupas e actividades idênticas. No primeiro dia reportaram condições neutras (PMV = 0, 23°C, 70% hr), no segundo dia alteraram-se as condições da câmara entre ligeiramente quente e quente (PMV = 1,5, 29°C, 50% hr). Passado um intervalo de cinco dias, os voluntários foram submetidos a um programa de aclimatização por períodos diários de duas horas, durante 4 dias a uma temperatura de 45°C e 40% de humidade relativa.

Todos os sujeitos mostraram aclimatização (aumento da produção de suor, redução dos batimentos cardíacos, pequenas mudanças na temperatura corporal e maior tolerância ao calor). A Figura 2.4 mostra as respostas térmicas dos sujeitos antes e depois do processo de aclimatização.

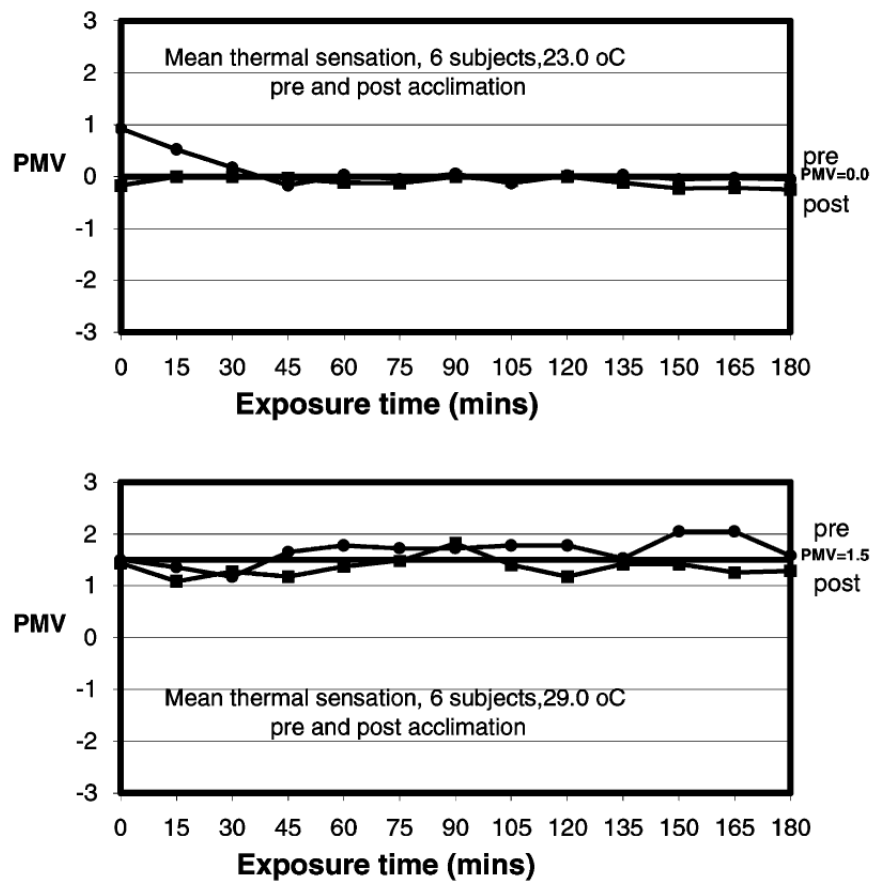


Fig. 2.4 - Respostas de sensação térmica de sujeitos masculinos expostos a um ambiente de 23°C e 29°C antes e depois de expostos ao programa de aclimatização [68]

Apesar de, em ambos os gráficos ocorreram pequenas variações na resposta ao conforto térmico, após o período de aclimatização. Conclui-se que estas pequenas mudanças provavelmente não têm significado nos requisitos ao conforto térmico.

2.2.4. Adaptabilidade do vestuário entre géneros

Williams [81] investigou em laboratório a capacidade dos ocupantes manterem o conforto ao alterar o seu vestuário. As respostas de aceitabilidade encontram-se na Figura 2.5.

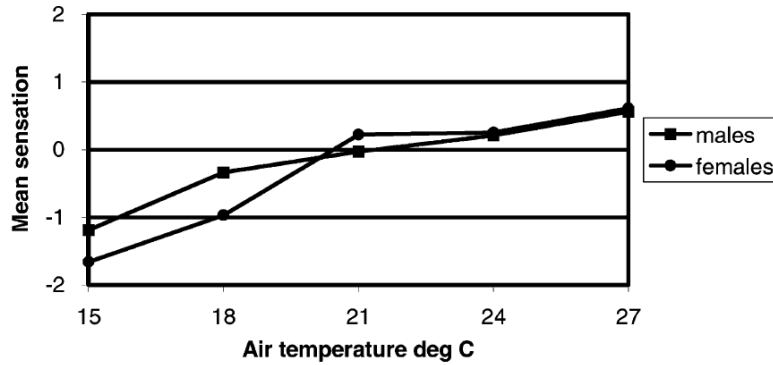


Fig. 2.5 - Sensação térmica média de 6 homens e 6 mulheres, na escala ASHRAE ao adaptarem o vestuário em ordem a manter o conforto térmico [69]

Foi descoberto que os sujeitos em ambientes quentes reduziam a roupa e portanto o valor de *clo* para restabelecerem o conforto. Na simulação de ambiente frio o conforto térmico foi mantido ao aumentar o isolamento da roupa, contudo obteve menos sucesso relativamente à simulação de ambiente quente. Curiosamente as mulheres efectuaram mais trocas de roupa do que os homens para manterem conforto térmico, abaixo dos 18 °C, porém com menor sucesso.

Outros dois estudos foram efectuados, utilizando grupos de 16 sujeitos submetidos a temperaturas ambientes desde quentes a frias [69], de forma a investigar as preferências térmicas por género. As simulações tinham uma duração de 3 h e tinham como objectivo recriar uma sala de estar ou um escritório. Cada sujeito tinha disponível um guarda-roupa semelhante ao seu, que lhe permitia adaptar-se às condições ambientais. Descobriu-se que os sujeitos ajustavam a sua roupa de modo a manter o conforto térmico, porém em situações de calor (remoção do vestuário) existiram limites de adaptabilidade dependendo da aceitação social ou “regras de etiqueta”. Isto significa que, se os indivíduos se vestirem meramente por imposição social ou profissional, a dispersão inter-individual aumenta, possibilitando o aumento de pessoas descontentes com o ambiente térmico mas, se pelo contrário, se vestirem influenciadas pelo clima interior e exterior e pela sua sensibilidade individual (algumas pessoas são tipicamente mais friorentas ou calorentas), então as diferenças inter-individuais provavelmente irão baixar, baixando também a percentagem de pessoas insatisfeitas.

Para idênticos níveis de roupa e de actividade, existiram pequenas diferenças entre géneros em situação de neutralidade térmica ($PMV = 0$) e ligeiramente quente ($PMV = +1$). Contudo em ambientes frios ($PMV = -2,0$), as mulheres submetidas ao estudo tendiam a sentir mais desconforto, comparativamente aos homens. O desconforto local entre géneros num estudo de Breslin [16] sugere que este facto deve-se às mulheres sentirem as mãos significativamente mais frias que os homens, levando a uma situação de desconforto localizado.

2.3. Abordagens de conforto térmico

Como principal objectivo de quem projecta, torna-se essencial estimar e prever as condições de conforto dos ocupantes, baseado na análise de grupos de pessoas. Vários estudos foram realizados com o objectivo de sintetizar, num único parâmetro, os diversos índices de conforto que possam prever e garantir as melhores condições de conforto térmico para os ocupantes.

Foram desenvolvidos diversos diagramas e modelos de previsão de conforto ambiental. Entre os especialistas internacionais existem duas correntes de pensamento.

A primeira corrente parte do pressuposto de que, pelo facto dos indivíduos serem biologicamente idênticos, então têm idênticas preferências térmicas. Esta corrente acredita que as preferências térmicas podem ser padronizadas em ambientes interiores controlados que garantam condições de conforto constantes. Esta abordagem ficou conhecida como analítica ou racional.

A segunda corrente adoptou uma abordagem adaptativa ou empírica, pressupondo que se alguma mudança ocorrer que produza desconforto, as pessoas reagem no sentido de restaurar o seu próprio conforto. Tais acções podem ser isoladas ou tomadas em conjunto como por exemplo, a troca de peças de vestuário, abrir ou fechar janelas, ajustar uma protecção solar opaca ou accionar um sistema mecânico de climatização, dependendo também da sua cultura e anseios naturais.

2.3.1. Abordagem analítica

Nos anos 20 do século XX, a American Society of Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), no seguimento do trabalho desenvolvido por Houghten e Yaglou [72], apresentou um dos primeiros índices de conforto. Denominado por índice de temperatura efectiva (ET), integrava a temperatura, velocidade do ar e humidade. Para determinar este índice, foram utilizadas duas câmaras climatizadas e ligadas entre si. A primeira serviria de teste, enquanto a segunda continha voluntários que experienciavam sensações térmicas específicas. Os investigadores procuraram assim determinar as temperaturas da câmara de teste que, em condições de humidade relativa de 100% e uma velocidade do ar baixa (aproximadamente 0,15 m/s), provocava idêntica sensação térmica na câmara de controlo, que apresentava parâmetros ambientais distintos.

Posteriormente, Yaglou e Miller, em 1925, integraram neste estudo o efeito da roupa na determinação do índice de temperatura efectiva (Figura 2.6), verificando a influência da estação climática, associada aos diferentes tipos de vestuário, utilizados ao longo das estações do ano [72].

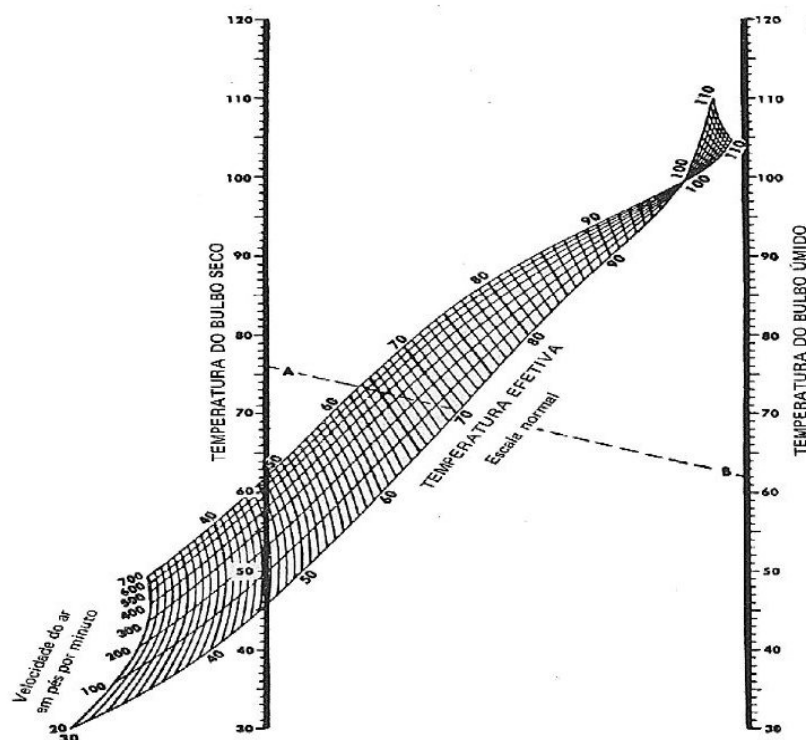


Fig. 2.6- Escala de temperatura efectiva normal para pessoas em repouso e normalmente vestidas [72]

No seguimento das pesquisas anteriores, em 1932, Vernon propõe uma correcção do índice de temperatura efectiva, contabilizando o efeito da radiação térmica das superfícies envolventes, recorrendo, para tal, ao termómetro de globo negro⁵. Este novo índice de conforto térmico, resultante desta melhoria, foi designado por temperatura efectiva corrigida (CET), adoptada passados 35 anos pela ASHRAE [54]. Contudo, com o desenvolvimento de novas pesquisas, este índice revelou alguns problemas relacionados com a subestimação dos efeitos da humidade, quando associados a baixas e elevadas temperaturas, levando a que fosse proposta uma nova escala de temperatura efectiva⁶ (ET*). Este novo índice tem por base o modelo fisiológico de termo-regulação, no qual a temperatura média da superfície molhada da pele e a temperatura interna do corpo surgem como os principais factores associados às sensações térmicas do organismo [54]. Várias fontes [61], [62], [48] sugerem que o conforto térmico é perdido quando o suor aumenta acima de 0,3 (ver Eq. 2.6), ou acima de um valor directamente dependente do nível de metabolismo.

A temperatura operativa (OT), proposta por Winslow, Henrington e Gagge no final da década de 30 do século XX, procurou integrar, mais uma vez, o efeito importante da radiação térmica da envolvente nas condições de conforto, sendo definida como a “*temperatura uniforme de um recinto fictício negro*

⁵ Sensor de temperatura envolvido por uma esfera oca metálica de negro de fumo, integrando a temperatura medida, os efeitos da energia radiante, temperatura e velocidade do ar [54].

⁶ Este índice é definido como a temperatura operativa de um ambiente fictício com humidade relativa de 50% que produz, no individuo, as mesmas trocas de calor sensível e latente que no ambiente real [85].

radiante, no qual um indivíduo sofre perdas de calor por radiação e convecção iguais às do ambiente dado” [54].

Procurando eliminar a dependência da nova temperatura efectiva (ET*), das variáveis relativas ao tipo de ocupação, efectuou-se a comparação entre ambientes internos com distintas ocupações tipo. Surge assim, o índice temperatura efectiva padrão (SET) desenvolvido para um conjunto de factores caracterizadores dos ambientes internos controlados [53]. Este índice foi desenvolvido considerando a temperatura uniforme que, num ambiente fictício com uma velocidade do ar inferior a 0,15m/s e humidade relativa de 50% (para uma pessoa com roupas padrão para o tipo de actividade física desenvolvida), induziria à mesma troca de calor, entre o mesmo ambiente e a pessoa, aproximando ao ambiente real [72].

O modelo desenvolvido por Povl Ole Fanger⁷ é, provavelmente, o modelo mais profundamente estudado, tendo sido praticamente inalterado desde a sua criação, há 40 anos atrás e que serve, ainda hoje, de base às actuais normas norte americanas e europeias. Na década de 70, o investigador realizou várias simulações laboratoriais com a população dinamarquesa e norte americana, utilizando câmaras climáticas de forma a poder controlar as condições de temperatura, humidade e velocidade do ar. Os indivíduos permaneciam no seu interior durante um determinado período de tempo e respondiam a questionários consoante as suas sensações térmicas. Através destas respostas e de equações teóricas sobre as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente, Fanger considerou as influências de **parâmetros individuais ou de grupo** (peso, vestuário e taxa metabólica) e **parâmetros ambientais** (temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade e humidade do ar), recorrendo posteriormente a métodos estatísticos que permitiriam analisar os dados recolhidos [27].

Em termos matemáticos, a expressão proposta por Fanger (1970) do balanço térmico entre o corpo e o meio envolvente [27], é traduzida pela expressão (2.3).

$$S = (M - W) - (Q_{sk} + Q_{res}) \quad (W/m^2) \quad (2.3)$$

Sendo:

S - taxa de calor acumulado no corpo (W/m^2)

W - taxa de trabalho mecânico realizado (W/m^2)

Q_{sk} - taxa total de calor perdido pela pele (W/m^2)

Q_{res} - taxa total de calor perdido pela respiração (W/m^2)

⁷ Povl Ole Fanger (1934-2006) estabeleceu um modelo em que as condições de neutralidade térmica podem ser traduzidas na zona de conforto assinalável num Diagrama Psicrométrico.

O índice desenvolvido com base no “voto de conforto” de pessoas expostas ao mesmo ambiente pode variar entre +3 (muito quente) e -3 (muito frio), correspondendo o valor 0 à neutralidade térmica. A fig. 2.7 expressa a escala Bedford, também conhecida por ASHRAE.

Designação ASHRAE	Equivalente Numérico
Muito Quente	+3
Quente	+2
Ligeiramente Quente	+1
Neutro	0
Ligeiramente Frio	-1
Frio	-2
Muito Frio	-3

Fig. 2.7 – Índices PMV pela escala ASHRAE [59]

Sendo a relação do voto médio estimado (*predicted mean vote*) definido através da seguinte relação:

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \times S \quad (2.4)$$

Desde então, tem havido uma série de estudos sobre as mais diversas actividades humanas, baseadas nesta equação, para a obtenção do voto médio estimado. Enquanto umas suportam o método, outras encontraram discrepâncias e tornou-se aparente que nenhum estudo individual pode validar adequadamente o PMV para a utilização diária de um edifício [39]. Os investigadores de Dear and Brager [24], concluíram que o PMV era bastante rigoroso quando utilizado para prever a temperatura operativa em edifícios artificialmente climatizados, contudo sobrestima as sensações térmicas das pessoas quando inseridas em edifícios com ventilação natural [39].

Tal como outro qualquer método, PMV não poderá prever o voto de conforto individual, pois as pessoas divergem nas suas preferências térmicas. Em vez disso, prevê um conforto médio num grupo de indivíduos expostos ao mesmo ambiente térmico, vestuário e com o mesmo nível de actividade física. Contudo, a junção destas três condições apenas ocorre em ambientes controlados, o que raramente acontece na prática.

Para além deste índice, Fanger [27] propôs um outro indicador que, nele baseado, estimasse a percentagem previsível de insatisfeitos (*predicted percentage of dissatisfied*). O cálculo do Índice PPD é feito através da relação:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4+0,2179PMV^2)} (\%) \quad (2.5)$$

Podendo ser representada sob a forma gráfica como se mostra na Figura 2.8.

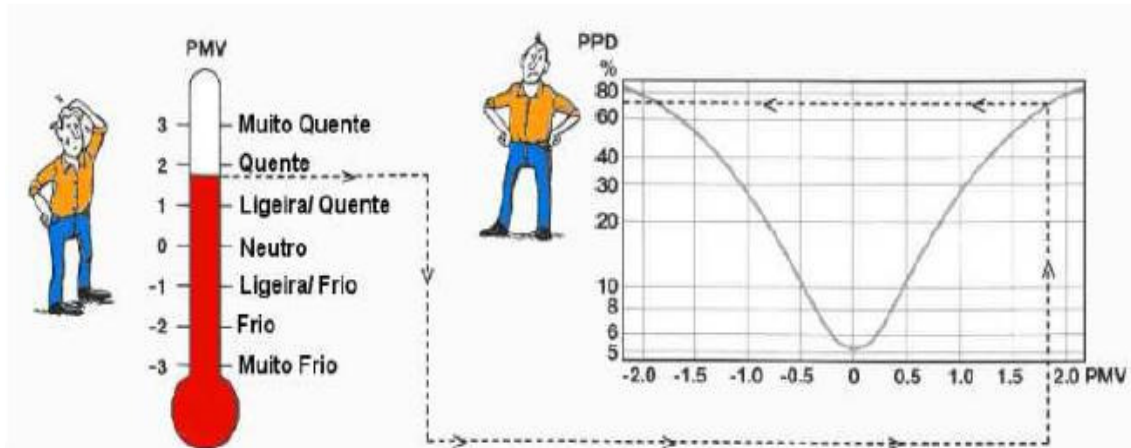


Fig. 2.8 - Relação entre os índices PPD (percentagem previsível de insatisfeitos) e PMV (voto médio estimado) [3]

Deverá notar-se que o índice PPD depende directamente de PMV e que ambas exprimem sensações de desconforto em relação à totalidade do corpo.

Ainda que o PMV se situe dentro dos valores atrás recomendados, será conveniente analisar cada um dos factores ambientais, uma vez que a sensação de desconforto poderá ser causada por um aquecimento ou arrefecimento indesejável de uma parte específica do corpo (desconforto local). Este tipo de situações poderá dever-se a:

- Uma diferença vertical da temperatura do ar muito elevada entre a cabeça e os tornozelos;
- Existência de pavimentos demasiadamente quentes ou frios;
- Velocidade do ar demasiado elevada (corrente de ar) ou;
- A uma assimetria muito acentuada nos valores da temperatura de radiação.

Um dos problemas de alguns modelos baseados no balanço energético encontra-se no isolamento térmico da roupa e na uniformização do vestuário. Enquanto algumas partes se encontram isoladas, outras estão expostas ao ambiente, proporcionando uma maior perda de calor incrementada pela velocidade do ar ao contrário das partes que se encontram devidamente isoladas. Um modelo “unidimensional” considera o isolamento do vestuário uniforme sobre toda a área do corpo, não permitindo desta forma responder a variações resultantes da velocidade do ar. Tipicamente, o isolamento criado pelo vestuário é medido a baixas velocidades, o que significa que provavelmente originam valores incorrectos quando por exemplo aplicados em situações de correntes de ar e em

actividades que resultem num dispêndio de energia e portanto, como consequência uma correcta resposta fisiológica [44].

Existem várias relações empíricas utilizadas para relacionar esta última questão, tais como a produção de suor e a circulação sanguínea, em variadas condições. Apesar de ser de utilização extremamente difícil e complexa, é possível comparar indirectamente, por meio de simulação, com os dados fisiológicos anteriormente definidos. O índice PMV não inclui a resistência do vestuário ao vapor de água. Assume que todo o suor produzido para criar neutralidade térmica evapora.

Contudo a Equação 2.6 [61] sugere que o suor produzido não deva ultrapassar determinado valor que dependa do metabolismo.

$$w < 0,0012M + 0,15 \quad (2.6)$$

Quanto maior a exigência física da actividade e/ou da circulação de ar, menor será o efeito do isolamento da roupa à resistência térmica e ao vapor de água. Estas reduções podem levar a um decréscimo de mais de 50% no isolamento térmico e mais de 80% no isolamento ao vapor de água, em velocidades do ar elevadas ou em actividades físicas exigentes [35].

O objectivo do modelo analítico ou racional será então, a busca da temperatura ou das restantes variáveis ambientais que poderão indicar um padrão de conforto, possibilitando, deste modo a previsão de temperaturas ou condições de conforto que seriam também aceitáveis em circunstâncias similares, noutros locais.

Porém o conforto não depende apenas de um processo fisiológico, existindo também factores psicológicos que afectam a percepção de conforto (expectativas).

2.3.2. Abordagem adaptativa

Uma alternativa e complementar à teoria de sensação térmica é o modelo adaptativo, sugerindo que parâmetros para além dos físicos desempenham um papel importante no conforto individual. Parâmetros esses de dimensão psicológica de adaptação, que poderão alterar as **expectativas**, e deste modo, a sua aceitabilidade.

Os métodos, desenvolvidos pela bibliografia consultada, assentam em três princípios: clima, edifício e tempo. A aplicação destes princípios nas pesquisas conduzidas em variados estados de ambiente, legitimou a “meta-análise” de estudos de autores como: Humphreys, Aluciems e de Dear e Brager [59]. Ao juntar o **voto de conforto** no comportamento dos indivíduos, o princípio relaciona a temperatura de conforto (T_c) com o meio e o contexto em que os sujeitos se encontram.

Em 1970 foram publicadas as Planilhas de Mahoney [67], que constituem um método simplificado de análise bioclimática, elaborado por Mahoney, Koenigsberger e Evans. Este método adopta um

conceito adaptativo de Zona de Conforto, nos quais os limites desejáveis de temperatura são distintos para os períodos diurno e noturno, dependendo das médias mensais, humidade relativa e média anual da temperatura do ar exterior. Este modelo tem uma particularidade que outros modelos adaptativos não apresentam: supõe que além de se acostumarem ao clima regional, as pessoas preferam durante a noite temperaturas mais baixas do que as desejadas nas horas diurnas.

Esta metodologia baseia-se no conhecimento de que o organismo humano desenvolveu um processo endógeno, cuja periodicidade se aproxima à do meio ambiente, produzindo relativa adaptação no domínio temporal. Se o organismo for isolado e colocado sob condições constantes artificiais, o período do ritmo biológico desvia-se ligeiramente daquele fornecido pelo meio ambiente, mostrando que tem uma própria periodicidade. O ritmo circadiano é sincronizado com a periodicidade das 24 horas do dia. O mais potente destes sincronizadores é o ciclo “dia-noite” (ver [76]). Este artigo aponta a temperatura como outro factor sincronizador.

Nas Planilhas de Mahoney, os intervalos de conforto considerados, dependem da média mensal da humidade relativa (Hr) e da média anual da temperatura do ar exterior (TMA)

Quadro 2.2- Limites Confortáveis de Temperatura (Planilhas de Mahoney)

Humidade Relativa	TMA < 15		15 ≤ TMA ≤ 20		TMA > 20	
	noite	dia	noite	dia	noite	dia
Hr < 30%	12 a 21	21 a 30	14 a 23	23 a 32	17 a 25	26 a 34
30% ≤ Hr < 50%	12 a 20	20 a 27	14 a 22	22 a 30	17 a 24	25 a 31
50% ≤ Hr < 70%	12 a 19	19 a 26	14 a 21	21 a 28	17 a 23	23 a 29
Hr ≥ 70%	12 a 18	18 a 24	14 a 20	20 a 25	17 a 21	22 a 27

Nota: O Quadro 2.2 apresenta os valores de temperatura de conforto e da TMA (temperatura média anual) em °C. A humidade relativa é referente à média mensal.

A Equação 2.7 foi obtida por regressão linear, a partir dos limites entre noite e dia, representando a temperatura média de conforto, à qual o método de Mahoney depende da temperatura média mensal do ambiente exterior (TME) e admitindo uma faixa de tolerância:

$$T_c = 14.15 + 0.42 TME \quad (2.7)$$

Szokolay (1987) [77] considerou, na sua equação que a T_c deva permanecer entre 18,5°C e 28,5°C.

$$T_c = 17.6 + 0.31 TME \quad (2.8)$$

Em que:

TC: temperatura média confortável em ambiente interior

TME: temperatura média exterior, mensal ou anual

Este autor definiu uma faixa de tolerância dependendo da temperatura média mensal ou anual, de 2°C e 1.75°C, respectivamente.

Existe, neste método, o pressuposto que a adopção de médias mensais ou anuais, altera somente o intervalo de tolerância mas não sobre a regressão linear. Esta hipótese torna possível comparar outros métodos que utilizem uma das duas médias de temperatura exterior.

Darmawan, num estudo desenvolvido em 1999, considerou que existem três categorias de adaptação térmica: os ajustes de comportamento (escolha de roupa, alteração da actividade, abertura ou fecho de portas e de janelas), adaptações fisiológicas (aclimatização) e reacções psicológicas (expectativas). Este factor psicológico considera que as experiências térmicas vivenciadas e acumuladas em relação às variações de temperatura típicas de um lugar, tornaria o indivíduo mais tolerante às situações térmicas mais expectáveis.

Humphreys (1978) [40], ao examinar os resultados de cerca de sessenta estudos de campo, realizados em variadas regiões do planeta, concluiu que existia uma forte correlação entre a temperatura interior neutral e a temperatura média mensal exterior, permitindo assim determinar as temperaturas de conforto das edificações. Especialmente em ambientes que se encontravam em regime livre de funcionamento, a relação de conforto entre este tipo de edifícios era praticamente linear, ao contrário daqueles que eram climatizados e que apresentavam um grau de complexidade superior (Figura 2.9).

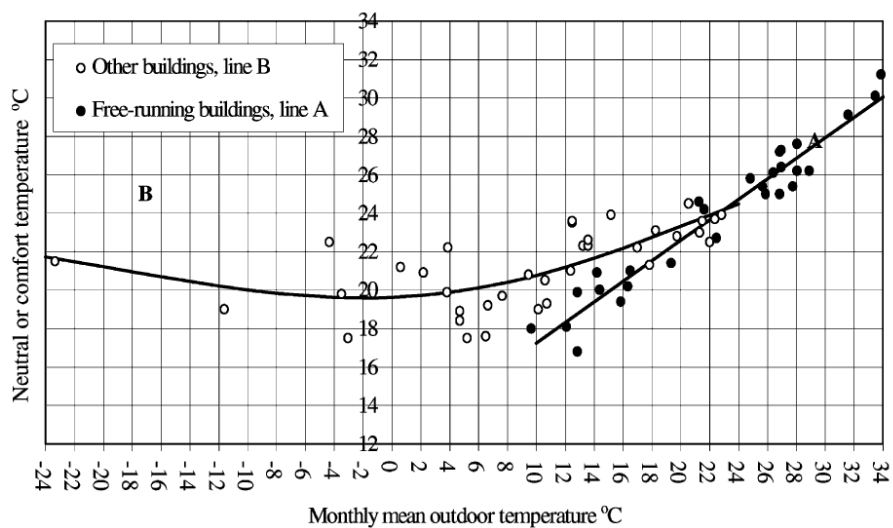


Fig. 2.9 – Preferências térmicas em regime livre (A) e controlados termicamente (B) [59]

Deste modo foi desenvolvida a seguinte equação linear:

$$T_c = 11.9 + 0.534 TME \quad (2.9)$$

Onde:

T_C : temperatura média confortável em ambiente interior (ou temperatura “neutra”, T_N).

TME : temperatura média mensal do ambiente exterior.

Brager e de Dear defendem que ocupantes que se encontrem em edifícios climatizados apresentam expectativas diferentes de um edifício naturalmente ventilado. Contudo, segundo Humphreys, parece improvável que os indivíduos modifiquem as suas respostas de conforto devido ao tipo de climatização de um edifício, seja ele mecânico ou ventilado.

Posteriormente, Humphreys e Nicol propuseram uma alteração às equações de Fanger, no sentido de torná-las sensíveis ao carácter adaptativo das sensações térmicas humanas. A equação da T_C é a indicada, onde TME é neste caso a temperatura exterior média mensal.

$$T_C = 13.5 + 0.54TME \quad (2.10)$$

Na Figura 2.10, observa-se a concordância do voto de conforto em edifícios naturalmente ventilados, localizados no Paquistão. A proporção de sujeitos confortáveis entre 20°C e 30°C revela a estabilidade do método.

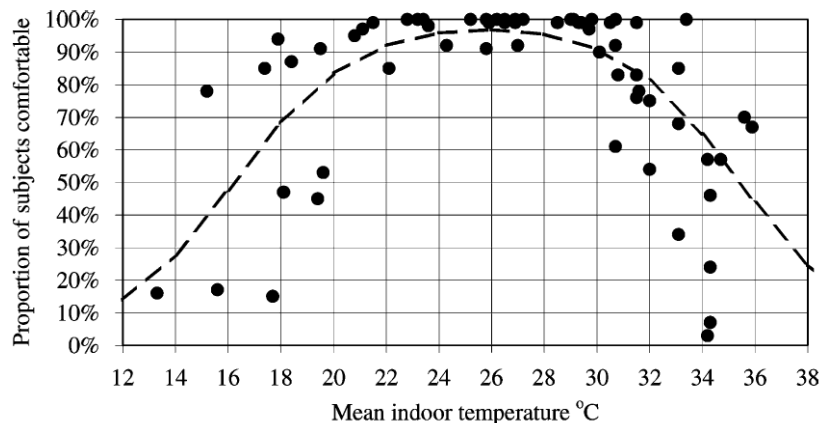


Fig. 2.10 - Relação entre temperatura de conforto T_C e temperatura exterior T_o [59]

Os estudos efectuados por Fergus e Nicol [60], compara a equação de Humphreys com os resultados de duas outras pesquisas, uma realizada no Paquistão e outra na Europa, que encontraram, respectivamente, as seguintes relações:

$$T_C = 18.5 + 0.36 TME \quad (\text{Paquistão}) \quad (2.11)$$

$$T_C = 18.2 + 0.28 TME \quad (\text{Europa}) \quad (2.12)$$

Tais como acções humanas conscientes de preservação de conforto, um outro argumento a favor da corrente adaptativa reside no conceito de aclimatização. Contudo tem havido alguma discórdia ao ser considerado apenas a temperatura exterior para determinar a T_C , ignorando uma série de outros factores externos, tal como: humidade e a velocidade do ar. No entanto, a título de exemplo, o

vestuário depende normalmente da temperatura externa, tal como o uso de sistemas de climatização. Outro factor biológico como o metabolismo também varia com a temperatura, tal como sugerem Baker e Standeven [13].

Actualmente, considera-se que a influência da humidade na temperatura ambiente, desde que dentro dos limites de conforto, é relativamente pequena, de tal modo que a EN ISO 7730 (ver 2.4.1) recomenda uma humidade relativa entre 30 e 70%, mas principalmente devido a preocupações com a qualidade do ar interior [63].

As variáveis que apresentam uma margem de controlo por parte dos utilizadores do edifício (conhecido como “oportunidade adaptativa”) são designados por “erros adaptativos”, sendo responsáveis pelas principais discrepâncias entre os resultados apresentados por métodos analíticos, como é o caso do índice PMV, e pelas metodologias adaptativas. No Quadro 2.3 estão apresentados os principais parâmetros para a determinação da percentagem previsível de insatisfeitos, para ambas as abordagens, em edifícios em regime de funcionamento livre, sendo uma a situação base e a outra, o resultado de alterações efectuadas por meio da oportunidade adaptativa.

Quadro 2.3 - Efeito dos "erros" adaptativos [13]

	Situação base	Situação adaptativa
Temperatura do quarto, ar (°C)	30,5	29,5
Temperatura do quarto, radiante (°C)	30,5	29,5
Temperatura localizada, ar (°C)	30,5	28,0
Temperatura localizada, radiante (°C)	30,5	28,0
Velocidade do ar (m/s)	0,1	0,2
Vestuário (clo)	0,5	0,4
Actividade (met)	1,2	1,1
PPD (%)	68,4	17,5

Por outro lado, o efeito da oportunidade adaptativa/erros adaptativos é ainda verificado na extensão das zonas de conforto – zonas que acomodam as variações da temperatura interior face à zona neutra (óptima) -, sendo estas tanto maiores quanto maior a liberdade de controlo dos factores condicionantes do conforto térmico nos edifícios [6].

2.4. Normalização existente sobre conforto térmico

Na primeira década do novo milénio foram desenvolvidas pesquisas que tiveram como fruto novas normas sobre exigências de conforto térmico, da qual se salienta a EN 15251:2007 e na actualização de outras amplamente aceites, as quais se destacam a norma europeia EN ISO 7730:2005 (52) e a ASHRAE Standard 55-2004 [85], que se consideram para a maioria do edificado do sector habitacional e terciário.

Qualquer desenvolvimento de um documento normativo deve ser validado, fiável, e que permita a maior aplicabilidade prática possível [63].

Validade

Diz respeito se o método de avaliação ou de previsão correcta representa interesse. Por exemplo, um índice que prevê o conforto térmico será que prevê com precisão o conforto térmico encarado pelas pessoas?

Os índices PMV e PPD foram extensivamente estudados neste âmbito. Contudo uma questão prevalece. Será que o PMV prediz o voto real das pessoas? Estudos laboratoriais validam a ISO 7730, contudo casos de estudo levaram a resultados dúbios. Nomeadamente quando se discutem variáveis como o metabolismo e o isolamento do vestuário que são difíceis de estimar na prática.

Fiabilidade

Diz respeito se uma norma utilizada para determinar o conforto térmico, se repetida vezes sem conta, dá o mesmo resultado dentro das mesmas condições. De notar que a fiabilidade não implica validade mas que a validade implica fiabilidade.

Praticabilidade

Diz respeito à possibilidade de ser utilizada correctamente. Uma norma mesmo que válida e fiável se não se apresentar de forma intuitiva será de aplicação limitada.

2.4.1. EN ISO 7730:2005

A presente norma sugere um modelo derivado de experiências e medições laboratoriais conduzidas em meados dos anos 60, em ambientes relativamente “convencionais”. Em 2005, dá-se a última revisão da norma EN ISO 7730, para além dos requerimentos já conhecidos PMV/PPD e temperatura operativa, também considera o desconforto localizado: assimetria da temperatura radiante, correntes de ar, gradiente de temperatura vertical e temperatura dos pavimentos.

Um dos factores críticos e que merece atenção é o efeito da velocidade do ar. É sabido que a velocidade do ar é uma estratégia a considerar em temperaturas amenas/quentes, porém poderá ser

algo a minimizar em ambientes mais frios. Outra questão é saber qual a importância da humidade e quais os requisitos que devem ser incluídos numa norma de conforto térmico. Apesar de alguma discussão e sucessiva revisão das normas, considera-se actualmente que a influência da humidade na temperatura ambiente, desde que dentro dos limites de conforto, é relativamente pequena, de tal modo que a nova versão recomenda uma humidade relativa entre 30 e 70%, mas principalmente devido a preocupações com a qualidade do ar [63].

A EN ISO 7730 valida o seu conteúdo e é auxiliada por outros estudos. O Quadro 2.4 resume o tipo de documento de avaliação do conforto térmico a ser utilizado para as diferentes variáveis solicitadas.

Quadro 2.4 - Resumo de normas ISO para a determinação de conforto térmico

Objectivo	Documento	Norma	
Avaliação do conforto térmico	Ambientes térmicos moderados – Determinação dos índices PMV e PPD e especificação das condições para o conforto	ISO 7730	
Normas sobre recolha de dados	Consumo metabólico	Ergonomia – Determinação da produção do calor metabólico	ISO 8996
	Parâmetros ambientais	Ambientes térmicos – Instrumentos e métodos para medições das quantidades físicas	ISO 7726
	Isolamento do vestuário	Estimativa das características térmicas do vestuário	ISO 9920

Para a produção de calor devido ao metabolismo, a norma ISO 8996 [87] define o cálculo dos ganhos associados ao metabolismo podendo ser determinado a partir de tabelas que estão respectivamente seleccionadas pelo tipo de actividade (Quadro 2.5).

Quadro 2.5 - Classificação de taxas metabólicas por actividade (ISO 8996 [87])

Classe	Taxa metabólica média (W/m^2)	Exemplo
Repouso	65	Repouso
Baixa	100	Sentado comodamente
Moderada	165	Trabalho mão/braço constante
Alta	230	Trabalho intenso
Muito alta	290	Actividade muito intensa

A norma ISO 9920 [88] faculta métodos para determinar o isolamento do vestuário baseado em tabelas (Quadro 2.6), que indicam o isolamento de conjuntos de vestuário ou, em alternativa, de peças de roupa em separado, possibilitando a criação de um conjunto próprio. Estas medições são retiradas através de um manequim estático normalmente com uma velocidade do ar no interior da câmara de teste de 0,15 a 0,2 m/s.

A unidade do isolamento térmico da roupa (I_{clo}) no sistema internacional é o $m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/W$, mas uma unidade mais prática é utilizada, o clo (1 clo = $0,155 m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/W$), que se define como o isolamento necessário para manter confortável uma pessoa que desenvolva uma actividade sedentária (menos de 1 met ou $60 W/m^2$) a uma temperatura de 21°C.

Quadro 2.6 - Isolamento térmico segundo o tipo de vestuário de acordo com a norma ISO 9920 [88]

Tipo de Vestuário	I_{cl} (clo)	I_{cl} ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/W$)
Despido	0	0
Em calções	0,1	0,016
Roupa tropical: camisa aberta com mangas curtas, calções, meias finas e sandálias	0,3	0,047
Roupa de verão: camisa com mangas curtas, calças largas, meias finas e sapatos	0,5	0,078
Roupa de trabalho: camiseta camisa com mangas compridas, calças formais, meias e sapatos	0,8	0,124
Roupa de inverno e de trabalho em interiores: camiseta, camisa de manga comprida, calças de lã e sapatos	1	0,155
Vestuário completo e de trabalho em interiores: camiseta e camisa de manga comprida, colete, gravata, jaqueta, calças e meias de lã e sapatos	1,5	0,233

2.4.2. ANSI/ASHRAE-55:2004

A primeira versão da norma ASHRAE 55 especifica os parâmetros ambientais e individuais que produzem condições térmicas aceitáveis a pelo menos 80% dos ocupantes. O conceito de aceitabilidade pode ser encarado como satisfação e este está associada a sensações térmicas (PMV). A norma baseia os seus modelos a partir do balanço energético do corpo humano, assumindo que a sensação térmica é exclusivamente influenciada por quatro factores ambientais (temperatura, radiação térmica, humidade e velocidade do ar), e dois factores individuais (actividade e roupa).

A revisão da ASHRAE 55 inclui um novo critério baseado na abordagem de conforto adaptativo, ACS⁸ (*Adaptive Comfort Standard*), que permite a sua utilização em edifícios naturalmente ventilados durante o verão ou em ambientes quentes [26]. A investigação contemplou cerca de 21,000 dados em 160 edifícios de serviços em vários pontos do globo, cobrindo um grande espectro de zonas climáticas. Os dados incluem uma variada gama de questionários, roupa, estimativas de metabolismo, simultâneas medições de ambientes térmicos, uma variedade de índices térmicos e por fim várias observações meteorológicas.

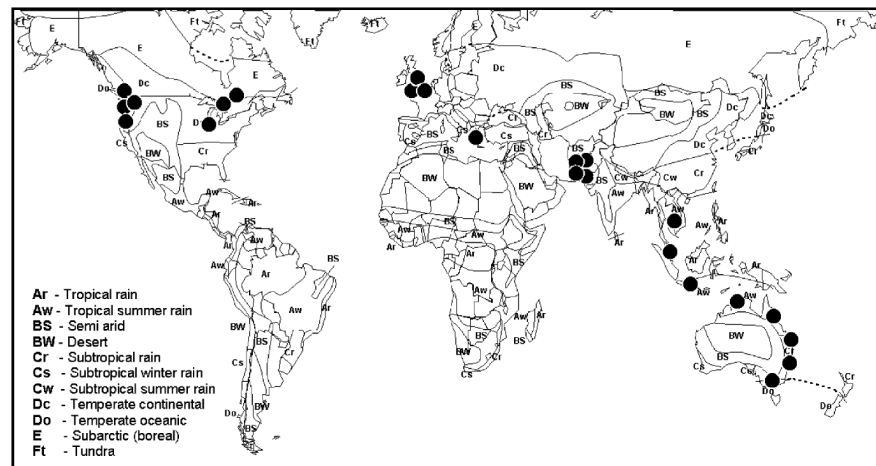


Fig. 2.11 - Distribuição geográfica dos edifícios que compõem a base de dados de conforto térmico da RP- 884 [42]

O desenvolvimento dos modelos adaptativos anteriormente descritos, e as pesquisas de campo efectuada pela RP-884 levaram ao desenvolvimento do ACS, propondo um modelo alternativo ao clássico índice PMV/PPD em edifícios naturalmente ventilados.

A temperatura de conforto óptima, T_{comf} , é então similar à regressão linear desenvolvida por Humphreys (ver Eq. 2.9 e 2.10), mas recalculada e directamente proporcional à temperatura exterior ($T_{a,out}$).

$$T_{comf} = 0,31T_{a,out} + 17,8 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.13)$$

Em que, T_{comf} corresponde entre 90 a 80% da aceitabilidade, sendo a largura de banda média do intervalo de conforto de 5°C para 90% de aceitabilidade, e de 7°C para 80%, ambas centradas na temperatura de conforto óptima conforme indicada na Figura 2.12.

⁸ O projecto ASHRAE RP-884 desenvolveu um modelo de conforto térmico adaptativo, e descreve como o trabalho foi incorporado na norma ASHRAE 55

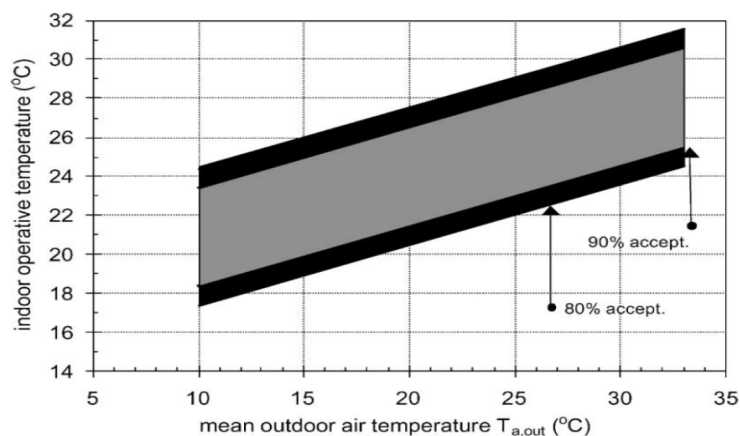


Fig. 2.12 - ACS proposto pela ASHRAE 55, aplicável em edifícios ventilados naturalmente

2.4.3. En 15251:2007

Entre 1997 e 2000 ocorreu um estudo financiado pela União Europeia através do programa Joule III. A Universidade de Oxford Brookes agiu como co-orientadora e principal responsável pelo estudo que estendeu a outras instituições académicas e empresariais do Reino Unido (COLT Internacional), França (Centro Nacional de Pesquisa Científica – ENTPE e 01dB), Suécia (Universidade de Chalmers), Grécia (National and Kapodistrian University of Athens) e Portugal (Universidade do Porto). Estas instituições ajudaram a desenvolver o SCAT`s (*Smart Controls and Thermal Comfort*).

O objectivo passava por estender várias amostras pelos países participantes no estudo, que ajudaram ao desenvolvimento do ACA (Algoritmo de Controlo Adaptativo), bem como o de novos mecanismos que permitissem a sua incorporação, tanto para edifícios climatizados como para os ventilados naturalmente e, por fim, determinar a eficiência energética utilizando o ACA [56].

Os parâmetros físicos considerados no estudo foram:

- Temperatura do ar (°C);
- Temperatura de globo (°C);
- Humidade relativa (%);
- Velocidade do ar (m/s);
- Concentração de CO₂ (ppm);
- Iluminação no plano de trabalho (lux);
- Nível de ruído (dB(A) e dB(lin)).

Os primeiros quatro pontos são parâmetros necessários à determinação do PMV, os restantes são considerados para a possibilidade de alteração da percepção de conforto térmico aquando da qualidade do ar, iluminação e nível de pressão sonora a que o ocupante se encontra sujeito.

Na pesquisa de campo ocorrida em Portugal, foram estudados cinco edifícios de serviço, de variados tipos de construção, dimensão e uso, dos quais 4/5 dos edifícios localizados na cidade do Porto e 3/5 com ventilação natural, tendo cada um deles uma ocupação que varia entre 24 e 200 pessoas.

O algoritmo adaptativo adoptado pela EN 15251:2007 possibilita, para os países participantes no estudo, o cálculo da temperatura interior de conforto em função do clima exterior. De referir que este modelo estabelece quatro categorias de edifícios, não em função da qualidade construtiva mas do tipo de edifício [57]. Estas categorias dependem, mais uma vez, da expectativa do ocupante face à temperatura de conforto calculada pelo modelo, correspondendo a um edifício de classe I um menor intervalo de conforto (maior expectativa → menor tolerância) e a um edifício de classe III um maior intervalo de conforto, como se pode observar na Figura 2.13.

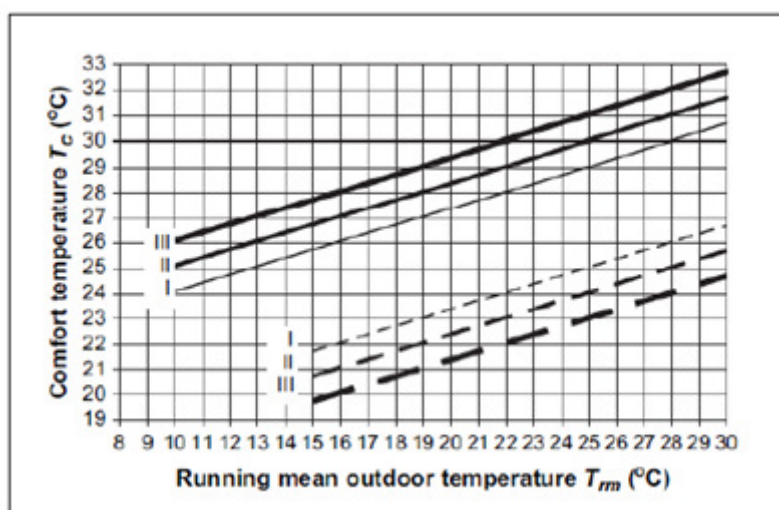


Fig. 2.13 - Limites de conforto superiores e inferiores para as temperaturas interiores de edifícios em regime de funcionamento livre, em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada [57]

O gráfico obteve-se através da conclusão de que a temperatura média exterior exponencialmente ponderada (T_{RM}) ser mais precisa na representação da dependência entre a temperatura de conforto e o clima exterior [20].

$$T_{RM}^n = c \cdot T_{RM}^{n-1} + (1 - c) \cdot T_{DM}^{n-1} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.13)$$

Em que, T_{RMn-1} ($^\circ\text{C}$) é a temperatura média exterior exponencialmente ponderada no dia $n - 1$ e T_{DM}^{n-1} ($^\circ\text{C}$) a temperatura média exterior do dia $n - 1$.

O valor da constante c varia no intervalo de 0 a 1, e define a reacção de resposta dos ocupantes da T_{RM} face às alterações da temperatura exterior. Para determinar o valor de c , os investigadores serviram-se de inquéritos, apresentando esses resultados graficamente (ver Figura 2.14), através da correlação entre o coeficiente de temperatura de conforto e a medição da temperatura exterior.

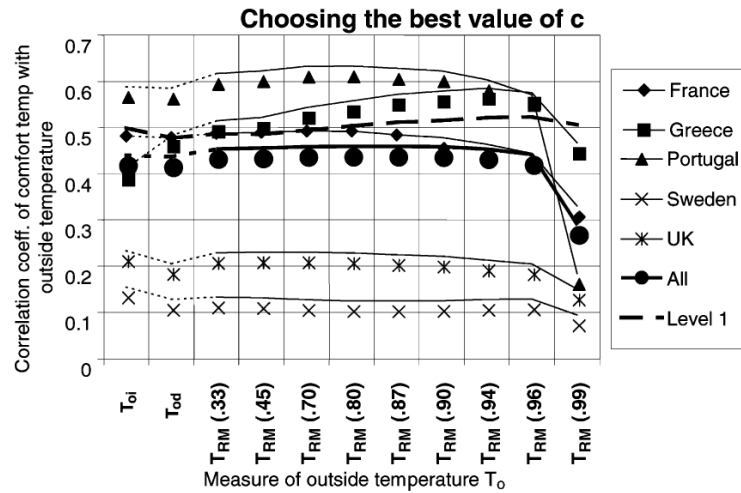


Fig. 2.14 - Correlação entre a temperatura de conforto e várias medidas da temperatura exterior (60)

Obteve-se valores de c entre 0,33 e 0,99, nos vários países em estudo e os resultados apontam para um valor óptimo de $c=0,8$ [50].

Humphreys e Nicol perceberam, posteriormente, que a aplicação do algoritmo resultaria numa temperatura interior demasiado baixa em situação de clima frio. Desta forma, no seu estudo [41], consideraram que deveria existir um limite mínimo para a T_{RMn} , resultando na equação final do ACA:

$$T_C = dT_{RMn} + e, T_{RM} > f \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.14)$$

$$T_C = g, T_{RMn} < f \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.15)$$

Em que d, e, f, g , à semelhança de c , são parâmetros obtidos por meio de análise de regressão dos dados recolhidos durante a realização do estudo, sendo a temperatura média exterior exponencialmente ponderada (T_{RM}), o parâmetro que caracteriza o ambiente exterior, como referido acima, e T_C a temperatura interior de conforto.

Quadro 2.7 - Temperaturas de conforto obtidas no projecto SCATs [50]

País	Equação adaptativa ($^\circ\text{C}$)	
	$T_{RM} \leq 10^\circ\text{C}$	$T_{RM} \geq 10^\circ\text{C}$
França	$0,049.T_{RM} + 22,58$	$0,026.T_{RM} + 21,42$
Grécia	<i>n. d</i>	$0,205.T_{RM} + 21,69$
Portugal	$0,381.T_{RM} + 18,12$	$0,381.T_{RM} + 18,12$
Suécia	$0,051.T_{RM} + 22,83$	$0,051.T_{RM} + 22,83$
Reino Unido	$0,104.T_{RM} + 22,58$	$0,168.T_{RM} + 21,63$
Território Europeu	22,80	$0,302.T_{RM} + 19,39$

Enquanto num modelo baseado no balanço energético, os parâmetros associados dizem respeito ao ambiente interior. Estes modelos necessitam ainda do conhecimento das rotinas e tipo de actividades, bem como do tipo de vestuário, difíceis de estimar. Por sua vez, os modelos de conforto térmico adaptativo aplicam como principal *input* a temperatura exterior. A anterior explicação em termos de microclima afecta de imediato as trocas energéticas individuais, enquanto os modelos de conforto adaptativo contextualizam qualquer mudança do clima.

A tese deste modelo apoia-se no facto de que o clima influencia fortemente o nosso comportamento adaptativo e portanto a nossa percepção psicológica sob a forma do tipo de ambiente que expectamos. Na sua análise, o termo “preferência” é considerado mais apropriado para o indicador de condições térmicas óptimas ao invés da tradicional presunção de “sensação térmica neutra”.

Como já anteriormente referido, a utilização do PMV em edifícios artificialmente climatizados é bastante assertiva, demonstrando o seu sucesso na previsão do conforto térmico e a importância dos ajustes no vestuário e na circulação de ar entre o interior e a variação climática. Neste sentido o PMV poderá ser considerado um modelo parcialmente adaptativo. Em contrapartida, edifícios naturalmente ventilados são fortemente influenciados por mudanças na expectativa dos ocupantes, resultando numa noção de controlo de variadíssimas combinações, que tornam a experiência térmica consideravelmente superior nestes edifícios.

2.5. Implicações do consumo energético pela necessidade de conforto térmico

O consumo energético é um dos maiores problemas da actualidade porque conduz a um esgotamento progressivo das reservas de combustíveis fósseis e num aumento da emissão de gases de efeito de estufa como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O).

Portugal é um país com escassos recursos energéticos próprios como o petróleo, o carvão e o gás, que são os recursos que asseguram a maior parte das necessidades energéticas dos países desenvolvidos. Esta situação de escassez de recursos conduz a uma elevada dependência energética proveniente do exterior (81,2% no ano de 2009). Analisando estes valores (Figura 2.15), é necessário aumentar a contribuição das energias renováveis no nosso país: hídrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa [96].

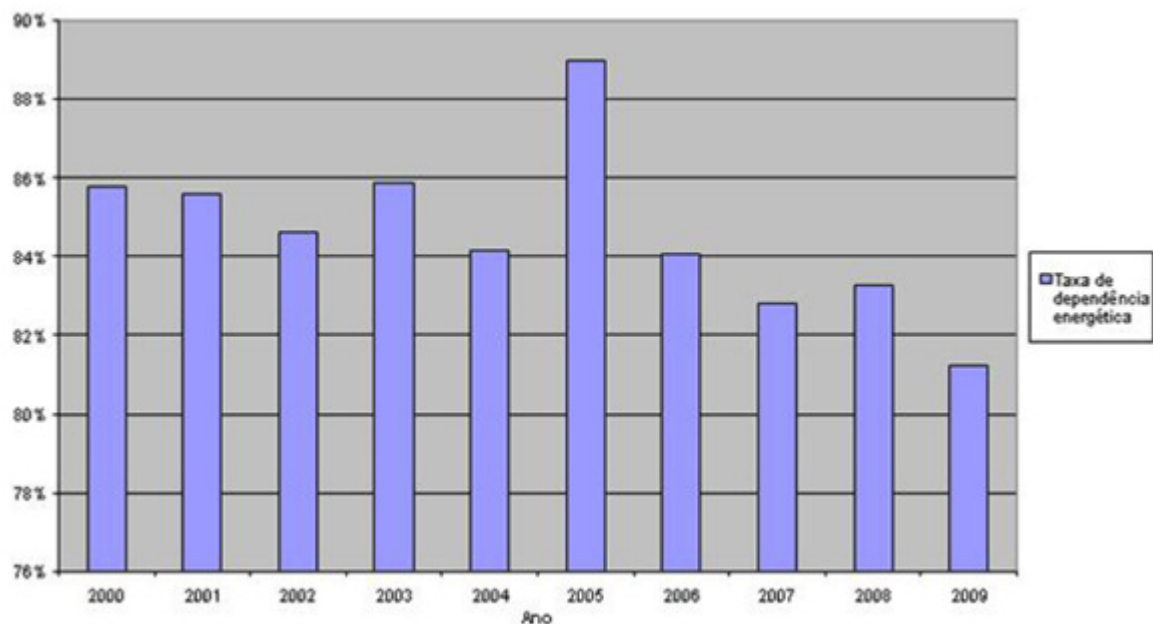


Fig. 2.15 - Taxa de dependência energética em Portugal (2000-2009) [98]

O petróleo continua a ter um papel essencial na estrutura de abastecimento em Portugal (Figura 2.16) e em 2009 representava 48,7% do consumo total de energia primária⁹. O gás natural, carvão e energias renováveis representavam, respectivamente, 15%, 11,3% e 17,1% [96].

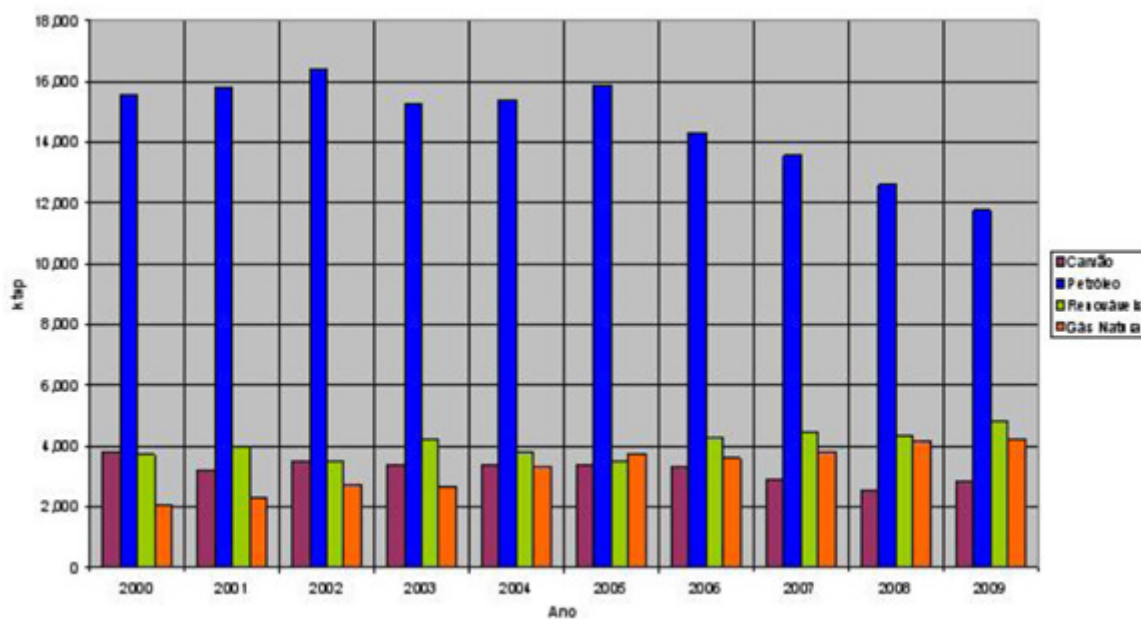


Fig. 2.16 - Evolução do consumo energético em Portugal (2000-2009) [98]

O elevado consumo de energia verificado nas habitações deve-se, em geral, ao desconforto sentido pelos ocupantes no interior das mesmas. As diferenças de temperatura existentes no interior da habitação ao longo do ano criam desconforto nos ocupantes levando-os a utilizar sistemas de

⁹ Energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis das quais não passaram por um processo de transformação.

climatização, frequentemente caros e de elevado consumo energético. Verifica-se uma crescente permanência no interior dos edifícios por parte dos seus utilizadores, devido aos novos tipos de actividades profissionais e de lazer. Esta prática dá origem a um aumento do consumo de energia na procura de um eficiente conforto no interior das habitações [7].

De acordo com os dados nacionais de recenseamento da habitação de 2001, 81% do parque habitacional edificado foi construído antes de 1990 [97], ou seja anterior à primeira legislação¹⁰ regulamentar do comportamento térmico dos edifícios. A grande maioria destes edifícios apresenta potenciais consumos energéticos e baixos níveis de conforto. Tendo em consideração o cenário apresentado: elevado número de edifícios nacionais a necessitarem de obras de reabilitação, 38,1% dos edifícios e 2,9% em avançado estado de degradação, estima-se que o número de fogos a necessitarem de reparações esteja na ordem dos 800 000 [97].

O investimento interno no sector da reabilitação de edifícios de habitação é ainda bastante incipiente. Na última década observou-se a manutenção da trajectória de crescimento do novo edificado, embora a um ritmo inferior ao ocorrido no passado. Hoje Portugal dispõe de mais 12% de edifícios e 16% de alojamentos destinados à habitação do que em 2001 [98].

Estes dados são ainda mais alarmantes, tendo em conta que em 2009 as construções novas (Figura 2.17) representavam cerca de 67,5% do total de edifícios, o que evidencia uma perda de importância, em 2010, da reabilitação do edificado [99].

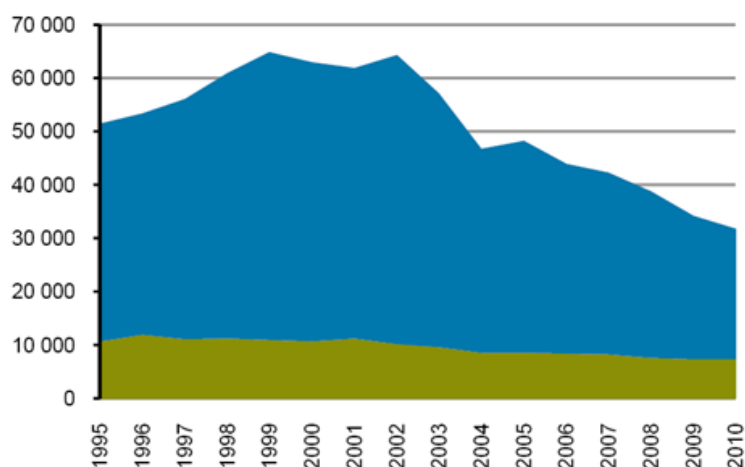


Fig. 2.17 - Reabilitações do edificado e construções novas em Portugal (1995-2010) [99]

De acordo com os dados do Balanço Energético divulgados anualmente pela Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), verifica-se na Figura 2.18 que a evolução do consumo de energia no sector doméstico apresentou uma trajectória crescente de 1989 a 2005, ano a partir do qual se verifica

¹⁰ O DL 40/90 de 6 de Fevereiro aprovou o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) que entrou em vigor em 1 de Janeiro de 1991.

uma inversão desta tendência. Em 2009 registou-se um aumento de 0,3 pontos percentuais (p.p) face a 2008, atingindo níveis próximo dos de 2007 [100].

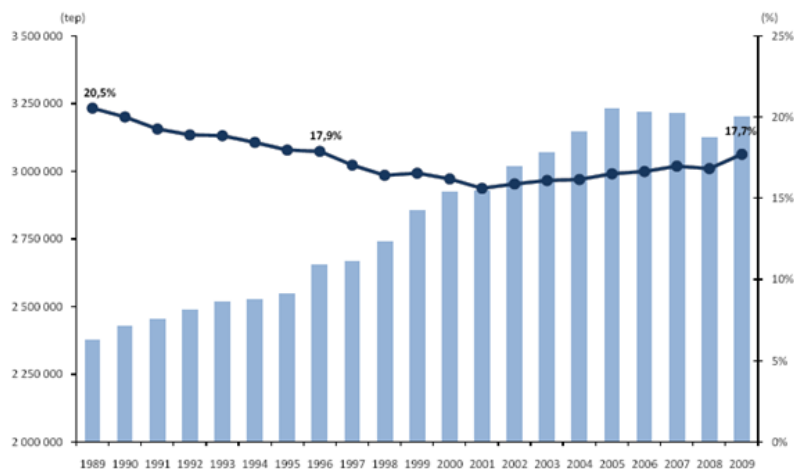


Fig. 2.18 - Consumo no sector doméstico (tep) e peso (%) do consumo do sector doméstico no consumo final de energia (1989-2009)
[96]

O peso total do consumo doméstico, voltou em 2009, a aproximar-se aos dados registados em 1996.

Apesar da actualização da regulamentação imposta, em 2006, por directiva europeia e transposta para regulamentação nacional e ao contrário do que se previa, o sector da reabilitação energética dos edifícios em Portugal não sofreu o impulso desejado a curto prazo, apesar de quantificar e tornar visível o desempenho energético e ambiental dos edifícios.

Em Portugal, os edifícios foram responsáveis pelo consumo de 5,8 Mtep (milhões de toneladas equivalente de petróleo), representando cerca de 30% do consumo total de energia primária do país e 62% dos consumos de electricidade no ano de 2005. O sector residencial com cerca de 3,3 milhões de edifícios contribuiu com 17% dos consumos de energia primária em termos nacionais, representando cerca de 29% dos consumos de electricidade, o que evidencia a necessidade de uma atenção particular de forma a moderar os consumos [1].

Segundo a DGEG existe, no sector doméstico, um aumento do consumo de energia eléctrica por unidade de alojamento comparando os valores de 2630 kWh/alojamento em 2009 contra 2510 kWh/alojamento no ano de 2008. Relativamente às formas de energia utilizadas, verifica-se uma diminuição nos consumos dos produtos de petróleo e um aumento do gás natural [96].

Nos últimos anos, no sector residencial, a qualidade dos edifícios e do conforto a eles associado têm aumentado e as necessidades de conforto térmico (aquecimento e arrefecimento) são comodidades que foram sendo colocadas gradualmente à disposição dos utilizadores dos edifícios de habitação. No entanto, este nível mais elevado de conforto traduz-se, normalmente, num acréscimo de investimento e num maior consumo de energia com repercussão no aumento de gases que contribuem para o

aquecimento global [1]. Em 2010, a Electricidade surge como a principal fonte de energia consumida no sector doméstico em Portugal, representando 44,1% do consumo total de energia. Esta fonte de energia foi a que sofreu maior alteração relativamente aos últimos inquéritos (15,5% em 1989 e 27,5% em 1996). O gasóleo de aquecimento representava cerca de 3% do consumo total de energia nos alojamentos [100].

O consumo de energia eléctrica assume um papel muito relevante no sector residencial, dado que a maioria dos equipamentos presentes nas habitações requer este tipo de fonte de energia, existindo uma evidente dependência na sociedade actual. O aumento do consumo de electricidade estará directamente associado ao aumento do conforto térmico e ao crescimento do número de equipamentos eléctricos disponíveis nas habitações [100].

Destaca-se o consumo de energia para o aquecimento/arrefecimento, que corresponde a 8,8% do consumo total de energia em 2010 [100].

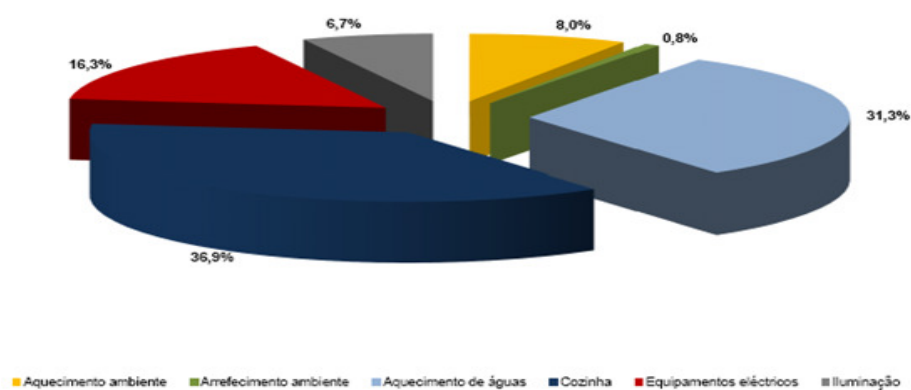


Fig. 2.19 - Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de uso (2010) [100]

Os consumos energéticos médios relativos ao conforto ambiental não são muito significativos em Portugal mas têm vindo a aumentar a um ritmo elevado e tendem a generalizar-se. Caso não surja, em breve, na construção dos edifícios uma aplicação rigorosa dos princípios, regras ou normas que promovam a utilização racional de energia, os níveis de conforto tenderão a ser atingidos cada vez mais recorrendo a sistemas de condicionamento de ar interior, o que fará aumentar os consumos globais no sector [55]. Hawkes [36] descobriu que a eficiência energética era melhorada quando se dava o controlo ambiental às pessoas, uma vez que o uso de energia estaria mais relacionada com necessidades do que propriamente manter a uniformidade imposta pelos sistemas de climatização. Wilson e Hedge [80] concluíram que o aumento da produtividade poderia ocorrer pelo aumento e controlo da percepção térmica individual, dando assim a possibilidade complementar aos sistemas mecânicos, de soluções de climatização passivas.

Um projecto recente [50] sugere que a variação de parâmetros interiores não aumenta o desconforto nos ocupantes, mas reduz significativamente a factura eléctrica no uso de sistemas de arrefecimento, quando comparado com a utilização de uma temperatura interior constante.

Num estudo efectuado na Europa [74] estima-se que o uso de soluções de climatização passiva permite uma poupança energética na ordem dos 18%. É pertinente sublinhar que um edifício que consuma pouca energia mas que aumenta o desconforto poderá ser tão insustentável como aquele que encoraja o uso de energia. Isto porque, considerando o princípio adaptativo, os ocupantes poderão utilizar a energia de modo a aliviar o seu desconforto. Edifícios naturalmente ventilados utilizam metade da energia daqueles que são climatizados [46].

Trabalhos mais recentes sugerem que o uso de um sistema de controlo que permita que a temperatura de referência mude com a temperatura exterior (em regime livre) não causa desconforto entre os ocupantes, comparando com uma temperatura de referência constante, mas que poderá resultar em ganhos substanciais na utilização da energia [50].

3. CONFORTO TÉRMICO E ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS

3.1. Geometria e orientação solar

Representando o Sol um papel crucial no conforto dos espaços, é necessário conhecer a sua relação com o ambiente, não só em termos de contributo energético, mas também a sua posição ao longo do dia e do ano. A esse percurso designa-se por **geometria solar** e com ela, é possível compreender a posição do sol relativamente aos edifícios e determinar o efeito da radiação, em todas as superfícies expostas. O aproveitamento da radiação solar pode servir para equilibrar a temperatura do ar através da radiação das superfícies [64], ou provocar a necessidade de sistemas de sombreamento.

A posição solar varia ao longo do ano, salientando-se: os solstícios, de Verão e Inverno¹¹, e os equinócios, da Primavera e do Outono¹².

No movimento de translação, a Terra percorre uma trajetória elíptica num plano inclinado de $23,27^\circ$ relativamente ao plano do equador. Este ângulo define a posição dos trópicos e faz com que os dois hemisférios terrestres recebam quantidades distintas de radiação solar ao longo do ano, caracterizando as estações pelos solstícios de Verão e de Inverno e pelos equinócios de Primavera e de Outono (Figura 3.1) [29].

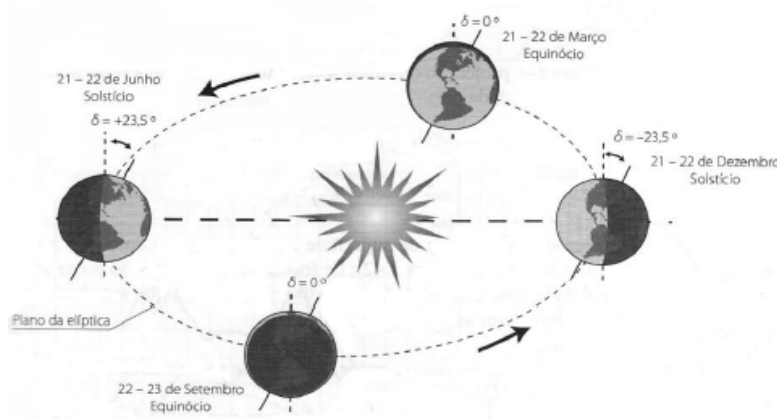


Fig. 3.1 - Movimento de translação da Terra [31]

A radiação solar pode ser dividida em directa, difusa e reflectida. Este fenómeno ocorre depois de a radiação penetrar a atmosfera, começando a sofrer interferências no seu trajecto em direcção à superfície terrestre [47]. A parcela que atinge directamente a Terra denomina-se radiação directa e a sua intensidade depende da altura solar (γ) e do ângulo de incidência dos raios solares relativamente

¹¹ Representam respectivamente os pontos de maior (21 de Junho) e menor (21 de Dezembro) altura solar representando os pontos limites do ciclo de amplitude.

¹² Representam o meio percurso solar e as transições entre as estações quente e fria (21 de Março e 21 de Setembro)

à superfície receptora (θ). Para além dos ângulos da altitude solar (γ), a posição do Sol na abóbada celeste pode ser definida através do azimute solar (α). A inclinação solar varia de acordo com a hora do dia e período do ano (Figura 3.2).

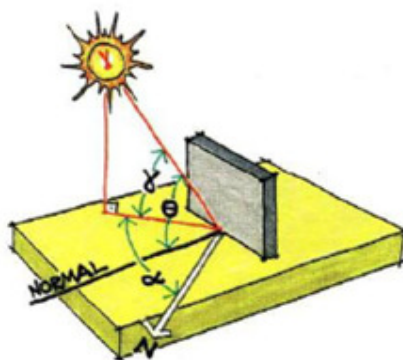


Fig. 3.2 - Ângulos de altitude solar (γ), azimute solar (α) e incidência (θ) [47]

Quanto menor for a altitude solar, maior é o trajecto da radiação através da atmosfera e, conseqüentemente, chega menos radiação à superfície terrestre. A este fenómeno dá-se o nome de dissipação atmosférica, ou seja, a radiação solar é absorvida pelo ozono, vapores e partículas presentes na atmosfera. A radiação difusa é a luz solar recebida indirectamente, resultante da acção da difracção nas nuvens, nevoeiro, poeiras em suspensão e outros obstáculos na atmosfera. A radiação reflectida, é proveniente da reflexão no solo e objectos circundantes [96], [47].

O Sol, como fonte de energia praticamente inesgotável, é o factor predominante no estudo da arquitectura bioclimática sendo fundamental conhecer a trajectória solar ao longo do dia nas diferentes estações do ano (Figura 3.3).

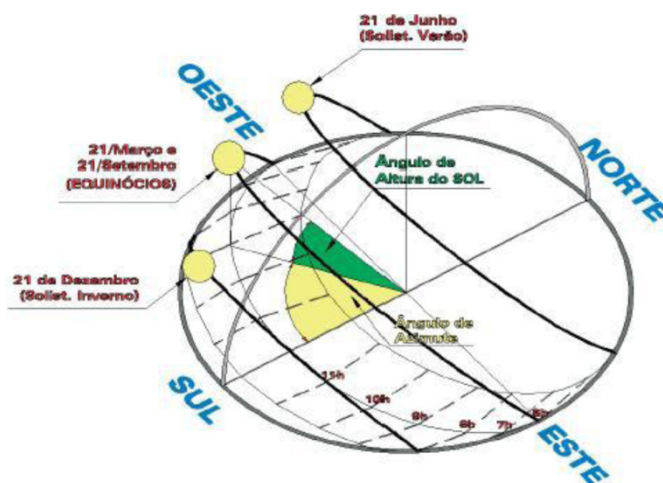


Fig. 3.3 - Percurso do sol durante o dia ao longo do ano [32]

A orientação de cada envolvente de um edifício e as soluções construtivas que as compõem são um dado fundamental na optimização de ganhos e/ou perdas de calor.

Orientação Sul: O Sol durante o Inverno percorre um trajecto próximo do azimute do Sul, com uma incidência praticamente perpendicular à fachada, propiciando maiores ganhos solares. No Verão, a proximidade do zénite no percurso solar diário, reduz significativamente a radiação na fachada Sul durante todo o dia. Assim pode concluir-se que a orientação Sul deve privilegiar os vãos envidraçados para captar a maior radiação de Inverno e deverá ser devidamente sombreada, para evitar a radiação de Verão [17].

Orientação Nascente e Poente: O Sol nasce junto do ponto cardeal Sudeste, pelo que a incidência de Inverno na fachada Nascente é de curta duração e com pequeno ângulo de incidência. No Verão, a incidência é de longas horas, desde o nascer (ponto Nordeste) até ao meio dia e com um ângulo bastante próximo da perpendicular, representando grandes ganhos solares. A fachada Poente sofre efeito idêntico, com a respectiva simetria. De Inverno o pôr do Sol localiza-se a Sudoeste, pelo que os ganhos são também reduzidos. No Verão a situação de ganhos é ainda mais elevada, pois é no período da tarde que ocorrem as maiores temperaturas no ar [32].

Conclui-se que estas orientações acumulam dois efeitos pouco positivos: pequenos ganhos durante o Inverno e ganhos excessivos durante o Verão. O seu desenho é por isso crucial para as cargas térmicas dos edifícios [17].

Orientação Norte: Esta é a orientação com menor impacte no efeito dos ganhos por radiação solar, contudo, é pelo mesmo motivo a fachada mais fria. Durante o Inverno, não apresenta ganhos solares directos. Nesta orientação pode concluir-se que não haverá grande necessidade de sombreamentos, mas é de extrema importância o dimensionamento e qualidade do envidraçado que poderão aumentar as perdas térmicas durante o Inverno.

3.2. A temperatura como referência no conforto ambiental

A temperatura do ar determina o estabelecimento de fluxos energéticos do interior para o exterior, fluxos estes que ocorrem fundamentalmente na estação de Inverno, tratando-se neste caso de perdas térmicas, ao passo que na estação de Verão o sentido do fluxo tem a tendência a inverter-se, passando para uma situação de ganhos térmicos [32].

Segundo as principais normas na área de conforto térmico [83], [84], o intervalo de temperatura interior deve encontrar-se compreendido entre os valores de 18°C e 26°C, devendo a sua variação corresponder à variação sazonal da temperatura do ar exterior. Admite-se que em períodos não muito longos, esses limites possam ser excedidos em 2°C e a flutuação diária da temperatura durante os períodos de ocupação não deve ser superior a $\pm 2^\circ\text{C}$ e, em períodos de Inverno, a diferença de temperatura para locais não aquecidos no edifício não deva superar os 4°C.

Estudos ainda realizados para a elaboração da norma EN ISO 7730, revelaram que uma alteração na temperatura superior a 5°C (subida ou descida) numa hora, é perceptível, de um modo desconfortável, pelos ocupantes [13].

É desta forma que a importância da temperatura do ar é tanto maior quanto menor for a actividade exercida pelos utilizadores de um espaço. Com o estado de repouso de um corpo, aumenta a sensibilidade às condições ambientais (térmica, visual, auditiva e olfactiva) [17].

A Temperatura Radiante representa a temperatura junto das superfícies e é determinada pela configuração dos elementos (paredes, pavimentos, coberturas). Grandes variações de temperatura radiante entre várias superfícies num mesmo espaço podem provocar desconforto nos ocupantes. Victor Olgyay refere que valores acima dos 2 a 2,5°C entre o ar e superfícies pode causar desconforto.

Numa investigação liderada por Clausen [21] demonstrou-se a importância sensorial da poluição do ar, carga térmica e ruído. Descobriram que 1°C de alteração da temperatura operativa equivalia a uma mudança de 2.4 decípol na percepção da qualidade do ar e que teria igualmente o mesmo efeito numa alteração de 3.9 dB do ruído. Um outro estudo utilizando o mesmo método [5] concluiu que um aumento da temperatura provocava um aumento da percentagem de insatisfeitos relativamente à qualidade do ar. Desta forma a temperatura têm um impacto dominante da percepção humana do ambiente, uma vez que afecta tanto o desconforto térmico como a percepção da qualidade do ar.

É sabido que a redução da poluição interna por aumento da ventilação permite a diminuição dos casos de Síndrome do Edifício Doente, mesmo em zonas de conforto térmico. A adopção de baixas temperaturas poderá ser utilizada como estratégia no combate destes fenómenos, uma vez que permitem o aumento da percepção da qualidade do ar no interior dos edifícios.

3.3. Parâmetros térmicos associados aos edifícios

O equilíbrio térmico é um dado relevante a considerar na crescente exigência de conforto térmico das sociedades ocidentalizadas, tornando-se cada vez mais importante a análise detalhada dos materiais e processos responsáveis por ganhos e perdas térmicas nas envolventes dos edifícios. Desta forma será possível antecipar de forma detalhada as necessidades energéticas, por meio de modelos válidos, fiáveis e que se apresentem de forma intuitiva e prática ao projectista.

3.3.1. Fenómenos de transmissão de calor

Quando corpos a temperaturas diferentes são postos na presença um do outro, o calor flui do mais quente para o mais frio. Num corpo mais quente o conteúdo energético e a actividade de cada molécula são superiores e estas interagem umas com as outras por impacto, permuta de electrões ou

através de um mecanismo ondulatório. Ao interagirem, é transferida energia das moléculas cujo nível energético é mais alto para aquelas em que é mais baixo, dando origem à transmissão de calor.

Através das envolventes do edifício podem ocorrer três processos físicos de transmissão de calor; **condução**, **convecção** e **radiação**. A Figura 3.4 ilustra os processos de transferência de calor e as zonas onde ocorrem.

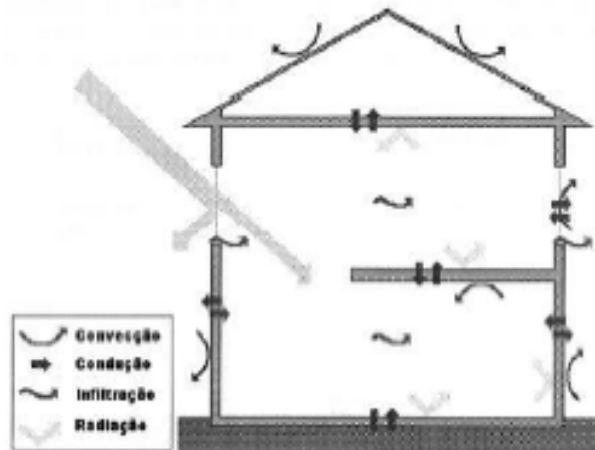


Fig. 3.4 - Processos térmicos num edifício [52]

3.3.2. Transmissão de calor por condução

A transmissão de calor por condução corresponde a um fenómeno de transferência de calor entre duas zonas, por contacto directo e com temperaturas diferentes sem que se verifiquem movimentos internos ou emissões de radiações. Este pode ocorrer em sólidos ou em fluidos [33], [18].

A transferência de calor por condução, em materiais homogéneos pode ser quantificada pela quantidade de calor Q (W) que, ao ser dividida pela área perpendicular à direcção de propagação A (m^2) resulta o fluxo de calor q [31].

$$q = \frac{Q}{A} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.1)$$

A Lei de Fourier (Equação 3.2) rege os fenómenos de transferência de calor por condução. Esta permite determinar o fluxo de calor entre duas superfícies através da condutibilidade térmica, da área e do gradiente de temperatura.

Estão ainda admitidas as hipóteses de homogeneidade e isotropia¹³ do material relativamente à condutibilidade térmica [33].

$$Q_{cond} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \equiv Q_{cond} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (3.2)$$

em que:

Q_{cond} - a quantidade de calor transferido por condução (W)

λ - a condutibilidade térmica do elemento (W/m.°C)

A - a área da superfície (m²)

$\frac{dT}{dx}$ - o gradiente de temperatura (°C/m).

O sinal menos presente na última equação decorre do facto de as transferências de calor ocorrerem das temperaturas mais elevadas para as mais baixas [18]. Associado ao facto de se considerar $T_2 - T_1$, onde T_2 é simultaneamente, a temperatura mais baixa e a de “chegada”. A quantidade de calor transferida por condução (Q_{cond}), não poderá tomar valor negativo.

A condutibilidade térmica é uma característica própria de cada material que traduz a forma como este se deixa atravessar pelo calor, podendo ser definida como a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material, por unidade de área, por unidade de diferença de temperatura. Assim, um material bom isolante térmico é aquele que tem um valor muito reduzido de condutibilidade térmica [18].

3.3.3. Transmissão de calor por convecção

A convecção pode ser compreendida como uma forma específica de condução, em que a variação de temperatura das moléculas implica a alteração relativa do seu posicionamento e, conseqüentemente, variações de massa volúmica, das quais resultam movimentos típicos da convecção. É um mecanismo de transferência de calor típico dos fluidos, visto que pressupõe a existência de movimentos que são incompatíveis com corpos sólidos [18].

Quando se dá um mecanismo de transferência de calor por convecção em fluídos, o elemento com maior temperatura e portanto menos denso, tende a subir ao contrário do elemento com menor temperatura e, portanto mais denso. Este deslocamento deve-se às forças de impulsão e é designado por movimento natural. Ao contrário, o movimento forçado ocorre quando uma fonte externa, natural ou artificial, promove as trocas de calor por convecção, como é o caso do vento e dos equipamentos de ventilação mecânica.

¹³ Isotrópico é a caracterização de uma substância que possui as mesmas propriedades físicas, independentemente da direcção considerada.



Fig. 3.5 - Mecanismo de transferência de calor por convecção [37]

A Lei do Arrefecimento, formulada por Newton, permite determinar o fluxo de calor, por convecção, entre uma superfície sólida e um fluido. No caso de um edifício, corresponde à interação entre a envolvente e o ar.

A Lei do Arrefecimento é traduzida pela seguinte expressão matemática:

$$Q_{conv} = h_c \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3.3)$$

em que:

Q_{conv} - quantidade de calor transmitida (W)

h_c - condutância térmica superficial por convecção ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A_s - área superficial de contacto entre o elemento sólido e o fluido (m^2)

T_s - temperatura superficial do sólido ($^\circ C$)

T_∞ - temperatura do fluido ($^\circ C$)

3.3.4. Transmissão de calor por radiação

Todos os corpos absorvem e de uma forma semelhante, emitem radiações electromagnéticas de diversos comprimentos de onda com uma intensidade em função da temperatura absoluta a que se encontram e do estado da sua superfície. A esta forma de transmissão de calor designa-se por radiação térmica.

Este mecanismo de transmissão de calor, pode ser considerado como um transporte de energia por ondas electromagnéticas. Para a radiação térmica os valores que ocorrem na prática, situam-se entre 0,3 e 10 μm (unidade de comprimento de onda) [33]. Este fenómeno de transmissão de calor, distingue-se dos dois anteriores pelo facto de não necessitar de qualquer meio material para que a transferência de energia ocorra, uma vez que esta transmissão tem a capacidade de propagar no vácuo.

Para se compreender melhor o fenómeno da radiação, é importante ter conhecimento sobre o conceito de corpo negro. Stefan e Boltzman demonstraram que a energia total emitida por um corpo radiante puro – que toma a designação de corpo negro e que se caracteriza, por um lado, por absorver toda a radiação nela incidente e, por outro, por radiar com intensidade igual em todas as direcções (emissão difusa). Esta energia em questão corresponde ao máximo de energia que pode ser emitida e que é dada pela seguinte expressão [18]:

$$Q_{max} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \text{ (W)} \quad (3.4)$$

Em que:

σ - constante de Stefan-Boltzmann, que toma o valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

T - temperatura absoluta (K)

A - área (m^2)

Cada tipo de superfície possui a capacidade de emitir radiação sendo essa característica designada por *emissividade* (ϵ). Os valores da emissividade variam entre 0 e 1, dependendo da capacidade do corpo de emitir a energia. No entanto, estes valores são meramente teóricos pois não se verificam na realidade. A um corpo com emissividade de 1, designa-se por corpo negro ou corpo ideal. Nestes casos não se verificam reflexões, pelo que toda a energia incidente é absorvida e posteriormente emitida, pelo contrário um corpo de emissividade nula toda a energia incidente é reflectida. De uma forma geral, os materiais de construção apresentam valores de emissividade na ordem de 0,8 [33], [18].

A expressão da energia emitida por um corpo real pode ser expressa de duas formas se:

- For considerada uma superfície que emita livremente para o espaço;

$$q_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad (3.5)$$

- Uma superfície à temperatura T_1 emitindo para um meio à temperatura T_2 ;

$$q_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.6)$$

em que:

q - calor transmitido por radiação (W)

ϵ - emissividade da superfície (m^2)

σ - constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

S - área da superfície emissora

T - temperatura absoluta (K)

T_1 e T_2 - temperaturas superficiais (K)

A energia radiante (radiação incidente, q_i), quando incide sobre um edifício parte é absorvida (radiação absorvida, q_a), outra é reflectida (radiação reflectida, q_r) e a restante parte é transmitida (radiação transmitida, q_t).

Designam-se por coeficientes de absorção α (ou absorvidade), reflexão ρ (ou reflectividade) e transmissão (ou transmissividade) τ , as quantidades percentuais de energia incidente absorvida, reflectida e transmitida:

$$\alpha = \frac{q_a}{q_i}, \rho = \frac{q_r}{q_i}, \tau = \frac{q_t}{q_i} \quad (3.7)$$

Pela conservação de energia, a soma destes três coeficientes tem de ser igual a 1. Quando os corpos são opacos, não há radiação transmitida ($\tau = 0$) pelo que a relação dos coeficientes é simplificada para [33]:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3.8)$$

De uma forma geral, os valores de α e ρ dependem da temperatura do corpo e diferem ainda para radiações com diferentes comprimentos de onda e ângulo de incidência.

3.3.5. Balanço energético dos edifícios

A equação de equilíbrio entre os ganhos e as perdas energéticas designa-se por balanço energético. Este balanço, efectuado em regime de temperatura do ar interior constante (regime permanente), permite obter as necessidades de aquecimento ou arrefecimento dos espaços de forma a garantir as exigências de conforto térmico dos seus ocupantes [4].

Para a realização do balanço energético de um edifício, considera-se os ganhos de calor relativos à energia solar e à ocupação interna, as perdas e os ganhos por infiltração e por condução através da envolvente, a energia fornecida para aquecimento/arrefecimento, entre outros factores como a inércia térmica da construção [4].

A Figura 3.7 exemplifica os processos de transferência de calor num compartimento, de forma a manter o ambiente térmico aceitável, tornando-se necessário proceder a estratégias de climatização, que serão abordadas mais detalhadamente no decorrer do presente trabalho.

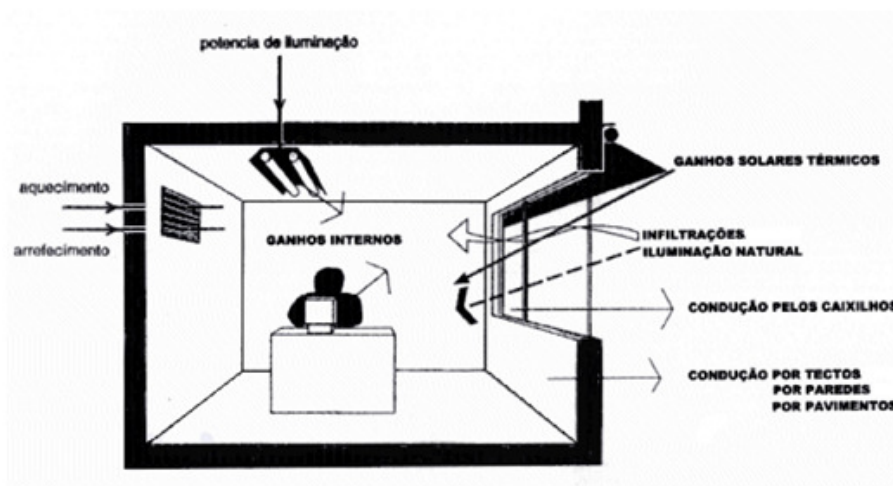


Fig. 3.6 - Balanço térmico de um edifício [4]

3.4. Sistemas passivos de arrefecimento

Portugal é um dos países da Europa com melhores condições de aproveitamento de energia solar, dispondo de um número médio anual de horas de Sol, variável entre 2200 e 3000, no continente, e entre 1700 e 2200, respectivamente, nos arquipélagos dos Açores e Madeira. Comparando com os valores da Alemanha, verifica-se uma diferença considerável que varia entre 1200 e 1700. Estes valores podem proporcionar aproveitamentos interessantes na estação de Inverno, com importantes ganhos em termos de aquecimento dos edifícios mas, ao mesmo tempo, podem constituir um problema em termos de sobreaquecimento de espaços que poderão conduzir a problemas de desconforto térmico [96].

Os sistemas de arrefecimento passivo baseiam-se em estratégias que visam utilizar as fontes frias existentes, de forma a diminuir a temperatura no interior dos edifícios, possibilitando eliminar ou diminuir consideravelmente a necessidade de um sistema de climatização convencional. Estes poderão passar por uma ou várias estratégias em simultâneo, de redução ou atenuação de ganhos de calor e/ou de estratégias que dêem origem a processos de dissipação de calor e que se traduzem directamente numa redução das necessidades de arrefecimento e numa melhoria das condições de conforto térmico, tais como [17];

- Controlar os ganhos pelo exterior: reduzindo a quantidade de radiação solar que atinge o edifício sobretudo o envidraçado (sombreamentos exteriores – palas, estores, etc.); optimização da forma do edifício; adopção de revestimentos claros que favoreçam a reflexão e não a absorção;
- Promover aberturas com orientações opostas de modo a favorecer a ventilação natural transversal dos espaços;

- Reduzir os ganhos internos provenientes de equipamentos e de iluminação artificial;
- Reduzir as necessidades de iluminação artificial durante o dia (promover a entrada de iluminação natural em todos os espaços);
- Absorver o calor restante, através de uma maior massa térmica;

A aplicação de estratégias que visem a dissipação de calor deve ainda ser tomada na fase de projecto dos edifícios, estando estas incorporadas no desenho dos mesmos. Antes de ser considerado qualquer sistema para arrefecimento, é impreterível considerar *a priori* sistemas que previnam o desnecessário aquecimento. No entanto, estes dependem de ambientes propícios que actuem como fontes frias e de gradientes de temperatura que permitam dar origem a processos de transferência significativos.

Na necessidade de sistemas que forcem o arrefecimento dos espaços, deverão ser tidos em conta sistemas activos de baixo consumo energético e da utilização de equipamentos eléctricos e de iluminação energeticamente eficiente que possibilitem a diminuição de ganhos internos.

3.4.1. Ventilação natural

A ventilação de edifícios tem sido, desde a antiguidade, um dos métodos passivos mais eficazes no arrefecimento de edifícios. É um processo através do qual o ocupante pode tirar partido da diferença de temperaturas existente entre o interior e o exterior em determinados períodos, através da abertura de janelas e portas e através das frinchas e infiltrações. Neste segundo caso, a ventilação não é controlável, pelo que deverá ser considerada uma boa vedação de portas e janelas, evitando indesejadas trocas durante a estação fria [32].

A adopção de meios de arrefecimento mecânico, HAVAC's, provocam não só um consumo substancial de energia, como reduzem significativamente a qualidade do ar interior e o conseqüente conforto ambiental nos espaços [34]. O processo de ventilação natural, deve ser considerado por excelência, como o sistema que garante a salubridade dos espaços. Assim, mesmo durante o Inverno, é recomendável a ventilação dos espaços, garantindo a qualidade e renovação do ar interior, mantendo estáveis as condições higrométricas. É sabido que elevadas percentagens de humidade relativa provocam situações de aparecimento de fungos e bolores, condicionando a qualidade do ar interior através do aumento de poeiras e micro organismos [11].

A ventilação pode ser usada em diferentes formas e períodos do dia.

A ventilação diurna poderá proporcionar conforto térmico, se ocorrer um aumento da velocidade do ar perceptível, podendo providenciar uma resposta de arrefecimento psicológico, mesmo com temperaturas tão altas como 34°C. O Quadro 3.1 apresenta a sensibilidade do corpo às velocidades de ar no interior.

Quadro 3.1 - Sensibilidade do corpo humano às velocidades de ar interior [64]

Velocidade do ar interior	Sensibilidade
Até 0,25 m/seg	Pouco perceptível
Entre 0,25 e 0,5 m/seg	Agradável
Entre 0,5 e 1,0 m/seg	Agradável mas bastante perceptível
Entre 1,0 e 1,5 m/seg	Incómodo
Mais de 1,5 m/seg	Bastante incómodo (exige medidas correctivas)

Quanto maior a velocidade do ar, maior será o arrefecimento evaporativo, minimizando desta forma o desconforto pela sensação de pele seca. Esta estratégia é especialmente benéfica, quando combinadas temperaturas e humidades elevadas [14]. Outros autores apontam que, apesar da ventilação durante o dia poder subir a temperatura interior, na generalidade dos casos o efeito pode ser positivo para as condições de conforto, desde que exista uma aceitável circulação do ar.

O arrefecimento por convecção em período nocturno, é uma estratégia a considerar em situações em que a temperatura exterior é inferior à temperatura interior. O movimento do ar para além de diminuir a temperatura interior, também facilita o arrefecimento da massa térmica (solução passiva que se descreve mais detalhadamente). O edifício torna-se mais fresco durante o próximo dia, desde que devidamente projectado para o efeito, para tal é necessária a existência de aberturas que potenciem a taxa de ventilação. Esta estratégia é potencialmente benéfica em climas com elevado gradiente térmico, entre os períodos diurnos e nocturnos de aproximadamente 15°C, quando a média da temperatura mínima durante o verão baixa até cerca de 20°C [14].

O efeito da ventilação depende da configuração e orientação do edifício, do espaço urbano e da envolvente e das condições de vento ao longo do dia. Torna-se pois importante o correcto posicionamento e dimensionamento das aberturas, podendo-se dividir simplificadamente em ventilação transversal e unilateral.

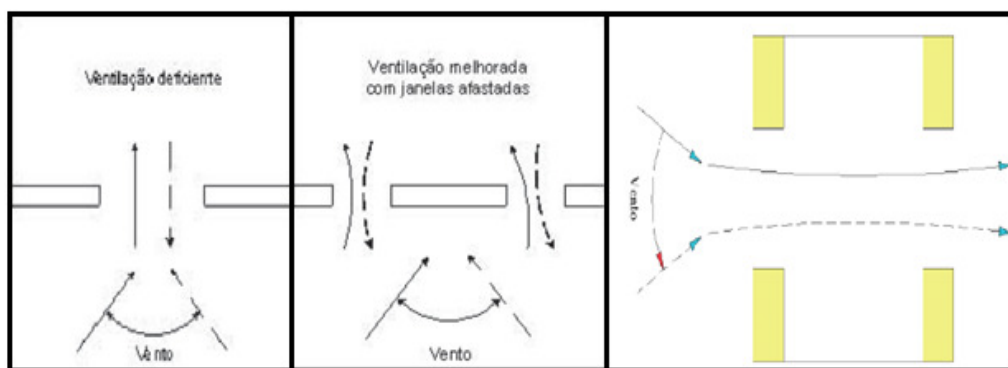


Fig. 3.7 - Esquemas de ventilação

Edifícios com aberturas numa única fachada são de difícil ventilação, mesmo em situação de incidência directa (perpendicular) do vento. Nesta situação aconselha-se a colocação de duas aberturas afastadas entre si.

Para arrefecer um espaço através de ventilação, é necessário promover aberturas em fachadas opostas de modo a que o ar mais frio entre (pela abertura sombreada) e transporte com ele o ar mais quente. A ventilação transversal é uma estratégia muito eficiente sobretudo quando conjugada com uma chaminé solar¹⁴.

3.4.2. Sombreamentos e vãos envidraçados

Para além da ventilação natural, que quando correctamente dimensionada deve ser uma estratégia a considerar, é importante o uso de outras soluções complementares, dos quais se salientam os vãos envidraçados e os seus sombreamentos.

Os sombreamentos são elementos fundamentais na protecção das áreas envidraçadas em meses mais quentes e de maior radiação do ano. É importante que estas soluções construtivas protejam de radiação directa os vãos envidraçados, sem com isso reduzir o conforto visual dado por estes.

Existem diversos dispositivos de sombreamento e protecção solar, podendo ser dispositivos adaptados à construção e portanto independentes da estrutura, como as venezianas e portadas, ou elementos que fazem parte da própria construção, de que são exemplos mais típicos as varandas em saliência, permitindo deste modo o sombreamento dos vãos envidraçados do piso inferior. É de maior interesse que os sombreamentos adaptados possam ser controlados pelo utilizador, pois a possibilidade de regular a entrada de radiação e a entrada de luz directa é um factor de bem-estar do utilizador.

Os dispositivos independentes da estrutura podem então dividir-se em dispositivos interiores e exteriores:

¹⁴ A Chaminé Solar permite extrair o ar quente, por efeito de chaminé dos espaços ocupados e deve terminar a uma altura superior à cobertura.

- Os interiores interrompem o fluxo de radiação após os mesmos terem já atravessado os vãos envidraçados. Tal significa que o sombreamento só actua na radiação que atravessa o envidraçado, sendo distribuída para o espaço interior por efeito de convecção. Somente uma parte é captada por estes tipos de sombreamento, pelo que a sua eficácia é reduzida [17].
- Os sombreamentos exteriores são mais eficazes uma vez que impedem a radiação solar antes de atingir o envidraçado. Assim, estes elementos eliminam a radiação incidente absorvida pelo envidraçado eliminando também o aumento dos ganhos no interior da habitação. Pode-se considerar que a maior ou menor eficácia dos sombreamentos depende em muito da sua localização face ao envidraçado.

Como anteriormente referido, no Verão as áreas envidraçadas são zonas através das quais os ganhos provenientes da radiação solar se tornam excessivos, levando a situação de desconforto. Quando uma radiação incide sobre um vidro, uma parte é reflectida, outra é absorvida através da espessura do vidro e uma terceira é transmitida. A relação entre cada uma destas 3 partes e o fluxo incidente definem o factor de reflexão, de absorção e o de transmissão do vidro [101];

Factores de transmissão, de reflexão e de absorção energéticas

Estes factores representam a relação entre os fluxos energéticos transmitido, reflectido ou absorvido e o fluxo energético incidente. No Quadro 3.2 encontram-se alguns exemplos destes três factores calculados num envidraçado de pano duplo.

Quadro 3.2 – Performances comparadas de vidro duplo utilizado em fachada [101]

Composição do vidro duplo		TI (%)	Coef. U ⁽¹⁾ (w/m ² .K)	Factor solar g
SGG PLANISTAR	6 mm	70	1.1	0.41
SGG PLANILUX	4mm			
SGG COOL-LITE KN 169	6 mm	61	1.3	0,44
SGG PLANILUX	6 mm			
SGG COOL-LITE SKN 165	6 mm	60	1.1	0,33
SGG PLANILUX	6 mm			
SGG COOL-LITE ST 150	6 mm	45	1.16	0,37
SGG PLANITHERM FUTUR N	6 mm			
SGG ANTELIO PRATA (face1)	6 mm	59	1.16	0,48
SGG PLANITHERM FUTUR N	6 mm			

Factor solar

O factor solar é a relação entre a energia total que passa através do vidro e a energia solar incidente. A energia total representa o somatório da energia solar que entra por transmissão directa e a que o vidro transpõe para o ambiente interior.

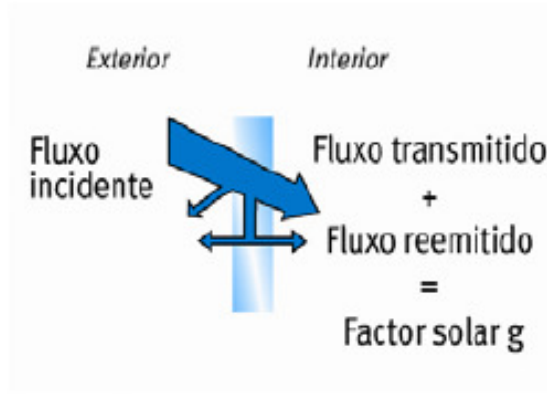


Fig. 3.8 - Trocas de calor por radiação no vidro [101]

Efeito de estufa

A energia solar que entra num local através do vidro é absorvida pelos objectos e pelas paredes interiores que aquecem reemitindo um raio térmico¹⁵. Os vidros, mesmo os mais claros, são praticamente opacos às radiações com um comprimento de onda superior a $5 \mu m$. A energia solar que entra pelos vidros fica assim retida aquecendo o compartimento [101].

Desta forma, torna-se necessário escolher correctamente o tipo de vidro e de caixilho. Inicialmente, os vãos envidraçados eram constituídas apenas por um pano simples. Contudo, com o intuito de tornar estas partes dos edifícios mais isolantes, tornou-se prática corrente a utilização de vidros constituídos por múltiplos panos. Com a introdução, por exemplo, de um segundo pano, é possível incrementar a resistência térmica do vidro para cerca do dobro, reduzindo o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) para metade.

Comparativamente aos caixilhos, existe actualmente uma panóplia de soluções para além do tradicional caixilho de madeira ou de alumínio. Nos últimos anos foram desenvolvidos novos polímeros tais como PVC (Policloreto de Vinilo) e PRFV (Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro). No que diz respeito ao isolamento térmico, os caixilhos poliméricos podem ser equiparados aos caixilhos de madeira ($U \approx 1,7 W/m^2 \text{ } ^\circ C$) mas com maior resistência à tracção, flexão e ao impacto.

3.4.3. Massa térmica

Outro elemento de maior importância é a massa térmica. A capacidade de conservação da energia nos principais constituintes de um edifício (paredes, pavimentos e coberturas) é importante para uma estratégia passiva. A massa ou inércia térmica de um material representa o volume com capacidade para armazenar o calor, com efeito prático durante o Inverno e o Verão. Assim, paredes mais espessas tendem a conservar mais calor durante maiores períodos de tempo [11]. No entanto, é importante um equilíbrio entre os principais constituintes responsáveis pelo isolamento térmico dos edifícios – massa

¹⁵ Situado primordialmente na gama do infravermelho remoto (superior a $5 \mu m$)

térmica, isolamento e vãos envidraçados – pois uma massa ou inércia térmica demasiado grande, reduz a capacidade de aquecer os espaços e ser responsável pelo surgimento de condensações superficiais durante os períodos de mudança da temperatura (Primavera/Outono).

Dimensionar correctamente a massa térmica dos elementos, permite reduzir as flutuações de temperatura no interior dos espaços, conservando o calor no interior durante o Inverno e conservando o fresco durante o Verão. As áreas com exposição directa ao Sol, são as que têm maior capacidade para reter a radiação solar, transmitindo-as depois para o interior. A cor das superfícies exteriores representa também uma grande influência neste efeito térmico: cores claras reflectem mais a radiação e as cores mais escuras absorvem maior radiação, ideal para localizações frias

Quando os edifícios têm uma inércia térmica forte, são termicamente bem isolados e protegidos de radiações directas durante o dia, ocorrendo uma diminuição de 35 a 45% na temperatura interior comparativamente à temperatura exterior. Esta é uma estratégia que deve ser tida em conta [14].

3.4.4. Redução de ganhos internos

Para além do metabolismo (ver 2.2.1), os equipamentos eléctricos juntamente com a iluminação artificial, são responsáveis pelo aumento da temperatura interior dos edifícios.

A iluminação natural é considerada indispensável nos espaços de uma habitação, contribuindo significativamente para o bem estar físico e sobretudo psicológico, dos ocupantes [17]. A diminuição do uso de iluminação artificial reflecte-se na diminuição das necessidades de arrefecimento diminuindo, por consequência, o consumo energético. Tendo em consideração a qualidade do ambiente interior gerado pela maior iluminação natural, é necessário adicionar à poupança energética, os ganhos físico-psicológicos e de produtividade, resultantes do bem estar pessoal [101].

As soluções para aproveitamento de iluminação natural poderão passar por [17]:

- Redução de zonas interiores e aumento das zonas periféricas;
- Pé-direito mais elevado, aumentando a distribuição da iluminação;
- Sombreamentos orientáveis;
- Janelas mais largas do que altas, para favorecer uma melhor distribuição espacial da luz;
- Maior controlo sobre a iluminação artificial, com maior divisão dos dispositivos de ligação.

3.5. Síntese de estratégias bioclimáticas para o caso de Verão

Considerando os seguintes tópicos, será possível uma melhoria do conforto térmico e das necessidades energéticas.

- Privilegiar a ventilação natural com a introdução de janelas basculante nos envidraçados e de grelhas de ventilação nas fachadas, de preferência em orientações opostas. Uma hipótese económica seria a abertura de orifícios na caixa de estore, garantindo a ventilação dos espaços e evitando a perda de conforto com a deslocação do ar ao nível dos ocupantes.
- Introdução de elementos nos vãos de portas interiores ou, em alternativa, criar folgas nas portas permitindo passagens de ar inferiores que favoreçam a ventilação transversal. Uma desvantagem desta estratégia é a degradação do isolamento acústico, entre compartimentos.
- Promover a ventilação natural nocturna, período do dia com maior eficácia devido às variações térmicas diárias.
- Introdução de sombreamentos exteriores que reduzam os ganhos térmicos por radiação solar no período de Verão, protegendo os envidraçados a Sul, Nascente e Poente. Esta medida para além de minimizar os ganhos durante a estação melhora significativamente a iluminação interior, através da difusão da luz nos espaços, reduzindo o contraste e o brilho e aumentando a área de influência da iluminação natural.
- Substituição dos envidraçados por vidros de baixa emissividade e menor coeficiente de transmissão térmica, de preferência inferior a $1,8\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. No entanto, o investimento poderá não compensar quando os edifícios já possuem envidraçados duplos.
- O reforço do isolamento térmico é uma medida ideal, porém a intrusão construtiva nos edifícios, os custos e, em situações em que os edifícios são relativamente recentes, poderá não ser economicamente viável.
- Prestar aos utilizadores informações e conhecimentos necessários, de forma a racionalizar e melhorar o desempenho ao nível do conforto e eficiência ao nível dos recursos. Para tal, é indispensável prover ao consumidor manuais de utilização para um correcto uso dos sistemas e otimizar os níveis de conforto adaptativo. Introduzir, por exemplo, princípios básicos de sustentabilidade como a substituição de lâmpadas e electrodomésticos por outros mais eficientes.

4. METODOLOGIA PARA A VALIDAÇÃO DO OBJECTO DE INVESTIGAÇÃO

No presente capítulo, o caso de estudo é apresentado, bem como o método de “controlo” (RCCTE), para a análise das necessidades energéticas de arrefecimento, que garantam uma temperatura interior máxima de 25°C. Também no decorrer da dissertação será considerada a implantação da fracção autónoma, em três zonas climáticas distintas do território português, estabelecidas pelo mesmo regulamento (Figura 4.1).

O programa *EnergyPlus* servirá para implementar as diferentes metodologias de análise de conforto térmico, considerando as diferentes metodologias de análise de conforto térmico, apresentadas no capítulo 3.4. Esta opção permitirá responder a um dos objectivos delineados: validação e praticabilidade, na aplicação em concreto das metodologias num caso de estudo.

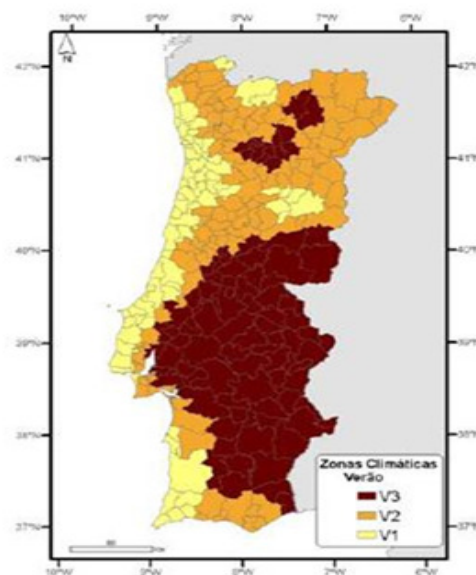


Fig. 4.1 - Zonamento climático de Junho a Setembro em Portugal [93]

4.1. Caracterização do caso de estudo

O caso de estudo refere-se a uma fracção autónoma inserida num edifício de habitação e comércio, localizado em Lisboa, na Avenida D. João II, construído no ano 2000 e que se encontra a uma altura de 27m (9º Piso). O edifício, situado em zona climática do tipo II-V2 Sul, é composto por 18 pisos (3 para estacionamento em cave, 4 de comércio e 12 de habitação), com um total de 36 fracções autónomas (12 T2, 12 T3 e 12 T4). O objecto de estudo é uma fracção autónoma de tipologia T4, residencial, com orientações das fachadas a Sul e Este, tal como indicado na Figura 4.2. O edifício

encontra-se em zona urbanizada, rodeada por outros edifícios de vários andares. A área útil de pavimento é de 136,67m² e o pé-direito médio ponderado é de 2,59m.

A circulação interior comum é constituída por uma caixa de elevadores e uma caixa de escadas, que se desenvolvem na vertical a partir do piso -3 até à cobertura. Os vãos envidraçados são simples e com vidro duplo incolor, sendo a caixilharia em alumínio sem corte térmico. As protecções exteriores são do tipo estores venezianos orientáveis, metálicos, de cor cinza médio, enquanto as protecções interiores utilizadas são cortinas opacas.

De seguida, será feita uma breve descrição das soluções construtivas existentes.

Estruturalmente o edifício que aqui se descreve é concebido em betão armado, com uma malha convencional de pilares e vigas, sobre os quais se assentam as lajes. Apesar de erigido no ano de 2000, não foi contemplado o uso de isolamento térmico no caderno de encargos o que, apesar de tudo, respeita o regulamento na altura em vigor.

Será considerada a implantação do edifício em diferentes zonas do território português, de forma a analisar o seu comportamento térmico nas diferentes zonas climáticas de Verão, estabelecidas no RCCTE.

Na Figura 4.2 pode observar-se a delimitação da zona aquecida, sendo a área preenchida o local não aquecido (LNA). Também se pode identificar a envolvente exterior e interior, identificadas a verde e rosa, respectivamente. A linha marcada a laranja representa a separação entre o local aquecido e as fracções autónomas adjacentes, que também são aquecidas.

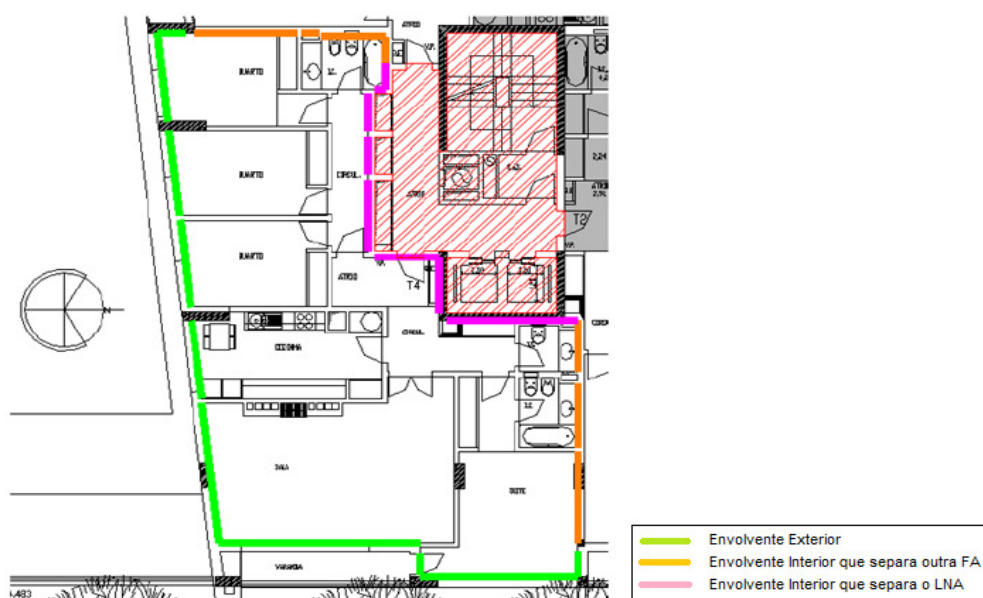


Fig. 4.2 - Delimitação das envolventes que compõem a fracção autónoma

4.2. Análise do comportamento térmico dos edifícios pelo RCCTE

O conforto térmico pode ser quantificado e, como tal, é possível geri-lo ou mesmo exigí-lo. O RCCTE apresenta o conforto térmico como um direito das pessoas a estabelecer um patamar mínimo, que deve ser atingido em todos os edifícios novos e aqueles por reabilitar. Associado ao conforto térmico, é também quantificado o consumo de energia necessário para garantir esse conforto, existindo um valor máximo autorizado.

O RCCTE é um regulamento de carácter técnico, cujo objectivo é a regulamentação das características térmicas dos edifícios de habitação e serviços, cuja dimensão não obriga a grandes sistemas de climatização, situação a partir da qual se aplica o RSECE. A sua elaboração provem da base técnica e da experiência, possibilitando determinar os efeitos térmicos nos edifícios, considerando o tipo e forma de construção e materiais adoptados, a localização, etc. O regulamento prevê ainda, os efeitos da radiação como um recurso no Inverno e algo a evitar no Verão [17].

De acordo com o INE, são cerca de 80% os edifícios em Portugal construídos antes da entrada em vigor do primeiro regulamento térmico. Em Lisboa este facto é ainda mais relevante, uma vez que a percentagem ultrapassa os 90% [72].

O primeiro regulamento das características térmicas dos edifícios, implantado em Portugal, data de 6 de Fevereiro de 1990, sendo considerado inovador no contexto Europeu, pois para além dos requisitos energéticos (N_{ic} e N_{vc}), já contabilizava os factores de protecção solar. Contudo, apesar desta versão ter conseguido alguns resultados positivos, foi considerada por muitos como “pouco exigente” [37].

Na tentativa energívora de aumentar e controlar o conforto interior dos edifícios, revelaram-se algumas deficiências na construção, materiais ou a simples conclusão de que os sistemas de construção e métodos adoptados, não são hoje, o suficiente para satisfazer as nossas necessidades de conforto.

A substituição da primeira versão foi dada pelo Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril [94]. O novo RCCTE vem impor alterações profundas no *Business as Usual* da construção em Portugal, definindo claramente os padrões médios de conforto e consumo e as necessidades relativas à qualidade do ar interior, tendo em consideração a grande estanquidade dos novos edifícios. [17].

O método de cálculo é baseado na norma EN ISO 13790 [87], tendo como premissa a limitação das necessidades nominais anuais de energia útil – para aquecimento N_{ic} , arrefecimento N_{vc} , águas quentes sanitárias N_{ac} , bem como as necessidades de energia primária N_{tc} – aos correspondentes valores limites de referência N_v , N_i , N_a e N_{tc} . Para tal, é necessário quantificar, sob condições específicas, os coeficientes de transmissão térmica, superficiais (U) e lineares (ψ), dos elementos da

envolvente, a classe de inércia térmica do edifício ou da fracção autónoma, o factor solar dos vãos envidraçados (g_L) e a taxa de renovação de ar (R_{ph}).

O regulamento estabelece nas suas disposições finais e transitórias - Art.14º -, como condições ambientais de conforto de referência, uma temperatura do ar interior de 20°C para a estação de aquecimento e de 25°C e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento e uma adequada salubridade do espaço interior, com uma taxa de renovação de ar mínima, 0,6h⁻¹ [89].

4.2.1. Método de cálculo das necessidades de arrefecimento

As necessidades nominais de arrefecimento de uma fracção autónoma de um edifício correspondem à energia útil que seria necessário retirar para que, no seu interior, não seja excedida a temperatura de 25°C, durante toda a estação convencional de arrefecimento (1 de Junho a 30 de Setembro). As necessidades de arrefecimento são calculadas com recurso à expressão:

$$N_{vc} = \frac{Q_g \cdot \eta}{A_p} \text{ (kWh/m}^2 \text{ ano)} \quad (4.1)$$

onde;

η é o factor de utilização dos ganhos solares e internos na estação de arrefecimento;

Q_g são os ganhos totais brutos do edifício ou da fracção autónoma.

Os ganhos responsáveis pelo aumento de temperatura interior, acima do valor de referência, ou ganhos de calor não úteis, são os que os sistemas de condicionamento de ar têm de retirar e representam, portanto, as necessidades de arrefecimento [2].

Como os ganhos e as perdas de calor no Inverno são distintas das do Verão, o factor de utilização dos ganhos térmicos η na época estival é obtido a partir de um coeficiente γ calculado da seguinte forma:

$$\gamma = \frac{\text{ganhos totais brutos}}{\text{perdas térmicas totais}} = \frac{Q_i + Q_s + Q_{ar-Sol}}{Q_{ext} + Q_v} \quad (4.2)$$

em que;

Q_i são os ganhos internos;

Q_s são os ganhos solares através dos vãos envidraçados;

Q_{ar-Sol} representam os ganhos solares através da envolvente opaca;

Q_{ext} são as perdas pela envolvente em contacto com o exterior;

Q_v representam as perdas por ventilação.

4.2.2. Cargas através da envolvente opaca exterior (ganhos e perdas)

As cargas através da envolvente opaca exterior resultam dos efeitos combinados da temperatura do ar exterior T_{atm} e da radiação solar incidente G . Para o seu cálculo, adopta-se uma metodologia simplificada baseada na “temperatura ar-Sol” [2], que se traduz, para cada orientação, na seguinte equação:

$$Q_{opaco} = UA(\theta_{ar-sol} - \theta_i) = UA(\theta_{atm} - \theta_i) + UA\left(\frac{\alpha G}{h_e}\right) \quad (W) \quad (4.3)$$

em que;

θ_{ar-sol} representa a temperatura ar-Sol ($^{\circ}C$), ou seja, a temperatura fictícia que induz o mesmo efeito da radiação solar incidente e temperatura do ar ambiente combinados:

$$\theta_{ar-sol} = \theta_{atm} + \alpha G/h_e$$

α é o coeficiente de absorção (para a radiação solar) da superfície exterior da parede;

G a intensidade de radiação solar instantânea incidente em cada orientação (W/m^2);

h_e a condutância térmica superficial exterior do elemento da envolvente, que toma o valor de $25 W/m^2 \cdot ^{\circ}C$.

Em termos de toda a estação convencional de arrefecimento, Q_{opaco} é obtido pela integração dos ganhos instantâneos ao longo de 4 meses ou 122 dias, o que conduz à seguinte equação final:

$$Q_{opaco} = 2,928 UA(\theta_m - \theta_i) + UA\left(\frac{\alpha I_r}{h_e}\right) \quad (kWh) \quad (4.4)$$

em que;

$$2,928 UA(\theta_m - \theta_i)$$

representa o fluxo de calor devido à diferença de temperatura interior/exterior (Q_{ext}). Dado que a temperatura média exterior θ_m durante toda a estação de arrefecimento, para todas as regiões climáticas em Portugal, é sempre inferior à temperatura interior de referência θ_i , o valor desta expressão é sempre negativo. Nestas condições, a diferença de temperatura interior/exterior, em termos médios e ao longo de toda a estação de arrefecimento, está na origem de uma perda de calor.

$$Q_{ar-sol}$$

representa os ganhos solares pela envolvente opaca, devido à incidência da radiação solar: $Q_{ar-sol} = UA(\alpha I_r/h_e)$;

2,928 é o resultado obtido pela expressão: $(122 \text{ dias} \times 24 \text{ h})/1000$

θ_m a temperatura média do ar exterior na estação convencional de arrefecimento na zona climática de Verão, onde se localiza o edifício ($^{\circ}\text{C}$);

I_r a intensidade média de radiação total incidente em cada orientação durante toda a estação de arrefecimento (kWh/m^2).

A primeira parcela da Equação 4.4 corresponde às perdas pela envolvente opaca e transparente, devido à condução originada pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior (FC V.1a do regulamento). A segunda corresponde aos ganhos solares através da envolvente opaca por radiação (FC V.1c do regulamento).

4.2.3. Ganhos solares através dos vãos envidraçados Q_s

Os ganhos solares (brutos) através dos vãos envidraçados (FC V.1b do regulamento) são dados pela expressão:

$$Q_s = \sum_j \left[I_{rj} \sum_n (A \cdot F_h \cdot F_o \cdot F_f \cdot F_g \cdot F_w \cdot g_{\perp}) \right] \text{ (kWh)} \quad (4.5)$$

em que;

A é a área de abertura do vão envidraçado (m^2);

I_{rj} é a intensidade da radiação solar incidente no vão envidraçado, com a orientação j na estação de arrefecimento (kWh/m^2);

F_o e g_{\perp} os factores dos vãos envidraçados e solares no Verão são diferentes dos utilizados na estação de Inverno e devem ser considerados com dispositivos de sombreamento móveis activados a 70% da área do vão envidraçado, o que significa que no Verão deve ser contabilizado, apenas 30% do factor do vidro.

4.2.4. Perdas devidas à renovação do ar Q_v

As perdas de calor por unidade de tempo correspondentes à renovação do ar interior, Q_v , são calculadas pela expressão:

$$Q_v = 0,34 \cdot R_{ph} \cdot V (\theta_i - \theta_{atm}) \text{ (W)} \quad (4.6)$$

Considerando toda a estação de arrefecimento, Q_v é obtido pela integração da Equação 4.6 ao longo dos 122 dias que constituem a estação de arrefecimento:

$$Q_v = 2,928 \cdot 0,34 \cdot R_{ph} \cdot V (\theta_m - \theta_i) \text{ (kWh)} \quad (4.7)$$

Como se está perante um modelo estático, a temperatura média exterior durante toda a estação de arrefecimento é sempre inferior à temperatura interior de referência, pelo que apenas as perdas devidas à renovação de ar são contabilizadas (FC V.1a do regulamento). Caso a FA dispusesse de sistemas mecânicos de ventilação então, à energia Q_v , deveria ser adicionada a energia eléctrica E_v necessária ao seu funcionamento.

4.2.5. Ganhos térmicos brutos resultantes de fontes internas Q_i

Os ganhos térmicos internos (FC V.1d do regulamento) incluem qualquer fonte de calor situada no espaço a arrefecer, excluindo naturalmente sistemas de climatização. Fazem então parte, os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e a energia térmica dissipada nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação. São calculados com base na equação seguinte:

$$Q_i = 2,928 \cdot q_i \cdot A_p \text{ (kWh)} \quad (4.8)$$

em que;

q_i representa os ganhos internos, decorrentes da actividade, iluminação e aparelhos eléctricos. No caso de habitações o regulamento propõe 4 W/m^2 .

A_p a área útil do pavimento [m^2]

4.2.6. Valores limite das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento N_v

Os valores limite das necessidades nominais de energia útil, para arrefecimento de uma fracção autónoma, dependem da zona climática do local, como indicado no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Valores limites das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento – adaptado de [93]

V₁ (Norte)	N_v = 16 kWh/m².ano	V₁ (Sul)	N_v = 22 kWh/m².ano
V₂ (Norte)	N _v = 18 kWh/m ² .ano	V ₂ (Sul)	N _v = 32 kWh/m ² .ano
V₃ (Norte)	N _v = 26 kWh/m ² .ano	V ₃ (Sul)	N _v = 32 kWh/m ² .ano
Açores	N _v = 21 kWh/m ² .ano	Madeira	N _v = 23 kWh/m ² .ano

4.2.7. Valor máximo admissível de necessidades nominais globais de energia primária, N_t

O valor máximo admissível de energia primária N_t é dado pela seguinte expressão:

$$N_t = 0,9(0,01N_i + 0,01N_v + 0,15N_a) \quad (kgep/m^2.ano) \quad (4.9)$$

Os factores de ponderação incluídos nesta equação pretendem traduzir padrões típicos de consumo nas habitações, obtidos com base em levantamentos estatísticos.

Os coeficientes de N_i , N_v e N_a derivam da aplicação dos valores das eficiências nominais dos sistemas de aquecimento, arrefecimento e de produção de AQS (Águas Quentes Sanitárias), que o RCCTE assume por defeito e os correspondentes factores de conversão para energia primária [2].

O factor de 0,9 pretende traduzir o princípio de que um edifício que cumpra estritamente o mínimo exigido pelo RCCTE, não será regulamentar. Terá que ser, pelo menos superior a 10% da soma ponderada, apresentada na Equação 4.9. Deste modo o regulamento proíbe necessidades energéticas superiores ao valor de energia máxima admissível.

4.3. O programa *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa de simulação de carga térmica e análise de energia, que permite calcular as cargas de aquecimento e arrefecimento necessárias para manter os ajustes de controlo térmico da(s) zona(s) em análise. Para tal, é necessário introduzir nos dados de entrada a geometria da zona a simular. O primeiro problema deste software é a sua interface, principalmente na dificuldade em introduzir os dados numéricos para a respectiva modelação 3D. Esta é feita apenas com as coordenadas X, Y e Z de um sistema de coordenadas global. Porém, hoje já existem programas de desenho tridimensionais, como o *Google Sketchup*, que facilitam esta tarefa, limitando o erro do operador ao introduzir as coordenadas uma a uma, com grau de exigência das 4 quatro décimas.

O *EnergyPlus* tem a sua origem em dois programas: DOE-2 e Blast (Building Loads Analysis and System Thermodynamics), desenvolvidos no final da década de 70 e princípio da década de 80, como uma ferramenta de simulação de energia e carga térmica. Os técnicos alvo seriam engenheiros e arquitectos, que desejavam dimensionar correctamente soluções de ar condicionado em aparelhos de HAVAC. O objectivo seria determinar o consumo energético e otimizar a sua eficiência. Historicamente, o desenvolvimento destes programas foi impulsionado pela crise do “combustível da máquina mundial”: a criação da Organização de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) inflacionou o preço do crude em valores recorde nunca antes vistos até então, originando uma profunda crise económica nos países considerados desenvolvidos, nomeadamente nos EUA.

Baseado na tipologia da construção e de outros parâmetros fornecidos pelo usuário, o *EnergyPlus* calcula a carga de aquecimento e arrefecimento necessárias para manter o controlo térmico do ambiente, a energia consumida pelos equipamentos responsáveis por esse controle, o tipo de actividades realizadas, ganhos internos, entre outros. A Equação 4.10 [102] – base teórica do programa - relaciona o fluxo de calor, numa série de elementos finitos, com as temperaturas em ambos os lados das envolventes.

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,l-j\sigma} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,l-j\delta} \quad (4.10)$$

Onde q'' é o fluxo de calor, T a temperatura, i significa o elemento interno da construção, j é o elemento externo da construção, t representa a iteração anual e X e Y os factores de resposta.

Para o cálculo das temperaturas o programa utiliza a Equação 4.11 [102]:

$$T'_t = \frac{\left(\sum \dot{Q}_c + \sum_{i=1}^{\#surf} h_i A_i T_{si} + \sum_{j=1}^{\#zones} \dot{m}_j C_p T_{zj} + m_{inf} C_p T_{**} \right)^{(1-\Delta t)} + \left(\frac{c_z}{\delta t} T_z + m_{sys} C_p T_{supply} \right)^{(1-\Delta t)}}{\left(\sum_{i=1}^{\#surf} h_i A_i + \sum_{j=1}^{\#zones} \dot{m}_j C_p + m_{inf} C_p \right)^{(1-\Delta t)} + \left(\frac{c_z}{\delta t} + m_{sys} C_p \right)^{(1-\Delta t)}} \quad (4.11)$$

Onde \dot{Q} é o fluxo de calor, h o coeficiente de convecção de troca de calor, A a área da parede, t a temperatura, \dot{m} o fluxo de massa, C é o calor específico da parede.

Para estes cálculos, o *Energy Plus* utiliza o conceito de “zonas”, que não são necessariamente compartimentos mas são definidas como uma região da construção ou conjuntos de compartimentos submetidos ao mesmo controlo térmico. As “zonas” podem interagir termicamente umas com as outras através de superfícies adjacentes e misturas de fluxos de ar. No *Energy Plus* as condições de cada “zona” são actualizadas a partir da Equação 4.11, que usa os valores previamente calculados. Isto significa que o *software* não tem que calcular iterações para encontrar uma solução sólida e actualizar as condições das “zonas”.

A introdução de dados e a obtenção de resultados é feita em formato de texto, na extensão IDF (*Input Data File*). Contudo, o programa apresenta um interface gráfico que, não sendo o mais atractivo, permite a introdução e modificação de todos os parâmetros caracterizadores do edifício em estudo, possibilitando também a visualização de um ficheiro de texto de erros após cada simulação efectuada pelo utilizador. Ainda como resultado da simulação, é possível obter um ficheiro em formato CAD com a geometria modelada. Menciona-se também a ferramenta *EP-Launch*, que permite inserir e alterar os ficheiros climáticos utilizados nas simulações.

O modo de funcionamento deste programa é apresentado, simplificadamente no diagrama da Figura 4.4.

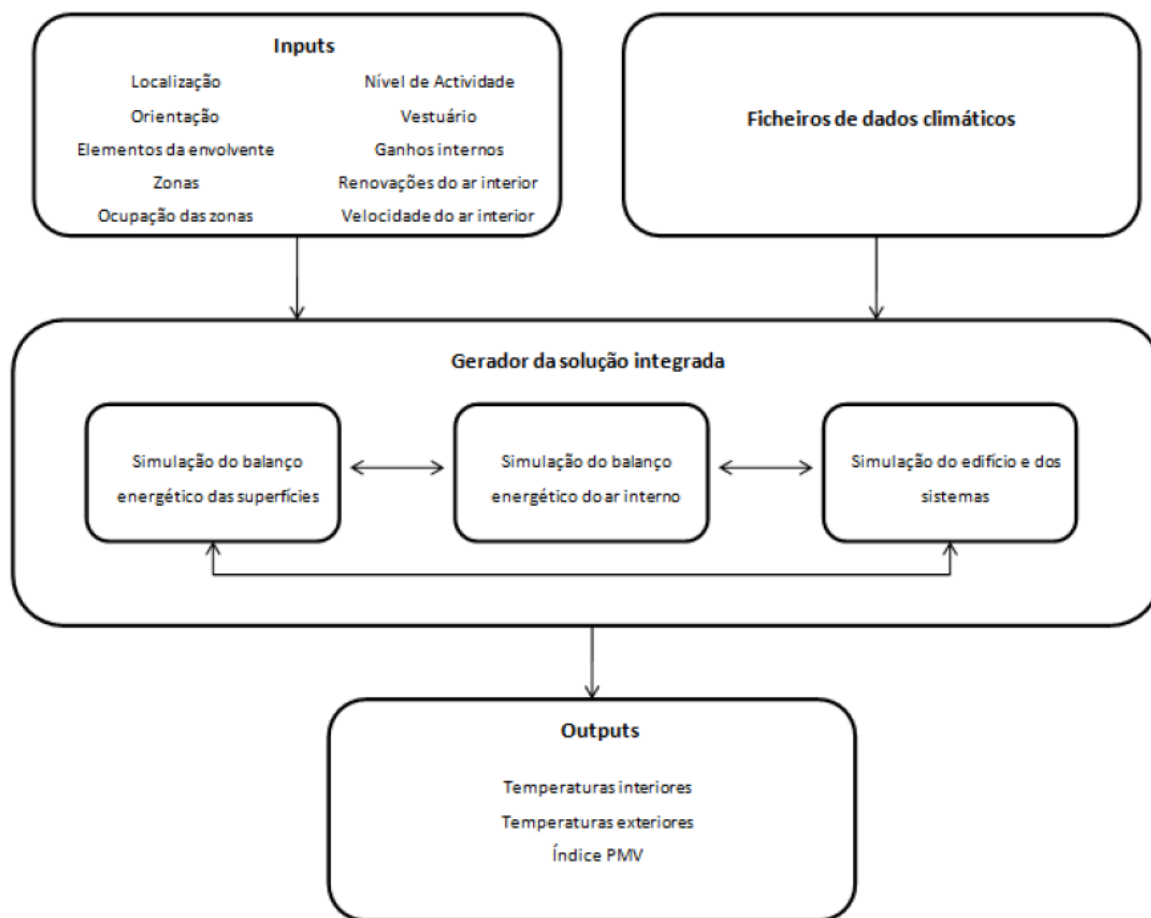


Fig. 4.3 - Diagrama representativo do funcionamento do *EnergyPlus* [6]

4.3.1. Parâmetros de simulação (*Simulation Parameters*)

Sendo um programa “aberto” à comunidade científica, desde a sua criação têm-se registado diversas actualizações. A versão utilizada neste trabalho é a 3.1.0 que, apesar de não ser a mais recente, permite dar resposta aos desafios do presente trabalho. Neste sub-capítulo, encontram-se exemplificados os campos de entrada para a simulação dinâmica do *EnergyPlus*. Na Figura 4.5 é possível observar-se a fracção autónoma e o local não aquecido (LNA), modelada no *software* e visualizada através do ficheiro *CAD*.

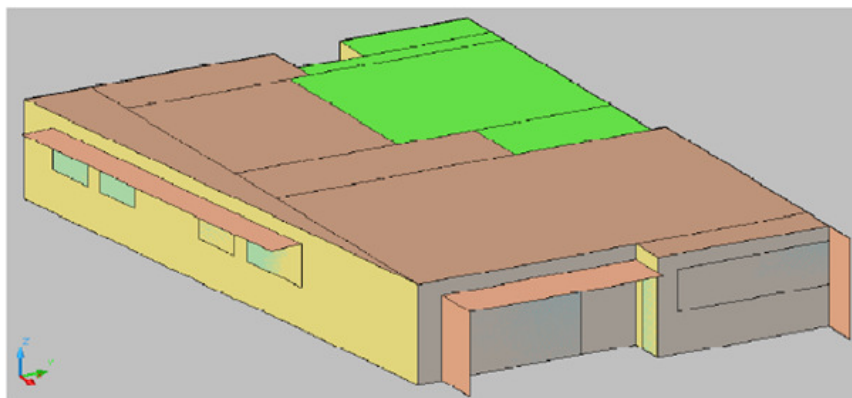


Fig. 4.4 - Fracção autónoma modelada no *EnergyPlus*

No primeiro quadro de inserção de dados, o utilizador define diferentes variáveis, como: a versão do programa, o intervalo de tempo unitário da simulação (*timestep*) válido entre 1 e 60, no qual o valor 60 corresponde a uma hora e 6 a dez minutos. Os algoritmos de convecção interior e exterior, o algoritmo para as soluções da envolvente e o controlo da simulação, no qual se optou, pela simulação do ficheiro climático. O programa disponibiliza três algoritmos distintos para as soluções da envolvente, que permitem seleccionar o tipo de algoritmo de transferência de calor a ser utilizado nos elementos construtivos. Neste caso, a escolha recaiu sobre o algoritmo CTF (*Conduction Transfer Function*), que considera apenas o calor transferido através dos elementos da envolvente. Quanto ao algoritmo de convecção interior e exterior, optou-se pelo modelo detalhado, uma vez que proporciona maior rigor às simulações e seus resultados.

4.3.2. Localização e clima (*Location and climate*)

No campo referente à localização, insere-se as coordenadas geográficas, a altitude e o fuso horário em relação ao GMT (*Greenwich Mean Time*). No que se refere ao clima, foram utilizados os ficheiros climáticos do Porto, Lisboa e Évora.

O período de simulação *RunPeriod* é o intervalo pretendido para obtenção dos resultados da simulação.

4.3.3. Materiais e elementos da envolvente (*surface construction elements*)

Neste campo inserem-se os dados que permitem a definição e caracterização dos diversos materiais constituintes da envolvente opaca e vãos envidraçados. Para cada elemento da envolvente opaca define-se um conjunto de características, tais como: rugosidade, espessura, condutibilidade, massa

volúmica, etc. Após o preenchimento destes dados, procede-se à construção de cada elemento da envolvente (paredes exteriores, interiores, LNA's, tectos e pavimentos), através da combinação dos diferentes materiais que o constituem, seguindo a sequência construtiva (do exterior para o interior).

4.3.4. Zonas Térmicas e geometria (*Thermal Zone Description/Geometry*)

Nesta janela procede-se à definição de cada uma das zonas térmicas que constituem o edifício. De referir que, é considerado zona térmica qualquer espaço ou compartimento que apresente um valor de temperatura uniforme, tal como indicado na Figura 4.5. Foram consideradas duas “zonas”, correspondendo à zona 1 – FA e zona 2 – LNA. Esta última engloba o patamar de acesso aos fogos, caixa de escadas e fosso do elevador.

Ainda antes de se iniciar a introdução dos elementos da envolvente, estipula-se como ponto de origem o canto superior esquerdo de cada um dos elementos verticais a definir. Para a introdução das restantes coordenadas do mesmo elemento, segue-se o sentido dos ponteiros do relógio.

Após a introdução das coordenadas dos elementos constituintes da envolvente da FA, procede-se à definição de cada elemento da envolvente opaca das zonas térmicas, associando-se a cada um deles uma solução construtiva. Os elementos da envolvente opaca são designados por “superfícies”, devendo ser introduzidas em primeiro lugar. Realça-se que na sua caracterização dever-se-á definir o tipo de superfície (parede, pavimento ou tecto), a zona que delimitam, o ambiente exterior ao elemento (exterior ou outra superfície) e a sua exposição ao sol e vento, no caso de envolventes exteriores.

Relativamente aos vãos envidraçados e portas, são designados pelo programa como “sub-superfícies”; estes são inseridos sobre as “superfícies” anteriormente executadas. Aos vãos envidraçados introduzidos associam-se o tipo de caixilho. Como forma de garantir taxas de activação dos sistemas de sombreamento, que não apenas o sombreamento total dos vãos envidraçados, introduzem-se, por cada vão envidraçado, duas “sub-superfícies”, alocando-se a uma o sistema de sombreamento que se pretende e deixando a outra sem sistema de sombreamento, ou seja, considera-se que 70% da área do envidraçado se encontra com a protecção exterior activa, enquanto os restantes 30% encontram-se apenas protegidas pela cortina interior opaca, contornando-se, deste modo, esta limitação do programa [6].

Aconselha-se a utilização do ficheiro CAD, à medida que o modelo é construído de forma a visualizar o modelo 3D do edifício em estudo.

4.3.5. Actividades (*Schedules*)

Este campo tem como objectivo definir o grau de utilização e operação da FA, bem como a percentagem ou quantidade de sombras, ocupação, nível de metabolismo (em função do tipo de actividade), iluminação e equipamentos eléctricos, infiltrações, controlo de temperatura e o isolamento do vestuário.

Schedule - Palas

As palas ou varandas estão sempre activas (100%) uma vez que fazem parte integrante da arquitectura do edifício.

Schedule - Ocupantes

Com o intuito de analisar os índices de conforto térmico (PMV), considerou-se que a ocupação da FA seria no mínimo de 1 ocupante e no máximo de 5 (fogos de tipologia T4 – 5 ocupantes definidos pelo RCCTE [94]. Definindo-se um *schedule* “ocupação” para 5 ocupantes durante os dias úteis da semana, entre os períodos 0-7h e 19-24h e uma ocupação mínima de 2 ocupantes para o período das 7-19h. No fim de semana considera-se que a ocupação será de 5 ocupantes em todos os períodos com excepção do período das 12-19h em que se considera apenas 1 ocupante.

Schedule – Actividades

Os níveis de metabolismo definidos para os dias úteis, entre os períodos 0-7h e 22-24h, correspondem a um nível de actividade em repouso (80W), 7-13h trabalho leve (140W) e para o período das 13-22h actividade sedentária (110W). Para o fim-de-semana, definiu-se que nos períodos 0-10h e 19-24h o nível de actividade seria de repouso (80W) e no período 10-19h seria de actividade sedentária (110W).

Estes *schedules* semanais foram adoptados para o período em estudo.

Schedule – Vestuário

Quanto à resistência térmica do vestuário convencionou-se para a estação de arrefecimento de 0,5 *clo*. Durante o desenvolvimento das simulações optou-se por baixar o valor de *clo* em determinados períodos do dia, de forma a ir ao encontro do índice PMV.

Schedule – Protecções Opacas

Neste campo foram consideradas protecções opacas com permeabilidade ao ar elevada (estores venezianos orientáveis). Considera-se que as taxas de activação encontram-se fixas, 30% desactivado e 70% activado.

4.3.6. Ganhos Internos (*Space gains*)

O programa permite considerar diversas fontes para os ganhos internos: iluminação, ocupação e equipamentos. Com o objectivo de simplificar a definição dos ganhos, apenas se considerou duas fontes: ocupação (*people*) e iluminação (*lights*).

Relativamente à ocupação, considerou-se o número máximo de ocupantes (5), activando também os *schedules* referentes à ocupação horária diária. Nesta “janela” é possível ainda activar o resultado relativo ao índice PMV. Na iluminação optou-se pelo valor médio por unidade de área útil de pavimento, para edifícios residenciais (4W/m^2), estabelecido pelo RCCTE.

4.3.7. Renovação de ar (*AirFlow*)

No presente trabalho optou-se por considerar um modelo simplificado para o fluxo de ar, assumindo-se que este ocorre por infiltração, através da ventilação natural da FA. Deste modo, para a definição deste parâmetro foi necessária a introdução do número de renovações horárias. Foram estabelecidas diferentes renovações horárias consoante a simulação em causa mas respeitando a taxa de ventilação média definida pelo projecto de térmica (através do RCCTE). Na zona respeitante ao LNA admitiu-se uma renovação horária de $1,0\text{h}^{-1}$.

4.3.8. Relatório de simulação (*Report*)

Na última etapa do programa é possível seleccionar as variáveis cujos resultados sejam os necessários para a realização do presente trabalho. Foram retirados os seguintes valores:

- Valores de PMV
- Temperatura exterior média de bolbo seco
- Temperaturas média interior
- Necessidades globais de energia primária para arrefecimento
- Ganhos e perdas das envolventes

4.4. Modelo analítico - metodologia de Fanger (PMV e PPD)

A principal dificuldade desta metodologia reside na determinação de todas as variáveis que integram a equação de balanço térmico. Esta dificuldade foi contornada através das potencialidades do programa de simulação dinâmica do comportamento de edifícios, *EnergyPlus*, que mediante a definição das condições de ocupação da FA, resistência térmica da indumentária usada pelos

ocupantes, actividade física (taxa de metabolismo) e velocidade do ar, devolve os índices PMV horários.

Através da EN ISO 7730, os índices PMV descarregados pelo *software* são verificados de modo a obter uma percentagem inferior a 10% do PPD ($-0,5 < PMV < +0,5$).

4.5. Modelo adaptativo

Como já referido, são adoptados o método empírico da norma ASHRAE standard-55:2004 e a norma europeia EN 15251:2007. Ambas as análises adaptativas irão avaliar o andamento das temperaturas internas, simuladas através do programa *EnergyPlus*, por aplicação dos intervalos de temperatura de conforto dos modelos adaptativos de cada uma das normas.

Caso sejam ultrapassados os limites máximos de T_c , avalia-se a possibilidade de descer a temperatura interior através de estratégias de arrefecimento.

4.5.1. ANSI/ASHRAE-55:2004

A avaliação de resultados irá passar pela determinação dos intervalos relativos às temperaturas interiores de conforto mensais (ver equação 2.13) apresentada no capítulo II, sendo estas comparadas com as temperaturas interiores diárias simuladas pelo *software*. Este intervalo, e segundo a ASHRAE RP-884 (98), deve garantir uma aceitabilidade das condições térmicas interiores de pelo menos 90% dos ocupantes dos edifícios (à semelhança do PPD).

A norma ANSI/ASHRAE Standard-55 2004 procura, através dos seus critérios de projecto, sugerir combinações de factores ambientais interiores e pessoais que satisfaçam a maioria dos seus ocupantes [6]. Na definição dos intervalos de conforto recorre-se às Equações 4.12 e 4.13 de forma a caracterizar o intervalo de conforto admissível [14].

$$T_{c-LS} = 0,31.T_M + 20,3 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.12)$$

$$T_{c-LI} = 0,31.T_M + 15,3 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.13)$$

Em que:

T_{c-LS} – Limite superior do intervalo de conforto;

T_{c-LI} - Limite inferior do intervalo de conforto;

T_M - Temperatura média mensal exterior.

Como se constata, por comparação com a Equação 2.13, os limites do intervalo de conforto são estabelecidos por uma banda de 2,5°C em torno da temperatura de conforto [6].

A envolvente de cada edifício é caracterizada em termos de temperatura média de bolbo seco $T_{a,out}$.

A temperatura de conforto óptima, T_c , é então similar à regressão linear indicada na Figura 2.9, mas recalculada e directamente proporcional à $T_{a,out}$.

$$T_c = 0,31T_{a,out} + 17,8 \quad (4.14)$$

Em que, T_c corresponde entre 90 a 80% da aceitabilidade, sendo a largura de banda média do intervalo de conforto de 5°C para 90% de aceitabilidade e de 7°C para 80%, ambas centradas na temperatura de conforto óptima. No caso de estudo, foi adoptado um intervalo de conforto de 5°C, permitindo assim aproximar-se das condições de aceitabilidade de PPD da norma EN ISO 7730.

4.5.2. SCATs/EN 15251:2007

Tendo em conta que o modelo adaptativo proposto pela norma EN 1521:2007, tem por base os resultados recolhidos pelo estudo SCAT`s, desenvolvido na Europa e do qual Portugal fez parte, torna-se pertinente utilizar a equação proposta para o território português:

$$T_c = 0,381.T_{RM} + 18,12 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.15)$$

O cálculo da temperatura média exterior exponencialmente ponderada (T_{RM}) efectua-se por aplicação da Equação 2.13, o que implica, neste caso, que um dos dados de saída do *software* de simulação dinâmica seja a temperatura média exterior [6].

O estudo SCAT`s, base da elaboração do modelo adaptativo da EN 15251:2007, propõe uma diferenciação dos edifícios em função do tipo de edifício e não em função da qualidade de construção do edifício [57].

A cada categoria corresponde um intervalo de conforto em torno das temperaturas de conforto interiores diárias, fornecidas por aplicação deste modelo adaptativo. No Quadro 4.2 observa-se esta classificação e os intervalos de temperatura aceitáveis para cada uma das categorias.

Quadro 4.2 - Critérios de classificação de edifícios em regime livre e limites de temperaturas de conforto face à categoria do edifício – adaptado de [57]

Categoria	Descrição	Limites de conforto
I	Elevado nível de expectativa. Usado, somente, em edifícios ocupados por pessoas muito sensíveis e frágeis	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
II	Expectativa normal (edifícios novos e reabilitação)	$\pm 3^{\circ}\text{C}$
III	Expectativa moderada (edifícios já construídos)	$\pm 4^{\circ}\text{C}$
IV	Valores fora das categorias anteriores (só aceite por períodos limitados)	$\pm >4^{\circ}\text{C}$

Foi adoptada a categoria II referente a edifícios novos e reabilitação. Esta opção justifica-se pelo facto da FA, que serve de base ao estudo, ter sido erigida no ano de 2001, no qual respeita e em algumas características suplanta, as exigências do primeiro regulamento do comportamento das características térmicas de edifícios (Decreto-lei n.º40/90, de 6 de Fevereiro). Por conseguinte aplica-se um limite de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ face às temperaturas diárias de conforto. Outra justificação deve-se ao facto de que a utilização da categoria III deverá ser utilizada com alguma restrição em climas demasiado quentes.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo apresenta-se a análise dos resultados obtidos. Estes encontram-se agrupados para as três cidades analisadas - Porto, Lisboa e Évora – que representam respectivamente as zonas climáticas V1, V2 e V3, definidas no RCCTE.

De forma a “calibrar” o programa *EnergyPlus* e garantir a coêrencia de resultados, procedeu-se, previamente, à elaboração do projecto da habitação situada em Lisboa, respeitando o actual RCCTE. Os resultados obtidos encontram-se indicados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Comparativo do comportamento térmico (RCCTE vs *EnergyPlus*)

	RCCTE	<i>EnergyPlus</i>
Nec. Energéticas (Arrefec.) [kWh]	1720,2	1769,5
Ganhos Internos [kWh]	1600,7	1528,3
Ganhos Envidraçados [kWh]	1814,4	2428,7
Ganhos Envolvente Opaca [kWh]	307,8	769,5
Ganhos Infiltração [kWh]	0,0	448,4
Perdas Envidraçados [kWh]	682,5	417,4
Perdas Envolvente Opaca [kWh]	432,4	1613,2
Perdas Infiltração [kWh]	972,9	1634,8
Temperatura Interior Média [°C]	25,0	24,6

Os valores obtidos no *EnergyPlus* foram determinados tendo em conta um *timestep* diário para os 122 dias, respeitantes à estação convencional de arrefecimento. Para além desta diferença, o RCCTE não contabiliza ganhos directos por infiltração, pois considera que a temperatura interior é sempre superior à exterior.

Da análise dos anteriores resultados, procedeu-se para a simulação do efeito da temperatura interior variável, que garanta a temperatura de conforto “adaptativa”, proposta pela ASHRAE-55:2004 e EN15251:2007 mas respeitando o Índice PMV de Fanger.

5.1. Zona climática V1 – Ficheiro climático do Porto

5.1.1. Análise da variação da temperatura interior

No gráfico da Figura 5.1 observa-se a variação das temperaturas exteriores e interiores em regime de funcionamento livre, na habitação em estudo considerando uma renovação horária ($1,0 \text{ Rph}^{-1}$), imposta pelo projecto realizado através do RCCTE.

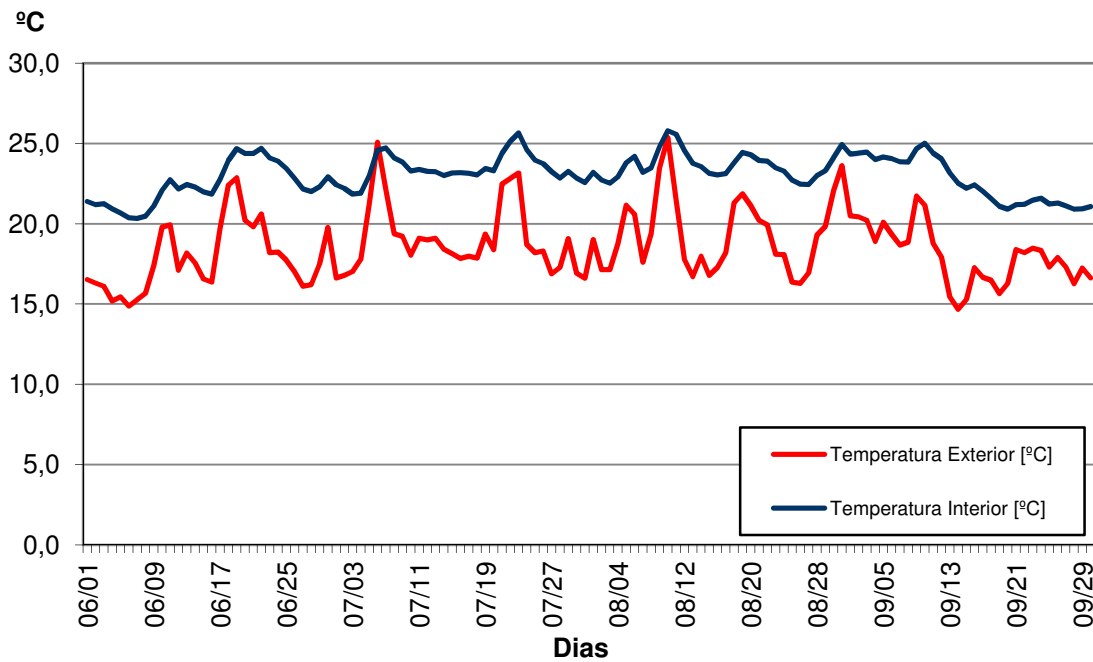


Fig. 5.1 - Evolução da temperatura média diária

A temperatura média diária exterior e interior foram, respectivamente, de $18,6^\circ\text{C}$ e $23,0^\circ\text{C}$, sendo a temperatura média diária exterior máxima de $25,4^\circ\text{C}$ ocorrida no dia 10 de Agosto. Na Figura 5.2 é possível observar-se detalhadamente a evolução dos valores horários das temperaturas interior e exterior entre a semana de 5 e 11 de Agosto. Optou-se por simular as temperaturas na anterior semana, pois foi uma das mais quentes, segundo o ficheiro climático proposto pelo INETI.

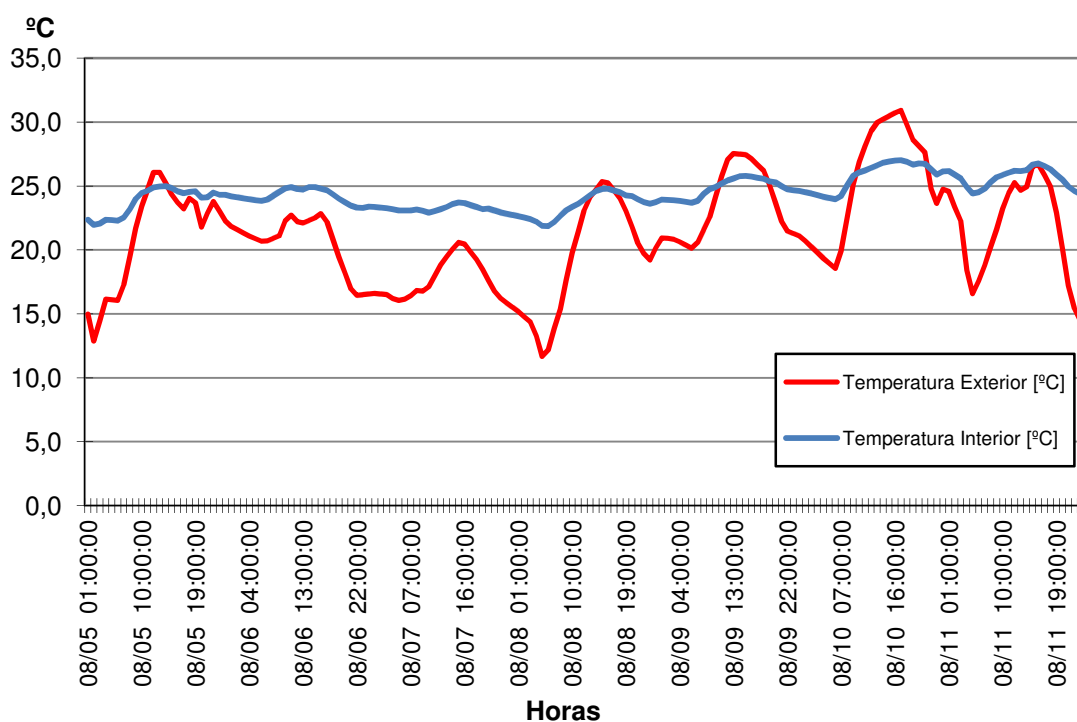


Fig. 5.2 - Evolução da temperatura média diária na "semana crítica"

A temperatura interior em regime livre, durante esta semana, encontra-se entre 21,9°C e 27,0°C e no dia 10 de Agosto pelas 17h, regista-se a temperatura máxima exterior de 30,9°C.

Em ambos os gráficos, é possível verificar-se os elevados gradientes térmicos e o efeito da inércia térmica do edifício.

Após a análise do comportamento térmico em regime livre, procedeu-se à calibração do *software* para as temperaturas de conforto máximo, em cada uma das metodologias aplicadas. Os resultados são os demonstrados no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Comparativo das temperaturas médias diárias [°C]

Estação	Te	Ti	Tc		
	Regime Livre	RCCTE	ASHRAE 55	EN 15251	
Junho	17,8	22,4	22,4	22,4	24,9
Julho	19,0	23,4	23,3	23,4	25,4
Agosto	19,4	23,7	23,5	23,6	25,5
Setembro	18,0	22,6	22,5	22,7	25,0
VERÃO	18,6	23,0	22,9	23,0	25,2

Desta análise, verifica-se que a temperatura de conforto média diária pelo RCCTE e ASHRAE-55, converge para a média da temperatura interior em regime livre. A utilização do algoritmo de conforto adaptativo (ACA) da norma EN 15251 revela resultados superiores às restantes metodologias.

De forma a melhor analisar o comportamento da temperatura de conforto, considerou-se o dia mais quente do ano. Fixando-se os respectivos intervalos de conforto de $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 3^{\circ}\text{C}$ para as normas ASHRAE-55 e EN 15251. Os resultados são os indicados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Limites das temperaturas interiores de conforto

Temperatura [°C]	RCCTE	ASHRAE-55	EN 15251
Tc-Li	x	21,3	24,8
Tc	25	23,8	27,8
Tc-Ls	x	26,3	30,8

Da análise do gráfico da Figura 5.3 para o dia mais quente, observa-se que o intervalo das temperaturas de conforto indexadas pelo estudo SCATs e adoptado pela EN 15251, permitem o acompanhamento das temperaturas em regime de funcionamento livre, uma vez que a temperatura interior máxima registada em regime livre é de $28,0^{\circ}\text{C}$ e portanto inferior ao limite superior da temperatura de conforto de $30,8^{\circ}\text{C}$, proposta pelo estudo SCATs.

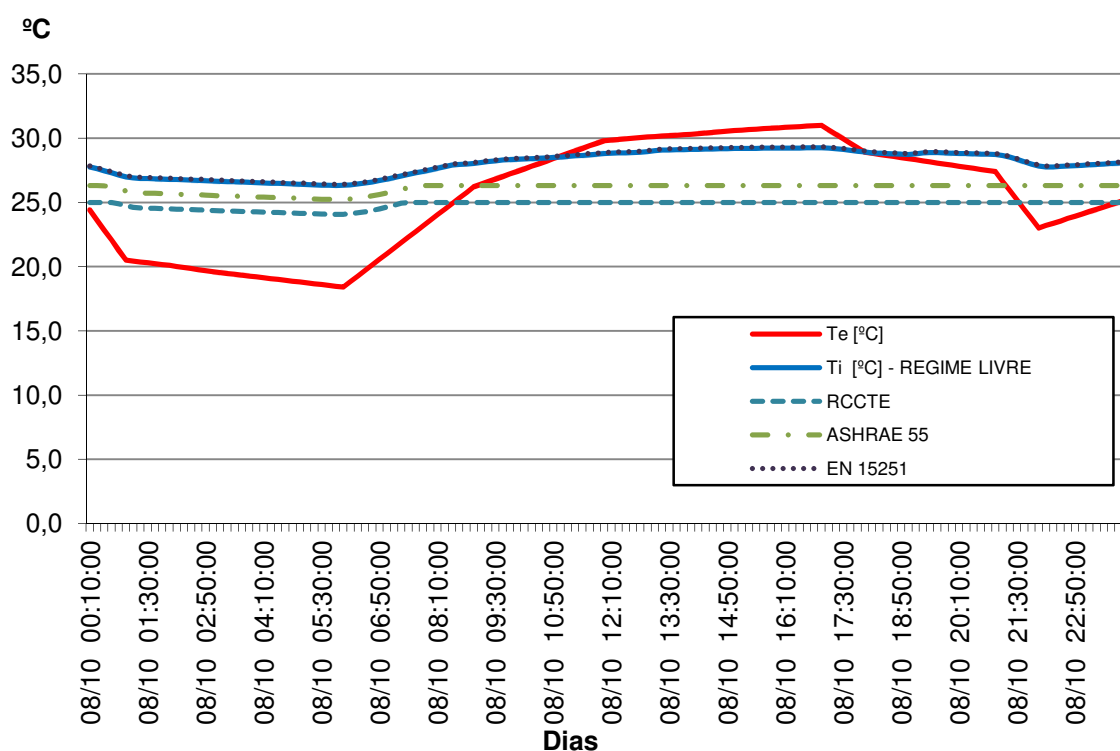


Fig. 5.3 - Evolução da temperatura diária máxima

Verifica-se também que tanto o RCCTE como a norma ASHRAE-55 obriga a um arrefecimento na maior parte do dia.

5.1.2. Análise das necessidades energéticas

Considerando as temperaturas interiores de conforto, os gráficos das figuras que se seguem permitem uma comparação das necessidades energéticas, face à evolução da temperatura exterior da estação convencional de arrefecimento da cidade do Porto.

Apesar do método proposto pelo estudo SCATs/EN 15251, considerar o cálculo da temperatura de conforto com base na temperatura média exterior diária, foi considerado neste sub-capítulo, a média mensal da temperatura exterior. Esta opção deve-se ao facto do programa *EnergyPlus* não permitir a introdução de temperaturas de conforto directamente dependentes da temperatura exterior. Uma hipótese para contornar esta limitação, seria efectuar a simulação dia-a-dia, o que se revela pouco prático, uma vez que seria necessária a simulação diária de 122 dias para cada zona climática. O Quadro 5.4 indica os intervalos de temperatura de conforto considerando então esta limitação.

Quadro 5.4 - Limites de temperatura de conforto médio mensal [°C]

Estação	Regime Livre		RCCTE	ASHRAE-55			EN 15251		
	Te	Ti	Tc	Tc-Li	Tc	Tc-Le	Tc-Li	Tc	Tc-Le
Junho	19,8	24,0	25	21,4	23,9	26,4	22,7	25,7	28,7
Julho	22,7	27,4		22,3	24,8	27,3	23,8	26,6	29,8
Agosto	23,0	27,5		22,4	24,9	27,4	23,9	26,9	29,9
Setembro	22,0	26,9		22,1	24,6	27,1	23,5	26,5	29,5



Fig. 5.4 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o RCCTE

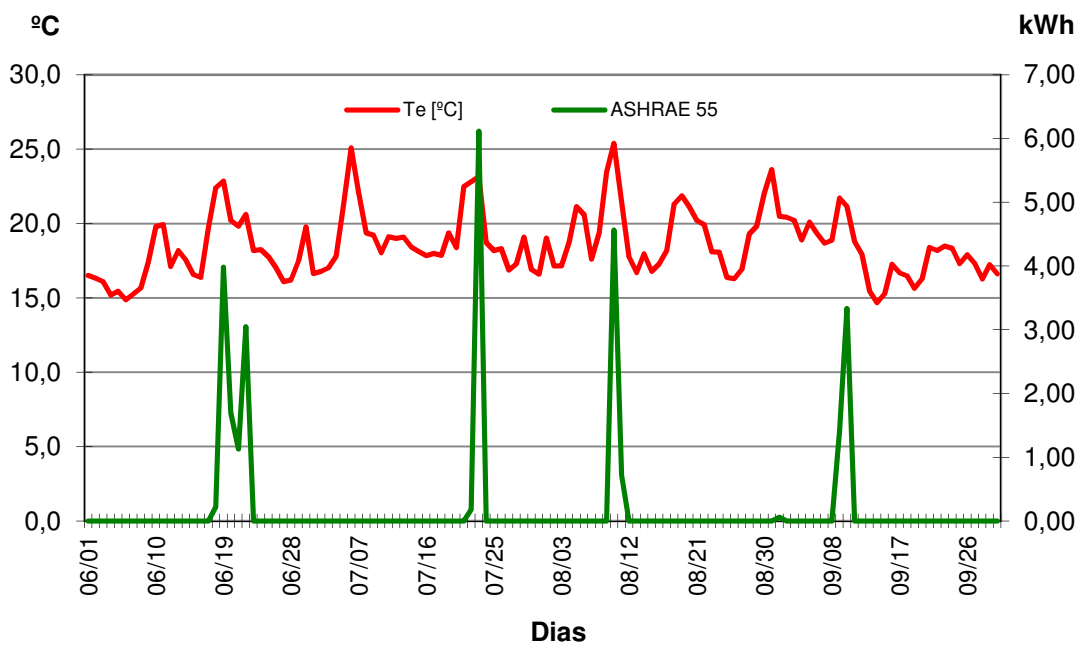


Fig. 5.5 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a ASHRAE 55:2004

O gráfico baseado no método de SCATs não se encontra apresentado, uma vez que as temperaturas interiores médias mensais em regime de funcionamento livre são sempre inferiores ao limite de temperatura de conforto máximo deste método, o que revela a ausência de necessidades de arrefecimento.

O algoritmo de conforto adaptativo proposto pela ASHRAE-55 : 2004, apresenta um pico de 6,12 kWh, no dia 23 de Julho. O RCCTE apresenta um consumo máximo de energia de 17,07 kWh,

ocorrido no dia 10 de Agosto que representa também, como já anteriormente referido, o dia com maior temperatura média diária exterior.

A Figura 5.6 resume as necessidades de arrefecimento no Porto, para a estação convencional de arrefecimento.

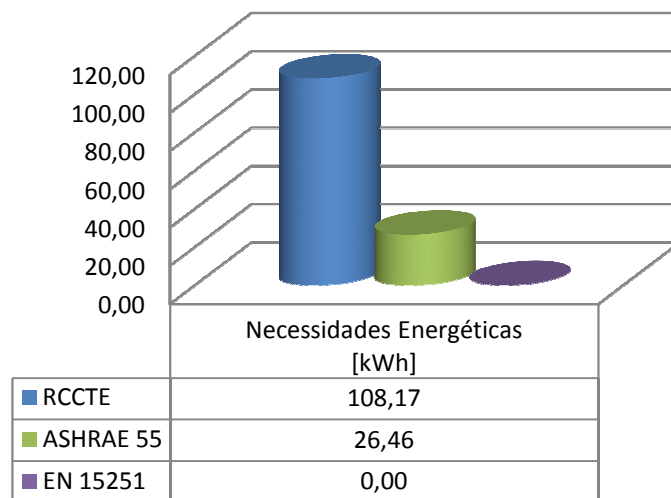


Fig. 5.6 - Resumo das necessidades energéticas

Verifica-se que a discrepância entre consumos é significativa. Considerando o consumo energético requerido pelo RCCTE, é possível uma redução de 75,5% se utilizado em alternativa o ACA da norma ASHRAE.55:2004 ou mesmo de 100% caso se considere os intervalos de conforto do estudo SCATs/EN 15251.

5.1.3. Índices e estratégias de conforto térmico

Considerando o potencial do algoritmo de conforto adaptativo para Portugal, proposto pelo estudo SCATs/EN 15251, no presente sub-capítulo pretende-se analisar, com o auxílio do índice PMV proposto por Fanger e pela PPD da norma EN ISO 7730, o conforto térmico no dia mais quente do ano, no Porto (10 de Agosto).

O gráfico da Figura 5.7, mostra a temperatura interior em regime livre, uma vez que para o presente dia, o estudo SCATs fixa uma temperatura de conforto de 27,8°C, e um intervalo entre 24,8 e 30,8°C.

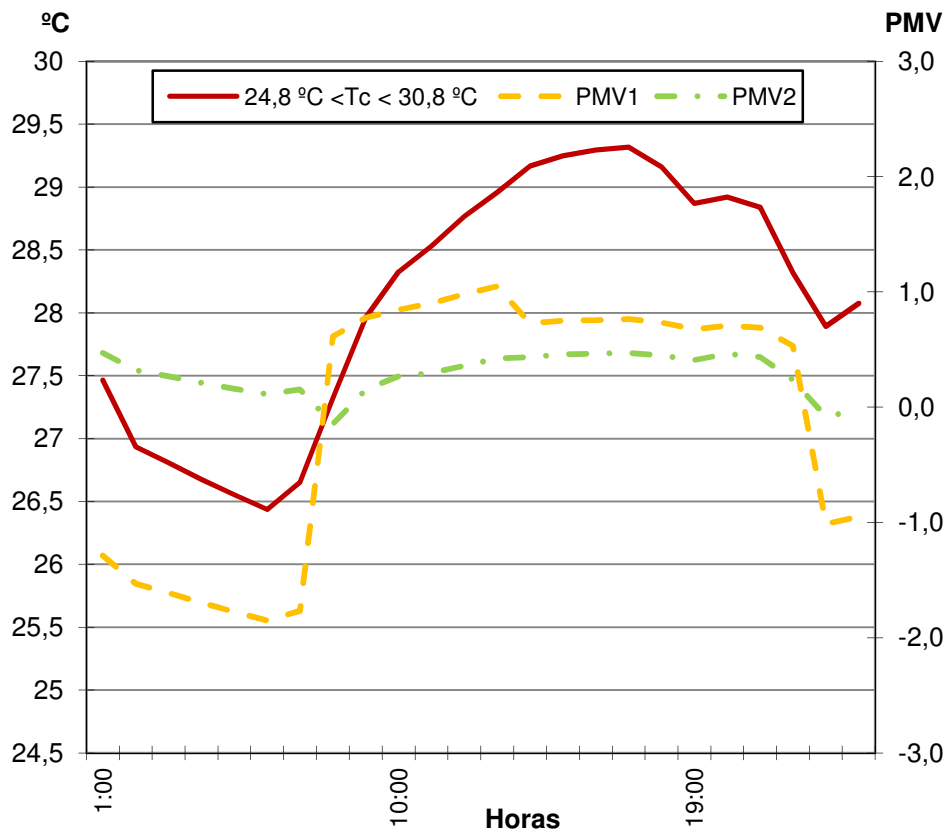


Fig. 5.7 - Temperatura de conforto e índices PMV

Com o auxílio do programa *EnergyPlus*, retirou-se o índice PMV para o intervalo de temperatura anteriormente descrita, resultando em valores de PMV entre -1,9 e +1,0, considerando um isolamento do vestuário de 0,5 clo e uma velocidade do ar de 0,5 m/s. Estes valores correspondem na legenda do gráfico ao PMV1.

De forma a respeitar o PPD de 10% proposta pela norma EN ISO 7730, considerou-se para este efeito, uma estratégia de alteração do vestuário ao longo das 24 horas. O horário introduzido no *software* foi o seguinte:

- Até às 7h – 1,5 clo;
- Entre as 7h e as 13h – 0,3 clo;
- Entre as 13h e as 22h – 0,5 clo;
- Até às 24h – 1,0 clo.

Com esta simulação, pretende-se verificar de que forma é possível respeitar o método “universal” de Fanger, utilizando as novas metodologias de conforto térmico. Conclui-se que para a cidade do Porto, PPD nunca excedeu os 10%, ou seja todos os valores de PMV encontram-se no intervalo estabelecido ($PMV = \pm 0,5$ clo). Os valores são os indicados em PMV2.

5.2. Zona climática V2 – Ficheiro climático de Lisboa

5.2.1. Análise da variação da temperatura interior

No gráfico da Figura 5.8 observa-se a variação das temperaturas exteriores e interiores em regime de funcionamento livre, na habitação em estudo, considerando uma renovação horária (1,0 Rph⁻¹), imposta pelo projecto realizado através do RCCTE.

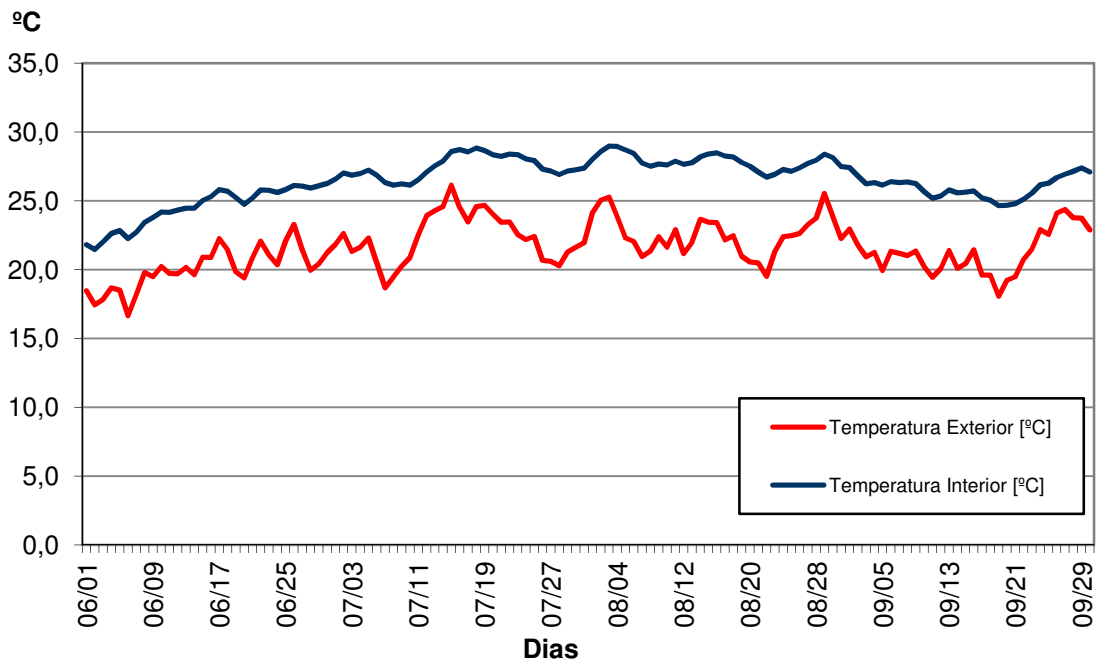


Fig. 5.8 - Evolução da temperatura média diária

Da análise do mesmo gráfico, verifica-se que a temperatura média diária no interior da habitação é sempre superior à temperatura média mensal exterior. As temperaturas exteriores e interiores médias diárias, ao longo da estação de arrefecimento foram, respectivamente, 21,6°C e 26,5°C, sendo a temperatura exterior média diária máxima de 26,1°C ocorrida no dia 15 de Julho.

Na Figura 5.9, observar-se mais detalhadamente, a evolução dos valores horários da temperatura interior e exterior na semana mais quente de Lisboa (15 e 21 de Agosto). No dia 15 de Julho pelas 14h, regista-se a temperatura máxima exterior de 32,4°C.

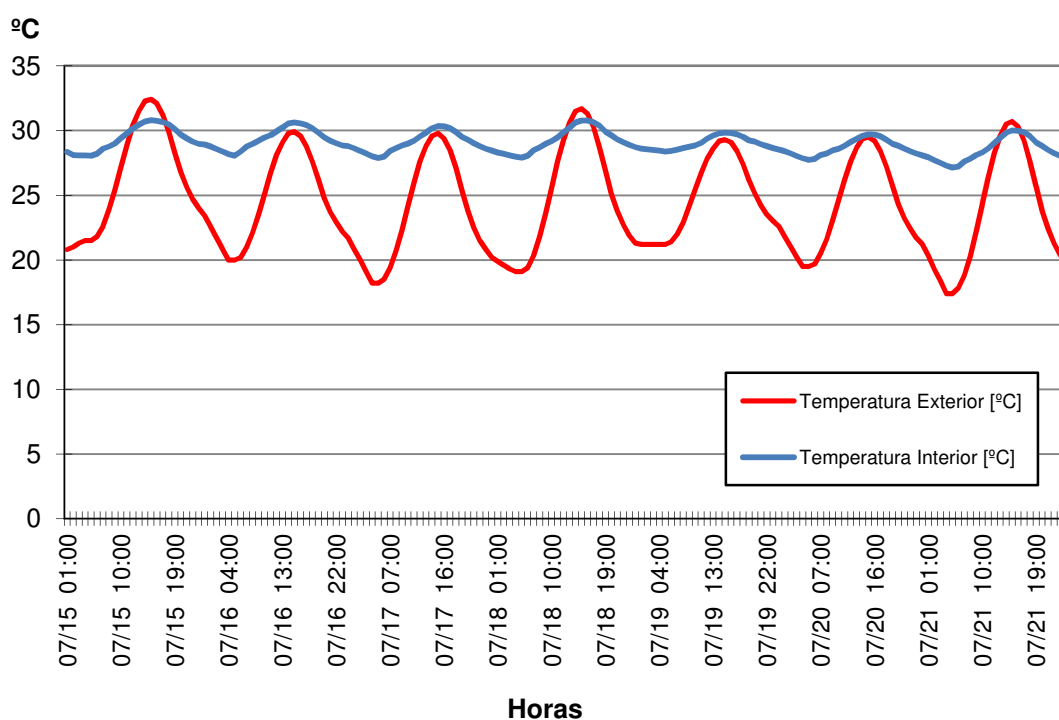


Fig. 5.9 - Evolução da temperatura média diária horária

A temperatura interior em regime livre, durante esta semana, encontra-se entre 27,1°C e 30,8°C, sendo que nos dias 15 e 18 de Julho observam-se “picos” máximos da temperatura exterior, que ultrapassam a temperatura interior. Devido ao efeito da inércia térmica, as temperaturas interiores mantêm-se relativamente constantes.

Tal como para o caso do Porto, procedeu-se à calibração do *software* para as temperaturas de conforto máximo para cada uma das metodologias aplicadas. Os resultados são os demonstrados no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 - Comparativo das temperaturas médias diárias [°C]

Estação	Te [°C]	Ti [°C]	Tc [°C]		
	Regime Livre	RCCTE	ASHRAE 55	EN 15251	
Junho	20,1	24,5	24,0	24,5	24,9
Julho	22,3	27,5	24,8	26,5	27,3
Agosto	22,6	27,9	24,9	26,8	27,7
Setembro	21,3	26,0	24,6	25,3	25,5
VERÃO	21,6	26,5	24,6	25,8	26,4

Desta análise, verifica-se que as médias diárias da temperatura de conforto são sucessivamente, mais elevadas entre o RCCTE, ASHRAE-55 e EN 15251. Esta última, apresenta valores médios de temperaturas de conforto bastante próximas às temperaturas de regime livre, sendo a média da temperatura interior praticamente idêntica para a estação convencional de arrefecimento.

De forma a melhor analisar o comportamento das temperaturas de conforto, considerou-se o dia mais quente do ano, tendo sido fixado para o caso da norma ASHRAE-55 EN 15251 os intervalos de conforto variam respectivamente $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Quadro 5.6 - Limites das temperatura interiores de conforto [$^{\circ}\text{C}$]

Temperatura	RCCTE	ASHRAE-55	EN 15251
Tc-Li	x	22,2	25,1
Tc	25	24,7	28,1
Tc-Ls	x	27,2	31,1

Da análise do gráfico da Figura 5.10 para o dia mais quente, observa-se que o intervalo das temperaturas de conforto indexadas ao estudo SCATs e adoptado pela EN 15251, permitem o acompanhamento das temperaturas em regime de funcionamento livre, uma vez que a temperatura interior máxima registada em regime livre é $30,9^{\circ}\text{C}$ e portanto inferior ao limite superior da temperatura de conforto proposta pelo estudo SCATs.

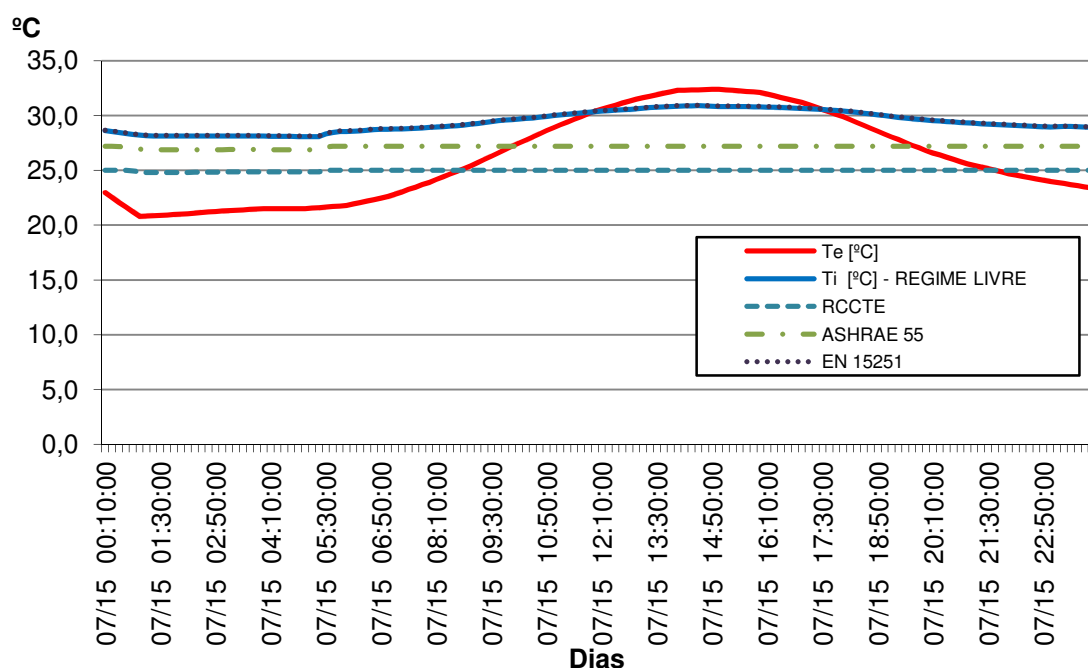


Fig. 5.10 - Evolução da temperatura diária máxima

5.2.2. Análise das necessidades energéticas

Considerando as temperaturas interiores de conforto, os gráficos das figuras que se seguem, permitem uma comparação das necessidades energéticas face à evolução da temperatura exterior da estação convencional de arrefecimento.

Tal como na simulação efectuada no ficheiro climático do Porto, considera-se neste sub-capítulo a média mensal da temperatura exterior. O Quadro 5.7 indica as temperaturas médias diárias em regime livre e os intervalos de temperatura de conforto mensais.

Quadro 5.7 - Limites de temperatura de conforto média mensal

[°C]	Regime Livre		RCCTE	ASHRAE-55			EN 15251		
Estação	Te	Ti	Tc	Tc-Li	Tc	Tc-Le	Tc-Li	Tc	Tc-Le
Junho	20,1	24,5		21,5	24	26,5	22,8	25,8	28,8
Julho	22,3	27,5	25	22,2	24,7	27,2	23,6	26,6	29,6
Agosto	22,6	27,9		22,3	24,8	27,3	23,7	26,7	29,7
Setembro	21,3	26		21,9	24,4	26,9	23,2	26,2	29,2

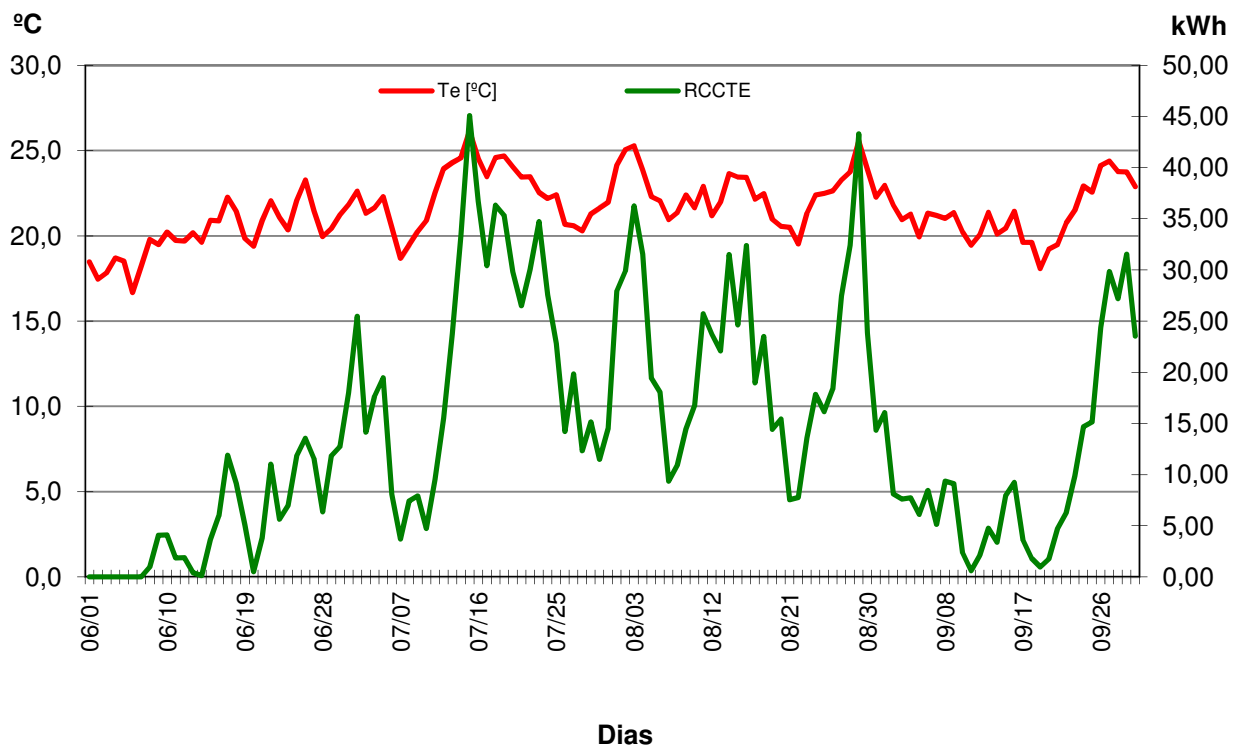


Fig. 5.11 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o RCCTE

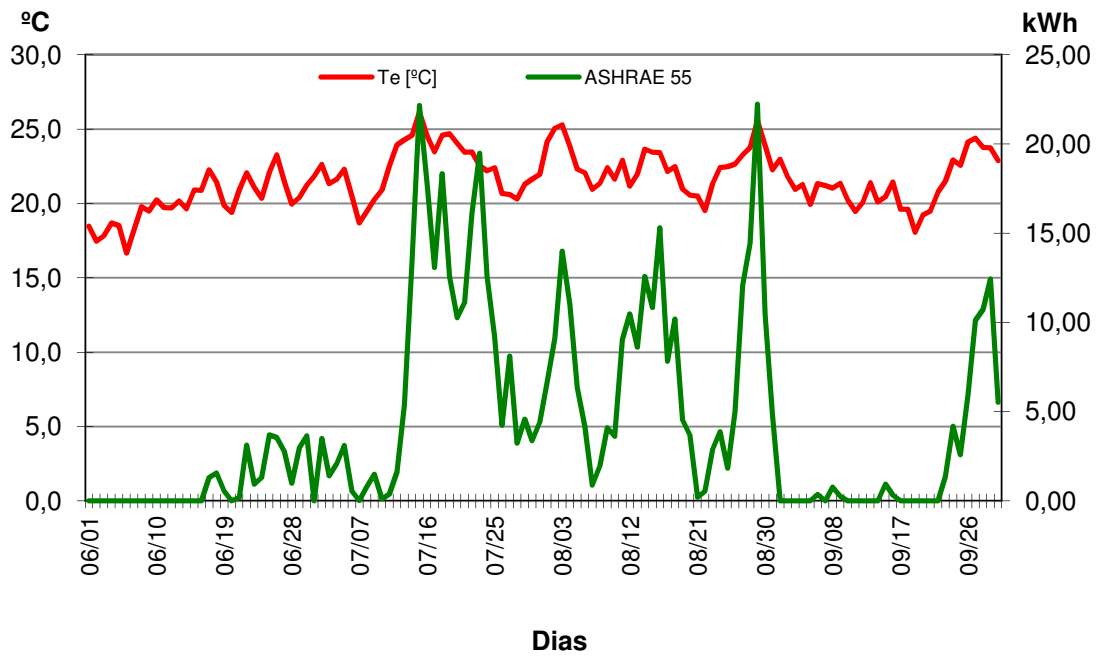


Fig. 5.12 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a ASHRAE-55:2004

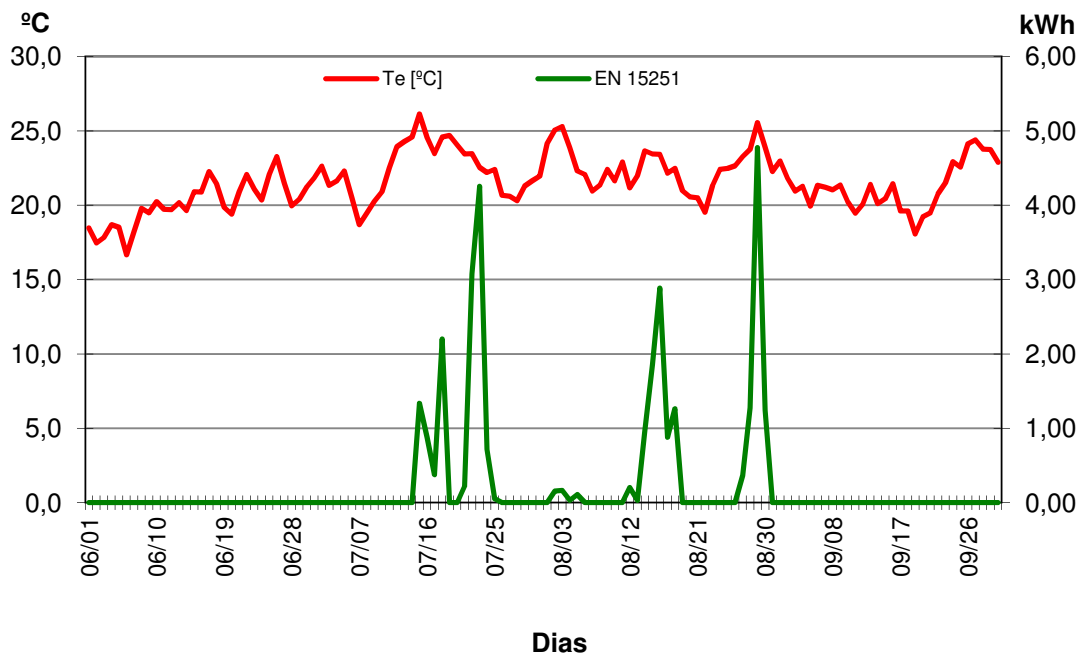


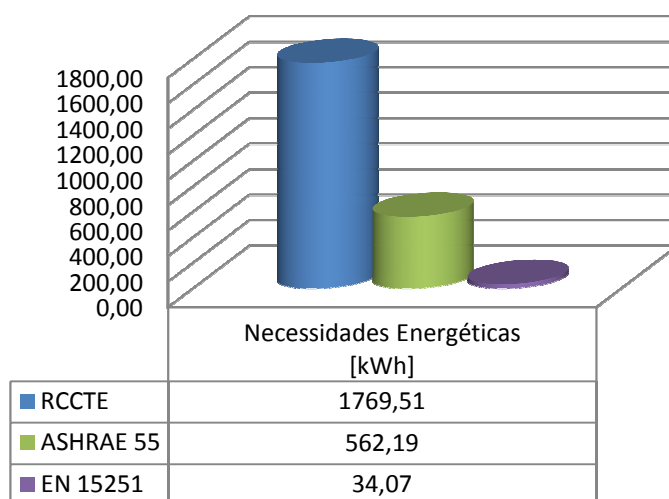
Fig. 5.13 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a EN 15251:2007

Analisando os três gráficos para as diferentes metodologias, o estudo SCATs/EN 15251 é o que apresenta menores necessidades de energia para arrefecimento da habitação, apresentando um pico de energia de 4,77 kWh, seguindo-se o algoritmo de conforto adaptativo proposto pela ASHRAE-55:2004, com um pico de 22,22 kWh. Ambas as metodologias apontam para um consumo energético

máximo no dia 29 de Agosto. Por fim, apresenta-se o RCCTE, com um consumo máximo de 45,08 kWh ocorrido no dia 15 de Julho, que representa também, como já anteriormente referido, o dia com maior temperatura média diária exterior.

O Quadro 5.8 resume as necessidades de arrefecimento em Lisboa, para a estação convencional de arrefecimento.

Quadro 5.8 - Resumo das necessidades energéticas



Verifica-se que a discrepância entre consumos é significativa. Considerando o consumo energético requerido pelo RCCTE, é possível uma redução de 69% se utilizado, em alternativa, o ACA da norma ASHRAE.55:2004 ou de 98,1% caso se considere os intervalos de conforto do estudo SCATs/EN 15251.

5.2.3. Índices e estratégias de conforto térmico

No presente sub-capítulo pretende-se verificar com o auxílio do índice PMV proposto por Fanger e pela PPD da norma EN ISO 7730, o conforto térmico no dia mais quente do ano, em Lisboa (15 de Julho).

O gráfico da Figura 5.14, mostra a temperatura interior em regime livre, uma vez que para o presente dia, o estudo SCATs fixa uma temperatura de conforto de 28,1°C, e um intervalo entre 25,1 e 31,1°C.

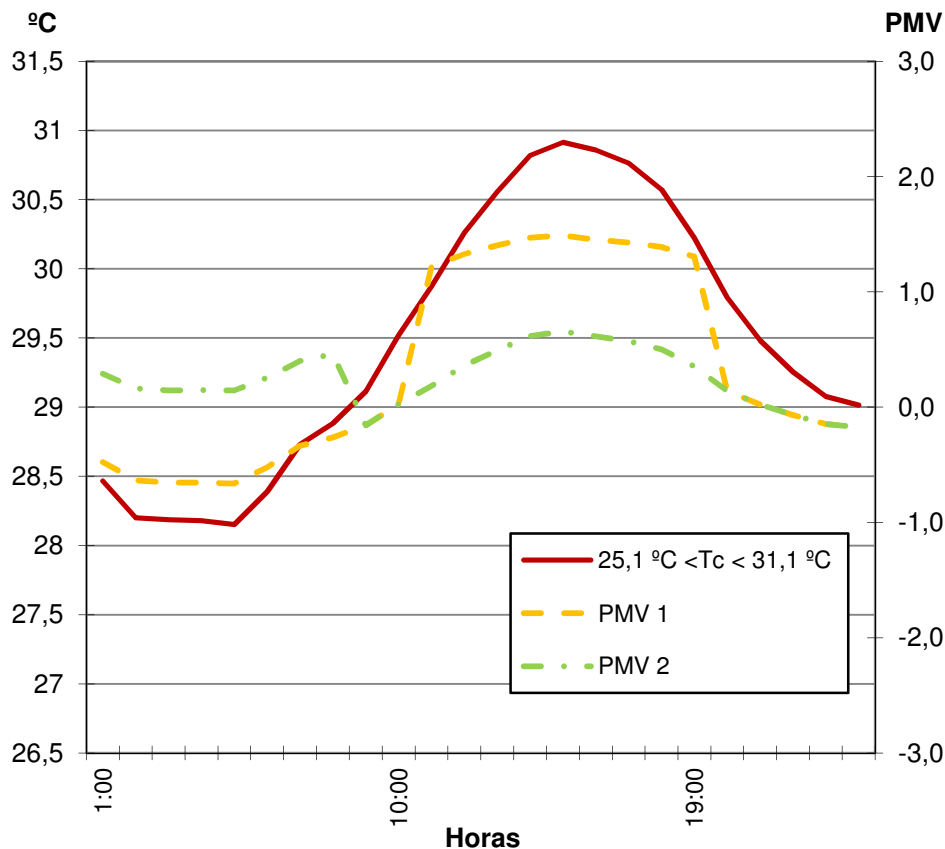


Fig. 5.14 - Temperatura de conforto e índices PMV

Com o auxílio do programa *EnergyPlus*, retirou-se o índice PMV para o intervalo de temperatura anteriormente descrita, resultando em dois períodos de desconforto – entre as 2h e as 5h com $PMV \approx -0,7$ e entre as 11h e as 19h com $PMV \approx +1,4$ – utilizando um vestuário considerado típico para o Verão de 0,5 clo. Estes valores correspondem na legenda do gráfico ao PMV1.

De forma a respeitar o PPD de 10%, proposta pela norma EN ISO 7730, considerou-se para este efeito uma estratégia de alteração do vestuário ao longo das 24 horas. O horário introduzido no *software* foi o que se segue:

- Até às 8h – 0,8 clo;
- Entre as 8h e as 10h – 0,5 clo;
- Entre as 10h e as 19h – 0,1 clo;
- Até às 24h – 0,5 clo.

Com esta hipótese o período do dia em que o PPD foi superior a 10%, encontra-se entre as 14h e as 17h com valores médios de $PMV = 0,6$, resultando num PPD de 13%, tal como observado no andamento da curva PMV2.

5.3. Zona climática V3 – Ficheiro climático de Évora

5.3.1. Análise da variação da temperatura interior

Na Figura 5.15 observa-se o andamento das temperaturas exteriores e interiores em regime de funcionamento livre.

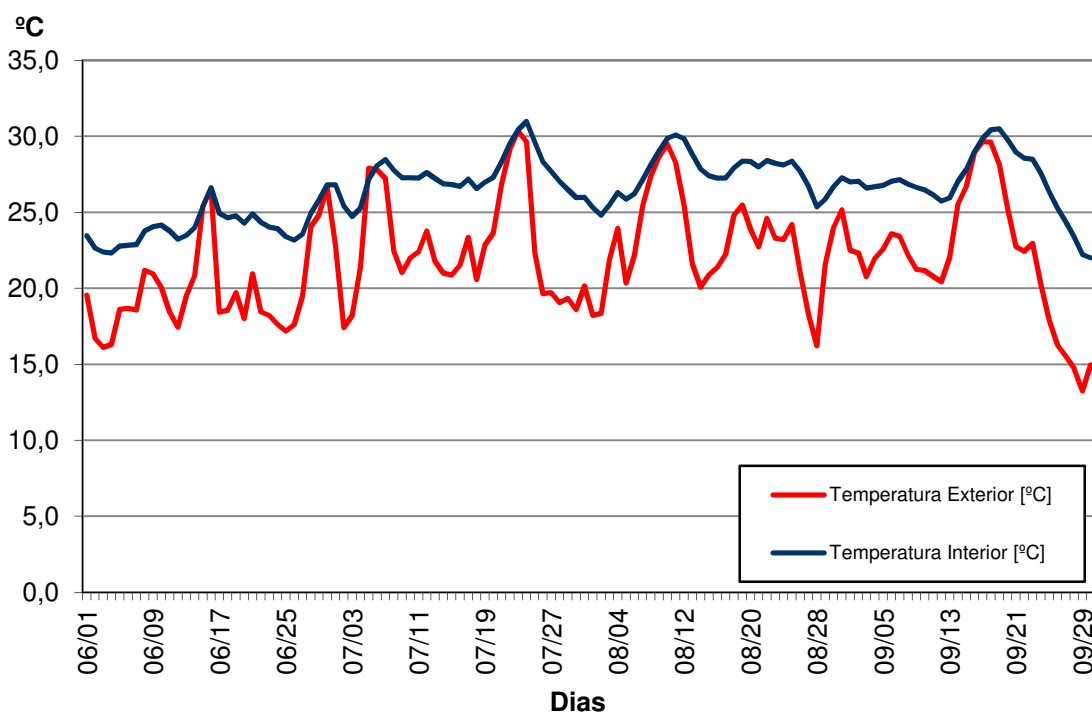


Fig. 5.15 - Evolução da temperatura média diária

A temperatura exterior e interior média diária ao longo da estação de arrefecimento foram, respectivamente, de 21,9°C e 26,5°C, sendo a temperatura exterior média diária máxima de 30,3°C, ocorrida no dia 23 de Julho. Na figura seguinte é possível observar-se mais detalhadamente a evolução dos valores horários das temperaturas interior e exterior na semana mais quente que ocorreu entre os dias 19 e 25 de Agosto. No dia 23 de Julho pelas 16h, regista-se a temperatura máxima exterior de 38,3°C.

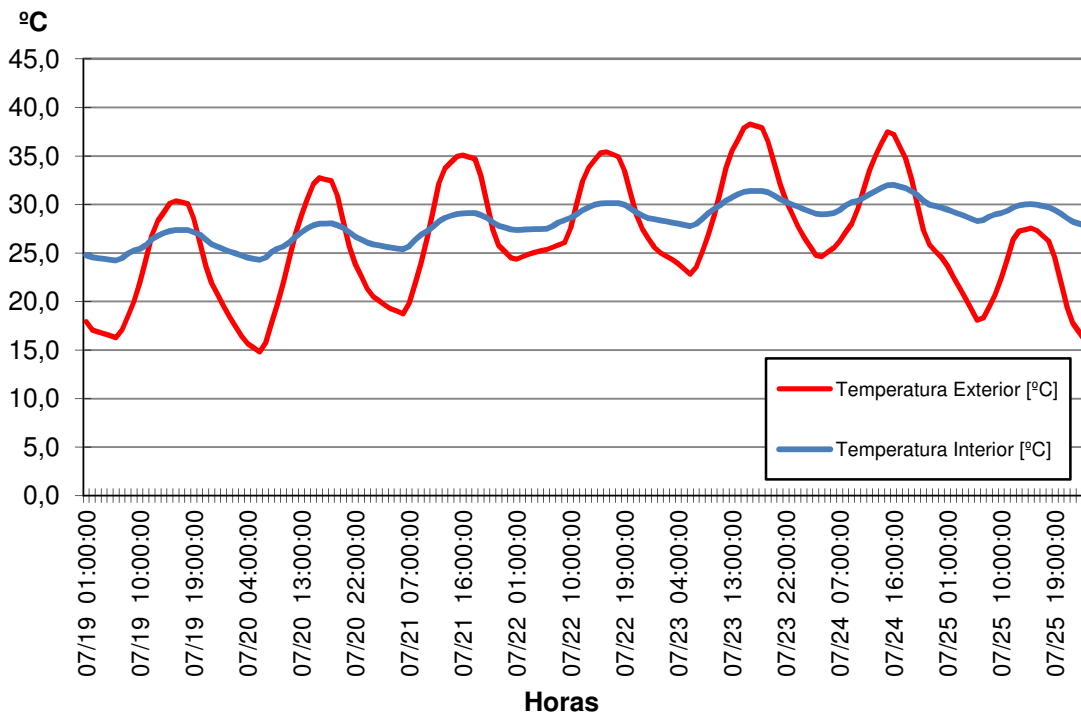


Fig. 5.16 - Evolução da temperatura média diária na "semana crítica"

A temperatura interior em regime livre, durante a presente semana, encontra-se entre 24,2°C e 32,0°C. Devido às grandes variações térmicas, pode-se observar o efeito da inércia térmica quando a temperatura exterior ultrapassa a interior.

Após a análise do comportamento térmico da habitação em regime de funcionamento livre, procedeu-se à introdução de intervalos de temperaturas de conforto utilizando a norma ASHRAE-55 2004 e a norma europeia EN 15251:2007 e da fixação da temperatura de conforto de 25°C do RCCTE (Quadro 5.9).

Quadro 5.9 - Comparativo das temperaturas médias diárias [°C]

Estação	Te	Ti	Tc		
	Regime Livre	RCCTE	ASHRAE 55	EN 15251	
Junho	19,8	24,0	23,7	26,3	24,2
Julho	22,7	27,4	24,8	26,4	27,3
Agosto	23,0	27,5	24,7	26,4	27,4
Setembro	22,0	26,9	24,4	26,1	27,0
VERÃO	21,9	26,5	24,4	26,3	26,5

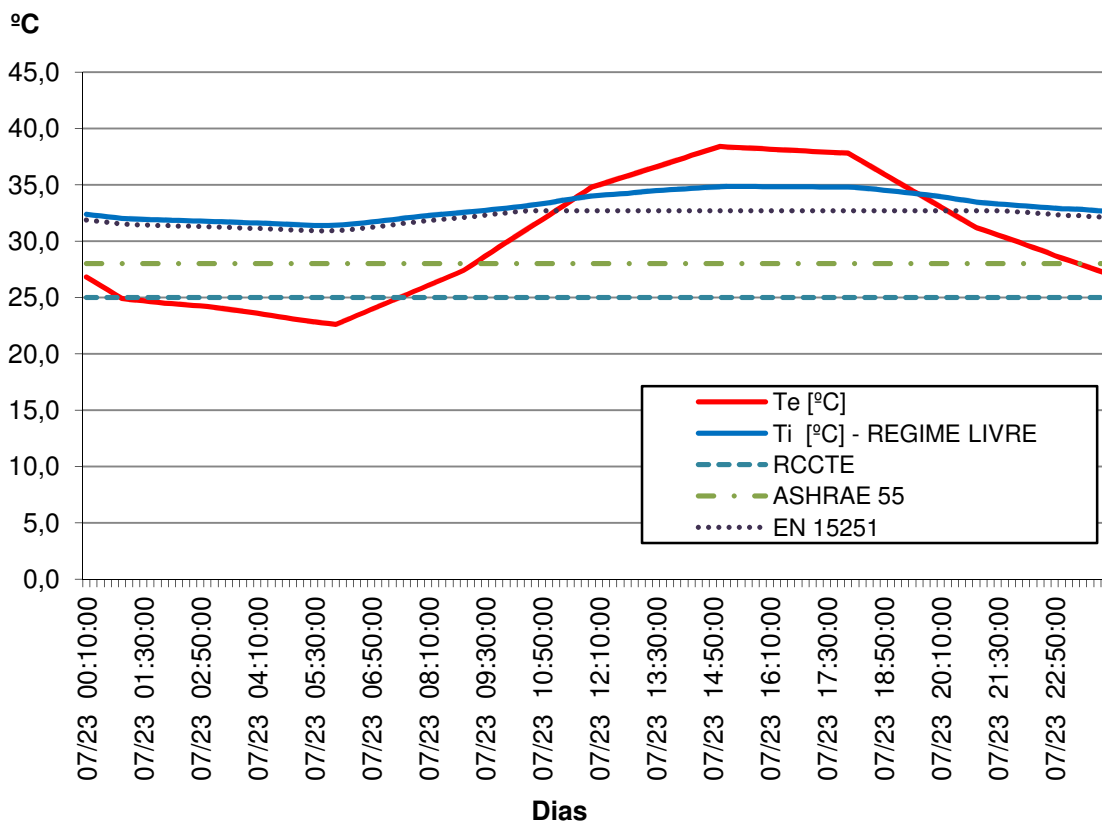
Mais uma vez, a metodologia proposta pelo estudo SCATs/EN 15251 é a que mais se aproxima da temperatura interior média em regime livre.

De forma a melhor analisar o comportamento das temperaturas, considerou-se o dia mais quente do ano, tendo sido fixado os intervalos de conforto de $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 3^{\circ}\text{C}$, respectivamente, para a norma ASHRAE-55 e EN 15251 os intervalos de conforto que variam respectivamente $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Quadro 5.10 - Limites das temperaturas interiores de conforto

Temperatura [°C]	RCCTE	ASHRAE-55	EN 15251
Tc-Li	x	23,8	27,7
Tc	25	26,8	29,7
Tc-Ls	x	29,8	32,7

Da análise do gráfico da Figura 5.17 para o dia mais quente, observa-se que o intervalo das temperaturas de conforto indexadas pelo estudo SCATs e adoptado pela EN 15251 não permitem o acompanhamento das temperaturas em regime de funcionamento livre. Este facto deve-se à temperatura interior máxima diária registada em regime livre ser de $34,9^{\circ}\text{C}$.



5.17 - Evolução da temperatura diária máxima

Fig.

O período mínimo em que se torna necessário o arrefecimento mecânico da habitação encontra-se entre as 10h30 e as 21h40.

5.3.2. Análise das necessidades energéticas

Considerando as temperaturas interiores de conforto, os gráficos das figuras que se seguem, permitem uma comparação das necessidades energéticas face à evolução da temperatura exterior da estação convencional de arrefecimento.

O Quadro 5.11 indica os intervalos de temperatura de conforto considerando a média mensal, ao invés da média diária, pelas razões já explanadas.

Quadro 5.11 - Limites de temperatura de conforto médio mensal [°C]

Estação	Regime Livre		RCCTE	ASHRAE-55			EN 15251		
	Te	Ti	Tc	Tc-Li	Tc	Tc-Le	Tc-Li	Tc	Tc-Le
Junho	19,8	24,0		21,4	23,9	26,4	22,7	25,7	28,7
Julho	22,7	27,4	25	22,3	24,8	27,3	23,8	26,8	29,8
Agosto	23,0	27,5		22,4	24,9	27,4	23,9	26,9	29,9
Setembro	22,0	26,9		22,1	24,6	27,1	23,5	26,5	29,5

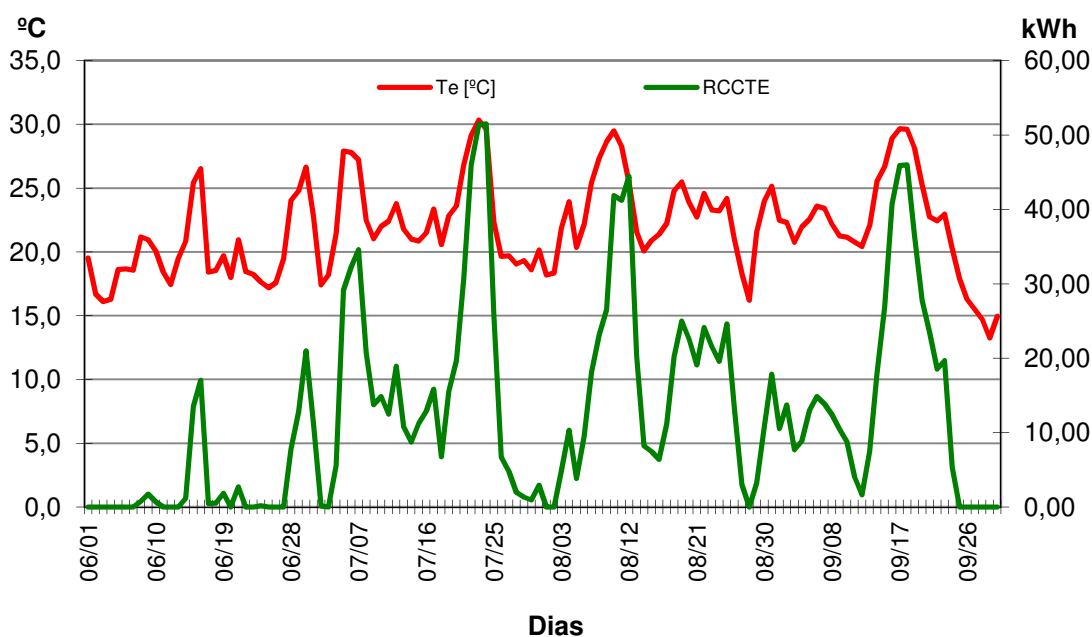


Fig. 5.18 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o RCCTE

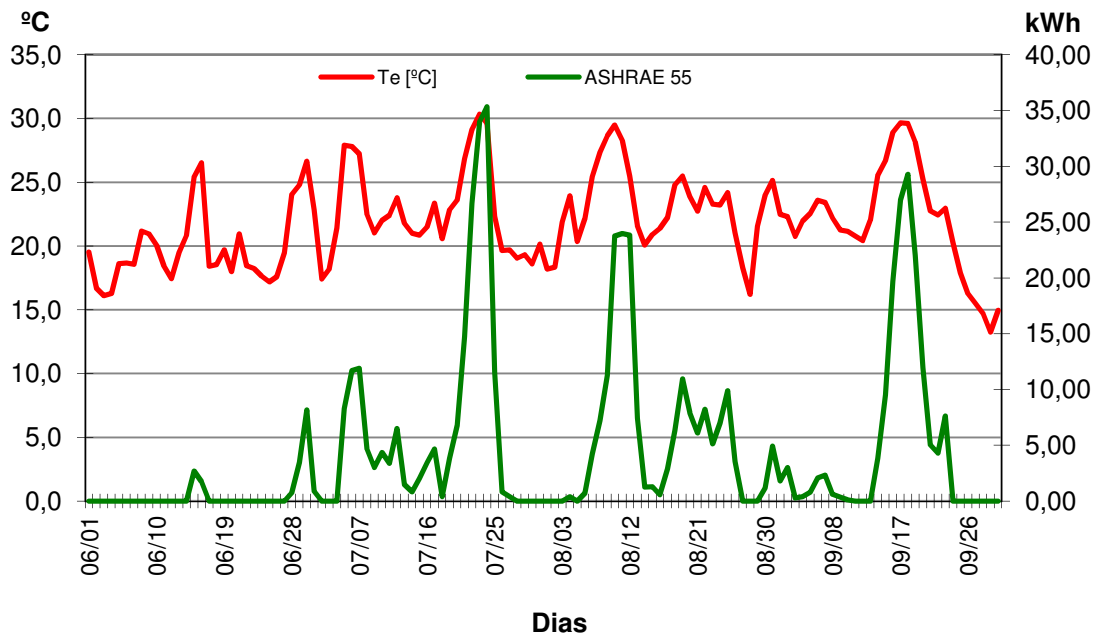


Fig. 5.19 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a ASHRAE-55:2004

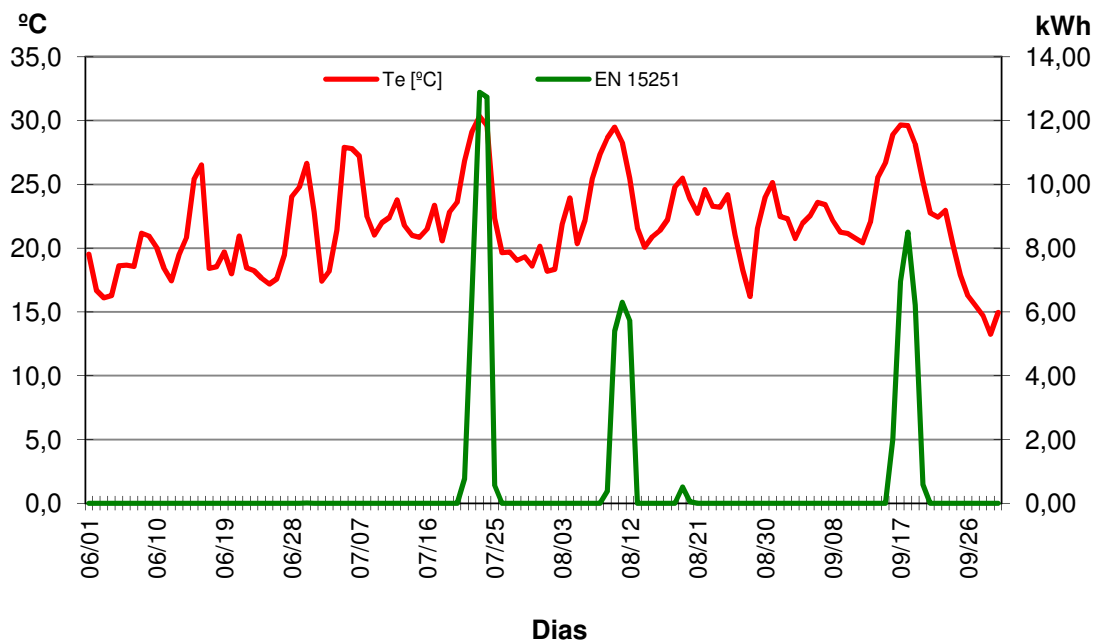


Fig. 5.20 - Temperatura exterior e necessidades energéticas segundo a EN 15251:2007

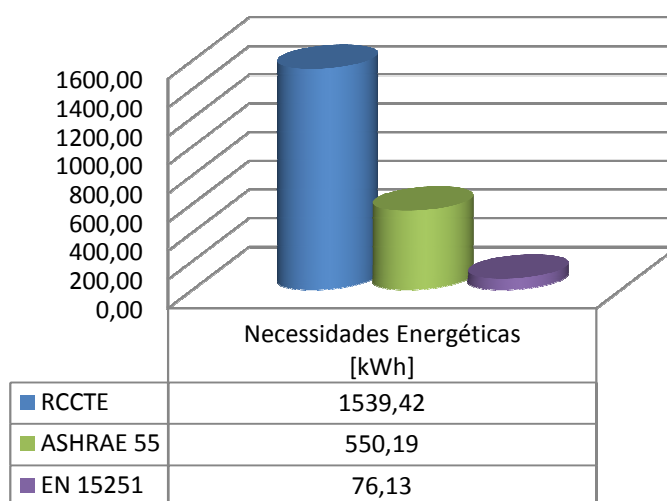
Analisando os gráficos para as diferentes metodologias, o estudo SCATs/EN 15251 é o que, mais uma vez, apresenta menores necessidades de energia para arrefecimento da habitação, apresentando um pico de energia de 12,88 kWh, ocorrido no dia correspondente ao mais quente do ano, 23 de Julho. Comparativamente, o algoritmo de conforto adaptativo proposto pela ASHRAE-55 : 2004, apresenta um pico de 35,34 kWh no dia 24 de Julho.

Por fim, o RCCTE com um consumo máximo de 51,47 kWh, ocorrido também no dia 24 de Julho, que representa também, como já anteriormente referido, o dia com maior temperatura média diária exterior.

Este facto deve-se aos dias 23 e 24 de Julho apresentarem temperaturas exteriores médias diárias bastante próximas, respectivamente 30,6°C e 29,6°C.

O Quadro 5.12 resume as necessidades de arrefecimento para Évora, para a estação convencional de arrefecimento.

Quadro 5.12 - Resumo das necessidades energéticas



Verifica-se, mais uma vez, que a discrepância entre consumos é significativa. Considerando o consumo energético requerido pelo RCCTE, é possível uma redução de 64,3% se utilizado em alternativa o ACA da norma ASHRAE.55:2004 ou de 95,1% caso se considere os intervalos de conforto do estudo SCATs/EN 15251.

5.3.3. Estratégias de arrefecimento passivo

Após se verificar na presente simulação de Évora, a necessidade de energia eléctrica que permita arrefecer a habitação nos dias mais quentes do ano, mesmo que para isso se utilize o estudo SCATs, este sub-capítulo vem introduzir a possibilidade de duas acções que poderão resultar numa diminuição do consumo.

O gráfico da Figura 5.21 indica os consumos energéticos para cada metodologia adoptada face à temperatura exterior. Os valores foram retirados, utilizando um *timestep* de 6 no programa, isto é, de 10 em 10 minutos.

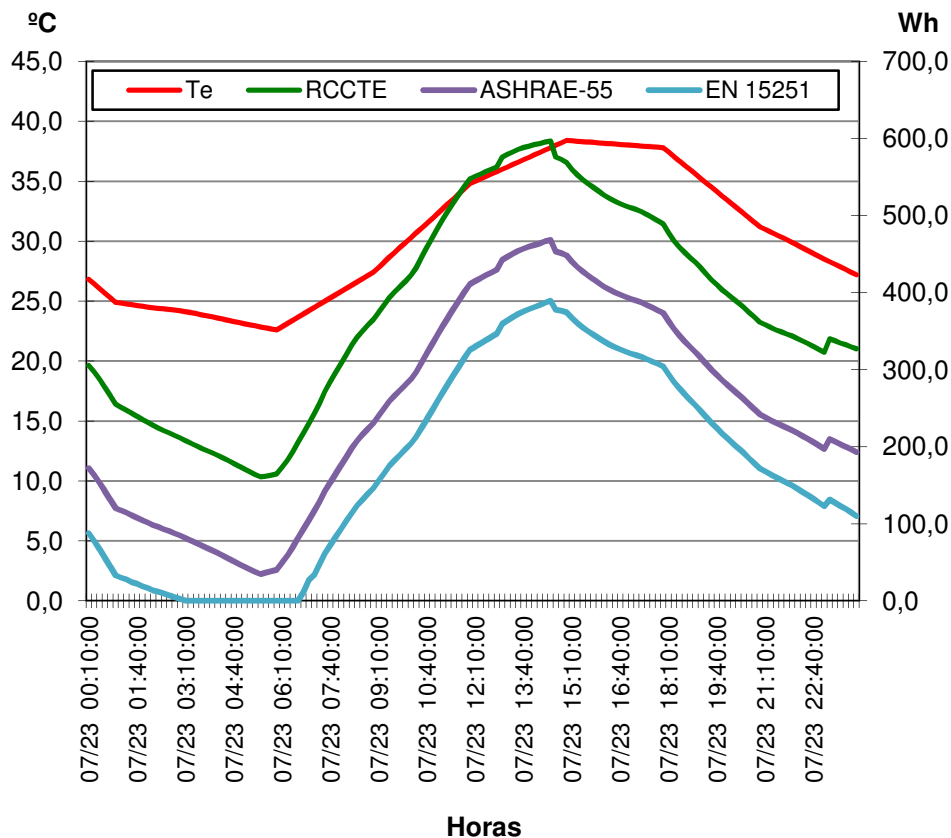


Fig. 5.21 - Evolução da temperatura exterior diária e necessidades energéticas

Observando a diminuição do consumo energético em ambas as metodologias, os dados extraídos do último gráfico, revelam que o algoritmo aplicado em Portugal proposto pela norma EN15251, permite a maior diminuição do consumo energético, opta-se então por dois tipos de estratégias de arrefecimento passivo.

A primeira hipótese, segue-se a estratégia de ventilação nocturna, que possa permitir uma média ponderada da renovação horária, idêntica ao estipulado pelo RCCTE ($R_{ph} = 1,0h^{-1}$) mas que apresente potencial para reduzir as necessidades energéticas de arrefecimento do presente caso de estudo. Para tal, considerou-se uma taxa mínima que garantisse a qualidade do ar entre as 8h e as 20h, quando as temperaturas exteriores são por norma mais elevadas, de $R_{ph} = 0,6 h^{-1}$. No período nocturno, a taxa de renovação de ar é de $1,4 h^{-1}$. Os resultados encontram-se na Figura 5.22.

De nodo a verificar qual a contribuição dos envidraçados na redução das necessidades energéticas, utilizou-se na segunda estratégia um vidro de pano duplo com caixa de ar de 12mm preenchida com argon, em todos os envidraçados da habitação. Ambos os panos apresentam um factor solar de 0,43 e um factor de transmissão luminosa de 0,77. O coeficiente de transmissão térmica é de $0,9 W/m^2 \cdot ^\circ C$.

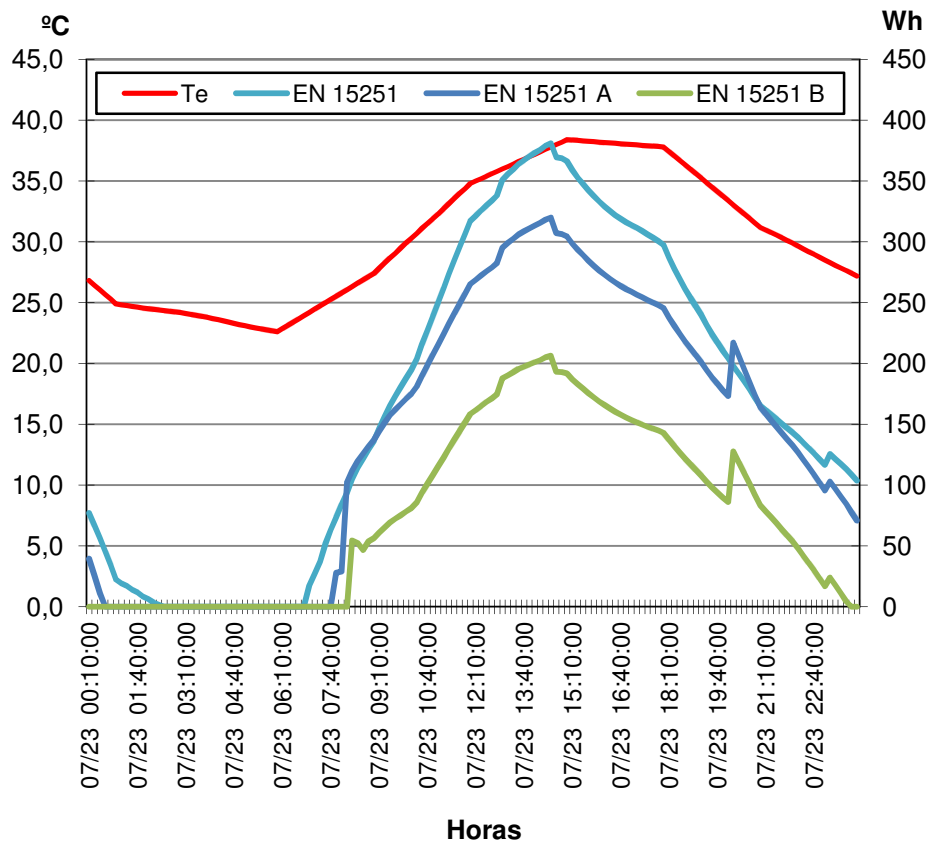


Fig. 5.22 - Evolução da temperatura exterior diária e necessidades energética

Em que:

Te – Temperatura exterior

EN 15251 – Consumo energético do estudo SCATs/EN 15251

EN 15251 A – Consumo energético do estudo SCATs/EN 15251 utilizando Rph variável

EN 15251 B – Consumo energético do estudo SCATs/EN 15251 utilizando Rph variável e envidraçados de baixa transmissão térmica.

Associando os envidraçados à ventilação variável, permitiu-se reduzir o consumo energético do dia mais quente. Utilizando estas três metodologias a redução foi respectivamente de 24,2 kWh do método inicial, para 20,3 kWh recorrendo-se à ventilação nocturna e de 11 kWh se se juntar a ventilação nocturna a vidros com bom comportamento térmico. Percentualmente, a poupança energética pode chegar aos 55%.

5.3.4. Índices e estratégias de conforto térmico

Considerando as potencialidades dos dois sistemas de arrefecimento passivo apresentado no sub-capítulo anterior, pretende-se determinar o índice de conforto. Mais uma vez o processo foi utilizar o índice PMV descarregado no *EnergyPlus*, considerando os diferentes *schedules* introduzidos.

O gráfico da Figura 5.2.3 representa o dia mais quente do ano registado no ficheiro climático de Évora (23 de Julho).

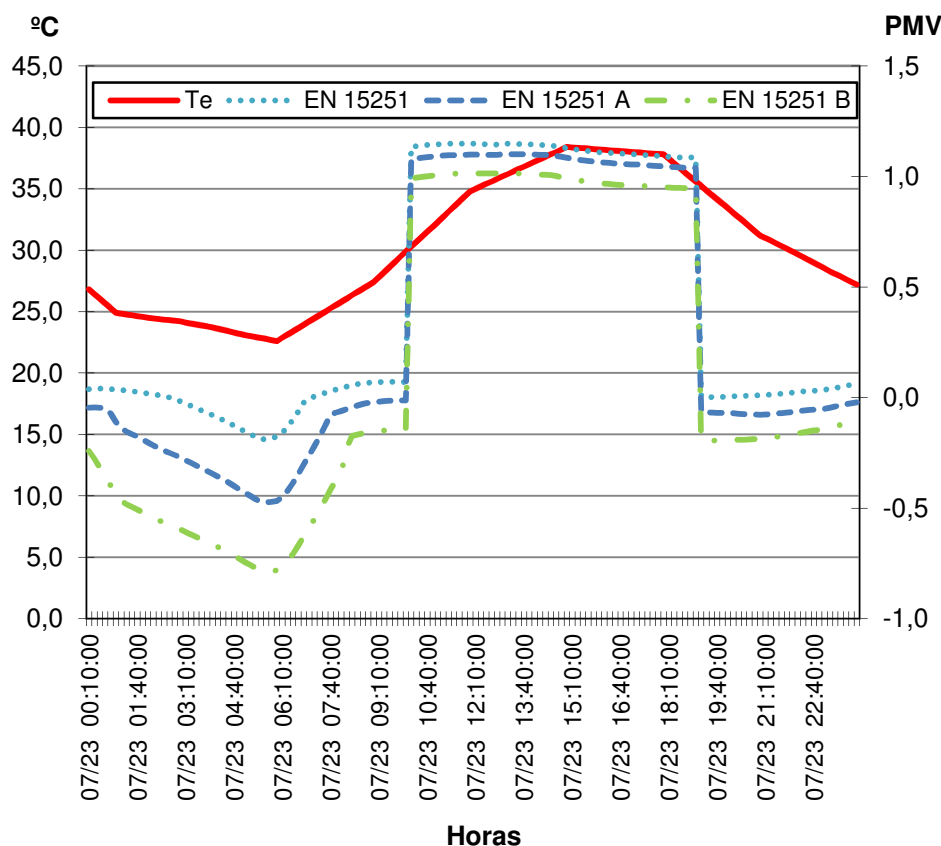


Fig. 5.23 - Temperatura exterior e índices PMV

Em que:

Te – Temperatura exterior

EN 15251 – Índice PMV do estudo SCATs/EN 15251

EN 15251 A – Índice PMV da Estratégia A

EN 15251 B – índice PMV da Estratégia B

Na simulação, foi considerada uma velocidade do ar de 0,5 m/s e um isolamento de vestuário de 0,5 clo, considerando também o intervalo de conforto de 26,7 °C a 32,7°C.

Verifica-se que o aumento da taxa de ventilação pode criar desconforto, se considerado o algoritmo proposto pelo estudo SCATs/EN 15251. Apesar de nenhum índice do gráfico se encontrar fora do

intervalo $PMV = \pm 1$, ou seja, ambiente ligeiramente frio ou quente, as médias de PMV para o presente dia foram para cada uma das estratégias, respectivamente $PMV = 0,4$, $PMV = 0,1$ e $PMV = 0,3$.

De forma a respeitar o PPD de 10% proposta pela norma EN ISO 7730 e conhecendo as temperaturas elevadas que se fazem sentir no dia simulado, considerou-se uma estratégia de diminuição do vestuário de 0,5 clo para um valor fixo de 0,1 clo durante o dia. A velocidade do ar para PMV1 mantiveram-se constantes e com uma velocidade de 0,5m/s, enquanto que em PMV2 e PMV3 fixaram-se velocidades distintas para o período das 7h às 22h, respectivamente 1,0 m/s e 2,0 m/s.

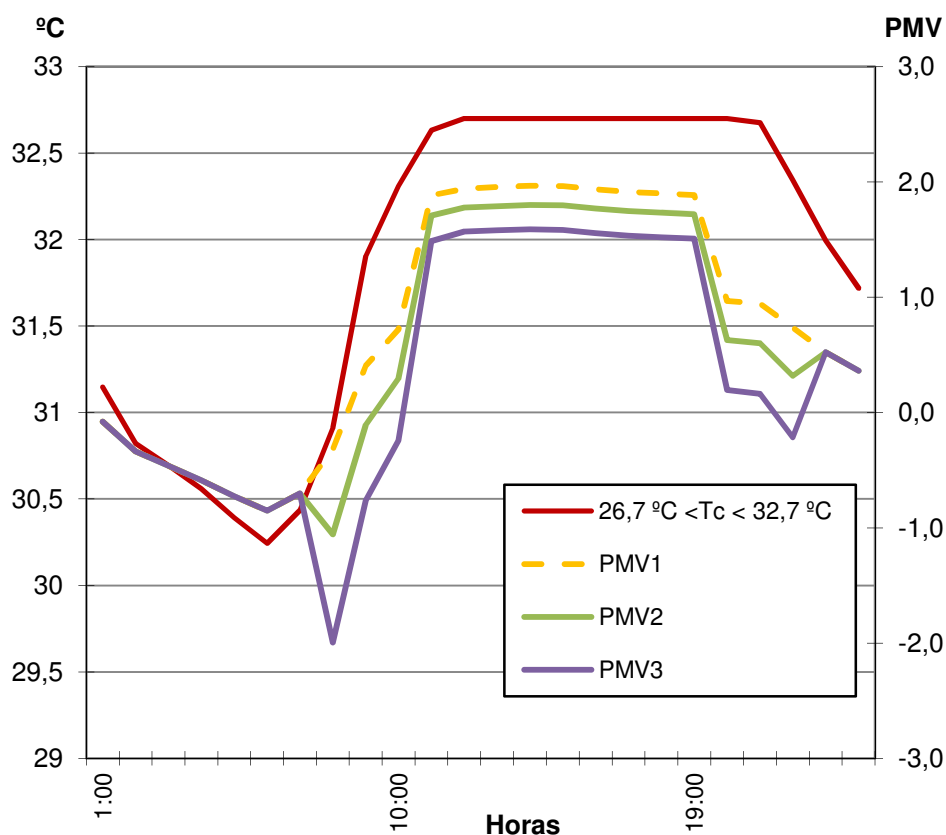


Fig. 5.24 – Limites de temperatura de conforto e índices PMV

Observando-se, no anterior gráfico, uma grande variação dos índices PMV1 e PMV2 para valores entre $PMV = \pm 2$, ou seja ambiente frio ou quente para o intervalo proposto pela EN 15251, que apresenta temperaturas entre 26,7°C e 32,7°C. Considerando os resultados do gráfico da anterior figura, propõe-se a fixação da temperatura interior máxima para a correspondente temperatura de conforto, T_c . Os resultados são os indicados no gráfico da próxima figura.

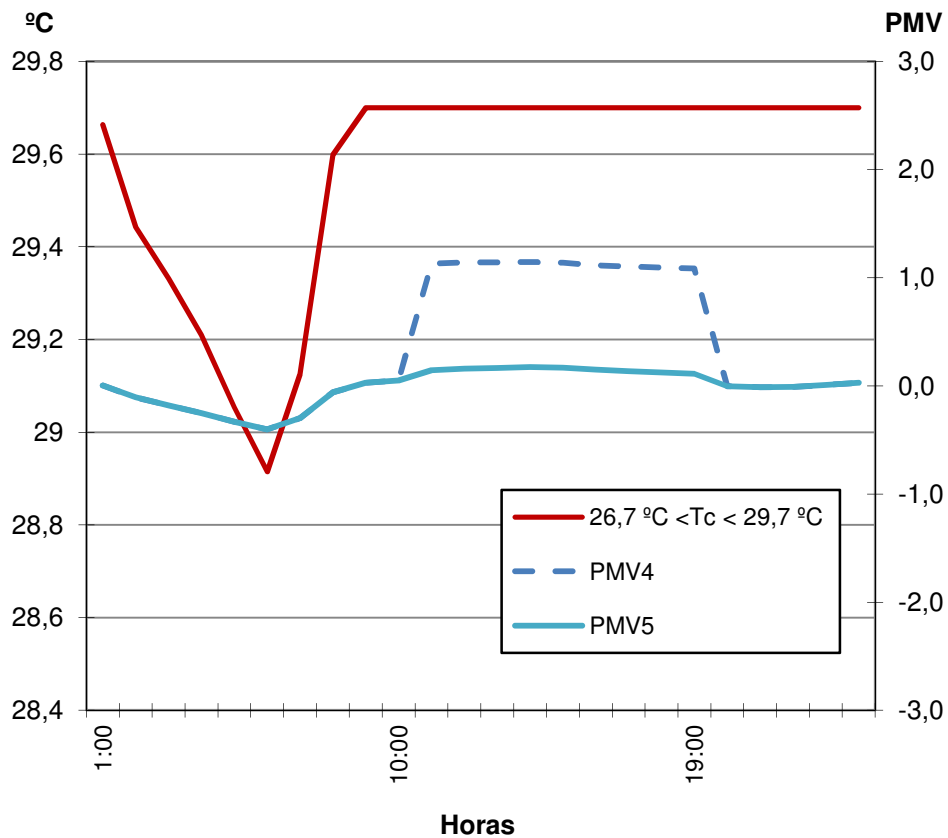


Fig. 5.25 - Temperatura de conforto e índices PMV

Reduzindo a temperatura para um máximo de 29,7°C e considerando permanentemente 0,5 clo (PMV4), do período das 10h às 20h registam-se valores de PMV ligeiramente quente. Introduzindo a estratégia de adaptação de vestuário (PMV5) para 0,1 clo, entre o mesmo intervalo de tempo, verificou-se um estado próximo ao de neutralidade térmica.

Apesar de, ao considerar-se o limite superior da temperatura de conforto de 29,7°C, originar um aumento do consumo energético de 25% face aos intervalos de conforto anteriormente admitidos, com esta solução é possível garantir o cumprimento da norma EN ISO 7730, pois o valor máximo de PPD foi de 8,4% ocorrido às 6h.

6. CONCLUSÃO

No presente capítulo são apresentadas as conclusões finais do trabalho, considerando a bibliografia consultada e os dados e elementos obtidos nos capítulos anteriores.

6.1. Conclusões Gerais

A habitação que serviu de base ao caso de estudo, e que foi simulada em três zonas climáticas distintas do território nacional – Porto, Lisboa e Évora – possibilitou demonstrar através dos gráficos elaborados a partir dos dados de saída do *EnergyPlus*, que a temperatura de conforto pode (e deve) ser superior a 25°C. Utilizando os índices PMV e PPD nos dias mais quentes como auxílio na verificação das condições de conforto térmico, demonstrou-se que os utilizadores, ao efectuarem pequenos ajustes, se encontravam também eles dentro dos limites de conforto térmico “clássicos”. Excepção feita na situação de Évora, em que a temperatura interior diária máxima registado de 34,9°C, obriga a necessidades de energia mesmo aquando da utilização do ACA aplicado para Portugal.

O *EnergyPlus*, apesar de ser um programa pouco “*friendly user*” apresenta, por outro lado, inúmeras potencialidades na optimização das condições interiores de conforto térmico. A possibilidade de introduzir *schedules* (actividade metabólica, isolamento do vestuário, tipo de ocupação, controlo de protecções opacas e taxas de renovação de ar) e ser ainda um programa “aberto” à comunidade, torna-o uma ferramenta muito útil. Infelizmente, não permite a análise directa da temperatura de conforto com a do exterior, o que dificultou a análise no método de SCATs, que propõe uma temperatura de conforto directamente proporcional à temperatura exterior média diária. Desta forma, ao analisar-se os dias mais quentes do ano (situação mais gravosa), está-se a minimizar a má interpretação dos dados em toda a estação de arrefecimento.

Apesar das limitações encontradas no programa, a dissertação possibilitou comprovar a potencialidade e praticabilidade da utilização de modelos simplificados de conforto térmico. Tanto o algoritmo proposto pela Secção 5.3 da ASHRAE-55, como a metodologia porposta pelo estudo SCATs, que faz parte da EN 15251, são instrumentos complementares de análise de conforto térmico que não devem ser desprezados, principalmente em edifícios que funcionem em regime livre, como é o caso da maioria do parque habitacional português em período de Verão. A utilização destas metodologias nas nossas habitações é, sem dúvida, apetecível pois a liberdade de adaptação ao ambiente é consideravelmente superior, comparativamente aos espaços públicos.

Ao privilegiar a regulação da temperatura, através do acesso ao fecho e abertura de janelas e possibilitar ao utilizador a liberdade para adaptar o seu vestuário às condições térmicas do interior e exterior, é dada a possibilidade de cada um encontrar o seu estado de conforto térmico, utilizando apenas em última instância sistemas de arrefecimento mecânicos. Por conseguinte, o conceito de

“Oportunidade Adaptativa”, deve ser encarado como modelo de arrefecimento a seguir, nos nossos lares.

A “uniformização” da temperatura de conforto pelos métodos analíticos, para além de potenciar o uso de sistemas mecânicos de climatização, com óbvias repercursões na qualidade do ar e consumo de energia, também poderá não garantir as condições ideais da temperatura de conforto. O RCCTE ao fixar uma temperatura de referência também poderá incorrer no mesmo erro. Obrigando ao dimensionar, o arrefecimento de habitações mesmo quando na realidade tais acções não sejam as necessárias.

De referir ainda, e tal como referenciado pela bibliografia consultada, o método clássico de Fanger não só requiere temperaturas mais baixas como também poderá mostrar respostas irrealistas em ocupantes de edifícios naturalmente ventilados sobre condições de calor, devendo ser os seus valores interpretados com alguma prudência, tal como todos os outros dados que tiveram por base os pressupostos utilizados.

6.2. Desenvolvimento Futuro de Trabalho

Demonstrada a importância da aplicação de modelos adaptativos no conforto térmico das habitações naturalmente ventiladas e na poupança energética que estes modelos permitem e Portugal, ao já ter um algoritmo de conforto adaptativo desenvolvido em edifícios de serviços, torna-se importante confirmar a sua validade em habitações, através de estudos de campo que permitam inquirir o grau de satisfação dos utilizadores, nomeadamente em regiões em que se verifiquem elevados gradientes térmicos e altas temperaturas exteriores. Estes modelos devem ainda ser verificados em diferentes tipologias, nomeadamente em edifícios antigos, habitações unifamiliares, habitações térreas e de cobertura e em edifícios que apresentem elevadas áreas envidraçadas.

Deverá também ser analisado e quantificado em estudos futuros, sistemas de aberturas de admissão e extracção de ar e qual a sua eficácia real, tendo em conta as dificuldades em garantir renovações de ar constantes através da ventilação natural.

Outro desenvolvimento futuro deverá passar pela elaboração de manuais que permitam dar a conhecer ao utilizador comum alternativas simples e acessíveis de arrefecimento passivo e qual o custo/benefício das alterações do comportamento dos ocupantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – ADENE - *Eficiência Energética nos Edifícios Residenciais - Manual do Consumidor*. Lisboa, Intelligent Energy Europe, 2008.
- 2 – AELENEI, D. - *RCCTE "Light"*, Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- 3 – AELENEI, D. - *Apontamentos da Cadeira Processos de Construção*. Monte de Caparica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- 4 – AFONSO, J. - *Estudo do Comportamento Térmico de Edifícios Antigos, Um caso de Estudo* [dissertação de mestrado]. Monte de Caparica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2007.
- 5 – ALM, O. *et al.* - *The Impact of Simultaneous Exposure to Thermal Load Low-Frequency Ventillation Noise and Indoor Air Pollution*, in “*Proceeding of the Indoor Air'99*”. Indoor Air, Volume 5, págs. 270-275, 1999.
- 6 - ALMEIDA, H. S. - *Análise do Conforto Térmico de Edifícios: Utilizando as Abordagens Analítica e Adaptativa* [Tese de Mestrado]. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2010.
- 7 – AMADO, Miguel - *Conservação Energética em Edifícios de Habitação e o Nível de Conforto Ambiental*. Lisboa, Construção 21 - Congresso Nacional da Construção, 2001.
- 8 - AMADO, Miguel *et al.* - *O Processo da Construção Sustentável*, in “1º Congresso Lusófono sobre Ambiente e Energia”. Estoril, 2009.
- 9 - ASHRAE (American Society of Heating and Refrigerating Engineers) - *Handbook of Fundamentals: Physiological Principles, Comfort, Health*. New York, 1997.
- 10 - BARROSO, C.; SANTOS, M. *et al.* - *Bioclimatismo no Projecto de Arquitectura: Dicas de Projecto* [Pós-Graduação em Arquitectura. Faculdade de Arquitectura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005].
- 11 – BAKER, N.; STEEMERS, K. - *LT Method 3.0 - An Energy Design Tool for Buildings in Southern Europe*. Cambridge, The Commission of the European Communities, 1992.
- 12 - BAKER, N.; STEEMERS, K. - *LT Method 3.0 - An Energy Design Tool for Buildings in Southern Europe*. Cambridge, The Commission of the European Communities, 1992.
- 13 – BAKER, N. V.; STANDEVEN, M. A. - *A Behavioural Approach to Thermal Comfort Assesment in Naturally Ventilated Buildings in* Chartered Institue of Building Servie Enginners. Proceddings of the CIBSE National Conference, Volume 84, págs. 76-84, 1995.

- 14 – BEIER, L.; KUSZON, L. - *Human Response to Draught and Vertical Temperature Difference*, Laboratory of Heating and Air Conditioning. [M.Sc. Thesis]. Denmark, Technical University of Denmark, 1992.
- 15 – BRAGER, G.; de DEAR, R. - *Climate, Comfort & Natural Ventilation: A new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55*. Berkeley, University of California, 2001.
- 16 - BRESLIN, R. - *Gender Differences and Thermal Comfort Requirements*. [Final year undergraduate report. Department of Human Sciences, Loughborough University]. U.K., 1995.
- 17 – CALIXTO, L. - *Arquitetura e Urbanismo Sustentável* [Dissertação de Mestrado]. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008.
- 18 – CANHA da PIEDADE, A.; MORET, A.; BRAGA, A. - *Térmica de Edifícios*. 1ª Edição. Edições Orion, 2009.
- 19 – CARVALHO, L. - *A Envolvente dos Edifícios e a Iluminação Natural*. Lisboa, LNEC, Volume 2, 1999.
- 20 – CHVATAL, K. M. - *Relação entre o Nível de Isolamento Térmico da Envolvente dos Edifícios e o Potencial de Sobreaquecimento no Verão*. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- 21 – CLAUSEN, G. *et al.* - *A Comparative Study of Discomfort Caused by Indoor Air Pollution, in “Thermal Load and Noise”*. Indoor Air, Volume 3, págs. 255-262, 1993.
- 22 - COLES, G.; di Corleto, R.; Firth, I. - *Documentation of the Heat Stress Standard Developed for Use in the Australian Environment*. Australian institute of Occupational Hygienists by the Heat Stress Working Group, 2002.
- 23 - de DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. - *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and preference*. ASHRAE, 1997.
- 24 - de DEAR, R. J; Brager, G. - *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, in “Field Studies of Thermal Comfort and Adptation”*. ASHRAE Technical Data Bulletin, Volume 14, págs. 27-49, 1998.
- 25 - de DEAR, R. e BRAGER, G. - *The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built*. Biometeorol, Volume 45, págs. 100-108, 2001.
- 26 - de DEAR, R. J; Brager, G. - *Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55*. Energy and Buildings, Volume 34, págs. 549-561, 2002.
- 27 - FANGER, Povl Ole - *Thermal Comfort*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1972.

- 28 – FIRST INTERNATIONAL ONE DAY FORUM ON NATURAL AND HYBRID VENTILATION - *Adaptive Thermal Comfort: A Multicultural Issue*. Sydney, 1999.
- 29 - GIVONI, B. - *Performance and Applicability of Passive and Low-Energy Cooling Systems*. Energy and Buildings, Volume 17, págs. 177-199, 1991.
- 30 – GIVONI, B. - *Climatic Aspects of Urban Design in Tropical Regions*. Atmospheric Environment, Volume 26B, nº3, págs. 397-402, 1992.
- 31 – GOMES, M. - *Construção Sustentável, Contributo da Utilização da Parede de Trombe* [Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa]. Lisboa, 2011.
- 32 – GONÇALVES, H.; Graça, J. - *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. Lisboa, INETI, 2004.
- 33 80 – GONÇALVES, H. *et al.* - *Física da Construção e Tecnologias Solar Passivas*, Térmica de Edifícios. INETTI, 1999.
- 34 84 – GOUVEIA, P. - *Caracterização dos Impactes da Envolvente no Desempenho Térmico dos Edifícios* [dissertação de mestrado]. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008.
- 35 - HAVENITH, G.; HÖLMER, I.; PARSONS, K. - *Personal Factors in Thermal Comfort Assessment: Clothing Properties and Metabolic Heat Production*. Energy and Buildings, Volume 34, 2002.
- 36 – HAWKES, D. Energy and Buildings, Volume 5, págs. 127-134, 1982.
- 37 – HENRIQUES, F. - *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*, Departamento de Engenharia Civil. Monte de Caparica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2007.
- 38 - HÖPPE, P - *Heat Balance Modelling Experientia* 49. págs. 741-746, 1993.
- 39 - HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F. - *The Validity of ISO-PMV for Predicting Comfort Votes in Every-Day Thermal Environments*. Oxford, School of Architecture Oxford : Center for Sustainable Development.
- 40 - HUMPHREYS, M. A. - *Outdoor Temperatures and Comfort Indoors*, in “Building Research and Practice. Journal of CIB, Volume 6, págs. 92-105, 1978.
- 41 - HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F. - *An Adaptive Guideline for UK Office Temperatures*, in “Standards for Thermal Comfort: Indoor Air Temperature Standards for the 21st Century “, O. Sykes, S. Roaf. London, E and FN Spon, 1995.
- 42 - HUMPHREYS, M.; NICOL, J. - *Outdoor Temperature and Indoor Thermal Comfort: Raising the Precision of the Relationship for The 1998 ASHRAE Database of Field Studies*. ASHRAE Transactions 206, Volume 2, págs. 485-492, 2000.

- 43 - ÍNDIAS, M. - *Curso de Física*. McGraw-Hill, 1992.
- 44 - JONES, B. W.; - *Capabilities and Limitations of Thermal Models for Use in Thermal Comfort Standards*. 2002.
- 45 - KOTZ, A. - *Humanbiometeorologische Bewertung des thermischen Milieus innerhalb verschiedener Stadtstrukturen*. [Diploma Thesis in Meteorology. Ludwig Maximilians University]. Munich, 1984.
- 46 - KOLOKOTRONI, M.; KUKADIA, V., PERERA, M. D. - *NATVENT - European Project on overcoming technical barriers to low-energy natural ventilation*. Chartered Institute of Building Service Engineers, Proceedings of the CIBSE/ASHRAE Joint National Conference, Volume 1, págs. 36-41, 1996.
- 47 - LAMBERTS, R.; DUTRA, L; PEREIRA, F. - *Eficiência Energética na Arquitectura*. Págs 28-50. PW Editores, 1997.
- 48 - LOTENS, W. A. - *Heat Transfer from Humans Wearing Clothing* [PhD Thesis. Delft University of Technology], Delft, 1993.
- 49 - MAYER, E. - *Objective criteria of thermal comfort*. Building and Environment, Volume 28, págs. 399-403, 1993.
- 50 - MCCARTNEY, K. J.; NICOL, J. F. - *Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe: Results of the SCATS Project*. Energy and Buildings, Volume 34, págs. 623-635, 2002.
- 51 - MEHNERT, P. *et al.* - *Prediction of the average skin temperature in warm and hot environments*. European Journal of Applied Physiology, Volume 82, págs. 52-60, 2000.
- 52 - MIMOSO, J. M. - *Transmissão de Calor - Bases Teóricas para a Aplicação à Térmica de Edifícios (ITE 14)*. Lisboa, LNEC, 1987.
- 53 - MONTEIRO, L. M. - *Conforto térmico em espaços abertos e temperatura equivalente de percepção*. São Paulo, Faculdade de Arquitectura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
- 54 - MORET, R.; CANHA, A.; BRAGA, A. M. - *Térmica de Edifícios*. Amadora, Orion, 2009.
- 55 - MOURÃO, J.; PEDRO, J. - *Sustentabilidade Ambiental da Habitação e Áreas Residenciais*. Lisboa, LNEC, 2005.
- 56 - NICOL, J. F; MCCARTNEY, K. J. - *SCATS: Final Report - Public*. U.K., Oxford Brookes University, 2001.
- 57 - NICOL, J. F; MCCARTNEY, K. J. - *Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN 15251*. Building and Environment, Volume 45, págs. 11-17, 2010.

- 58 – NICOL, F.; PAGLIANO, L. - *Allowing for Thermal Comfort in Free-Running Buildings in the New European Standard EN 15251*.
- 59 - NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. - *Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings*.
- 60 - NICOL, J. F. - *International Standards Don't Fit Tropical Buildings: What Can We Do About It?* in Conferencia Internacional Sobre Confort y Comportamiento Térmico de Edificaciones. Maracaibo, 2000.
- 61 - NISHI, Y.; GAGGE, A. - *Moisture Permeation of Clothing: A Factor Governing Thermal Equilibrium and Comfort*. ASHRAE Transactions, Volume 76, págs. 137-145, 1970.
- 62 - NISHI, Y. - *Effective Temperature Scale for use in hypo and hyperbaric environments*. Aviation Space and Environmental Medicine, Volume 48, págs. 97-107, 1977.
- 63 – OLESEN, B. W; PARSONS, K.C. - *Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730*. Energy and Buildings, Volume 34, págs. 537-548, 2002.
- 64 - OLGAY, Victor - *Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas*. G. Gili, Barcelona, *Arquitectura y clima*, 1998.
- 65 - OLIVEIRA, F.; ALMEIDA, F. e ALVAREZ, S. - *Energia e Ambiente nas Cidades: Uma estratégia Global para a EXPO'98*, in “Conforto em Espaços Exteriores”, Parque EXPO'98 SA. Lisboa, 2000.
- 66 - ONU - *Climate and House Design*. New York, United Nations, 1970.
- 67 - PARSONS, K. - *The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort*. Energy and Buildings, Volume 34, págs 593-599, 2002.
- 68 – ROAF, S.; FUENTES, M.; TAYLOR, S. - *The ECO-House Design Guide*. Architectural Press, 2001.
- 69 - ROHLES, H. - *Temperature or Temperament: A Psychologist Looks at Thermal Comfort*. ASHRAE Transactions 86, págs. 5-13, 1980.
- 70 - RUAS, A. - *Avaliação de Conforto Térmico: Contribuição à aplicação prática das normas internacionais*. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- 71 - SILVA, Pedro *et al.* - *Metodologia de Simulação com Vista à Reabilitação Energeticamente Eficiente*, in “3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios”. Porto, 2009.
- 72 – SIRGADO, J. - *Análise do Impacte dos Vãos Envidraçados no Despenho Térmico dos Edifícios* [Dissertação do Grau de Mestrado]. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2010.

73 - SODHA, M. *et al* - Solar Passive Buildings. *International Series on Building Environmental Engineering*. Science and Design, Volume 2, 1986.

74 - STOOPS, J. *et al*. - *Estimation of energy saving potential of the adaptive algorithm*. Report to task 5 of the SCATs Project, European Commission, 2000.

75 - SOUZA, F. *et al*. - *Sono, Sonho, Ritmo Biológico e Insônia*, in “Revista de Psicofisiologia”. Laboratório de Psicobiofísica da UFMG.

76 – SZOKOLAY, S. V. - *Thermal Design of Buildings*. Camberra, RAI Education Division.

77 – THERMAL COMFORT FOR FREE-RUNNING BUILDINGS. *Energy and Buildings*, págs. 175-182, 1996.

78 - WEBB, L.; PARSONS, K. - *Thermal Comfort Requirements for People with Physical Disabilities*. Proceedings of the BEPAC and EPSRC Mini Conference. Oxford, 1997.

79 - WILLIAMS, S. - *Behavioural Responses to Maintain Thermal Comfort in Office Environments*. [M.Sc. Thesis. Department of Human Sciences, Loughborough University]. U.K., 1996.

80 - WILSON, S.; HEDGE, A. - *The Office Environment Survey: A Study of Building Sickness*. London, Building use Studies, 1987.

81 - XAVIER, A - *Proposta de zona de conforto térmico obtida a partir de estudos de campo em Florianópolis*, R. LAMBERTS. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina. V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e II Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 1999.

84 - XAVIER, A. P. - *Condições de Conforto Térmico para Estudantes de 2º Grau na Região de Florianópolis*. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

Normas

85 – EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) - EN ISO 7730:2005 - *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. Novembro 2005.

86 – AMERICAN SOCIETY OF HEATING AND REFRIGERATING ENGINEERS - ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 - *Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, 2004.

87 - INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION – ISO 8996 - *Ergonomics of thermal environments - Determination of metabolic heat production*. Geneva, 1989.

88 – INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION – ISO 9920 - *Ergonomics - Estimation of the thermal characteristics of a clothing ensemble*. Geneva, 1993.

89 - EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) - EN ISO 13790:2007 - *Ergonomics of the thermal environment - Energy Performance of Buildings - Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling*. 2007.

90 - INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION – ISO 7726 - *Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities*. Geneva, 1998.

91 - Norma Portuguesa - NP 1037-1 - *Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão dos Locais com Aparelhos a Gáz - Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural*. 2002.

Documento legislativo:

92 - DIRECTIVA 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro - Relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios.

93 - DECRETO-LEI nº78/2006 de 4 de Abril - Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar (SCE).

94 - DECRETO-LEI nº 79/2006 de 4 de Abril - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE).

95 - DECRETO-LEI Nº80/2006 de 4 de Abril - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

Internet:

96 - www.construcaosustentavel.pt. [Citação: 08 de 09 de 2011.]

97 - DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia. www.dgge.pt. [Citação: 08 de 09 de 2011.]

98 - DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia. www.dgge.pt. [Citação: 08 de 09 de 2011.]

99 - INE - Instituto Nacional de Estatística - *Census 2001*. INE, 2001. www.ine.pt. [Citação: 08 de 09 de 2011.]

100 - INE - Instituto Nacional de Estatística - *Resultados Preliminares Census 2011*. INE, 2001. www.ine.pt. [Citação: 08 de 09 de 2011.]

101 - INE - Instituto Nacional de Estatística - *Estatísticas da Construção e Habitação 2010*. INE, 2011. www.ine.pt. [Citação: 08 de 09 de 2011.]

102 - INE/DGEG - *Resultados Preliminares do Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*. INE, 2011. www.ine.pt. [Citação: 08 de 09 de 2011.]

103 - Saint-Gobain - O vidro e a radiação solar. www.saintgobain.com. [Citação: 18 de 08 de 2010.]

104 - EnergyPlus Energy Simulation Software. U.S Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. [Citação: 18 de 08 de 2010.]

105 - *Input Output Reference, The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. [Citação: 18 de 08 de 2010.]

ANEXOS

ANEXO A – FIGURAS EM ANEXO

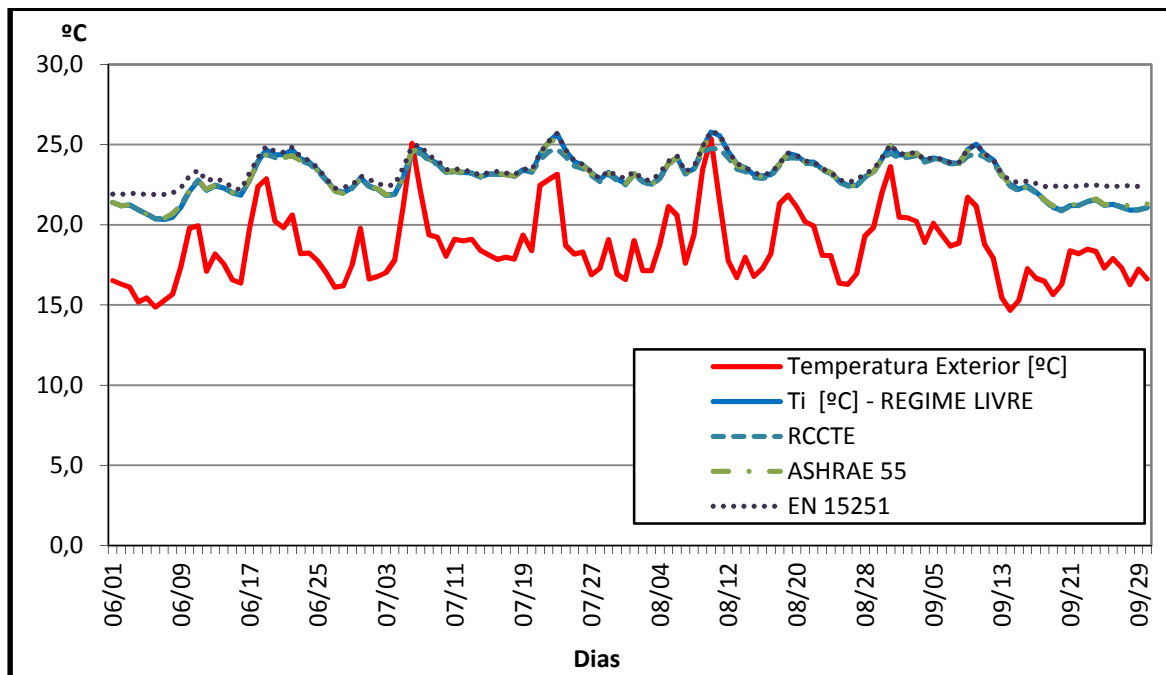


Fig. A.1 - Evolução das temperaturas média diárias em Lisboa

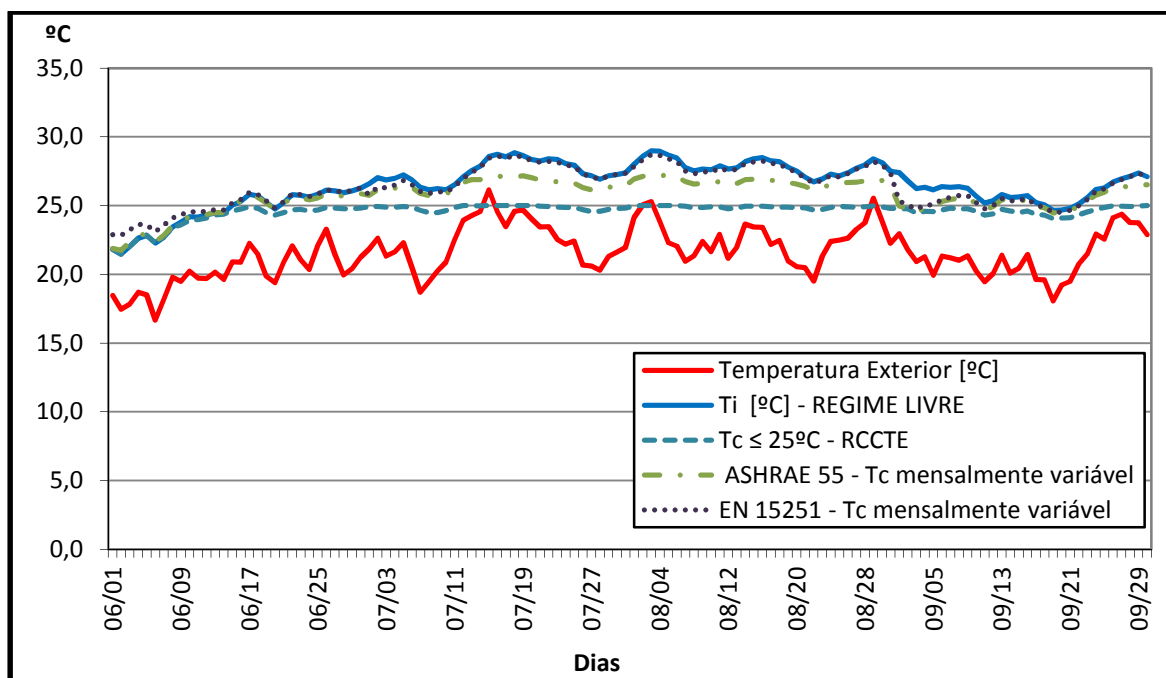


Fig. A.2 - Evolução das temperaturas média diárias no Porto

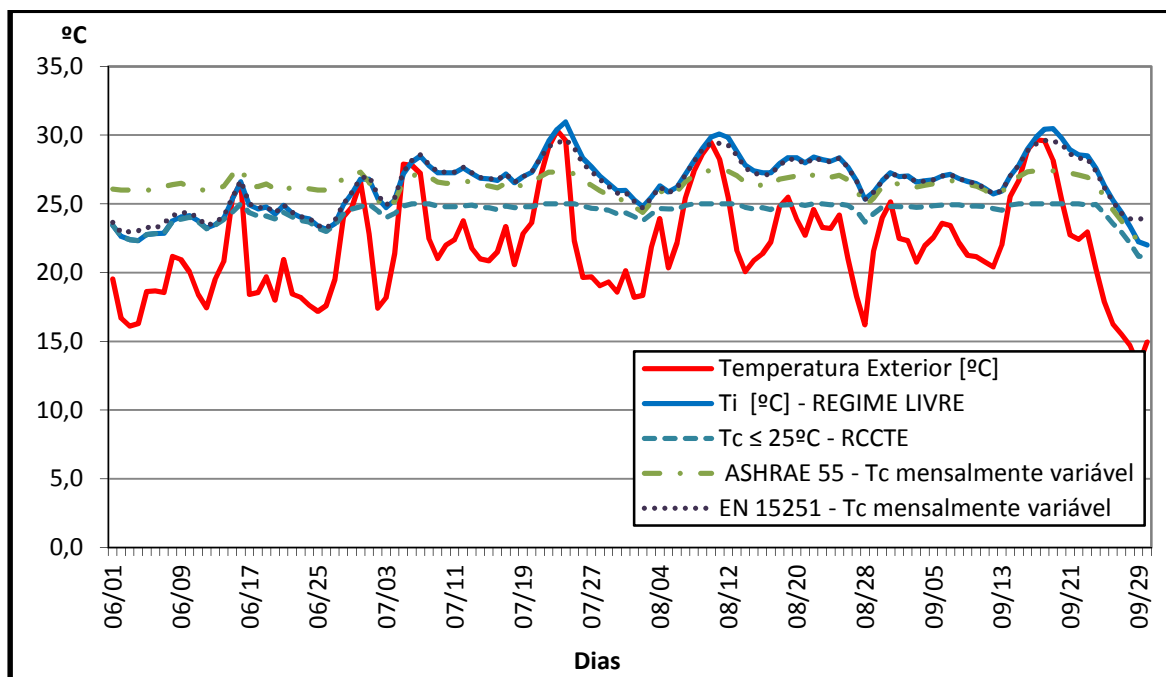
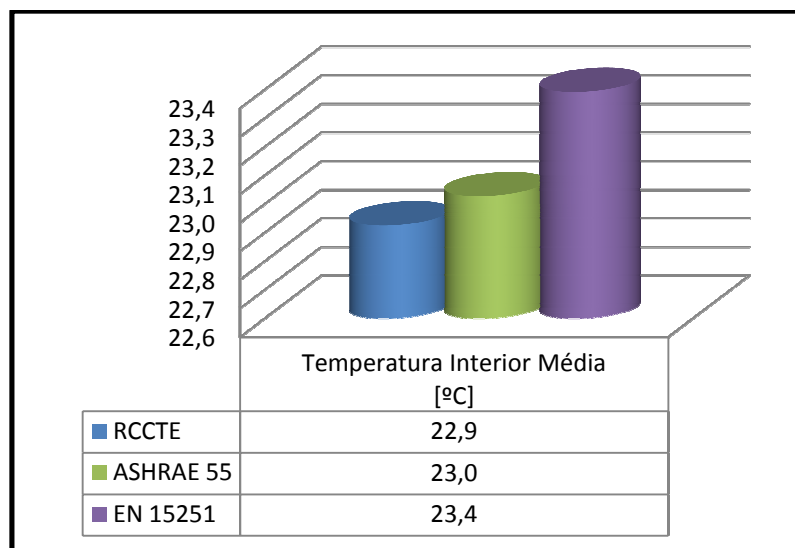
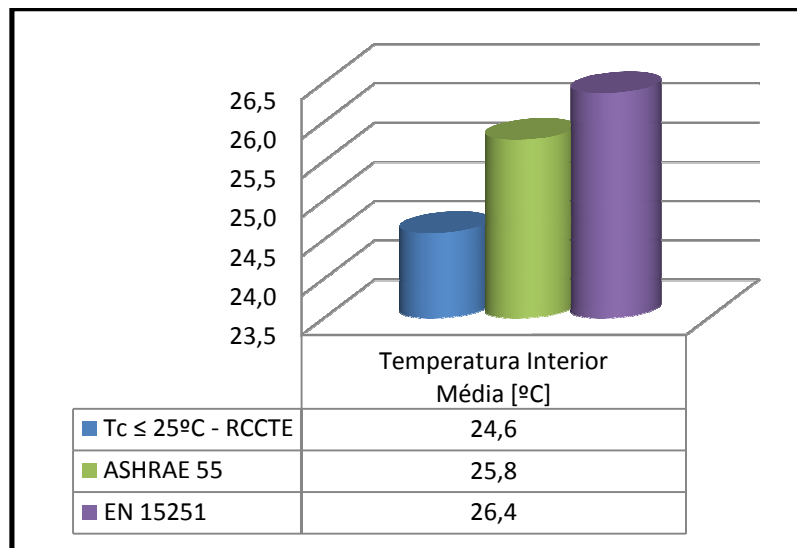


Fig. A.3 - Evolução das temperaturas médias diárias em Évora

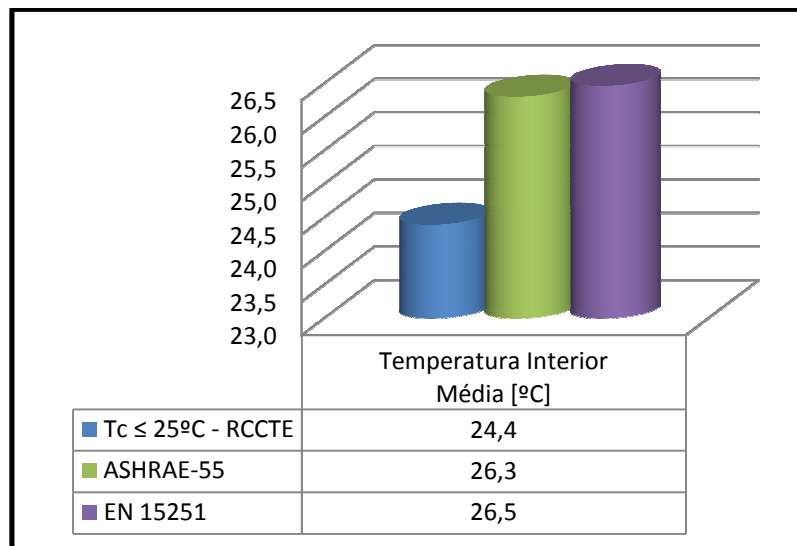
Quadro A.1 - Resumo da temperatura interior média em Lisboa



Quadro A.2 - Resumo da temperatura interior média no Porto



Quadro A.3 - Resumo da temperatura interior média em Évora



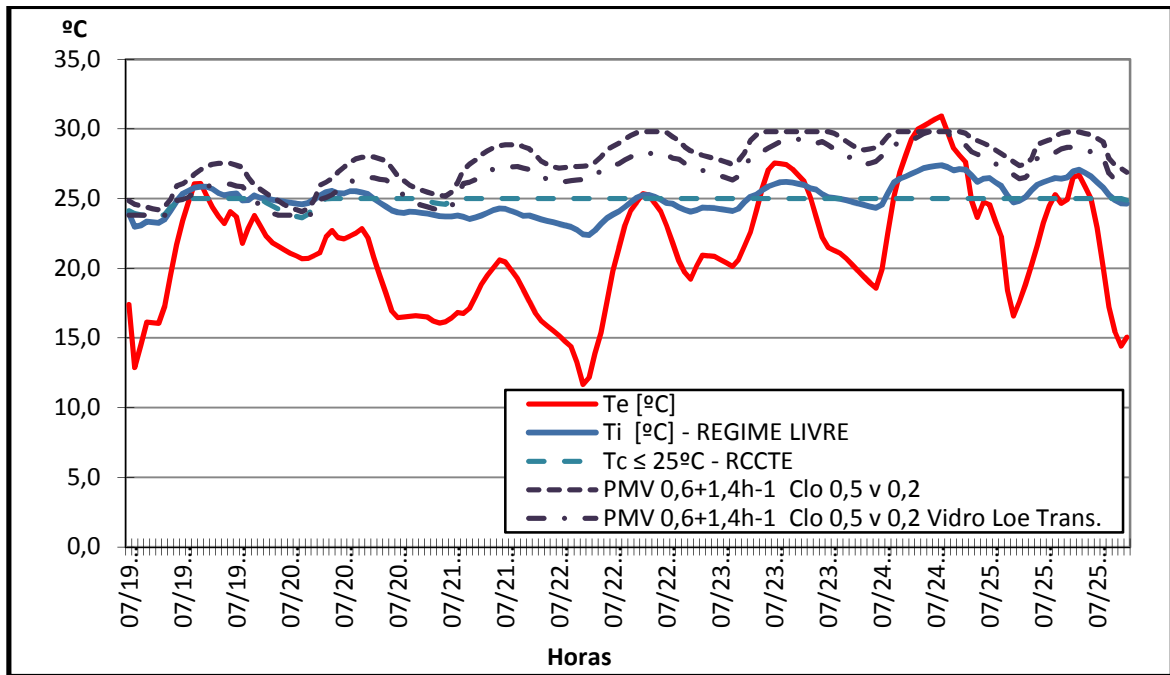


Fig. A.4 - Evolução das temperaturas segundo o tipo de estratégia no Porto

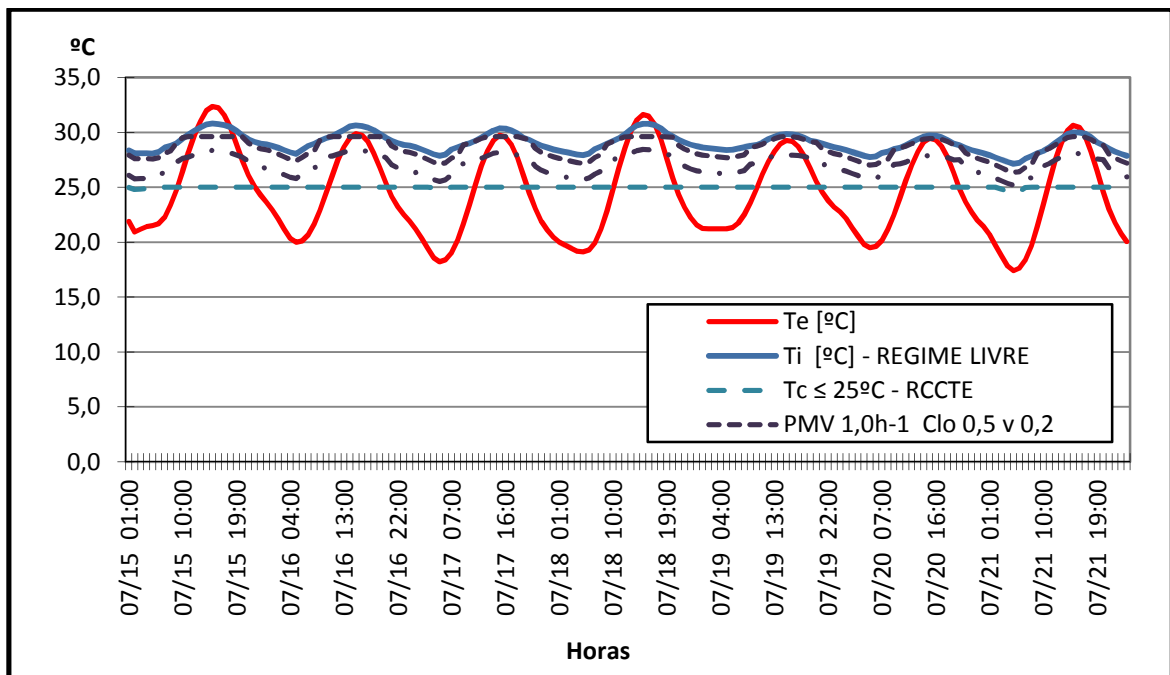


Fig. A.5 - Evolução das temperaturas segundo o tipo de estratégia em Lisboa

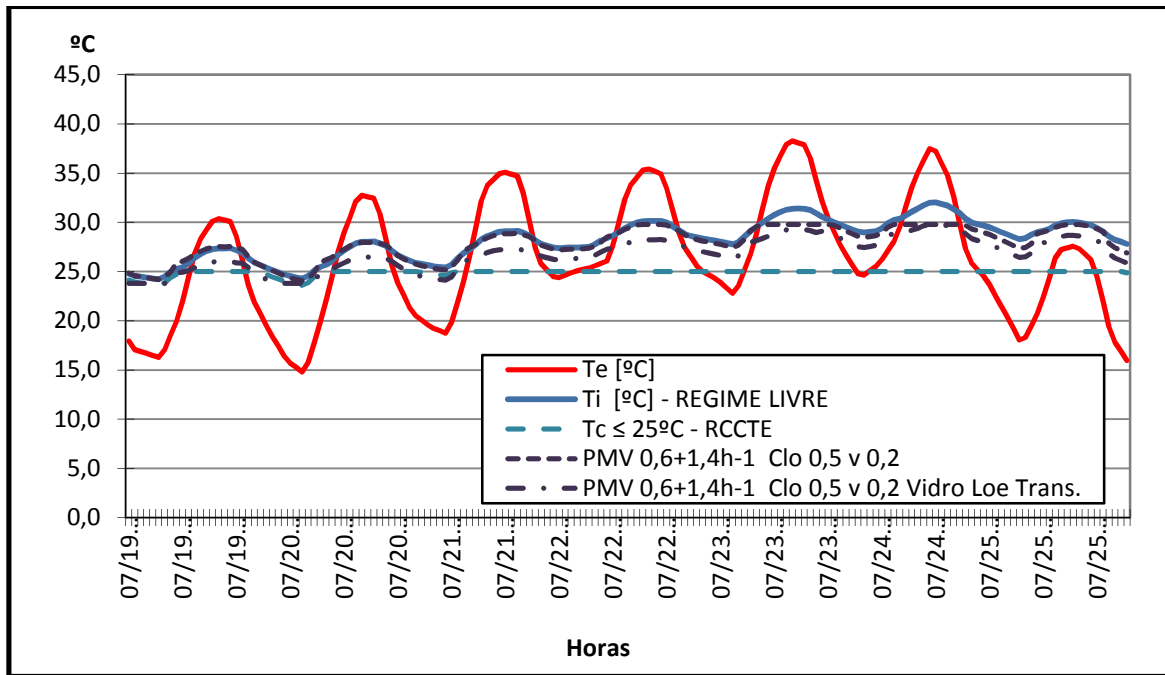


Fig. A.6 - Evolução das temperaturas segundo o tipo de estratégia em Évora

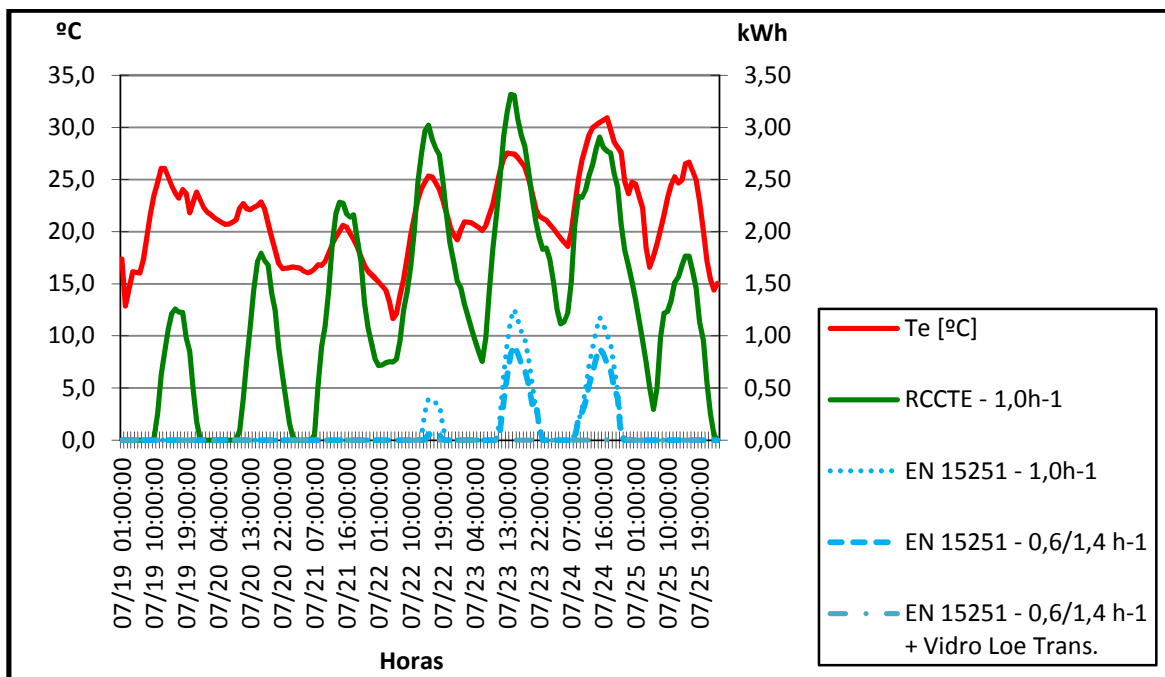


Fig. A.7 - Evolução da temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o tipo de estratégia no Porto

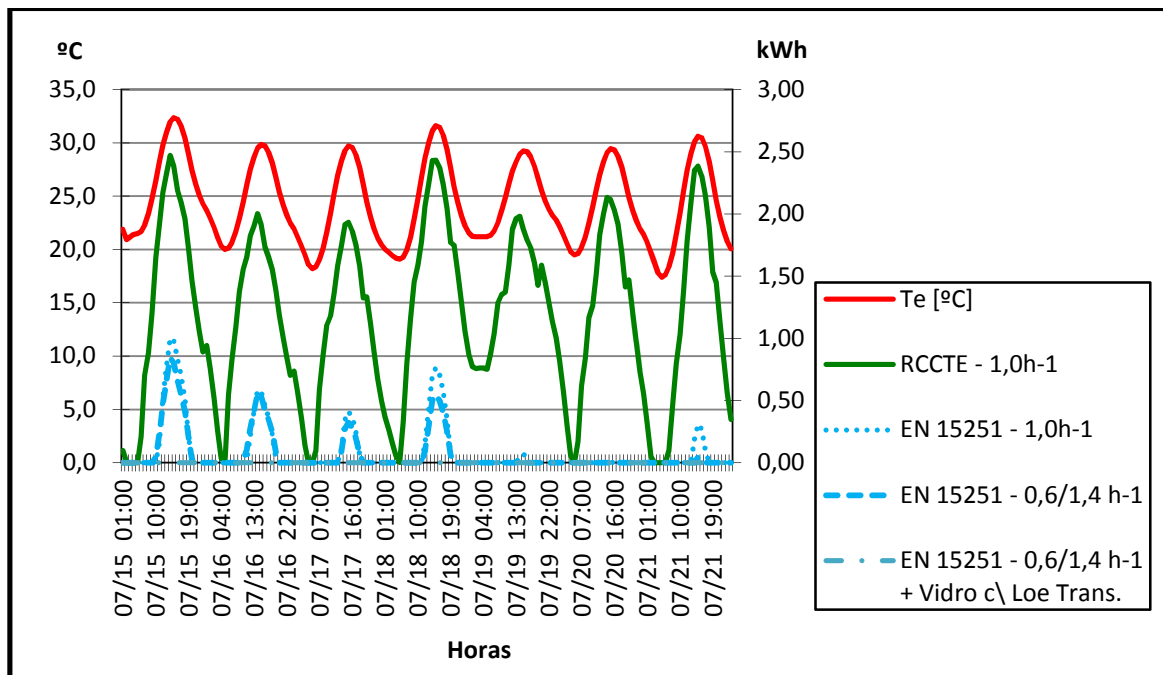


Fig. A.8 - Evolução da temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o tipo de estratégia em Lisboa

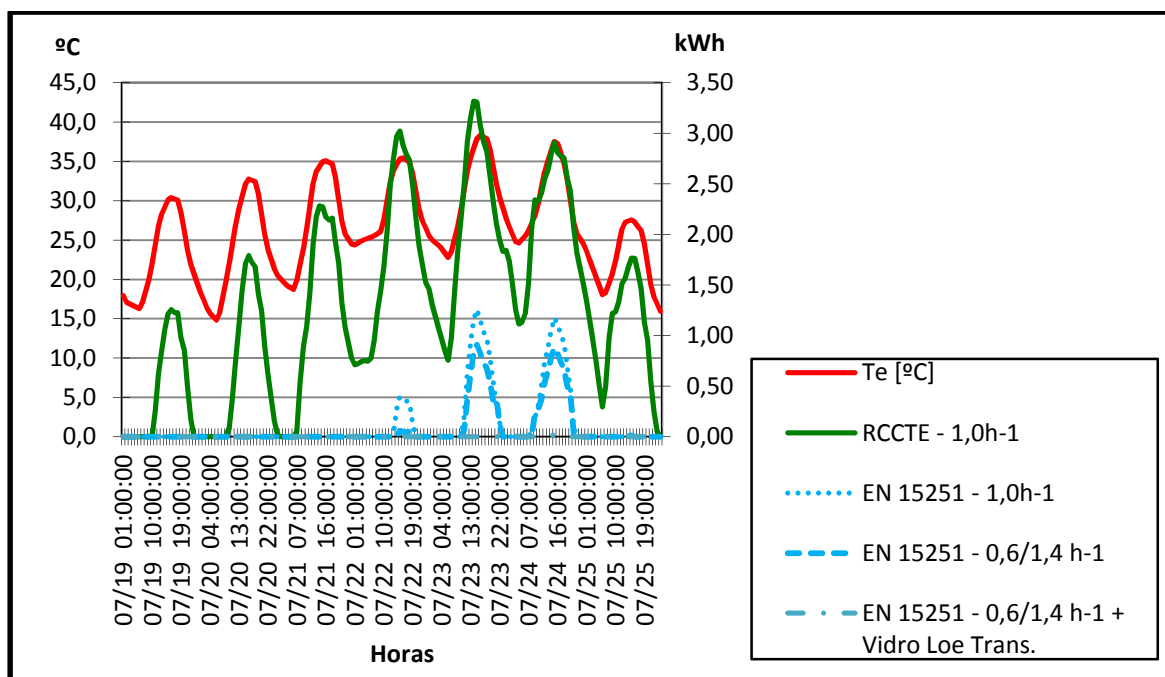


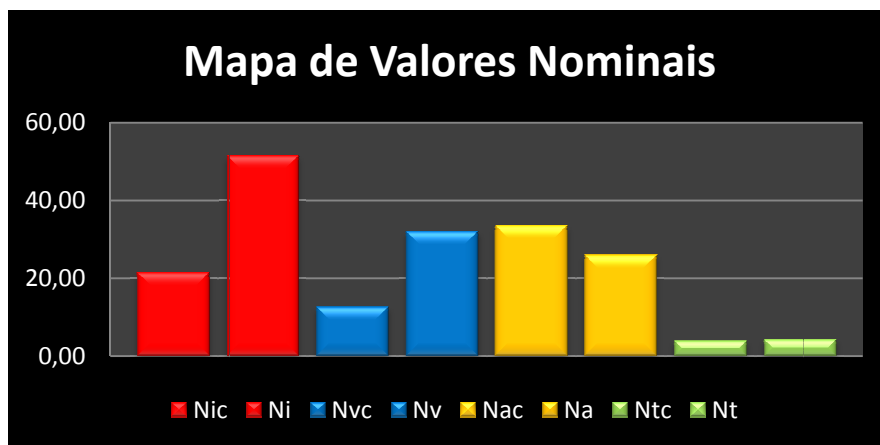
Fig. A.9 - Evolução da temperatura exterior e necessidades energéticas segundo o tipo de estratégia em Évora

ANEXO B – MAPA DE VALORES NOMINAIS (RCCTE)

Quadro B.1 - Zonamento climático

Zonas Climáticas	I1	V2
Graus-dias:	1190	
Duração Aquec.	5,3	
Altitude:	27	
Temp. Verão	25	

Quadro B.2 - Mapa de valores nominais



CLASSE ENERGÉTICA

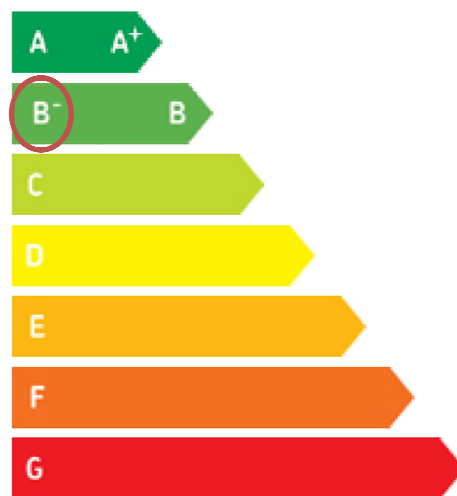


Fig. B.1 - Classe energética da habitação em estudo