



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Conforto térmico: Estudo paramétrico

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Construções

Autor

Ana Paula Borges do Forno

Orientador

Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2016

Uma longa viagem começa com um único passo.

Lao-Tsé

À minha família

AGRADECIMENTOS

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Agradeço aos meus orientadores Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos e Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio; pela constante disponibilidade, competência, incentivo e espírito crítico, o meu muito obrigado.

Agradeço também a toda a minha família e amigos pelo constante apoio e pela força que me deram para ultrapassar todos os obstáculos e realizar com sucesso este trabalho.

RESUMO

Devido ao aumento da qualidade de vida, principalmente nos países desenvolvidos, o conforto térmico tem vindo a requerer uma preocupação crescente ao longo dos anos, nomeadamente ao nível de estudos de eficiência energética, com vista à diminuição do consumo de energia, sem baixar o nível de conforto dos ocupantes. Assim, o nível de conforto térmico é um direito dos cidadãos, permitindo o alcance de um bem-estar ao nível da saúde e produtividade.

O conforto térmico no interior de edifícios depende de diversos parâmetros incluindo, o nível metabólico, o vestuário, a temperatura do ar, a temperatura radiante, a velocidade do ar e a pressão de vapor de água.

Nesta dissertação estudou-se a sensibilidade dos índices de conforto térmico PMV-PPD, através de um estudo paramétrico relativo aos parâmetros que influenciam o conforto térmico, referidos anteriormente. O estudo foi efetuado através de uma folha de cálculo que tem por base a metodologia desenvolvida por *Fanger* e proposta na norma ISO 7730, assim como um *software* desenvolvido nos EUA que permite efetuar uma comparação entre a norma ASHRAE-55 e a norma EN -15251.

Tendo em conta os resultados obtidos, pode-se verificar que parâmetros como, a velocidade do ar e a pressão de vapor de água, possuem uma relevância menor no nível de conforto térmico humano relativamente à situação de referência e gama de valores estudada, em comparação com outros parâmetros, tais como, o nível de metabolismo, vestuário, temperatura do ar e temperatura média radiante. Comparando as normas Europeias e a Americana os resultados obtidos para os índices de conforto térmico são semelhantes e as diferenças encontradas entre eles são residuais.

Palavras-chave: Conforto térmico, índices de conforto térmico, PMV, PPD, estudo paramétrico, método de *Fanger*, ASHRAE-55, EN 15251.

ABSTRACT

Due to increased quality of life especially in developed countries, the thermal comfort has been required a growing concern over the years especially in terms of energy efficiency studies in order to reduce energy consumption without lowering the comfort level of the occupants. The level of thermal comfort is a citizen's right, which may be required allowing a well-being in terms of health, productivity and longevity.

The thermal comfort inside buildings depends on several parameters including: metabolic rate, clothing, air temperature, radiant temperature, air velocity and water vapor pressure.

This master thesis aim to study the sensitivity analysis of the thermal comfort index PMV-PPD through a parametric study, making a change of the parameters that influence thermal comfort mentioned above. The study was conducted through a worksheet that is based on the methodology developed by *Fanger* and proposed in the ISO 7730 standard, as well as an American software that allows to make a comparison between the standards ASHRAE-55 and EN-15251.

Taking into account the results obtained, it can be observed that parameters such as the air velocity and the water vapor pressure have a lower importance on human thermal comfort relative to the reference situation and the range of values studied in comparison with other parameters such as the level of metabolism, clothing, air temperature and mean radiant temperature. Comparing the European and the American standards the results obtained for the thermal comfort indexes are very similar and the differences between them are only residual.

Keywords: thermal comfort, thermal comfort indices, PMV, PPD, parametric study, *Fanger* method, ASHRAE-55, EN 15251.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Motivação e objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 CONFORTO TÉRMICO.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente	6
2.3 Equação de balanço térmico	6
2.4 Equilíbrio térmico.....	11
2.5 Fatores que influenciam o equilíbrio térmico.....	12
2.5.1 Metabolismo	12
2.5.2 Vestuário.....	12
2.5.3 Temperatura do ar.....	13
2.5.4 Temperatura média radiante	13
2.5.5 Velocidade do ar.....	14
2.5.6 Humidade absoluta do ar	14
2.6 Sondas para a medição dos parâmetros ambientais.....	14
2.7 Conforto térmico global.....	14
2.7.1 Índices de conforto térmico global	14
2.8 Desconforto térmico local	16
2.8.1 Índices de desconforto térmico local	16
<i>Correntes de ar</i>	16
<i>Diferenças de temperatura do ar na vertical</i>	17
<i>Temperatura dos pavimentos</i>	17
<i>Assimetria de temperatura radiante</i>	18
2.9 Classificação de ambientes.....	19
2.10 Normalização.....	20
2.10.1 ISO 7730:2005.....	20
2.10.2 ISO 7726:1998.....	20
2.10.3 ISO 8996:2004.....	20

2.10.4 ISO 10551:1995.....	20
2.10.5 ISO 9920:2007.....	20
2.10.6 ANSI/ASHRAE Standard 55 2004	21
2.10.7 EN 15251:2006.....	22
3 METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO.....	23
3.1 Conforto térmico e implicações do aumento do consumo de energia nos edifícios.....	23
3.2 Abordagens de conforto térmico	24
3.2.1 Abordagem racional	24
3.2.1.1 Avaliação do conforto térmico num hospital através do modelo PMV-PPD.....	24
3.2.1.2 Avaliação do conforto térmico num infantário, através dos índices PMV e PPD	25
3.2.1.3 Controlo do conforto térmico em fachadas de vidro	25
3.2.2 Abordagem adaptativa.....	26
3.2.2.1 Estudos de campo em conforto térmico humano	26
3.2.2.2 Avaliação de modelos adaptativos de conforto térmico em climas moderados ...	27
3.2.2.3 Normas de abordagem adaptativa de conforto térmico	27
3.2.2.4 Modelos de conforto térmico e técnicas	28
3.2.2.5 Medições do isolamento provocado pelo vestuário através de um manequim ...	29
3.2.2.6 Estudos comparativos no que diz respeito ao sexo (masculino e feminino)	30
3.2.2.7 Conforto térmico em escolas	30
3.2.2.8 Um novo índice preditivo para avaliar a sensação/resposta térmica do corpo humano	30
3.3 Diferenças entre a abordagem racional e a abordagem adaptativa.....	31
3.4 Estratégias bioclimáticas e sistemas passivos	32
3.5 Classificação climática Köppen-Geiger	33
4 ESTUDO PARAMÉTRICO.....	35
4.1 Introdução.....	35
4.2 Folha de cálculo.....	36
4.2.1 Descrição da folha de cálculo	36
4.2.2 Situação de referência.....	41
4.2.3 Estudo paramétrico e gama de valores utilizada	42
4.3 <i>Software</i> CBE	43
4.3.1 Modelos de conforto térmico.....	43
4.3.2 Representação visual do conforto térmico	44
4.3.3 Interface gráfica.....	46
4.3.4 Gama de valores	47

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 Influência do nível de metabolismo.....	48
5.2 Influência do vestuário	49
5.3 Influência da temperatura do ar	50
5.4 Influência da temperatura radiante	50
5.5 Influência da velocidade do ar.....	51
5.6 Influência da pressão de vapor de água	52
5.7 Comparação dos resultados – Folha de cálculo e <i>software</i> CBE	52
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
6.1 Conclusões.....	54
6.2 Trabalhos futuros.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A – Resultados tabelados da análise dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) da folha de cálculo.....	60
ANEXO B – Resultados tabelados da análise dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) no <i>software</i> CBE.....	61
ANEXO B – Resultados tabelados da análise dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) no <i>software</i> CBE “(cont.)”	62
ANEXO C – Resultados da análise de sensibilidade dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) na folha de cálculo e <i>software</i> CBE.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Balanço térmico no corpo humano (Alfano <i>et al.</i> , 2010).....	7
Figura 2.2 – Relação entre o peso/altura e área de <i>DuBois</i> (Oliveira, 2008)	8
Figura 2.3 – Percentagem previsível de insatisfeitos (PPD) em função do voto médio previsível (PMV) (adaptado da EN ISO7730 2006).....	16
Figura 2.4 – Percentagem de insatisfeitos (PD) em função da diferença de temperatura do ar na vertical entre a cabeça e os tornozelos (Alfano <i>et al.</i> , 2010)	17
Figura 2.5 – Percentagem de insatisfeitos (PD) em função da temperatura do pavimento (Alfano <i>et al.</i> , 2010).....	18
Figura 2.6 – Percentagem de insatisfeitos (PD) em função da assimetria da temperatura radiante °C, para o teto quente (1), parede fria (2), teto frio (3) e parede quente (4) (Alfano <i>et al.</i> , 2010)	18
Figura 2.7 – Intervalo aceitável da temperatura operativa e humidade para espaços onde os ocupantes têm um nível metabólico entre 1.0 met e 1.3 met, e a roupa proporciona entre 0.5 clo e 1.0 clo de isolamento térmico (norma ASHRAE, 2004)	21
Figura 2.8 – Intervalo aceitável de temperaturas operativas para espaços não climatizados (norma ASHRAE, 2004).....	22
Figura 2.9 – Limites de conforto superiores e inferiores para as temperaturas interiores de edifícios não climatizados, em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada (Norma EN 15251:2006).....	22
Figura 3.1 – Limite superior e inferior das normas de conforto térmico para 80% de aceitabilidade (Taleghani <i>et al.</i> , 2013).....	27
Figura 3.2 – Manequim térmico “Maria” (Oliveira <i>et al.</i> , 2014)	29
Figura 3.3 - Mapa mundial da classificação climática de <i>Koppen-Geiger</i> (adaptado de Rubel&Kottek, 2010).....	34
Figura 4.1 – Balanço térmico do vestuário, em regime permanente (Gameiro da Silva, 2015)	36
Figura 4.2 – Interface gráfica da folha de cálculo para a aplicação da norma ISO 7730 (Gameiro da Silva 2015).....	38
Figura 4.3 – Distribuição percentual dos fluxos de calor e massa relativos aos diversos processos de troca de calor efetuados entre o corpo humano e a envolvente, obtido para a situação de cálculo referente à Figura 4.2 (Gameiro da Silva, 2015)	39

Figura 4.4 – Cálculo para uma situação de desconforto térmico por sensação de calor (Gameiro da Silva, 2015).....	40
Figura 4.5 – Representação gráfica para os diferentes termos intervenientes no balanço térmico, para a situação referida na Figura 4.4 (Gameiro da Silva, 2015)	40
Figura 4.6 – Resultados da folha de cálculo para a situação de referência Quadro 4.2	42
Figura 4.7 - Representação gráfica das zonas de conforto térmico, assim como estratégias passivas, tais como ventilação natural, radiação solar, sombreamento e arrefecimento evaporativo (Schiavon et al. 2014)	45
Figura 4.8 – Diagrama psicrométrico com zonas de conforto sobrepostas para 0.5 e 1.0 clo (para condições de verão e inverno), com 1.1 met, velocidade do ar abaixo dos 0.2m/s fornecido pela ASHRAE -55 para o método gráfico (Schiavon et al. 2014)	45
Figura 4.9 – Interface gráfica do <i>CBE Thermal Comfort Tool</i> , ASHRAE-55 (CBE@2016)...	46
Figura 4.10 – Visualização da zona de conforto térmico para os mesmos valores de entrada. a) diagrama psicrométrico; b) diagrama de temperatura – humidade relativa (CBE@2016)	47
Figura 5.1 – Índices PMV-PPD em função do nível metabólico	49
Figura 5.2 – Índices PMV-PPD em função do vestuário	49
Figura 5.3 – Índices PMV-PPD em função da temperatura do ar	50
Figura 5.4 – Índices PMV-PPD em função da temperatura radiante	51
Figura 5.5 – Índices PMV-PPD em função da velocidade do ar.....	51
Figura 5.6 – Índices PMV-PPD em função da pressão de vapor de água.....	52
Figura 5.7 – Índice PMV em função da variação percentual de cada parâmetro	53
Figura 5.8 – Índice PPD em função da variação percentual de cada parâmetro	53
Figura C.1 – Índices PMV e PPD em função do nível metabólico de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e <i>software</i> CBE)	63
Figura C.2 - Índices PMV e PPD em função do vestuário de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e <i>software</i> CBE).....	63
Figura C.3 - Índices PMV e PPD em função da temperatura do ar de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e <i>software</i> CBE)	64
Figura C.4 - Índices PMV e PPD em função da temperatura radiante de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e <i>software</i> CBE)	64
Figura C.5 - Índices PMV e PPD em função da velocidade do ar de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e <i>software</i> CBE)	65
Figura C.6 - Índices PMV e PPD em função da velocidade do ar de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e <i>software</i> CBE)	65
Figura C.7 - Índice PMV em função da variação percentual de cada parâmetro	66
Figura C.8 - Índice PPD em função da variação percentual de cada parâmetro	66

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Taxa metabólica para várias atividades (adaptado de EN ISO7730)	8
Quadro 2.2 – Valores de resistências térmicas de peças de vestuário corrente.....	13
Quadro 2.3 – Escala de conforto com sete níveis.....	15
Quadro 2.4 – Limites de aplicação do método de <i>Fanger</i>	15
Quadro 2.5 – Categorias de ambiente térmico (adaptado de EN ISO7730).....	19
Quadro 2.6 – Exemplos de critérios de projeto para diferentes tipos de espaços/edifícios (adaptado de EN ISO7730).....	19
Quadro 4.1 – Intervalos de aplicabilidade do método de <i>Fanger</i> definidos na norma ISO 7730.	38
Quadro 4.2 – Valores de referência utilizados no estudo paramétrico	41
Quadro 4.3 – Parâmetros analisados e respetiva gama de valores escolhida	42

SIMBOLOGIA

S	Armazenamento de calor corporal	$[\text{W}/\text{m}^2]$
M	Taxa de metabolismo	$[\text{W}/\text{m}^2]$
W	Trabalho mecânico exterior	$[\text{W}/\text{m}^2]$
E	Transferência de calor por evaporação na pele	$[\text{W}/\text{m}^2]$
E_{res}	Transferência de calor por evaporação na respiração	$[\text{W}/\text{m}^2]$
C_{res}	Transferência de calor por convecção na respiração	$[\text{W}/\text{m}^2]$
C	Transferência de calor por convecção	$[\text{W}/\text{m}^2]$
R	Transferência de calor por radiação	$[\text{W}/\text{m}^2]$
W	Transferência de calor por condução	$[\text{W}/\text{m}^2]$
A_{du}	Área da superfície corporal de <i>DuBois</i>	$[\text{m}^2]$
W_{b}	Massa corporal	$[\text{kg}]$
H_{b}	Altura do corpo	$[\text{m}]$
η	Rendimento do corpo humano	$[\%]$
E_{d}	Transferência de calor por evaporação devido à difusão	$[\text{W}/\text{m}^2]$
E_{sw}	Transferência de calor por evaporação devido à transpiração	$[\text{W}/\text{m}^2]$
λ	Calor latente da água à temperatura da pele	$[\text{J}/\text{kg}]$
μ	Coefficiente de permeabilidade da pele	$[\text{kg}/(\text{s m}^2 \text{ Pa})]$
p_{sk}	Pressão do vapor de água à temperatura da pele	$[\text{Pa}]$
p_{a}	Pressão parcial do vapor de água	$[\text{Pa}]$
$\dot{m}_{\text{a, res}}$	Ventilação pulmonar	$[\text{kg ar seco}/\text{s}]$
$W_{\text{a, ex}}$	Humidade absoluta do ar expirado	$[\text{kg vapor de água}/\text{kg ar seco}]$
W_{a}	Humidade absoluta do ar ambiente	$[\text{kg vapor de água}/\text{kg ar seco}]$
$C_{\text{p,a}}$	Calor específico de ar quente a uma pressão constante	$[\text{J}/(\text{kgK})]$
t_{ex}	Temperatura do ar expirado	$[\text{°C}]$
t_{a}	Temperatura do ar	$[\text{°C}]$
f_{cl}	Fator da área vestida	$[\text{adimensional}]$
h_{c}	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre o vestuário e o ar	$[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$

t_{cl}	Temperatura exterior do vestuário	[°C]
v_{ar}	Velocidade do ar relativa	[m/s]
A_{eff}	Área radiante efetiva do corpo	[m ²]
ε	Emissividade da superfície exterior do corpo vestido	[adimensional]
σ	Constante de <i>Stefan Boltzmann</i>	[W/m ² /K ⁴]
t_r	Temperatura média radiante	[°C]
t_i	Temperatura de uma superfície isotérmica genérica	[°C]
F_{p-i}	Fator de forma entre a pessoa e a superfície i	[adimensional]
T_u	Intensidade da turbulência	[adimensional]
I_{cl}	Isolamento facultado pelo vestuário	[clo]
h_c	Coefficiente de troca de calor por convecção	[W/(m ² °C)]
t_{sk}	Valor da temperatura exterior da pele	[°C]
P_a	Pressão de vapor de água	[Pa]

ABREVIATURAS

PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
CBE	<i>Center of the Built Environment</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
EN	Norma Europeia
CEN	Comité Europeu de Normalização
DR	<i>Draught Rate</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
PCM	<i>Phase Change Material</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
TABS	<i>Thermally Activated Building Systems</i>
EUA	Estados Unidos da América
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado um breve enquadramento do tema, os objetivos e a metodologia adotada. Apresenta-se ainda a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento do tema

Desde a antiguidade que as relações do homem com o ambiente circundante são estudadas, por forma a favorecer uma realização mais eficaz das tarefas inerentes ao seu quotidiano. As condições naturais do ambiente foram adaptadas tendo em vista maximizar as condições de conforto, higiene e segurança dos seus ocupantes. Sendo o tema do conforto térmico há muito estudado e conhecido, atualmente esta problemática encontra-se muito presente na preocupação de garantia de satisfação de condições de conforto em espaços habitacionais, de trabalho e lazer. Este facto deve-se à dependência elevada entre o nível de conforto térmico e o desempenho humano, assim como aquela que se verifica ao nível de ruído, iluminação e qualidade do ar dos espaços interiores, que podem afetar de forma significativa o grau de desempenho e bem-estar dos seus utilizadores.

Motivado pelo aumento do padrão de qualidade vida e das exigências crescentes de conforto dos ocupantes, principalmente conforto térmico (aquecimento e arrefecimento), nos países desenvolvidos, o consumo de energia nos edifícios tem vindo a aumentar ao longo dos anos. Uma das consequências inerentes ao exagerado consumo de energia é o recurso a combustíveis fósseis que contribui para o aquecimento global. Surge então a necessidade de limitar o consumo de energia principalmente ao nível da construção e dos edifícios, assim estudos de avaliação da eficiência energética tornam-se cada vez mais indispensáveis.

Os estudos de eficiência energética avaliam as condições necessárias à conceção de um ambiente térmico adequado e confortável à sua ocupação. A performance individual dos ocupantes apresenta melhores resultados quando realizada em condições favoráveis de conforto térmico, aumentando o grau de satisfação e bem-estar pessoal. Através destes estudos conseguem-se gerar espaços com condições satisfatórias de conforto térmico e ao mesmo tempo reduzir os consumos de energia, bem como minimizar perdas desnecessárias.

“Em Portugal morre-se de frio” (Soeiro, 2016), onde a notícia aponta que Portugal é provavelmente o país da Europa onde as pessoas passam mais frio nos meses de inverno, isto

porque parte substancial da população vive em casas que são energeticamente ineficientes e o preço da energia elétrica ser elevado.

A União Europeia tem vindo a desenvolver um conjunto de metas de acordo com a Diretiva 2002/91/CE de 16 de dezembro e da sua posterior reformulação, a Diretiva n.º 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativas à promoção do aumento do desempenho energético dos edifícios visando que, os edifícios novos e reabilitados possuam necessidades energéticas quase nulas a partir de 2020 e que o seu provimento seja feito a partir de energias renováveis tais como eólica, solar e geotérmica.

Portugal transpôs a diretiva europeia para o decreto de lei nº118/2013 de 20 de agosto, o qual se prevê alcançar melhorias de eficiência energética e conforto térmico nos edifícios aplicando um único diploma o sistema de certificação energética dos edifícios (SCE), do qual faz parte o regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH, 2013) e o regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços (RECS).

O conforto térmico no interior de edifícios é uma condição muito relevante para alcançar um bem-estar em termos de saúde, produtividade e consequentemente longevidade. O conforto térmico pode ser medido e exigí-lo é um direito dos cidadãos, sendo portanto necessário estabelecer um patamar mínimo exigido em todos os edifícios.

1.2 Motivação e objetivos

O presente trabalho tem como finalidade analisar a sensibilidade dos índices de conforto térmico PMV-PPD aos principais parâmetros que o influenciam, tais como: o nível metabólico, o vestuário, a temperatura do ar, a temperatura radiante e a pressão de vapor de água.

Pretende-se apresentar uma abordagem pedagógica acerca da importância do conforto térmico, demonstrando como é desenvolvida a equação de balanço térmico no corpo humano, os parâmetros individuais e ambientais que o influenciam, como é caracterizado o conforto e desconforto, assim como, uma revisão sobre a normalização existente.

Outro dos objetivos principais é a comparação das duas abordagens existentes para a previsão do conforto térmico: abordagem racional e abordagem adaptativa. Serão comparadas as principais diferenças existentes entre as duas abordagens e quais as condições em que cada delas uma pode ser aplicada.

Por fim, pretende-se efetuar um estudo paramétrico utilizando duas ferramentas de cálculo, fixando um cenário de referência próximo da situação de conforto ideal e procedendo-se à modificação de cada um dos parâmetros de entrada, dentro de um intervalo previamente definido e com um determinado incremento. Para este efeito utilizar-se-á uma folha de cálculo em MS Excel, desenvolvida pelo Professor Doutor Manuel Gameiro da Silva no Departamento de Engenharia Mecânica da FCTUC (Gameiro da Silva, 2015), que tem por base a metodologia desenvolvida por *Fanger* e proposta na norma ISO 7730, assim como, um *software* desenvolvido pelo CBE (*Center of the Built Environment*) (CBE@2016) que permite efetuar uma comparação entre a norma Americana ASHRAE-55 (2010) e a norma Europeia EN-15251 (2007).

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, sobre os quais se apresenta de seguida uma breve descrição elucidativa.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento geral, procurando-se justificar o tema a um nível ambiental e de desempenho humano. Também são explanados os objetivos e a organização da dissertação.

No segundo capítulo faz-se uma revisão sobre o conceito de conforto térmico, como é desenvolvida a equação de balanço térmico no corpo humano, os índices de conforto e quais as variáveis de entrada. Faz-se referência aos fatores que influenciam o equilíbrio térmico e a existência de um conforto térmico global ou desconforto térmico local. Por último são apresentadas algumas normas de referência do conforto térmico.

O terceiro capítulo é dedicado à revisão bibliográfica do conforto térmico, abordando trabalhos realizados por autores nacionais e internacionais. É feita uma comparação entre o nível de conforto térmico nos edifícios e as implicações no aumento do consumo de energia. Efetua-se uma explicação acerca das duas abordagens de conforto térmico existentes, a abordagem racional e a abordagem adaptativa e apresenta-se uma comparação entre elas. Por fim faz-se uma breve referência a algumas estratégias bioclimáticas e sistemas passivos de aquecimento/arrefecimento.

O capítulo quatro faz referência ao estudo paramétrico, realizado com o objetivo de analisar a variação de sensibilidade dos índices de conforto térmico PMV-PPD, através da modificação dos parâmetros de entrada para o seu cálculo. Para a realização do estudo foi utilizada uma folha de cálculo desenvolvida pelo Professor Doutor Manuel Gameiro da Silva no Departamento de Engenharia Mecânica da FCTUC, que tem por base a metodologia

desenvolvida por *Fanger* e proposta na norma ISO 7730, assim como, um *software* desenvolvido pelo CBE (*Center of the Built Environment*) (CBE@ 2016) que permite efetuar uma comparação entre a norma americana ASHRAE-55 e a norma europeia EN-15251.

No capítulo cinco, apresentam-se os resultados obtidos após o estudo paramétrico através das duas ferramentas, assim como a discussão dos mesmos.

No sexto capítulo é apresentada a síntese conclusiva deste trabalho, assim como propostas/sugestões de trabalhos futuros.

2 CONFORTO TÉRMICO

No presente capítulo efetua-se uma apresentação geral do tema. Define-se o termo de conforto térmico, como se pode efetuar a sua quantificação e quais os principais fatores que o influenciam. Também se apresenta uma visão global da normalização existente aplicada.

2.1 Introdução

Conforto térmico é definido como sendo o “estado de espírito em que o indivíduo expressa satisfação correlativamente ao ambiente térmico que o rodeia” (Norma ASHRAE, 2004). Através da definição apresentada é de fácil compreensão que o conceito de conforto térmico é abstrato, no sentido que depende de condições fisiológicas quantificáveis e psicológicas que variam de pessoa para pessoa e se tornam de difícil quantificação e complexidade.

O conforto térmico é alcançado através da condição de homeotermia no corpo humano, a qual é assegurada pelo mecanismo de termorregulação. A temperatura corporal interna deve manter-se nos 37°C e a regulação é atingida graças à termogénese e termodispersão do calor interno. Já a temperatura externa pode variar entre um valor máximo de 45°C e um valor mínimo que depende da parte do corpo (Alfano *et al.*, 2010).

A sensação de conforto térmico é alcançada quando se atinge um conforto térmico geral, correlacionando o corpo como um todo e não ocorrem desconfortos térmicos locais associados a transferências de calor por partes do corpo (Alfano *et al.*, 2010).

O estudo do conforto térmico pretende analisar e determinar quais as condições essenciais para a avaliação e conceção de um ambiente termicamente adequado às atividades humanas. A relevância do estudo de conforto térmico assenta nos seguintes fatores:

- 1- Bem-estar humano no que refere à sensação de conforto térmico.
- 2- Desempenho humano em atividades manuais, intelectuais e percetivas.
- 3- Conservação de energia no interior de edifícios, que pode ser atingida através de um estudo aprofundado de conforto térmico, sabendo assim quais as necessidades energéticas necessárias aos seus ocupantes e evitando-se desperdícios desnecessários.

2.2 Trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente

O corpo humano comporta-se como um sistema termodinâmico que efetua trocas de energia com o meio envolvente. Para se alcançar a neutralidade térmica é necessário que o balanço energético entre o calor produzido pelo corpo e o calor cedido ao meio exterior seja atingido.

Trocas de calor podem realizar-se através das seguintes formas:

- Convecção: caracteriza-se pela troca de calor sensível entre o corpo (pele e roupa) e o ar ambiente;
- Radiação: troca de calor sensível entre a superfície do corpo e as superfícies de contacto (paredes, objetos opacos);
- Condução: troca de calor sensível entre a superfície do corpo e as de contacto (cadeira, chão, mesa);
- Evaporação: troca de calor latente por evaporação de água do corpo humano. As trocas por evaporação assumem duas formas, uma respeitante à perspiração insensível que é a evaporação contínua de água na superfície da pele e dos pulmões. A outra forma de evaporação é através da transpiração associada à evaporação de água e gorduras da pele associada à produção do suor.

Nos três primeiros modos de trocas de calor o seu sentido depende do sentido do gradiente térmico, pelo contrário o fluxo de calor por evaporação é sempre uma perda de calor do corpo humano para o ambiente circundante (Patrício e Santos, 2000).

Se o calor perdido for superior ao calor gerado a sensação será de frio; se pelo contrário o calor gerado for superior ao perdido a sensação será de calor. Assim, quando se verifica um aumento da temperatura exterior, a temperatura é reduzida a partir de processos de vasodilatação e produção de suor. Para uma diminuição da temperatura exterior, o cérebro envia uma mensagem nervosa pelos nervos motores e ocorre vasoconstrição e contração muscular de forma a reduzir as perdas de calor.

2.3 Equação de balanço térmico

O conforto térmico é atingido através da neutralidade térmica. Para determinar o estado térmico do corpo humano aplica-se a seguinte equação de balanço térmico:

$$S = M - W - E - E_{res} - C_{res} - C - R - K \quad (1)$$

onde os diferentes termos têm o significado seguinte:

S – armazenamento de calor corporal (W/m^2)

M – taxa de metabolismo (W/m^2)

- W – trabalho mecânico exterior (W/m^2)
 E – transferência de calor por evaporação na pele (W/m^2)
 E_{res} – transferência de calor por evaporação na respiração (W/m^2)
 C_{res} – transferência de calor por convecção na respiração (W/m^2)
 C – transferência de calor por convecção (W/m^2)
 R – transferência de calor por radiação (W/m^2)
 K – transferência de calor por condução (W/m^2)

A equação de balanço térmico pode ser representada através da seguinte ilustração:

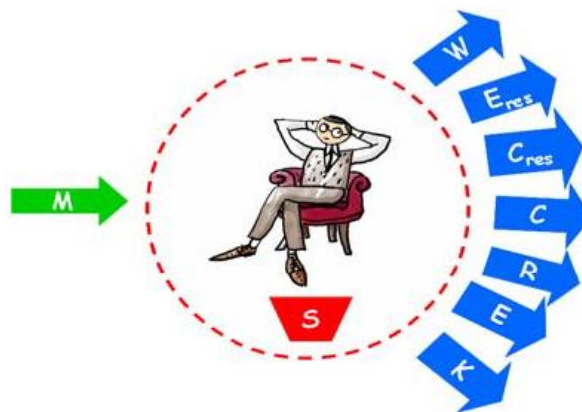


Figura 2.1 – Balanço térmico no corpo humano (Alfano *et al.*, 2010)

Cada um dos termos da equação está relacionado com a unidade da área de superfície corporal, para reduzir variações ao nível individual referentes ao metabolismo, que é usualmente chamada de área da superfície corporal de *DuBois* (m^2):

$$A_{Du} = 0.202W_b^{0.425}H_b^{0.725} \quad (2)$$

onde:

W_b – massa corporal (kg)

H_b – altura do corpo (m)

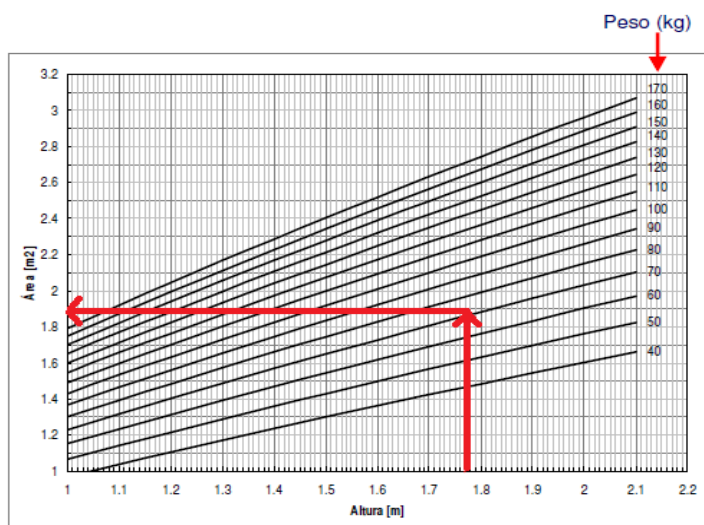


Figura 2.2 – Relação entre o peso/altura e área de *DuBois* (Oliveira, 2008)

O valor de S quando é igual a zero representa a situação em que o corpo se encontra em equilíbrio térmico. Quando o seu valor é maior do que zero representa um aquecimento ou quando é menor do que zero corresponde a uma sensação de frio.

O metabolismo é o processo que permite ao organismo transformar elementos orgânicos em energia térmica e que depende da atividade física do indivíduo. A energia metabólica é representada por unidade de área e de tempo (W/m^2), sendo expressa na unidade “met” (unidade de medida da energia do metabolismo), onde $1\text{met}=58.2\text{ W/m}^2$ e que é igual à energia produzida por uma pessoa sentada em repouso por unidade de área superficial do corpo. A estimativa da taxa metabólica pode ser feita através do Quadro 2.1 adaptado da ISO 7730 (2006) ou a partir de medição direta onde os métodos de medição se encontram enunciados na EN 8996.

Quadro 2.1 – Taxa metabólica para várias atividades (adaptado de EN ISO 7730)

Atividade física	Taxa de metabolismo	
	W/m ²	met
Repouso, deitado	46	0,8
Repouso, sentado	58	1
Repouso, em pé	70	1,2
Atividade ligeira, sentado (escritório, escola, laboratório)	70	1,2
Atividade ligeira, em pé (Compras, indústria ligeira)	93	1,6
Atividade média (vendedor, trabalho doméstico, trabalho com maquinaria)	116	2
Atividade pesada (trabalho com maquinaria pesada)	174	3
Andar à velocidade de 2 Km/h	110	1,9
Andar à velocidade de 3 Km/h	140	2,4

Quanto ao trabalho mecânico exterior este é relativo ao dispêndio de energia pelo corpo humano quando este se encontra em esforço físico. Na maioria das situações é assumido que o trabalho mecânico é igual a zero, pois ele é normalmente desprezável na equação de equilíbrio em situações de conforto térmico. Podemos considerar o rendimento (η) do corpo humano como sendo a razão entre o trabalho mecânico e a taxa metabólica, assim na expressão de balanço térmico a diferença (M-W) vem:

$$(M-W) = M (1-\eta) \quad (3)$$

A transferência de calor por evaporação pode dar-se por difusão E_d ou devido à transpiração E_{sw} quando o suor é produzido e posteriormente evaporado à superfície.

$$E_d = \lambda \mu (p_{sk} - p_a) \quad (4)$$

onde:

λ – calor latente da água à temperatura da pele (J/kg)

μ – coeficiente de permeação da pele (kg/(s m² Pa))

p_{sk} – pressão do vapor de água à temperatura da pele (Pa)

p_a – pressão parcial do vapor de água (Pa)

$$E_{sw} = 0.42 [(M - W) - 58.2] \quad (5)$$

A transferência de calor por evaporação na respiração (E_{res}) e a transferência de calor por convecção na respiração (C_{res}) estão relacionadas com as diferenças em termos da humidade absoluta e da temperatura do ar expirado e o ambiente.

$$E_{res} = \lambda \dot{m}_{a, res} (W_{a, ex} - W_a) \quad (6)$$

onde:

$\dot{m}_{a, res}$ - ventilação pulmonar (kg ar seco/s)

$W_{a, ex}$ – humidade absoluta do ar expirado (kg vapor de água/ kg ar seco)

W_a – humidade absoluta do ar ambiente (kg vapor de água/ kg ar seco)

$$C_{res} = \dot{m}_{a, res} C_{p,a} (t_{ex} - t_a) \quad (7)$$

onde:

$C_{p,a}$ – calor específico de ar quente a uma pressão constante (J/(kgK))

t_{ex} – temperatura do ar expirado (°C)

t_a – temperatura do ar (°C)

A transferência de calor convectiva, C , ocorre através do contacto com o ar em correntes devido ao escoamento que rodeia o indivíduo, ou seja se a temperatura do ar do espaço for inferior ou superior à temperatura da pele do ocupante este perderá ou ganhará calor.

$$C = f_{cl} h_c A_b (t_{cl} - t_a) \quad (8)$$

onde:

f_{cl} – fator da área vestida (adimensional)

h_c – coeficiente de transferência de calor por convecção entre o vestuário e o ar (W/m^2K)

t_{cl} – temperatura exterior do vestuário ($^{\circ}C$)

O termo h_c se for calculado através de convecção natural, ou seja, a transferência de calor é realizada apenas por diferenças de densidade do fluido, toma a forma:

$$h_c = 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} \quad (9)$$

Se o termo h_c for calculado através de convecção forçada, ou seja, a transferência de calor é efetuada através de uma fonte externa como uma bomba ou ventilador, toma a seguinte forma:

$$h_c = 12.1 \sqrt{v_{ar}} \quad (10)$$

onde:

v_{ar} – velocidade do ar relativa (m/s)

A transferência de calor por radiação, R , é aquela que acontece através da propagação de ondas eletromagnéticas entre o corpo humano e os corpos que estão à sua volta (paredes, mobiliário). Se o corpo humano estiver mais quente do que os corpos que se encontram à sua volta, existe uma perda de calor. Se pelo contrário os corpos que rodeiam o corpo humano se encontrarem mais quentes existe um ganho de energia por parte do indivíduo.

$$R = A_{eff} \varepsilon \sigma [(t_{cl} + 273) - (t_r + 273)^4] \quad (11)$$

onde:

A_{eff} – área radiante efetiva do corpo¹ (m^2)

ε – emissividade da superfície exterior do corpo vestido, adotado o valor de 0.97 (adimensional)

¹ $A_{eff} = A_{Du} \times f_{cl} \times f_{eff}$

f_{eff} – é o fator da área de radiação efetiva. É a relação entre a área de radiação efetiva do corpo vestido e a área da superfície do corpo vestido, variando os seus valores de acordo com a posição do indivíduo (sentado ou em pé).

σ – constante de *Stefan Boltzmann*, adotado o valor de $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m²/K⁴)

t_r – temperatura média radiante (°C)

Pode-se definir temperatura média radiante como a temperatura uniforme de um espaço opaco imaginário, onde um ocupante permutará a mesma quantidade de calor radiante que no espaço real não uniforme (Alfano et al., 2010) . Pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$t_r = \sum t_i \times F_{p-i} \quad (12)$$

t_i – temperatura de uma superfície isotérmica genérica (parede, sujeito) visível ao sujeito.

F_{p-i} – fator de forma entre a pessoa e a superfície i (adimensional)

No que diz respeito à transferência de calor por condução esta ocorre através de trocas de calor entre partículas, ou seja, entre o corpo humano e os objetos sólidos com os quais se encontra em contacto. Este valor é normalmente controlado pelo nível de isolamento conferido pelo vestuário.

2.4 Equilíbrio térmico

Como já foi referido anteriormente para se alcançar o conforto térmico é necessário que o balanço energético do corpo humano seja nulo. Em determinadas situações para manter esse equilíbrio é necessário recorrer aos mecanismos de termorregulação.

A termorregulação consiste, num sistema de respostas automáticas e voluntárias que regulam as transferências de calor que são efetuadas entre o corpo humano e o ambiente, assim como a produção de energia interna que mantém o equilíbrio térmico (Patrício e Santos, 2000).

Mecanismos principais de termorregulação:

- Vasoconstrição e vasodilatação;
- Metabolismo;
- Transpiração.

Para uma diminuição da temperatura da pele verifica-se a iniciação do processo de vasoconstrição, diminuição do diâmetro dos vasos sanguíneos, e se este processo não for suficiente para aumentar a temperatura corporal inicia-se o processo de arrepios e tremores involuntários.

Quando a situação é oposta e a temperatura da pele aumenta inicia-se um processo inverso, que consiste numa vasodilatação das zonas superficiais traduzindo-se numa perda de calor. Como este processo normalmente não é suficiente para diminuir as perdas térmicas, inicia-se

o processo de transpiração que aumenta as trocas de calor latente entre a superfície da pele e o ambiente.

Quando as condições ambientais e individuais determinam um estado de equilíbrio térmico sem ativar o mecanismo de termorregulação, diz-se que foi alcançada uma situação de equilíbrio térmico ou conforto térmico (Patrício e Santos, 2000).

2.5 Fatores que influenciam o equilíbrio térmico

As sensações térmicas do ser humano referem-se principalmente ao estado térmico global e as variáveis que têm maior influência nas condições térmicas e conseqüentemente no conforto térmico das pessoas são:

Fatores individuais:

- Taxa de metabolismo (ou nível de atividade física);
- Isolamento do vestuário.

Fatores ambientais:

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

A condição de conforto térmico pode ser alcançada através de combinações diversas destes parâmetros (Alfano *et al.*, 2010).

2.5.1 Metabolismo

O metabolismo é um parâmetro que já foi explicado anteriormente, aquando a apresentação da equação de balanço térmico.

2.5.2 Vestuário

O vestuário é a primeira camada protetora da envolvente do corpo humano, funcionando como uma resistência térmica em relação às trocas de calor entre o corpo humano e o meio envolvente (Patrício e Santos, 2000).

Assim, o vestuário pode ser quantificado através da sua resistência térmica (I_{cl}) e a unidade utilizada é designada “clo”. Sendo 1 clo igual a $0.55m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$. O valor mais baixo de resistência térmica corresponde a uma pessoa sem roupa e é 0 clo, o valor mais alto é dado para o vestuário correspondente a um esquimó com calças e casaco de peles de 4 clo (Patrício e Santos, 2000).

Quadro 2.2 – Valores de resistências térmicas de peças de vestuário corrente.

Vestuário	ICL (clo)	Vestuário	ICL (clo)
Roupa interior		Vestido	
Camisola de alças	0,04	de verão	0,2
Camisola manga curta	0,09	de inverno	0,40-0,70
Camisola manga comprida	0,12	Blusão	
Cueca e soutien	0,03	de verão	0,15
Boxer	0,05	de inverno	0,29
Camisas/blusas		Blazer	
de verão, manga curta	0,15	de verão	0,25
de verão, manga comprida	0,20/0,15	de inverno	0,35
de inverno, manga curta	0,25	colete	0,12
de inverno, manga comprida	0,3	casaco	0,6
Calças		<i>Parka</i>	0,7
Calções	0,06	Meias	
de verão	0,2		
de inverno	0,28	Finas	0,02
de meia estação	0,25	<i>Collants</i>	0,01
Camisolas		Nylon	0,03
Sem mangas	0,12	Sapatos	
de Verão	0,2	Sola fina	0,02
de inverno	0,35	Sola grossa	0,04
de meia estação	0,28	Botas	0,1

O valor total da resistência térmica da roupa de uma pessoa é dado, através da soma dos valores das resistências térmicas individuais de cada peça de roupa.

2.5.3 Temperatura do ar

Deve ser tida em consideração para o cálculo das trocas de calor por convecção entre o indivíduo e o ambiente.

2.5.4 Temperatura média radiante

A temperatura média radiante é um parâmetro que já foi explicado anteriormente, aquando a apresentação da equação de balanço térmico.

2.5.5 Velocidade do ar

É uma grandeza de difícil quantificação, devido às rápidas flutuações que sofre ao nível de intensidade e direção. Intervém nas trocas de calor por convecção e evaporação ao nível do corpo humano (Patrício e Santos, 2000).

2.5.6 Humidade absoluta do ar

Influencia as trocas de calor por evaporação ao nível da pele. Quando a humidade do ar é elevada, a evaporação do suor é reduzida, causando desconforto principalmente em locais de temperatura elevada. Em ambientes moderados essa influência torna-se pequena.

2.6 Sondas para a medição dos parâmetros ambientais

Na medição dos parâmetros ambientais descritos anteriormente (temperatura do ar; temperatura média radiante; velocidade do ar e humidade absoluta do ar) são habitualmente utilizadas sondas.

Para a medição da temperatura do ar, as sondas utilizadas podem ser termómetros de dilatação ou elétricos e termomanómetros, sendo os mais utilizados os termomanómetros elétricos. Na medição da temperatura média radiante, é utilizado o termómetro de globo negro e a sonda de medição de assimetria de temperatura radiante, que se destina à medição de diferenças de temperatura em superfícies. A velocidade do ar é medida utilizando sensores, podendo ser utilizados anemómetros. Por fim, a humidade absoluta do ar é medida através de uma sonda, podendo ser um psicrómetro ou um transdutor de ponto de orvalho (Patrício e Santos, 2000).

2.7 Conforto térmico global

O conforto térmico global, como já foi referido, está relacionado com o conforto térmico do corpo humano como um todo, sendo influenciado maioritariamente pela variação dos fatores anteriormente descritos.

2.7.1 Índices de conforto térmico global

Foram desenvolvidos para tentar expressar sob a forma de um único parâmetro, os efeitos dos vários fatores ambientais, sobre as respostas fisiológicas e sensoriais de um indivíduo (Patrício e Santos, 2000).

O índice PMV é definido como o voto médio previsível (*Predicted Mean Vote*), foi desenvolvido por *Fanger* e tem como objetivo estimar os valores médios da votação de um grupo de pessoas relativamente a um ambiente. As sensações térmicas são expressas numa escala de conforto de sete níveis, como se apresentam no quadro seguinte.

Quadro 2.3 – Escala de conforto com sete níveis

Voto	Sensação correspondente
3	Muito quente
2	Quente
1	Ligeiramente quente
0	Neutro
-1	Ligeiramente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Fanger estabeleceu os seus estudos através de experiências com um grande número de pessoas dentro de uma câmara climática, as quais foram entrevistadas sobre qual era a sensação térmica que estavam a ter durante as experiências.

Segundo a norma ISO 7730-1994, o índice é calculado através da seguinte expressão:

$$PMV = (0.303 \times e^{-0.036M} + 0.028) \times S \quad (13)$$

Para a aplicação da expressão, é recomendável que os fatores que influenciam o conforto térmico, anteriormente mencionados, se encontrem na seguinte gama de intervalos, ver Quadro 2.4, (Patrício e Santos, 2000).

Quadro 2.4 – Limites de aplicação do método de *Fanger*

Parâmetro	Símbolos	Valor	Unidade
Nível de metabolismo	M	0,8 a 4	met
Vestuário	ICL	0 a 2	clo
Temperatura do ar	Ta	10 a 30	°C
Temperatura radiante	Tr	10 a 40	°C
Velocidade do ar	Va	0 a 1	m/s
Pressão de vapor de água	pa	0 a 2,7	KPa

Adicionalmente *Fanger* propôs um outro indicador PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), que dá uma previsão da percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições térmicas, ou seja, pessoas que escolheriam os valores de +3, +2, -1, -2 da escala de conforto. Este índice pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)} \quad (14)$$

Também é possível determinar o índice PPD através da equação representada conforme ilustrado na Figura 2.3.

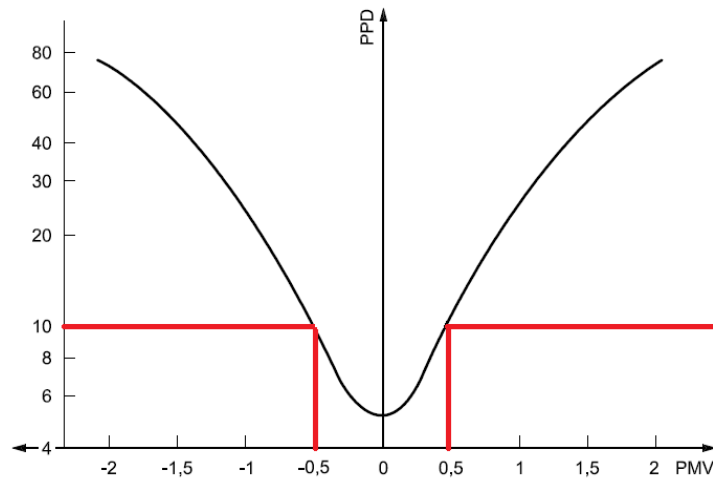


Figura 2.3 – Percentagem previsível de insatisfeitos (PPD) em função do voto médio previsível (PMV) (adaptado da EN ISO 7730, 2006)

Segundo a norma ISO 7730:2006, para que existam condições de conforto térmico, o índice PMV deve estar compreendido entre -0,5 e +0,5. O que corresponde a ter um índice PPD inferior a 10%, ou seja 90% dos ocupantes sentem-se confortáveis.

2.8 Desconforto térmico local

O cálculo dos índices PMV e PPD referem-se à avaliação do conforto ou desconforto global do corpo, no entanto esta avaliação não é suficiente, pois o desconforto térmico pode dever-se a um aquecimento ou arrefecimento indesejado de uma parte do corpo. Uma pessoa pode sentir-se confortável a uma temperatura ambiente, mas sentir um incómodo relativamente a uma corrente de ar ou uma temperatura demasiado elevada na cabeça (Patrício e Santos, 2000).

O desconforto térmico local caracteriza-se pelos seguintes fatores:

- Correntes de ar;
- Diferenças de temperatura de ar na vertical;
- Pavimentos quentes ou frios;
- Assimetria de temperatura radiante.

2.8.1 Índices de desconforto térmico local

Correntes de ar

Uma corrente de ar é sentida pelo indivíduo através de uma massa de ar com velocidade excessivamente elevada, que causa um arrefecimento da parte do corpo exposta. A

percentagem de pessoas insatisfeitas devido ao arrefecimento por correntes de ar pode ser calculada através da expressão DR (*draught rate*) (Alfano *et al.*, 2010).

$$DR = (34 - t_a) \cdot (v_a - 0.05)^{0.62} \cdot (0.37 \cdot v_a \cdot T_u + 3.14) \quad (15)$$

onde:

t_a – temperatura do ar local (°C) entre os limites 20 a 26°C.

v_a – velocidade média do ar local (m/s)

T_u – intensidade da turbulência (adimensional)

Diferenças de temperatura do ar na vertical

As diferenças de temperatura do ar na vertical, são caracterizadas pela diferença de temperaturas do ar entre a cabeça e os tornozelos.

A figura seguinte, Figura 2.4, ilustra a percentagem de insatisfeitos PD em função da diferença da temperatura do ar na vertical (Alfano *et al.*, 2010).

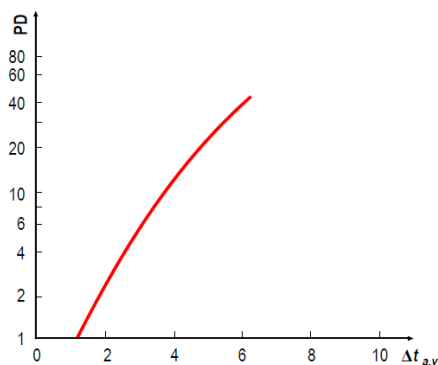


Figura 2.4 – Percentagem de insatisfeitos (PD) em função da diferença de temperatura do ar na vertical entre a cabeça e os tornozelos (Alfano *et al.*, 2010)

Temperatura dos pavimentos

A temperatura do pavimento pode conduzir a um desconforto localizado, pois se o pavimento estiver demasiado quente ou frio, vai provocar um desconforto no indivíduo por este sentir os pés muito quentes ou muito frios (Patrício e Santos, 2000).

A Figura 2.5 ilustra a percentagem de insatisfeitos em função da temperatura do pavimento.

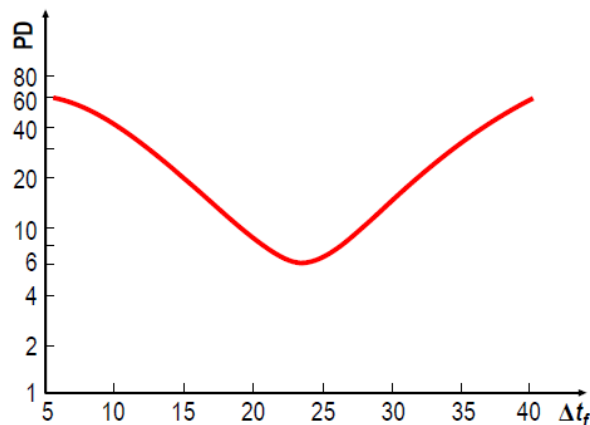


Figura 2.5 – Percentagem de insatisfeitos (PD) em função da temperatura do pavimento (Alfano *et al.*, 2010)

Assimetria de temperatura radiante

Quando um indivíduo se encontra sentado de costas para um vão envidraçado, numa sala aquecida e sente frio nas costas, o desconforto localizado sentido é uma assimetria de temperatura radiante (Patrício e Santos, 2000).

A percentagem de insatisfeitos em função da assimetria da temperatura radiante, causada por um teto quente, parede fria, teto frio ou parede quente, encontra-se representada na figura seguinte.

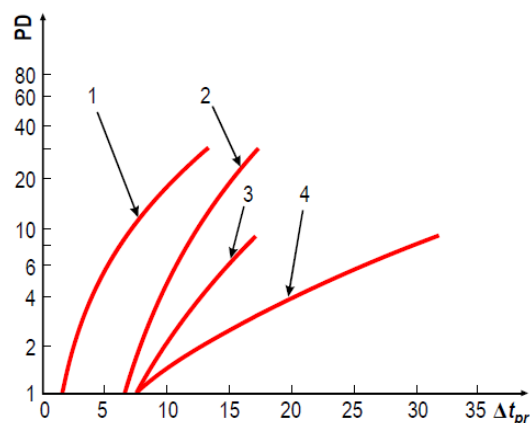


Figura 2.6 – Percentagem de insatisfeitos (PD) em função da assimetria da temperatura radiante °C, para o teto quente (1), parede fria (2), teto frio (3) e parede quente (4) (Alfano *et al.*, 2010)

Para a medição dos fatores que provocam o desconforto térmico localizado, são utilizados sensores de temperatura do ar, velocidade do ar e temperatura radiante, assim como, uma sonda para medir a temperatura de superfícies (Patrício e Santos, 2000). Os tipos de sondas já foram anteriormente descritas no subcapítulo 2.6.

2.9 Classificação de ambientes

Segundo a norma EN 7730:2006 *apud* (Alfano *et al.*, 2010) os ambientes térmicos são classificados segundo quatro categorias: A, B, C e uma D quando o ambiente não se inclui em nenhuma das anteriores, onde todos os critérios devem ser satisfeitos concomitantemente para cada categoria, ver Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Categorias de ambiente térmico (adaptado de EN ISO7730)

Categoria	Conforto térmico global		Desconforto térmico local			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				Diferenças de temperatura do ar na vertical	Temperatura dos Pavimentos	Assimetria de temperatura radiante
A	<6	-0.2<PMV<+0.2	<10	<3	<10	<5
B	<10	-0.5<PMV<+0.5	<20	<5	<10	<5
C	<15	-0.7<PMV<+0.7	<30	<10	<15	<10

Cada categoria prescreve uma percentagem máxima de insatisfeitos para um conforto térmico global (PPD), e um valor da percentagem de insatisfeitos para cada um dos tipos de desconforto térmico local.

Quadro 2.6 – Exemplos de critérios de projeto para diferentes tipos de espaços/edifícios (adaptado de EN ISO 7730)

Tipo de espaço/edifício	Atividade (W/m ²)	Categoria	Temperatura operativa (°C)		Máxima velocidade média do ar (m/s)						
			Verão	Inverno	Verão	Inverno					
Escritório	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,1					
Sala de conferências											
Auditório											
Restaurante	81	B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16					
Sala de aulas											
Infantário											
Grande armazém	93	C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21					
							A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,1
C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19							
Grande armazém	93	A	23,5 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13					
							B	23,5 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,2	0,15

Alguns requisitos são difíceis de atingir na prática e devido à precisão da instrumentação para medir os parâmetros de entrada, pode tornar-se difícil verificar se o valor de PMV se encontra de acordo com a categoria A ($-0.2 < PMV < +0.2$). Assim a verificação pode basear-se na faixa de temperatura operativa equivalente, conforme especificado na norma (EN ISO 7730, 2006), ver Quadro 2.6.

2.10 Normalização

As principais normas dedicadas ao conforto térmico no interior de edifícios foram redigidas pela ISO (*International Organization for Standardization*) e pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*).

2.10.1 ISO 7730:2005

A norma utiliza o método desenvolvido por *Fanger*, para prever a sensação de conforto térmico a pessoas expostas a ambientes térmicos moderados. Permite o cálculo e interpretação dos parâmetros PMV e PPD. A sua avaliação de conforto térmico assenta na avaliação de parâmetros físicos do ambiente – temperatura do ar, velocidade, humidade e temperatura média radiante – assim como de parâmetros pessoais – vestuário, atividade desenvolvida. É de aplicação a homens e mulheres saudáveis, expostas a ambientes internos, na conceção de novos ambientes ou a ambientes existentes. A norma foi desenvolvida especificamente para ser aplicada a ambientes de trabalho, mas pode ser aplicável a outro tipo de ambientes.

2.10.2 ISO 7726:1998

Esta norma define os parâmetros físicos e como se efetua a medição dos mesmos para os ambientes térmicos. Para a análise do conforto térmico interno, em ambientes moderados ou stress térmico em ambientes extremos, a norma descreve as características dos equipamentos e quais os métodos de medição dos fatores físicos (Almeida, 2010).

2.10.3 ISO 8996:2004

A norma apresenta a metodologia usada para a determinação da taxa de calor metabólico, onde para o cálculo da taxa de metabolismo (M), é aplicada a equação de balanço térmico entre o corpo e o ambiente (Almeida, 2010).

2.10.4 ISO 10551:1995

A norma permite a construção e uso de escalas de julgamento, que posteriormente permitem a comparação de dados, sobre fatores subjetivos de conforto térmico (Almeida, 2010).

2.10.5 ISO 9920:2007

A norma apresenta métodos que permitem estimar qual a resistência para diferentes indumentárias, existindo perdas de calor sensível e latente em condições de regime permanente (Almeida, 2010).

2.10.6 ANSI/ASHRAE Standard 55 2004

A norma tem como objetivo a especificação da combinação dos fatores ambientais, térmicos interiores e pessoais, que conduzem a condições ambientais térmicas aceitáveis para os seus ocupantes em espaço interior.

Esta norma adota uma abordagem analítica, através dos índices de conforto térmico PMV e PPD, à semelhança da norma ISO 7730:2005.

De acordo com a norma, a gama de temperaturas operativas é apresentada na Figura 2.7 e refere-se a uma aceitabilidade dos ocupantes de 80%. Esta gama é baseada no critério de 10% de insatisfeitos com o conforto térmico global, baseado no índice PMV-PPD, mais 10% adicionais de insatisfeitos com o conforto térmico local.

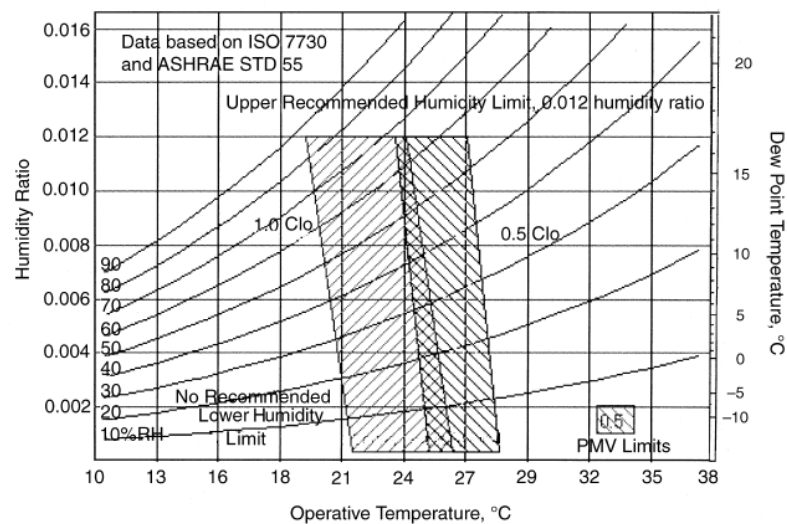


Figura 2.7 – Intervalo aceitável da temperatura operativa e humidade para espaços onde os ocupantes têm um nível metabólico entre 1.0 met e 1.3 met, e a roupa proporciona entre 0.5 clo e 1.0 clo de isolamento térmico (norma ASHRAE, 2004)

A norma também apresenta um modelo adaptativo, alvo de um extenso programa de desenvolvimento para a avaliação de conforto térmico, sendo apenas de aplicação a edifícios naturalmente ventilados, ou seja, que não dispõem de equipamentos de climatização. A Figura 2.8 apresenta a relação entre os intervalos de conforto para as temperaturas operativas interiores em função das temperaturas médias mensais exteriores.

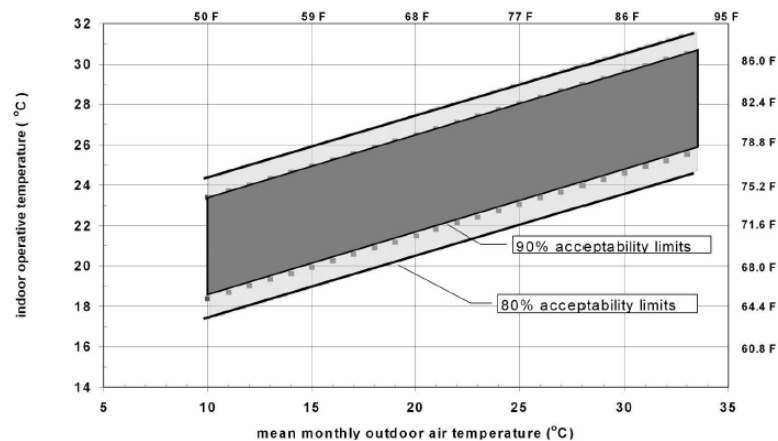


Figura 2.8 – Intervalo aceitável de temperaturas operativas para espaços não climatizados (norma ASHRAE, 2004)

2.10.7 EN 15251:2006

Esta norma europeia expõe duas metodologias para a análise de conforto térmico. A primeira é analítica e baseada nos índices PMV e PPD e a segunda é baseada num modelo adaptativo desenvolvido em vários países europeus.

A abordagem adaptativa descrita nesta norma permite aos países europeus calcular a temperatura interior de conforto em função do clima exterior. Na norma são apresentadas quatro categorias de conforto térmico em edifícios que dependem do tipo de edifício. Assim como se pode observar na Figura 2.9, para um edifício de classe I o intervalo de conforto é menor (menor tolerância) em comparação com um edifício de classe III, onde o intervalo de conforto é maior.

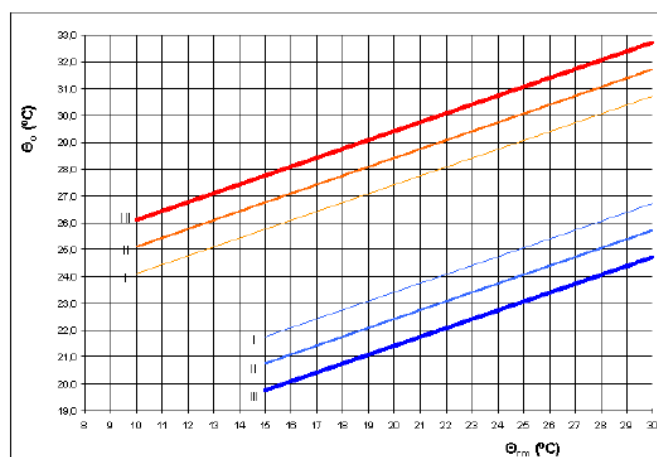


Figura 2.9 – Limites de conforto superiores e inferiores para as temperaturas interiores de edifícios não climatizados, em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada (Norma EN 15251:2006)

3 METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

Neste capítulo, é efetuada uma breve revisão bibliográfica acerca do conforto térmico assim como alguns trabalhos realizados por autores nacionais e internacionais nesta área.

A sensação de conforto térmico é um estado de espírito que envolve vários processos e é influenciada através de várias variáveis tais como físicas, fisiológicas e psicológicas.

3.1 Conforto térmico e implicações do aumento do consumo de energia nos edifícios

Atualmente existe uma grande preocupação com o aumento do consumo de energia fóssil e quais as suas implicações para o meio ambiente, como aquecimento global e mudanças climáticas. Os edifícios são responsáveis pelo consumo de cerca 40% da energia total global e contribuem para uma emissão dos níveis de CO₂ de 30%. Uma grande proporção dessa energia gasta é para aumentar os níveis de conforto térmico dentro dos edifícios, na sua maioria devida ao aumento da instalação de sistemas de AVAC. Esta problemática levou a um aumento dos estudos com vista a melhorar a eficiência energética dos edifícios, pois, inquéritos recentes aos ocupantes de edifícios, identificam o conforto térmico como o critério mais importante, em comparação com o conforto visual ou acústico e a qualidade de ar interior. Assim, foram criados índices, realizaram-se experiências em câmaras climáticas e efetuaram-se inquéritos aos ocupantes de edifícios, com o objetivo de criar normas e melhorar o conforto térmico tentando diminuir o consumo de energia.

Yang *et al.* (2014) realizaram uma pesquisa acerca da conexão entre o conforto térmico e o consequente aumento do consumo de energia. Os autores chegaram à conclusão que o modelo analítico desenvolvido por *Fanger*, PMV, obtém bons resultados quando aplicado a edifícios equipados com sistema de ar condicionado. O mesmo não acontece em edifícios com ventilação natural, onde os seus ocupantes interagem com o meio envolvente, por forma a sentirem mais conforto através da adaptação ao ambiente. Os modelos adaptativos permitem que os ocupantes interajam com o ambiente e se adaptem a ele, tendendo portanto a alcançar uma maior gama de temperaturas de conforto, o que poderia resultar numa poupança de energia, quer ao nível de edifícios equipados com sistemas de ar condicionado ou edifícios dotados apenas de sistemas de ventilação natural.

3.2 Abordagens de conforto térmico

Existem atualmente duas abordagens diferentes para estudar o conforto térmico: a racional e a adaptativa. A abordagem racional é baseada em dados que resultam de experiências de câmaras climáticas, principalmente desenvolvidas por *Fanger*. A abordagem adaptativa, por sua vez, utiliza dados resultantes de estudos em edifícios, com a finalidade de estudar qual a aceitabilidade dos ocupantes em relação ao ambiente térmico.

3.2.1 Abordagem racional

Segundo Djongyang *et al.* (2010), a abordagem racional é baseada em experiências realizadas por Fanger em câmaras climáticas, através de um modelo em regime permanente. Nestes ensaios, os participantes foram vestidos com roupas padronizadas e realizaram atividades *standard*, à medida que foram expostos a diferentes ambientes térmicos. Em alguns estudos, as condições térmicas foram escolhidas e os ocupantes referiam na escala da norma ASHRAE qual a sensação térmica que estavam a sentir, desde +3 muito quente a -3 muito frio. Noutros estudos, os participantes controlavam o ambiente térmico ajustando a temperatura até sentirem uma sensação de neutralidade.

Assim, *apud* Djongyang *et al.* (2010) *Fanger* desenvolveu uma equação de balanço térmico, que foi anteriormente explanada no capítulo 2, que resulta do balanço entre o fluxo de calor do corpo num dado ambiente térmico e o fluxo de calor que é necessário para alcançar a sensação de neutralidade térmica, para uma determinada atividade. A equação que relaciona as condições térmicas com a escala de sensação térmica da norma ASHRAE ficou conhecida como índice PMV. Posteriormente o índice PMV foi incorporado no índice PPD. O modelo de *Fanger* PMV-PPD tem sido desde então de um grande contributo para o desenvolvimento da teoria de conforto térmico, assim como, para a avaliação das condições de ambientes térmicos interiores em edifícios.

Além do modelo PMV-PPD, foi desenvolvido por Gagge *et al.*, um modelo conhecido como o modelo de dois nodos. O modelo PMV-PPD é útil apenas para prever respostas em regime permanente, enquanto o modelo de dois nodos de Gagge pode ser usado para previsão de respostas fisiológicas, ou respostas para situações passageiras.

3.2.1.1 Avaliação do conforto térmico num hospital através do modelo PMV-PPD

Pourshaghaghly & Omidvari (2012) analisaram qual o nível de conforto térmico e qual o desempenho do ar condicionado num hospital, sito no oeste do Irão. Para tal utilizaram o modelo PMV, apresentado na ISO-7730 (2005) e o modelo PPD calculado através de medições experimentais realizadas no edifício. Os resultados obtidos, demonstraram que os valores de PMV em algumas partes do edifício não se encontram num intervalo aceitável

definido pela ISO. Foi verificado que na estação fria o nível de conforto térmico é baixo no turno de trabalho da manhã e na estação quente as condições térmicas são piores no turno de trabalho do meio-dia.

Por fim conclui-se que o índice PPD no sexo masculino era maior do que para o sexo feminino quer para a estação de verão como de inverno, apesar de a diferença ser inferior a 5%.

3.2.1.2 Avaliação do conforto térmico num infantário, através dos índices PMV e PPD

Fabbri (2013) estudou o conforto térmico num infantário com crianças de 4 e 5 anos de idade. A avaliação do conforto térmico fez-se através de medições, a partir de um *datalogger*, para avaliar o ambiente interior segundo a norma EN ISO 7730 e, ainda, através da aplicação de um questionário às crianças segundo a EN ISO 10551. Como nas normas não estão referenciados questionários concebidos para ser aplicados a crianças, aquando a avaliação das mesmas, foi necessário modificar o questionário para uma aproximação mais pedagógica. Foi possível verificar como as crianças entendem e são sensíveis a conceitos como temperatura ou sensação de calor, mas parecem não conseguir entender qual é a diferença entre os conceitos.

A comparação entre os resultados obtidos pelo *datalogger* e o questionário, demonstraram a necessidade de alargar o conceito de conforto térmico, para ter em consideração diferentes faixas etárias tais como crianças, jovens e idosos. Este trabalho, demonstrou tal como foi já referido, que as crianças entendem o conceito de conforto térmico, conseguem definir qual a sensação térmica que estão a sentir e qual o nível de conforto térmico que gostariam de sentir naquele momento.

Verificou-se que o índice PMV das crianças é ligeiramente maior relativamente aos adultos.

3.2.1.3 Controlo do conforto térmico em fachadas de vidro

Hwang e Shu (2011) investigaram o efeito da envolvente dos edifícios no conforto térmico e na potencial poupança de energia, baseando-se no índice PMV em edifícios com fachadas em vidro. A avaliação do conforto térmico foi determinada através do modelo PMV-PPD, da norma ISO 7730. Foi realizado um estudo paramétrico, para um edifício real com uma fachada em vidro. Ao longo dos ensaios foram alterados os tipos de vidro bem como as áreas de vidro, para prever mudanças nos níveis de conforto térmico do espaço. Estes parâmetros fazem parte do índice da envolvente de edifícios chamada ENVLOAD em Taiwan. Os resultados demonstraram que o ENVLOAD tem um efeito significativo no conforto térmico, pois através de uma conceção cuidadosa dos componentes de uma fachada de vidro, pode ser atingido conforto térmico e economia de energia.

Foram também realizadas simulações comparativas, entre o controlo do conforto térmico através do índice PMV e, o controlo termostático convencional para indagar as alterações na

poupança de energia, referente a um espaço que controle o nível de conforto térmico devido à alteração da sua envolvente. Os resultados apontam que o potencial de poupança de energia através do controlo do conforto térmico pelo índice PMV aumenta, com condições de baixa ENVLOAD.

3.2.2 Abordagem adaptativa

A abordagem adaptativa utiliza estudos de campo para estudar qual a real aceitabilidade por parte dos seus ocupantes ao ambiente térmico que os rodeia, que depende do contexto, do comportamento dos ocupantes e das suas expectativas. Atualmente, a abordagem adaptativa é utilizada como um complemento aos ensaios laboratoriais, de modo a atingir um estudo mais confiável sobre o conforto em locais de trabalho e também definir quais os parâmetros de interação mais relevantes. Este tipo de abordagem permite uma análise a outros fatores que não podem ser simulados nos ensaios laboratoriais. Os ocupantes terão um comportamento em resposta aos seus hábitos quotidianos, estarão a usar as suas roupas do dia-a-dia e os seus comportamentos não estarão impostos a quaisquer restrições. A subjetividade na experiência térmica e suas interpretações decorre através de uma complexa interação entre os ocupantes e o ambiente, fornecendo um apoio teórico para a abordagem adaptativa e estudos de conforto térmico (Djongyang *et al.*, 2010).

Em seguida apresentam-se vários tipos de estudos de abordagem adaptativa.

3.2.2.1 Estudos de campo em conforto térmico humano

Mishra e Ramgopal (2013) apresentam-nos uma visão global acerca dos estudos realizados nas últimas décadas em conforto térmico humano. Para facilitar as comparações entre as várias investigações, os estudos de conforto térmico foram agrupados através da classificação climática de *Köppen-Geiger*, desenvolvida no subcapítulo 3.5. São discutidos os aspetos que podem ter influência no conforto térmico, tais como efeitos ambientais e fisiológicos.

Os estudos de campo demonstram que o ser humano tem uma capacidade considerável em se adaptar ao meio envolvente, através de oportunidades adaptativas. Esta observação é válida para edifícios sem climatização e para edifícios climatizados. Os estudos também demonstram que espaços com ar condicionado possuem intervalos de conforto térmico mais adstringidos, em comparação com edifícios sem climatização.

Os meios de adaptação mais utilizados pelos ocupantes através das zonas climáticas são a modificação do movimento do ar (abrir ou fechar uma janela/porta) e o ajuste do tipo de roupa ao ambiente. A adaptação ao meio envolvente prende-se na facilidade, economia e eficácia das ações.

As investigações indicaram que os indivíduos são suscetíveis de sentir o mesmo ambiente térmico de formas distintas. Os ambientes onde normalmente existe uma falta de medidas adaptativas aplicadas, recebem avaliações baixas de conforto térmico.

Quando não existem restrições monetárias os ocupantes preferem utilizar métodos de arrefecimento mecânicos, como sistemas de ar condicionado, em vez de serem implementadas medidas de adaptação.

3.2.2.2 Avaliação de modelos adaptativos de conforto térmico em climas moderados

Sourbron e Helsén (2011) investigaram a aplicação de modelos de conforto térmico adaptativos (ASHRAE 55, ISO 74 e EN 15251) a *Thermally Activated Building Systems* (TABS). TABS são soluções construtivas aplicadas com o objetivo de aproveitar a inércia térmica da estrutura de um edifício de construção nova e obter melhor eficiência energética nos sistemas de aquecimento/refrigeração. Foi estudado o consumo de energia pelos edifícios para um clima moderado, com sistemas de aquecimento/arrefecimento e com valores de referência de acordo com os modelos adaptativos, chegando-se à conclusão que este diminui.

A aplicação de modelos adaptativos aos edifícios tem em vista a redução de energia consumida, pois as temperaturas operativas máximas permitidas são mais elevadas, em comparação com o modelo convencional da ISO 7730.

3.2.2.3 Normas de abordagem adaptativa de conforto térmico

Taleghani *et al.* (2013) estudaram as duas aproximações existentes ao conforto térmico, a abordagem em regime quase permanente e a abordagem adaptativa. A abordagem adaptativa centra-se na teoria de que o ser humano adota diferentes atitudes, para se adaptar ao ambiente no interior dos edifícios. Foram analisadas três normas que referem a abordagem adaptativa: a norma ASHRAE 55-2010, a norma Europeia EN 15251 e a norma Alemã ATG *guideline* NEN 5060. Através de um caso de estudo sito na Holanda (De Bilt), estas foram comparadas.

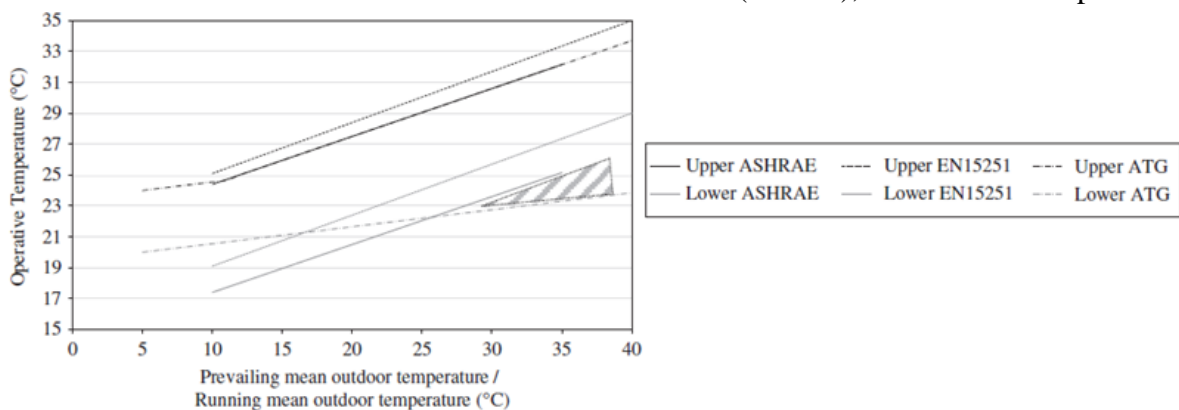


Figura 3.1 – Limite superior e inferior das normas de conforto térmico para 80% de aceitabilidade (Taleghani *et al.*, 2013)

Através da análise dos resultados obtidos, verificou-se que a norma ASHRAE possui as temperaturas mais baixas estimadas (17.8°C). Este facto deve-se ao cálculo das temperaturas de referência diferir de norma para norma.

Os limites inferiores possuem diferentes declives como se pode observar na Figura 3.1, pois a norma alemã usa um declive de apenas 0.11 para o limite inferior, o que se encontra representado no triângulo cinzento.

As variações aceitáveis da temperatura ótima são diferentes. A norma ASHRAE e a ATG permitem uma variação de $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$, já a norma EN 15251, apenas permite uma variação de $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Esta diferença pode levar a diferenças nos cálculos.

As bases de dados foram feitas a partir de estudos de campo, o que leva a que as equações das normas sejam diferentes para a localização. Por exemplo a norma ASHRAE utiliza medições de muitos países (excluindo países de África e América do sul), por outro lado a norma europeia utiliza dados de diferentes climas europeus (França, Suíça, Portugal, Grécia, UK), por fim a norma Alemã utiliza dados alemães desde 2004.

3.2.2.4 Modelos de conforto térmico e técnicas

Pasupathy *et al.* (2008) mostraram que o armazenamento de energia sob a forma de calor latente, através de materiais de mudança de fase (PCM's), desempenha um grande papel na conservação de energia que é gasta nos edifícios para alcançar o conforto térmico. Os materiais de mudança de fase são muito interessantes devido à sua capacidade de armazenamento e pequena variação de temperatura. Também demonstraram que através de um aumento da capacidade térmica de um edifício, pode aumentar o conforto térmico sentido pelos seus ocupantes. Ou seja, diminuindo a frequência de oscilações da temperatura interna do ar a temperatura interior aproxima-se da ideal, por um longo período de tempo.

Orosa e Oliveira (2011) estudaram uma nova abordagem de conforto térmico comparando modelos adaptativos e modelos de PMV. Para edifícios com sistemas de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), o índice desenvolvido por *Fanger* PMV consegue prever com sucesso quais as condições de conforto requeridas. Já para edifícios que dispõem apenas de ventilação natural, apenas os modelos adaptativos conseguem fornecer as previsões necessárias. O modelo adaptativo propõe a mesma temperatura neutra para ambientes com a mesma temperatura interior, mas com níveis de humidade relativa diferentes.

Os autores decidiram desenvolver um novo modelo de PMV para comparar a temperatura neutra em condições interiores reais. Este novo modelo considera a humidade relativa interior

no seu cálculo, demonstrando uma clara diferenciação do ambiente interior, ao contrário dos modelos adaptativos. Os resultados demonstram que o novo modelo de PMV tende a superestimar neutralidades térmicas mas com um menor valor do que o índice PMV. O modelo obtido é interessante, pois permite combinar o índice PMV com modelos adaptativos, permitindo a consideração de temperaturas interiores, humidade relativa e considerar o efeito de revestimentos. Por exemplo, este novo modelo classifica ambientes interiores em conformidade com a sua humidade relativa, sugerindo diferentes temperaturas neutras em modelos adaptativos, podendo ser aplicado para obter economia de energia, pois a diferença encontrada é superior a 1°C entre condições interiores.

3.2.2.5 Medições do isolamento provocado pelo vestuário através de um manequim

Oliveira *et al.* (2014) avaliaram qual o isolamento térmico provocado pelo vestuário, considerando o corpo numa posição de repouso e em movimento. Para tal, foram utilizados métodos para calcular a resistência térmica equivalente do corpo denominados, método de série, método global e paralelo. O método global é o mais convencional, definindo a resistência do corpo inteiro. O método de série e paralelo, através da temperatura da pele e do fluxo de calor em cada segmento, permite o cálculo das resistências locais. As medições foram efetuadas através de nove conjuntos de vestuário, sendo os resultados relativos a isolamentos básicos, efetivos e totais. O corpo do manequim Figura 3.2 encontrava-se dividido em diferentes partes, que eram controladas independentemente.



Figura 3.2 – Manequim térmico “Maria” (Oliveira *et al.*, 2014)

Uma análise comparativa entre os métodos demonstra que o método de série é o que apresenta sempre os maiores valores, por outro lado o método paralelo apresenta os mais baixos. Os autores concluíram que os valores de isolamento térmico dinâmicos são sempre mais baixos do que os correspondentes valores estáticos.

3.2.2.6 Estudos comparativos no que diz respeito ao sexo (masculino e feminino)

Wang (2006) investigou o ambiente térmico e o conforto térmico em edifícios residenciais na China, durante o inverno. Através de um total de 120 participantes, questionários e medição de parâmetros físicos, previu a votação média previsível (PMV) e qual a percentagem média de insatisfeito (PPD). Chegou à conclusão que o sexo masculino é menos sensível às variações de temperatura, quando comparado com o sexo feminino. A temperatura operativa dos homens é cerca de 1.1°C mais baixa, comparativamente com a das mulheres, pois a taxa metabólica das mulheres é mais baixa do que a dos homens e estas são mais sensíveis à variação da temperatura operativa.

3.2.2.7 Conforto térmico em escolas

Dias Pereira *et al.* (2014) estudaram a avaliação da qualidade de ar interior e o conforto térmico, em escolas secundárias Portuguesas. Na escola secundária estudada, sita em Beja, o estudo de campo levou em conta a aplicação de questionários, monitorização e levantamento de parâmetros físicos. A monitorização e a medição de parâmetros físicos (temperatura do ar; humidade relativa; concentrações de CO₂) foram efetuadas no início e fim de cada aula. Através destes dados, do vestuário dos ocupantes e sabendo a taxa metabólica dos mesmos, foram calculados os índices de conforto térmico de *Fanger* (PMV e PPD). Questionários subjetivos escrutaram qual era a aceitabilidade térmica, a sensação térmica e a preferência térmica.

Os resultados dos questionários foram comparados com as medições efetuadas, concluindo-se que para um modo de ventilação natural os ocupantes se encontravam numa faixa de temperatura para além da zona aceitável, assim como os limites de concentração de CO₂ também foram ultrapassados.

3.2.2.8 Um novo índice preditivo para avaliar a sensação/resposta térmica do corpo humano

Apud Zolfaghari e Maerefat (2011), em 1991 *Ring* e de *Dear*, desenvolveram um novo modelo para a avaliação da resposta térmica baseado nos estudos de *Hensel*. O novo índice de resposta térmica (R) é baseado na resposta estática e dinâmica do termoreceptor, em relação à resposta cutânea e sensação térmica. Mas o modelo de *Ring* e de *Dear*, não foi muito utilizado ao longo dos anos em estudos de conforto térmico. As causas da não aplicação do modelo prendem-se com o facto de o referido índice, não se encontrar em conformidade com a escala de sensação térmica da norma ASHRAE. Para contornar este lapso, *Zolfaghari* e *Maerefat*,

decidiram desenvolver um novo índice preditivo, que conseguisse relacionar o índice de resposta térmica (R) e a escala de sensação térmica da norma ASHRAE. Desenvolveram um novo índice de resposta térmica ao qual chamaram TRESP e introduziram-no ao modelo desenvolvido por *Ring* e de *Dear*. O índice TRESP foi comprovado através de várias comparações com os resultados analíticos e experimentais publicados, verificando-se que existia uma boa concordância, tanto em regime permanente como em regime transiente. O novo índice consegue prever com precisão a sensação térmica, sendo apenas dotado de erros médios absolutos de 0.19, em regime permanente e 0.28 em regime transiente.

3.3 Diferenças entre a abordagem racional e a abordagem adaptativa

As duas abordagens possuem especificidades diferentes. Tal como já foi referido anteriormente, a abordagem racional utiliza dados baseados em experiências feitas em câmaras climáticas por *Fanger*. Já a abordagem adaptativa tem como objeto de estudo investigações de campo em edifícios não climatizados.

Na comparação de resultados obtidos através das duas abordagens, existem discrepâncias, pois nos estudos de campo, as pessoas mostram sentir-se confortáveis numa faixa de temperaturas mais ampla, em comparação com o método PMV (Teixeira, 2009).

Estudos realizados recentemente indicam que existe uma grande semelhança entre a real sensação térmica do ser humano e a sensação prevista por modelos adaptativos, em edifícios ventilados naturalmente. A disparidade entre os dois métodos pode ser elucidada, através de algumas observações relevantes (Teixeira, 2009).

- Nos ensaios realizados em câmaras climáticas, os participantes não podiam agir de acordo com as suas rotinas, o que leva a que as suas expectativas sejam alteradas. Os participantes não eram dotados de realizarem ações adaptativas no ambiente em que se encontravam, sendo a possibilidade de controlo do ambiente mínima, daí, a faixa de condições aceitáveis ser muito mais limitada.
- O modelo racional de *Fanger* foi desenvolvido para condições de regime permanente, as quais são muito distintas das reais, principalmente para edifícios apenas dotados de ventilação natural, onde os ocupantes estão constantemente em interação com o ambiente.

Quando se analisa o modelo PMV e ensaios de campo, para edifícios dotados de sistemas de AVAC, as discrepâncias entre os dois métodos são muito reduzidas, pois encontram-se mascaradas pela faixa estreita de temperatura desses ambientes (Teixeira, 2009).

Como o modelo do PMV foi proposto originalmente para ambientes com ventilação mecânica, a sua aplicação leva à adoção de temperaturas interiores constantes, ou dentro de uma faixa muito pequena, estimulando um gasto de energia desnecessário. Em edifícios apenas dotados de ventilação natural, as gamas de temperatura toleradas são mais amplas. Algoritmos de controlo baseados em modelos adaptativos, demonstraram, poupança de energia, sem alteração dos níveis de conforto (Teixeira, 2009).

3.4 Estratégias bioclimáticas e sistemas passivos

A conceção de um edifício bioclimático tem como finalidade, a obtenção natural das condições de conforto dos seus ocupantes, que podem variar em função do clima, das soluções construtivas e do tipo de utilização. Como a noção de conforto térmico se encontra intimamente associada a fatores fisiológicos e psicológicos, que variam de pessoa para pessoa, dado o mesmo ambiente térmico as sensações de conforto térmico podem variar. O clima varia instantaneamente, mas o conforto humano também não é uma realidade estática, pois o ser humano tem capacidade adaptativa face à variação das condições térmicas que o envolvem (Gonçalves e Graça, 2004).

A adoção de estratégias que têm em conta as condições climáticas do local e a sua interação com o clima, proporcionando um equilíbrio entre o edifício e o clima, designam-se por estratégias bioclimáticas. São regras que se destinam a conceber e orientar o edifício partindo das condições climáticas locais. Quando aplicadas estas regras gerais, o edifício estará mais próximo de atingir condições de conforto térmico, diminuindo por conseguinte, os consumos energéticos utilizados para esse fim (Gonçalves e Graça, 2004).

Sistemas passivos são dispositivos construtivos incorporados nos edifícios, que têm como principal objetivo o aquecimento ou arrefecimento natural. No caso da estação de aquecimento (inverno), este tipo de sistemas pretendem maximizar a captação do sol. Esta captação pode ser feita através de vãos envidraçados bem orientados e dimensionados, aos quais é possível associar elementos de elevada inércia, que permitirão o armazenamento da energia e posterior utilização. Este tipo de sistemas são designados por sistemas de aquecimento passivo e são classificados da forma seguinte (Gonçalves e Graça, 2004):

- Sistemas de ganho direto;
- Sistemas de ganho indireto ou desfasado – parede de trombe; parede massiva; colunas de água;
- Sistema de ganhos isolados – espaço estufa; ou coletor a ar.

No que diz respeito à estação de arrefecimento (verão), o objetivo é contribuir para o arrefecimento do edifício através de fontes frias. Assim sendo, uma fonte fria no verão é o solo, pois as temperaturas que atinge são sempre inferiores à temperatura do ar exterior, sendo portanto uma fonte de arrefecimento de edifícios. Outra fonte que pode ser utilizada é o arrefecimento através do ar exterior, nos períodos da noite e do início da manhã, devido às grandes amplitudes térmicas que ocorrem no verão. Existem ainda outros tipos de arrefecimento com menor utilização, dos quais se destacam, o arrefecimento radiativo, que tira partido da diferença de temperatura radiativa entre a envolvente do edifício e a temperatura da envolvente celeste. Estes sistemas podem classificar-se segundo os seguintes conceitos (Gonçalves e Graça, 2004):

- Ventilação natural;
- Arrefecimento pelo solo;
- Arrefecimento evaporativo;
- Arrefecimento radiativo.

3.5 Classificação climática Köppen-Geiger

A classificação climática de *Köppen-Geiger* foi criada por *Wladimir Köppen* e posteriormente melhorada pelo mesmo e por *Rudolf Geiger*, daí o nome da classificação. Foi sendo atualizada ao longo dos anos, mais recentemente por *Kottek et al.* (2006), e por *Rubel e Kottek*, (2010).

A classificação baseia-se no pressuposto que, a vegetação natural de cada região é uma manifestação do clima que nela prevalece, pois as plantas são reveladoras de vários parâmetros climáticos. Considera-se também a precipitação e temperatura do ar. Cada tipo climático é representado por um código constituído por duas ou três letras, cada uma com um significado diferente (Gama, 2012).

Köppen dividiu o mapa do mundo em cinco grupos (ver Figura 3.3), cada um com tipos de vegetação e climas diferentes: zona equatorial (A), zona árida (B), zona temperada (C), zona de neve (D) e zona polar (E). Estes grupos são subdivididos em tipos climáticos em relação à precipitação ocorrida: clima desértico (W), clima das estepes (S), clima húmido (f), clima seco no verão (s), clima seco no inverno (w) e clima de monção (m); e em subtipos climáticos em relação à temperatura do ar em cada zona: clima árido quente (h), clima árido frio (k), verão quente (a), verão ameno (b), verão fresco (c), clima extremamente continental com inverno muito frio (d), clima gelado polar (F) e clima de tundra polar (T) (Gama, 2012).

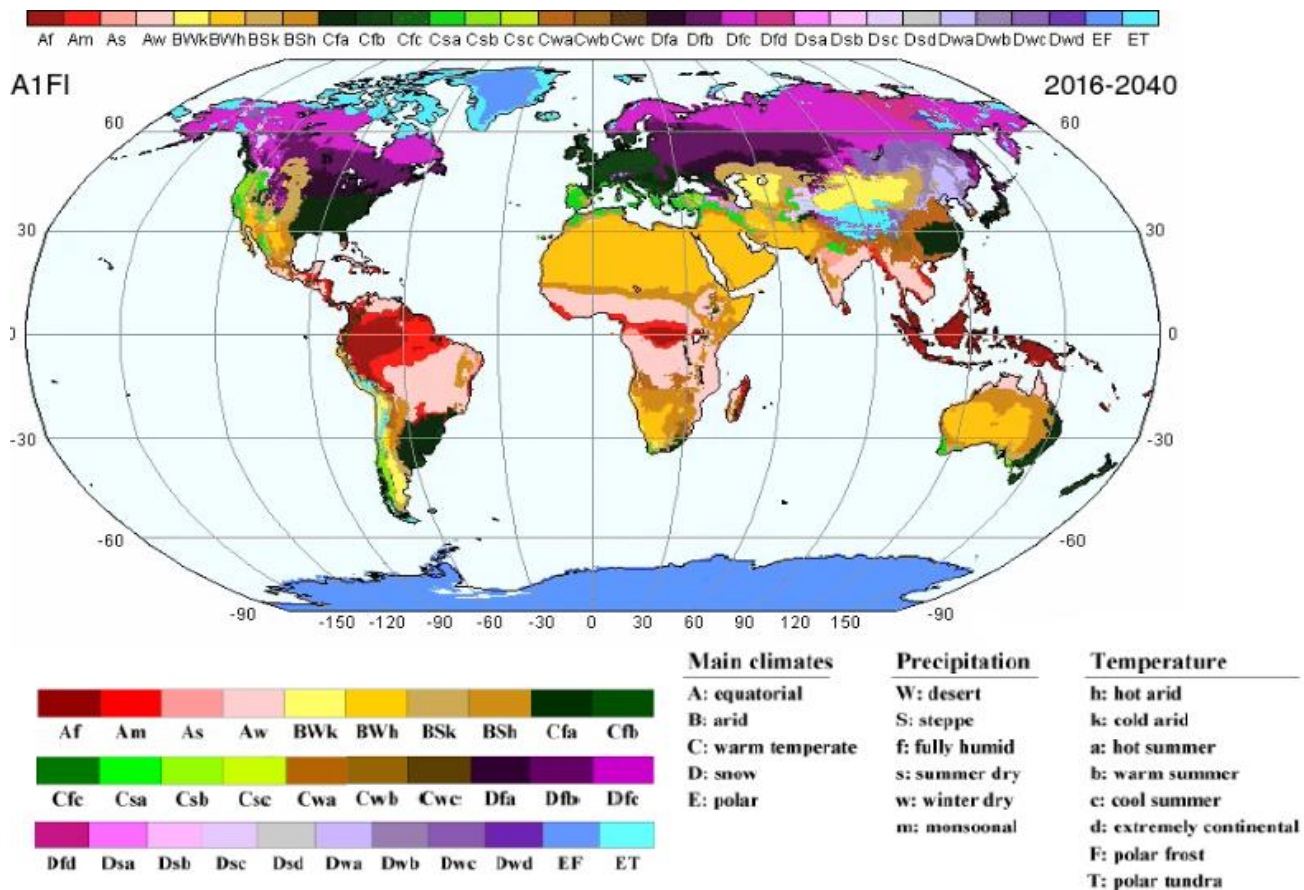


Figura 3.3 - Mapa mundial da classificação climática de *Koppen-Geiger* (adaptado de Rubel e Kottek, 2010).

4 ESTUDO PARAMÉTRICO

Neste capítulo, é efetuada uma descrição detalhada das duas metodologias utilizadas e a situação de referência, para o estudo paramétrico.

4.1 Introdução

No presente trabalho, foi realizado um estudo paramétrico, com o objetivo de analisar a variação de sensibilidade dos índices de conforto térmico PMV-PPD, com a modificação dos parâmetros de entrada para o seu cálculo. Utilizou-se uma folha de cálculo em MS Excel, desenvolvida pelo Professor Doutor Manuel Gameiro da Silva no Departamento de Engenharia Mecânica da FCTUC (Gameiro da Silva, 2015), que tem por base a metodologia desenvolvida por Fanger e proposta na norma ISO 7730. Também foi utilizado um *software* desenvolvido pelo CBE (*Center of the Built Environment*) (CBE@2016) que permite efetuar uma comparação entre a norma americana ASHRAE-55 (2010) e a norma europeia EN-15251 (CEN 2007) já descritas anteriormente.

Como referido anteriormente no capítulo 2, existem diversos fatores que podem exercer uma influência direta sobre o conforto térmico, podendo ser mencionados os fatores individuais, como o nível de metabolismo (M) e o isolamento facultado pelo vestuário (I_{cl}), e os fatores ambientais, tais como a temperatura do ar (T_a), a velocidade do ar (V_a), a temperatura radiante (T_r) e a pressão parcial do vapor de água (P_a).

O balanço térmico é essencial para efetuar a avaliação das necessidades energéticas (aquecimento e arrefecimento) dos edifícios durante a fase de projeto. Já na fase de utilização o balanço térmico possibilita manter uma temperatura interior em conformidade com os níveis de conforto requeridos.

Para avaliar e adaptar o nível de conforto térmico sentido pelos ocupantes dentro de um edifício, é fundamental, ter a noção de quais os parâmetros com um maior nível de relevância, para a posterior adoção de medidas eficientes a aplicar na obtenção da melhoria das condições de conforto.

4.2 Folha de cálculo

4.2.1 Descrição da folha de cálculo

A folha de cálculo desenvolvida pelo Professor Doutor Manuel Gameiro da Silva permite ao utilizador obter os índices PMV e PPD, de uma forma simples e expedita. O método desenvolvido por *Fanger*, que se encontra adaptado na norma ISO 7730, permite a determinação do índice PMV, através da equação de balanço térmico já referida no capítulo 2. Para o desenvolvimento da folha de cálculo e aplicação do método, o principal entrave centra-se no facto do termo referente à temperatura exterior do vestuário, t_{cl} , ser inicialmente desconhecido. Para a resolução deste problema, este termo é determinado através de um processo iterativo, através de uma equação que resulta de um balanço térmico que é estabelecido para a camada de vestuário (equação (16)). Considera-se em regime permanente que, o fluxo de calor é transmitido por condução através do vestuário, desde a camada interior que se encontra à temperatura da pele, até à camada exterior, e é igual à soma das trocas de calor por convecção e radiação para o ambiente (Gameiro da Silva, 2015).

$$(t_{sk} - t_{cl}) / I_{cl} = 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \quad (16)$$

da qual se pode expressar t_{cl} da forma,

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl} \times 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{eq} + 273)^4] - I_{cl} \times f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_{eq}) \quad (17)$$

onde o valor da temperatura exterior da pele t_{sk} , é calculado através da seguinte equação,

$$t_{sk} = 35.7 - 0.028(M - W) \quad (18)$$

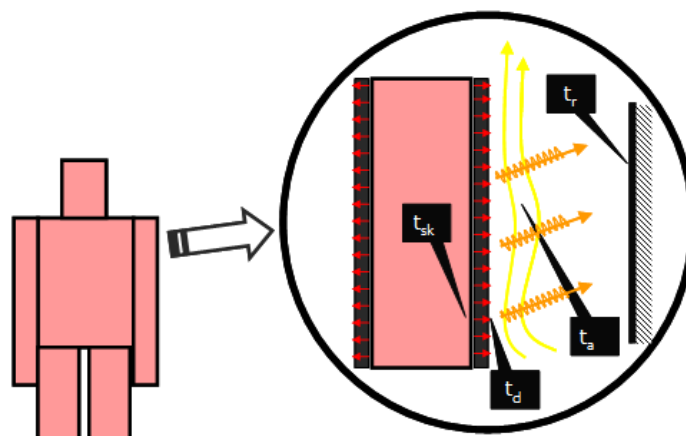


Figura 4.1 – Balanço térmico do vestuário, em regime permanente (Gameiro da Silva, 2015)

O valor de t_{cl} na equação (17) é inicialmente desconhecido, logo é considerado como uma variável dependente, para a qual é arbitrado um valor inicial, para se poder dar início ao processo de iteração. Este processo termina, quando a diferença entre o valor calculado e o valor arbitrado para t_{cl} é praticamente zero.

Para a folha de Excel desenvolvida, o valor inicial de t_{cl} é a média da temperatura do ar t_a com a temperatura da pele t_{sk} . Depois de determinado o valor de t_{cl} o cálculo do índice de conforto PMV é imediato, através da equação (13), e determinados através da norma ISO 7730, os valores do coeficiente de convecção h_c e da relação entre a área vestida e a área nua f_{cl} (Gameiro da Silva, 2015).

A folha de cálculo também permite a determinação do índice PPD, o qual é obtido através da equação (14).

O ficheiro desenvolvido em MS Excel contém duas folhas de cálculo. A primeira folha, a qual é utilizada neste trabalho, permite a determinação direta dos índices PMV-PPD, através do método de cálculo sugerido na norma ISO 7730, através de parâmetros relacionados com as condições ambientais, tais como, a temperatura ao ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e pressão parcial de vapor (Gameiro da Silva, 2015).

Na Figura 4.2, apresenta-se a interface da folha de cálculo, onde se pode observar que esta se encontra dividida em três secções distintas. A primeira secção (localizada do lado esquerdo) encontra-se a parte destinada à introdução de dados pelo utilizador, para a iniciação e controlo dos processos de cálculo. O operador apenas pode fazer alterações nesta secção da folha, pois as restantes secções são automáticas, introduzindo para cada situação que pretenda calcular, os dados de entrada e calculando no botão “Run”. A segunda secção refere-se à visualização dos cálculos intermédios, efetuados ao longo do método, tais como, os valores dos diversos fluxos de calor determinados. Finalmente a terceira secção (localizada do lado direito) apresenta os valores dos índices de conforto térmico PMV-PPD (Gameiro da Silva, 2015).

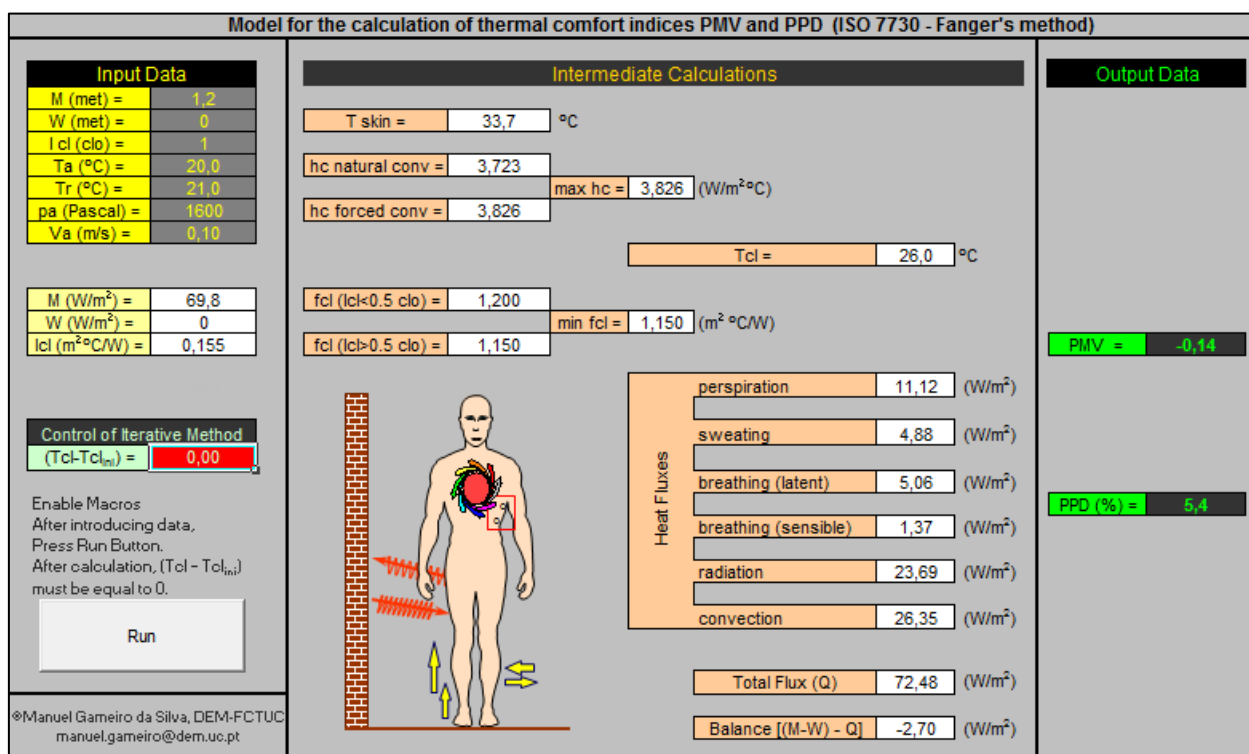


Figura 4.2 – Interface gráfica da folha de cálculo para a aplicação da norma ISO 7730 (Gameiro da Silva 2015)

Para a aplicação do método, devem ser levados em consideração os intervalos de aplicação do método de *Fanger* para o cálculo da zona de conforto térmico, assim, os dados de entrada devem estar compreendidos dentro dos limites de aplicabilidade definidos na norma ISO 7730, para estar garantida a convergência do processo de cálculo.

Quadro 4.1 – Intervalos de aplicabilidade do método de *Fanger* definidos na norma ISO 7730.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade	Valor	Unidade
Nível de metabolismo	M	46 a 232	W/m ²	0,8 a 4	met
Isolamento do vestuário	I _{cl}	0 a 0,310	m ² C/w	0 a 2	clo
Temperatura do ar	t _a	10 a 30	°C		
Temperatura média radiante	t _r	10 a 40	°C		
Velocidade relativa do ar	v _{ar}	0 a 1	m/s		
Pressão parcial do vapor de água	p _a	0 a 2700	Pa		

A folha de cálculo também faculta uma representação gráfica, relativa às diferentes percentagens dos fluxos de troca de calor entre o corpo humano e o ambiente (Figura 4.3).

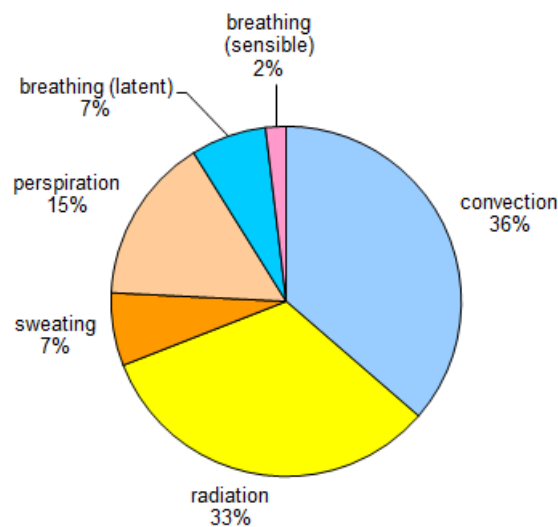


Figura 4.3 – Distribuição percentual dos fluxos de calor e massa relativos aos diversos processos de troca de calor efetuados entre o corpo humano e a envolvente, obtido para a situação de cálculo referente à Figura 4.2 (Gameiro da Silva, 2015)

É de salientar que o caso considerado nas figuras 4.2 e 4.3, corresponde a uma situação confortável, pois o valor de PMV é próximo de zero, mas como se encontra próximo de zero por valores negativos, quer dizer que o indivíduo simulado estaria a ter uma ligeira sensação de frio (Gameiro da Silva, 2015).

Para situações onde os termos dos fluxos de calor que são trocados pelo corpo humano e a envolvente, tenham o valor negativo, a representação gráfica apresentada anteriormente na Figura 4.3 não é conveniente, existindo na folha de cálculo uma representação alternativa Figura 4.5. Entende-se como situações onde os fluxos de calor podem ter o valor negativo, por exemplo, quando a temperatura do ar e/ou a temperatura média radiante são superiores à temperatura exterior do vestuário, logo representa um ganho de calor e não uma perda através de fenómenos de convecção ou radiação. De seguida é apresentado o cálculo para uma situação de desconforto, através de ganho de calor, onde a temperatura média radiante apresenta um valor elevado 39°C, o que origina na Figura 4.5 a existência de uma barra invertida relativa ao termo da radiação (Gameiro da Silva, 2015).

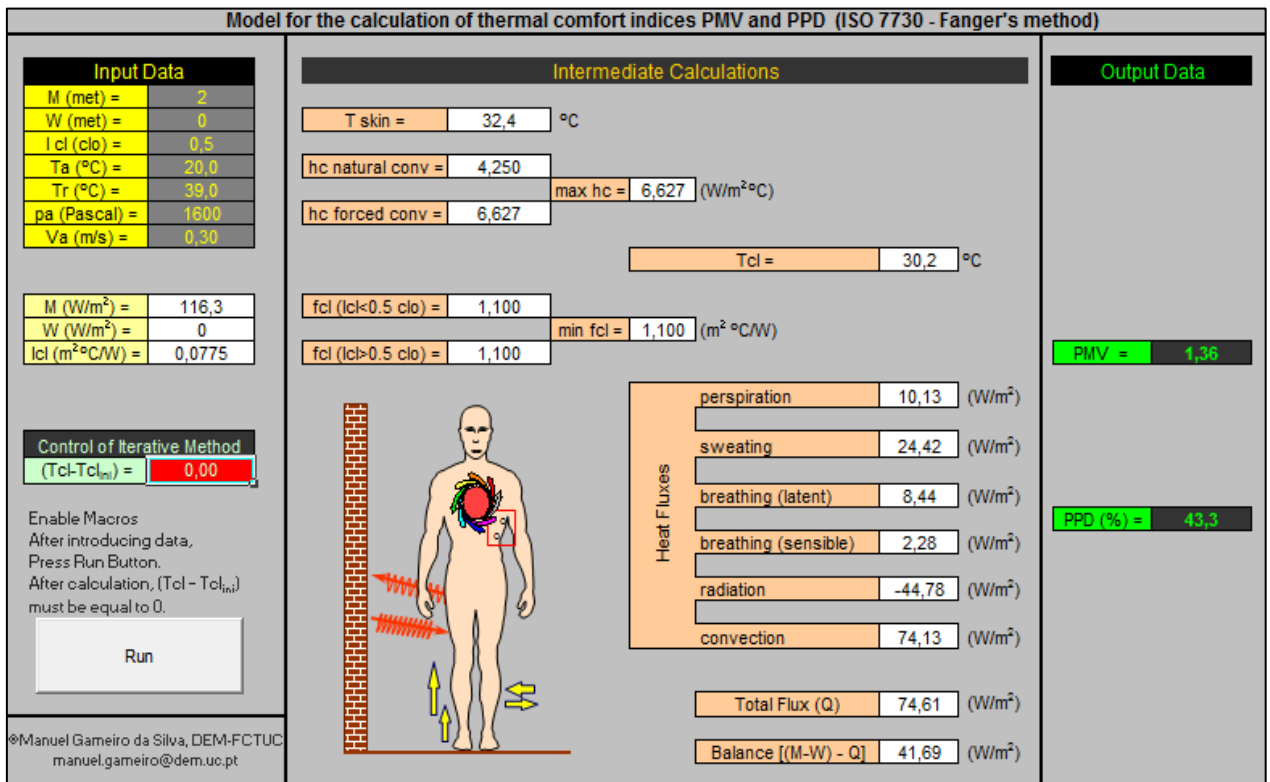


Figura 4.4 – Cálculo para uma situação de desconforto térmico por sensação de calor (Gameiro da Silva, 2015)

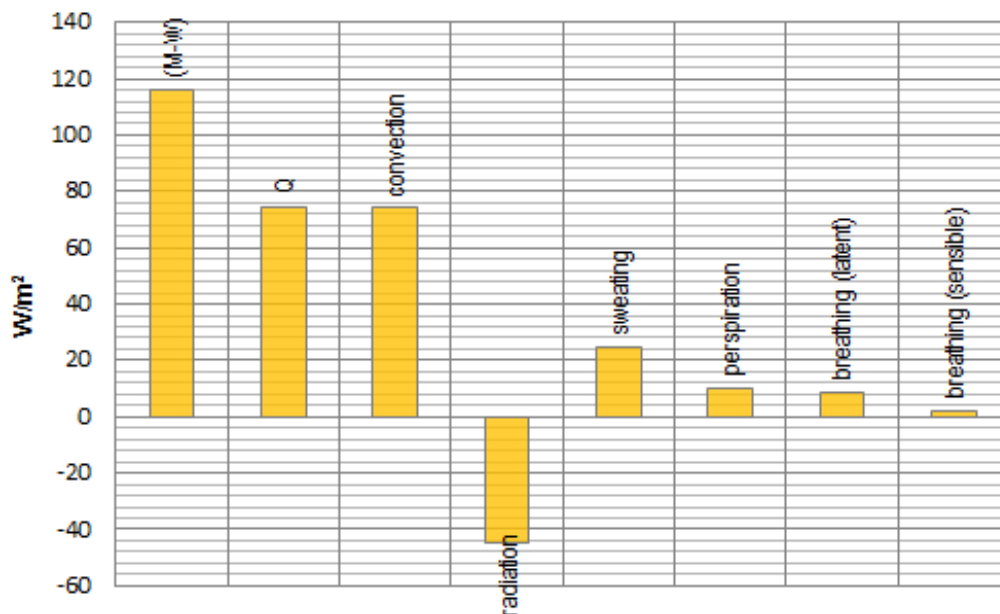


Figura 4.5 – Representação gráfica para os diferentes termos intervenientes no balanço térmico, para a situação referida na Figura 4.4 (Gameiro da Silva, 2015)

A avaliação dos parâmetros de conforto térmico em ambientes de trabalho é pouco utilizada, devido ao custo elevado dos equipamentos que se destinam a este tipo de medições (Gameiro da Silva 2015).

Existem apenas duas formas possíveis de determinar experimentalmente os valores dos índices PMV e PPD, ou a partir de estações climáticas interiores que permitem a medição das grandezas ambientais, t_{ar} , t_r , V_{ar} , e p_a e conseguem aplicar o método iterativo que é aplicado na folha de cálculo, ou através de transdutores aquecidos que conseguem simular o comportamento térmico do corpo humano.

4.2.2 Situação de referência

O estudo paramétrico terá como referência os valores apresentados no Quadro 4.2, e os resultados para estes valores estão representados na Figura 4.6.

Quadro 4.2 – Valores de referência utilizados no estudo paramétrico

Parâmetro	Símbolos	Valor	Unidade
Nível de metabolismo	M	1,2	met
Nível de atividade realizada	W	0	met
Vestuário	I_{cl}	0,9	clo
Temperatura do ar	T_a	22,0	°C
Temperatura radiante	T_r	22,0	°C
Velocidade do ar	V_a	0,05	m/s
Pressão de vapor de água	P_a	1350,0	Pa

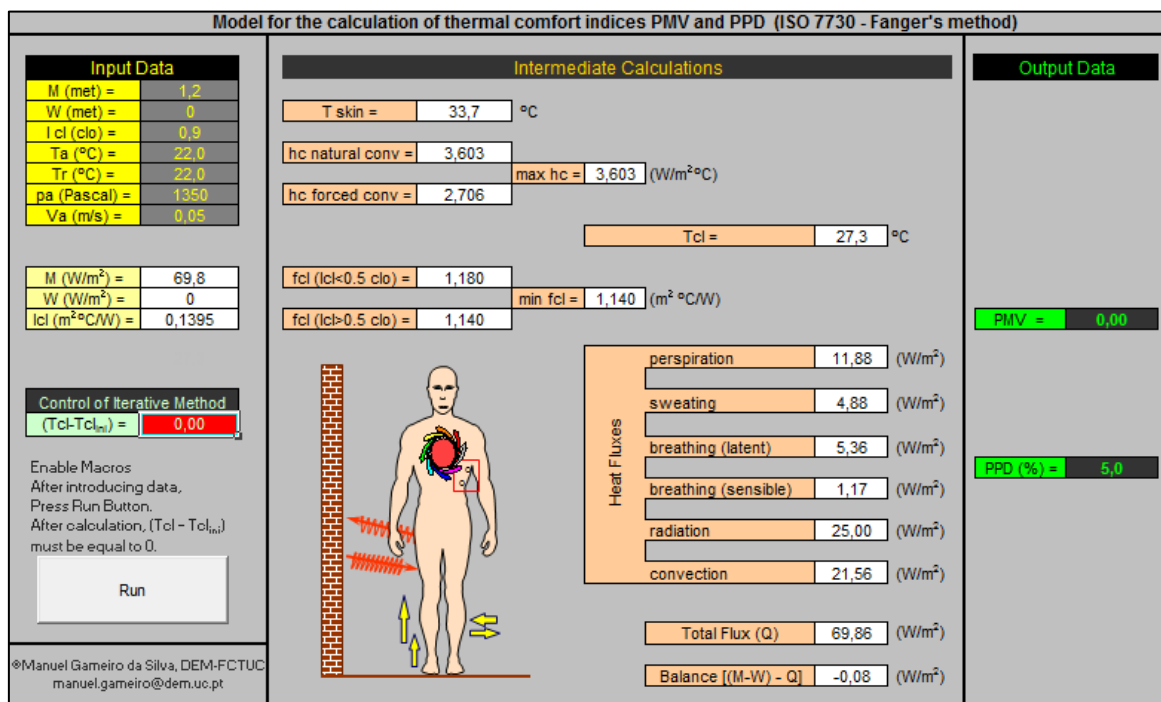


Figura 4.6 – Resultados da folha de cálculo para a situação de referência Quadro 4.2

Para a situação de referência através da folha de cálculo é possível concluir que os valores correspondem à situação ótima de conforto térmico de acordo com a metodologia de *Fanger*, pois o valor de PMV é zero, o que significa que os ocupantes não sentem nem calor nem frio, e o PPD é 5%, que é o valor mínimo de insatisfeitos, também de acordo com a metodologia de *Fanger*.

4.2.3 Estudo paramétrico e gama de valores utilizada

Os parâmetros analisados, gama de valores utilizada e o incremento utilizado para a realização do estudo são apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Parâmetros analisados e respetiva gama de valores escolhida

Parâmetro	Símbolos	Mínimo	Incremento	Máximo	Unidades
Nível de metabolismo	M	0,80	0,20	5,80 ⁽¹⁾	met
Vestuário	Icl	0,00	0,15	3,75 ⁽¹⁾	clo
Temperatura do ar	Ta	0,00 ⁽¹⁾	1,50	37,50	°C
Temperatura radiante	Tr	0,00 ⁽¹⁾	1,50	37,50	°C
Velocidade do ar	Va	0,00	0,02	0,50	m/s
Pressão de vapor de água	Pa	1200,00	10,00	1450,00	Pa

⁽¹⁾ valores fora dos limites de aplicação do método de *Fanger*

4.3 Software CBE

O CBE (*Center of the Built Environment*) é uma entidade americana localizada na Califórnia e fundada em 1997. Esta entidade tem como principal objetivo, melhorar a eficiência energética dos edifícios, através de tecnologias de construção, técnicas de projeto e operação. O conforto térmico é um dos principais aspetos da qualidade do ambiente interior, e encontra-se diretamente relacionado com a satisfação dos ocupantes e o consumo de energia nos edifícios.

Para a medição da resposta dos ocupantes dos edifícios ao ambiente interior e para obtenção de uma melhoria física e de qualidade do ambiente interior, o CBE desenvolveu uma interface gráfica, que pode ser utilizada *on-line*, para previsão do conforto térmico de acordo com a norma americana ASHRAE-55 (2010) e a norma europeia EN- 15251 (2007), já descritas anteriormente no capítulo 2. O *software* permite a avaliação do conforto térmico através da abordagem racional (índices de conforto térmico PMV e PPD), assim como a utilização de um modelo de conforto adaptativo. O *software* disponibiliza atualizações constantes e novas funcionalidades, tais como a visualização dos limites de conforto dentro de gráficos psicrométricos e geração de documentação automática para créditos de conforto térmico, utilizada no sistema de avaliação de sustentabilidade de edifícios americano o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*). A título de curiosidade, em Portugal os sistemas existentes para a avaliação da sustentabilidade em edifícios são o Líder A e o SB Tool PT.

4.3.1 Modelos de conforto térmico

De acordo com a norma ASHRAE-55, o conforto térmico pode ser determinado através dos índices propostos por *Fanger* (PMV/PPD), através da temperatura efetiva padrão (*standard effective temperature* – SET) e para níveis de velocidade do ar superior a 0.15 m/s a norma utiliza o modelo designado por *Elevated Air Speed*. Para espaços apenas dotados de ventilação natural, a norma recomenda o uso de modelos de conforto adaptativos (Schiavon et al., 2014)

O SET é um índice de conforto que se baseia no modelo dinâmico de dois nodos (proposto por *Gagge*) da regulação da temperatura, no qual o corpo humano é modelado através de dois cilindros concêntricos, nos quais o cilindro central representa o núcleo do corpo humano e o periférico representa a pele. Através deste modelo é medida a temperatura da pele e a humidade cutânea. Este índice é baseado em equações de balanço térmico, tal como o índice PMV, e incorpora fatores pessoais, tais como o vestuário e o índice metabólico no seu cálculo. O SET é definido de acordo com a norma ASHRAE-55, como a temperatura de ar equivalente de um ambiente isotérmico com humidade relativa de 50%, com uma média de velocidade do ar <0.1 m/s, e temperatura média radiante igual à temperatura média do ar.

Onde a perda de calor através da pele de um ocupante imaginário que veste roupas padronizadas, 0.6 clo, para a realização de determinada atividade, 1.0 met, é a mesma que a de uma pessoa no ambiente real, com roupa real e nível de atividade real (Schiavon et al., 2014)

Apud Schiavon et al. (2014) a norma ASHRAE 55, especifica que para edifícios dotados de ventilação natural, sem sistemas mecânicos, podem usar-se modelos adaptativos de conforto térmico. A norma especifica que a temperatura média exterior deve ser maior do que 10°C mas inferior a 33.5°C, os ocupantes devem estar em atividades praticamente sedentárias (1.0 a 1.3 met) e terem a liberdade de poder adaptar o vestuário (num intervalo de 0.5 a 1.0 clo).

4.3.2 Representação visual do conforto térmico

A carta climática representada na Figura 4.7a, apresenta o perímetro da zona de conforto onde uma pessoa não vai experimentar uma sensação de desconforto e é aplicado a climas moderados. Esta representação tem em conta quatro parâmetros, os quais se enunciam, o movimento do ar, pressão de vapor, evaporação e efeito da radiação. Nesta representação temos a temperatura de bolbo seco no eixo das ordenadas e a humidade relativa nas abcissas. Pode-se observar que a zona de conforto se encontra rodeada de curvas que demonstram como os efeitos climáticos podem ser utilizados para restaurar a sensação de conforto (Schiavon et al., 2014).

Esta representação (Figura 4.7a), não se encontra de acordo com a norma ASHRAE 55. Foi criado um diagrama psicrométrico mais completo, que representa uma equação de estado e que permite que todos os parâmetros de ar húmido sejam determinados através de três parâmetros independentes. Neste diagrama a pressão atmosférica é fixa, no eixo das abcissas está representada a temperatura de bolbo seco e a humidade absoluta no eixo das ordenadas. As linhas curvas que estão representadas no diagrama representam a humidade relativa, a linha que representa os 100% é a linha de saturação, quando começa a condensação (Schiavon et al., 2014).

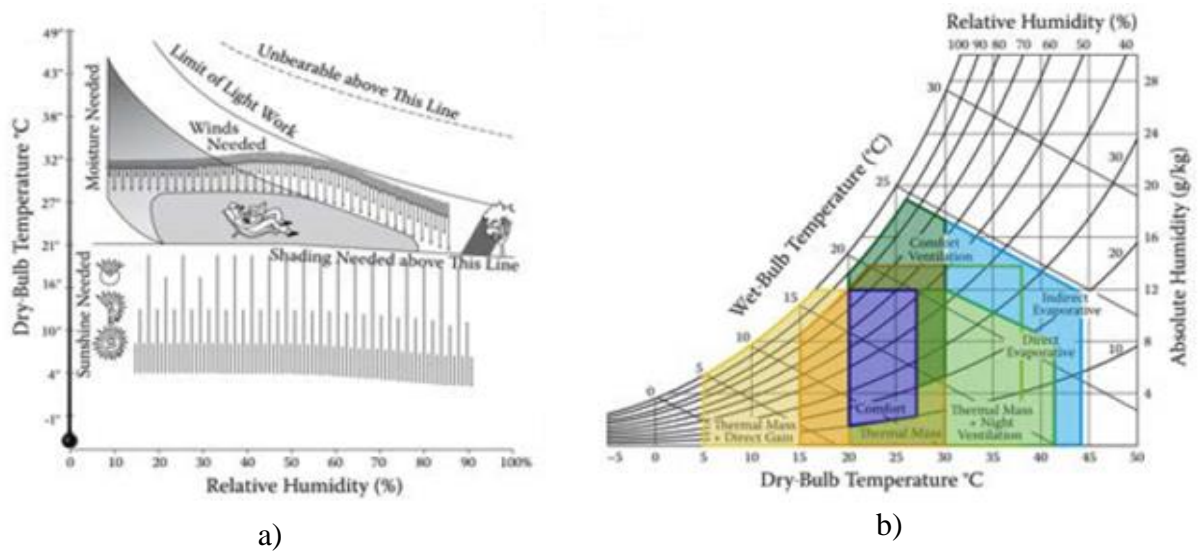


Figura 4.7 - Representação gráfica das zonas de conforto térmico, assim como estratégias passivas, tais como ventilação natural, radiação solar, sombreamento e arrefecimento evaporativo (Schiavon et al., 2014)

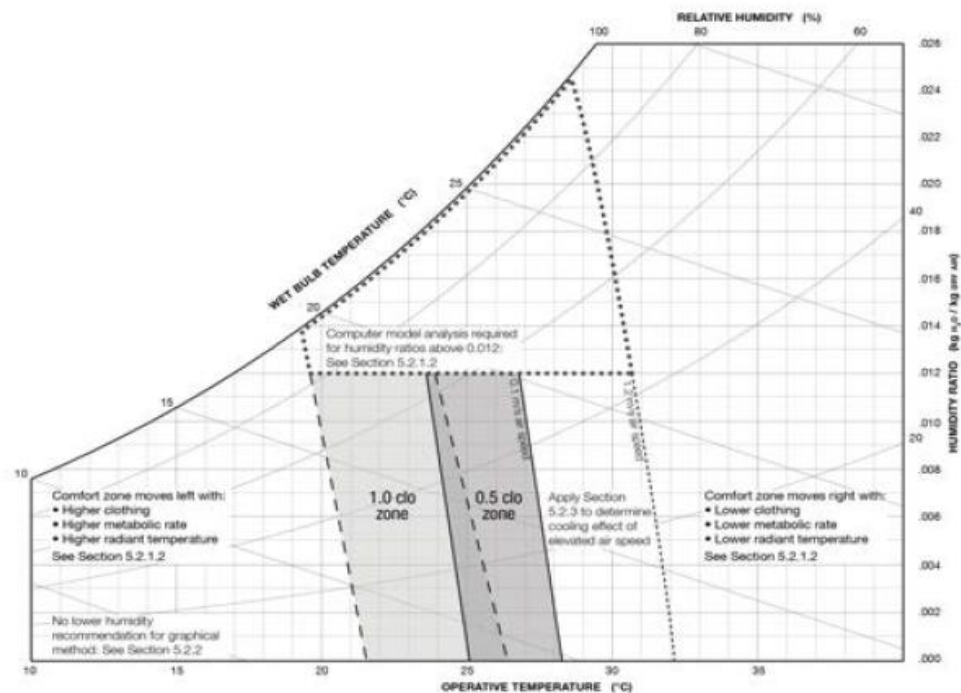


Figura 4.8 – Diagrama psicrométrico com zonas de conforto sobrepostas para 0.5 e 1.0 clo (para condições de verão e inverno), com 1.1 met, velocidade do ar abaixo dos 0.2m/s fornecido pela ASHRAE -55 para o método gráfico (Schiavon et al., 2014)

A norma ASHRAE – 55, para o cálculo do conforto térmico através do modelo PMV determina um método gráfico (Figura 4.8), onde se encontram representadas duas zonas para uma taxa metabólica de 1.1 met, sem nenhum limite inferior de humidade e um valor máximo de $0.012\text{kg}_w/\text{kg}_{da}$. Neste método gráfico a norma não permite o uso de apenas a temperatura de bolbo seco, mas sim a temperatura operativa que se representa no eixo das abcissas (Schiavon et al., 2014).

4.3.3 Interface gráfica

Na Figura 4.9, apresenta-se a interface gráfica do *software CBE Thermal Comfort Tool*, onde se pode observar que este é constituído por duas partes. Na parte esquerda o utilizador pode seleccionar a abordagem de conforto térmico que pretende utilizar (racional ou adaptativa), especificar os *inputs* para os parâmetros que afetam o conforto térmico e também seleccionar outras opções. No lado direito apresentam-se os resultados e uma mensagem que permite visualizar se os resultados se encontram de acordo com as normas ou não. Em baixo destes outputs geram-se gráficos interativos (psicrométricos, temperatura humidade relativa) com a representação da zona de conforto térmico (Schiavon et al., 2014).

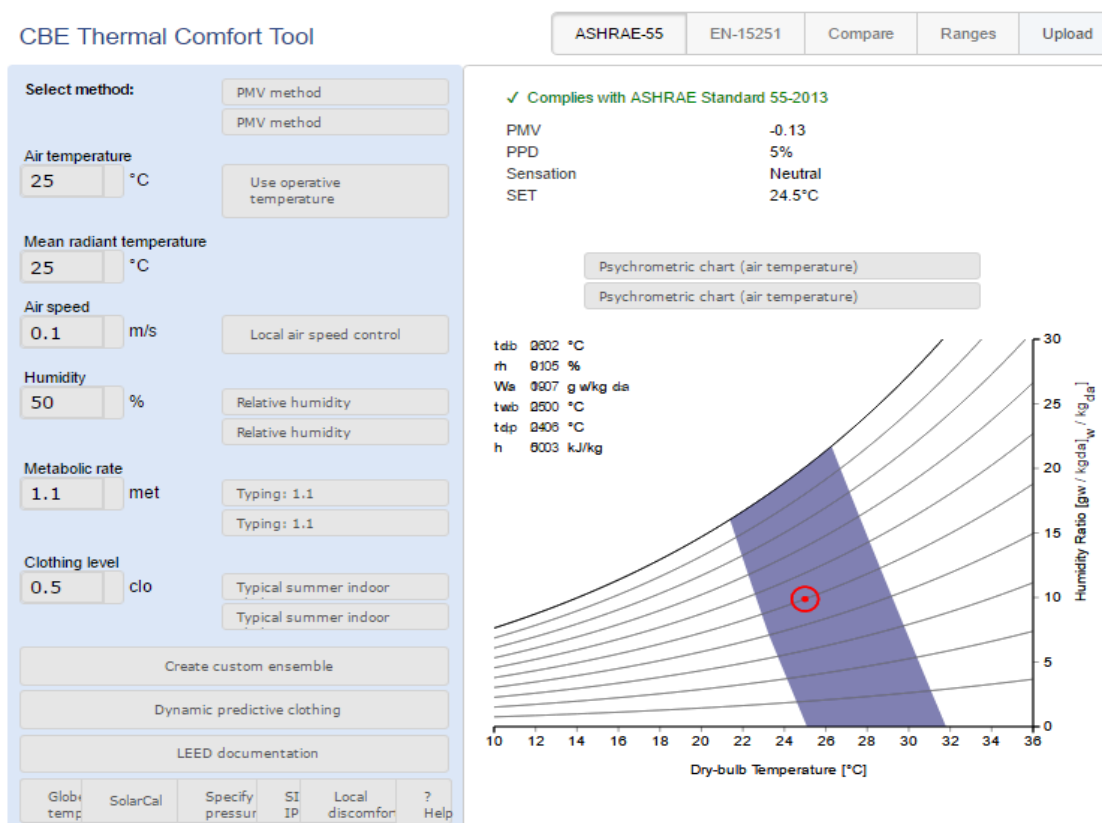


Figura 4.9 – Interface gráfica do *CBE Thermal Comfort Tool*, ASHRAE-55 (CBE@2016)

Para a aplicação do método PMV, a principal visualização dos resultados no *software* é o diagrama psicrométrico representado na Figura 4.10a. A zona de conforto térmico é apresentada a azul e representa a combinação da temperatura de bolbo seco aceitável e valores de humidade, de acordo com a norma, quando os outros quatro parâmetros se mantêm constantes. O limite de conforto térmico representa os limites para o PMV entre -0.5 e 0.5, ou seja que 90% dos ocupantes estão satisfeitos com o ambiente. O ponto a vermelho representa o valor da temperatura de bolbo seco e os valores de humidade introduzidos nos *inputs*. Uma versão simplificada do diagrama psicrométrico também está disponível no *software*, onde em vez do rácio de humidade disponibiliza a humidade relativa no eixo das abcissas Figura 4.10b, (Schiavon et al., 2014).

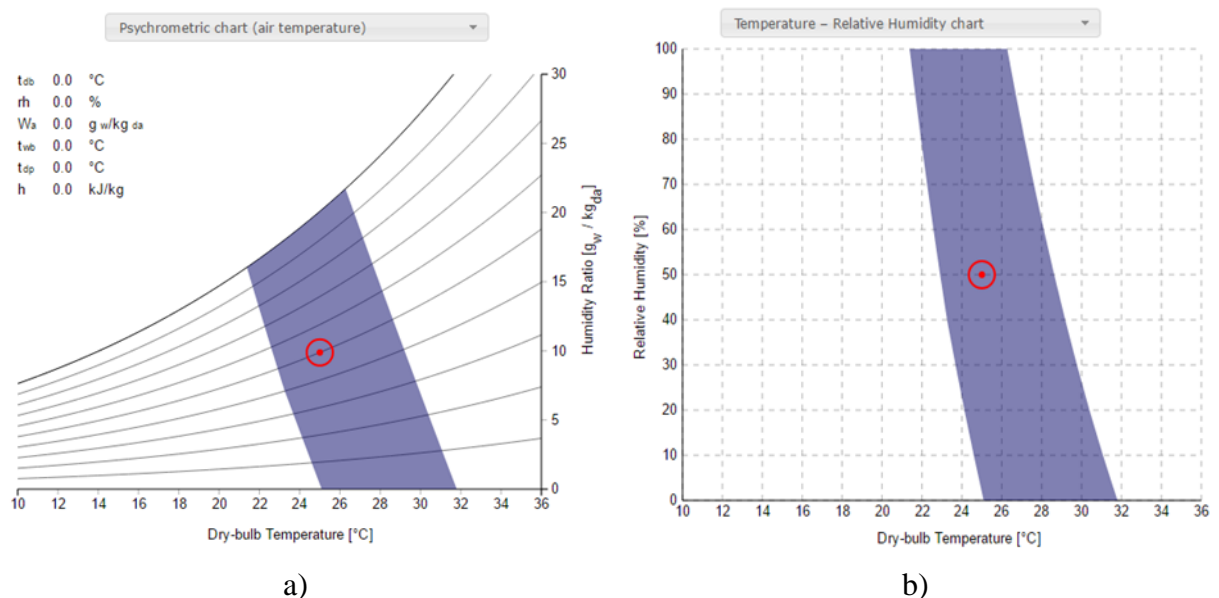


Figura 4.10 – Visualização da zona de conforto térmico para os mesmos valores de entrada. a) diagrama psicrométrico; b) diagrama de temperatura – humidade relativa (CBE@2016)

4.3.4 Gama de valores

A gama de valores utilizada para o cálculo dos índices de conforto térmico (PMV e PPD) é a mesma que foi utilizada quando a avaliação da folha de cálculo ver Quadro 4.3, assim como os parâmetros analisados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, apresentam-se os resultados obtidos para o estudo paramétrico efetuado através da folha de cálculo a qual utiliza fórmulas simplificadas e os resultados obtidos pelo *software* do CBE. Efetua-se uma discussão dos resultados e uma comparação entre as duas metodologias.

Os resultados obtidos através da folha de cálculo e do *software* do CBE para os índices de conforto térmico (PMV-PPD) são praticamente idênticos, tornando a posterior representação gráfica das duas metodologias de difícil interpretação. Decidiu-se apresentar no capítulo dos resultados apenas a representação obtida através da metodologia da folha de cálculo, e em anexo (A,B e C) tabelas e gráficos resultantes da sobreposição dos valores obtidos através do cálculo das duas metodologias.

5.1 Influência do nível de metabolismo

A Figura 5.1 representa os resultados obtidos para os índices de conforto (PMV-PPD) em função do nível de metabolismo, para os ocupantes de um determinado espaço interior, de acordo com as metodologias apresentadas anteriormente no capítulo 4 utilizadas na folha de cálculo, e para os valores de referência apresentados no Quadro 4.2. De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que para um nível metabólico de 1,20 os ocupantes estão em equilíbrio térmico, pois o índice PMV toma o valor zero e o índice PPD toma o valor de 5%. Para um nível de metabolismo menor do que 1,20, os ocupantes têm uma sensação de frio, e para valores superiores as 1,20 os ocupantes têm sensação de calor crescente, à medida que a sua atividade metabólica vai aumentando. A percentagem de insatisfeitos é máxima para um nível metabólico superior a 4,20, e mínima para um valor de 1,20.

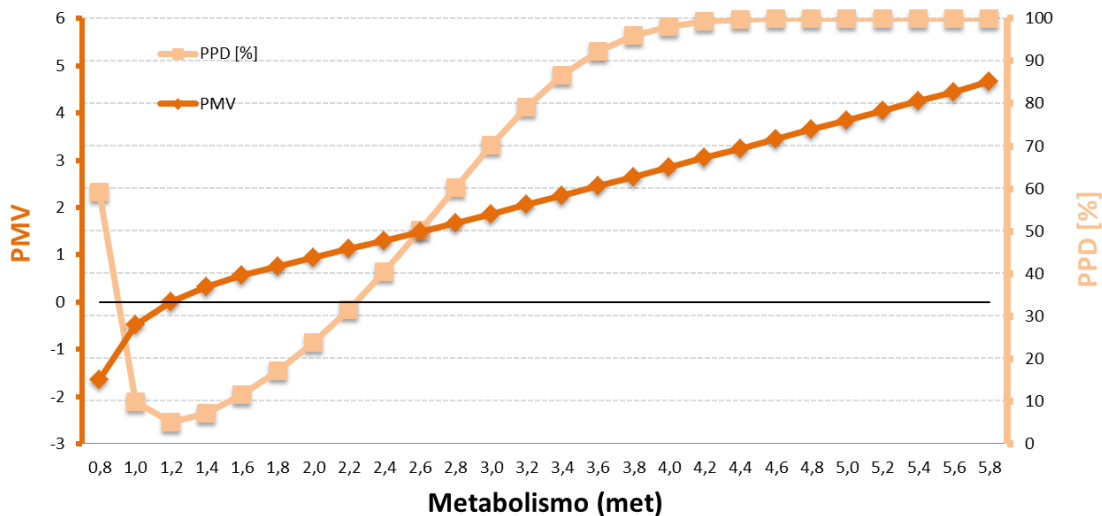


Figura 5.1 – Índices PMV-PPD em função do nível metabólico

5.2 Influência do vestuário

A Figura 5.2, apresenta os resultados obtidos para os índices de conforto (PMV-PPD) em função do nível de isolamento térmico, proporcionado pelo vestuário dos ocupantes. Observa-se que para um valor de 0,9 clo o valor do índice PMV é zero, e as pessoas encontram-se em equilíbrio térmico, sendo a percentagem de insatisfeitos de 5%. Também se observa que o número de pessoas insatisfeitas com o conforto térmico aumenta de uma forma muito mais considerável quando o nível de vestuário diminui, e para um valor de 0 clo (significa que os ocupantes não possuem qualquer roupa) o número de insatisfeitos é de 98,80%. Para valores superiores de vestuário o número de insatisfeitos é menor, atingindo os 43,5% para 3,0 clo.

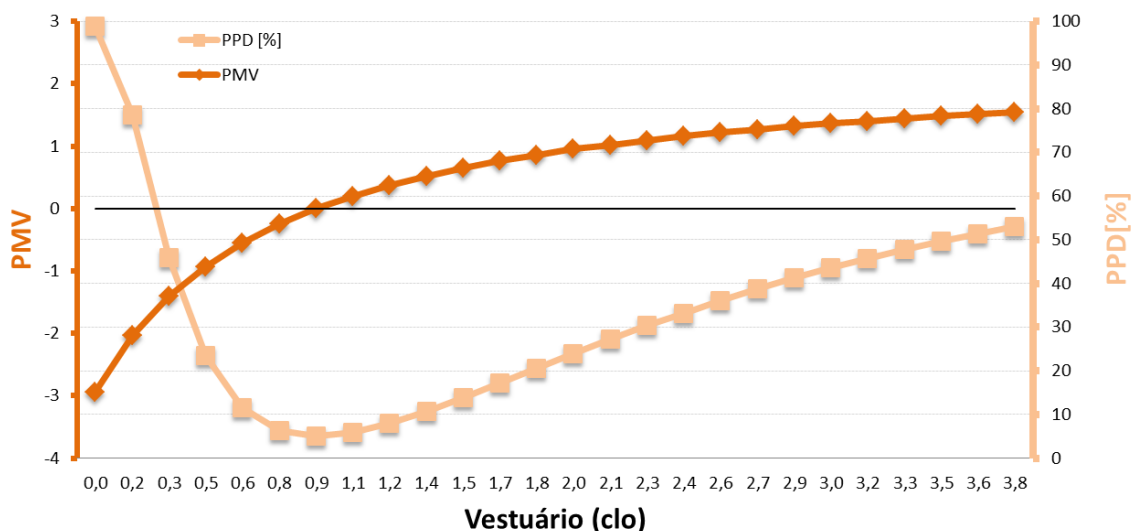


Figura 5.2 – Índices PMV-PPD em função do vestuário

5.3 Influência da temperatura do ar

Os resultados obtidos para a análise de sensibilidade da temperatura do ar, encontram-se representados na Figura 5.3. Através da análise da figura, verifica-se que o índice PMV comporta-se quase de forma linear à medida que aumenta a temperatura do ar ambiente interior. Também é de salientar que a percentagem de insatisfeitos diminui à medida que a temperatura do ar aumenta, até ao valor de aproximadamente 22,5°C, a partir do qual volta a aumentar. A partir da temperatura de 22,5°C os ocupantes começam a ter uma sensação ligeira de calor, pois o índice PMV troca de sinal.

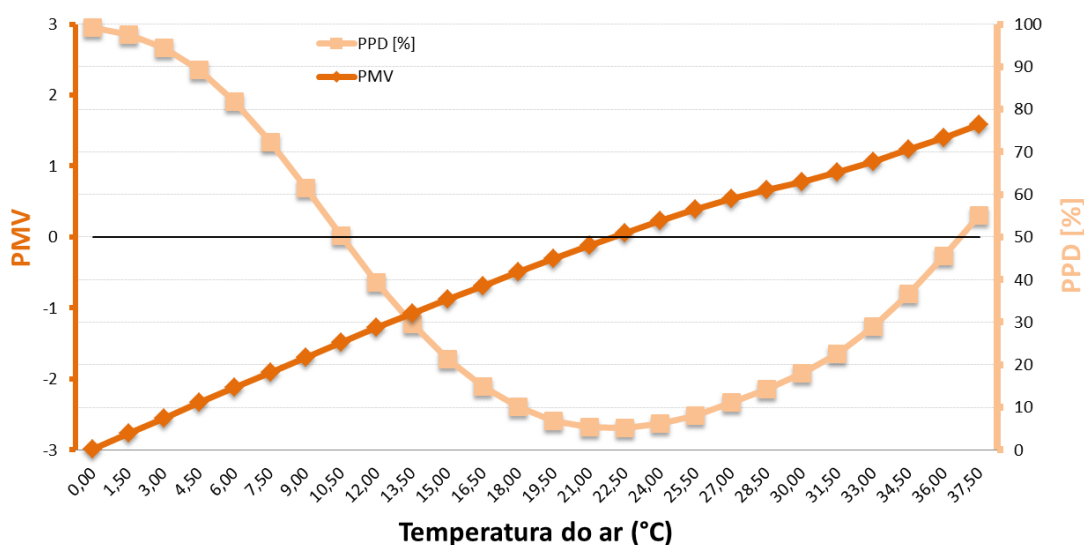


Figura 5.3 – Índices PMV-PPD em função da temperatura do ar

5.4 Influência da temperatura radiante

A temperatura radiante condiciona diretamente as trocas de calor por radiação. A Figura 5.4 representa os resultados obtidos para a análise de sensibilidade deste parâmetro. Pode observar-se que as curvas obtidas possuem uma grande semelhança com as apresentadas na Figura 5.3 para a temperatura do ar. As principais diferenças ocorrem para os valores de temperatura inferiores, ou seja, o valor do índice PMV agora é de -2,16 e o valor de PPD é de 83,4%, em vez de -2,99 e 99,1% respetivamente no gráfico da temperatura do ar (Figura 5.3).

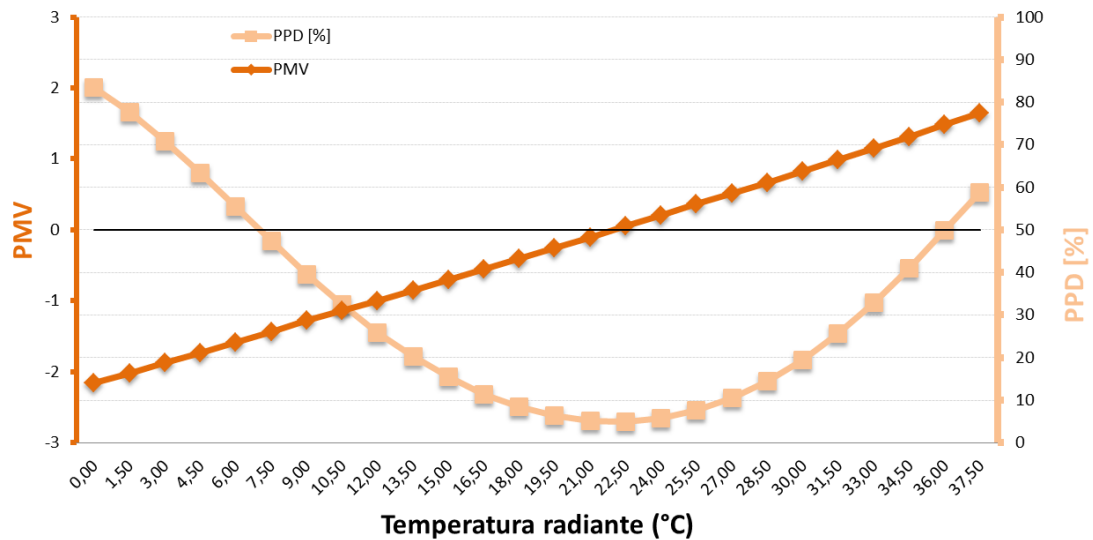


Figura 5.4 – Índices PMV-PPD em função da temperatura radiante

5.5 Influência da velocidade do ar

Os resultados obtidos para o estudo paramétrico para a velocidade do ar, num compartimento, são apresentados na Figura 5.5. Os resultados para este parâmetro foram os únicos que apresentaram algumas diferenças quando analisados pelas duas metodologias. Assim, apresentam-se os resultados sobrepostos e observa-se que a partir do valor de 0,12m/s os valores de PMV e PPD variam mas não de maneira muito significativa. Também se pode observar que este gráfico de todos os analisados anteriormente, apresenta valores dos índices PMV e PPD mais estáveis. Assim, pode concluir-se que a relevância deste parâmetro no intervalo de valores considerado é mais reduzida em comparação com os anteriores na análise da sensação de conforto térmico.

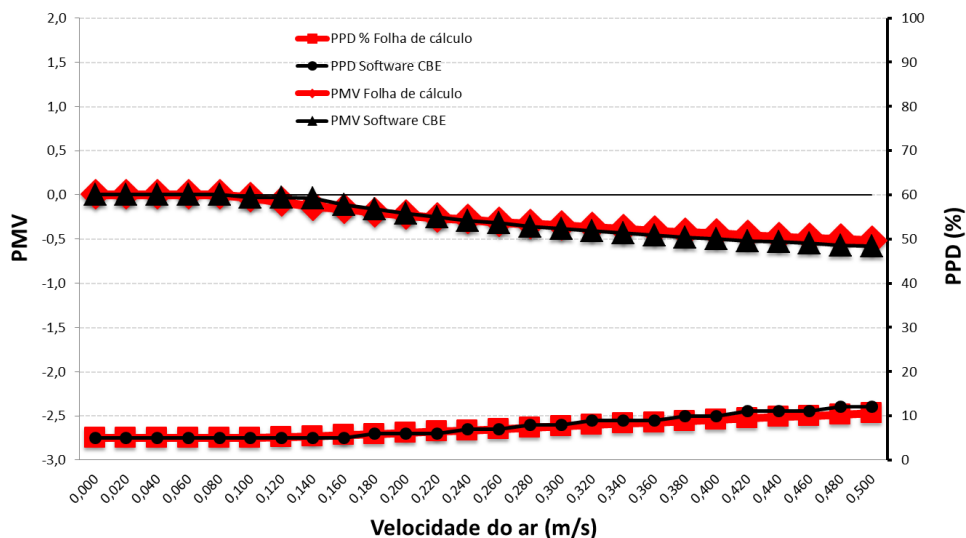


Figura 5.5 – Índices PMV-PPD em função da velocidade do ar

5.6 Influência da pressão de vapor de água

Na Figura 5.6 apresentam-se os resultados obtidos em função da pressão de vapor de água. Pode observar-se que de todos os parâmetros estudados este é o que apresenta uma menor variação, ou seja, para a gama de pressões que foi analisada (1200 a 1450 Pa), os índices de conforto praticamente não sofrem variação.

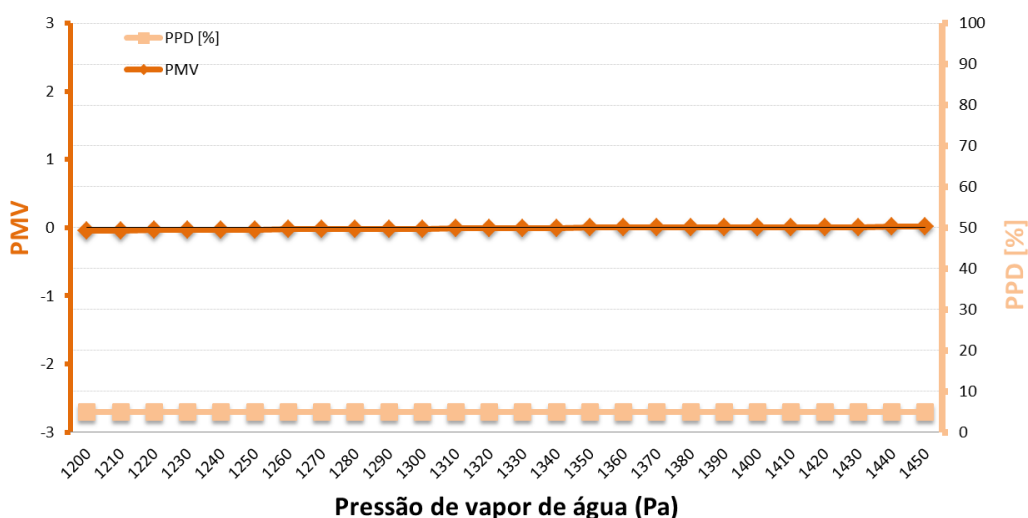


Figura 5.6 – Índices PMV-PPD em função da pressão de vapor de água

5.7 Comparação dos resultados – Folha de cálculo e *software* CBE

De acordo com os resultados obtidos, para o estudo da influência da variação paramétrica apresentam-se nas figuras Figura 5.7 e Figura 5.8 uma representação dos índices de conforto PMV-PPD em função da variação percentual de cada parâmetro. Apenas se apresentam os resultados obtidos a partir da folha de cálculo, pois os resultados do *software* CBE são muito idênticos. No anexo C (Figura C.7e Figura C.8) apresentam-se ambos os resultados.

Verifica-se que o índice PMV (Figura 5.7) é muito sensível à variação dos quatro primeiros parâmetros, e como já tinha sido referido os parâmetros com menor relevância são a velocidade do ar e a pressão de vapor de água. Relativamente ao índice PPD (Figura 5.8) verifica-se a mesma tendência que o índice PMV, onde se conclui que este também é bastante sensível aos quatro primeiros parâmetros analisados, e os parâmetros com menor relevância são também os mesmos. É de salientar que as conclusões deste trabalho são válidas apenas para as condições de referência utilizadas, ou seja, próximas das condições de conforto.

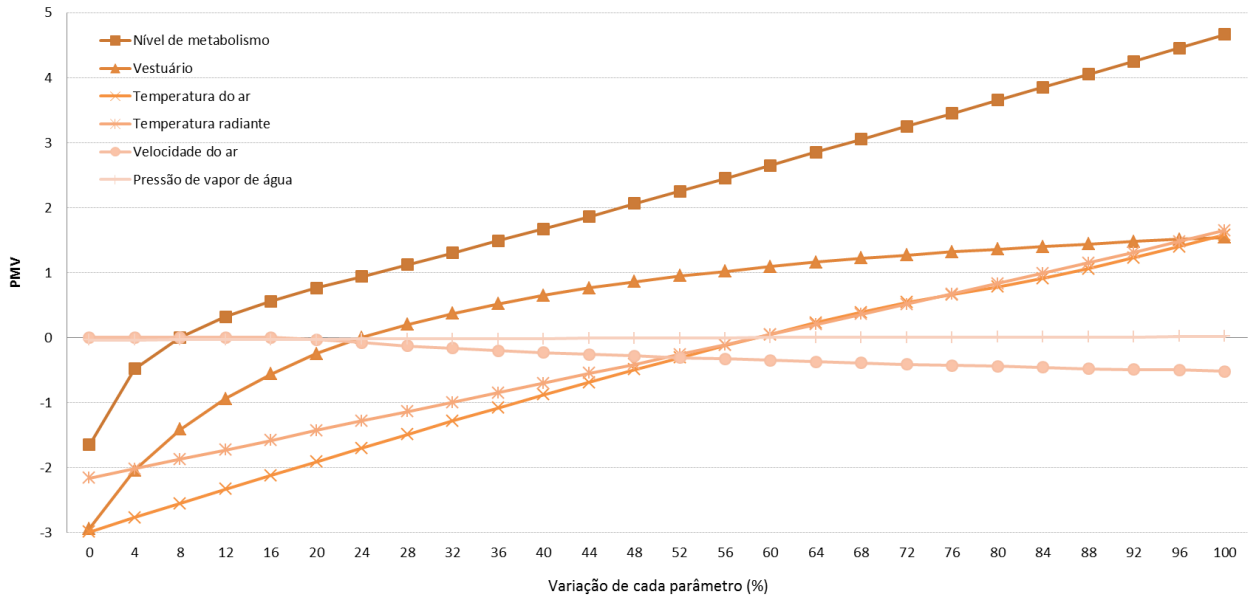


Figura 5.7 – Índice PMV em função da variação percentual de cada parâmetro

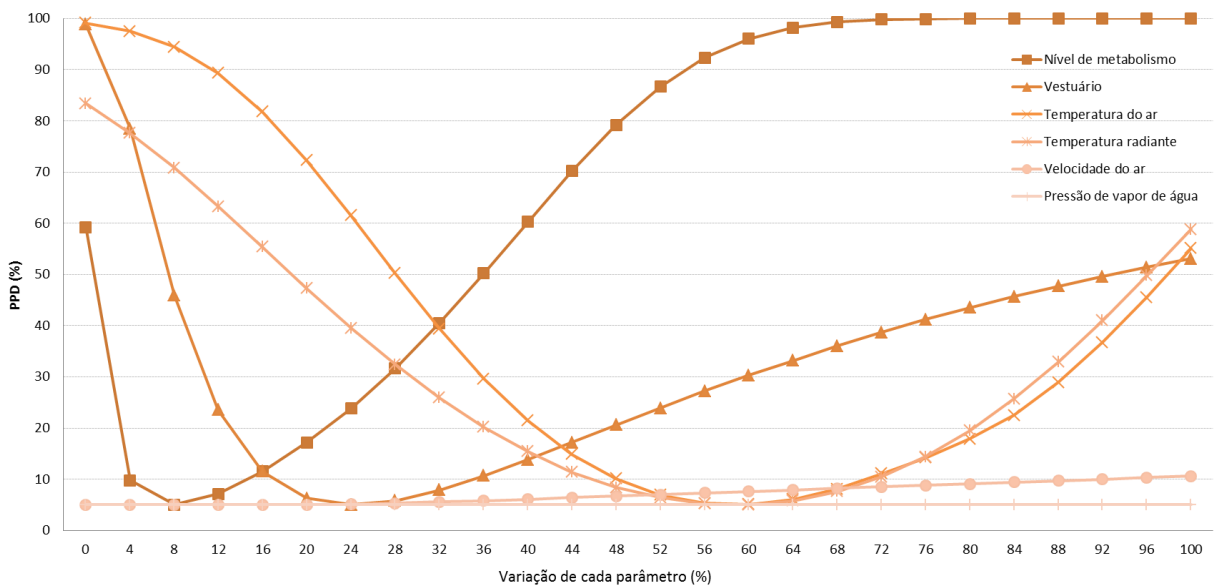


Figura 5.8 – Índice PPD em função da variação percentual de cada parâmetro

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Nesta dissertação é analisada a variação dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) quando se alteram seis parâmetros (individuais e ambientais), nomeadamente: nível metabólico, vestuário, temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e pressão de vapor de água. Utilizaram-se duas ferramentas de cálculo, designadamente: uma folha de cálculo em MS Excel (Gameiro da Silva, 2015), que tem por base a metodologia desenvolvida por *Fanger* e proposta na norma ISO 7730, assim como um *software* desenvolvido nos EUA pelo *Center of the Built Environment* (CBE@2016) que permite efetuar uma comparação entre a norma Americana ASHRAE-55 (2010) e a norma Europeia EN-15251 (2007).

Conclui-se que, existem parâmetros com uma menor relevância no conforto térmico humano, e outros com um nível de importância muito superior, sendo esta importância função da gama de valores calculada. É de salientar que as conclusões deste trabalho são válidas apenas para as condições de referência utilizadas, ou seja, próximas das condições de conforto. Nestas condições a velocidade do ar e a pressão de vapor de água possuem uma relevância no nível de conforto térmico humano muito baixa, sendo que a influência da pressão de vapor de água é praticamente desprezável. Os índices de conforto térmico PMV-PPD são mais sensíveis à variação de parâmetros, tais como: o nível metabólico, o nível de vestuário, a temperatura do ar e a temperatura radiante. Destes, o parâmetro mais relevante é o nível metabólico pois sofre uma maior variação ao longo do intervalo em estudo e o menos relevante é a temperatura radiante.

Também se conclui que utilizando a folha de cálculo ou o *software* do CBE, os resultados são muito idênticos, sendo verificada apenas uma ligeira alteração quando é analisado o parâmetro da velocidade do ar, o qual não possui uma grande relevância ao nível do conforto térmico humano para a gama de valores e condições de referência estudadas. Também se verifica que as diferenças no cálculo dos índices de conforto térmico são muito pouco significativas quando são utilizadas as normas Europeias ou a norma Americana.

Por fim, conclui-se que o nível de conforto térmico é fortemente influenciado por fatores individuais, nível de metabolismo e vestuário, assim como por alguns fatores ambientais, temperatura do ar e temperatura radiante. Sabendo quais os parâmetros que influenciam o

conforto térmico, pode-se tentar influenciar alguns destes parâmetros para manter o conforto térmico dos ocupantes. Por exemplo, ao nível do vestuário, vestir ou tirar roupa dependendo se os ocupantes estão a sentir frio ou calor, ou ao nível da temperatura do ar, diminuindo ou aumentando a temperatura interior do compartimento através de meios mecânicos sempre que necessário.

É importante serem efetuados estudos de conforto térmico no interior de edifícios e saber quais os parâmetros que o influenciam, para ser possível manter o conforto dos ocupantes de uma forma mais eficiente, diminuindo as necessidades energéticas dos edifícios. Por exemplo, num edifício de escritórios onde os ocupantes necessitam de um vestuário específico (e.g. fato e gravata), numa situação de verão, a temperatura de conforto requerida será inferior comparativamente a uma situação onde os ocupantes pudessem adaptar-se ao ambiente através da mudança do vestuário. Esta situação poderá originar um consumo de energia superior para o arrefecimento do espaço.

Note-se que as conclusões extraídas deste trabalho são válidas para a situação de referência utilizada, isto é, próxima das condições de conforto. Se as condições de referência fossem diferentes as conclusões também poderiam ser distintas.

6.2 Trabalhos futuros

Neste trabalho realizou-se um estudo paramétrico através de duas ferramentas de cálculo que permitem efetuar a comparação entre três normas diferentes, nomeadamente: a ISO 7730, a ASHRAE-55 e a EN -15251. Será importante realizar um estudo paramétrico semelhante através de outras ferramentas específicas, tais como, o *software* DesignBuilder e o Módulo CFD (*computational fluid dynamics*) a um compartimento de referência e efetuar uma comparação dos resultados das mesmas. Neste caso seria possível analisar a interação entre o edifício e os seus ocupantes, em particular no que respeita ao conforto térmico dos mesmos. Um exemplo concreto seria o estudo da influência da abertura de vãos na ventilação natural para arrefecimento do edifício e conseqüentemente dos seus ocupantes.

Outro trabalho interessante seria efetuar um estudo paramétrico semelhante ao efetuado nesta dissertação, mas com condições de referência diferentes. Por exemplo, uma situação de referência mais fria e outra mais quente comparando os resultados obtidos.

Num estudo futuro poderá ser feita a avaliação de conforto térmico no interior de um edifício completo (não apenas um compartimento) através da aplicação do modelo racional (Djongyang et al., 2010) e modelos adaptativos (Djongyang et al., 2010). Utilizando por exemplo o *software* DesignBuilder para efetuar uma simulação dinâmica do comportamento térmico do edifício e cálculo do índice PMV em cada hora. Para a análise adaptativa, poderia

ser efetuada uma comparação das temperaturas internas simuladas através do *software* DesignBuilder, com o método proposto na norma EN 15251 que permite o cálculo das temperaturas interiores de conforto através da aplicação de modelos adaptativos para edifícios sem sistemas mecânicos de arrefecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfano, F. et al., 2010. *Ambiente Interior e Eficiência Energética nas Escolas*, REHVA (Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations).
- Almeida, H., 2010. *Análise do Conforto Térmico de Edifícios utilizando as abordagens analítica e adaptativa*. Tese de Mestrado, IST, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa.
- CBE@(2016), Center of the built environment@(2016). <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>, consultado em 02-03-2016.
- Dias Pereira, L. et al., 2014. Assessment of indoor air quality and thermal comfort in Portuguese secondary classrooms: Methodology and results. *Building and Environment*.
- Djongyang, N., Tchinda, R. e Njomo, D., 2010. Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14, pp.2626–2640.
- EN ISO7730, S., 2006. 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 Ergonomics of the thermal environment.
- Fabbri, K., 2013. Thermal comfort evaluation in kindergarten: PMV and PPD measurement through datalogger and questionnaire. *Building and Environment*, vol.68, pp.202–214.
- Gama, M.C., 2012. *Sistemas Passivos de Aquecimento/Arrefecimento de Edifícios: Simulação do seu Desempenho em Função do Clima*. Tese de Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.
- Gameiro da Silva, M.C., 2015. Aplicações computacionais para avaliação do conforto térmico. ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- Gonçalves, H. & Graça, J.M., 2004. “*Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*” P. Departamento de energias renováveis – INETI. Lisboa.
- Hwang, R.L. & Shu, S.Y., 2011. Building envelope regulations on thermal comfort in glass facade buildings and energy-saving potential for PMV-based comfort control. *Building and Environment*, vol. 46(4), pp.824–834.
- José, S., 2016. “Em Portugal morre-se de frio”, *Jornal Expresso*, 26.02.2016.

- Liaison, S. et al., 2004. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- Mishra, A.K. & Ramgopal, M., 2013. Field studies on human thermal comfort - An overview. *Building and Environment*, vol. 64, pp.94–106.
- Oliveira, A., 2008. *Avaliação da Incerteza na Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD*. Departamento de Engenharia Mecânica, FCTUC, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Oliveira, A.V.M. et al., 2014. Analysis of natural and forced convection heat losses from a thermal manikin: Comparative assessment of the static and dynamic postures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 132, pp.66–76.
- Orosa, J.A. & Oliveira, A.C., 2011. A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models. *Renewable Energy*, vol. 36(3), pp.951–956.
- Pasupathy, A., Velraj, R. & Seeniraj, R. V, 2008. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. , vol. 12, pp.39–64.
- Patrício, J. & Santos, A., 2000. *Seminário ambiente em edifícios urbanos*, LNEC, Lisboa.
- Pourshaghagh, A. & Omidvari, M., 2012. Examination of thermal comfort in a hospital using PMV-PPD model. *Applied Ergonomics*, vol. 43(6), pp.1089–1095.
- REH, 2013. Regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação. (DL118/2013 de 20 de Agosto).
- Rubel & Kottek, 2010. World maps of köppen-geiger climate classification. Disponível em <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>, consultado em Maio de 2016.
- Schiavon, S., Hoyt, T. & Piccioli, A., 2014. Center for the Built Environment. *Berkeley, U C*, (Web application for thermal comfort visualization and calculation according to ASHRAE Standard 55). Available at: <http://escholarship.org/uc/item/4db4q37h>.
- Sourbron, M. & Helsen, L., 2011. Evaluation of adaptive thermal comfort models in moderate climates and their impact on energy use in office buildings. *Energy and Buildings*, vol. 43(2-3), pp.423–432.
- Standard EN15251:2006, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality , thermal environment, lighting and acoustics Contents. In pp. 1–52.
- Taleghani, M. et al., 2013. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, pp.201–215.
- Teixeira, A., 2009. *Impacto da Norma de Conforto Europeia EN 15251 na certificação energética em edifícios de serviços*. Departamento de Engenharia Engenharia

Mecânica,FEUP, Porto.

- Wang, Z., 2006. A field study of the thermal comfort in residential buildings in Harbin. vol. 41, pp.1034–1039.
- Yang, L., Yan, H. & Lam, J.C., 2014. Thermal comfort and building energy consumption implications - A review. *Applied Energy*, vol. 115, pp.164–173.
- Zolfaghari, A. & Maerefat, M., 2011. A new predictive index for evaluating both thermal sensation and thermal response of the human body. *Building and Environment*, vol. 46(4), pp.855–862.

ANEXO A – Resultados tabelados da análise dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) da folha de cálculo

Nível de metabolismo	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00	4,20	4,40	4,60	4,80	5,00	5,20	5,40	5,60	5,80
PMV	-1,65	-0,48	0,00	0,32	0,56	0,76	0,94	1,12	1,30	1,49	1,67	1,86	2,06	2,25	2,45	2,65	2,85	3,05	3,25	3,45	3,65	3,85	4,05	4,25	4,45	4,66
PPD [%]	59,20	9,80	5,00	7,10	11,50	17,20	23,80	31,60	40,50	50,20	60,30	70,20	79,20	86,70	92,30	96,00	98,20	99,30	99,80	99,90	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
zero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vestuário	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00	3,15	3,30	3,45	3,60	3,75
PMV	-2,94	-2,04	-1,41	-0,94	-0,56	-0,25	0,00	0,20	0,37	0,52	0,65	0,76	0,86	0,95	1,02	1,09	1,16	1,22	1,27	1,32	1,36	1,40	1,44	1,48	1,51	1,54
PPD [%]	98,80	78,50	45,90	23,50	11,50	6,30	5,00	5,80	7,90	10,70	13,80	17,20	20,60	23,90	27,20	30,30	33,20	36,00	38,70	41,20	43,50	45,70	47,70	49,60	51,40	53,10
zero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Temperatura do ar	0,00	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00	16,50	18,00	19,50	21,00	22,50	24,00	25,50	27,00	28,50	30,00	31,50	33,00	34,50	36,00	37,50
PMV	-2,99	-2,77	-2,55	-2,33	-2,12	-1,91	-1,70	-1,49	-1,28	-1,08	-0,88	-0,69	-0,49	-0,31	-0,12	0,05	0,23	0,39	0,54	0,66	0,78	0,91	1,06	1,23	1,40	1,58
PPD [%]	99,10	97,50	94,40	89,30	81,80	72,30	61,50	50,20	39,40	29,60	21,40	14,90	10,10	6,90	5,30	5,10	6,10	8,10	11,10	14,20	17,90	22,50	28,90	36,70	45,50	55,10
zero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Temperatura radiante	0,00	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00	16,50	18,00	19,50	21,00	22,50	24,00	25,50	27,00	28,50	30,00	31,50	33,00	34,50	36,00	37,50
PMV	-2,16	-2,02	-1,87	-1,73	-1,58	-1,43	-1,28	-1,14	-1,00	-0,85	-0,70	-0,55	-0,41	-0,26	-0,11	0,05	0,20	0,36	0,51	0,67	0,83	0,99	1,15	1,31	1,48	1,65
PPD [%]	83,40	77,60	70,80	63,30	55,40	47,30	39,50	32,40	25,90	20,20	15,40	11,40	8,40	6,40	5,20	5,00	5,80	7,60	10,50	14,40	19,50	25,70	32,90	41,00	49,80	58,80
zero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Velocidade do ar	0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50
PMV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,08	-0,13	-0,16	-0,20	-0,23	-0,26	-0,28	-0,31	-0,33	-0,35	-0,37	-0,39	-0,41	-0,43	-0,44	-0,46	-0,48	-0,49	-0,50	-0,52
PPD [%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,10	5,30	5,60	5,80	6,10	6,40	6,70	7,00	7,30	7,60	7,90	8,20	8,50	8,80	9,10	9,40	9,70	10,00	10,30	10,60
zero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pressão de vapor de água	1200	1210	1220	1230	1240	1250	1260	1270	1280	1290	1300	1310	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380	1390	1400	1410	1420	1430	1440	1450
PMV	-0,04	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
PPD [%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
zero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

ANEXO B – Resultados tabelados da análise dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) no software CBE

Nível de metabolismo		0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00	4,20	4,40	4,60	4,80	5,00	5,20	5,40	5,60	5,80
ASHRAE 55	PMV	-1,65	-0,48	0,00	0,32	0,56	0,76	0,95	1,12	1,30	1,49	1,67	1,86	2,06	2,25	2,45	2,65	2,85	3,05	3,25	3,45	3,65	3,85	4,05	4,25	4,46	4,66
	PPD [%]	59,00	10,00	5,00	7,00	12,00	17,00	24,00	32,00	41,00	50,00	60,00	70,00	79,00	87,00	92,00	96,00	98,00	99,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
EN 15251	PMV	-1,65	-0,48	0,00	0,32	0,56	0,76	0,95	1,12	1,30	1,49	1,67	1,86	2,06	2,25	2,45	2,65	2,85	3,05	3,25	3,45	3,65	3,85	4,05	4,25	4,46	4,66
	PPD [%]	59,00	10,00	5,00	7,00	12,00	17,00	24,00	32,00	41,00	50,00	60,00	70,00	79,00	87,00	92,00	96,00	98,00	99,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Categoria		IV	II	I	II	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV

Vestuário		0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00	3,15	3,30	3,45	3,60	3,75
ASHRAE 55	PMV	-2,94	-2,04	-1,41	-0,94	-0,56	-0,25	0,00	0,20	0,38	0,52	0,65	0,76	0,86	0,95	1,02	1,10	1,16	1,22	1,27	1,32	1,36	1,40	1,44	1,48	1,51	1,54
	PPD [%]	99,00	79,00	46,00	24,00	12,00	6,00	5,00	6,00	8,00	11,00	14,00	17,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	41,00	43,00	46,00	48,00	50,00	52,00	53,00
EN 15251	PMV	-2,94	-2,04	-1,41	-0,94	-0,56	-0,25	0,00	0,20	0,38	0,52	0,65	0,76	0,86	0,95	1,02	1,10	1,16	1,22	1,27	1,32	1,36	1,40	1,44	1,48	1,51	1,54
	PPD [%]	99,00	79,00	46,00	24,00	12,00	6,00	5,00	6,00	8,00	11,00	14,00	17,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	41,00	43,00	46,00	48,00	50,00	52,00	53,00
Categoria		IV	IV	IV	IV	III	II	I	II	II	III	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV

Temperatura do ar		0,00	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00	16,50	18,00	19,50	21,00	22,50	24,00	25,50	27,00	28,50	30,00	31,50	33,00	34,50	36,00	37,50
ASHRAE 55	PMV	-2,99	-2,77	-2,55	-2,33	-2,12	-1,91	-1,70	-1,49	-1,28	-1,08	-0,88	-0,68	-0,49	-0,30	-0,12	0,06	0,23	0,39	0,54	0,66	0,78	0,91	1,07	1,23	1,40	1,58
	PPD [%]	99,00	98,00	94,00	89,00	82,00	72,00	62,00	50,00	39,00	30,00	21,00	15,00	10,00	7,00	5,00	5,00	6,00	8,00	11,00	14,00	18,00	23,00	29,00	37,00	46,00	55,00
EN 15251	PMV	-2,99	-2,77	-2,55	-2,33	-2,12	-1,91	-1,70	-1,49	-1,28	-1,08	-0,88	-0,68	-0,49	-0,30	-0,12	0,06	0,23	0,39	0,54	0,66	0,78	0,91	1,07	1,23	1,40	1,58
	PPD [%]	99,00	98,00	94,00	89,00	82,00	72,00	62,00	50,00	39,00	30,00	21,00	15,00	10,00	7,00	5,00	5,00	6,00	8,00	11,00	14,00	18,00	23,00	29,00	37,00	46,00	55,00
Categoria		IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III	II	II	I	I	II	II	III	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV

ANEXO B – Resultados tabelados da análise dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) no software CBE “(cont.)”

Temperatura radiante		0,00	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00	16,50	18,00	19,50	21,00	22,50	24,00	25,50	27,00	28,50	30,00	31,50	33,00	34,50	36,00	37,50
ASHRAE 55	PMV	-2,16	-2,02	-1,87	-1,73	-1,58	-1,43	-1,28	-1,14	-0,99	-0,85	-0,70	-0,55	-0,40	-0,26	-0,10	0,05	0,20	0,36	0,51	0,67	0,83	0,99	1,15	1,32	1,48	1,65
	PPD [%]	83,00	78,00	71,00	63,00	55,00	47,00	39,00	32,00	26,00	20,00	15,00	11,00	8,00	6,00	5,00	5,00	6,00	8,00	10,00	14,00	20,00	26,00	33,00	41,00	50,00	59,00
EN 15251	PMV	-2,16	-2,02	-1,87	-1,73	-1,58	-1,43	-1,28	-1,14	-0,99	-0,85	-0,70	-0,55	-0,40	-0,26	-0,10	0,05	0,20	0,36	0,51	0,67	0,83	0,99	1,15	1,32	1,48	1,65
	PPD [%]	83,00	78,00	71,00	63,00	55,00	47,00	39,00	32,00	26,00	20,00	15,00	11,00	8,00	6,00	5,00	5,00	6,00	8,00	10,00	14,00	20,00	26,00	33,00	41,00	50,00	59,00
Categoria		IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III	II	II	I	I	II	II	III	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV

Velocidade do ar		0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	
ASHRAE 55	PMV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,03	-0,04	-0,11	-0,16	-0,21	-0,25	-0,29	-0,32	-0,36	-0,38	-0,41	-0,43	-0,46	-0,48	-0,50	-0,52	-0,53	-0,55	-0,57	-0,58	
	PPD [%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	6,00	6,00	6,00	7,00	7,00	8,00	8,00	9,00	9,00	9,00	10,00	10,00	11,00	11,00	11,00	12,00	12,00	
EN 15251	PMV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,08	-0,12	-0,16	-0,20	-0,23	-0,25	-0,28	-0,31	-0,33	-0,35	-0,37	-0,39	-0,41	-0,43	-0,44	-0,46	-0,47	-0,49	-0,50	-0,52	
	PPD [%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	6,00	6,00	6,00	6,00	7,00	7,00	7,00	8,00	8,00	8,00	8,00	9,00	9,00	9,00	10,00	10,00	10,00	10,00	
Categoria		I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	III	III

Pressão de vapor de água		1200	1210	1220	1230	1240	1250	1260	1270	1280	1290	1300	1310	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380	1390	1400	1410	1420	1430	1440	1450	
ASHRAE 55	PMV	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	PPD [%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
EN 15251	PMV	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	PPD [%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Categoria		I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

ANEXO C – Resultados da análise de sensibilidade dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) na folha de cálculo e *software* CBE

Neste anexo apresentam-se os gráficos respeitantes às tabelas anteriores, obtidas através do cálculo dos índices PMV e PPD, para os diferentes parâmetros. Decidiu-se apenas apresentar em anexo a sobreposição dos resultados, pois eles são praticamente os mesmos segundo as duas metodologias e a sobreposição dos mesmos poderia gerar uma dificuldade de análise acrescida.

Influência do nível de metabolismo

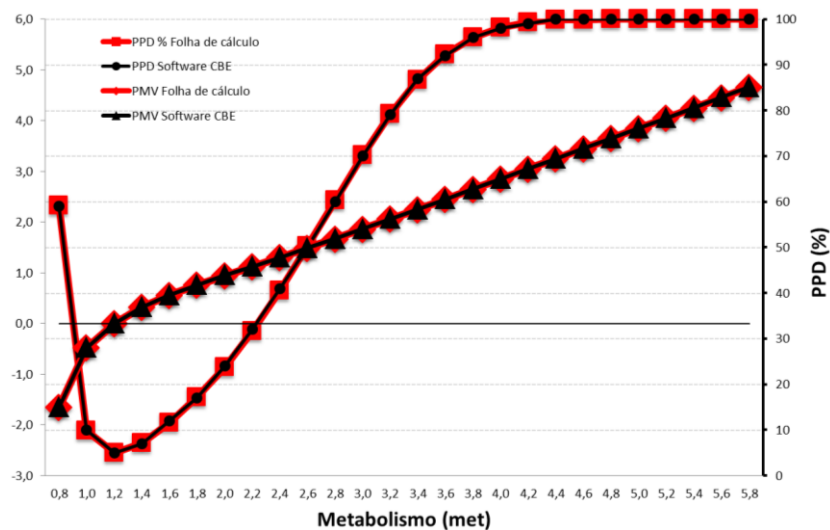


Figura C.1 – Índices PMV e PPD em função do nível metabólico de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e *software* CBE)

Influência do nível de vestuário

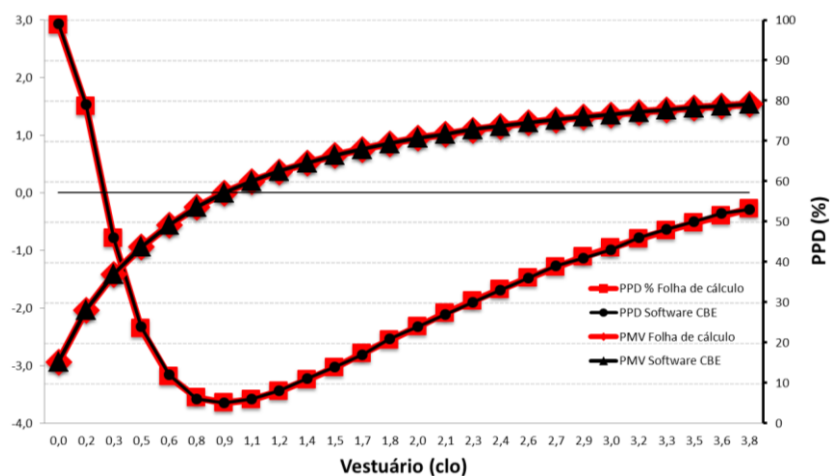


Figura C.2 - Índices PMV e PPD em função do vestuário de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e *software* CBE)

Influência da temperatura do ar

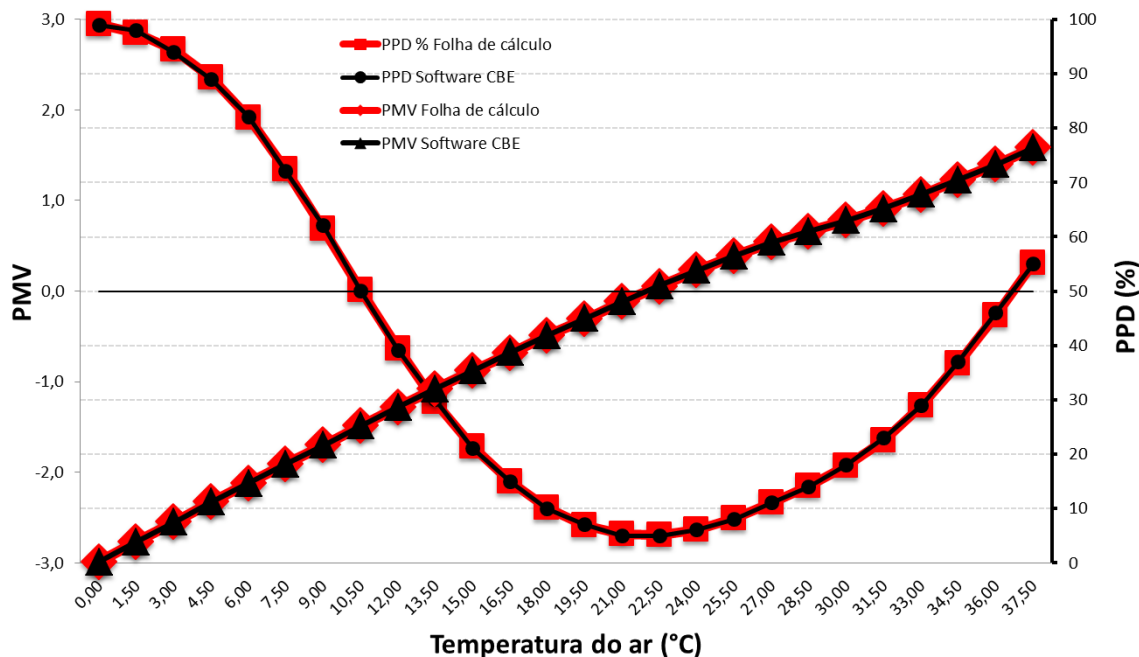


Figura C.3 - Índices PMV e PPD em função da temperatura do ar de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e *software* CBE)

Influência da temperatura radiante

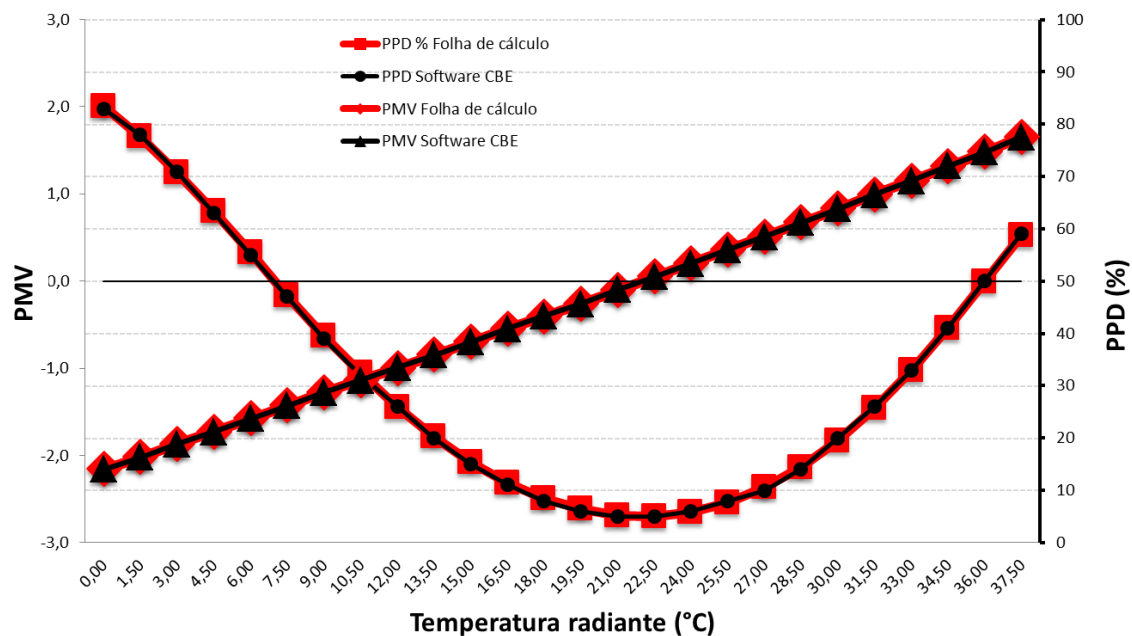


Figura C.4 - Índices PMV e PPD em função da temperatura radiante de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e *software* CBE)

Influência da velocidade do ar

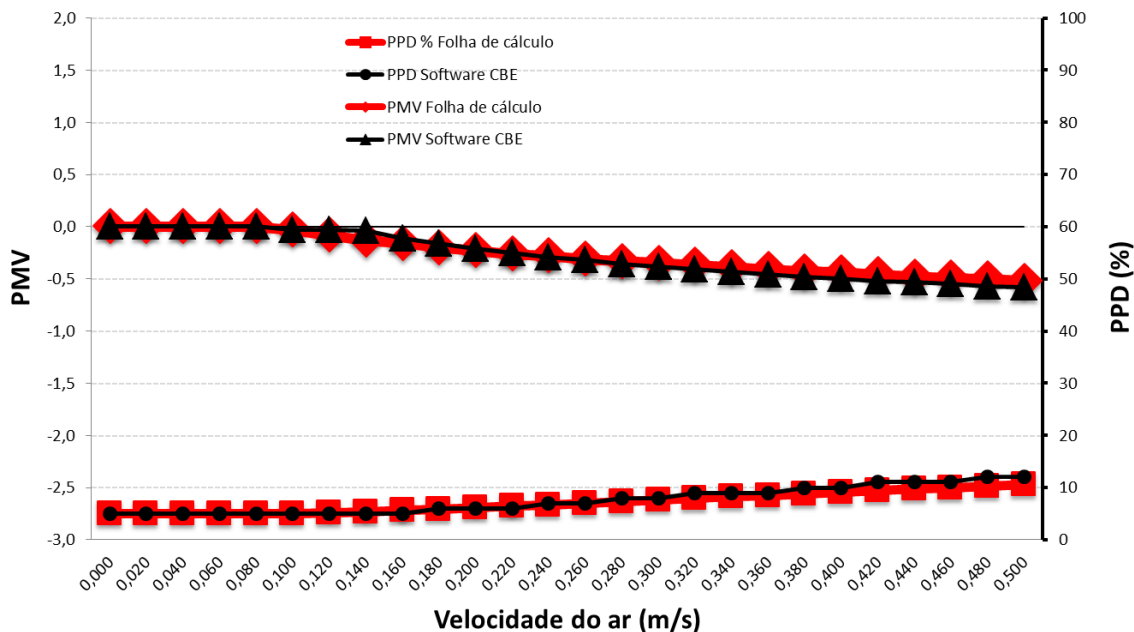


Figura C.5 - Índices PMV e PPD em função da velocidade do ar de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e *software* CBE)

Influência da pressão de vapor de água

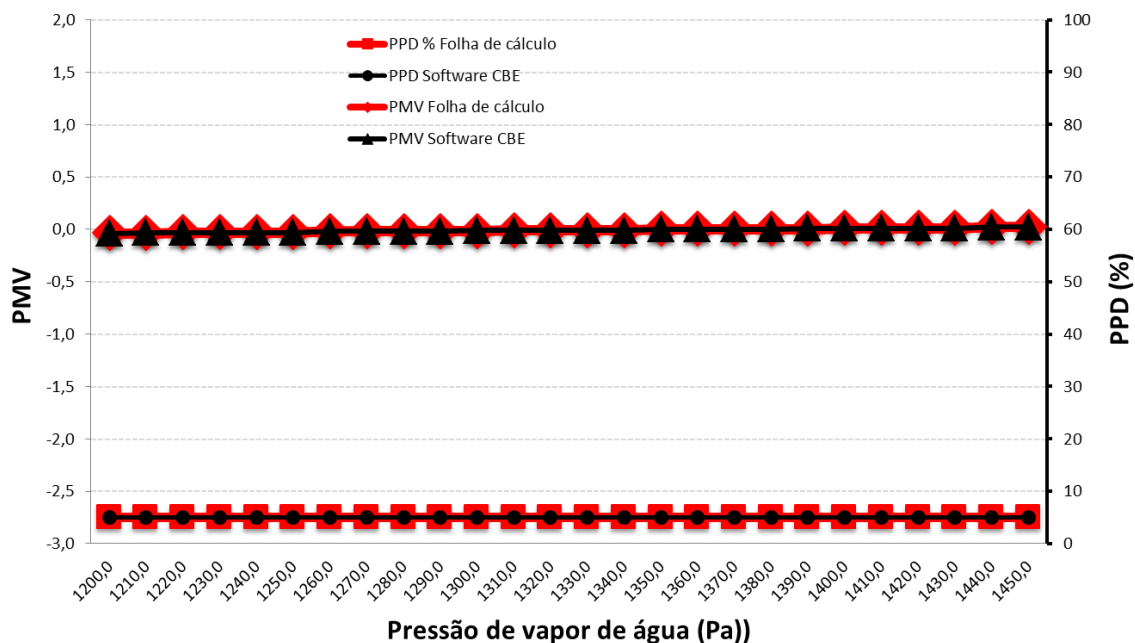


Figura C.6 - Índices PMV e PPD em função da velocidade do ar de acordo com os resultados obtidos pelas duas metodologias (folha de cálculo e *software* CBE)

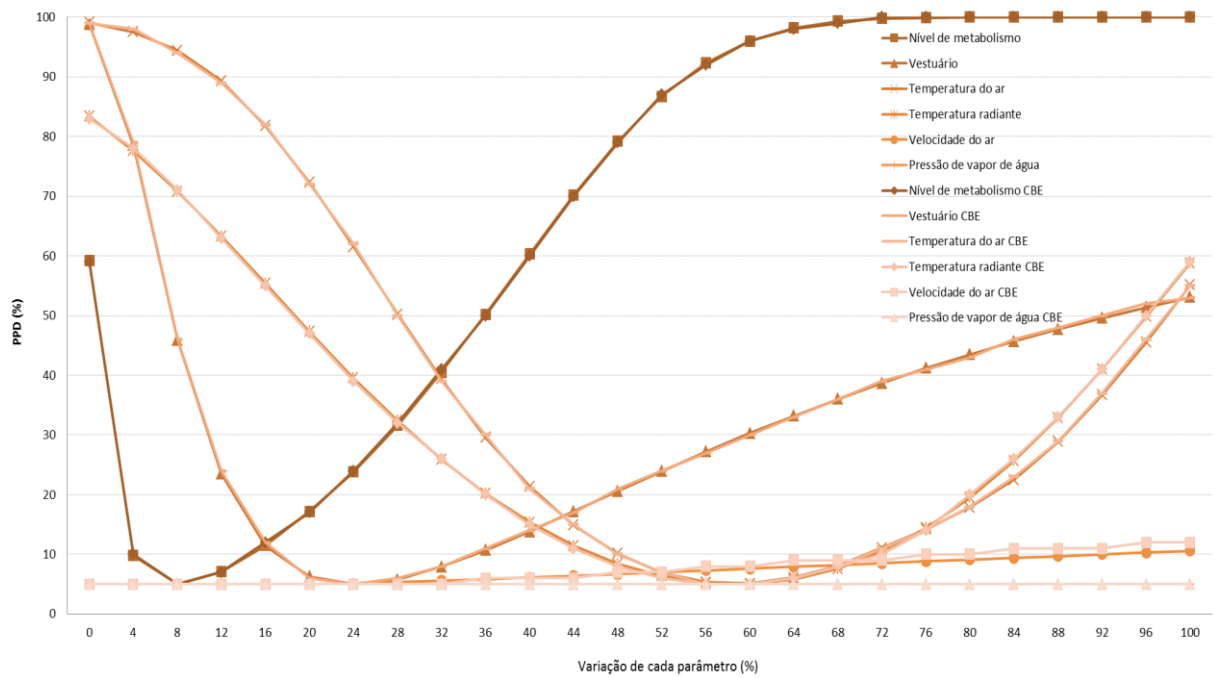


Figura C.7 - Índice PMV em função da variação percentual de cada parâmetro

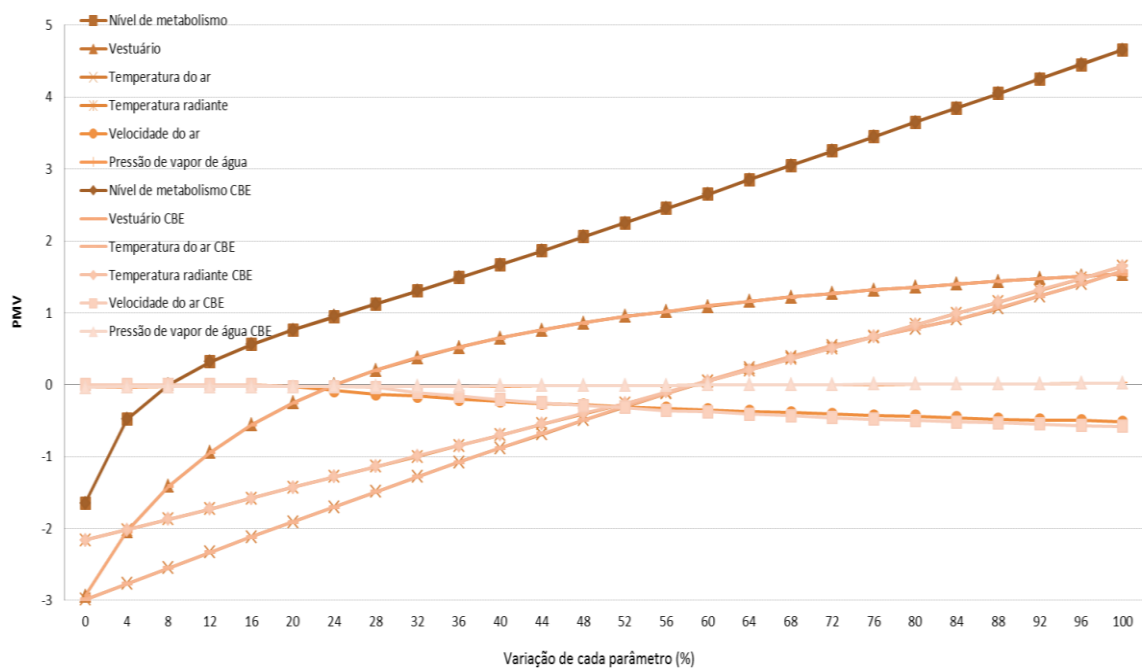


Figura C.8 - Índice PPD em função da variação percentual de cada parâmetro