



Paulo Matos de Carvalho

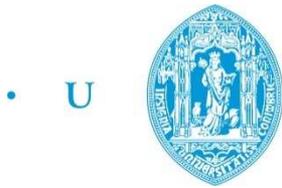
ÍNDICE MULTICRITÉRIO DA PERCEÇÃO DE QUALIDADE DO AMBIENTE INTERIOR

Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica

Março de 2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Paulo Alexandre Matos de Carvalho

ÍNDICE MULTICRITÉRIO DA PERCEÇÃO DE QUALIDADE DO AMBIENTE INTERIOR

Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, na especialidade de Aerodinâmica,
apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para
obtenção do grau de Doutor

Orientadores: Professor Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva
Professor Doutor João António Esteves Ramos

Coimbra, Março de 2014

Índice Multicritério da Perceção de Qualidade do Ambiente Interior

Copyright ©: Paulo Matos de Carvalho, 2014

Edição: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Publicação: Departamento de Engenharia Mecânica

Coimbra, Portugal

ISBN 978-972-8954-36-9

Please cite this work as:

de Carvalho, P.M., Multicriteria Index of Indoor Environment Quality Perception, University of Coimbra, PhD Thesis in Portuguese, ISBN 978-972-8954-36-9

Agradecimentos

Todo o trabalho realizado no âmbito do presente doutoramento não teria sido possível sem o apoio, incentivo e ajuda de familiares, orientadores, colegas e amigos em relação aos quais é mais do que justo que seja aqui expresso publicamente o meu apreço.

Desde logo aos meus filhos Tiago e Laura, que apesar da sua tenra idade souberam perceber a importância da realização deste projeto e à Clara, que sempre me proporcionou uma enorme base de sustentação afetiva. A eles é dedicado este trabalho.

Aos orientadores: Manuel Carlos Gameiro da Silva e João Esteves Ramos. O meu apreço e consideração extravasa largamente as competências científicas de cada um, sendo também muito alicerçado nas respectivas nobrezas de caráter.

Do ponto de vista da orientação científica, Manuel Carlos Gameiro da Silva consegue com muito poucas e assertivas palavras, transmitir um enorme capital de confiança relativamente aos caminhos a percorrer e respetivas metodologias. Essa é sem dúvida uma prerrogativa impar, só ao alcance de alguém que para além de ser um experimentalista consagrado, reúne ainda um nível de conhecimento absolutamente único e não apenas nesta área do saber.

Do ponto de vista da orientação científica, João Esteves Ramos acompanhou este trabalho de doutoramento desde a sua fase inicial em que foram efetuados os ensaios preliminares de caracterização da qualidade do ar interior e os primeiros inquéritos. A sua visão clínica e pragmatismo, a par com os seus conhecimentos e contribuições atentas, foram fundamentais para o resultado final.

À minha família que soube compreender os motivos de um menor contacto, especialmente nos últimos dois anos, e que ainda assim sempre me acarinhou, apoiou e encorajou relativamente a este projeto. Quer aos que sempre estiveram presentes (Mãe, Avós, Tios e Primos). Quer aos que já estando ausentes, continuam presentes nas memórias reconfortantes e nos ensinamentos que me proporcionaram (Irmão e Pai).

Às minhas cunhada e sogra, pelo inestimável apoio prestado. Especialmente quando esse apoio permitia conciliar as necessidades do exercício da docência e do presente trabalho de investigação com as vicissitudes da vida familiar.

Aos colegas e amigos do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Leiria. Com um ênfase especial para os que trabalham no pavilhão de Engenharia Automóvel. É fantástico o nível de apoio e entre - ajuda que sempre senti da parte destas pessoas. Tornam o local de trabalho num espaço extremamente aprazível do ponto de vista humano.

Ao Simão, Teresa, Paulo e Délia, que como amigos, prestaram auxílio quando sentiam que podiam ajudar, estiveram presentes para rejubilar nos bons momentos e igualmente presentes para apoiar nos maus.

Um agradecimento especial também ao Laboratório de Aerodinâmica Industrial pelas condições proporcionadas para a realização deste trabalho e aos colegas deste mesmo laboratório, com um ênfase especial para alguns:

O Luís Serrano, jovial companheiro com quem tenho o prazer de percorrer muitos caminhos comuns e trocar opiniões acerca de imensos aspetos (inclusivamente científicos).

O Carlos Alcobia, para além de ser um amigo sempre disponível para ouvir e ajudar relativamente a tudo o que esteja ao seu alcance é também um investigador com anos de experiência nas mesmas áreas de interesse. Pelas opiniões que tanto prezo e pela disponibilidade para ajudar, expresso a minha gratidão e agradecimento.

O Gonçalo Fonseca pela ajuda na realização dos ensaios de caracterização acústica dos edifícios.

O Mário Mateus pelos seus ensinamentos de acústica.

Aos alunos do Instituto Politécnico de Leiria. Todos os anos, os alunos a quem tenho o prazer de lecionar, se revelam uma fonte de ensinamentos (especialmente os do curso de Engenharia Automóvel), contribuindo para a minha formação como docente e como pessoa. Também merecem uma palavra de apreço os que participaram neste estudo, contribuindo para o mesmo através do preenchimento dos inquéritos

Ao Instituto Politécnico de Leiria pelos apoios concedidos e pela permissão de realização de ensaios nas suas instalações.

Por último, é também mais do que adequado expressar ainda um agradecimento adicional à minha esposa, pela ajuda a transferir para as folhas de cálculo, a grande maioria dos inquéritos recolhidos.

Resumo

Neste trabalho são analisadas as contribuições do ambiente térmico, do ambiente acústico, do ambiente visual e da qualidade do ar para a percepção global da qualidade ambiental de um espaço interior. Os resultados obtidos repercutem a percepção humana após um tempo de exposição prolongada ao mesmo ambiente. Todos os ensaios efetuados, ao longo de cerca de dois anos, decorreram em contexto de sala de aula, no *Campus* de uma instituição de ensino superior e em edifícios naturalmente ventilados. Verificou-se que, nas condições referidas, é possível prever a percepção global de qualidade do ambiente interior com base em apenas três das quatro variáveis mencionadas: Conforto Térmico, Conforto Visual e Conforto Acústico.

Para cada uma destas variáveis é possível determinar os respetivos *voto médio previsível* e *percentagem previsível de insatisfeitos* em função de um conjunto de variáveis físicas objetivamente mensuráveis.

No caso do ambiente térmico verificou-se que o voto médio previsível, calculado de acordo com as correspondentes normas internacionais, apresenta boa concordância com o conjunto de resultados obtidos. No caso da percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente térmico, é proposta uma nova metodologia para a obtenção deste índice que apresenta vantagens ao nível da interpretação física dos resultados obtidos.

Ainda no âmbito do conforto térmico, foi efetuada uma análise detalhada da aplicação do *standard* de conforto térmico adaptativo. Verificou-se que num contexto em que o nível de atividade metabólica é constante para toda a população, são as mesmas variáveis que influenciam o nível de isolamento térmico do vestuário que também influenciam a temperatura interior de conforto e exatamente nas mesmas ponderações. Com base nas conclusões obtidas, é proposta uma nova metodologia para o cálculo da temperatura interior de conforto adaptativo. É ainda proposto um novo índice de temperaturas: A Razão de Equivalência Térmica, concebido para a regulação de temperatura em edifícios naturalmente ventilados e edifícios híbridos.

Nos casos dos conforto acústico e conforto visual, foram desenvolvidos dois índices do *Voto Médio Previsível* e *Percentagem Previsível de Insatisfeitos*, respetivamente para cada um destes. Em ambos os casos, o *Voto Médio Previsível* é obtido com base em grandezas físicas medidas localmente.

No caso da percepção de qualidade do ar interior e nestas condições de exposição longa duração, não foi possível identificar um conjunto de grandezas físicas que permitam estimar o *Voto Médio Previsível* respetivo. É possível no entanto estimar a *Percentagem Previsível de insatisfeitos* com a qualidade do ar apenas com base no voto médio observado para esta percepção. A formulação matemática correspondente é apresentada, conjuntamente com as demais.

Ainda no âmbito da percepção de qualidade do ar, foram identificados alguns efeitos que se supõem estar associados à matriz de distribuição espacial humana e que provocam alterações nas ponderações com que as percepções de ar viciado e de odores influenciam o voto médio de qualidade do ar.

Em ensaios realizados em condições de exames finais, verificou-se que os "estados de alma" (traduzidos pela autoavaliação da *performance* face às expectativas iniciais) não influenciam as avaliações individuais de percepção da qualidade de cada um dos ambiente considerados nem tão pouco a avaliação global efetuada ao ambiente interior no seu todo.

Verificou-se que todas as quatro percepções do ambiente interior, bem como a percepção global do mesmo, possuem uma matriz comum da curva de percentagem previsível de insatisfeitos em função do voto médio respetivo, quando este é expresso em escala unipolar.

Abstract

This work presents an assessment on the influence of thermal comfort, acoustic comfort, visual comfort and air quality perception over the global human perception of an indoor environment. All field essays were conducted in circumstances where the participants were exposed to the indoor environment for a long period. Experiments were conducted for a period of two years in naturally ventilated classrooms of an academic campus.

In these circumstances it is possible to calculate both the *Predicted Mean Vote* and the *Predicted Percentage of Dissatisfied* for each of the significant environments that contribute to the global environmental perception. These models can be calculated based on a set of measured physical variables significant for each perception and the mathematical formulation for the significant perceptions is presented.

In the case of Thermal Comfort, the *Predicted Mean Vote* was calculated according to the international standard where this index is described. The obtained values showed good agreement with the expressed vote in the field experiments. In the case of the *Predicted Percentage of Dissatisfied* with the thermal environment, a new methodology is proposed for the calculation of this index. The main benefit arises from the physical interpretation that can be extracted from the proposed equation.

Still in the context of Thermal Comfort an analysis of the Adaptive Thermal Standard's application was performed. In field experiments performed, the metabolic level was not a variable that could be used to perform thermal adaptation, once all individuals were compelled to perform the same sedentary activity. In these conditions the temperature variables that are significant for the determination of the clothing insulation level showed to be exactly the same that allow to calculate the adaptive comfort temperature. The weight of each significant temperature to the calculation of the clothing insulation level is exactly the same to the calculation of the adaptive thermal comfort. Based on these conclusions, a new formula for the calculation of the adaptive comfort temperature is proposed and a new temperature index is proposed: The Thermal Equivalence Ratio. This index was conceived for the thermal regulation of the temperature in naturally ventilated buildings and hybrid buildings.

In the cases of Acoustic Comfort and Visual Comfort, two *Predicted Mean Vote* indexes were developed (one for each of these). In both cases the respective indexes can be calculated based on a particular set of measured physical variables. Also, for each of these two comforts aspects, the *Predicted Percentage of Dissatisfied* can be calculated based on the same physical variables.

In the case of the Air Quality Perception, it was not possible to identify a set of physical variables that would allow to estimate the respective *Predicted Mean Vote*. However, it is possible to estimate the *Predicted Percentage of Dissatisfied* with the indoor air, based on the mean vote for this perception. The mathematical formulation for this purpose is presented along with the other ones.

Still in the context of the air quality perception, some effects were identified that cause changes in the weighting of the odour and air stiffness perception contributions to the air quality perception as a whole. These effects are supposed to be associated with the human distribution inside the room.

In field experiments conducted during final exams it was possible to assess that the individual state of mind (described by the self-estimated performance compared to the individual expectations prior to the exam) does not influence the individual perceptions of the indoor environment nor the perception of the indoor environment as a whole.

All four analysed perceptions of the indoor environment, as well as the global perception of the same environment present a common pattern of the percentage of dissatisfied curve when plotted as a function of the respective mean average vote, if this vote is presented in a unipolar scale.

Agradecimentos	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Nomenclatura e Acrónimos	xi
1. Introdução.....	1
Principais objetivos	2
Enquadramento do trabalho desenvolvido	2
Estrutura da tese	3
2. Estado da Arte	5
Ambiente Térmico.....	5
Ambiente Acústico	12
Qualidade do Ar	18
Ambiente Luminoso	29
Psicofisiologia	32
Resposta Humana a Estímulos Conjugados	33
Redes Neurais Artificiais	35
Significância Estatística e Coeficiente de Determinação.....	38
3. Métodos Experimentais	39
Avaliação das Perceções Subjetivas	40
Ambiente Térmico.....	43
Ambiente Acústico	48
Qualidade do Ar	50
Ambiente Luminoso	56
4. Análise de Resultados	59
Perceção Subjetiva	61
Percentagem Previsível de Insatisfeitos.....	84
Qualidade do Ar	103
Ambiente Térmico.....	111
Ambiente Acústico	131
Ambiente Luminoso	139
Índice Global da Perceção do Ambiente Interior	143
5. Conclusões.....	145
Bibliografia	151
Anexo	165

Nomenclatura e Acrónimos

Símbolo	Significado e unidades
ALV	Voto de Iluminação Artificial (do termo inglês " <i>Artificial Light Vote</i> ")
AQV	Voto de Qualidade do Ar (do termo inglês " <i>Air Quality Vote</i> ")
ASmV	Voto de Cheiros/Odores (do termo inglês " <i>Air Smell Vote</i> ")
AStV	Voto de Ar Fresco/Viciado (do termo inglês " <i>Air Stiffness Vote</i> ")
AV	Voto Acústico (do termo inglês " <i>Acoustic Vote</i> ")
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
BMI	Índice de Massa Corporal (do termo inglês " <i>Body-Mass Index</i> ") [kg/m ²]
CTA	Conforto Térmico Adaptativo
LV	Voto Luminoso (do termo inglês " <i>Luminous Vote</i> ")
$maxT_{day,x}$	Temperatura máxima exterior registada no dia x [°C]
NIV	Voto de Ruído Interior (do termo inglês " <i>Noise from the Inside Vote</i> ")
NLV	Voto de Iluminação Natural (do termo inglês " <i>Natural Light Vote</i> ")
NOV	Voto de Ruído Exterior (do termo inglês " <i>Noise from the Outside Vote</i> ")
RMSE	Raiz do erro quadrático médio (do termo inglês " <i>Root Mean Square Error</i> ")
$T_{day \cdot x-i}$	Temperatura média exterior registada i dias anteriores [°C]
T_{rm}	Média móvel exponencialmente ponderada das temperaturas médias diárias do exterior [°C]
VOC	Composto Orgânico Volátil (do termo inglês " <i>Volatile Organic Compound</i> ")

1. Introdução

Atualmente, as pessoas passam a maior parte da sua vida em ambientes confinados. Os quatro vetores que representam os principais ambientes interiores para a maioria dos europeus ao longo da sua vida são: a casa, a escola, o local de trabalho e o transporte. Em todos estes ambientes interiores, a ergonomia desempenha um papel fundamental: o de permitir aos seres humanos desempenhar as tarefas pretendidas ou interagir com o meio envolvente, de forma saudável, segura e em condições de conforto.

Numa perspetiva abrangente, a ergonomia pode assim ser definida como a aplicação do conhecimento das características humanas à conceção e projeto de sistemas, componentes e estruturas com as quais o ser humano interaja.

As pessoas que se encontrem sob a ação de um determinado sistema ou dentro de uma estrutura, como um meio de transporte ou um edifício, interagem forçosamente com o ambiente interior numa perspetiva ergonómica. É do resultado dessa interação que surge a Ergonomia Ambiental como um ramo particular da Ergonomia.

A Associação Internacional de Ergonomia (IEA - "*International Ergonomics Association*") foi fundada em Oxford no ano de 1959. Realizou o primeiro grande congresso em Estocolmo no ano de 1961. Nos Estados Unidos havia sido criada a "*Human Factors Society*" em 1957, e até hoje o termo mais frequente naquele país continua a ser "*Human Factors*", embora o termo ergonomia adotado nos principais países europeus seja aceite como sinónimo.

A ergonomia ambiental concentra-se na interação do utilizador com o meio físico que o rodeia, sendo este caracterizado pelos seguintes aspectos: Ambiente térmico (temperatura, humidade, temperatura média radiante, velocidade...), Ambiente acústico (nível de pressão sonora, clareza de audição da mensagem oral...), Ambiente visual (luminosidade, área de janelas...), Qualidade do ar, Vibrações, Pressão atmosférica, ...

A Sociedade Internacional de Ergonomia Ambiental reuniu pela primeira vez em Bristol no ano de 1984 e, desde então, realizou conferências bienais em diversos locais do globo. A ideia original era proporcionar um fórum de discussão para os ergonomistas ambientais. Contudo, desde muito cedo que as preocupações se focaram quase exclusivamente na resposta do ser humano às condições de calor e frio (Parsons, 2000).

Diversas interpretações podem ser feitas para este facto em particular. Desde logo, este facto pode resultar de existirem poucos investigadores ou instituições que considerem a resposta do ser humano

como um todo. Contudo, uma outra explicação para a preponderância da investigação em conforto térmico relativamente às demais pode resultar do facto de, no caso do conforto térmico ser possível desenvolver modelos abrangentes e com domínio de aplicação a praticamente todos os ambientes interiores. Além disso, estes modelos são baseados num conjunto de variáveis físicas possíveis de obter através de medições experimentais, realizadas com um conjunto de equipamentos de custo moderado. Não foi ainda possível desenvolver modelos igualmente abrangentes do ponto de vista do domínio de aplicação para os demais aspetos da ergonomia ambiental e conseqüentemente para a perceção global de conforto ou de qualidade de um ambiente interior.

Considerando por exemplo o caso da perceção de qualidade do ar interior, o efeito conhecido de adaptação da fisiologia humana ao longo do tempo tem como consequência que qualquer modelo global e abrangente que se pretenda desenvolver será sempre um modelo transiente, ou seja dependente da variável "tempo de exposição". Acresce a isto que não existe ainda atualmente instrumentação experimental com uma sensibilidade que esteja sequer próxima da sensibilidade humana para os odores, o que de alguma forma inviabiliza a obtenção de um modelo com base na medição de grandezas físicas objetivas, para este caso.

Considerando os casos do conforto visual ou conforto acústico, há questões que colocam em causa a abrangência pretendida para o domínio de aplicação dos modelos encontrados. Considere-se por exemplo, um modelo experimental robusto de perceção do ambiente visual, obtido em condições interiores de ambiente de escritório. O mesmo pode não ser válido num meio de transporte coletivo (como o autocarro, comboio, avião ou transporte naval) ou ainda sequer num meio de transporte individual uma vez que as tarefas desempenhadas são diferentes, tal como também o são os seus contextos.

Há contudo questões comuns que se aplicam aos vários contextos de aplicação dos modelos de ergonomia ambiental e que só são possíveis de determinar mediante um estudo aprofundado das mesmas.

Principais objetivos

O principal objetivo do trabalho de investigação desenvolvido foi a criação de diversos modelos fechados da perceção humana da qualidade ambiental interior a partir das grandezas que a podem influenciar. Pretendia-se ainda que tal pudesse ser obtido com base em grandezas físicas mensuráveis localmente.

Tanto quanto possível, era desejável que o domínio de aplicação dos modelos obtidos não fosse restringido por condições particulares associadas aos ensaios experimentais efetuados.

Enquadramento do trabalho desenvolvido

A ergonomia ambiental tem como domínios de aplicação os dois principais ambientes interiores em que a maioria dos seres humanos atualmente se podem encontrar confinados: os meios de transporte e os edifícios. Um elemento chave para a realização do trabalho pretendido e para a prossecução do objetivo principal é a determinação da perceção subjetiva humana em relação aos vários aspectos que podem condicionar a sensação de conforto. Para tal torna-se necessário proceder à realização de inquéritos de

avaliação. Este facto levanta por si só questões em relação às quais se torna necessário definir uma estratégia desde o primeiro momento.

Por um lado, é necessário que as amostras recolhidas em cada ensaio tenham dimensão para serem estatisticamente significativas para que os resultados reflitam de facto os valores médios respetivos da população. Por outro lado é necessário que haja uma predisposição positiva dos elementos dos painéis de avaliação para o preenchimento dos inquéritos por forma a garantir que todas as questões são convenientemente respondidas. O contexto de sala de aula possui algumas características que fazem com que as duas premissas mencionadas anteriormente possam ser cumpridas, permitindo desta forma recolher um conjunto de inquéritos cuidadosamente preenchidos. Esses foram dois aspetos que foram também ponderados na escolha do local em que decorreram os ensaios.

Há no entanto condições particulares do ambiente interior de uma sala de aula que são diferentes das que se registam no interior de um transporte público coletivo ou ainda de um transporte individual, o que poderá exigir correções nos modelos construídos a partir das grandezas físicas. As vibrações são um exemplo disso. No estudo efetuado, as vibrações não são sequer consideradas pelo simples facto de não haver qualquer registo deste âmbito, nos edifícios usados para os ensaios de campo. Há casos de estudo de edifícios localizados na proximidade de vias férreas, em que a componente vibratória não é displicente para a perceção subjetiva do ambiente interior. Não é esse o caso no âmbito do presente estudo. Também no interior de um transporte público coletivo, as vibrações representam uma componente importante da perceção de conforto no interior (Alcobia & Silva, 1999; Alcobia, 2006; M.C. Gameiro da Silva, Alcobia, Martinho, & Ramos, 2006).

O âmbito e domínio de aplicação dos resultados obtidos é algo que terá que estar sempre presente em todas as contribuições do presente trabalho para a ergonomia ambiental. Não significa isto de forma nenhuma que muitos dos resultados obtidos não possam igualmente ser válidos em ambientes interiores como transportes públicos coletivos ou individuais.

Estrutura da tese

O presente texto encontra-se dividido em seis capítulos diferentes. O primeiro desses capítulos (Introdução) apresenta um enquadramento de trabalho desenvolvido, motivações do autor para ter desenvolvido o seu trabalho de investigação nesta área em particular e aqueles que definidos inicialmente como os principais objetivos a atingir no âmbito de presente trabalho de doutoramento. É neste capítulo que se enquadra ainda a presente secção de explanação da estrutura adotada para esta obra.

No Capítulo 2 ("Estado da Arte") são apresentadas as principais contribuições científicas para o conhecimento da perceção humana ao nível de cada um dos quatro dos tipos de estímulos considerados. São considerados os ambientes: Térmico, Acústico, Luminoso e de Qualidade do Ar. Neste capítulo é ainda abordada a forma como algumas grandezas físicas são percecionadas pelo ser humano ("Psicofisiologia") e as contribuições científicas que incluem a integração de mais do que um ambiente distinto (ou estímulo) para o conforto global, no sub-capítulo de "Resposta Humana a Estímulos Conjugados". São ainda abordadas as redes neuronais artificiais por dois motivos distintos. Por um lado esta ferramenta de estatística não convencional permite entrar em consideração com todas as componentes não lineares de um determinado modelo. A este nível, revela-se ainda um instrumento poderoso, uma vez que há evidências suficientes de que, através da utilização de redes neuronais artificiais é possível aproximar qualquer função matemática. Por outro lado, as redes neuronais

artificiais possuem uma matriz de inspiração na forma como os seres humanos fazem a sua aprendizagem através repetição de experiências. Sendo neste caso o objetivo "modelar a resposta humana ao ambiente circundante", justifica-se que se atribua a esta ferramenta um destaque especial através da sua inclusão no capítulo do "Estado da Arte".

No Capítulo 3 ("Métodos Experimentais") são apresentadas as condições em que os ensaios experimentais foram realizados e a forma como foram recolhidas, quer as avaliações subjetivas dos elementos dos painéis de avaliação que participaram neste estudo, quer as grandezas físicas objetivas medidas e utilizadas para a determinação dos índices pretendidos.

No Capítulo 4 ("Análise de Resultados") são apresentados os resultados dos ensaios de campo realizados e tratados de acordo com o conjunto de regras de agregação definidas. A partir destes, é desenvolvida a estratégia de prossecução dos objetivos, tendo como base as seguintes premissas: Cada uma das perceções individuais significativas terá que ser abordada e caracterizada de forma independente. Só desta forma, a perceção global poderá ser determinada em função das perceções individuais.

Como tal, em primeiro lugar são analisadas de forma detalhada as várias perceções subjetivas. É avaliada para cada uma delas de que forma as sub-contribuições subjetivas identificadas influenciam essa perceção. É ainda analisada para cada perceção a influência de alguns efeitos de contexto como sejam a importância da tarefa desempenhada e o "estado de espírito" individual.

Com base nos resultados obtidos são avaliadas as contribuições lineares e não lineares das várias perceções subjetivas para o índice global e o mesmo é obtido a partir de a uma rede neuronal artificial. Para cada uma das contribuições subjetivas e para o índice global, são propostos e apresentados Índices da Percentagem Previsível de Insatisfeitos, de acordo com o conjunto de regras de agregação definidas. Cada um dos quatro aspectos ambientais é analisado individualmente (Qualidade do Ar, Ambiente térmico, Ambiente acústico e Ambiente luminoso) do ponto de vista das grandezas físicas objetivas que permitam a determinação da perceção subjetiva correspondente

O índice global da perceção de qualidade do ambiente interior bem como o índice da percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente interior são apresentados com a formulação matemática completa necessária para calcular os respetivos resultados.

No Capítulo 5 ("Conclusões") são sumariadas as principais conclusões decorrentes das análises efetuadas aos resultados obtidos.

2. Estado da Arte

Nos últimos anos tem-se registado um interesse crescente pelo conforto global nos espaços interiores que são mais usados pelos seres humanos ao longo da sua vida. Estes espaços interiores são principalmente a casa, a escola, o escritório (ou local de trabalho) e o automóvel (considerando neste caso a noção de automóvel na sua dimensão mais abrangente e que inclui para além do transporte individual, os diversos transportes públicos).

Por um lado alguns estudos têm demonstrado que a permanência num ambiente confortável melhora a produtividade (Andersson, Boerstra, Clements-Croome, Fitzner, & Hanssen, 2006). Por outro lado, há também uma crescente preocupação com os custos e os impactos ambientais relacionados com os consumos energéticos associados à geração das mesmas condições de conforto.

Existem quatro aspetos ambientais que contribuem para o conforto de um ambiente interior: Conforto térmico; Qualidade do Ar; Conforto acústico; Conforto visual (Alfano et al., 2010). A contribuição ponderal de cada uma destas áreas para a avaliação global do nível de conforto de um ambiente interior pode variar de indivíduo para indivíduo. Dois destes aspetos estão intimamente ligados a dois sentidos humanos: o conforto acústico à audição e o conforto visual à visão. Nestes dois casos, ambos os estímulos ambientais relevantes se encontram absolutamente confinados aos sistemas sensoriais dos sentidos respetivos.

Nos casos da perceção de qualidade do ar e do conforto térmico não é possível confinar cada um destes fatores a apenas um dos sentidos humanos. Existe uma grande ligação entre a perceção da qualidade do ar e o sistema sensorial do sentido do olfato, mas a perceção humana de qualidade deste fator não se esgota neste sentido. Também no caso do conforto térmico há alguma relação entre este e o sentido do tato, mas a perceção humana de conforto não se encontra confinada a este sentido.

Ambiente Térmico

Os seres humanos, tal como os restantes seres vivos, obtêm a sua energia a partir dos alimentos ingeridos. Contudo, o corpo humano apresenta baixos valores de eficiência mecânica: entre cinco a dez por cento (Nishi, 1981). Desta forma, a maior parte da energia gerada através da oxidação dos alimentos

é convertida em energia térmica, que é posteriormente transmitida até à superfície do corpo por convecção através da corrente sanguínea e por condução entre os tecidos.

Efetuando um balanço energético ao corpo humano, pode considerar-se que o calor produzido internamente (Q) corresponde à diferença entre a atividade metabólica (M) e o trabalho mecânico realizado (W_m). Numa situação de regime permanente, o resultado líquido do calor produzido também é igual às perdas de calor por convecção das vias respiratórias (C_{res}) e evaporação pelas vias respiratórias (E_{res}), acrescido da perda de calor evaporativa através da pele (E) e das transferências por condução (K), convecção (C) e radiação (R). Tal pode ser traduzido pela equação:

$$Q = M - W_m = C_{res} + E_{res} + E \pm K \pm C \pm R + S \quad (2.1)$$

Na qual: S = Termo de calor armazenado (valor nulo em condições de equilíbrio térmico)

Em condições normais, o equilíbrio térmico do corpo humano é assegurado pelo sistema de termoregulação que atua sobre algumas das variáveis acima mencionadas para manter o corpo humano dentro de uma faixa de temperaturas considerada segura. O centro termoregulador do corpo humano situa-se no hipotálamo e controla, vários processos fisiológicos para manter a temperatura profunda em torno de um valor definido em função da taxa metabólica: geralmente 36,8 °C para uma pessoa sedentária e 37,9 para uma pessoa com atividade elevada (DuBois, 1941).

Diversos processos de controlo podem ser usados, isoladamente ou de forma combinada, pelo organismo humano para garantir o equilíbrio de fluxos térmicos entre este e o ambiente. O tipo processos usados depende da magnitude do fluxo térmico gerado. Um processo de primeira linha é a alteração do caudal de sangue do interior do corpo para a camada da pele. Tal é conseguido pela alteração das áreas de passagem do fluxo sanguíneo nos vasos sanguíneos podendo ser acompanhado por ajustes do batimento cardíaco.

Em condições de fluxos térmicos maiores, a simples alteração do fluxo de sanguíneo pode ser insuficiente, sendo então ativados outros mecanismos termoreguladores de segunda linha. Sendo o desvio do equilíbrio térmico provocado por uma condição de frio, uma resposta do organismo são os tremores involuntários, comumente designado por "tiritar de frio". Este mecanismo de contração muscular involuntária aumenta o nível de atividade metabólica e conseqüentemente a produção interna de calor. Se o desvio do equilíbrio térmico for provocado por uma situação de calor a resposta de segunda linha do organismo é a sudação. Este mecanismo consiste no bombear de suor, pelas glândulas sudoríparas, para a superfície da pele. A evaporação do suor remove da superfície do corpo humano para o ambiente uma quantidade de calor elevada correspondente à sua entalpia de mudança de fase.

O organismo humano possui recetores sensoriais diferenciados para as sensações de frio e calor. Ambos os tipos de recetores estão localizados imediatamente abaixo da pele em pontos discretos e separados. Possuem ambos um diâmetro de cerca de 1 milímetro. O número de recetores de frio e calor não é igual, nem tão pouco nenhum deles se encontra uniformemente distribuído pelo corpo humano. Para a maior parte das áreas do corpo há cerca de 3 a 10 vezes mais recetores de frio que recetores de calor. A assimetria na distribuição de recetores de frio pelo corpo humano resulta em densidades de recetores que oscilam entre 15 a 25 recetores de frio por centímetro quadrado nos lábios, até 3 a 5 recetores de frio por centímetro quadrado no dedo e menos de 1 recetor por centímetro quadrado em algumas áreas amplas da superfície do tronco. Também para os recetores de calor se regista o mesmo tipo de assimetria na densidade da sua distribuição espacial pelo corpo humano.

Os recetores sensoriais de frio respondem a perdas térmicas provocadas por temperaturas inferiores a 17 °C, sendo esta informação enviada pelo mecanismo de transmissão sináptico para o sistema nervoso

central. O mecanismo é semelhante para os recetores sensoriais de calor, mas neste caso atuando como resposta às temperaturas mais elevadas (R.J. Dear, Ring, & Fanger, 1993; Ring & Dear, 1991).

Os seres humanos não são sensíveis ao valor absoluto da temperatura mas sim à magnitude das trocas térmicas entre o organismo e o meio envolvente. Desta forma, ambos os tipos de recetores são sensíveis às perdas ou ganhos térmicos, sendo este tipo de resposta designada neste âmbito como resposta estática. Mas, para além disso, os recetores também são sensíveis às variações nos ganhos ou perdas térmicas, sendo neste caso a resposta dos recetores designada por resposta dinâmica.

A não necessidade de atuação de qualquer um dos mecanismos de termoregulação está relacionada com a noção de conforto térmico. Também a temperatura superficial da pele está relacionada com a noção de conforto térmico, uma vez que, nesta situação fisiológica (de conforto) é geralmente aceite que a temperatura média da pele de uma pessoa se situa no intervalo de 33 a 34 °C (Fanger, 1973). Contudo a definição mais elegante de conforto térmico foi proposta por Fanger e adotada por diversas organizações internacionais como a "International Organization for Standardization (ISO)" (ISO 7730, 2005) ou a "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)" (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2010). Conforto térmico é assim definido como

"O Estado de espírito em que o indivíduo expressa satisfação em relação ao ambiente térmico".

Esta definição permite retirar duas conclusões distintas. Por um lado, o ser humano é a métrica do conforto térmico e por outro lado a perceção subjetiva de conforto térmico coincide em absoluto com o próprio conforto térmico.

Há um elevado número de parâmetros ambientais que influenciam o conforto térmico. Por vezes a sua avaliação in loco torna-se difícil e complexa. Diversos índices têm sido propostos com o intuito de melhor descrever o ambiente térmico para o ser humano com base num número de variáveis limitado e facilmente mensurável. Desta forma, a complexidade e aplicação prática destes índices em situações de ensaios de campo também decorre do número e tipo de variáveis que estes encerram na sua formulação.

As primeiros índices propostos consistiram na redução do ambiente real a um ambiente imaginário caracterizado apenas por um valor de temperatura. Tal é o caso da temperatura operativa (Gagge, 1940).

A temperatura operativa (T_o) é o resultado do efeito combinado dos fenómenos de convecção e de radiação. Resulta numa média ponderada da temperatura do ar e da temperatura média radiante em que os coeficientes de ponderação são os coeficientes de transmissão de calor associados às grandezas que representam cada um dos fenómenos:

$$T_o = \frac{h_c T_a + h_r T_r}{h_c + h_r} \quad (2.2)$$

Este conceito integra de forma direta os efeitos da temperatura do ar e da temperatura média radiante. Mas, para além destes, integra ainda de forma indireta, o efeito da velocidade do ar que se encontra incorporado no coeficiente de transmissão de calor por convecção.

Um novo índice de temperaturas foi proposto posteriormente baseado no conceito de temperatura operativa: A temperatura efetiva (Gagge & Stolwijk, 1972). Esta foi definida como sendo a temperatura

de um ambiente, com uma humidade relativa de 50% e que provoca a mesma perda de calor através da pele que seria perdida no ambiente considerado. Matematicamente, a temperatura efetiva é definida por:

$$T_{ef} = T_o + w \cdot i_m \cdot LR (P_v - 0,5 \cdot P_{vs,ef}) \quad (2.3)$$

Sendo:

T_o - Temperatura Operativa [°C]

w - Fração da pele húmida

i_m - Índice de permeabilidade de humidade

LR - Relação de Lewis

P_v - Pressão parcial de vapor [Pa]

$P_{vs,ET}$ - Pressão parcial de vapor saturado à temperatura efectiva [Pa]

Desta forma, este índice combina os efeitos da temperatura média radiante e da temperatura do ar que se encontram incorporados na temperatura operativa. Combina ainda (de forma indireta) a velocidade do ar também na temperatura operativa. Acrescenta ainda a estes o efeito do grau de humidade da pele (w) e o índice de permeabilidade (i_m).

Um outro índice de temperaturas foi desenvolvido durante a década de 50 (do século XX), especialmente destinado aos campos de treinos do exército e corpo de fuzileiros dos Estados Unidos da América, como um elemento de controlo de esgotamentos físicos severos provocados pelo calor designado por Temperatura de Bolbo Húmido e de Globo (WBGT da expressão inglesa "*Wet-Bulb Globe Temperature*"). Este índice é função da temperatura, da velocidade e da humidade do ar, bem como da temperatura média radiante. Esta é determinado a partir da temperatura húmida natural, temperatura de globo negro, e sob o efeito de uma carga térmica solar, da temperatura do ar nas condições descritas pela norma (ISO 7726, 1998) para cada uma das grandezas. Os coeficientes de ponderação entre as grandezas são apresentados noutra norma internacional (ISO 7243, 1989).

As maiores limitações deste índice de temperaturas decorrem do facto de determinados ambientes serem muito mais extenuantes do ponto de vista térmico do que o previsto pelo índice. Tal ocorre especialmente nos casos em que as perdas evaporativas sejam baixas, quer pelo facto de a humidade do ar ser elevada, quer pelo facto de a sua velocidade ser baixa ou nula (Budd, 2008).

Um dos índices de temperatura mais versáteis é o de Temperatura Equivalente (T_{eq}). Este índice contabiliza de forma direta os efeitos da temperatura do ar (T_a), da temperatura média radiante (T_r), da velocidade do ar (u) e, inclusivamente, do isolamento térmico devido ao vestuário (I_{cl}), existindo diversos métodos para a sua obtenção podendo ser medido diretamente com recurso a um transdutor aquecido (Madsen, 1971). Matematicamente este índice pode ser obtido através da seguinte expressão (Madsen, Olesen, & Cristensen, 1984):

$$T_{eq} = 0,55T_a + 0,45T_r + \frac{0,24 - 0,75\sqrt{u}}{1 + I_{cl}} (36,5 - T_a) \quad (2.4)$$

Outros dois índices foram propostos por Fanger (Fanger, 1970) ficando conhecidos internacionalmente pelas siglas respetivas *PMV-PPD* (de "*Predicted Mean Vote*" e "*Predicted Percentage of Dissatisfied*").

No âmbito deste trabalho, e para não gerar confusões nem ambiguidades entre o voto da percepção subjetiva térmica e os demais, este índice será sempre precedido das letras *Th* correspondentes à palavra inglesa "*Thermal*". Assim sendo os índices de conforto térmico propostos por Fanger serão designados de *Th.PMV-Th.PPD*.

O valor *Th.PMV* representa a votação média previsível da avaliação do ambiente térmico, realizada por um painel de pessoas e usando para tal a escala de 7 pontos de conforto sugerida por Gagge (Gagge, Burton, & Bazett, 1941)

O conjunto de equações que representam o modelo é válido para ambientes moderados e foi adotado internacionalmente (ISO 7730, 2005)

$$\begin{aligned} Th.PMV = & (0,30e^{-0,036M} + 0,028) \times \left\{ (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \times \right. \\ & \times [5,733 - 6,99(M - W) - P_v] - 0,42[(M - W) - 58,15] - \\ & - 1,7 \times 10^{-5} M (5,867 - P_v) - 0,0014M (34 - T_a) - \\ & \left. - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c (T_{cl} - T_a) \right\} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Fanger propôs ainda que o índice de percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente térmico (*Th.PPD*) pode ser calculado a partir do valor *Th.PMV* obtido a partir da Equação (2.5), de acordo com:

$$Th.PPD = 100 - 95 \times e^{-\left(0,03353 \cdot Th.PMV^4 + 0,2179 \cdot Th.PMV^2\right)} \quad (2.6)$$

Pode concluir-se então que na prática a percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente térmico depende das mesmas variáveis que permitem prever o voto médio da população.

Sendo:

M - Nível metabólico [W/m²]

W - Trabalho mecânico exterior [W/m²]

P_v - Pressão parcial de vapor [Pa]

T_a - Temperatura do ar [°C]

T_r - Temperatura média radiante [°C]

T_{cl} - Temperatura média da superfície do vestuário [°C]

f_{cl} - fator de vestuário ou razão entre a área do corpo vestida e a área despida

h_c - Coeficiente de transmissão de calor por convecção [W.m⁻².°C⁻¹]

O coeficiente de convecção para o ar em torno de um ser humano pode ser obtido a partir de:

$$h_c = \begin{cases} 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} & , se \quad 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{u} \\ 12,1\sqrt{u} & , se \quad 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} < 12,1\sqrt{u} \end{cases} \quad (2.7)$$

Sendo *u* a velocidade média do ar em m/s.

E o fator de vestuário ou razão entre a área do corpo vestida e a área despida obtido a partir de:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} & ,se \quad I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1} \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} & ,se \quad I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1} \end{cases} \quad (2.8)$$

Sendo I_{cl} o nível de isolamento do vestuário em $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Uma unidade mais prática para expressar o nível de isolamento proporcionado pelo vestuário é o "clo" (Gagge et al., 1941). A unidade clo representa o isolamento proporcionado pelo vestuário que mantém um indivíduo, sentado e em situação de repouso, confortável num espaço normalmente ventilado (velocidade do ar de 0,1 m/s) à temperatura de 21 °C e humidade relativa inferior a 50%. O valor unitário desta grandeza (1 clo) é igual a 0,151 $\text{m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1}$. Desta forma, o valor de fronteira (0,078 $\text{m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1}$) apresentado na Equação (2.8) é igual a 0,5 clo, o que na prática corresponde a uma indumentária média envergada por uma população jovem e não sujeita a códigos de vestuário, num dia típico de primavera com temperaturas máximas exteriores da ordem de 22 a 23 °C (de Carvalho, da Silva, & Ramos, 2013).

A temperatura média na superfície do vestuário pode ser calculada através da equação:

$$T_{cl} = 37,5 - 0,028(M - W) - I_{cl} \times \{3,96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \times \\ \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c (T_{cl} - T_a)\} \quad (2.9)$$

O cálculo desta grandeza, efectuado de acordo com a expressão apresentada, é necessariamente iterativo uma vez que a temperatura da superfície do vestuário é definida em função dela própria não permitindo o isolamento desta grandeza por manipulação algébrica simples.

O valores de Th.PMV-Th.PPD podem ser calculados para diferentes combinações de níveis de atividade metabólica, temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e pressão parcial de vapor de água (humidade absoluta do ar), de acordo com o preconizado na norma ISO 7730:2005, devendo as respectivas medições ser efectuadas tendo em conta as recomendações da norma ISO 7726 (ISO 7726, 1998). No entanto, o domínio de validade recomendado para os valores obtidos dos índices Th.PMV-Th.PPD é para valores de Th.PMV compreendidos entre -2 e +2 e considerando ainda os intervalos de domínio de aplicação das grandezas seguintes:

$$M \in [46; 232] \text{ W} \cdot \text{m}^2 \quad \text{ou} \quad [0,8; 4,0] \text{ met}$$

$$I_{cl} \in [0; 0,31] \text{ m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1} \quad \text{ou} \quad [0; 2] \text{ clo}$$

$$T_a \in [10; 30] \text{ °C}$$

$$T_r \in [10; 40] \text{ °C}$$

$$u \in [0; 1] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P_v \in [0; 2700] \text{ Pa}$$

$$HR \in [30; 70] \%$$

Nestas condições a função da percentagem previsível de insatisfeitos possui a curva apresentada na Figura 2.1.

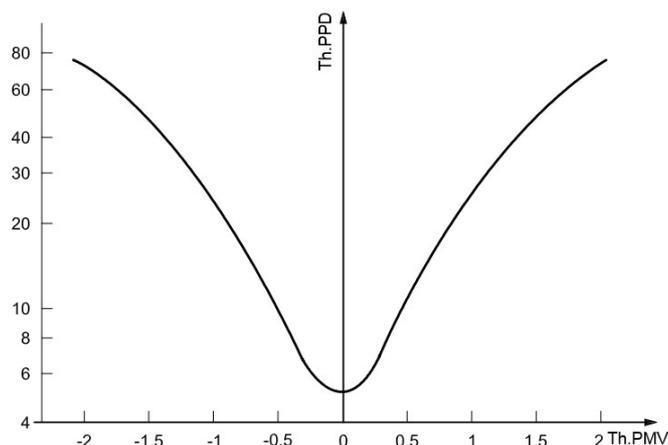


Figura 2.1 - Curva da percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente térmico em função do voto médio respetivo. Adaptado a partir da norma (ISO 7730, 2005).

A referida norma considera como desconfortável um indivíduo que expresse o seu voto térmico como sendo "Muito Frio", "Frio", "Quente" ou "Muito Quente". Ou de outra forma, considera válida a condição de conforto térmico, se o voto expresso da perceção subjetiva for "Ligeiramente frio", "Neutro" ou "Ligeiramente Quente". O que significa que um sujeito é considerado em situação de conforto térmico quando o seu voto se encontra compreendido entre os valores de -1,5 a +1,5 na escala de sete pontos de McIntyre.

Considerações adicionais estabelecem ainda como aceitável uma diferença de temperatura do ar medida ao nível do tornozelo (a 0,1 m do solo) e da nuca (a 1,1 m do chão), de 3 °C para uma pessoa sentada e com uma atividade sedentária.

A formulação matemática e aplicação dos índices propostos por Fanger foram amplamente testadas em diversos ambientes interiores, não só de edifícios como também de meios de transporte. Estes índices tiveram ainda alguns refinamentos posteriores que consistiram na consideração dos efeitos das componentes flutuantes da velocidade do ar e da temperatura. Foi proposta a criação do conceito de desconforto térmico localizado para calcular a percentagem de pessoas insatisfeitas devido aos efeitos provocados por correntes de ar (Melikov, 1988). Os fatores considerados neste cálculo são os valores médios temporais da temperatura e da velocidade do ar e a componente flutuante desta última, na forma de intensidade de turbulência. Mais recentemente foi também proposto que se incorporasse o efeito da componente flutuante da temperatura, (Madsen & Popielek, 1994).

Alguns autores desenvolveram um modelo adaptativo de conforto térmico em edifícios nos quais as condições interiores de conforto possam ser ajustáveis pelos seu ocupantes (R. J. de Dear & Brager, 1998; Richard de Dear & Brager, 1998; Richard J. de Dear & Brager, 2002; R De Dear, 2004; Richard De Dear, Brager, & Cooper, 1997). Os ajustamentos mais comuns às condições interiores de conforto resultam da abertura e fecho de janelas (ou portas exteriores) nos edifícios em que os ocupantes tenham acesso às mesmas. Tal é usualmente o caso em edifícios que não estejam dependentes de um sistema centralizado de ventilação para a renovação do ar interior.

As condições climatéricas interiores podem ter um forte impacto no desempenho do ser humano em espaços interiores de escritórios (Wargocki, Wyon, & Fanger, 2000), ou no interior de veículos, diminuindo a concentração e capacidade de reação dos condutores (R. R. Mackie, McCauley, & O'Hanlon, 1974; Robert R. Mackie & O'Hanlon, 1977).

Ambiente Acústico

O som resulta da propagação de uma onda mecânica num meio físico que possua densidade não nula. A situação mais comum envolvendo o sistema auditivo humano resulta da propagação das ondas sonoras no ar atmosférico. Nesta situação a ação mecânica geradora de som provoca compressão das moléculas de ar originando regiões de alta pressão que alternam com regiões de baixa pressão provocadas pela rarefação das moléculas de ar. As moléculas de ar inicialmente perturbadas pela compressão inicial vão perturbar outras moléculas de ar adjacentes, originando novas regiões de compressão e rarefação, num efeito "dominó" que se propaga no ar atmosférico. À medida que a onda sonora se vai afastando da fonte original a sua intensidade vai diminuindo até que acaba por desaparecer.

O ouvido humano tem capacidade para detetar ondas sonoras numa faixa de frequências compreendida entre os 20 e os 20000 Hz. Para o ouvido humano, uma onda sonora representa a flutuação da pressão do ar ao longo do tempo e em torno do valor médio (pressão atmosférica). A percepção do som é a sensação produzida pelo ouvido humano quando este é estimulado pela componente flutuante do sinal de pressão. O efeito da onda sonora recebida resulta assim numa evolução temporal de uma pressão oscilante.

Existem três propriedades que caracterizam o som:

1. Tom;
2. Intensidade;
3. Timbre.

O tom de um som é determinado pela frequência da vibração. Quanto maior a frequência, mais elevado é o tom. Como exemplos de tons, podem mencionar-se as notas musicais Dó ou Ré.

A intensidade do som depende da amplitude da onda sonora. Quanto maior for a amplitude da onda sonora, mais intenso é o som.

O timbre ou qualidade de um som depende dos seus harmónicos, que são frequências adicionais que se sobrepõem ao tom fundamental. Os harmónicos são responsáveis pelas diferentes características de cada voz ou de cada instrumento, permitindo assim reconhecer a fonte sonora.

A pressão sonora instantânea é num dado instante e numa dada localização espacial a diferença entre a pressão absoluta medida e o valor médio da pressão atmosférica nesse meio ambiente. Como essa pressão instantânea vai variando ao longo do tempo, devido ao efeito da passagem da onda sonora, utiliza-se como indicador local o valor da pressão sonora efectiva que é o desvio-padrão (raiz do valor médio quadrático) da componente flutuante do sinal sonoro para um dado intervalo de tempo (T) e é descrita pela seguinte expressão:

$$P_{RMS}^2 = \frac{1}{T} \int P^2 dt \quad (2.10)$$

Como pressão que é, o seu valor será representado na unidade internacional correspondente à mesma grandeza: o Pascal. No entanto, verificou-se na prática que o sistema auditivo humano é sensível a uma faixa muito ampla de valores de pressão sonora, sendo o quociente entre o seu seu valor mais elevado (definido pelo limiar da dor).e o seu valor mais baixo (definido pelo limiar da audição) de 10 milhões.

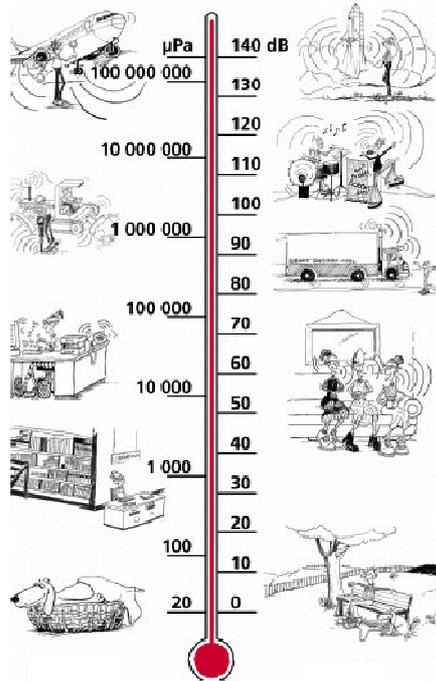


Figura 2.2 - Valores de pressão sonora e nível de pressão sonora correspondente

Verificando-se a ocorrência de uma gama de variação com várias ordens de grandeza para uma variável, a solução mais comum para a redução de magnitude da escala consiste na *logaritmização* da variável. Desta forma, definiu-se o nível de pressão sonora (*NPS*) a partir do logaritmo do quociente entre a pressão sonora efectiva e a pressão sonora de referência (limiar de audição), de acordo com a Equação (2.11).

$$NPS = 10 \log_{10} \left(\frac{P^2}{P_{ref}^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (2.11)$$

A adimensionalização do nível de pressão sonora é efetuada com base no valor que se considera ser o limiar de audição de um ser humano normal sujeito a um tom puro de 1000 Hz: 20 µPa. Para este nível de pressão corresponde um valor do nível de pressão sonora de zero decibel.

Em termos acústicos podem definir-se outras grandezas base, como sejam a potência e a intensidade sonora. O nível de potência sonora é definido pela Equação (2.12).

$$L_w = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_{ref}} \right) \quad (2.12)$$

sendo W a potência acústica da fonte sonora que é comparada com um valor de referência convencionalmente arbitrado ($W_{ref} = 10^{-12}$ [W]).

A intensidade sonora, num determinado ponto, é definida na Equação (2.13)

$$I = \frac{P_{RMS}^2}{\rho_a \cdot c} = \frac{W}{A} \quad (2.13)$$

designando:

c a velocidade do som no ar [m/s];

ρ_a a massa volúmica do ar [kg/m^3];

W a potência acústica [W]

A a área [m^2].

A grandeza logarítmica correspondente ao valor adimensionalizado de intensidade sonora é designada por Nível de Intensidade Sonora (L_i), e apresentada na Equação (2.14).

$$L_i = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}} \quad (2.14)$$

sendo considerado como valor de referência para a intensidade sonora $I_{ref} = 10^{-12}$ [W/m^2].

Em muitas situações é necessário caracterizar o efeito sonoro ao longo de um período mais alargado do que o intervalo de tempo usado para o cálculo do nível de pressão sonora (125 ms ou 1 s, conforme se utiliza uma característica de resposta rápida ou lenta do sonómetro, respetivamente). O índice normalmente utilizado para esse efeito designa-se por nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}). Este índice corresponde ao nível de pressão sonora de um sinal sonoro constante que resulta no mesmo conteúdo em energia, após o período de amostragem considerado, do sinal não constante registado. O seu cálculo é baseado na média temporal do valor médio quadrático da pressão sonora e apresentado na Equação (2.15):

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{NPS}{10}} dt \right) \quad (2.15)$$

Se a evolução temporal do nível de pressão sonora assumir uma forma discreta no tempo, em vez de um registo contínuo, o nível sonoro contínuo equivalente pode, neste caso, ser calculado através da média energética dos vários níveis sonoros, definida pela Equação (2.16).

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{NPS_i}{10}} \right) \quad (2.16)$$

Todos os índices e parâmetros acústicos apresentados estão associados apenas à grandeza física da variação da pressão, mas sem ter em consideração o seu conteúdo em frequência. Tal facto tem como consequência que nenhum deles reflete a forma como o ouvido humano interpreta as características do som.

Para descrever a percepção do som pelo ouvido humano foi introduzido nos anos trinta o conceito de curvas isofónicas (Fletcher & Munson, 1933) de acordo com Lei de Weber-Fechner (apresentada em maior detalhe no sub-capítulo "*Psicofisiologia*" do presente texto).

Este tipo de curvas pretende representar a correlação entre a pressão sonora (objetiva) e a percepção sonora do ouvido humano (subjativa), para o intervalo de frequências audíveis e considerando ainda o domínio de pressões sonoras compreendido entre o limiar da audição humana e o limiar de dor. Estas curvas foram inicialmente obtidas para tons puros, mas estudos levados a cabo por Robinson e White *fide* (Alcobia, 2006; Onusic & Hage, 2005) permitiram a obtenção de curvas isofónicas para níveis de pressão sonora em bandas de oitava apresentadas na Figura 2.3.

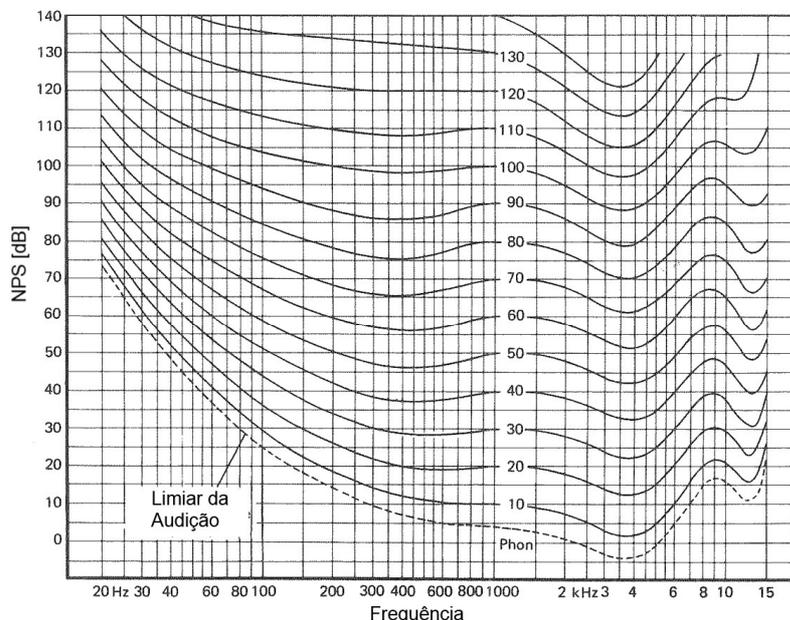


Figura 2.3 - Curvas isofónicas para tons puros.
Adaptado a partir de (Hassal & Zaveri, 1988).

Em 1955, Stevens apresentou um conceito análogo, tentando introduzir variações lineares (sones) em vez de variações logarítmicas (fones). O autor definiu o *sone* como sendo "A unidade da escala de nível sonoro correspondente a um tom puro de 1000 Hz e com 40 dB de nível de pressão sonora. Um outro som de dois sone será percebido com um nível sonoro duas vezes maior" *fide* (Onusic & Hage, 2005). O mesmo autor, apresentou no ano de 1957 um método para determinar a sonoridade de sons complexos. Na mesma época, Zwicker elaborou um método gráfico para obter o valor de sonoridade. Ambos os métodos são descritos na norma ISO 532 (ISO 532, 1975).

Desta forma, apesar de terem sido apresentados diversos métodos híbridos para medir os níveis de ruído, para além da sonoridade atrás mencionada, constituía-se como uma grande lacuna a inexistência de normalização. Estes métodos baseavam-se nas curvas de ponderação em frequência apresentadas na Figura 2.4. Apenas como exemplo ilustrativo, menciona-se que a curva de ponderação D foi criada para

efetuar medições em aeroportos e aviões. Foi considerado pela Organização Internacional de Normalização que a curva de ponderação que melhor representava o sistema auditivo humano é a curva de ponderação A.

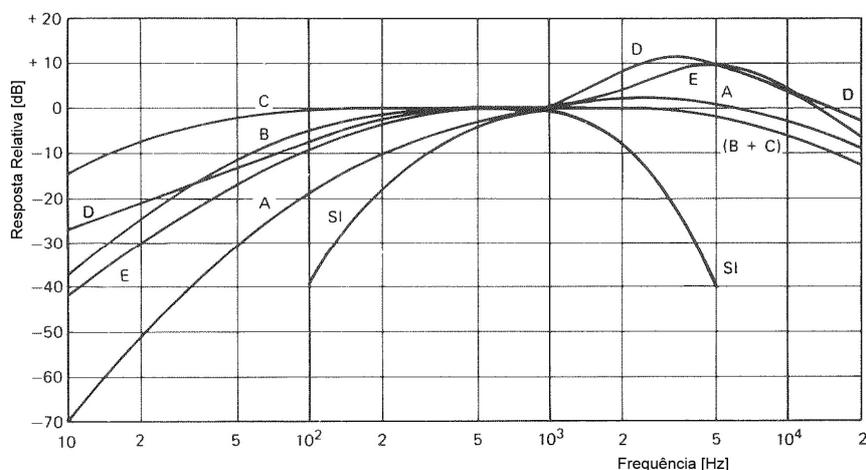


Figura 2.4 - Curvas de ponderação acústica. Adaptado a partir de (Hassal & Zaveri, 1988)

A sonoridade não é o único fator importante para a caracterização do ambiente acústico no interior de uma sala de aula. São, por isso, apresentados de seguida alguns dos parâmetros métricos objetivos e índices do domínio da acústica que se têm revelado importantes num contexto de comunicação oral em espaços interiores de edifícios

As fontes de ruído podem localizar-se no exterior ou no interior da própria sala. Um exemplo muito comum de ruído no interior da sala são as conversas paralelas tidas por alunos que assistem à aula em questão. As diversas fontes de ruído que podem afetar o normal desenrolar de uma aula encontram-se representadas na Figura 2.5.

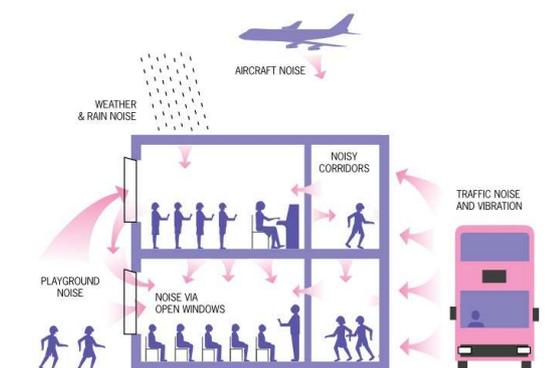


Figura 2.5 - Fontes de ruído exterior genéricas em contexto de sala de aula. Adaptado a partir de (Building Bulletin 93, 2004).

A ininteligibilidade da fala assume uma dimensão preocupante quando se trata de estudantes com algum nível de deficiência auditiva. Esta situação de deficiência auditiva tanto pode ser devida a uma perda permanente da capacidade auditiva da pessoa como a uma situação temporária provocada por uma patologia comum tal como uma gripe ou uma infeção. Numa situação normal, estima-se que em países como o Reino Unido ou os Estados Unidos, estas situações de incapacidade auditiva possam

chegar a afetar até 40% de uma população constituída por crianças dos 6 aos 19 anos (Nelson, 2003; Niskar et al., 1998; Shield & Dockrell, 2003). Os estudantes que se encontrem numa situação deste tipo são muito mais afetados pelo ruído que um estudante com uma audição normal.

As fontes de ruído podem encontrar-se quer no interior, quer no exterior de uma sala de aulas. Um exemplo comum, embora difícil de caracterizar, de ruído no interior resulta de conversações paralelas à comunicação principal, tidas por discentes no interior da sala.

Uma das preocupações do presente trabalho é a de determinar quais os parâmetros acústicos que sejam os mais representativos das condições de conforto acústico no interior de uma sala de aula. É ainda importante ter em consideração que a determinação desses mesmos parâmetros não pode ser feita de forma intrusiva relativamente ao normal decorrer das atividades desempenhadas quer em aulas teóricas quer em exames finais.

Vários estudos realizados em contexto letivo apontam a importância do tempo de reverberação na inteligibilidade da fala, referindo que tempos de reverberação elevados prejudicam a comunicação oral entre docente e alunos (Zannin & Zwirtes, 2009).

Tempo de reverberação

A clareza da percepção sonora é dependente do tempo de duração da onda sonora no ambiente, avaliada convencionalmente pelo tempo de reverberação.

O tempo de reverberação (designado por RT a partir do termo inglês "*Reverberation Time*") é definido pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios como sendo "o intervalo de tempo necessário para que a energia volúmica do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milionésimo (10^{-6}) do seu valor inicial" (Decreto-Lei 96/2008, 2008). Uma redução da amplitude do sinal sonoro nesta proporção, corresponde a uma queda de 60 dB do nível de pressão sonora NPS.

Não ocorrendo um decaimento rápido da onda sonora gera-se um efeito de mascaramento da qualidade do sinal sonoro devido à sobreposição com as ondas geradas subsequentemente através de fenómenos de reflexão. Desta forma, um tempo de reverberação baixo contribui para o reforço do som direto.

No caso de salas de aula, o tempo de reverberação global, corresponde à média aritmética dos valores dos tempos de reverberação obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. O valor obtido desta forma, deve ser inferior ao valor de referência (RT_0), calculado de acordo com a equação seguinte (Decreto-Lei 96/2008, 2008):

$$RT \leq RT_0 = 0,15 \cdot V^{1/3} \quad (2.17)$$

O efeito combinado da reverberação e ruído exerce ao nível da comunicação oral um efeito mais pernicioso do que o produzido pela soma das partes (Bradley, Reich, & Norcross, 1999; Crandell & Smaldino, 2000). Desta forma, para além do efeito da reverberação é necessário também ter em consideração o ruído exterior à sala e consequentemente o nível de isolamento acústico proporcionado pela fachada (Zannin & Marcon, 2007).

Isolamento Acústico da Fachada

O isolamento acústico da fachada é caracterizado no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios pelo parâmetro "Isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado - $D_{2m,nT}$ ". Este parâmetro é definido como sendo "a diferença entre o nível médio de pressão sonora no exterior medido a dois metros da fachada do edifício ($L_{1,2m}$) e o nível médio de pressão sonora medido no local de receção (L_2), corrigido da influência das condições de reverberação do compartimento recetor" (Decreto-Lei 96/2008, 2008). O cálculo deste parâmetro, com a inclusão do termo de correção associado ao tempo de reverberação é efetuado de acordo com:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \left(\frac{RT}{RT_o} \right) \quad (2.18)$$

Sendo RT_o o tempo de reverberação de referência, em segundos, obtido de acordo com a Equação (2.17).

No caso de edifícios escolares e de investigação, o mesmo decreto-lei estabelece como requisito legal que a fachada da sala proporcione um nível de isolamento acústico não inferior a 33 dB.

Qualidade do Ar

A necessidade de ventilação dos espaços interiores começou por surgir assente no receio de contágio de doenças e sua disseminação. Foi o facto de ter sido demonstrado que alguns tipos de doenças humanas emitiam micro-organismos patológicos que desencadeou a necessidade de diluição da concentração dos micro-organismos através do aumento da taxa de ventilação (Billings, 1893) *fide* (Fanger, 2000).

Na primeira metade do século XX foi reconhecido que a maior fonte de contágio de micro-organismos não era por via aérea, permitindo o surgimento de um novo paradigma ao nível das necessidades de ventilação. A este nível, os seres humanos continuaram a ser considerados como uma potencial fonte de emissão de micro-organismos para o ar interior, mas o holofote da discussão passou a recair sobre os bioefluentes humanos e os odores causados pelos mesmos.

Perceção olfativa

A sensação humana do odor possui quatro propriedades (Duffee & O'Brien, 2000): Concentração; Intensidade; Caráter e Hedonismo:

— A **concentração** é uma propriedade mensurável da sensação odorífera. É medida em termos do número de diluições com ar isento de cheiros, necessário para reduzir o odor em questão até ao limiar de identificação. Os limiares de deteção e reconhecimento do odor são normalmente definidos como concentrações de um determinado odor no ar, detetáveis por uma fração específica da população humana (tipicamente 50 por cento da população). Este processo é efetuado de forma comparativa entre as amostras odoríferas e amostras placebo de ar isento de odores. O limiar de reconhecimento do odor é usualmente 2 a 5 vezes superior à do limiar de deteção de odor. De acordo com a explicação apresentada, a concentração de um odor possui unidades (adimensionais) de "diluição-até-ao-limiar" (abreviadamente designadas por D/T do termo em inglês *Dilutions-to-Threshold*).

No caso de um odor ser muito intenso, i.e. superior a 10 D/T, então pode fazer sentido a recolha de uma amostra de ar em saco adequado para o efeito e sua posterior análise através de um painel de indivíduos com sensibilidade olfativa considerada média e de acordo com o descrito no método de referência correspondente (ASTM E679-91, 1997; ISO 13301, 2002). Algumas das situações mais comuns em que se aplica a técnica descrita são por exemplo instalações de tratamento de águas residuais ou aterros. No entanto, em ambientes interiores, raramente se usa esta técnica, uma vez que abaixo de 10 D/T a precisão e fiabilidade do método diminuem drasticamente (Duffee & O'Brien, 2000).

— A **intensidade** refere-se à magnitude com que a sensação provocada pelo odor é percebida pelos seres humanos. Esta grandeza é medida por comparação com amostras de *n-butanol* de diferentes concentrações. O método de referência (ASTM E544-10, 2010) descreve um olfatómetro com 8 portas de cheiro em que a concentração de *n-butanol* duplica a cada nível. Não significa isto que a percepção de intensidade do odor a *n-butanol* também duplique. Ela aumenta, mas mais lentamente.

A intensidade é a propriedade respeitante à sensação odorífera mais diretamente relacionada com a perturbação provocada pelo cheiro em causa. Uma vez que o odor é avaliado se é suficientemente forte independentemente do facto de normalmente poder ser considerado agradável.

Alguns autores (Ferreira, 2012; Teixeira, Rodríguez, & Rodrigues, 2010) propõem uma relação entre a intensidade e a concentração através dos modelos de Stevens ou Fechner cujas equações são apresentadas adiante na secção de Psicofisiologia deste mesmo capítulo. A lei de Stevens é aqui reproduzida de forma adaptada para o caso particular da resposta humana aos odores:

$$I = k \cdot \Phi^n = k \cdot C^n \quad (2.19)$$

Sendo,

I - Intensidade do odor na escala de *n-butanol*

C - Concentração do odor na unidade adimensional de "diluição-até-ao-limiar" D/T

k, *n* - Constantes específicas para cada odor. Usualmente $n < 1$

A escala de intensidade do odor pode ser dividida nas seguintes categorias, sendo o odor classificado como: **0** - *Inodoro*; **1** - *Muito fraco* (limiar de deteção); **2** - *Fraco*; **3** - *Distinto*; **4** - *Forte*; **5** - *Muito Forte*; **6** - *Intolerável*.

A maior contribuição deste modelo psicofisiológico é a determinação de qual a taxa de diminuição da intensidade do odor, quer seja por ventilação, por dispersão atmosférica ou por um dispositivo de absorção de odores.

— O **caráter** de um odor é uma propriedade que se refere à capacidade humana para distinguir vários tipos de odores. Não é uma propriedade quantificável, apenas descritiva. Entre outras classificações podem ser usadas 3 classes:

1. Descrições gerais da percepção odorífera: Doce; Pungente; Ácida; Fragrante; Enjoativa; Quente; Seca; Azeda; Amarga...
2. Com analogia à fonte de odor semelhante: Amendoa; Naftalina; Banana; Peixe...
3. Com analogia a um composto químico específico conhecido: Couve podre (metil mercaptano); Queijo rançoso ou manteiga rançosa (ácido butírico); gasolina (ciclohexano)...

— O **hedonismo** (tom hedónico ou qualidade do odor) é a propriedade que relaciona o grau de agradabilidade ou desagradabilidade de um odor. Este tipo de avaliação é efetuada laboratorialmente, essencialmente por indústrias de fragrâncias e perfumes cujo objetivo é a criação de odores considerados agradáveis. A resposta humana ao nível desta propriedade da exposição a um determinado odor é condicionada pela frequência, tempo, intensidade, carácter, e experiências anteriores associadas a este odor em particular.

Ao nível da perceção e identificação de odores, o sentido do olfato humano, embora não seja tão desenvolvido como o de outros mamíferos é capaz de distinguir centenas de aromas diferentes. A sensibilidade humana aos odores é muito superior à dos métodos instrumentais disponíveis para o efeito. Conseguem prontamente detetar odores na faixa de concentrações de 1 parte por bilião (10^{12}) enquanto as melhores tecnologias analíticas existentes estão limitadas a aproximadamente 0,1 partes por milhar de milhão (10^9) (Duffee & O'Brien, 2000). É importante também ter em consideração que, usualmente os odores são uma mistura complexa de várias componentes odoríferas. É importante ter bem presentes estes dois factos antes de proceder à recolha de amostras de ar para subsequente análise química. Nas condições de ensaio do presente trabalho, não há registo de queixas em relação a odores prevalentes nas salas de aulas. Como tal, a hipótese de recolha de amostras de ar para subsequente análise química foi à partida descartada por se tratar de um exercício, mais que provavelmente, infrutífero.

Na década de 1930, diversas medições sensoriais foram efetuadas envolvendo vários grupos de pessoas com o objetivo de usar diretamente as suas respostas para avaliar a qualidade do ar interior (Yaglou, Riley, & Coggins, 1936). Os trabalhos desenvolvidos por Yaglou ao nível da sensibilidade do sistema olfativo humano para a perceção de odores foram posteriormente utilizado por Fanger no desenvolvimento de uma nova abordagem para a avaliação da intensidade e da concentração de odores e poluentes, tendo sido desenvolvidas unidades de medida que quantificam as respostas sensoriais: o "*olf*" para a quantidade de poluição libertada e o "*decipol*" (*dp*) para o nível de poluição perceptível.

Um *olf* é a quantidade de bioefluentes gasosos (poluição) produzidos por uma pessoa padrão com atividade sedentária e sensação térmica neutra.

Um *decipol* representa a perceção da qualidade do ar num espaço sujeito a uma fonte de poluição de 1 *olf* e com uma taxa de ventilação de $10 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($36 \text{ m}^3/\text{h}$).

Tabela 2.1 - Valores de bioefluentes gasosos humanos correspondentes a várias atividades.

Atividade	<i>olf</i>
Pessoa sedentária	1
Pessoa ativa	5
Pessoa muito ativa	11
Fumador (durante o ato de fumar)	25
Fumador (média)	6

Esta noção de percepção, baseia-se sempre na sensação que um indivíduo estranho ao espaço considerado tem quando nele entra, uma vez que, após um período de habituação, o novo ocupante deixa de se sentir tão desconfortável. Fanger propôs uma correlação entre a percentagem de insatisfeitos com a qualidade do ar (AQ.PD) e a taxa de ventilação em $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{olf}^{-1}$. A correlação proposta é apresentada na Figura 2.6 e resulta da avaliação da qualidade do ar em função das emissões de biofluentes de homens e mulheres com atividades sedentárias.

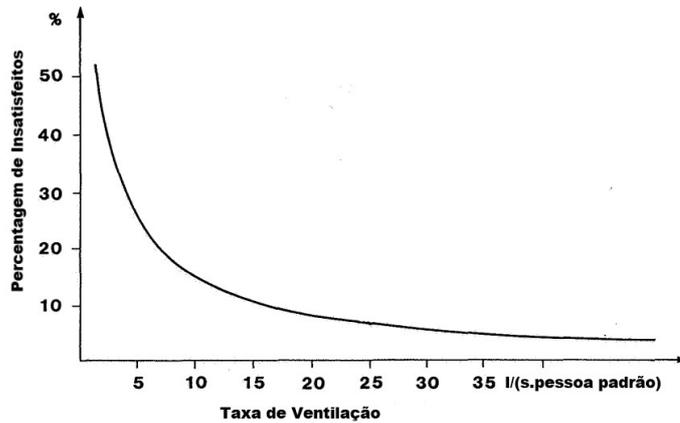


Figura 2.6 - Nível de insatisfação causado por uma pessoa padrão (1 *olf*) considerando diferentes taxas de ventilação. Adaptado a partir de (Report EUR 14449 EN, 1992).

A função apresentada na curva da Figura 2.6 é descrita pela Equações (2.20):

$$AQ.PD = \begin{cases} 395 \cdot e^{(-1,83 \cdot q^{1/4})} & , \quad q \geq 0,32 \text{ l/s} \cdot \text{olf} \\ 100 & , \quad q < 0,32 \text{ l/s} \cdot \text{olf} \end{cases} \quad (2.20)$$

O mesmo autor apresentou ainda uma relação entre a percepção de qualidade do ar e a percentagem previsível de insatisfeitos com a qualidade do mesmo. A curva correspondente é apresentada na Figura 2.7

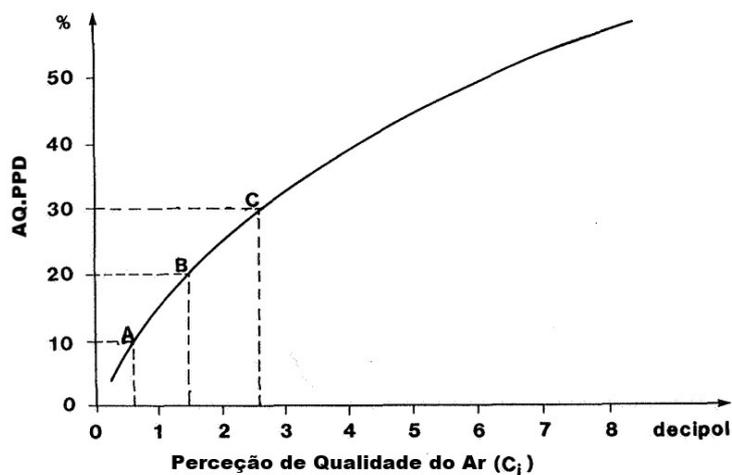


Figura 2.7 - Relação entre a percentagem previsível de insatisfeitos e a percepção de qualidade do ar expressa em *decipol*. Adaptado a partir de (Report EUR 14449 EN, 1992)

Matematicamente, a curva apresentada na Figura 2.7 é descrita pela Equação (2.21):

$$C_i = 112(\ln AQ.PD - 5,98)^{-4} \quad (2.21)$$

São propostos na Figura 2.7, três níveis de qualidade do ar interior (A, B e C) que correspondem a percentagens previsíveis de insatisfeitos de 10, 20 e 30%, respetivamente. Os valores de taxas de ventilação correspondentes a este níveis de qualidade são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Taxas de ventilação correspondentes a níveis de qualidade do ar interior, considerando ar exterior limpo e uma eficiência de ventilação unitária. Adaptado a partir de (Report EUR 14449 EN, 1992)

Nível de Qualidade	AQ.PPD	decipol	Taxa de ventilação [l/s.olf]
A	10 %	0,6	16
B	20 %	1,4	7
C	30 %	2,5	4

Os valores apresentados quer na Tabela 2.2, quer nas Figura 2.6 e Figura 2.7 representam resultados obtidos a partir de avaliações subjetivas efetuadas imediatamente após a entrada na sala, sendo as pessoas provenientes de um espaço exterior com ar limpo. No âmbito do presente trabalho, a avaliação da percepção subjetiva da qualidade do ar interior realizada nestas circunstâncias é designada por avaliação subjetiva inicial de um visitante não adaptado.

Perceção da Taxa de Renovação do Ar (Ar Fresco / Ar Viciado)

O grande objetivo da ventilação em espaços interiores tais como escolas, mas também em edifícios de serviços e comércio é o de proporcionar uma percepção de qualidade do ar aceitável para a maioria das pessoas no seu interior. A percepção de qualidade do ar interior possui uma importante componente olfativa que foi descrita anteriormente. Mas não é apenas esta componente que é responsável pela percepção de qualidade. A temperatura e humidade do ar apresentam uma forte influência na percepção da qualidade do ar. A contribuição da entalpia do ar para a percepção subjetiva do mesmo foi apresentadas em diversos estudos (Fang, Clausen, & Fanger, 1998a, 1998b). De facto existem termo recetores no nariz que são sensíveis à temperatura e humidade do ar. Manter a entalpia do ar interior em níveis moderadamente baixos proporciona um arrefecimento convectivo e evaporativo da cavidade nasal que por sua vez contribui para que o ar interior seja percecionado como mais fresco e agradável. Neste âmbito pode então considerar-se que o termo "*mais fresco*", que em termos de bens de consumo perecíveis significa "*mais recente*", sendo aplicado ao ar possui uma sobreposição semântica decorrente da percepção humana, com o significado térmico ou entálpico da expressão.

Efeito de Adaptação Olfativa

A pituitária humana possui uma notável capacidade de adaptação ao ar interior. Este efeito adaptativo ocorre essencialmente nos primeiros 15 minutos após a exposição ao ambiente (Report EUR 14449 EN, 1992) e tem consequência direta na percepção da qualidade do ar. A percepção do odor diminui, mas há outros efeitos associados à qualidade do ar interior em que tal não acontece, como sejam a irritação de olhos e mucosas. Este tipo de irritação de olhos e mucosas pode ser provocado pela exposição ao fumo de tabaco ou poluentes resultantes de misturas de materiais de construção. Nestes casos, é até possível

que a irritação aumente ao longo do tempo de exposição. Para contornar o efeito adaptativo, desde logo, em estudos pioneiros nesta área, foi assumido (Yaglou et al., 1936) que a percepção de qualidade do ar interior tinha que ser registada no instante imediato após a entrada no espaço das pessoas.

O efeito de adaptação da pituitária humana é mencionado a vários níveis. O nível de adaptação é muito elevado para a exposição a bioefluentes e a fumo de tabaco ambiental, mas é substancialmente menor para exposições a poluentes do próprio edifício (Gunnarsen & Ole Fanger, 1992).

Ao nível da adaptação a bioefluentes e nomeadamente ao dióxido de carbono verificou-se que para indivíduos sujeitos a uma exposição de longa duração (ocupantes) uma taxa de renovação de ar de aproximadamente 1/3 produz o mesmo nível de insatisfeitos que a necessária para indivíduos sujeitos a uma exposição de longa duração (visitantes) (Gunnarsen & Ole Fanger, 1992; Persily, 1996, 1997). No caso de se tratar de uma carga de poluentes do próprio edifício o fator aplicável à taxa de renovação de ar é de 2/3 para que a percentagem de ocupantes adaptados insatisfeitos seja a mesma que a registada para visitantes (não adaptados) e assumindo a mesma carga de poluentes (Gunnarsen & Ole Fanger, 1992).

Grande parte das recomendações existentes acerca dos níveis máximos de concentração de poluentes e dióxido de carbono fazem sentido porque em situações de exposição prolongada os seres humanos não conseguem ter a percepção da presença destes compostos no ar que respiram nem da taxa de renovação de ar.

Desta forma, a relação entre a concentração de dióxido de carbono e a prevalência de sintomas de saúde em escolas tem sido investigada desde há muito. Alguns estudos (Myhrvold, Olsen, & Lauridsen, 1996) encontraram correlações parciais (Valor $p < 0,001$) entre sintomas de cefaleias, tonturas, cabeça pesada, cansaço, dificuldades de concentração, odores desagradáveis e concentrações elevadas de dióxido de carbono (na faixa 1500–4000 ppm quando comparadas com concentrações abaixo de 4000 ppm). Taxas de ventilação efetivas em escolas são raramente medidas, embora se suspeite que a ventilação inadequada é muito frequentemente um condicionalismo importante para os sintomas de saúde reportados. Na maioria dos trabalhos efetuados nesta área é o elevado nível de dióxido de carbono registado em algumas situações (Giuli, Da, & Carli, 2012) que atua como um indicador da insuficiente ventilação em edifícios naturalmente ventilados.

Desta forma em situações de exposição prolongada ao ambiente interior, é sugerido um máximo de 1500 ppm de dióxido de carbono, considerando um tempo de exposição típico de um dia inteiro, (Alfano et al., 2010; Building Bulletin 101, 2006).

Como se comprova, no caso da qualidade para além de critérios sensoriais de percepção da qualidade do ar é necessário associar a estes critérios de minimização de riscos para a saúde. Isto, porque a verificação dos primeiros não implica necessariamente a verificação dos segundos.

São muito diversas as substâncias que contribuem para a má qualidade do ar interior. As substâncias potencialmente poluentes podem ter origem no interior ou no exterior, e podem ser produzidas pelos ocupantes dos edifícios nas suas atividades essenciais, pelos materiais de construção e equipamentos dos edifícios (tintas, vernizes aglomerantes). Por esta razão, a qualidade do ar interior é na generalidade dos casos significativamente inferior à qualidade do ar exterior e, naturalmente, também inferior ao desejável. Assim sendo, e atendendo a que 90% das nossas vidas acontece no interior de edifícios, é fundamental acautelar a qualidade do ar interior, nomeadamente, ao nível do projeto da instalação e da própria exploração do edifício. Uma má qualidade do ar interior pode originar efeitos imediatos (odores desagradáveis), efeitos a curto prazo (irritações e infeções ao nível das vias respiratórias, da pele, dos

olhos) e até efeitos a médio / longo prazo, como é, por exemplo, o caso extremamente grave do tumor dos pulmões, causado pela inalação de amianto em suspensão no ar.

Considere-se a qualidade do ar inalado, numa perspetiva geral de todos os agentes que a influenciam, quer esta influência possa ou não ser percecionada diretamente pelos seres humanos. Numa perspetiva puramente taxonómica, podem dividir-se os agentes que afetam a qualidade do ar inalado em três classes principais:

1. Químicos;
2. Físicos;
3. Biológicos.

Nos agentes químicos destacam-se: Dióxido de Carbono (CO₂); Partículas em Suspensão (PM_x); Monóxido de Carbono (CO); Ozono (O₃); Formaldeído (HCHO); Fumo do tabaco; Compostos Orgânicos Voláteis (COVs); Óxidos de azoto (NO_x); e Radão.

Nos agentes físicos, destacam-se: Fatores de ambiente térmico (Temperatura; Humidade; Velocidade do Ar).

Nos agentes biológicos destacam-se bactérias e os fungos.

Num contexto puramente taxonómico, é ainda pertinente mencionar que embora o radão esteja incluído nos agentes químicos, este composto manifesta a sua nocividade através da emissão de radiação ionizante (Samet, 2000).

A legislação portuguesa que aborda a problemática da qualidade do ar interior foi publicada numa perspetiva de conciliar a eficiência energética com o conforto e a preservação da saúde em espaços interiores. Resulta essencialmente da transposição parcial da diretiva europeia de Desempenho Energético dos Edifícios (Directiva 2002/91/CE de 2003 com correções COM/0780 de 2008, 2008). Não é esse o âmbito nem o contexto do presente trabalho. No contexto do presente trabalho só faz sentido analisar substâncias, espécies químicas ou grandezas com repercussão direta na perceção da qualidade do ar interior. É importante mencionar mais uma vez que no caso do ar interior, "perceção de qualidade" e "qualidade" não são necessariamente sinónimos.

Contudo, há duas peças legislativas portuguesas que fazem menção a valores de referência ou valores limite de substâncias que afetam a perceção da qualidade do ar: O Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios (RSECE, 2006), aprovado pelo Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de abril e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE, 2006), aprovado pelo Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de abril.

O RSECE (RSECE, 2006) aplica-se a edifícios de serviços e de habitação dotados de sistemas de climatização. Não é esse o caso dos espaços interiores em que foram realizados ensaios. Contudo, nele são definidas as concentrações máximas de referência para alguns dos agentes que afetam a perceção de qualidade do ar interior dos edifícios, pelo que os respetivos valores são transcritos e apresentados na Tabela 2.3.

O RCCTE (RCCTE, 2006) estabelece requisitos de qualidade construtiva para novos edifícios de habitação e pequenos espaços de serviços sem sistemas de climatização, nomeadamente ao nível do isolamento de paredes, e pavimentos, tipo de coberturas e superfícies vidradas, limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos. No âmbito da perceção da qualidade do ar interior, o RCCTE é

relevante pelo facto de fazer menção a valores de referência da humidade do ar, sendo a relevância deste parâmetro discutida adiante neste capítulo.

Tabela 2.3 - Concentrações máximas de referência para compostos químicos no interior de edifícios de acordo com RSECE (RSECE, 2006).

Parâmetro	Concentração máxima [mg/m^3]
Partículas suspensas no ar (PM_{10})	0,15
Dióxido de Carbono (CO_2)	1800
Monóxido de Carbono (CO)	12,5
Formaldeído (HCHO)	0,1
Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)	0,6

Bioefluentes gasosos resultantes da atividade humana

São dois os principais bioefluentes resultantes do processo de respiração humana: O dióxido de carbono e o vapor de água. A produção destes dois compostos depende do nível de atividade metabólica

Tabela 2.4 - Valores indicativos de emissões de bioefluentes humanos gasosos em função do tipo de atividade desempenhada Adaptado a partir de (BS 5925, 1991).

Atividade	Vapor de água [g/h]	Dióxido de Carbono [dm^3/h]
Repouso	40	14,4
Trabalho leve	50	23,0 – 46,1
Trabalho moderado	50	23,0 – 46,1
Trabalho pesado	50	69,1 – 93,6
Fumador (média)	50	6

O vapor de água é um constituinte do ar inalado pelos seres humanos, funcionando como elemento lubrificante das mucosas. Humidades relativas baixas (inferiores a 30%), estão associados a sintomas de irritação nos olhos, nariz e garganta, podendo ainda causar hemorragias nasais e aumento da eletricidade estática. Outra consequência associada a humidades relativas baixas é o enfraquecimento do nível de defesa proporcionado pelas membranas mucosas, contribuindo para um aumento de doenças respiratórias. A ocorrência de níveis de humidade relativa elevados também acarreta consequências para o espaço interior e no médio prazo para os seres humanos. Teores de humidade relativa acima de 60% podem resultar em condensações nas superfícies interiores do edifício com especial incidência nas pontes térmicas. A consequência mais direta da ocorrência continuada de condensações é o desenvolvimento de fungos e ácaros causadores de alergias, irritações e, em casos mais graves, asma. Considerando espaços interiores naturalmente ventilados, como os que são analisados no âmbito do presente trabalho, o nível de humidade relativa no interior é influenciada fortemente pela temperatura interior e humidade relativa exterior. A teor de humidade no interior depende também do nível de atividade metabólica dos indivíduos presentes. Outros elementos do mobiliário interior, tais como tapetes, cortinas, móveis e livros podem absorver bastante humidade num espaço interior em espaços

com humidades relativas elevadas (por exemplo superiores a 65%), promovendo assim o crescimento microbiano.

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006) recomenda uma humidade relativa de 50% para a estação de arrefecimento. A norma europeia (EN 15251, 2007) recomenda que não se ultrapasse o valor absoluto de humidade de 12 g/kg de ar seco e a ASHRAE recomenda uma humidade relativa máxima de 60% (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2010).

O dióxido de carbono é um sub-produto normal, resultante do processo de respiração, sendo exalado a uma taxa (indicativa) de cerca de 0,3 dm³/min durante a execução de tarefas em locais de trabalho como escritórios, em que é normal uma baixa atividade física. O dióxido de carbono é incolor e inodoro, sendo em termos de quantidade, o mais importante dos bioefluentes humanos, com uma taxa de emissão proporcional ao metabolismo (ISO 8996, 2004).

Possui reduzida toxicidade nas concentrações em que geralmente está presente nos espaços interiores. No que respeita a valores limite, uma vez que o dióxido de carbono não é considerado um gás tóxico, a Organização Mundial de Saúde não define um valor limite para a concentração deste gás no interior de edifícios não industriais.

Alguns investigadores indicam que concentrações de dióxido de carbono superiores a 1000 ppm têm influência na perceção da qualidade do ar, sendo tido como um ambiente “pesado” (Persily, 1997). Para efeito de conforto no que diz respeito aos odores dos bioefluentes humanos, a ASHRAE recomenda um valor limite de dióxido de carbono de 700 ppm acima do valor registado no exterior (ANSI/ASHRAE Standard 62.1, 2010). Na legislação portuguesa o valor de referência definido para a concentração máxima interior é de 1800 mg/m³ (RSECE, 2006). Este valor corresponde a aproximadamente 1000 ppm.

Partículas em Suspensão

As partículas em suspensão no ar são constituídas por uma complexa mistura de compostos que podem ser sólidos ou líquidos, considerando-se neste último caso também a inclusão dos aerossóis quando se encontram em suspensão no ar.

Podem ter vários tamanhos, formas e serem constituídas por centenas de diferentes compostos químicos e biológicos. Podem ainda funcionar como meio de transporte de organismos vivos como vírus (0,003 a 0,06 µm), fungos (2 a 10 µm) e bactérias (0,4 a 5 µm).

A dimensão das partículas em suspensão é o fator mais importante para a deposição das mesmas no aparelho respiratório. Partículas com diâmetros superiores a 10 µm raramente penetram para além das vias respiratórias superiores, enquanto as partículas com diâmetro igual ou inferior a 2 µm possuem uma maior capacidade de penetração até ao interior dos pulmões, podendo ficar depositadas até aos alvéolos. A Norma Portuguesa (NP 1796, 2007) efectua uma discriminação taxonómica das partículas em suspensão, para valores de diâmetro aerodinâmico até a 10 µm.

Designam-se por partículas respiráveis ou finas (usualmente representadas pela sigla PM_{2,5}) aquelas que possuem um diâmetro inferior a 2,5 µm. Devido à sua pequena dimensão, podem penetrar profundamente no nosso sistema respiratório, tal como pode ser observado na Figura 2.8. Além disso, este tipo de partículas tendem a permanecer no ar por longos períodos de tempo, percorrendo longas, de acordo com as variações de intensidade e direção do vento e das condições atmosféricas. Estas partículas podem ter proveniência do fumo do tabaco (0,01 a 1 µm), dos produtos da combustão ou do

ar exterior (ASHRAE, 2009). É ainda importante referir a este propósito que no interior, 99% das partículas em suspensão tem diâmetro inferior a 1 μm .

Partículas de maiores dimensões, mas ainda assim com um diâmetro inferior a 10 μm (PM10) designam-se por torácicas ou grosseiras e são normalmente retidas no nariz e traqueia. Contudo podem entrar nos pulmões e penetrar em qualquer parte deste órgão dependendo da sua dimensão, embora com eficiências de deposição inferiores à registadas para as partículas finas.

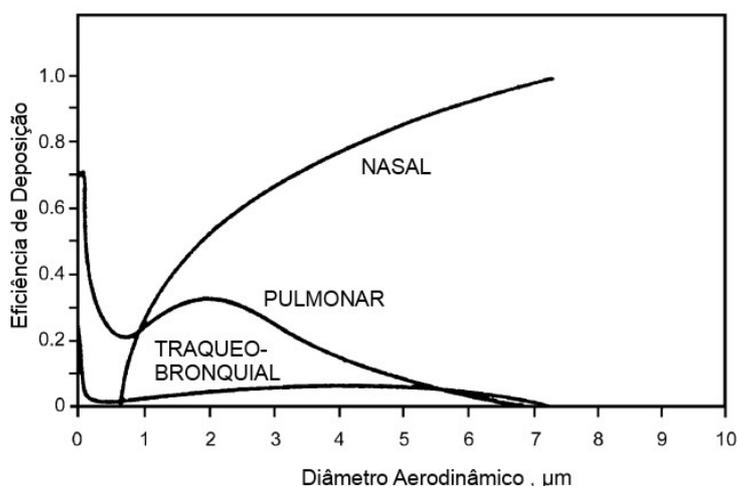


Figura 2.8 - Eficiência de deposição de partículas em suspensão no aparelho respiratório humano, de acordo com o respetivo diâmetro aerodinâmico. Adaptado a partir de (ASHRAE, 2009).

Em média, em ambientes interiores sem fumo do tabaco, metade da exposição a partículas finas depende da combinação de vários fatores, tais como: condições ambientais, materiais de construção, tipo de ventilação, sistemas de ar condicionado e taxas de ventilação. Metade da exposição interior a partículas finas provém tem a sua origem no exterior, sendo as principais fontes geradoras a poluição automóvel e os setores industriais que fazem uso de processos de combustão, principalmente quando a matéria-prima é o carvão.

A penetração das partículas exteriores no ambiente interior ocorre pela utilização normal do espaço. Nomeadamente devido à abertura de janelas, portas e por frinchas que tanto podem ser devidas a uma deficiente construção da fachada exterior como estar associadas à colocação de tubagens, redes elétricas ou de dados.

Em contexto de sala de aula, não há uma fonte de poluição específica geradora de partículas, como tabagismo e combustão para preparação de alimentos e aquecimento. Neste caso, a taxa de ocupação pode estar associada à principal fonte poluidora, pois está relacionado com as atividades dos ocupantes. Os ocupantes funcionam desta forma como geradores e meio de transporte de partículas tais como compostos de fibras de tecido, fragmentos de cabelo, partículas do solo, células de pele, fungos, fibras de papel (Luoma & Batterman, 2001; Monn et al., 1997). Há ainda que ter em consideração que neste âmbito, os seres humanos são responsáveis pela ressuspensão de partículas que já se encontravam depositadas. No caso em estudo, os alunos induzem a ressuspensão das partículas através da abertura da porta da sala ou devido à sua interação com as superfícies sólidas das mesas (Blondeau, lordache, Poupard, Genin, & Allard, 2005).

As condições climáticas também podem influenciar a concentração de partículas em suspensão no interior. Grandezas físicas tais como a temperatura e humidade, provocam em determinadas circunstâncias comportamentos adaptativos de abertura de janelas e portas em edifícios naturalmente ventilados e em que tal é possível. Estas variações na taxa de ventilação do espaço vão influenciar as concentrações de partículas em suspensão no seu interior (Monn et al., 1997).

É geralmente aceite que as concentrações de partículas no interior de um espaço têm duas proveniências distintas: interior e exterior. No entanto, o nível de significância de cada uma delas depende de variáveis, como a taxa média de renovação de ar, o tipo principal de poluição no exterior (empresas ligadas a grandes combustões, trânsito rodoviário), o tipo de atividades no interior e o diâmetro aerodinâmico das partículas emitidas (Branis, Rezáčová, & Domasová, 2005).

Diversos estudos fundamentam a hipótese de as concentrações de partículas em suspensão no ar interior com diâmetros superiores a 2,5 µm serem fortemente dependentes das atividades realizadas no interior do espaço, enquanto que as concentrações de partículas finas e ultrafinas (inferiores a 2,5 µm) são fortemente correlacionadas com as concentrações respetivas registadas no exterior (Branis et al., 2005; Braniš, Šafránek, & Hytychová, 2009; Diapouli, Chaloulakou, Mihalopoulos, & Spyrellis, 2008). Neste contexto, também as concentrações de partículas finas e ultrafinas são mais fortemente influenciadas por condições meteorológicas tais como velocidade do vento, pluviosidade, humidade relativa e temperatura.

Não há uma indicação clara de que as partículas em suspensão no ar atmosférico possam ser percecionadas pelas pessoas, mesmo tratando-se de partículas com uma forma geométrica mais espinhosa com glucanos, aldeídos ou ftalatos (Wolkoff, 2013). Não é também claro qual o nível de consequências que podem ao nível dos pulmões de uma pessoa saudável. Exposições a curto prazo podem provocar sintomas como falta de ar, irritação ocular e pulmonar, náuseas, tonturas e reações alérgicas (EPA, 2013). Alguns efeitos inflamatórios foram também observados entre asmáticos.

Formaldeído

O formaldeído (HCHO) é um gás incolor e provido de odor pelo que pode ser detetado pelos seres humanos. Este composto químico é utilizado como aditivo conservante em cosméticos, produtos de higiene pessoal e embalagens de alimentos. Cerca de metade do HCHO, atualmente produzido, é consumido na produção de ureia-fenol-formaldeído e resinas que são usadas como colagem e laminação de agentes, como adesivos em comprimido, produtos de madeira e como isolamento de espuma de plástico e embalagem dos produtos (Awbi, 2013). A emissão de HCHO é caracterizada por uma maior libertação em materiais mais recentes, que depois com o passar do tempo vai tendo uma redução gradual. É também normalmente utilizado como “aglutinante” nos compósitos de madeira e na manufatura de têxteis com o objetivo de melhorar o seu comportamento, nomeadamente impedir que encolham, enruguem e a cor desvaneça.

A sua concentração média no ambiente interior em edifícios correntes varia, em regra, entre 0,03 mg/m³ (ou 0,02 ppm) e 0,06 mg/m³ (ou 0,05 ppm). A exposição individual diária pela respiração varia entre 0,3 e 0,6 mg. No caso de um fumador a exposição diária é maior, podendo chegar a 2 mg, fumando 20 cigarros por dia (World Health Organization, 2000).

O HCHO pode entrar no organismo humano por inalação, ingestão ou absorção através da pele. A maioria da quantidade inalada é absorvida no trato respiratório superior. Uma vez no corpo, o HCHO reage rapidamente com tecidos contendo hidrogénio. O HCHO possui efeitos de irritação que podem produzir uma variedade de sintomas, dependendo do modo de assimilação, duração e concentração da

exposição. Alguns estudos realizados em ratos apontam a hipótese de o HCHO poder funcionar como um agente cancerígeno, mas estudos semelhantes em seres humanos foram inconclusivos (Awbi, 2013).

Ambiente Luminoso

No Sistema Internacional de unidades (SI) a quantidade fundamental fotométrica de intensidade luminosa é a *candela*, representada abreviadamente por *cd* (IES, 2012). A magnitude da *candela* possui uma base histórica que foi definida em termos de filamento de chama *standard*. Posteriormente foi possível defini-la formalmente numa base radiométrica devido aos avanços registados nesta área da metrologia. Atualmente, a *candela* é a intensidade luminosa numa dada direção, de uma fonte emitindo radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz e que tem uma intensidade radiante nessa direção de $1/683$ W/sr (National Bureau of Standards, 2006). Esta definição expressa a *candela* em termos de Watt (W) e estereoradiano (sr), sendo o estereoradiano definido como o ângulo sólido que forma uma área na superfície da esfera igual ao quadrado do raio desta.

Duas unidades importantes podem ser deduzidas com base na *candela*: As de *Fluxo Luminoso* e *Iluminância*. Para tal considere-se um modelo apresentado na Figura 2.9 constituído por uma fonte pontual de radiação isotrópica (ou seja, irradiando uniformemente energia em todas as direções) localizada no centro de uma esfera ideal com reflectância nula.

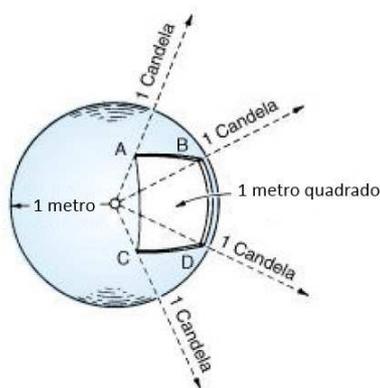


Figura 2.9 - Esfera imaginária para a definição das unidades *lumen* e *lux* a partir da unidade *candela*. Adaptado a partir de (IES, 2012).

Desta forma, qualquer porção da parte interior da superfície da esfera recebe apenas radiação da fonte pontual localizada no centro da mesma, nunca recebendo radiação refletida a partir de outras porções da sua superfície interior. Para uma esfera possuindo um metro de raio, um metro quadrado de área na sua superfície representa o ângulo sólido de um estereoradiano. No exemplo representado na Figura, a área correspondente a um estereoradiano apresenta uma configuração não padronizada, sendo tal, neste caso, irrelevante para o efeito pretendido. Considerando agora que a intensidade luminosa da fonte pontual é uma *candela*, a quantidade de fluxo radiante emitido a partir da fonte através da zona espacial do ângulo sólido definido pela área unitária marcada na superfície da esfera é um *lumen* (*lm*),

Desta forma, sendo a área de uma esfera definida por $4\pi r^2$, conclui-se que uma fonte isotrópica pontual com uma intensidade luminosa de 1 cd produz um fluxo luminoso total de $4\pi\text{ lm}$.

Para a correta definição de iluminância, a esfera da figura tem obrigatoriamente que possuir dimensões, uma vez que a intensidade de fluxo luminoso diminui com a distância à fonte. Assim assumindo que o raio da esfera é unitário, a iluminância na superfície da esfera é 1 lm/m^2 ou 1 lux . Desta forma, a iluminância é definida como sendo o fluxo total luminoso incidente sobre uma superfície por unidade de área. A iluminância foi por vezes designada por "Luminosidade". No entanto, esta designação presta-se a ser geradora de confusão devido a outras utilizações desta palavra. Desta forma, "Luminosidade" não deve ser usada numa perspetiva de caracterização quantitativa, mas sim e apenas numa perspetiva não quantitativa de perceção fisiológica da luz.

Há ainda uma outra quantidade importante no âmbito da iluminação e que por vezes pode ser confundida com a iluminância, inclusivamente por uma questão de semelhança fonética: A Luminância. A luminância está diretamente relacionada com a perceção de luminosidade, ou seja com o efeito visual que a iluminância produz. A luminância depende não apenas da iluminância da superfície do objeto, mas também da área deste projetada num plano perpendicular à direção da visão (IES, 2012).

Pode portanto afirmar-se que há uma relação direta entre a luminância de um objeto visível e a iluminância da imagem por ele produzida na retina humana. De forma análoga se pode afirmar o mesmo para o que se verifica em fotografia. A unidade de luminância é candela por metro quadrado (cd/m^2).

Do ponto de vista do conforto do campo visual, um dos fenómenos mais estudados é o da ofuscação. A ofuscação é um fenómeno (de desconforto visual) em que devido a um excesso radiativo o indivíduo fica vesgo e/ou cerra os olhos ou pisca os mesmos ou ainda desvia o olhar. A ofuscação pode ainda ocorrer por outro motivo, tal como o exemplificado na Figura 2.10. Neste caso, a amplitude de luminância de um determinado ambiente visual é muito grande, provocando uma diminuição da performance visual do indivíduo. Ao nível da ofuscação, são mencionados na literatura dois tipos distintos de ofuscação: ofuscação desconfortável, que provoca desconforto sem necessariamente prejudicar a visão de objetos, e uma ofuscação de inaptidão que prejudica a visão sem necessariamente causar desconforto.

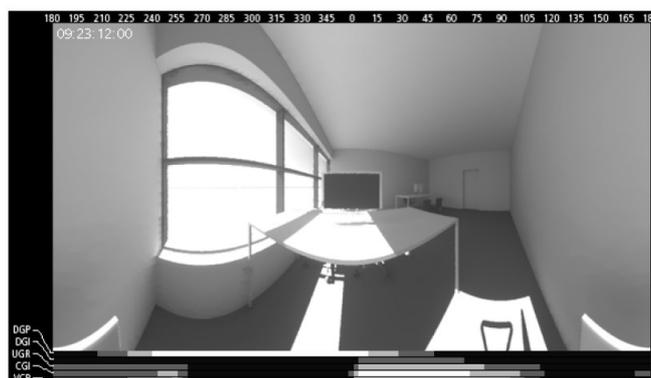


Figura 2.10 - Exemplo de situação de ofuscação.
Retirado de (Jakubiec & Reinhart, 2011)

A distinção taxonómica apresentada não significa que ambas não possam ocorrer simultaneamente apesar de representarem fenómenos diferentes. A ofuscação de inaptidão depende principalmente da quantidade de luz que incide no olho e é largamente independente da luminância da fonte. Nos edifícios, a luz solar direta no campo de visão pode causar ofuscação de inaptidão.

A ofuscação de desconforto depende da luminância da fonte e ocorre quando se verifica uma exposição súbita a uma fonte de luz clara, cuja intensidade é superior àquela para a qual o olho humano está adaptado. Este tipo de estímulo provoca sensações desagradáveis cuja magnitude varia desde uma simples sensação de aborrecimento até situações de dor. É relevante mencionar ainda que a ofuscação de desconforto pode não diminuir necessariamente a visibilidade.

Sabendo então que há pessoas mais sensíveis a este fenómeno do que outras, depreende-se que a ofuscação é um fenómeno subjetivo. Assim sendo, o principal método de investigação envolve a realização de avaliações subjetivas da sensação de desconforto por parte de pessoas submetidas a diversas fontes de ofuscação com diferentes níveis de luminância. A partir dos resultados obtidos procuram desenvolver-se expressões do índice de ofuscação.

Existem alguns modelos de previsão do desconforto visual provocado pela ofuscação, tais como: a Probabilidade de Conforto Visual (IES, 2012), o Índice Britânico de Ofuscação (Hopkinson & Bradley, 1960; Hopkinson, 1972), o Limite de Luminância (Bodmann, 1967), o Índice de Ofuscação CIE (CIE 55, 1983; Navvab & Altland, 1997), e a Escala de Ofuscação Unificada (CIE 117, 1995; Einhorn, 1969, 1979; Paul & Einhorn, 1999). A ofuscação (designada pela letra G do termo inglês "Glare") descrita por estes modelos pode de uma forma genérica ser representada pela seguinte expressão (Peter Robert Boyce & Boyce, 2010):

$$G = \frac{L_s^a \cdot \omega_s^b}{L_b^c \cdot p^d} \quad (2.22)$$

Nesta expressão, a letra " s " em índice designa a fonte (da palavra inglesa "source") e a letra " b " em índice designa o fundo (da palavra inglesa "back"). As variáveis consideradas são a luminância (L), o tamanho aparente da fonte de ofuscação (ω) e a posição da fonte relativamente à linha de visão (p). Cada uma das variáveis é afetada por um expoente particular representado pelas constantes a, b, c, d .

Esta equação sugere que o desconforto por ofuscação aumenta com a luminância da fonte e o seu ângulo sólido, diminuindo com a luminância de fundo e com o aumento da divergência da fonte de ofuscação relativamente à linha de visão.

Este tipo de modelos de ofuscação possui como grande óbice o facto de não pode ser usado para prever a ofuscação de desconforto provocada pela luz natural nas condições do presente trabalho. Um dos seus pressupostos é de que o tamanho da fonte de ofuscação seja menor do que 0,01 sr.

Neste caso, o Índice de Ofuscação de Luz do Dia (Chauvel, Collins, Dogniaux, & Longmore, 1982; Hopkinson, 1963) é um modelo interessante, uma vez que é aceite para prever a ofuscação de desconforto provocada por fontes de grandes dimensões, como é o caso das janelas. Baseado no Índice de Ofuscação da Luz do Dia (DGI do termo inglês "Daylight Glare Index") e em estudos de ofuscação de usando fontes claras artificiais de grandes dimensões, foi proposta a seguinte expressão a ofuscação de luz natural vista por janelas reais (Chauvel et al., 1982) sujeita a algumas modificações posteriores (Fisekis et al., 2003) fide (Inkarojrit, 2005):

$$DGI = 10 \log 0,478 \sum_{i=1}^n \frac{L_s^{1,6} \cdot \Omega^{0,8}}{L_b + 0,007 \cdot \omega_s^{0,5} \cdot L_s} \quad (2.23)$$

Sendo:

n - número de fontes de ofuscação no campo de visão

Ω - ângulo sólido da fonte visto do ponto de observação [sr]

As demais variáveis e respectivos índices presentes na Equação (2.23) possuem os significados respectivos atribuídos também para a Equação (2.22).

No âmbito da qualidade do ambiente luminoso consideraram-se os efeitos combinados das iluminações natural e artificial na percepção do ambiente luminoso como um todo.

Em termos de iluminação artificial em espaços interiores existem recomendações para os níveis de iluminância a adotar consoante o tipo de tarefa desempenhada (IES, 2012; ISO CIE 8995, 2002). Estas recomendações proveem essencialmente daquelas que são as duas organizações internacionais mais ativas nesta área: A Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) e a Illuminating Engineering Society (IES). Contudo, não é fácil estabelecer uma relação causal entre a qualidade da iluminação artificial e a produtividade na realização de uma tarefa (P R Boyce et al., 2006). Em estudos efetuados em ambiente de escritório, as pessoas que percecionavam a iluminação artificial como sendo de melhor qualidade também percecionavam o ambiente interior do escritório como sendo mais aprazível (Veitch, Newsham, & Boyce, 2008). Contudo, qualidade de iluminação não pode ser entendida como sinónimo de elevado fluxo luminoso. Em ambientes de escritórios, verificou-se que iluminações consideradas insuficientes não provocam perturbações de maior aos ocupantes (Akashi & Boyce, 2006; Linhart & Scartezzini, 2011).

No âmbito da iluminação natural, verifica-se que as áreas envidraçadas e vistas para o exterior desempenham um papel importante no ambiente visual. O efeito da vista para o exterior tem sido objeto de diversos estudos (Bringslimark, Hartig, & Grindal Patil, 2011; Chang & Chen, 2005; Hartig, Evans, Jamner, Davis, & Gärling, 2003) que determinaram existir uma preferência humana por vistas da natureza em relação a vistas de elementos urbanos ou arquitetónicos. Contudo, estar localizado demasiado próximo de uma janela pode resultar em problemas de índole térmica e de ofuscação (Aries, Veitch, & Newsham, 2010).

Psicofisiologia

A psicofisiologia teve a sua origem em outubro de 1850 quando Fechner se debruçou sobre uma área da filosofia que estudava as relações entre a mente e o corpo. O seu objetivo era desenvolver uma teoria para relacionar a matéria com a mente, descrevendo o relacionamento entre o mundo físico e a maneira como este é percebido pelo ser humano, ou seja, o relacionamento entre o mundo físico e o mundo psicológico. A psicofisiologia inclui a análise de limites de percepção de grandezas físicas pelo ser humano, bem como a sua distinção, reconhecimento e quantificação em diversas escalas. Fechner propôs que a um mundo físico correspondesse um mundo psicológico. No mundo físico, os objetos materiais seriam medidos em unidades físicas, e no mundo psicológico, as sensações seriam medidas em unidades psicológicas. Baseado nas ideias de D. Bernoulli e de E. H. Weber, estabeleceu que as sensações psicológicas (I) são uma função logarítmica dos valores físicos (Φ), daqui resultando o modelo de Fechner:

$$I = a \cdot \log \Phi + b \quad (2.24)$$

sendo:

α, b - Constantes dependentes da grandeza física em questão.

De entre os diversos modelos nesta área, o modelo de Stevens (Stevens, 1986) adquiriu uma preponderância muito grande pelo facto de proporcionar bons resultados para sentidos distintos estudados na psicofisiologia. Afirma que o valor subjetivo da intensidade de um estímulo é uma função de potência do valor físico, tem sido a base de diversos estudos :

$$I = c \cdot \Phi^n \quad (2.25)$$

sendo:

n - Expoente da função potência, que varia de acordo com a natureza do estímulo;

c - Constante dependente do módulo e do padrão do estímulo. (pode ser unitário, por vezes)

O termo estímulo, no âmbito do presente trabalho, é definido como sendo uma alteração do ambiente (interno ou externo ao próprio ser humano) que é detetável pelo ser humano. De forma equivalente pode definir-se "estímulo" como uma perturbação de um recetor sensorial que induz um reflexo através de uma transdução da mesma perturbação gerada. Nestas condições, um estímulo representa frequentemente o mecanismo responsável pela atuação de um sistema de controlo homeostático associado ao tipo de perturbação em causa.

Para além das medições de grandezas físicas efetuadas no âmbito deste trabalho, algumas medições de variáveis associadas a psicofisiologia podem ainda incluir: medição da atividade cerebral por eletroencefalografia (EEG do termo inglês "*electroencephalography*") ou ressonância magnética funcional (fMRI do termo inglês "*functional magnetic resonance imaging*"), medição da condutância da pele, medições cardiovasculares (batimento cardíaco e respetiva variabilidade), atividade muscular (EMG do termo inglês "*electromyography*"), variações no diâmetro da pupila (pupímetria) ou movimentos oculares (eletro-oculograma, também designado pela sigla EOG)

Resposta Humana a Estímulos Conjugados

Apesar de a forma como os seres humanos percebem o conforto depender de vários estímulos e das suas interações, na maioria das situações os quatro grandes aspetos ambientais (térmico, acústico, luminoso e de qualidade do ar) têm sido avaliados de forma independente nos trabalhos científicos.

Há contudo na literatura diversos trabalhos que analisam a forma como estímulos diferentes interagem entre si. Neste âmbito, é sugerido que os estímulos combinados possuem uma contribuição aditiva para a avaliação subjetiva global, caso os mecanismos internos desses estímulos possam ser considerados independentes (Broadbent, 1971).

Tal é o caso dos estímulos associados aos parâmetros térmico e acústico, tendo-se verificado que afetam diversas atividades humanas de forma independente um do outro (Hancock & Pierce, 1985). Contudo, tal já não se verifica relativamente à percepção humana da qualidade do ar que é influenciada pela temperatura e humidade do mesmo (Berglund & Cain, 1989; Fanger, 1988). Verificou-se que a

percepção de qualidade do ar diminui à medida que tanto a temperatura como a humidade aumentam. No entanto, a intensidade odorífera do ar inalado é independente das propriedades psicrométricas do mesmo (Fang et al., 1998a, 1998b).

Diversos outros estudos abordam as contribuições combinadas de estímulos independentes para a percepção subjetiva humana do ambiente: Térmico e acústico (Viteles & Smith, 1946); Térmico, acústico e visual (Horie, Sakurai, Noguchi, & Matsubara, 1985; Yamazaki, Nomoto, Yokota, & Murai, 1998); Térmico, acústico e de qualidade do ar (Clausen, Carrick, Fanger, & Kim, 1993).

Um outro estudo enfatiza o facto de a insatisfação com um dos aspetos do ambiente interior não conduzir necessariamente a um resultado de insatisfação ou desconforto generalizado em relação ao ambiente na sua globalidade (Michael A. Humphreys, 2005). Também de forma análoga, a manifestação de satisfação em relação a um aspeto particular não é condição suficiente para ser geradora de uma avaliação global satisfatória do ambiente interior.

Um estudo efetuado em ambiente de escritórios sugere que o processo de avaliação global resulta de uma ponderação subjetiva dos vários aspetos individuais. No entanto, é também ressalvado que as satisfações expressas relativamente a diferentes elementos do ambiente interior podem não contribuir com ponderações iguais para a avaliação global efetuada ao mesmo (Michael A. Humphreys, 2005). O autor sugere ainda, no âmbito do mesmo estudo, que as variáveis "temperatura do ar" e "qualidade do ar" apresentam uma maior contribuição para a percepção de qualidade do ambiente interior do que outras variáveis tais como a "iluminância" e a "humidade do ar".

Um estudo recente baseado em cinco ensaios de campo, propõe um índice global de satisfação com o ambiente interior baseado numa análise de regressão linear múltipla usando como variáveis independentes a temperatura operativa, a concentração de dióxido de carbono, a iluminância e o nível de pressão sonora ponderado pela escala A ($L_{eq,A}$) (Cao et al., 2012). No entanto o coeficiente de determinação apresentado pelos autores é baixo ($R^2 = 0,4647$).

Outros estudos efetuados em ambientes interiores de autocarros de transporte de passageiros combinaram métodos estatísticos convencionais com a utilização de redes neuronais artificiais para a determinação de um índice global de insatisfeitos (Alcobia & Silva, 1999; M.C. Gameiro da Silva et al., 2006). Uma rede neuronal de retro propagação com quatro camadas MLP 5-10-8-1 é proposta para determinar as ponderações com as quais os diferentes estímulos contribuem para a avaliação da percepção subjetiva global (Alcobia, 2006). O autor apresenta um coeficiente de correlação de Pearson de 0,95 entre os valores resultantes do modelo e os observados para o nível global de insatisfação. As ponderações de cada um dos estímulos são apresentadas na Equação (2.26).

$$Desconforto\ Global = -7,959 + 0,471Vibração + 0,249Acoustica + 0,235Térmica + 0,225Qualidade\ Ar + 0,123Luminosa \quad (2.26)$$

Um estudo efetuado em câmara climática sugere que a satisfação dos participantes com o ambiente interior global é mais afetada por temperaturas elevadas do que por ar interior de pior qualidade (Balazova, Clausen, & Wyon, 2007).

No contexto de edifícios letivos, alguns ensaios de campo efetuados em escolas secundárias do Reino Unido avaliaram a qualidade do ar interior, conforto térmico e performance acústica dos edifícios

(Mumovic et al., 2009). Os resultados recolhidos apontam para que em escolas dotadas de sistemas de ventilação mecânica foram registadas situações de ruído ambiente interior e desconforto térmico localizado provocado por correntes de ar. Os níveis de conforto térmico registados são aceitáveis, mas as temperaturas registadas na prática tendem a ser mais elevadas do que o valor desejável.

Noutros contextos que não envolvem apenas a dimensão do conforto humano foram também efetuadas análises multicritério das condições ambientais no interior de edifícios. Alguns estudos (C. A. Roulet, Johner, Flourentzou, & Greuter, 2003) avaliaram a criação de índices conjugando critérios como: [1] Performance energética do edifício; [2] Riscos para a saúde; [3] Qualidade do ambiente interior através de métodos estatísticos não convencionais de lógica difusa ("*Fuzzy logic*"). Não foi possível no entanto obter correlações claras entre os vários critérios através da aplicação desta metodologia.

Redes Neurais Artificiais

As redes neuronais artificiais tornaram-se extremamente populares, sendo amplamente aplicadas a vários problemas de modelação matemática, essencialmente porque são genéricas, precisas e representam uma solução para de forma simples modelar ou simular componentes numéricos. (Karlaftis & Vlahogianni, 2011). Têm uma propensão inerente para armazenar conhecimento empírico e são usadas em qualquer um dos três contextos (Haykin, 1999): [1] Como modelos de sistemas nervosos biológicos; [2] Como processadores/controladores adaptativos de sinal, em tempo real; [3] Como métodos analíticos de grandes quantidades de dados. Neste último caso, as maiores virtudes das RNA prendem-se essencialmente com a capacidade de operar com dados multidimensionais, com grande flexibilidade de modelação, capacidade de aprendizagem, flexibilidade e boas prestações preditivas.

Teoricamente, uma RNA multicamada é um aproximador universal de qualquer função contínua num intervalo compacto do universo R^n . O teorema de aproximação universal (Cybenko, 1989) afirma que qualquer função contínua que transforma uma entrada correspondente a um intervalo de números reais num intervalo de números reais de saída pode ser arbitrariamente aproximada com precisão por um perceptrão multicamadas com somente uma camada oculta. Esse resultado é válido para classes restritas de funções de ativação como funções sigmoidais.

Existem algumas semelhanças entre as RNA e outros métodos de estatística clássica como sejam as regressões lineares ou não lineares múltiplas.

As principais diferenças entre as RNA e outros métodos de estatística clássica residem nas próprias estruturas de desenvolvimento dos respetivos modelos. As diferenças podem ser estruturadas em quatro passos: aprendizagem, definição e interpretação, assumções e colinearidade.

A principal diferença entre os métodos de estatística clássica e as RNA resultam do processo de aprendizagem destas últimas. Este processo, independentemente do método de aprendizagem usado (Supervisionado, Não supervisionado, Bayesiano, ...) produz como resultado mais do que um modelo. Neste aspeto há um claro contraste com o que decorre da implementação de modelos de estatística clássica como sejam regressões lineares múltiplas ou regressões não lineares. Nos métodos de

estatística clássica, o resultado final é apenas um. A produção de mais do que um modelo como resultado final decorre do facto de a curva de aprendizagem poder possuir vários mínimos locais, convergindo o modelo para várias arquiteturas diferentes (Ripley, 1996).

Esta é uma característica inerente ao processo de modelação das RNA que também tem como consequência alguma flexibilidade adicional, uma vez que a estrutura funcional dos dados não precisa de ser assumida à *priori*. Mas há vários aspetos negativos também decorrentes deste mesmo facto. Por um lado, porque os mecanismos de inferência estatística ficam ocultos. O que permite que se questione a qualidade do modelo obtido por esta via. Por outro lado porque torna difícil efetuar uma interpretação física dos modelos obtidos a partir de grandezas experimentais mensuradas.

Por este motivo, as RNA são muitas vezes designadas como "caixas negras" em virtude da opacidade dos modelos que geram.

A opção entre a utilização das RNA ou métodos de estatística clássica depende do problema em análise, do respetivo nível de complexidade dos dados, variáveis e do objetivo final do modelo obtido. No âmbito do trabalho realizado, esta questão é extremamente relevante para a construção dos modelos.

Para os modelos de perceção dos ambientes interiores construídos a partir de grandezas físicas medidas *in loco* considera-se fundamental não perder o controlo da inferência estatística nem a interpretação física dos modelos obtidos. Por exemplo: No caso do modelo de perceção do ambiente luminoso, a orientação azimutal das janelas pode não ser estatisticamente significativa para o modelo, mas o produto desta variável pela área das janelas já ser relevante. A experiência mostra que em muitos casos a aproximação do modelo obtido ao conjunto de dados experimentais melhora substancialmente com a inclusão de termos resultantes de variáveis que não possuem significância estatística.

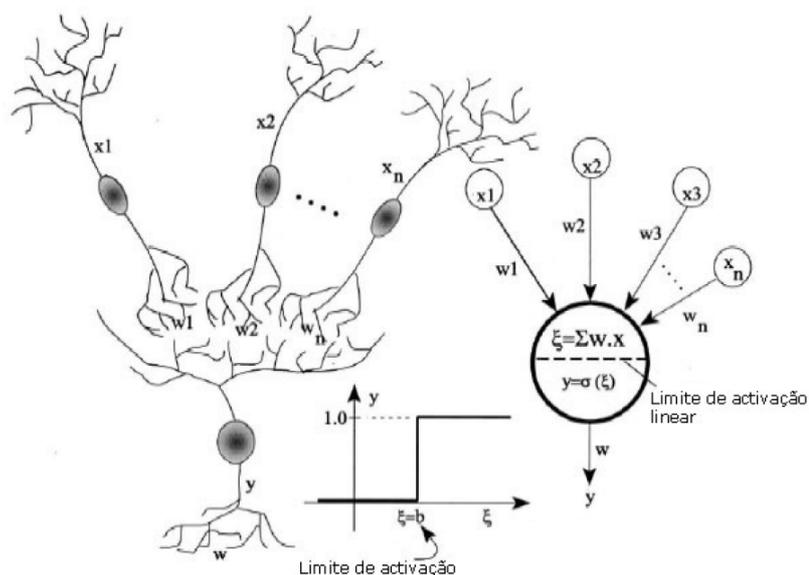


Figura 2.11 - Analogia entre o neurónio biológico e o neurónio artificial.
Adaptado de (Alcobia, 2006)

Contudo, para a obtenção de um modelo global da perceção humana da qualidade do ambiente interior a partir das perceções subjetivas que se sabe serem relevantes, as RNA proporcionam uma ferramenta de eleição.

Desde logo pela analogia entre o neurónio artificial e o neurónio biológico, que não pode de forma alguma ser ignorada. Esta analogia consiste no facto de as ligações entre nodos representarem as

ligações entre os axónios e as dendrites. Os pesos das ligações representam as sinapses e a função de ativação representa a atividade no corpo da célula.

Este é precisamente o processo de comunicação por transmissão de estímulos dos neurónios biológicos que se apresenta de forma comparativa com o neurónio artificial na Figura 2.11. De forma genérica, para ambas as situações (neurónio biológico e neurónio artificial) representam-se vários sinais de intensidade " x " e força sináptica " w " que alimentam um neurónio com um limite de ativação " b ". A aprendizagem da cadeia biológica é feita através do ajuste dos pesos ou forças sinápticas. Este é exatamente o processo usado para as RNA.

Uma RNA tenta modelar algumas das características dos neurónios biológicos. Em termos de simulação, a rede é constituída por unidades básicas de processamento, designadas por neurónios, interligados entre si. Cada neurónio possui várias entradas às quais estão associados pesos. Um peso para cada entrada. Um somatório efetua a soma ponderada das entradas encontrando-se na saída do mesmo uma função de ativação. As redes contêm vários neurónios ligados por forma a que as saídas de uns estão ligadas às entradas de outros.

Existem vários tipos de RNA multicamadas. Contudo, há dois tipos que são mais usados em problemas de regressão tais como aqueles que se colocam no âmbito deste trabalho.

- Redes de retropropagação ou redes multicamadas de perceptrões, vulgarmente designadas de MLP (do termo em inglês *Multilayer Perceptrons*). Este tipo de rede encontra-se amplamente difundido, muito graças ao seu elevado desempenho em múltiplos domínios de aplicação. Uma rede MLP consiste numa camada de entrada de dados onde cada nodo representa uma das variáveis independentes do problema, uma camada de saída onde os nodos representam as variáveis dependentes do problema e uma ou mais camadas ocultas compostas por um ou mais nodos. São os nodos das camadas ocultas que possibilitam o ajustamento da não linearidade dos dados. Neste tipo de redes, os dados são alimentados de forma unidirecional e sem ligação entre os nodos da mesma camada. Tipicamente este tipo de redes é sujeito a um processo de aprendizagem supervisionada por retropropagação do erro. Este processo apresenta melhores indicadores de performance do que outros processos como algoritmos genéticos (ZG Che, Chiang, & Che, 2011), nomeadamente ao nível da velocidade de aprendizagem. Este tipo de redes tem sido aplicado com enorme sucesso à modelação de situações e reconhecimento de padrões (Hassoun, 1995). Apenas alguns exemplos incluem situações como a previsão de chuva e padrões de clientes em comércio eletrónico (Xiao & Chandrasekar, 1997) ou à previsão de custos do produto e do molde na indústria de injeção de termoplásticos (ZH Che, 2010).

- Redes de base radial. Sendo vulgarmente designadas por RBF (do termo em inglês *Radial Basis Function*), estas redes podem ser vistas como um caso especial de MLP. São constituídas por três camadas: a camada de entrada, uma camada oculta e a camada de saída. A camada oculta é usada para promover o agrupamento dos dados de entrada na rede. Contudo, este tipo de redes usa como função de ativação uma função radial base do tipo gaussiana (Haykin, 1999). Às redes RBF é apontada como principal vantagem possuírem um período de aprendizagem inferior ao das MLP convencionais, mas não são tão versáteis nem tão rápidas na sua utilização como estas últimas.

Tal como foi descrito acima, o processo de aprendizagem supervisionada por retropropagação possui elevado desempenho e popularidade no que concerne a redes multicamadas e nomeadamente redes multicamadas unidirecionais. Este método é uma extensão do que foi apresentado em 1960 (Widrow & Hoff, 1960) para uma única camada de neurónios. No método, posteriormente designado

por regra delta, os pesos eram ajustados de acordo com o erro na saída dos neurónios. Este erro representa a diferença entre a saída obtida e a saída desejada. O erro era multiplicado por um coeficiente que consistia no passo do algoritmo de aprendizagem. Para a aprendizagem de redes com múltiplas camadas não existia na altura nenhum método eficiente para treino. Foram posteriormente desenvolvidas (Werbos, 1974), as bases teóricas para um método de cálculo de derivadas parciais ordenadas, que deu origem ao algoritmo de retropropagação apresentado por Rumelhart et al. (Rumelhart, Durbin, Golden, & Chauvin, 1996).

O algoritmo consiste na atualização dos pesos da última camada de acordo com a regra delta e propagar o erro para montante, alterando os pesos de acordo com a influência destes na saída. Obtém-se desta forma, uma superfície de erro, que representa o mesmo (erro) em função dos pesos da rede. A partir deste ponto o objetivo é localizar um mínimo da superfície de erro através dos gradientes descendentes. Explicações mais simples e detalhadas deste algoritmo são apresentadas por diversos autores (Basheer, 1998; Haykin, 1999; Zupan & Gasteiger, 1993).

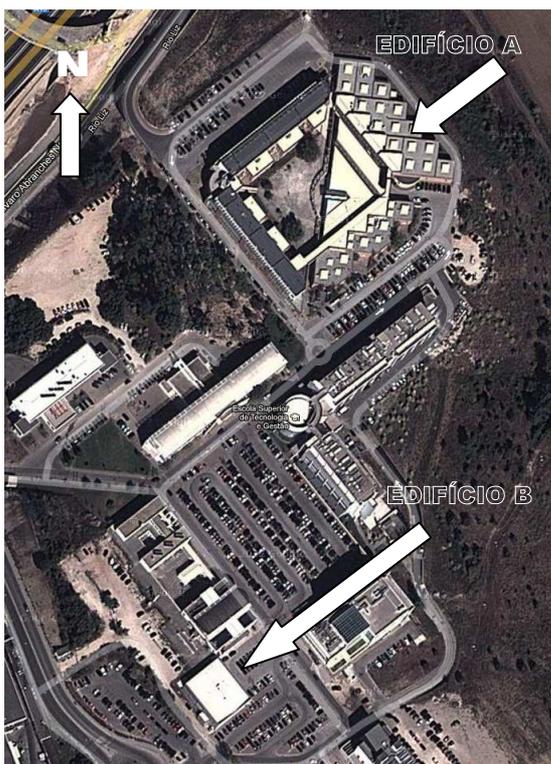
Significância Estatística e Coeficiente de Determinação

No teste de significância estatística, o “Valor-p” representa a probabilidade de obtenção de um teste estatístico pelo menos tão extremo quanto o teste em questão assumindo que a hipótese nula é verdadeira. Neste contexto, a hipótese nula representa a redução ao absurdo da hipótese estatística em consideração. Desta forma, quanto menor for o Valor-p, melhor é a presunção contra a hipótese nula. No âmbito deste trabalho foi sempre tido em consideração que Valores-p < 0,05 representam uma presunção forte contra a hipótese nula.

O coeficiente de determinação (R^2) indica de que forma um conjunto de valores ou modelo representa um conjunto de dados experimentais. Neste âmbito, o coeficiente de determinação é o quadrado do coeficiente de correlação entre um conjunto de dados experimentais e o correspondente conjunto de dados preditivos. De forma geral R^2 pode ser relacionado com a variância inexplicada pelo modelo. Um valor de $R^2 = 0,70$ pode ser interpretado da seguinte forma: “Setenta por cento da variação experimental observada pode ser explicada pelo modelo, podendo os remanescentes trinta por cento ser devidos a variáveis desconhecidas, imperfeições do modelo ou variabilidade inerente.

3. Métodos Experimentais

Os ensaios experimentais foram conduzidos no *campus* 2 do Instituto Politécnico de Leiria localizado a uma latitude de 40 °N e a uma distância linear de 18 km em relação ao oceano atlântico.



Os ensaios decorreram em apenas dois edifícios do *campus*. Praticamente todas as salas de aulas (7 das 8 salas de aulas do estudo) localizam-se no edifício A e apenas uma sala de aula se localiza noutra edifício de menores dimensões - designado por edifício B, tal como representado na Figura 3.1. Ambos os edifícios A e B possuem ventilação natural. Alguns autores designam este tipo de edifícios como passivos (F. Nicol & Humphreys, 2010) uma vez que não dispõem de sistemas de arrefecimento mecânico ativos no verão, mesmo que disponham de um sistema de aquecimento central. Ambos os edifícios A e B dispõem de um sistema de aquecimento central com radiadores de alumínio ligados a uma caldeira.

Figura 3.1 - Vista aérea dos edifícios onde foram realizados os ensaios de campo.

A regulação dos radiadores pode ser feita manualmente no interior das salas através das válvulas de entrada de água quente. Em todas as salas, os ocupantes têm acesso aos radiadores do aquecimento central, bem como às janelas, persianas e porta.

A utilização dos mecanismos de controlo ambiental não foi restringida para não alterar as rotinas normais estabelecidas pela população em causa. Foi no entanto efetuado um registo manual de alterações a este mecanismos em que o mesmo é identificado conjuntamente com o instante em que a

alteração se processou. Também as entradas de estudantes atrasados para a aula foram registadas segundo a mesma metodologia.

Avaliação das Percepções Subjetivas

A avaliação das percepções subjetivas representa um elemento chave do trabalho efetuado. A função objetivo do trabalho é minimizar o erro na previsão das percepções dos ambientes interiores. Sendo esses erros sempre calculados tendo como referência os resultados proporcionados pelos inquéritos de avaliação subjetiva. Desta forma, são as avaliações subjetivas que definem a métrica de adequação dos resultados obtidos. Mas as implicações da forma como são concebidos os inquéritos e nomeadamente as escalas de voto vão muito para lá da simples recolha de um valor numérico correspondente ao voto expresso. O número de classes do voto usada em cada uma das escalas e a interpretação do significado de cada uma delas em termos do conforto humano determinam de forma irrevogável a agregação dos resultados e posterior tratamento dos mesmos para o cálculo das percentagens de insatisfeitos com determinado ambiente. A interpretação das escalas de votos pelos inquiridos deve ser feita de tal forma que em nenhuma circunstância possam ser suscitadas dúvidas de interpretação do pretendido.

Desta forma, os questionários foram desenvolvidos especificamente para os ensaios de campo efetuados tendo sido previamente testados em ensaios preliminares. Foi considerado que o inquérito não poderia ultrapassar as duas páginas, por forma a que pudesse ser impresso numa única folha (frente e verso). Mesmo num ambiente em que há uma propensão para aceitar melhor a participação num estudo através do preenchimento de um inquérito, existe sempre algum nível de receio de que a anuência relativamente ao seu preenchimento se transforme numa tarefa longa e fastidiosa. Considerou-se como tal extremamente importante para a voluntária colaboração das pessoas, mencionar previamente que o inquérito é constituído por apenas uma folha, podendo ser preenchido em pouco mais de um minuto. Para tal foi também necessária a adoção de uma estrutura gráfica que permita a imediata identificação do ponto de resposta face à pergunta formulada.

Foram ainda definidas duas outras premissas de base para a conceção do inquérito e das escalas de voto:

- Todas as classes presentes em cada uma das escalas de voto deveriam traduzir, de forma simples e com expressões comuns à oralidade e à escrita, aquela que seria descrição qualitativa expectável do ambiente considerado, naquelas circunstâncias.
- Nas escalas de voto não deveria existir nenhuma zona de indefinição relativamente à caracterização do ambiente em causa. O objetivo é impossibilitar que o inquirido possa expressar o seu voto sem que previamente seja obrigado a refletir qualitativamente acerca do ambiente em questão. Ou seja, a inclusão de classes como "*neutro*" ou "*indefenido*" foi rejeitada na maioria das escalas de voto consideradas, com apenas duas exceções que serão ainda devidamente justificadas.

Os inquéritos são anónimos, sendo apenas colocadas algumas questões de índole pessoal como sejam a idade, o género, altura e peso. O nível de vestuário é inquirido através da utilização de uma *checklist* das peças individuais de vestuário que a pessoa enverga no momento do preenchimento. A lista das peças individuais de vestuário não comporta de forma alguma todas as que se encontram descritas em normas

internacionais em que o nível de isolamento das mesmas é referenciado (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2010; ISO 7730, 2005)

Dados Pessoais

Idade: 70
60
50
40
30
20

Sexo: M F

Altura: 1,90
1,80
1,70
1,60
1,50
1,40

Peso: 100
90
80
70
60
50

Vestuário

Calças Camisola Interior Camisola Fina

Saia T-Shirt Camisola Normal

Calções Camisa Camisola Grossa

Vestido Casaco

Fato

Figura 3.2 - Avaliação dos dados pessoais e peças individuais de vestuário dos inquiridos

A limitação do número de peças individuais de roupa apresentadas no inquérito foi ajustada em função da observação detalhada das indumentárias envergadas pela população e causa. Esta lista de peças de vestuário individuais foi ainda testada nos 233 inquéritos efetuados na fase preliminar de ensaios.

No caso da avaliação subjetiva do conforto térmico a escala de voto usada apresenta um esbatido de cores entre o azul e o vermelho, que são as duas cores usualmente associadas às sensações térmicas correspondentemente apresentadas nos subtítulos da escala. O número de classes patente nesta escala foi definido de acordo com as indicações da escala de McIntyre (McIntyre, 1978).

A expressão da perceção de conforto térmico é efetuada através da marcação por um (X) no ponto correspondente da escala contínua e a sua tradução numérica é efetuada através da sobreposição de uma régua graduada entre -500 e +500. Este mesmo tipo de metodologia para a tradução numérica do voto expresso foi já testada de forma bem sucedida em alguns estudos (Alcobia, 2006; Silva et al., 2006).

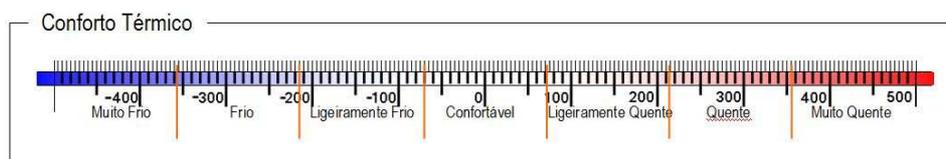


Figura 3.3 - Escala de voto do conforto térmico

Os resultados das votações de cada uma das pessoas no interior da sala foram convertidos em valores compreendidos entre -500 e +500 colocando uma régua graduada transparente em cima das escalas contínuas nas quais os votos foram expressos de acordo com a mesma metodologia usada em estudos semelhantes (Alcobia, 2006; M.C. Gameiro da Silva et al., 2006). Esta graduação não se encontra visível para as pessoas aquando do instante da votação. A régua de leitura de resultados não foi colocada até à extremidade das escalas de voto porque a experiência mostra que os extremos das escalas não são usados para exprimir as preferências de voto.

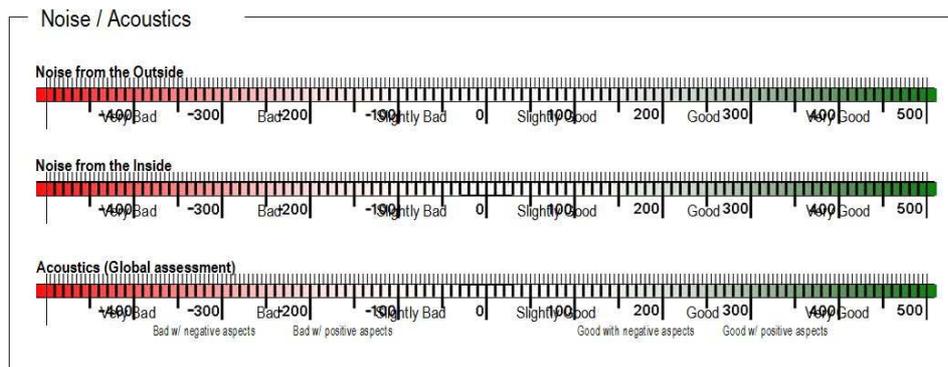


Figura 3.4 - Escalas de votação do ambiente acústico.

Para permitir a imediata interpretação das escalas apresentadas e a expressão da avaliação do ambiente interior foram usadas cores e subtítulos de apoio. As cores empregues devem permitir ao inquirido identificar imediatamente qual o ponto da escala que traduz a sua perceção reduzindo o tempo de tomada de decisão. É indesejável que o inquirido tenha que refletir e interpretar os termos empregues, se isso significar que eles são complexos, ambíguos ou distintos daqueles que são usados no dia a dia para caracterizar esses ambientes. Neste contexto, as escalas usadas para os ambientes acústico, luminoso e de qualidade do apresentam legendas qualitativas desde o "Muito mau" ao "Muito bom". Considera-se que esta é a taxonomia mais simples, objetiva e próxima da que é usada no dia a dia pelas pessoas.

Uma questão importante para a agregação de resultados é o facto de as escalas adotadas para estes três ambientes corresponderem a seis classes distintas: três classes no domínio do "mau" e três classes no domínio do "bom". Foi excluída a existência de uma classe correspondente a "Neutro" ao centro da escala. No âmbito destes três ambientes o "neutro" é ambíguo e poderia ser interpretado como "indiferente". Considere-se por exemplo o ambiente luminoso. São aceites duas hipóteses: (1) O ambiente ou é adequado para a realização das tarefas que estão a ser desempenhadas no espaço interior e nesse caso deve ser considerado como pertencente a um dos domínios do "bom" ou seja a tradução numérica da resposta será um valor positivo; (2) Caso a pessoa o considere "desadequado" ou "incómodo" a resposta deve pertencer a um dos domínios do "mau" com a consequente tradução numérica num resultado negativo. Claro que sendo as escalas contínuas, o resultado da tradução numérica do voto pode ser zero. Do ponto de vista do utilizador isso significa que o voto foi colocado exatamente a meio entre as classes "Ligeiramente mau" e "Ligeiramente bom". A interpretação do processo cognitivo que desencadeou esta resposta pode significar que o indivíduo considera que o ambiente luminoso é ligeiramente mau, mas no limite superior deste patamar ou então que o indivíduo considera que ele é ligeiramente bom, mas no limite inferior do mesmo patamar. A discussão em torno da interpretação do processo cognitivo que desencadeou este voto em particular, é interessante para o ponto de vista da ergonomia ambiental apenas num aspeto: Independentemente da situação, a pessoa foi obrigada a tomar uma decisão sem ambiguidade na resposta escolhida.

No caso da avaliação global do ambiente interior o voto da perceção subjetiva resulta da ponderação de vários elementos díspares entre si, que o caracterizam. Pode facilmente conceber-se uma situação em que a avaliação de um determinado ambiente interior é negativa, mas anulada pela avaliação positiva de outro ambiente. Desta forma, optou-se por incluir uma classe central de neutralidade para acomodar este tipo de situações e patente na Figura 3.5.

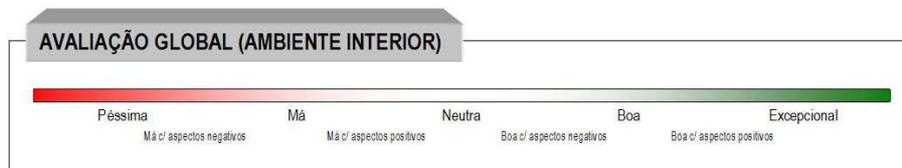


Figura 3.5 - Escala de votação do ambiente interior (avaliação global)

Após a avaliação de cada um dos quatro fatores usados para caracterizar o ambiente interior cada participante efetua a sua avaliação global do ambiente interior numa escala de voto semelhante.

No entanto, nos ensaios realizados em situações de exame, o questionário inclui ainda uma pergunta adicional onde cada participante efetua uma autoavaliação da sua performance em função daquelas que eram as suas expectativas iniciais. A escala contínua bipolar apresentada na Figura 3.6 inclui subtítulos de auxílio à votação, onde são definidas cinco áreas. Estas incluem uma zona neutra (ao centro), duas zonas claramente negativas e duas outras claramente positivas.

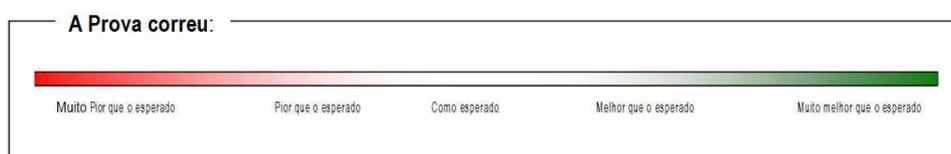


Figura 3.6 - Escala de votação da autoavaliação, da performance no exame.

Ambiente Térmico

As medições objetivas das grandezas físicas de caracterização do ambiente térmico podem ser feitas com recurso a instrumentação que se pode dividir em três classes: [1] Instrumentação composta por sensores individuais; [2] Sensores aquecidos e [3] Manequins térmicos.

Na utilização de sensores individuais, para avaliar o conforto térmico, torna-se imperativo a medição das quatro variáveis físicas fundamentais (temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e humidade relativa) que o influenciam. As características fundamentais de cada sensor estão estabelecidas em norma internacional (ISO 7726, 1998).

Temperatura do ar

A temperatura do ar pode ser medida através de termómetros de bolbo com líquido, de bolbo com gás, utilizando elementos bimetálicos ou através de termopares, termistores ou termo resistências. Na medição da temperatura do ar é importante ter em linha de conta o efeito da radiação. Pretende-se que a temperatura medida seja tanto quanto possível uma temperatura convectiva e desprovida de contaminação radiativa. Este aspeto reveste-se de importância capital nos casos em que se registem diferenças de temperatura elevadas entre pelo menos uma das superfícies da envolvente interior e a temperatura convectiva do ar. A situação mais provável de poder gerar a ocorrência de um fenómeno desta natureza, nas condições dos ensaios efetuados, é a existência de uma fachada que, pela sua orientação, seja exposta a uma quantidade de radiação solar diretamente incidente muito elevada.

Uma forma de salvaguardar a ocorrência deste tipo de efeitos é a através da utilização de escudos de radiação térmica, tal como apresentado na Figura 3.7

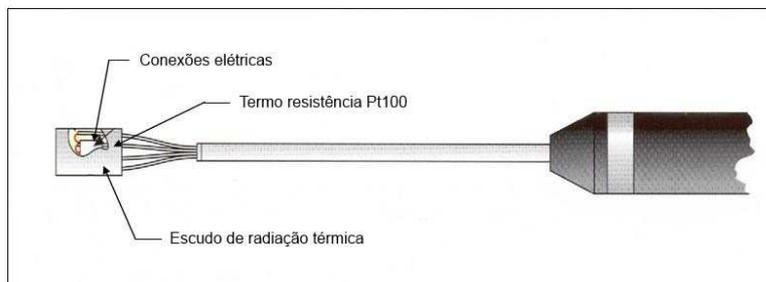


Figura 3.7 - Sensor individual de temperatura de um dos equipamentos usados nos ensaios (Brüel and Kjøer Indoor Comfort Analyser Type 1213).

Temperatura radiante

A temperatura média radiante é definida como sendo a temperatura uniforme das paredes de um compartimento imaginário no qual uma pessoa trocaria a mesma quantidade de calor por radiação que no ambiente em análise. O modo mais comum de efetuar a sua medição é através de um termómetro de globo negro. Este dispositivo é constituído por uma esfera oca, de cobre, normalmente com um diâmetro de 150 mm e revestida por uma camada de tinta preta. Possui no seu centro um sensor de temperatura. Os detalhes da utilização do termómetro de globo negro são apresentados na literatura (M C Gameiro da Silva, 2002).

Alguns autores sugerem que a camada de tinta preta provoca uma sobrevalorização da absorção radiativa relativamente à que se regista no corpo humano, sugerindo em alternativa a utilização de um sensor elipsoidal pintado de cor cinzenta (Madsen et al., 1984).

A temperatura média radiante pode ainda ser calculada se forem medidos os valores das temperaturas radiantes planas da envolvente interior através da utilização de um sensor como o apresentado na Figura 3.8.

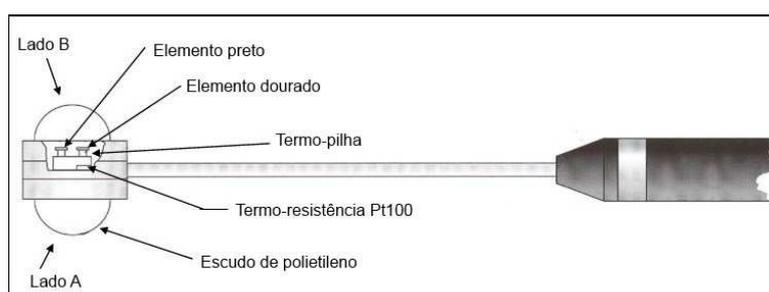


Figura 3.8 - Sensor de temperatura radiante em dois planos de um dos equipamentos usado nos ensaios (Brüel and Kjøer Indoor Comfort Analyser Type 1213).

Por último, esta grandeza pode ainda ser calculada analiticamente se forem conhecidas as temperaturas de todas as superfícies vizinhas, as respetivas áreas e localizações relativamente ao ponto em questão. O cálculo efetuado por esta via através da utilização de fatores de forma revela-se um meio menos expedito para obtenção da grandeza pretendida.

Velocidade do ar interior

A medição de grandezas como velocidade e/ou caudal em escoamentos de fluidos reveste-se sempre de um nível de complexidade superior aos que se verificam para temperatura, pressão e humidade. O maior grau de dificuldade na medição da velocidade do ar decorre de esta apresentar características vectoriais, que podem ainda estar associadas a elevadas flutuações do seu valor em amplitude. De entre os vários métodos disponíveis para a medição destas grandezas, a anemometria de fio quente e a velocimetria laser de efeito Doppler são os mais adequados (M C Gameiro da Silva, 2002). A utilização da velocimetria laser de efeito Doppler é uma técnica que, quer por via do seu custo quer da complexidade na sua aplicação, é preferencialmente usada como método de referência e não tanto como técnica experimental de amostragem *in loco*.

No contexto do presente trabalho, e considerando os ensaios realizados, o valor médio da velocidade instantânea do ar registado com o sensor apresentado na Figura 3.9, aquando do momento do preenchimento dos inquéritos foi de 0,07 m/s. No decurso dos ensaios, as velocidades do ar registadas oscilaram entre 0 – 0,17 m/s.

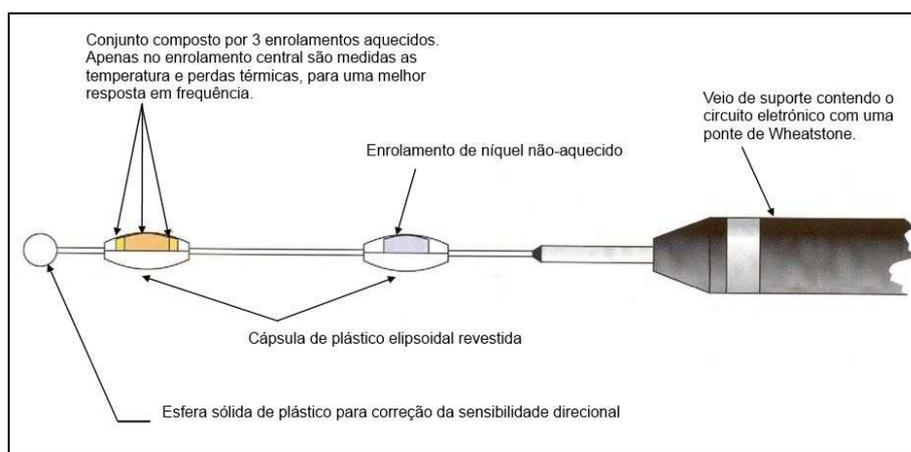


Figura 3.9 - Sensor de velocidade do ar de um dos equipamentos usados nos ensaios (Brüel and Kjær Indoor Comfort Analyser Type 1213).

Tal como mencionado anteriormente, as grandezas físicas associadas ao ambiente térmico foram registadas usando um medidor de conforto térmico dotado de um transdutor aquecido. O valor da velocidade do ar encontra-se desta forma incorporado nas grandezas temperatura equivalente (T_{eq}) e Voto Térmico Médio Previsível ($Th.PMV$) que foram registadas diretamente. Para esse efeito foi inserido no equipamento de medida um valor do nível de vestuário considerado típico para a estação do ano em questão a pressão parcial de vapor e a atividade metabólica dos indivíduos. Os dois primeiros valores foram posteriormente corrigidos com o valor exato do nível de vestuário e pressão parcial de vapor apurados para cada ensaio de campo.

Humidade

A humidade pode ser expressa em termos de valor absoluto ou valor relativo. Em termos de conforto térmico, é a humidade absoluta E o valor absoluto da humidade expressa como pressão parcial de vapor no ar que influencia as perdas de calor evaporativas de um indivíduo. Em ambientes térmicos moderados (com temperatura < 26 °C e atividade metabólica < 2 met) a humidade tem um efeito

diminuto quer na sensação térmica, quer na percepção da qualidade do ar interior (EN 15251, 2007; ISO 7730, 2005). Tipicamente, um aumento de 10% na humidade relativa do ar é percebido como correspondente a um aumento da temperatura operativa de 0,3 °C. A humidade do ar é usualmente medida com recurso a sensores capacitivos, sensores químicos de cloreto de lítio ou ainda sondas de ponto de orvalho como a apresentada na Figura 3.10.

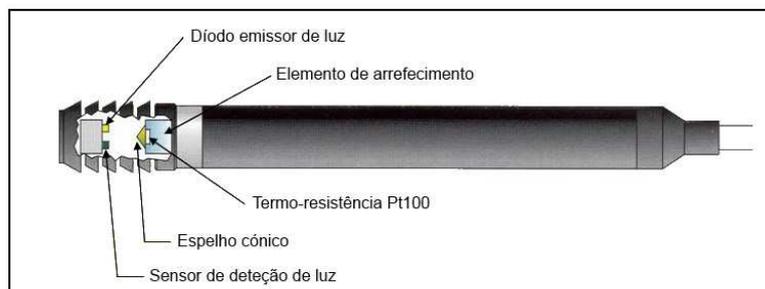


Figura 3.10 - Sensor de ponto de orvalho de um dos equipamentos usados nos ensaios (Brüel and Kjær Indoor Comfort Analyser Type 1213).

No decurso dos ensaios efetuados, verificou-se que todos os valores de humidade registados (exceto um) no interior das salas de aulas se situam no intervalo 50% a 70%.

Manequins térmicos

Os manequins térmicos possuem como principal vantagem a possibilidade de permitirem a simulação mais realística de fatores adicionais que podem ser possíveis de contabilizar por outras formas. Fatores como sejam: Aspetos anatómicos; Influência dos assentos nas trocas de calor; Exposição solar localizada a porções particulares do corpo ou ainda Constrangimentos físicos impostos a escoamentos incidentes sobre porções particulares do corpo.

Muitos dos manequins atualmente existentes apenas conseguem simular as perdas de calor sensíveis, devido à dificuldade que existe em construir e operar um manequim que simule a transpiração. Este facto é apenas parcialmente limitador da utilização de manequins térmicos, uma vez que em climas moderados ou dentro da zona de conforto não se verifica transpiração por parte das pessoas.

Numa perspetiva histórica, as primeiras utilizações de manequins térmicos foram efetuadas com propósitos militares, tendo sido desenvolvidas nos Estados Unidos da América. Estes primeiros manequins, foram construídos em cobre, apresentando uma postura rígida, sem secções independentes e não possuindo mecanismos de regulação da temperatura superficial (Wyon, Larsson, Forsgren, & Lundgren, 1989).

Atualmente existem diversos tipos de manequins que se podem classificar quanto à sua postura, número de partes do corpo, modo de controlo e tipo de utilização (Nuno Alexandre Gonçalves Martinho, 2012).

O seu princípio de funcionamento baseia-se num sistema de aquecimento de resistências elétricas enroladas em diferentes secções do manequim, imediatamente abaixo da camada que simula a pele externa, por forma a garantir uma distribuição da temperatura superficial o mais uniforme possível.

Externamente, a maioria dos manequins é construída de uma forma semelhante à dos manequins usados nas montras das lojas de vestuário. Ou seja, são feitos a partir de resina ou plástico, apresentando uma capacidade térmica moderada e permitindo um tempo de resposta adequado com o

do ser humano. O número de secções nas quais o manequim é dividido varia de modelo para modelo sendo normalmente entre 16 e 36 (Nuno Alexandre Gonçalves Martinho, 2012).

Nos anos mais recentes verifica-se uma tendência de desenvolvimento dos manequins no sentido da complexidade e multifuncionalidade registando-se a existência de alguns manequins que simulam a respiração e outros que simulam transpiração, sendo ainda capazes de simular movimentos complexos como o de caminhar (Holmér, 2004).

Os manequins térmicos são previamente calibrados em câmaras climáticas, sendo expostos a ambientes uniformes com os correspondentes valores de temperatura equivalente. A expressão apresentada na Equação (3.1) é usada para obter o valor da temperatura de cada secção i .

$$T_{eq} = T_{pele,i} - \frac{Q}{h_i} \quad (3.1)$$

Durante a calibração e de acordo com a equação apresentada, calculam-se os valores do coeficiente global de transmissão de calor para cada uma das secções do manequim, sendo conhecidos os valores dos fluxos de calor (Q), das temperaturas da pele medidas pelo manequim ($T_{pele,i}$) e o valor da temperatura equivalente imposta (T_{eq}). Os coeficientes determinados desta forma, são posteriormente usados durante as medições experimentais efetuadas para se obter a temperatura equivalente de cada secção com base nas leituras da temperatura de pele e do fluxo de calor respetivo.

Uma descrição detalhada das diversas teorias e métodos de medição, do conforto térmico através do recurso a manequins térmicos pode ser consultada na literatura (Nuno Alexandre Gonçalves Martinho, 2012; Nilsson, 2004, 2007).

As variáveis físicas escolhidas para descrever o ambiente térmico interior foram a temperatura efetiva e o índice de *Voto Térmico Médio Previsível* designado abreviadamente por *Th.PMV* (do inglês "*Thermal Predicted Mean Vote*"). Para o registo direto destes índices e das grandezas que permitam o seu cálculo foram usados de forma redundante, como medida de segurança dois equipamentos apresentados na Figura 3.11: Um sensor aquecido (Brüel and Kjær Thermal Comfort Meter 1212) ligado a um sistema autónomo de registo de dados (*data logger*). Este tipo de transdutor aquecido usado para monitorizar grandezas de conforto térmico foi desenvolvido por Madsen (Madsen, 1971) e permite registar diretamente os valores das temperatura efetiva (T_{ef}), voto térmico médio previsível (*Th.PMV*) e percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente térmico (*Th.PPD*). O mesmo tipo de equipamentos foi usado em ensaios de campo na monitorização das condições interiores de conforto térmico em autocarros (N.A.G. Martinho, Silva, & Ramos, 2004; M.C. Gameiro da Silva et al., 2006).

Paralelamente foi empregue, de forma redundante e por questões de segurança, um outro equipamento de monitorização de grandezas físicas relevantes para o ambiente térmico (Brüel and Kjær Indoor Comfort Analyser Type 1213). Este equipamento possui capacidade de registar internamente os valores medidos e foi programado para efetuar o registar simultâneo das seguintes grandezas físicas: temperatura, humidade, velocidade do ar, temperatura radiante em duas paredes e temperatura operativa. Também este equipamento tem sido usado em trabalhos de investigação realizados em *Campus* académicos para a determinação de índices de conforto térmico (Corgnati et al., 2011; Corgnati, Ansaldi, & Filippi, 2009).

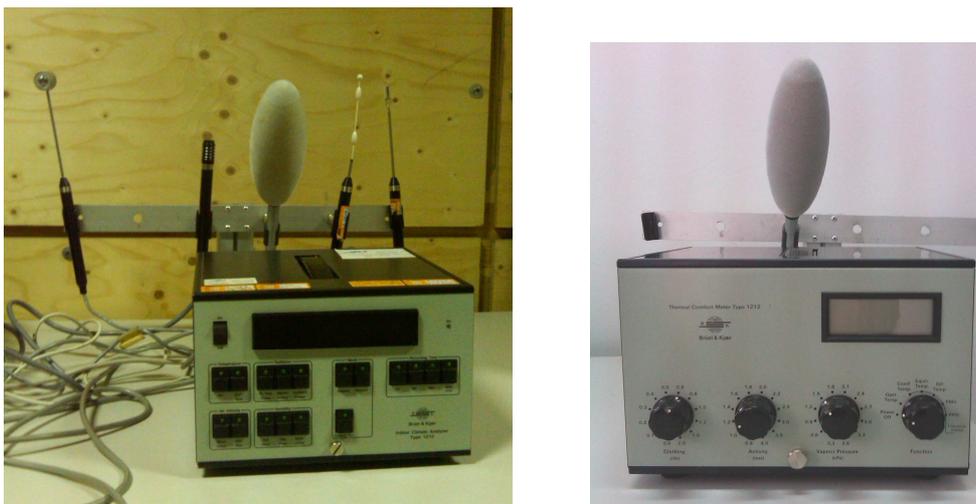


Figura 3.11 - Equipamentos de medição de conforto térmico usados em paralelo nos ensaios de campo. À esquerda é apresentado o *Brüel and Kjær Indoor Comfort Analyser Type 1213* com capacidade de gravação dos registos efetuados. À direita o *Brüel and Kjær Thermal Comfort Meter 1212*.

Por último, todas as alterações de parâmetros do ambiente interior provocadas pelos utilizadores foram registados. Nomeadamente, a abertura e fecho de janelas ou porta, bem como regulações de estores e persianas. A entrada de alunos atrasados foi também registada manualmente em folha própria.

Ambiente Acústico

Como variáveis independentes do ambiente acústico foram seleccionadas o tempo de reverberação (RT) e o isolamento acústico da fachada ($D_{2m,nT,w}$). A determinação experimental de ambos os valores envolve a geração de um nível elevado de ruído quer no interior do edifício (para o caso do tempo de reverberação) quer no exterior do mesmo (para o caso do isolamento acústico da fachada exterior). Por forma a não perturbar a normal realização das atividades letivas, a realização destes ensaios foi efetuada durante os períodos de interrupções letivas das férias de Natal e férias grandes. Desta forma, os ensaios para a determinação do tempo de reverberação de cada uma das salas foram realizados com a sala desprovida de ocupação humana, excetuando as duas pessoas necessárias para a realização dos ensaios.

O mobiliário letivo, composto essencialmente por mesas e cadeiras, não sofreu alterações de disposição relativamente à configuração do mesmo nas aulas teóricas e nos exames.

Para a determinação do tempo de reverberação foram usados dois equipamentos: uma fonte de geração omnidirecional de ruído *CESVA dodecahedron omnidirectional sound source* e um sonómetro integrador *CESVA SC310*. A utilização de ambos os equipamentos num ensaio de determinação do tempo de reverberação é apresentada na Figura 3.12.

O sonómetro integrador *CESVA SC310* é um equipamento de classe 1 segundo IEC (*International Electrotechnical Commission*) e ANSI (*American National Standards Institute*). Tem capacidade de

funcionar como analisador espectral em tempo real, quer em bandas de oitava de 31,5 Hz a 16 kHz, quer em bandas de 1/3 de oitava de 20 Hz a 10 kHz. Para a determinação do tempo de reverberação este equipamento procede ao cálculo do mesmo para cada uma das frequências do espectro de interesse. Este sonómetro é calibrado anualmente em entidade certificada para esse efeito.

Os dados armazenados na memória foram posteriormente transferidos para um computador usando para tal um programa informático dedicado, fornecido pelo fabricante (*CESVA Capture Studio*). O cálculo dos valores médios e desvios-padrão foi efetuado através do programa informático *CESVA Insulation Studio*, também fornecido pelo fabricante do equipamento.



Figura 3.12 - Ensaio de determinação do tempo de reverberação.

Para a determinação do tempo de reverberação de acordo com a legislação portuguesa e norma internacional vigentes (Decreto-Lei 96/2008, 2008; ISO 3382-2, 2008) foram efetuados três ensaios válidos de decaimento do ruído rosa gerado pela fonte omnidirecional em cada um dos três locais considerados mais representativos das condições acústicas do interior da sala.

Para a determinação do isolamento acústico da fachada foi usado o mesmo sonómetro integrador usado nos ensaios do tempo de reverberação, mas agora efetuando a medição dos níveis médios de pressão sonora em bandas de terço de oitava e de acordo com o disposto na legislação portuguesa e norma internacional aplicáveis (Decreto-Lei 96/2008, 2008; ISO 717-1, 2013).

Como fonte de ruído exterior foi usada um gerador de som *Brüel & Kjær Sound source type 4224* produzindo ruído rosa.

De forma análoga ao procedimento adotado para o cálculo do tempo de reverberação, também os dados dos valores médios dos níveis de pressão sonora registados a dois metros da fachada do edifício e no interior da sala, foram transferidos para um computador. Os valores dos isolamentos acústicos das fachadas foram posteriormente calculados, de acordo com a norma internacional (ISO 717-1, 2013) através do programa *CESVA Insulation Studio*.

Um pormenor da realização de um dos ensaios de determinação do isolamento acústica da fachada é apresentado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Ensaio de determinação do isolamento acústico da fachada.

Qualidade do Ar

No caso da qualidade do ar interior as duas grandezas que foram medidas experimentalmente, com recurso a instrumentação dedicada foram as concentrações de dióxido de carbono e de partículas em suspensão no ar.

Na Figura 3.14 é apresentado um pormenor da localização dos equipamentos de medida no interior de uma das salas em que foram conduzidos ensaios.



Figura 3.14 - Pormenor da colocação dos equipamentos de aquisição de dados durante a realização dos ensaios

Dióxido de Carbono

Um dos métodos de referência usado para medir concentrações de dióxido de carbono em atmosferas é a detecção não dispersiva de radiação infravermelha, usualmente referenciado pela sigla NDIR (do inglês "*Non Dispersive Infra Red Detection*"). Por vezes este método também é designado por método do feixe pulsado de luz infravermelha. Esta técnica serve-se da capacidade que alguns gases têm de absorver radiação infravermelha em comprimentos de onda definidos. O dióxido de carbono absorve radiação infravermelha preferencialmente na gama de 4,2 μm . A quantidade de radiação absorvida é dada pela lei de Beer:

$$a_{\lambda} = 1 - e^{-C \cdot Q_{\lambda} \cdot L} \quad (3.2)$$

Sendo: C - Concentração de dióxido de carbono [ppm];

Q_{λ} - Eficiência de absorção [$\text{ppm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]

L - Comprimento do feixe ótico [m]

O feixe de luz infravermelha é produzido numa lâmpada, e modulado ou de outra forma transformado num feixe pulsado. Uma forma simples de o fazer é através de um mecanismo obturador, que pode ser algo tão simples como um disco rotativo com um orifício. O objectivo é o de poder desagregar a radiação infravermelha produzida pela lâmpada da produzida pela assinatura térmica dos componentes no interior do equipamento. Cada pulso de luz atravessa a câmara de análise de dióxido de carbono. O sistema usa a absorção total no comprimento de onda do espectro considerado não sendo necessário para tal a utilização de nenhum elemento dispersivo (tal como um prisma por exemplo) para difratar a radiação empregue. Resulta deste facto a denominação de método não dispersivo.

O sistema de detecção é constituído por duas câmaras idênticas. Uma câmara de amostra através da qual o ar atmosférico contendo dióxido de carbono flui, e outra de referência, cheia com uma mistura de gás apropriada (normalmente azoto). Quando a radiação infravermelha atravessa a câmara de amostra, ocorre uma atenuação da radiação, resultado de uma maior absorção a montante que vai diminuindo progressivamente para jusante. Esta diferença na quantidade de radiação absorvida por cada uma das câmaras depende da concentração do dióxido de carbono. No método descrito, a fonte de luz é modelada, a uma frequência conhecida (normalmente próxima de 10 Hz), para produzir um sinal de referência nulo nas câmaras (de Carvalho, 2006).

O método NDIR é quase incontornável como referência na medição de dióxido de carbono. Não apenas pelo facto de se tratar de um método de referência. Mas também pelo baixo custo de alguns equipamentos que operam de acordo com este princípio, associado à elevada sensibilidade e resposta rápida apresentada.

Para a medição da concentração de dióxido de carbono no interior, utilizou-se um equipamento designado "*Indoor Air Quality Monitor PS32*" da empresa Sensotron. Este dispositivo de medida é normalmente indicado para medir concentrações de dióxido de carbono no ar, numa faixa compreendida entre 0 e 5000 ppm. A medição da concentração de dióxido de carbono é feita através do método NDIR, descrito anteriormente e usando para tal de um sensor de reduzidas dimensões.

A resolução das leituras de dióxido de carbono é de 1 ppm, sendo a sua incerteza de: ± 10 ppm (ou 2% do valor medido) considerando um intervalo de confiança de 95% e sendo todos estes valores apresentados com base nos dados do fabricante. Este equipamento foi adquirido especificamente para a realização dos ensaios no âmbito do presente trabalho. Desta forma, aquando da realização dos

mesmos, o equipamento encontrava-se dentro do período de validade da calibração efetuada pelo fabricante.



Figura 3.15 - Equipamento de medição de CO₂ com capacidade de gravação de dados incorporada

Para além da medição de dióxido de carbono, este equipamento mede ainda a humidade relativa entre 0 e 100%, bem como a temperatura do ar entre 10 e 45 °C. A temperatura e a humidade relativa são medidas através de um elemento semiconductor. As resoluções apresentadas são de 0,1 °C para a temperatura do ar e de 0,1% para a humidade relativa. Cada um destes valores apresentados possui uma incerteza de $\pm 0,5$ °C para a temperatura e $\pm 3,5\%$ para a humidade relativa, considerando também um intervalo de confiança de 95%.

O equipamento possui uma memória interna com capacidade de armazenagem conjunta de 67000 dados, ficando assim a autonomia da memória dependente da taxa de aquisição de dados definida pelo utilizador. O intervalo de tempo mínimo entre leituras que o equipamento consegue realizar é de 10 segundos. Contudo, no âmbito de trabalho realizado e de acordo com a experiência recolhida durante os ensaios preliminares realizados, verificou-se ser suficiente definir uma taxa de amostragem de dióxido de carbono correspondente a um período de um minuto. Os dados recolhidos e armazenados no equipamento durante os ensaios são posteriormente descarregados para um computador através de uma porta série com comunicação RS-232 e usando um programa dedicado fornecido pelo fabricante.

Partículas em suspensão

Os equipamentos de medição de partículas em suspensão no ar operam essencialmente por três métodos distintos: [1] Método gravimétrico; [2] Método de atenuação de radiação beta; [3] Método ótico de contagem de partículas.

O método gravimétrico constitui o método de referência para a amostragem e determinação de concentrações mássicas de partículas em suspensão no ar com um diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 μm (designadas usualmente por PM₁₀), de acordo com a legislação portuguesa (Decreto-Lei 111/2002, 2002), e norma europeia (EN 12341, 1998) aplicáveis.

Este método é usado, quer a nível nacional quer europeu, em estações de monitorização da qualidade do ar. O princípio de funcionamento de um amostrador gravimétrico baseia-se na aspiração de ar, a um caudal constante, através de uma entrada especialmente desenhada em que as partículas em. Na prática, requer-se uma entrada de ar satisfatória do ponto de vista aerodinâmico, devendo o prato impactor apresentar uma característica de corte com 50 % de eficiência para o diâmetro aerodinâmico em causa (Agência Portuguesa do Ambiente, 2010). Este método permite a determinação da massa das partículas depositadas em filtros, durante um determinado período de tempo correspondente

normalmente a 24 horas. Após a pesagem dos filtros estes poderão ser analisados no laboratório para a determinação da composição química. Durante todo o período de amostragem é assegurado um caudal constante, independentemente da quantidade de partículas depositadas no filtro, através da utilização de um controlador de caudal.

Este método possui como principal limitação a sua não portabilidade, tornando-o inviável para a medição de partículas em suspensão no interior de uma sala.

O método de atenuação de radiação beta baseia-se na absorção da radiação β emitida por uma fonte radioativa, pelas partículas depositadas num filtro. O esquema do princípio de funcionamento deste tipo de equipamentos é apresentado na Figura 3.16. As partículas são aspiradas pelo equipamento com um caudal constante. O fluxo de ar constante atravessa uma fita de fibra de vidro onde ficam depositadas as partículas durante o intervalo de tempo pré-programado. Esta fita encontra-se localizada entre a fonte radioativa e um detetor de radiação Geiger-Muller. A distribuição uniforme das partículas depositadas sobre a superfície do filtro permite relacionar a massa total depositada com o número de contagens registadas pelo detetor.

A determinação da massa de partículas depositadas (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$) é efetuada por comparação dos números de contagens registadas com o filtro no início do período de aspiração de ar e no final do mesmo, através da equação (3.3).

$$m = \frac{A}{k} (\ln N_f - \ln N_i) \quad (3.3)$$

Sendo:

m - Massa total de partículas [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];

A - Atividade da fonte radioativa [s^{-1}];

k - Constante física do equipamento [$\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \mu\text{g}^{-1}$];

N_f e N_i - Números de contagens final e inicial (respetivamente).

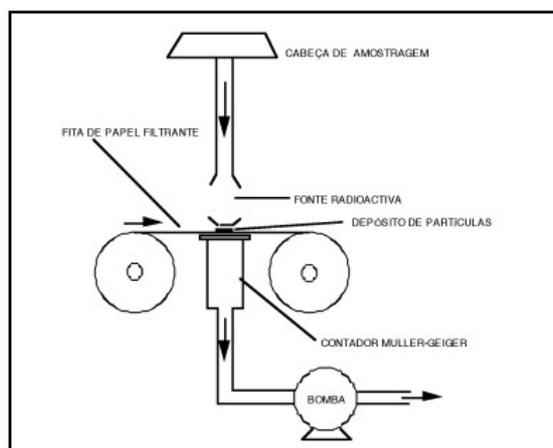


Figura 3.16 - Esquema de funcionamento de um analisador de partículas por atenuação de radiação beta. Retirado de (Agência Portuguesa do Ambiente, 2010)

O método ótico de contagem de partículas baseia-se num processo de contagem de eventos usando para um díodo laser como fonte emissora de radiação e um foto detetor. O ar atmosférico é aspirado

com um caudal constante e são efetuadas contagens correspondentes a várias classes, de acordo com o diâmetro aerodinâmico das partículas. Este método possui como principal vantagem o facto de ser portátil, tornando-o especialmente adequado para a realização de ensaios em espaços interiores como os usados no âmbito deste trabalho. Pode ainda ser usado para a determinação do nível de limpeza do ar em ambientes controlados como laboratórios farmacêuticos, laboratórios de micro-eletrónica ou salas limpas de hospitais.

Desta forma, a determinação das concentrações de partículas em suspensão no ar interior foi efetuada com um analisador portátil *Lighthouse 3016* apresentado na Figura 3.17.

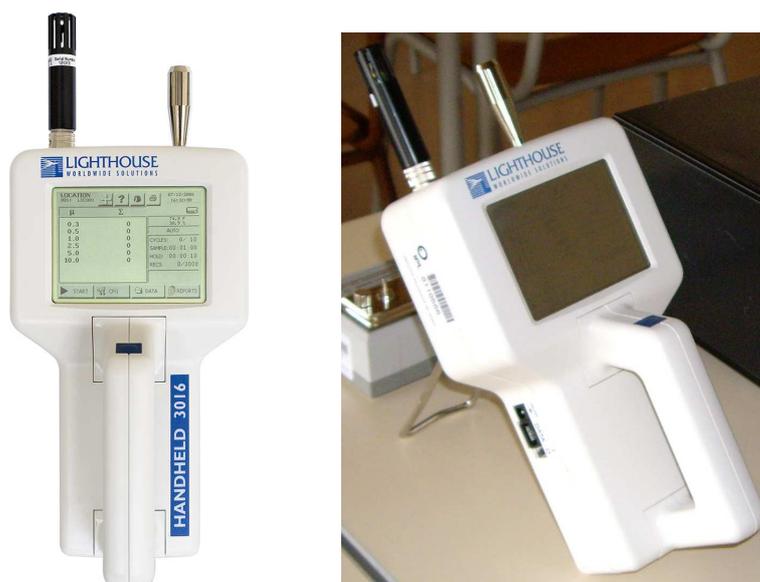


Figura 3.17 - Equipamento de medição de partículas em suspensão no ar com capacidade de registo interno dos valores medidos.

Este equipamento foi adquirido especificamente para a realização do trabalho efetuado, encontrando-se por isso dentro do período de validade da calibração efetuada pelo fabricante. Possui as seguintes especificações técnicas: Gama de medição de partículas: 0.3 - 10,0PM; Limiares de deteção dos vários canais: 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0 μm ; Caudal de aspiração de ar: 2.83 dm^3/min . Fonte de emissão laser: Díodo laser. Este equipamento possui ainda sensores ambientais de temperatura (com uma incerteza de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ na faixa de temperaturas de 0-50 $^\circ\text{C}$) e de humidade (com uma incerteza de $\pm 2\%$ na faixa de humidades de 15-90%). Permite armazenar internamente todos os dados simultaneamente, até um total conjunto de 3000 registos.

Uma das questões que se coloca relativamente à utilização deste tipo de equipamento prende-se com o valor da massa volúmica das partículas em suspensão no ar. Sendo um equipamento de medição ótica, o valor da densidade das partículas afeta diretamente o cálculo dos resultados expressos em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor pode ser definido pelo utilizador no equipamento, sendo que por defeito a especificação com que o mesmo vem configurado de fábrica é 2,5 g/cm^3 . Contudo, alguns estudos concluíram que um valor mais indicado para a utilização deste tipo de equipamento é de 1,65 g/cm^3 (Tittarelli et al., 2008; Tuch et al., 2000; Weijers, 2004).

Para avaliar estas questões foi efetuado um ensaio preliminar, com a duração de quatro dias e meio, em que os resultados deste equipamento foram comparados com os de um analisador de PM10 pelo método de atenuação de radiação beta.

O resultado das medições efetuadas pelos dois analisadores de partículas em suspensão durante o período considerado é apresentado na Figura 3.18.

Verificou-se que o valor da massa volúmica das partículas que proporciona a melhor concordância entre os dois resultados obtidos é precisamente o valor de $1,65 \text{ g/cm}^3$.

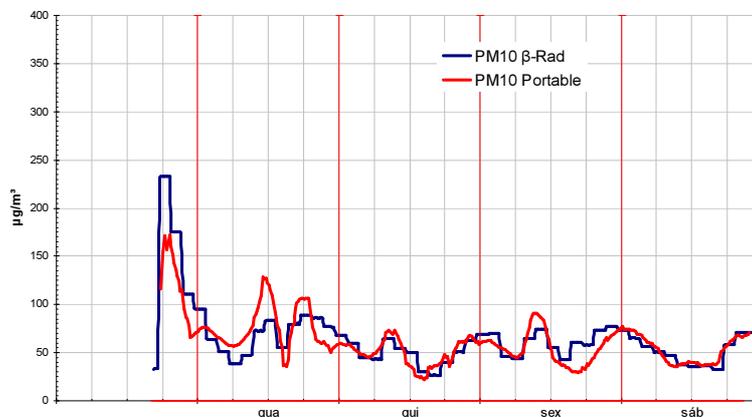


Figura 3.18 - Ensaio comparativo entre dois analisadores de partículas PM10 por métodos de atenuação de radiação beta e método ótico.

A curva apresentada na Figura 3.18, para o analisador portátil correspondente precisamente ao resultado obtido considerando uma massa volúmica de $1,65 \text{ g/cm}^3$, sendo este o valor usado nos ensaios realizados no âmbito deste trabalho.

Duas questões importantes que se colocam adicionalmente, quando se pretende determinar o nível de limpeza do ar interior são: O número de amostras recolhidas em locais representativos diferentes no interior da sala e o volume de ar recolhido em cada amostra. A norma internacional aplicável à determinação do nível de limpeza do ar (ISO 14644-1, 1999) define que devem ser recolhidas amostras num número de pontos não inferior a \sqrt{A} , sendo A a área da sala em m^2 . Adicionalmente, em cada amostra deve ser aspirado um volume mínimo de ar de 2 dm^3 , não podendo o período correspondente de amostragem ser inferior a um minuto.

Esta metodologia é inviável de ser aplicada nos ensaios de campo realizados. A recolha de amostras de ar tem que ser efetuada no decorrer do próprio ensaio uma vez que uma grande fonte de partículas em suspensão no ar são os seres humanos presentes no interior da sala. A aplicação da metodologia preconizada na norma (ISO 14644-1, 1999) induziria um nível de perturbação na aula ou no exame que não seria tolerável.

Desta forma, a opção tomada foi por desenvolver uma metodologia própria para a determinação das concentrações de partículas em suspensão no ar. O equipamento de medição foi colocado, conjuntamente com os demais num local considerado representativo das condições no interior da sala. Esse local foi sempre no meio da população discente e colocado de forma a que a sua distância às pessoas mais próximas não fosse significativamente superior à distância típica entre indivíduos na malha de distribuição espacial humana. As amostragens foram feitas apenas neste local representativo do ambiente interior. Quanto ao volume de ar aspirado, foi definido que cada amostragem corresponderia a um intervalo de tempo de dois minutos de aspiração de ar. Possuindo o equipamento usado um caudal de aspiração de ar constante e igual a $2,83 \text{ dm}^3/\text{min}$, o volume de ar aspirado em cada amostragem foi de $5,66 \text{ dm}^3$.

O equipamento foi programado para efetuar uma amostragem de dois minutos, ficando de seguida em pausa por um período de três minutos e recomeçando novamente. Assim, foi recolhida uma amostra de 5,66 dm³ de ar por cada cinco minutos de ensaio decorrido, sendo os respetivos valores guardados na memória interna do equipamento e posteriormente descarregados para um computador através de uma ligação RS-232 e usando o programa dedicado fornecido pelo fabricante. Também esta metodologia de recolha de amostras foi validada no ensaio preliminar de quatro dias, realizado por comparação de resultados com o analisador de referência por atenuação de radiação beta.

Ambiente Luminoso

A metodologia tradicional nas medições relacionadas com a luminosidade baseia-se em luxímetros portáteis, que medem a iluminância em diversos pontos do ambiente em análise.

Ao nível das medições nos edifícios relativamente aos locais de trabalho, o plano de medição utilizado é o horizontal (ver figura 4.50) a uma altura de 0,85 metros do solo, sendo o padrão utilizado em todas as normas de iluminação, excetuando-se algumas aplicações de usos específicos como para desenho técnico, bibliotecas ou locais contendo estantes, sendo nestes casos utilizado o plano vertical.

Para as medições de iluminância no decorrer dos ensaios foi usado um luxímetro *Testo 545*, idêntico ao apresentado na Figura 3.19. Este equipamento possui como elemento sensor um fotodiodo de silicone, permitindo-lhe efetuar medições da intensidade luminosa entre 0 e 100000 lux, com uma resolução de 1 lux até 32000 lux e de 10 lux quando selecionada toda a gama de medida. É recomendada pelo fabricante a sua utilização para uma faixa de temperaturas compreendidas entre os 0 e os 50 °C.



Figura 3.19 - Equipamento de medição de iluminância usado nos ensaios.

A configuração do equipamento pode ser feita através de um programa dedicado fornecido pelo fabricante, sendo possível definir o tempo entre cada leitura com um intervalo mínimo entre leituras de dois segundos. Alternativamente a sua configuração pode ser feita manualmente no próprio equipamento. O equipamento possui ainda a possibilidade de recolha dos dados gravados através de uma porta série RS-232, sendo exportados diretamente para um computador.

Um aspeto sensível na caracterização do ambiente luminoso no interior da sala é o número de pontos de amostragem. Como é possível observar na Figura 3.20, é possível que no decorrer de um ensaio se tenham registado ligeiros gradientes de iluminância nos diversos planos de trabalho em utilização. Efetuar uma amostragem de iluminância em diversos locais representativos no interior da sala, no decurso da aula ou do exame, é algo que seria intolerável pelo nível de perturbação que induziria ao normal decorrer das tarefas desempenhadas.



Figura 3.20 - Ensaios de campo. Do lado esquerdo um ensaio realizado durante uma aula normal e do lado direito, um realizado em situação de exame. Em ambos os casos, os equipamentos de medida encontram-se localizados num local considerado representativo das condições no interior da sala.

Desta forma, optou-se por efetuar as medições de iluminância sempre no mesmo local de referência em que foram colocados os demais equipamentos. Tal como mencionado anteriormente, estes equipamentos foram sempre colocados de forma a tentar ocupar o espaço equivalente ao de uma pessoa e encontrando-se a uma distância das pessoas na sua vizinhança considerada representativa das distâncias normais entre indivíduos na malha de distribuição humana no interior da sala.

Foi efetuado um registo manual dos valores de iluminância sempre que se verificava a ocorrência de uma condição que provocasse alterações nas condições de iluminação no interior. Também no momento de preenchimento dos inquéritos foram registados os valores de iluminância no plano de trabalho.

4. Análise de Resultados

Os ensaios de campo validados decorreram entre novembro de 2010 e janeiro de 2012, de acordo com o calendário apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Caracterização das populações. "N" designa a amostra de inquéritos validados. Idade, Altura, Peso e BMI designam as médias respetivas da população em causa.

Estação	Ano	Mês	Hora	N	Idade	Altura [m]	Peso [kg]	BMI [kg/m ²]
Outono	2010	Novembro	12:10	22	20	1,75	69	22,6
			16:26	34	21	1,76	77	24,9
		Dezembro	12:30	22	21	1,76	70	22,6
			16:55	32	21	1,78	75	23,7
Inverno	2011	Março	15:15	45	23	1,73	71	23,7
			15:15	76	20	1,77	73	23,3
Primavera		Abril	15:02	36	23	1,72	72	24,3
			15:20	50	21	1,76	71	22,9
		Maio	14:58	29	24	1,72	71	24,0
			15:41	38	20	1,76	71	22,9
		Junho	15:00	20	21	1,72	68	22,9
			15:24	36	21	1,78	73	23,2
Verão		Julho	11:45	30	20	1,77	72	23,1
			16:30	26	22	1,71	67	22,9
Outono		Setembro	16:10	20	21	1,77	78	24,9
			11:25	22	21	1,77	75	23,9
		Novembro	14:55	60	20	1,76	70	22,5
			11:30	61	23	1,76	75	24,2
Inverno	2012	Janeiro	11:35	73	21	1,77	73	23,3
			14:38	30	21	1,76	73	23,6
			21:05	38	24	1,76	74	24,0

As populações participantes no estudo são constituídas por estudantes do ensino superior. Mais especificamente por estudantes de licenciaturas em Engenharia Mecânica, Engenharia Automóvel e Engenharia do Ambiente. Talvez por este facto a população apresente uma assimetria em relação à distribuição do género masculino/feminino com 87,8% da população constituída por homens e 12,2% por mulheres. Contudo, esta distribuição desproporcionada de géneros não deverá colocar em causa os resultados obtidos. Em termos do ambiente térmico, foi demonstrado (Fanger, 1973) que tanto homens

como mulheres apresentam as mesmas preferências pelo ambiente térmico. A temperatura da pele das mulheres e as suas perdas evaporativas são ligeiramente menores do que as dos homens. Contudo, estes dois fatores contrabalançam o facto de as mulheres possuírem um metabolismo ligeiramente inferior. Também em estudos efetuados com crianças em ambiente de escola primária (M.A. Humphreys, 1977a, 1977b), foi observado que não existem diferenças significativas entre as respostas de rapazes e raparigas.

Outros estudos de perceção da qualidade do ambiente interior realizados em salas de aula (Giuli et al., 2012) também não encontraram diferenças significativas de perceção do ambiente entre rapazes e raparigas. A similitude estatística entre ambos os sexos pode ser alargada a questões relevantes em contexto de sala de aula como sejam a "visibilidade do quadro", "correntes de ar" ou "visibilidade do plano de escrita de apontamentos".

Já no que concerne às idades, a população é muito uniforme. Noventa e três (93%) por cento da população concentra-se na faixa etária dos 18 – 26 anos. Um total de 800 inquéritos foram considerados válidos de entre o total de ensaios realizados.

Previamente à fase de realização de ensaios decorreu uma fase preliminar e exploratória durante os meses de dezembro de 2009 e janeiro de 2010. Nesta fase foram recolhidos e tratados 233 inquéritos de avaliação da perceção subjetiva do ambiente interior. Os resultados destes inquéritos serviram para aferir a adequação das escalas contínuas e da utilização de esbatidos nas cores conjugados com as legendas de indicação qualitativa. O tratamento e análise destes resultados permitiu identificar algumas falhas menores na elaboração dos inquéritos como sejam o posicionamento dos subtítulos em relação ao eixo de simetria da classe que designam. Os ensaios realizados nesta fase permitiram ainda afinar a metodologia de colocação do equipamento experimental e aquisição de dados.

Contando com os ensaios preliminares exploratórios, no âmbito deste trabalho foram contabilizados como válidos e tratados um total de 1033 inquéritos.

Os dados recolhidos na fase preliminar, quer os dados das avaliações subjetivas, quer os resultados das medições com os equipamentos não são apresentados na Tabela 4.1 nem usados na análise de resultados que consubstancia o presente capítulo.

Perceção Subjetiva

Os valores dos votos inscritos nas escalas contínuas foram lidos manualmente e um-a-um. Para tal, no documento "Word" que contém o inquérito foi colocada em cima de cada uma das escalas de voto uma régua graduada de -500 a +500 e com uma resolução de 5 pontos. As escalas de voto foram então removidas juntamente com as respetivas legendas de apoio, permanecendo inalteradas as linhas de caixa usadas para delimitar cada um dos ambientes e as régua de leitura. O documento contendo apenas estes elementos foi impresso em acetatos e usado para proceder à leitura dos resultados. O acetato foi sobreposto a cada um dos inquéritos preenchidos assegurando-se a perfeita coincidência entre as linhas caixas dos votos e as do acetato e garantindo-se também desta forma o perfeito alinhamento da régua impressa em acetato com a do inquérito preenchido.

Os votos expressos nas escalas contínuas foram traduzidos num valor numérico usando escalas de leitura semelhantes às apresentadas na Figura 3.4. Foi usada uma escala de mil pontos [-500 ; 500] para proceder à conversão numérica dos votos expressos. A utilização de uma escala de mil pontos foi considerada pelo facto de permitir uma grande resolução na leitura dos votos expressos. Os valores lidos com esta escala podem posteriormente ser convertidos para outra escala tal como por exemplo a escala de sete pontos de McIntyre (McIntyre, 1978) comumente usada em estudos de conforto térmico. A percentagem de insatisfeitos correspondente a cada voto expresso foi também calculada de acordo com o conjunto de regras de agregação usado para cada voto.

Para o ambiente térmico, a escala usada é bipolar, com sete classes e centrada. O valor zero corresponde ao ponto ótimo. Os votos de "desconforto" correspondem às classes de "Frio" ou "Calor" ou condições ainda mais extremas do que estas. Desta forma, são contabilizados como indivíduos em situação de desconforto (térmico), aqueles cujos votos cumprem a condição apresentada na Equação (4.1).

$$|V_t| > \frac{1000}{7} \times 1,5 \quad (4.1)$$

As escalas usadas para os ambientes Acústico, de Qualidade do Ar e Luminoso, são idênticas. Correspondem a escalas unipolares de seis classes, em que o valor zero marca a fronteira entre as classes "Ligeiramente má" e "Ligeiramente boa". Desta forma, são contabilizados como indivíduos em situação de desconforto relativamente a cada um dos ambientes mencionados, aqueles cujos votos cumprem a condição apresentada na Equação (4.2).

$$V_t < -\frac{1000}{6} \quad (4.2)$$

A escala usada para o voto de caracterização do Ambiente Interior (Global) é uma escala unipolar de cinco classes. O valor zero corresponde ao ponto central da avaliação "Neutra" e no seu limite inferior, esta classe faz fronteira com a classe de avaliação "Má". Como tal, são contabilizados como indivíduos

globalmente em situação de desconforto ou descontentamento com o ambiente interior, aqueles cujos votos cumprem a condição apresentada na Equação (4.3).

$$Vt < -\frac{1000}{5} \quad (4.3)$$

Ambiente Acústico

Em situações de aula teóricas, o ambiente acústico é marcado pela comunicação bidirecional entre um orador e uma audiência. Este processo de comunicação e inteligibilidade da fala são afetados pelo efeito combinado do ruído ambiente e condições acústicas da sala

Em exames finais, o ambiente acústico muda drasticamente. O interior da sala passa a estar silencioso durante a maior parte do tempo do ensaio. As questões de inteligibilidade da fala que se colocam num contexto de aula normal deixam de fazer sentido. As fontes de ruído exterior continuam presentes, mas também nestas épocas o nível de ruído exterior é diferente. No período em que decorrem os exames finais, a atividade letiva é inexistente ou residual. Este facto faz com que a população circulante no espaço exterior às salas de aulas diminua substancialmente em relação ao período letivo normal. Para além disso, muita da população académica que se encontra presente no *Campus* está envolvida em atividades de estudo em grupo, pelo que, é normal a adoção de uma postura de maior recato acústico para não perturbar o estudo dos colegas. Pelos vários motivos apresentados, é normal que nível de ruído exterior também seja menor durante este período.

Pelos elementos apresentados os dois elementos de votação adotados para caracterizar o melhor possível o ambiente acústico foram o Voto de Ruído Exterior (designado por **NOV** de "*Noise from the Outside Vote*") e Voto de Ruído Interior (**NIV** de "*Noise from the Inside Vote*").

Há três questões que se colocam em relação à caracterização do ambiente acústico em termos das demais percepções acústicas subjetivas:

- Pode o ambiente acústico ser descrito de forma correta e precisa pelos votos *NOV* e *NIV*?
- As contribuições dos votos *NOV* e *NIV* são sensíveis ao tipo de tarefa desempenhada?
- Em situações de exame, tal como em outras com um maior nível de pressão individual, a autoavaliação da performance individual tem influência na percepção do ambiente acústico?

O voto acústico representado na Figura 4.1 mostra que todos os valores médios registados dos parâmetros *NOV* e *NIV* são positivos. Esta é uma limitação do modelo uma vez que seria desejável trabalhar com uma faixa mais alargada de valores que incluísse também valores negativos. Contudo, tal também é uma consequência do facto os resultados provirem de ensaios de campo. Nem as condições acústicas no interior da sala, nem no exterior da mesma podem ser alteradas ou de alguma forma controladas previamente à ocorrência do ensaio.

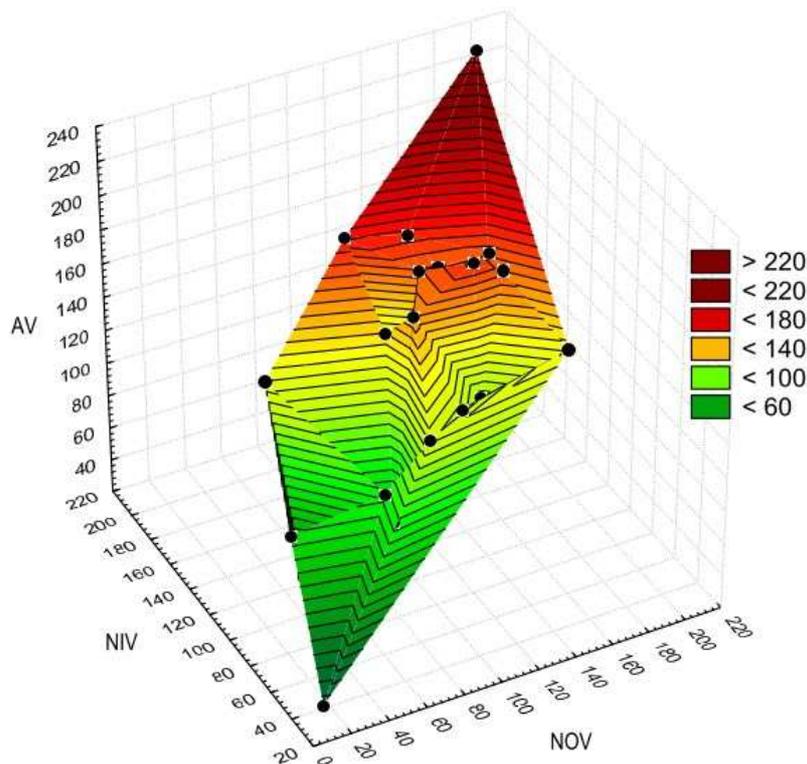


Figura 4.1 - Voto acústico (AV) em função dos votos de ruído interior (NIV) e ruído exterior (NOV)

Usando regressões lineares múltiplas para a determinação do voto acústico, obtém-se:

$$AV = 0,342NOV + 0,634NIV \quad (4.4)$$

A equação (4.4) apresenta a seguinte ficha estatística: $RMSE = 18,64$; $R^2 = 0,841$; $Valor\ p = 9,3 \times 10^{-17}$; $F = 453,1$; $\sigma = 19,957$. Esta equação representa a expressão do voto acústico usando a totalidade dos dados experimentais, independentemente do facto de os mesmos provirem de ensaios realizados em aulas teóricas ou em exames finais. As únicas variáveis com significância estatística para este modelo são NOV (valor $p = 5,2 \times 10^{-3}$) e NIV (valor $p = 4,7 \times 10^{-6}$). A utilização de um termo independente ou constante não evidenciou significância estatística suficiente para justificar a sua inclusão no modelo (valor $p = 0,348$). O emprego de regressões lineares múltiplas pressupõe que as variáveis de entrada do modelo sejam entre si linearmente independentes. Os votos NOV e NIV apresentam um coeficiente de correlação $R^2=0,396$ que demonstra que existe algum nível de correlação entre ambas. Este resultado não é de todo inesperado, uma vez que seria expectável que a ocorrência de ruído proveniente do exterior tenha algum nível de repercussão na perceção de ruído interior. Podem existir diversos motivos para tal. Uma hipótese aventada para ilustrar uma situação deste género é o facto de a existência de um nível de ruído mais elevado e com origem no exterior, seja potenciador de comentários e conversas paralelas entre os presentes no interior precisamente em relação à atividade geradora de ruído no exterior.

A observação da equação (4.4) obtida para o voto acústico permite concluir que a soma dos coeficientes dos votos de ruído interior e exterior é 0,976. Este facto permite retirar duas conclusões:

O voto acústico no interior de uma sala de aula pode ser previsto através de uma combinação linear dos votos de ruído no interior e exterior. O resultado do voto acústico corresponde (aproximadamente) a uma média ponderada com contribuições de 2/3 do ruído interior e 1/3 do ruído exterior.

Para avaliar se a tarefa desempenhada possui alguma influência na contribuição relativa dos votos acústicos, os resultados dos ensaios realizados em aulas teóricas e em exames finais foram analisados separadamente. Os coeficientes lineares da equação determinados para cada uma das situações são apresentados na Equação (4.5) e Tabela 4.2.

$$AV = C_{NOV} \cdot NOV + C_{NIV} \cdot NIV \quad (4.5)$$

Tabela 4.2 - Coeficientes dos votos de ruído exterior (C_{NOV}) e interior (C_{NIV}) obtidos separadamente para as situações de aulas teóricas e exames finais.

	Aulas teóricas	Exames
Ficha Estatística	$F = 227,5; p = 7,7 \times 10^{-11}$ $R^2 = 0,827 \quad \sigma = 22,5$	$F = 1018,6; p = 3,8 \times 10^{-6}$ $R^2 = 0,962; \sigma = 6,6$
C_{NOV}	0,373 ($\sigma = 0,1425; p = 0,021$)	0,292 ($\sigma = 0,0882; p = 0,030$)
C_{NIV}	0,583 ($\sigma = 0,1361; p = 8,9 \times 10^{-4}$)	0,723 ($\sigma = 0,0767; p = 7,1 \times 10^{-4}$)

Em situações de exames finais talvez fosse razoável supor que a contribuição do *NOV* para o voto acústico aumentasse, uma vez que o interior da sala se encontra silencioso durante a maior parte do tempo da realização da prova. Neste contexto, os alunos no interior da sala poderiam ser mais sensíveis aos ruídos provenientes do exterior. Contudo, não foi encontrada suficiente evidência estatística que suporte tais pressupostos. Tudo aponta para que os coeficientes dos votos de ruído do interior e exterior sejam semelhantes para as situações de aulas teóricas e exames finais (considerando um nível de confiança de 95%). Consequentemente, pode concluir-se que as contribuições relativas do ruído do interior e ruído do exterior não são significativamente afetadas pela tarefa desempenhada pelos votantes.

Ainda considerando apenas os ensaios realizados em contexto de exames finais, foi analisada a hipótese de a autoavaliação da *performance* no exame influenciar a avaliação subjetiva do ambiente acústico. Para este efeito foi usado o voto de autoavaliação da *performance* (*PV de "performance vote"*). Os resultados mostram que a autoavaliação da *performance* individual não possui nem significância estatística nem correlação com o voto acústico (*Valor p* = 0,7194; $R^2 = 0,0358$)

Qualidade do Ar

Dois parâmetros de voto foram considerados como os mais aptos a descrever de forma completa e precisa a percepção subjetiva da qualidade do ar interior: O voto de ar viciado/fresco (*AStV* da expressão anglo-saxónica "*Air Stiffness Vote*") e o voto de cheiros/odores (*ASmV* da expressão anglo-saxónica "*Air Smell Vote*"). As palavras "cheiro" e "odor" são sinónimas. Como tal, de um ponto de vista puramente semântico parece redundante a utilização destas duas palavras seguidas. A palavra "cheiro" é generalista e usada de forma arbitrária para designar a presença de uma substância química detetada pela pituitária humana. Esta é a interpretação pretendida para a escala de voto da percepção subjetiva em questão. Contudo, muito frequentemente na comunicação social, a palavra "odor" é usada para designar o odor corporal humano. Muito provavelmente porque esta palavra não possui associada a si

uma conotação de intensidade tão grande como "cheiro". Considerou-se que poderia haver algum risco de se gerarem ambiguidades de interpretação do objetivo do voto em questão. Para que não surgisse qualquer dúvida que a avaliação do cheiro do ar interior, incluía tanto fontes humanas como não-humanas optou-se deliberadamente pela utilização das palavras "cheiros/odores".

O ar viciado ou ar fresco está diretamente dependente da ventilação do espaço interior e dos níveis de dióxido de carbono produzidos pelo metabolismo humano. O dióxido de carbono é inodoro, mas não necessariamente indetetável pelos seres humanos. A relação entre o dióxido de carbono e a prevalência de riscos para a saúde em escolas tem sido abundantemente investigada. Em estudos pioneiros foi encontrada uma correlação parcial estatisticamente significativa (ANOVA; $p < 0,001$) entre sintomas de odores desagradáveis, dores de cabeça, tonturas, cabeça pesada, cansaço, dificuldade de concentração e concentrações elevadas de dióxido de carbono (1500–4000 ppm comparadas com concentrações abaixo de 1500 ppm). Concomitantemente, é sugerido na literatura que a concentração máxima de dióxido de carbono não ultrapasse 1500 ppm ao longo de um dia inteiro (Alfano et al., 2010; Building Bulletin 101, 2006) para evitar a ocorrência de qualquer um dos sintomas descritos.

Quanto aos cheiros/odores, em contexto de sala de aula estão maioritariamente relacionados com compostos orgânicos voláteis (VOC's) de origem humana, produtos de limpeza e ventilação insuficiente. O olfato humano é extremamente eficiente na deteção de odores. Mas possui igualmente uma notável capacidade de adaptação aos mesmos odores. Neste contexto, o tempo de exposição é um elemento-chave. Como foi mencionado anteriormente, todos os inquéritos foram respondidos pelo menos uma hora após o início da aula. O que significa que o domínio de validade dos resultados da perceção subjetiva da qualidade do ar inclui um tempo de uma exposição compreendido entre uma e duas horas.

Para o voto da perceção subjetiva da qualidade do ar pode ser colocado um conjunto de questões semelhantes às consideradas para a caracterização do ambiente acústico:

- Pode a perceção subjetiva da qualidade do ar ser correta e completamente descrita pelos votos *AStV* e *ASmV*?
- A contribuição de cada um destes parâmetros é sensível à tarefa desempenhada?
- Em situações de exames finais, o resultado da perceção subjetiva da qualidade do ar é influenciado pela autoavaliação individual?

Os votos da perceção da qualidade do ar apresentados na Figura 4.2 mostram que globalmente o voto *ASmV* apresenta melhores resultados que o voto *AStV*. Não se registam valores negativos de *ASmV* enquanto no caso do *AStV*, tal já se verificou. Para além disso os valores registados de *ASmV* atingem um valor máximo de 220 (na escala de bipolar de 500) ao passo que os valores registados de *AStV* nunca ultrapassaram os 170. A interpretação deste facto é complexa e inconclusiva. Uma interpretação simples é que de facto os ambientes olfativos eram percecionados como sendo de melhor qualidade que os de renovação de ar. Mas pode também significar que, neste contexto, existe uma atitude mais severa em relação à perceção de ar viciado do que em relação à perceção da existência de cheiros. Um elemento que seguramente tem influência no resultado do voto olfativo é o tempo de exposição superior a uma hora. Em relação à hipótese de maior severidade com o ar viciado, é importante ter presente que todas as salas onde foram realizados ensaios dispunham apenas de ventilação natural, mas possuindo os ocupantes acesso às janelas e podendo facilmente abrir uma ou mais caso o desejassem. Esta constatação levanta a questão de quais são as variáveis físicas que contribuem para a

percepção do ar viciado no interior. Tal como já foi mencionado anteriormente, é importante referir que a observação direta dos comportamentos da população durante a realização dos ensaios permitiu concluir que a abertura de janelas e porta é condicionada primariamente por questões térmicas podendo o seu fecho subsequente ser condicionado por questões de ruído e ininteligibilidade da fala. Desta forma, pode antever-se que a percepção de ar viciado possa ser dependente de variáveis físicas como a temperatura e humidade do ar interior e não apenas da concentração de dióxido de carbono. Esta questão será no entanto abordada em maior detalhe adiante.

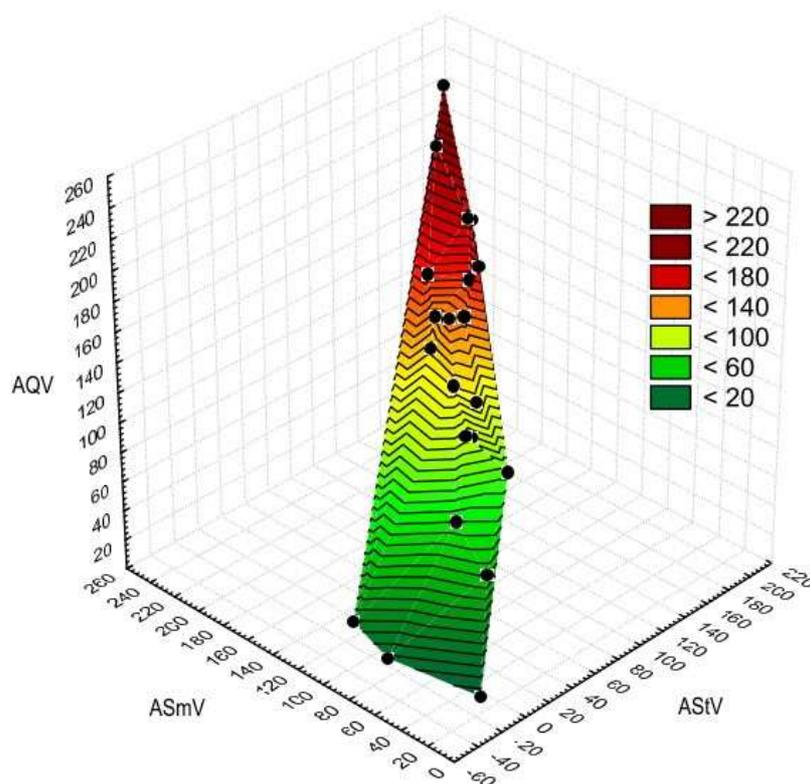


Figura 4.2 - Voto da qualidade do ar (AQV) em função dos votos de cheiros/odores (ASmV) e ar viciado/fresco (AStV).

Usando regressões lineares múltiplas, o voto de qualidade do ar (AQV) foi calculado usando como variáveis independentes os votos de ar viciado/fresco (AStV) e cheiros/odores (ASmV):

$$AQV = 0,5644 AStV + 0,5022 ASmV \quad (4.6)$$

A equação apresenta o melhor modelo de regressão linear múltipla obtido ($RMSE = 7,28$; $R^2=0,985$; $F = 3218,6$; valor $p = 9,0 \times 10^{-25}$; $\sigma = 7,765$) usando toda a informação de votações da qualidade do ar, indiscriminadamente de os resultados provirem de aulas teóricas ou exames finais. Apenas as variáveis ASmV (valor $p = 2,8 \times 10^{-11}$) e AStV (valor $p = 5,3 \times 10^{-10}$) demonstraram suficiente significância estatística para serem consideradas no modelo. A utilização de uma variável independente ou constante não revelou significância estatística suficiente para justificar a sua inclusão no modelo.

Pela análise da equação pode observar-se que a soma dos coeficientes das variáveis independentes é igual a 1 (mais precisamente 1,0666). A combinação desta observação com o elevado valor de R^2 obtido

na regressão sugere que em ambiente letivo, a percepção da qualidade do ar interior pode ser descrita como uma combinação das percepções de cheiros e ar viciado. Uma aproximação razoável sugerida pela equação (4.6) é a de que o voto de percepção da qualidade do ar corresponde a uma média aritmética das percepções de ar viciado e de cheiros.

É importante mencionar que as duas variáveis independentes são elas próprias significativamente correlacionadas ($R^2 = 0,792$), o que torna este modelo instável do ponto de vista da independência linear das variáveis. O coeficiente de determinação obtido é consistente com a forma afunilada apresentada pelo gráfico da Figura 4.2. Tal significa que, em contexto de sala de aula, os seres humanos não conseguem dissociar o ar viciado dos odores que ele transporta. Ainda assim, esta análise demonstra que a percepção subjetiva da qualidade do ar interior é pelo menos possível de ser descrita pelos dois votos considerados.

Para avaliar se a os coeficientes de regressão obtidos para a equação (4.6) são sensíveis ao tipo de tarefa desempenhada a mesma análise foi efetuada separadamente para aulas teóricas e exames finais. Os resultados estatísticos e coeficientes da equação são apresentados Equação (4.7) e na Tabela 4.3.

$$AQV = C_{AStV} \cdot AStV + C_{ASmV} \cdot ASmV \quad (4.7)$$

Tabela 4.3 - Coeficientes dos votos de Ar viciado/Ar fresco (C_{AStV}) e Cheiros/Odores (C_{ASmV}) obtidos separadamente para as situações de aulas teóricas e exames finais.

	Aulas teóricas	Exames
Ficha Estatística	$F = 1780,8$; $\text{valor-p} = 1,4 \times 10^{-16}$ $R^2 = 0,985$ $\sigma = 7,4$	$F = 9370,0$; $\text{valor-p} = 2,2 \times 10^{-9}$; $R^2 = 0,992$; $\sigma = 4,4$
C_{AStV}	0,518 ($\sigma = 0,0517$; $\text{valor-p} = 1,7 \times 10^{-7}$)	1,205 ($\sigma = 0,0124$; $\text{valor-p} = 2,2 \times 10^{-9}$)
C_{ASmV}	0,523 ($\sigma = 0,0363$; $\text{valor-p} = 2,3 \times 10^{-9}$)	0 ($\text{valor-p} = 0,156$)

A significância estatística e a ponderação dos coeficientes dos votos $AStV$ e $ASmV$ é diferente nos dois tipos de situações analisadas. Em exames finais o voto $ASmV$ deixa de possuir significância estatística e a percepção da qualidade do ar passa a ser igual ao voto de $AStV$ majorado em cerca de 20%. Outro aspeto interessante é que esta relação apresenta um coeficiente de correlação extremamente elevado e superior ao obtido para qualquer outro voto de percepção do ambiente interior.

Não é provável que neste caso seja a tarefa desempenhada a determinar o desaparecimento da percepção de cheiros no ar inteiro como variável relevante para a percepção do ar interior, mas sim as condições em que a tarefa é desempenhada. A diferença entre os dois resultados pode ser explicada pela diferença na distribuição espacial das pessoas no interior da sala entre um caso e outro.



Figura 4.3 - Ensaio de campo. À esquerda **(a)** um ensaio realizado numa aula teórica. À direita **(b)** um ensaio realizado num exame final. Ambas as figuras correspondem à mesma disciplina e aproximadamente à mesma população.

Nos exames finais, os presentes só se podem sentar nos lugares previamente designados pelo professor. A distribuição espacial adotada tem como objetivo distanciar o máximo possível os examinandos entre eles. Nas aulas teóricas os estudantes sentam-se sempre na proximidade de outros colegas. Este procedimento gera diferenças na distribuição espacial das pessoas que é patente na Figura 4.3. Em exames finais, a matriz de distribuição espacial da população é esparsa e alargada à totalidade do espaço interior disponível. Nas aulas teóricas, a matriz de distribuição espacial da população é localmente densa e concentrada apenas em alguns pólos da sala. Nesta última situação a única clareira visível no exemplo da Figura 4.3, corresponde ao espaço onde foram colocados os equipamentos de medição das grandezas físicas e que ocupam o equivalente a dois lugares sentados.

Considerando que são os seres humanos a principal fonte de odores no ar interior, a distância à fonte de odores mais próxima deverá ser neste caso um elemento-chave para a determinação da perceção da qualidade do ar interior.

A taxa de ocupação da sala (N/N_{max}) apresentada na Tabela 4.13 foi analisada como variável potencialmente relevante para a precisão do modelo. Contudo, esta variável não demonstrou significância estatística suficiente para justificar a sua inclusão como variável de correção do modelo. Nem em situações de exames finais (valor $p = 0,729$) nem em aulas teóricas (valor $p = 0,930$). Este resultado não é de todo estranho, uma vez que a taxa de ocupação da sala não descreve com rigor a distribuição espacial das pessoas. Verificam-se situações de distribuição espacial localmente densa em alguns locais no interior da sala, mas em que a taxa de ocupação verificada foi baixa. Tal acontece essencialmente em aulas teóricas onde a afluência de estudantes é bastante inferior à lotação da sala. As pessoas escolhem o seu lugar na vizinhança de outras com quem tenham maior afinidade e/ou na porção da sala que consideram melhor servir os seus propósitos de aprendizagem. Os motivos que determinam a preferência individual de um determinado lugar ou zona da sala em relação a outra não são importantes do ponto de vista desta análise. O que é um facto é que nas aulas teóricas em que a afluência de estudantes é inferior à capacidade da sala se geram algumas ilhas de elevada densidade

humana local. Tal verifica-se mesmo em salas com bastantes lugares livres e conseqüente baixa taxa de ocupação. Uma grandeza física que talvez fosse importante para este modelo é a densidade humana na vizinhança do indivíduo. Mas para a determinação de tal grandeza com base em ensaios de campo seria necessário que todos os lugares à disposição dos alunos estivessem assinalados com um código que inequivocamente determinasse a sua posição no interior da sala. Desta forma poder-se-ia avaliar de que forma a presença de outras pessoas nas imediações do indivíduo influencia a contribuição do voto de cheiros/odores para a percepção do ar interior. Tal não foi equacionado à partida no âmbito do trabalho efetuado pelo que, neste aspeto, a hipótese apresentada é inconclusiva.

Para além do efeito de distância à fonte de odores, outro efeito que deve ainda ser tido em consideração é o da capacidade de adaptação da pituitária humana aos odores. A percepção humana dos odores presentes no ar depende do tempo de exposição aos mesmos. Em situação de exposição prolongada a percepção de determinado odor presente no ar diminui ou mesmo desaparece. No contexto do presente trabalho todos os participantes foram sujeitos a uma exposição de pelo menos uma hora às condições da atmosfera no interior da sala. Há contudo uma diferença entre os ensaios realizados em contexto de aula teórica e os realizados em contexto de exame final. No primeiro caso, as aulas eram interrompidas cerca de uma hora após o seu início para que os presentes pudessem preencher os inquéritos da percepção subjetiva das condições no interior. Esta metodologia foi adotada por forma a maximizar a disponibilidade dos indivíduos presentes no interior da sala em relação ao preenchimento dos inquéritos e o cuidado no preenchimento do mesmo. Uma abordagem inicial aos ensaios de campo nestas condições permitiu concluir que, quando o preenchimento do inquérito era efetuado no final da aula, o nível de atenção com que o mesmo era abordado era inferior ao desejável. Foram recolhidos e tratados 233 inquéritos durante ensaios de campo realizados em dezembro de 2009 e janeiro de 2010 nestas condições. Uma reflexão crítica em relação à forma como estes ensaios preliminares decorreram permitiu afinar algumas estratégias em relação ao instante em que os inquéritos devem ser preenchidos, para que mereçam a total atenção de cada um dos presentes no interior da sala.

No entanto, em situação de exame final nenhum dos participantes era interrompido no decorrer da prova para não prejudicar o seu raciocínio e concentração. O preenchimento individual do inquérito da percepção subjetiva era efetuado imediatamente após a conclusão do mesmo, enquanto um dos professores vigilantes confirmam a identificação do aluno e os elementos da prova de avaliação. O tempo que demora ao aluno a preencher o inquérito é sensivelmente o mesmo que demora ao professor vigilante a confirmar a identificação, cada uma das folhas de exame e o recibo de presença na prova. No mesmo instante em que o aluno entrega ao professor o inquérito preenchido, recebe imediatamente o recibo de presença na prova de avaliação. O nível de cuidado com que os inquéritos foram preenchido em situação de exame foi idêntico ao que se registou em aulas normais. Mas o instante em que tal ocorreu foi após uma exposição de duas horas às condições do ambiente interior.

Não é possível apenas com base nos resultados obtidos retirar conclusões acerca da influência de tempos de exposição desta magnitude em relação à percepção dos odores no interior. Este é apenas um fator que terá que ser tido em consideração em trabalhos futuros neste âmbito.

Em termos de fatores que sofrem alteração de uma situação de aula normal para um exame, há ainda que ter em consideração o nível de responsabilidade em relação à tarefa desempenhada. Em ambos os casos a tarefa desempenhada apresenta elementos comuns: leitura, raciocínio e escrita. Mas no caso dos exames, os indivíduos presentes no interior da sala estão a ser avaliados em relação aos seus conhecimentos e capacidades. O nível de sucesso na avaliação é importante para a vida do estudante. Neste caso, a atividade de leitura, raciocínio e escrita está sujeita a um nível de responsabilidade imediata superior à que ocorre em aulas teóricas.

A possibilidade de a autoavaliação da *performance* influenciar a percepção da qualidade do ar foi também analisada. Baseando a análise apenas nos ensaios efetuados em situação de exame final foi eliminada a possibilidade de alunos a quem a prova tenha decorrido pior do que as suas expectativas iniciais apresentarem também uma percepção da qualidade do ar interior pior do que outros colegas mais satisfeitos com a sua prestação. Os resultados demonstram que o voto autoavaliação da *performance* (*PV*) não tem influência na percepção expressa da qualidade do ar interior. A variável *PV* não possui significância estatística embora algum nível de correlação tenha sido registado a este nível (valor $p = 0,106$; $R^2 = 0,5188$).

Ambiente Luminoso

Todos os espaços interiores analisados no âmbito dos ensaios de campo realizados possuem simultaneamente luz natural e luz artificial, embora se registem diferenças significativas em termos de área exterior de envidraçados. Os ocupantes do espaço interior possuem acesso tanto a janelas como a estores ou persianas. Nas situações de exames finais, as condições de iluminação artificial praticamente não variaram ao longo do ensaio. Contudo, em aulas teóricas as condições luminosas não são sempre constantes ao longo do ensaio. Como exemplo, menciona-se que quando é usado um projetor multimédia, frequentemente são efetuados ajustes na iluminação para permitir a visualização mais nítida possível dos conteúdos apresentados. Os ajustes efetuados mais frequentemente consistem na diminuição do nível de intensidade luminosa artificial junto à tela de projeção (e por vezes na sala inteira) e ainda no sombreamento interior de algumas janelas para eliminar efeitos do ofuscação provocada pela luz solar.

Todas as salas em que decorreram ensaios de campo possuem apenas uma fachada exterior, sendo apenas essa fachada dotada de envidraçados que possuem todos a mesma direção.

O nível de iluminação no interior da sala aquando do preenchimento dos inquéritos é semelhante ao que se regista quando não estão a ser empregues meios audiovisuais pelo docente.

De acordo com o descrito, os parâmetros de voto considerados como melhores candidatados a descreverem corretamente a percepção luminosa do ambiente interior são os votos de iluminação natural (*NLV* do inglês "*Natural Light Vote*") e de iluminação artificial (*ALV* do inglês "*Artificial Light Vote*").

Os resultados das avaliações da percepção subjetiva apresentados na Figura 4.4 mostram que a avaliação da iluminação natural merece da parte dos presentes no interior da sala um maior nível de severidade do que a iluminação artificial. Enquanto os votos *NLV* registam diversos valores médios negativos, todos os resultados registados de *ALV* foram claramente positivos. Os motivos para tal serão analisados em maior detalhe adiante neste trabalho, contudo há uma constatação que decorre da observação direta das condições no interior das salas: Enquanto as condições de iluminação artificial são relativamente constantes em todas as salas, as condições de iluminação natural variam drasticamente. Quer pela área de envidraçados exteriores e respetiva orientação, tal como pode ser constatado na Tabela 4.19, quer pela própria intensidade radiativa.

Neste contexto, o mesmo conjunto de questões pode ser colocado em relação à percepção do ambiente luminoso:

- Pode a percepção subjetiva do ambiente luminoso ser correta e completamente descrita pelos votos $AL.Vt$ e $NL.Vt$?
- A contribuição de cada um destes parâmetros é sensível à tarefa desempenhada?
- Em situações de exames finais, o resultado da percepção subjetiva do ambiente luminoso é influenciado pela autoavaliação individual?

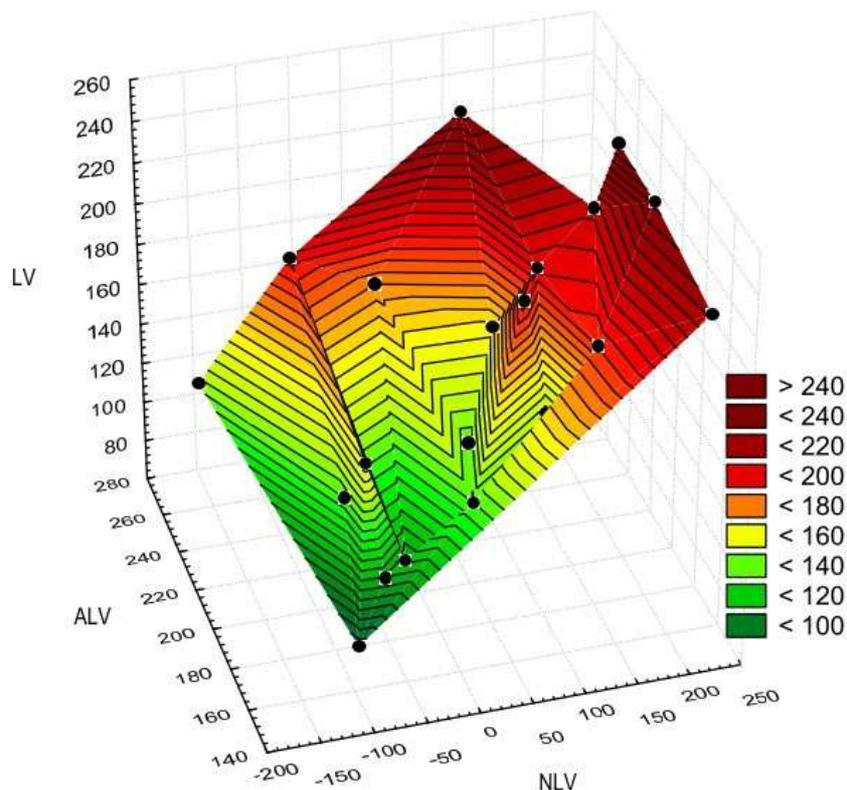


Figura 4.4 - Voto do ambiente luminoso (LV) em função dos votos de iluminação artificial (ALV) e iluminação natural (NLV).

Empregando métodos de regressão linear múltipla, a percepção do ambiente luminoso $Lu.Vt$ foi calculada usando como variáveis independentes $AL.Vt$ e $NL.Vt$:

$$Lu.Vt = 0,2455 NL.Vt + 0,7730 AL.Vt \quad (4.8)$$

A equação apresenta o melhor modelo obtido ($RMSE = 21,36$; $R^2=0,773$; $F=613,2$; valor $p = 5,5 \times 10^{-18}$; $\sigma=22,455$) usando toda a informação recolhida nos ensaios, indiscriminadamente de estes terem ocorrido em aulas teóricas (normais) ou em exames finais. Ambas as variáveis são estatisticamente significativas: $NL.Vt$ ($R^2 = 0,555$; valor $p = 9,7 \times 10^{-6}$) e $AL.Vt$ ($R^2 = 0,340$; valor $p = 2,1 \times 10^{-17}$). A utilização de um termo independente ou constante não apresenta significância estatística para a sua inclusão no modelo. As duas variáveis do modelo são linearmente independentes, não apresentando correlação entre si ($R^2 = 0,025$).

Em termos práticos isto significa que (aparentemente) os seres humanos conseguem diferenciar as contribuições relativas da luz natural e artificial para o ambiente luminoso interior. A equação obtida é também aquela que apresenta o menor coeficiente de correlação com o voto luminoso expresso,

quando comparada com as equações congêneres obtidas para os ambientes acústico e de qualidade do ar.

Observa-se para o caso do ambiente luminoso que a soma dos coeficientes de voto é 1,0185. Combinando este valor com a informação com a estatística obtida, permite afirmar que, neste contexto e em termos médios, a percepção do ambiente luminoso ($Lu.Vt$) resulta de uma média ponderada de $\frac{1}{4}$ Voto de luz natural ($NLVt$) e $\frac{3}{4}$ Voto de luz artificial ($ALVt$).

Neste contexto, é importante ainda analisar a hipótese de os coeficientes da equação (4.8) poderem ser influenciados pela contexto de sala de aula ou pela tarefa desempenhada. Para tal é necessário desagregar a informação dos ensaios realizados em aulas teóricas dos realizados em contexto de exames finais. Os resultados das análises parcelares efetuadas desta forma, são apresentados na Equação (4.9) e Tabela 4.4.

$$LV = C_{NLV} \cdot NLV + C_{ALV} \cdot ALV \quad (4.9)$$

Tabela 4.4 - Coeficientes dos votos de Luz Natural (C_{NLV}) e Luz Artificial (C_{ALV}) obtidos separadamente para as situações de aulas teóricas e exames finais.

	Aulas teóricas	Exames
Ficha Estatística	$F = 432,7$; $valor-p = 1,3 \times 10^{-12}$ $R^2 = 0,774$ $\sigma = 20,4$	$F = 160,9$; $valor-p = 1,5 \times 10^{-4}$ $R^2 = 0,384$; $\sigma = 28,4$
C_{NLV}	0,213 ($\sigma = 0,0455$; $valor-p = 4,4 \times 10^{-4}$)	0,286 ($\sigma = 0,1032$; $valor-p = 5,0 \times 10^{-2}$)
C_{ALV}	0,758 ($\sigma = 0,0276$; $valor-p = 6,7 \times 10^{-13}$)	0,791 ($\sigma = 0,0680$; $valor-p = 3,5 \times 10^{-4}$)

A análise da hipótese considerada permite concluir que não há suficiente evidência estatística de que os coeficientes obtidos para a equação da percepção do ambiente luminoso dependam da tarefa efetuada em contexto de sala de aula (considerando um nível de confiança de 95%).

É importante realçar que as duas tarefas desempenhadas no mesmo ambiente interior apresentam algumas semelhanças já que ambos os casos envolvem situações de leitura e escrita. Mas, enquanto nas aulas teóricas a leitura é efetuada em dois planos diferentes: o plano de trabalho horizontal da secretária e o plano vertical do quadro e da tela de projeção, nos exames final a leitura é apenas efetuada ao nível do plano de trabalho. Também a utilização de meios multimédia envolvendo a projeção de imagens e texto numa tela é um fator diferenciador de ambos os casos. Combinando toda a informação apresentada, não é possível afirmar perentoriamente que a ponderação atribuída pelos seres humanos às componentes de luz natural e luz artificial seja independente da tarefa desempenhada.

É ainda relevante ponderar a possibilidade de os resultados da percepção subjetiva do ambiente luminoso poderem ser afetados pela autoavaliação da performance individual. Centrando esta análise apenas nos ensaios realizados em exames finais, assume-se como hipótese que os alunos a quem a prova tenha decorrido pior do que as suas expectativas prévias à entrada, também percecionem o ambiente luminoso de forma mais negativa do que outros colegas mais satisfeitos com a sua prestação individual. Os resultados mostram que o voto de autoavaliação da performance (PV) não tem nem significância estatística nem correlação com a percepção expressa do ambiente luminoso ($valor p = 0,087$; $R^2 = 0,004$). A capacidade de avaliação do ambiente interior em sala de aula não é afetada pela performance individual na tarefa desempenhada.

Ambiente Térmico

Contudo, neste ponto, a análise do voto térmico apresenta duas contribuições importante: Como referência para assegurar que a estrutura das escalas de voto foi inteiramente compreendida e devidamente respondida pelos ocupantes do espaço interior.

Esta análise, é possível de ser realizada devido à existência de dados objetivos das grandezas físicas permitindo o cálculo de índices de conforto térmico. Como foi mencionado anteriormente, os valores da temperatura efetiva (ET), voto térmico médio previsível (*Th.PMV*) e percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente térmico (*Th.PPD*) foram monitorizados e adquiridos ao longo dos ensaios em intervalos regulares de um minuto. Verificou-se que os resultados dos votos do ambiente térmico apresentam consistência com os valores adquiridos e ainda com os modelos térmicos PMV-PPD (ISO 7730, 2005) e de conforto térmico adaptativo (EN 15251, 2007).

Permite-se assim concluir que a estrutura da escala de voto térmico, bem como as respetivas legendas de apoio, não só foram bem compreendidas pelos participantes nos ensaios como produziram resultados consistentes com os normas internacionais de conforto térmico aplicáveis. As escalas de avaliação da perceção subjetiva em relação aos demais ambientes possuem a mesma estrutura e grafismo que os usados para o conforto térmico. Há ainda que ter em consideração que a escala de conforto térmico é a que aparece em primeiro lugar na ordem de preenchimento do inquérito. É portanto razoável assumir que, se a primeira escala de votação foi bem compreendida e adequadamente preenchida pelos inquiridos, as restantes dez também o tenham sido.

Perceção global do ambiente interior

A previsão da perceção humana de um ambiente interior a partir dos votos parcelares dos diversos ambientes é um desígnio há muito perseguido e também um dos objetivos do presente trabalho. Há contudo um claro revés ao tentar usar os resultados das perceções térmica, acústica, luminosa e de qualidade do ar para prever a perceção do ambiente interior no seu global: A escala de avaliação da perceção do conforto térmico é diferente das restantes.

As escalas usadas para a avaliação dos ambientes acústico, luminoso e de qualidade do ar são unipolares, permitindo a conversão de avaliações qualitativas desde "*Péssimo*" até "*Excecional*" num valor numérico compreendido entre -500 e +500. Estas escalas traduzem a forma natural como os seres humanos avaliam estímulos ambientais que estejam diretamente relacionados com os seus sentidos primários tais como a audição, visão e olfato. O valor ótimo para cada uma destas avaliações está localizado à direita na escala, dentro da zona identificada como "*Excecional*" e corresponde a valor numérico de +500.

A escala usada para avaliação da perceção do conforto térmico é bipolar possuindo o respetivo valor ótimo exatamente ao centro e dentro da zona identificada como "*Confortável*" ou por vezes também designada na literatura por "*Neutro*". Estando colocado exatamente no centro da escala de voto, o respetivo valor numérico correspondente é zero (0).

A avaliação da perceção subjetiva do ambiente térmico foi efetuada usando a escala bipolar contínua, com esbatidos de cor, apresentada na Figura 4.5. O grafismo e estrutura de construção das escalas de voto foi semelhante para os diversos componentes considerados do ambiente interior.

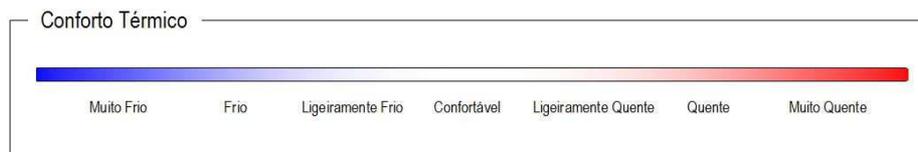


Figura 4.5 - Escala de votação do ambiente térmico

No entanto, o ambiente térmico (e respetiva escala de voto) apresenta diferenças significativas relativamente aos outros três. Desde logo porque o ambiente é diretamente caracterizado por uma única escala de voto. Para os restantes ambientes foi considerado que os seres humanos seriam capazes de diferenciar pelo menos duas componentes independentes para cada um dos ambientes, pelo que são apresentadas três escalas de voto para cada. Para além disso, a escala de voto do ambiente térmico é bipolar com o valor ótimo localizado no centro da escala (correspondente ao valor zero) enquanto as restantes escalas de voto são unipolares com os valores ótimos localizados à direita (correspondentes ao valor +500). Desta forma, não é possível efetuar uma análise de ponderações de voto em função de componentes elementares para o voto térmico.

Desta forma, a utilização direta dos resultados expressos nas escalas de voto consideradas resultaria numa distorção das ponderações atribuídas ao ambiente térmico em relação aos demais três ambientes considerados. Ainda assim, é importante perceber se é possível através de modelo linear combinar a informação resultante dos inquéritos de avaliação das perceções subjetivas para estimar a perceção do ambiente interior no seu todo. Usando métodos de regressões lineares múltiplas, observa-se que nenhuma das quatro variáveis de voto apresenta significância estatística suficiente para justificar a sua inclusão em tal modelo (*ThV*: valor $p = 0,2265$; *AcV*: valor $p = 0,0794$; *AQV*: valor $p = 0,0753$ e *LuV*: valor $p = 0,0840$). A observação dos resultados obtidos permite ainda concluir que as significâncias estatísticas das perceções acústica, luminosa e de qualidade do ar apresentam uma ordem de grandeza semelhante e relativamente próxima do valor limite usualmente considerado para o parâmetro em causa. Já no caso do resultado da perceção de conforto térmico, a significância apresentada possui uma magnitude cerca de três vezes pior do que a dos restantes ambientes considerados. Este resultado é também indubitavelmente produzido pelo facto de se estarem a comparar avaliações efetuadas tendo como base escalas diferentes.

Neste ponto, considere-se ainda a hipótese de o voto global de avaliação do ambiente interior resultar de uma combinação linear dos votos dos ambientes interiores relevantes. A análise estatística dos votos, tal e qual como eles resultam das escalas empregues para a expressão das perceções subjetivas, mostra que, enquanto os votos acústico, de qualidade do ar e luminoso apresentam valores p concordantes entre si e iguais a 0,08 (considerando valores arredondados à segunda casa decimal). O voto de conforto térmico apresenta um valor p igual a 0,23. As escalas de voto dos ambientes acústico, luminoso e de qualidade do ar são unipolares e iguais entre si. A escala de voto do conforto térmico é diferente das demais, sendo bipolar e simétrica. Considere-se um voto -10 na escala de mil pontos empregue para o ambiente acústico. Este voto expressa uma perceção humana que se encontra no limite superior do "*ligeiramente mau*". Já para o ambiente térmico, o mesmo voto de -10 exprime, na mesma escala de mil pontos empregue, uma perceção de termicamente "*confortável*".

Conclui-se que a única forma de criar um índice global da qualidade do ambiente interior, com significado físico e em função dos ambientes sujeitos à percepção humana é usando escalas de voto equivalentes para todos os ambientes.

Esta conclusão levanta um problema em relação ao conforto térmico: Foi empregue uma escala bipolar porque essa é a forma natural pela qual os seres humanos definem a sua sensação térmica e a traduzem de forma qualitativa. Esta escala de sete classes de conforto térmico proposta por McIntyre (McIntyre, 1978) tem sido abundantemente usada em estudos de conforto térmico, com enorme sucesso.

É, contudo, possível efetuar uma tradução qualitativa direta de classes da escala "Muito frio/Muito quente" de McIntyre em classes da escala unipolar "Péssimo/Excepcional". Do ponto de vista gráfico essa conversão é apresentada na Figura 4.6. A escala de McIntyre é "dobrada ao meio" rebatendo um extremo sobre o outro. Ambos os extremos "Muito frio" e "Muito quente" com são ajustados à classe "Péssimo" da escala unipolar. Um procedimento semelhante é adotado para as demais classes da escala com exceção da classe "Confortável".

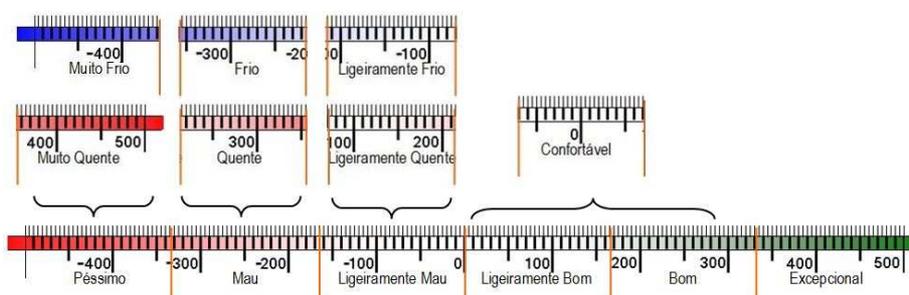


Figura 4.6 - Conversão da escala de voto térmico bipolar para escala unipolar qualitativa

Matematicamente, esta transformada de conversão dos votos térmicos é representada por:

$$CTh.Vt = -500 + \frac{7}{6} \left(500 - \sqrt{Th.Vt^2} \right) \Leftrightarrow |Th.Vt| \geq \frac{500}{7} \quad (4.10)$$

sendo:

$CTh.Vt$ - Voto térmico convertido para a escala unipolar de [-500;500] e 6 classes

$Th.Vt$ - Voto térmico na escala bipolar de [-500;500] e 7 classes

O domínio de validade da transformada de conversão exclui os votos médios na classe "Confortável".

A conversão dos votos térmicos na classe "Confortável" envolve um nível de complexidade superior. Desde logo, decorrente das interpretações que possam ser feitas em relação ao significado de "Confortável". Esta expressão pode significar que o indivíduo se encontra "Apenas ligeiramente confortável". Pode também significar que se encontra "Convictamente confortável" sem qualquer margem para dúvidas ou ainda "Excepcionalmente confortável".

Conclui-se portanto que esta escala bipolar de conforto térmico não apresenta o nível de detalhe desejável no patamar de conforto. As escalas unipolares empregues para os demais ambientes interiores (exceto a da avaliação global) possuem a este nível, uma resolução sete vezes (7 X) superior à da escala térmica.

Tal como numa fotografia, é possível transformar diretamente uma imagem de elevada resolução numa com resolução inferior. É contudo mais complicado ampliar uma imagem com baixa definição sem criar ruído ou distorção.

Um método possível para a conversão do voto pretendida é o descrito pela equação (4.11). Consiste em ampliar a escala do voto bipolar na classe de conforto em função da distância do voto expresso em relação ao ponto central da escala. O valor máximo do voto convertido é ajustado para o máximo da escala (+500) e em função da distância ao zero da escala bipolar o voto térmico é convertido para a escala unipolar.

$$CTh.Vt = 500 - 7\sqrt{Th.Vt^2} \Leftrightarrow -\frac{500}{7} < Th.Vt < \frac{500}{7} \quad (4.11)$$

Esta transformada de conversão do voto na escala bipolar para a escala unipolar merece algumas considerações. No momento do preenchimento dos inquéritos, é explicado aos participantes que todas as escalas de voto são contínuas, pelo que o voto pode ser colocado em qualquer ponto da escala. Contudo, no momento da votação não são visíveis para os participantes, nem a régua graduada usada para a leitura do voto expresso, nem os limites de cada uma das classes. As referências que os participantes possuem para se guiar são o *degradé* de cores que se encontra centrado no meio da escala de voto e a palavra "Confortável" que também ela se encontra centrada no meio da classe que designa e totalmente contida dentro da mesma. Assumindo que um indivíduo que se encontra a preencher o inquérito da perceção subjetiva do conforto térmico pretende colocar o seu voto exatamente no ponto central da escala, não é líquido que o consiga fazer embora o erro cometido deva ser inferior a ± 15 . A escala de voto térmico foi concebida para permitir um rápido preenchimento da mesma combinando o detalhe das informações auxiliares com um grafismo intuitivo que permita a imediata assimilação do seu objetivo. Não foi concebida para proporcionar o nível de detalhe que se veio a revelar necessário ao nível do voto de conforto. Também do ponto de vista da leitura do voto expresso, a resolução da régua de leitura é $\pm 5/500$, pelo que apenas a amplificação de um valor desta magnitude usando a transformada da equação (4.11) resulta numa incerteza da ordem de $\pm 35/500$.

A transformada de conversão do voto térmico levanta ainda outra questão: a da existência de um voto limite superior para as escalas unipolares de cada um dos ambientes interiores considerados nestas circunstâncias. Verificou-se na prática que estando os votos positivos das escalas unipolares dos ambientes acústico, luminoso e de qualidade do ar desagregados nas classes "*Ligeiramente bom*", "*Bom*" e "*Excecional*", nunca foi registado um voto médio na classe "Excecional" para nenhum dos ambientes interiores considerados. Os melhores resultados obtidos para cada um destes votos médios foram: 229 para o ambiente acústico, 232 para a qualidade do ar e 242 para o ambiente luminoso. A fronteira inferior da classe "Excecional" para cada um destes ambientes é 333,3.

Pode questionar-se se faz sentido a existência da classe "Excecional" admitindo-se como hipótese que nestas condições de ensaios nunca se venha a registar um voto médio nesta classe. É necessário no entanto ter em conta que cada voto médio corresponde a uma curva de distribuição de votos. E embora não tenha sido registado nenhum valor médio na classe "Excecional" foram registadas diversas avaliações individuais da perceção subjetiva dentro da classe "Excecional" e inclusivamente algumas no limite superior da escala de voto (+500). Como tal, faz todo o sentido que, mesmo nestas condições de ensaio exista uma classe de voto "Excecional".

O facto de não se ter registado nenhum valor de avaliação da percepção subjetiva acima de 242 não implica por si só a existência de um valor limite para o voto médio expresso nas escalas unipolares.

Mas considere-se, por exemplo, o voto da percepção subjetiva relativa ao ambiente luminoso. Todas as salas possuem uma iluminação artificial adequada. Os quadros dispõem de iluminação dedicada que permite anular alguns dos reflexos interiores. As lâmpadas de teto podem ser ligadas parcialmente (0 - 50 - 100%) permitindo desta forma algum nível de controlo sobre a intensidade luminosa resultante da luz artificial. Algumas das salas possuem grandes áreas de envidraçados. Neste caso, tal como no da iluminação artificial, nem sempre uma elevada intensidade luminosa é desejável. Pode resultar em dificuldade na leitura do quadro ou dos conteúdos multimédia que estejam a ser projetados na tela. Mas também ao nível da luz natural é possível ao utilizador controlar a sua entrada e eventuais fenómenos de ofuscação que dela resultem, através de cortinas ou estores. Ora, sabendo que aos utilizadores, pelo menos em algumas das salas de ensaio, são proporcionadas boas condições tanto de luz natural como de luz artificial, bem como um razoável nível de controlo de ambas. Sabendo ainda que se registaram diversos ensaios em que não houve necessidade por parte dos utilizadores de recorrer à iluminação artificial, para além da luz do quadro. Seria expectável que pelo menos em ensaios onde a luz artificial não foi sequer ligada por não haver essa necessidade e a luz natural abundante mas não ofuscante, o voto luminoso médio pudesse pelo menos estar próximo da fronteira do "Excelente". Mas tal nunca se verificou. O ambiente luminoso foi considerado como exemplo porque é aquele que permite aos utilizadores presentes no interior da sala um maior nível de controlo e regulação das variáveis ambientais.

Em que condições se registará então a ocorrência de um voto médio "Excepcional"?

Do ponto de vista do significado da palavra "Excepcional" apresenta como sinónimos "Ótimo, Muito bom, Perfeito; Distinto ou Único ". Todos estes adjetivos qualificam situações que podem ser consideradas de exceção ou acima da normalidade. Como tal, é perfeitamente possível que a classificação "Excepcional" seja interpretada como algo a atribuir apenas a um ambiente que suplante as expectativas da pessoa. Neste âmbito, é importante mencionar ainda que as populações participantes no estudo se encontram familiarizadas com as salas em que foram realizados os ensaios, uma vez diariamente têm várias horas de contacto com os edifícios em que foram realizados os ensaios e pelo menos uma vez por semana assistem a uma aula de duas horas nessa sala. As populações participantes nos ensaios encontram-se profundamente familiarizadas com os ambientes em relação aos quais foram inquiridas. É portanto razoável considerar que nestas condições e em termos médios para a população considerada, a percepção de um determinado ambiente não suplante as expectativas.

Uma outra hipótese que se considera poder proporcionar esse resultado é uma transição de um ambiente percecionado como negativo para outro com condições muito boas ao mesmo nível. Ainda assim, é possível que exista algum fator de adaptação ao ambiente percecionado como melhor, pelo que a variável tempo de exposição pode ser relevante a este nível.

Considerando então que nestas condições de ensaio e para as populações em causa existe um valor limite superior para o voto da percepção subjetiva de cada ambiente (V_{lim}), a transformada de conversão do voto térmico na escala bipolar para a escala unipolar resulta em:

$$CTh.Vt = \begin{cases} V_{t\lim} \left(1 - \frac{7}{500} |Th.Vt| \right) & \Leftarrow 0 \leq |Th.Vt| < \frac{500}{7} \\ -500 + \frac{7}{6} (500 - |Th.Vt|) & \Leftarrow \frac{500}{7} \leq |Th.Vt| \leq 500 \end{cases} \quad (4.12)$$

Mesmo assumindo a existência de um valor limite para o voto térmico nestas condições como perfeitamente razoável, é bem mais complexo determinar o seu valor de forma precisa.

A análise das percentagens de insatisfeitos com cada um dos ambientes interiores considerados, apresentada em mais detalhe adiante nesta obra, veio permitir estimar um voto limite médio do ambiente térmico de aproximadamente 230. Não é possível afirmar com rigor que o valor seja exatamente este, mas efetuando uma análise de sensibilidade verifica-se que oscilações deste valor dentro de um intervalo razoável proporcionam ainda assim resultados de percentagens previsíveis de insatisfeitos na zona de conforto consistentes com as obtidas para os demais ambientes interiores.

Convertido o voto da percepção térmica para a escala unipolar de seis classes, encontram-se os quatro votos das percepções subjetivas expressos em escalas iguais e exibindo comportamentos idênticos de percentagens de insatisfeitos e desvios-padrão das votações. É neste ponto possível efetuar uma nova avaliação da forma como as várias percepções subjetivas interagem e se combinam para determinar a avaliação global do ambiente interior.

Considere-se a hipótese de o voto de avaliação global do ambiente poder ser obtido por uma combinação das percepções subjetivas dos quatro ambientes em conjugação com uma constante arbitrária. A análise estatística das cinco variáveis independentes consideradas nestas circunstâncias permite concluir que o único voto significativo para o índice global do ambiente interior é o da qualidade do ar interior (AQ.Vt). Para além das significâncias foram também determinadas as correlações entre os vários votos e de cada um destes com o voto de avaliação global do ambiente interior. Os resultados são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Análise estatística dos votos que contribuem para avaliação global do ambiente interior. "Const." designa a inclusão de uma constante no modelo.

	CTh.Vt	Ac.Vt	AQ.Vt	Lu.Vt	Const.
Valor p	0,113	0,081	0,013	0,060	0,854

Valores de R^2 entre variáveis de voto:

	CTh.Vt	Ac.Vt	AQ.Vt	Lu.Vt	IE.Vt
CTh.Vt	1	0,03	0,43	0,02	0,37
Ac.Vt	0,03	1	0,34	0,31	0,46
AQ.Vt	0,43	0,34	1	0,33	0,80
Lu.Vt	0,02	0,31	0,33	1	0,45
IE.Vt	0,37	0,46	0,80	0,45	1

Para além da elevada correlação existente entre a perceção da qualidade do ar e a avaliação global do ambiente interior verifica-se também que esta é a única variável que aparenta possuir significância estatística para a determinação do voto de avaliação global do ambiente interior.

Contudo, ao contrário do que poderia transparecer numa primeira análise, faz sentido que a perceção da qualidade do ar não seja considerada para a determinação da perceção subjetiva do ambiente interior. A sobreposição registada entre "qualidade do ar interior" e "qualidade do ambiente interior" é apenas um dos motivos que suporta esta conclusão. Adiante neste capítulo, esta análise é discutida em maior detalhe a relevância da perceção da qualidade do ar para o índice global que se pretende construir.

Neste ponto, há contudo uma observação que decorre dos ensaios efetuados. No caso do ar interior registaram-se concentrações de dióxido de carbono acima das 4000 ppm sem que a população no interior da sala tivesse uma perceção clara de que o ar se encontrava viciado. Para a maioria dos ambientes considerados, a avaliação da perceção subjetiva é a métrica da qualidade do mesmo ambiente. Tal ocorre para os ambientes térmicos, acústico e luminoso, mas não se verifica para a qualidade do ar interior.

Tabela 4.6 - Estatística dos votos que constituem o modelo de avaliação global do ambiente interior em função das perceções subjetivas.

	CTh.Vt	Ac.Vt	Lu.Vt
Valor p	$2,0 \times 10^{-4}$	$6,9 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-4}$

Valores de R^2 entre variáveis de voto:

	CTh.Vt	Ac.Vt	Lu.Vt	IE.Vt
CTh.Vt	1,000	0,029	0,022	0,368
Ac.Vt	0,029	1,000	0,307	0,457
Lu.Vt	0,022	0,307	1,000	0,452
IE.Vt	0,368	0,457	0,452	1,000

A eliminação do voto de perceção da qualidade do ar interior das variáveis independentes do modelo, provoca uma alteração no número de graus de liberdade dos denominador e numerador da distribuição F que acarreta a alteração do valor p apresentado na Tabela 4.6 e associado às as demais variáveis independentes. Nestas condições, os votos das perceções subjetivas térmica, acústica e luminosa passam a ser estatisticamente significativos para a determinação do voto global de qualidade do ambiente interior.

Aplicando uma análise de regressão linear múltipla nestas condições, obtêm-se o modelo linear apresentado na Equação (4.13).

$$IE.PMV = 0,24 CTh.PMV + 0,39 Ac.PMV + 0,40 Lu.PMV \quad (4.13)$$

O modelo linear obtido desta forma, possui um nível de ajustamento da perceção global do ambiente interior caracterizado por um $RMSE = 20,9$ sendo que 81% da variância da perceção global do ambiente interior consegue ser explicada pela combinação linear das variáveis apresentada ($R^2 = 0,81$). A comparação gráfica dos valores reais expressos para o voto global do ambiente interior com o voto médio previsível respetivo é apresentada na Figura 4.7.

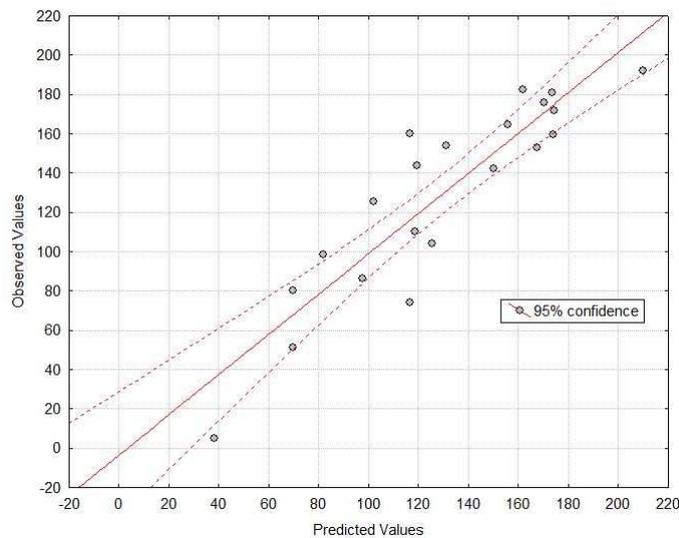


Figura 4.7 - Nível de ajustamento entre os valores observados do voto de percepção global do ambiente interior e os valores previstos com base no modelo linear múltiplo.

O bom nível de ajustamento proporcionado pela simples combinação linear das três variáveis de percepção subjetivas consideradas, evidencia que um índice global da percepção de qualidade do ambiente interior possui uma componente linear muito significativa. Há contudo que equacionar a hipótese de uma ou mais das variáveis independentes consideradas poder contribuir para a percepção global de forma não linear. Para tal foram usados métodos estatísticos de redes neuronais artificiais.

Redes Neuronais Artificiais

Considerando os valores das percepções subjetivas, tal como foram lidos a partir das escalas de voto, foram usados métodos de redes neuronais artificiais para a determinação do índice global da percepção de qualidade do ambiente interior. Foi usada a seguinte metodologia de separação aleatória dos dados para o treino, teste e validação das redes obtidas:

Treino 70% da amostra com *performance* = 0,967128

Teste 15% da amostra com *performance* = 0,999729

Validação 15% da amostra com *performance* = 1,000000

Foram geradas e treinadas 5000 redes neuronais artificiais usando o software *Statistica Neural Networks*. A rede com a melhor *performance* global é uma MLP 3-7-1.

Para a obtenção das redes foi usado um algoritmo de treino BFGS (ou Quasi-Newton) que é considerado um algoritmo de treino de convergência rápida, mas como elevados requisitos de memória do sistema pela necessidade de armazenamento da matriz Hessiana. No caso da rede MLP 3-7-1 referida, a convergência dos pesos e desvios foi obtida ao fim de 39 ciclos. A função de erro usada foi de soma dos erros quadráticos ou SOS (do termo inglês "*sum of squares*"). A referida rede possui ainda como funções de activação: Tanh para a camada oculta e Exponencial para a camada de saída.

Os resultados proporcionados por esta rede neuronal são apresentados na Figura 4.8.

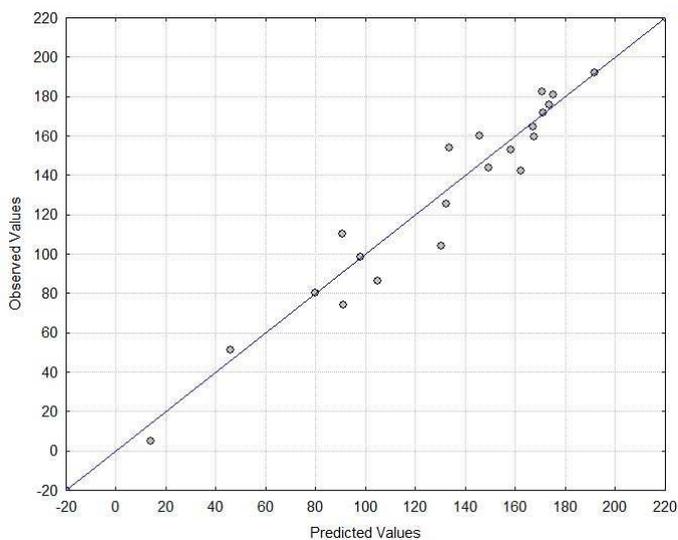


Figura 4.8 - Performance de ajustamento do modelo neuronal obtido para o índice global da percepção de qualidade do ambiente interior.

A Rede neuronal artificial obtida proporciona um nível de erro muito satisfatório. O valor de $RMSE = 12,2$ tendo em consideração que a amplitude da escala é 1000). O coeficiente de determinação entre os vectores dos votos expressos e dos resultados proporcionados pela rede MLP possui um valor elevado ($R^2 = 0,94$).

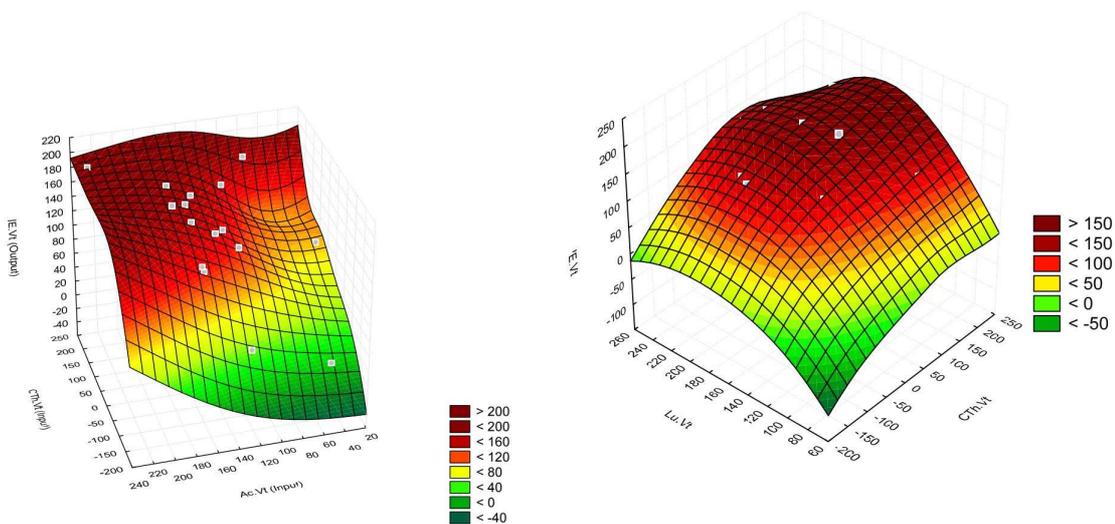


Figura 4.9 - Resultados do voto médio previsível para o ambiente interior (global) proporcionados pela RNN em função das várias contribuições e comparados com resultados experimentais. À esquerda são apresentadas as contribuições das percepções acústica e térmica (convertida para escala unipolar). À direita são apresentadas as contribuições da percepção luminosa e térmica convertida.

Conclusões do capítulo

Num contexto de sala de aula, o resultado da percepção do ambiente acústico pode ser descrito pela combinação linear das percepções de ruído no interior e exterior da sala. Também a percepção do ambiente luminoso pode ser descrita pela combinação linear das percepções de iluminações natural e artificial. Quanto à percepção da qualidade do ar interior, o cenário muda ligeiramente de figura. Embora ela possa ser descrita de forma rigorosa pela combinação linear das percepções de ar fresco/viciado e cheiros/odores, estas duas variáveis não são absolutamente independentes uma da outra. Existe um nível não negligenciável de correlação entre ambas. Tal decorre muito provavelmente do facto de o dióxido de carbono ser inodoro, ocorrendo a sua identificação de forma indireta através dos odores associados ao metabolismo humano. Verificou-se ainda que a ponderação atribuída pelos seres humanos à percepção subjetiva de cheiros/odores depende da distância à fonte. Num contexto de distribuição espacial densa, de seres humanos, os votos de cheiros/odores e ar viciado/fresco contribuem de igual forma para o voto de percepção da qualidade do ar interior. Ao invés, num contexto de distribuição espacial esparsa de seres humanos, o voto de cheiros/odores passa a ser irrelevante, sendo a percepção da qualidade unicamente dependente da percepção de ar viciado/fresco. É possível que as contribuições relativas das percepções de cheiros/odores e ar fresco/viciado para a percepção da qualidade do ar interior sejam dependentes do binómio (intensidade dos odores, tempo de exposição), sendo a intensidade função da distância à(s) fonte(s) de produção de odores. Não é possível no âmbito do trabalho realizado retirar conclusões que permitam um maior nível de detalhe em relação a esta hipótese, uma vez que todos os ensaios realizados corresponderam a tempos de exposição longos e numa situação de carga ascendente das concentrações de dióxido de carbono ao longo do decurso do ensaio resultante da geração metabólica deste gás pelos presentes no interior da sala e do nível de ventilação da mesma.

O estado de espírito individual não influencia nenhuma das percepções subjetivas relativas aos ambientes acústico, luminoso e de qualidade do ar. Tão pouco a avaliação global do ambiente interior no seu todo é afetada pelo estado de espírito individual.

A escala de voto usada para o voto térmico (escala de McIntyre de sete classes) não possui na classe de conforto um nível de detalhe semelhante ao proporcionado pelas escala unipolares de seis classes. Comparando as duas escalas para os valores correspondentes à zona de conforto verifica-se que geometricamente a escala unipolar proporciona um nível de detalhe 7x superior ao da escala bipolar, embora a escala unipolar apresente como limitação o facto de não indicar qual a natureza térmica dos desvios em relação ao ótimo (calor ou frio).

O voto da avaliação global do ambiente interior não pode ser determinado usando combinações lineares dos votos térmico, acústico, luminoso e de qualidade do ar, obtidos diretamente a partir das escalas de voto usadas. Verificou-se no entanto que convertendo o voto térmico da escala bipolar usada para uma escala unipolar semelhante à das outras três variáveis de percepção subjetiva independentes, passa a ser possível obter a contribuição individual e independente das várias percepções subjetivas para o índice global da percepção subjetiva da qualidade do ambiente interior.

Constatou-se que a soma das contribuições lineares e independentes dos três ambientes interiores (Térmico, Acústico e Luminoso) para a percepção global do ambiente interior é muito significativa: 81% da variância da percepção global do ambiente interior é explicada pelas contribuições lineares e independentes.

Há componentes do índice global não lineares e dependentes das percepções combinadas de mais do que um ambiente interior com ponderações relativas distintas. Entrando em linha de conta com todas as contribuições lineares e não lineares, mediante a utilização de redes neuronais artificiais, verifica-se que 94% da variância da percepção global do ambiente interior é explicada pela contribuição dos três ambientes interiores considerados: Térmico, Acústico e Luminoso.

Em todo o caso, em ensaios futuros a realizar brevemente, será possível aumentar o nível de rigor dos valores apresentados, procedendo a algumas alterações na metodologia de avaliação subjetiva do conforto térmico. Para permitir a rigorosa determinação da componente independente de cada ambiente interior para o índice global, as escalas de voto usadas para todas as variáveis independentes devem possuir a mesma estrutura (unipolar ou bipolar), o mesmo número de classes e equivalência qualitativa entre classes.

Há um outro facto que importa salientar. Considerando apenas as contribuições lineares e independentes das percepções subjetivas e efetuando uma análise de sensibilidade à contribuição do ambiente térmico para a avaliação global, verifica-se que este valor é da ordem de 25%. Mas, efetuando agora uma análise de sensibilidade global da contribuição do ambiente térmico para a avaliação global do modelo obtido usando redes neuronais artificiais, verifica-se que este valor sobe para 50%.

Este facto é suportado pelo que foi mencionado no Capítulo 2 e constatado por diversos autores: A percepção da qualidade do ar interior é influenciada maioritariamente por grandezas objetivas da esfera do ambiente térmico, como sejam a temperatura e a humidade do ar.

Há que ter em consideração que o valor obtido tendo em conta as contribuições lineares e independentes resulta da transformada da escala bipolar de voto térmico em escala unipolar. O que para os votos obtidos na zona de conforto se traduz numa ampliação efetiva de 3,22 considerando o voto limite usado de 230. Como tal, as contribuições relativas lineares independentes e não lineares de cada um dos ambientes para o índice global poderão sofrer ligeiras correções ao serem efetuadas as correções propostas às escalas de voto térmico em ensaios futuros.

Percentagem Previsível de Insatisfeitos

A percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico é função direta do voto térmico médio, expresso pelos presentes num determinado espaço interior e sujeitos aos mesmos ambiente térmico e níveis de vestuário e atividade metabólica. A equação proposta por Fanger (Fanger, 1970) foi adotada como *standard* internacional (ISO 7730, 2005).

$$Th.PPD = 1 - 0,95 \times e^{(-4,3455 \times 10^{-11} ThPMV^4 - 7,8444 \times 10^{-6} ThPMV^2)} \quad (4.14)$$

Sendo:

Th.PPD — Percentagem prevista de insatisfeitos com o ambiente térmico ($0 \leq ThPPD < 1$)

Th.PMV — Voto térmico médio previsível expresso numa escala [-500 ; +500]

A percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico foi calculada para cada ensaio de acordo com o conjunto de regras de agregação de resultados definidos para a escala térmica. Os valores obtidos são comparados com o valor previsto na Figura 4.10.

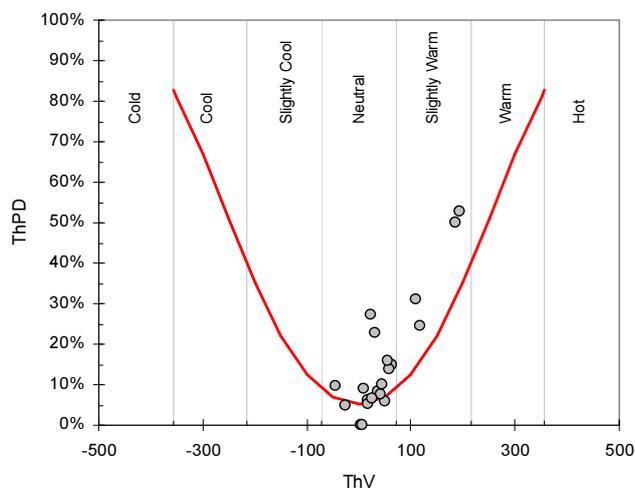


Figura 4.10 - Percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico (*Th.PD*) registada nos ensaios. A linha assinala o valor *Th.PPD* calculado de acordo com a norma (ISO 7730, 2005) e apresentado na equação (4.14).

Efetuada uma comparação entre os resultados experimentais obtidos e os previstos pelo modelo *ThPMV-ThPPD* verifica-se a existência de um elevado coeficiente de correlação ($R^2 = 0,8080$), mas também de uma Raiz do Erro Quadrático Médio elevada ($RMSE = 10,08\%$). Globalmente pode considerar-se que os resultados obtidos para a percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico apresentam boa consistência com o modelo *ThPMV-ThPPD*.

Neste ponto, foi assumindo como hipótese que, tal como se verifica para o caso do ambiente térmico, também para os demais ambientes, é possível estabelecer uma relação unívoca entre o voto médio e a

percentagem de insatisfeitos respectiva. Efectuando uma análise aos resultados obtidos, é possível retirar algumas conclusões:

- O comportamento das percentagens de insatisfeitos com os ambientes Acústico, de Qualidade do Ar e Luminoso em função dos respetivos votos médios é semelhante. A semelhança de comportamento é patente na Figura 4.11. Globalmente, verifica-se um decaimento da percentagem de insatisfeitos com o voto médio na faixa de ambientes considerados "Ligeiramente Bom". A percentagem de insatisfeitos tende para um valor nulo ou residual a partir de um determinado valor que se situa na zona superior da faixa "Ligeiramente Bom" ou eventualmente na fronteira entre esta faixa e a que se encontra imediatamente acima dela.
- O valor residual ou valor-limite da percentagem de insatisfeitos para qualquer um dos ambientes considerados pode eventualmente ser não nulo, mas será previsivelmente inferior ao valor de 5% proposto pelo modelo *ThPMV-ThPPD*, aplicável ao ambiente térmico.

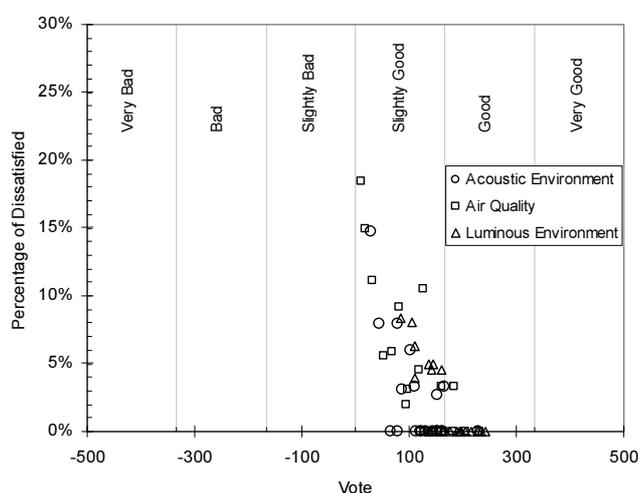


Figura 4.11 - Percentagens de insatisfeitos com os ambientes Acústico, Luminoso e de Qualidade do ambiente interior expressas em função dos respetivos votos da perceção do ambiente interior.

A percentagem de insatisfeitos com o Ambiente Interior no seu todo (avaliação global) não pode ser incluída na figura anterior. Tal como foi mencionado anteriormente, o voto correspondente à perceção do ambiente interior no seu todo possui um conjunto de regras de agregação de resultados diferente dos usados para os restantes ambientes, pelo facto de a escala de voto se encontrar dividida em cinco classes e possuir uma classe "Neutra" entre os votos das perceções "Boa" e "Má". A percentagem de insatisfeitos com o Ambiente Interior (no global) em função do voto do Ambiente Interior (global) é apresentada na Figura 4.12. Apesar de a agregação de resultados para contabilização das percentagens de insatisfeitos ser ligeiramente diferente das anteriores, verifica-se que o comportamento da função de percentagem de insatisfeitos é semelhante aos descritos acima.

Também neste caso é visível um decaimento da percentagem de insatisfeitos com o aumento do voto médio. A partir de um valor - limite, a percentagem de insatisfeitos deverá tender para um valor residual (que pode eventualmente ser não - nulo). Uma observação inicial das figuras (Figura 4.11 e Figura 4.12) indica que para ambas o valor limite de voto a partir do qual se regista uma percentagem de

insatisfeitos residual poderá ser da ordem de grandeza de 200 (eventualmente ser ligeiramente inferior a este valor).

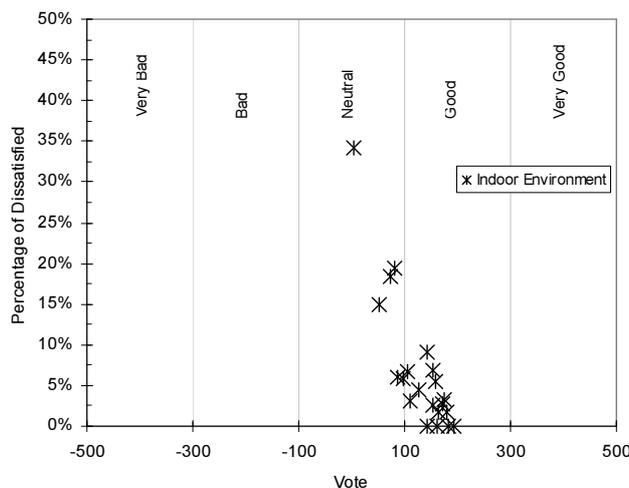


Figura 4.12 - Percentagem de insatisfeitos com o ambiente interior (IEPD) em função do voto respetivo (IEV).

Efetuada uma análise de regressão com base nos diversos conjuntos de pontos obtidos, verifica-se que um elevado número de funções de diversas famílias proporciona bons níveis de ajustamento. As funções sigmóides, exponenciais, polinomiais e racionais são aquelas que apresentam melhores resultados do ponto de vista da minimização do RMSE. Para efetuar uma análise mais detalhada de cada uma destas funções estendeu-se a faixa de análise de regressão para além dos limites dos conjuntos considerados. Dois pontos foram adicionados a cada conjunto de dados: (-500;1) e (+500;0). A inclusão destes pontos pretende aproximar duas condições de fronteira:

- No limite superior de voto (Voto = +500), a percentagem previsível de insatisfeitos não pode ser inferior a zero;
- No limite inferior de voto (Voto = -500), a percentagem previsível de insatisfeitos não pode ultrapassar os 100%.

Quer num caso quer no outro, a inclusão dos pontos mencionados não traduz de forma correta as condições de fronteira que se pretendem estabelecer. Para além disso, não há nenhuma garantia que mesmo para um valor médio de voto igual a -500, a percentagem de insatisfeitos seja de 100%. Da mesma forma como não há a garantia de que num caso em que o valor médio do voto seja +500, a percentagem de insatisfeitos com o ambiente interior seja necessariamente nula. A título de exemplo, refira-se aliás que considerando a equação (4.14) aplicável ao ambiente térmico e aplicando um voto extremo de "muito frio" (-500) ou "muito calor" (+500) resulta numa percentagem previsível de insatisfeitos de 95%. Embora estes dois valores se encontrem fora do domínio de validade da função, ainda assim não deixa de ser um indicador interessante que o autor tenha considerado que o ambiente térmico pudesse, no máximo, produzir 95% de insatisfeitos.

Uma outra questão levantada pela inclusão dos dois pontos artificialmente introduzidos nos limites da escala prende-se com a distorção dos resultados obtidos para os valores de RMSE. Para minimizar este efeito, a cada um destes pontos foi atribuída uma ponderação de 0,1, enquanto que para cada um dos pontos obtidos experimentalmente foi usada uma ponderação de 1,0. Desta forma, a

contribuição dos dois pontos para a variável de RMSE a otimizar encontra-se limitada a 0,45% do seu valor global.

O alargamento do domínio de regressão permite concluir que nem as funções polinomiais nem as racionais obtidas são adequadas para expressar a percentagem previsível de insatisfeitos. Em ambos os casos verifica-se que as funções tendem para valores de $\pm\infty$ ou valores não admissíveis, dentro do que se pretende seja o intervalo de aplicação da função. As funções polinomiais apresentam ainda o problema adicional de exibirem pontos de inflexão sem tradução física para os mesmos. As funções racionais, por seu turno, apresentam descontinuidades associadas a assíntotas de $\pm\infty$ no domínio alargado de análise da função.

A análise das várias funções no domínio alargado permitiu ainda concluir que são as funções sigmoidais aquelas que melhores resultados de *RMSE* apresentam, independentemente do ambiente interior cuja percentagem de insatisfeitos esteja a ser analisada.

No conjunto de funções sigmoidais analisadas, o comportamento apresentado na zona positiva do voto médio da perceção do ambiente interior é muito semelhante. Todas descrevem um comportamento assintótico a tender para um valor nulo ou positivo de pequena dimensão.

Mas registam-se diferenças significativas na zona negativa de votos da perceção dos ambientes interiores. A maior diferença resulta no nível de saturação da percentagem previsível de insatisfeitos apresentado para uma faixa de valores negativos do voto médio, à medida que este diminui. Na Figura 4.13 são apresentadas a título exemplificativo três funções apresentando níveis de saturação muito distintos na parte inferior do voto.

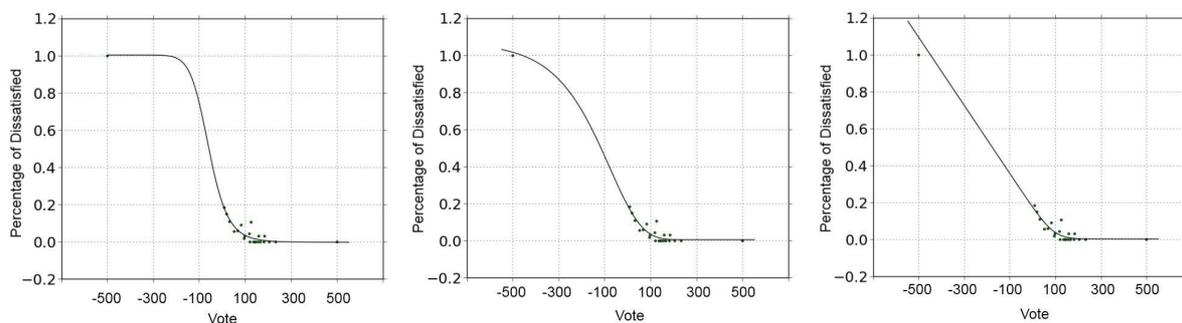


Figura 4.13 - Algumas curvas de regressão obtidas para a percentagem de insatisfeitos com a qualidade do ar interior. Todas as curvas correspondem a funções sigmoidais. A figura à esquerda representa uma função Logística de quatro coeficientes. No meio é apresentada uma função de Gompertz com 3 coeficientes e do lado direito uma função de Peters-Baskin com 3 coeficientes. As duas funções à direita possuem um *offset* que se traduz em assíntotas não nulas nos limites superiores dos votos respetivos.

Diversas funções sigmoidais apresentam valores idênticos de *RMSE* em relação ao conjunto de dados experimentais. A grande diferença existente entre essas funções de ajustamento reside precisamente na extensão do patamar de saturação de insatisfeitos exibido para os valores mais negativos do voto médio. Como tal, torna-se necessário prever se existe ou não algum nível de saturação da percentagem de insatisfeitos no extremo inferior do voto médio da perceção subjetiva. No caso de se prever a sua existência é ainda desejável explicitar a sua extensão e forma.

A existência de algum nível de saturação pode ser justificada pela própria distribuição Gaussiana dos votos em torno de um valor médio, quando esse valor médio tende para o seu limite inferior.

Uma análise à dispersão de votos recolhidos nos ensaios experimentais revela que globalmente os desvios-padrão diminuem à medida que o voto médio aumenta. Este comportamento, patente na Figura 4.14 demonstra que o nível de consenso entre a população aumenta com a percepção de qualidade do ambiente interior. Este comportamento é generalizado para os vários ambientes interiores cujas percepções subjetivas se encontram registadas em escalas unipolares. Também se encontra incluída neste padrão de comportamento a avaliação global do ambiente interior.

Nesta fase, a única avaliação da percepção subjetiva que não foi incluída na análise dos desvios-padrão foi o ambiente térmico, pelo facto de a respetiva escala de voto ser bipolar.

Conhecendo com rigor o desvios-padrão de uma população de resultados, então é possível determinar a dispersão dos mesmos em torno de um valor médio e desta forma contabilizar aqueles que se encontram abaixo do limiar de desconforto. Os desvios-padrão dos votos obtidos para cada um dos quatro ambientes votados em escalas unipolares foram analisados separadamente. Embora todos eles apresentem uma tendência notória de diminuição dos desvios-padrão em função do aumento do voto médio, a taxa a que tal sucede não é exatamente a mesma para todos.

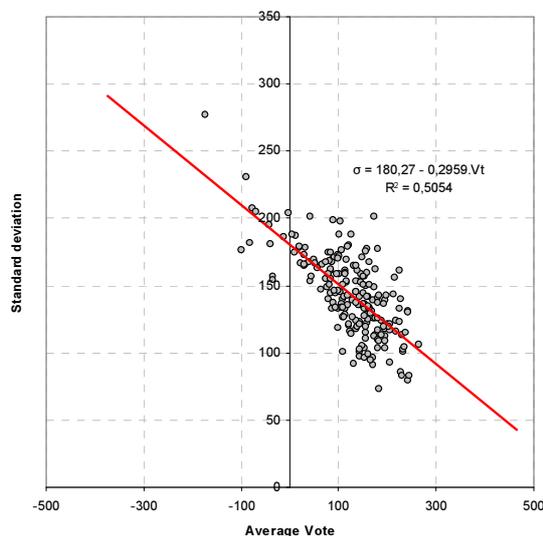


Figura 4.14 - Desvios-padrão dos votos de avaliação das percepções subjetivas dos ambientes acústico, de qualidade do ar, luminoso e do ambiente interior global. Foram excluídos da figura os resultados correspondentes ao conforto térmico.

A percentagem previsível de insatisfeitos corresponde desta forma à função de distribuição cumulativa obtida considerando uma distribuição Gaussiana. Desta forma, usando a equação (4.15) é possível determinar a percentagem previsível de insatisfeitos com determinado ambiente interior apenas com base no voto médio previsto. Genericamente, esta equação é válida para os ambientes acústico, luminoso, de qualidade do ar interior e do ambiente interior global. É importante ressaltar no entanto que os desvios-padrão e os limiares de desconforto diferem consoante o ambiente interior cujo voto esteja a ser considerado e a escala de voto empregue. Os valores de cada uma das variáveis mencionadas para os ambientes interiores considerados são apresentados na Tabela 4.7 e Equação (4.16), respetivamente.

$$PPD = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{ERF} \left(\frac{DT - v}{\sigma \cdot \sqrt{2}} \right) \right] \quad (4.15)$$

Sendo:

ERF - Função de erro

v - Voto médio para o ambiente considerado;

DT - Limiar de desconforto para a escala de voto considerada;

σ - Desvios-padrão

O limiar de desconforto (designado por DT a partir da expressão anglo-saxónica "*Discomfort Threshold*") representa o valor a partir do qual um voto deixa de ser contabilizado como "Descontente" com o ambiente em questão. Para os votos das perceções acústica, luminosa e de qualidade do ar tal corresponde à fronteira entre o "*Ligeiramente mau*" e o "*Mau*" das respetivas escalas. Para a escala empregue na avaliação do ambiente interior global o mesmo valor corresponde à fronteira entre o "*Neutro*" e o "*Mau*". Para todas as escalas unipolares de avaliação das perceções subjetivas (inclusivamente para o ambiente interior global) o limiar de desconforto é o simétrico do quociente entre a amplitude da escala e o número de classes de agregação de resultados, tal como apresentado na equação seguinte:

$$DT = -\frac{1000}{n}, \quad \begin{cases} n = 6 \Leftarrow \text{Ambientes Acústico, Qualidade do Ar e Luminoso} \\ n = 5 \Leftarrow \text{Ambiente interior global} \end{cases} \quad (4.16)$$

Os desvios-padrão para cada um dos ambientes interiores foram inicialmente determinados por análise de regressão linear em função do voto médio. Os coeficientes das retas obtidas desta forma foram alvo de uma otimização posterior.

O processo de otimização dos coeficientes de regressão linear das retas de desvios-padrão teve como objetivo a conjugação de dois fatores: Minimizar o $RMSE$ correspondente às diferenças entre a curva de percentagem previsível de insatisfeitos e os valores reais de insatisfeitos registados nos ensaios e, simultaneamente, maximizar o coeficiente de correlação (expresso na forma R^2) entre os vetores das mesmas grandezas.

Também no caso do voto de avaliação global do ambiente interior foi tido em conta o facto de o respetivo desvio-padrão nunca poder ser um valor negativo, pelo que a reta de regressão linear inicial teria que ser corrigida.

Tabela 4.7 - Desvios-padrão dos votos de avaliação das perceções subjetivas.

	Acústico	Qualidade do Ar	Luminoso	Ambiente Interior (Global)
σ	$170 - 0,34.v$	$180 - 0,25.v$	$190 - 0,20.v$	$185 - 0,35.v$

O resultado final que corresponde às equações lineares apresentadas na Tabela 4.7 é apresentado graficamente na Figura 4.15. Os valores das estimativas iniciais para cada uma das retas de desvio-padrão apresentadas foram obtidas por regressão linear simples. Estas retas são apresentadas na figura a traço interrompido. As retas de desvios-padrão obtidas desta forma sofreram posteriormente um processo de otimização em que os novos critérios e variáveis - objetivo correspondem aos que foram mencionados anteriormente. Ainda assim, nos coeficientes das retas de desvio-padrão otimizadas, não se registaram grandes diferenças em relação aos coeficientes iniciais de regressão linear.

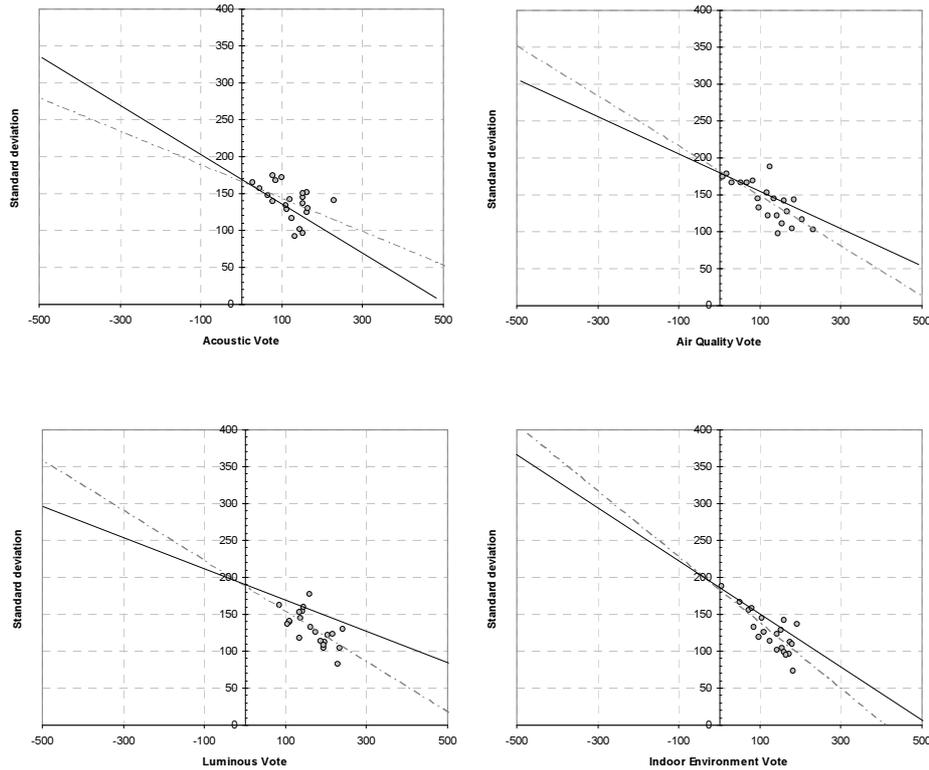


Figura 4.15 - Retas de desvios-padrão dos votos assinalados em escalas unipolares. As retas a tracejado correspondem à regressão linear inicial e as linhas a sólido correspondem às retas cujos coeficientes foram otimizados para melhorar o comportamento da percentagem previsível de insatisfeitos de cada ambiente.

As curvas obtidas para a percentagem previsível de insatisfeitos com base na metodologia indicada, apresentam um bom nível de concordância com os resultados experimentais obtidos. Os valores da raiz do erro quadrático médio e do coeficiente de correlação quadrático entre o modelo baseado na distribuição normal e os resultados experimentais, encontram-se apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultados do modelo de previsão das percentagens de insatisfeitos com os vários ambientes interiores.

	Acústico	Qualidade do Ar	Luminoso	Ambiente Interior (Global)
RMSE	2,36 %	2,62 %	1,65 %	3,56 %
R²	0,613	0,760	0,708	0,820

Efetuada uma comparação com os valores obtidos para o ambiente térmico. Como foi mencionado anteriormente, para este ambiente a percentagem previsível de insatisfeitos foi calculada de acordo com a norma internacional (ISO 7730, 2005). Os valores correspondentes obtidos ($RMSE = 10,08\%$; $R^2 = 0,808$) revelam que as quatro curvas apresentadas na Figura 4.16 possuem um menor nível de erro no ajustamento dos resultados, embora a curva *ThPPD* apresente um coeficiente de correlação mais elevado do que o registado para qualquer um dos restantes ambientes.

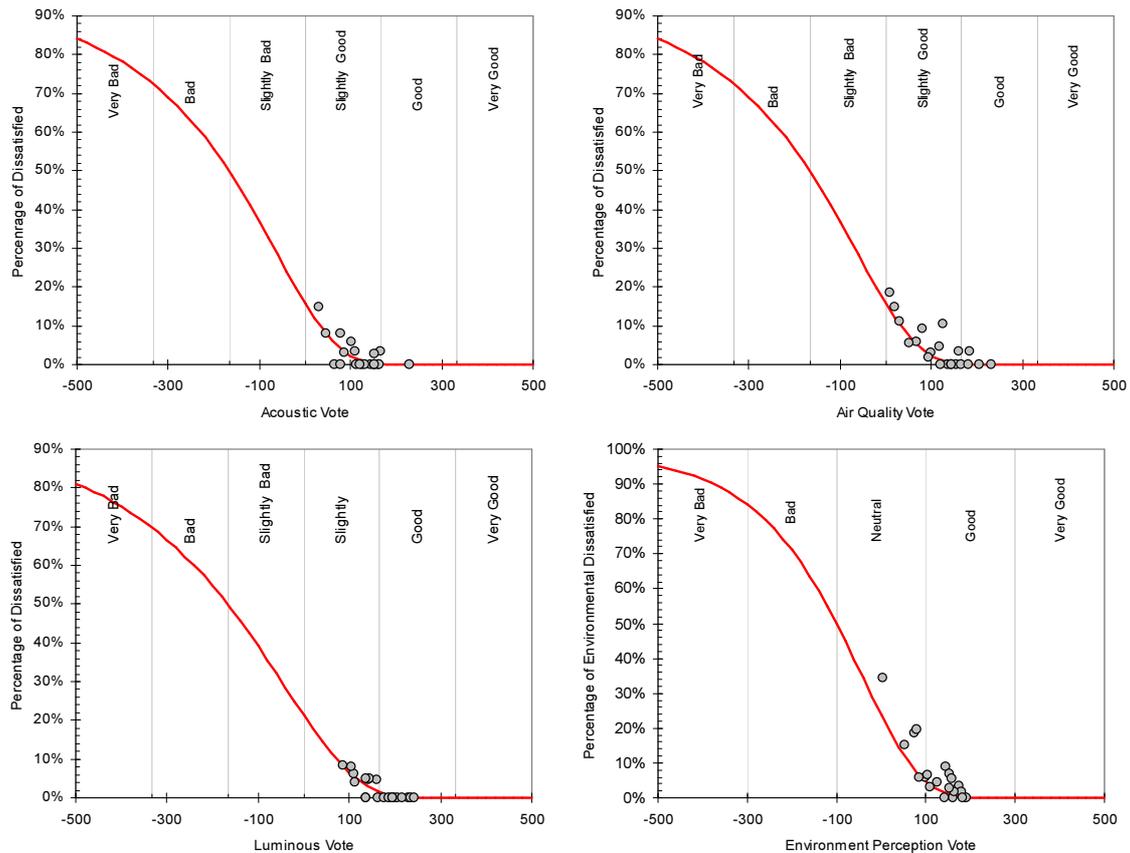


Figura 4.16 - Percentagens previsíveis de insatisfeitos com os ambientes acústico, de qualidade do ar, luminoso e de avaliação global do ambiente interior.

Verifica-se também que o ambiente onde se registou um maior nível de erro da curva de percentagem prevista de insatisfeitos relativamente aos valores experimentais foi o da avaliação global do ambiente interior. A escala de voto usada para a avaliação da perceção subjetiva deste ambiente é diferente das demais. Possui menos classes de agregação de resultados (cinco em vez das seis classes empregues para os restantes três). O número impar de classes nesta escala resulta do facto de possuir uma classe "neutra" ao centro. Faz sentido, à luz deste resultado, discutir a adequação das escalas de voto empregues em cada caso. O facto de a escala de voto do ambiente interior global possuir menos uma classe que as dos ambientes acústico, de qualidade do ar e luminoso não representa uma vantagem do ponto de vista da agregação de resultados e da previsão da percentagem de insatisfeitos.

Uma outra questão levantada pela metodologia proposta para o cálculo das percentagens previsíveis de insatisfeitos é a da adequação do modelo baseado em distribuições Gaussianas dos votos da perceção subjetiva. Assumindo uma distribuição normal perfeita, seria expectável que o valor dos desvios-padrão que apresentasse melhores resultados no modelo, resultaria da reta que também melhor aproximasse os valores experimentais obtidos para esta grandeza. Ou seja, a reta de regressão linear inicial dos desvios-padrão. Na prática verificou-se que a reta que otimizava os valores de $RMSE$ e R^2 da função em causa é muito próxima da reta de regressão linear inicial. Esta pequena diferença pode ser explicada pelo facto de as populações em cada ensaio serem relativamente pequenas. A maior população registada em ensaios foi de 76 indivíduos. Tal facto acarreta como consequência a existência de variabilidade experimental que proporciona desvios em relação às distribuições teóricas previstas para

os votos. O facto de as diferenças registadas a este nível serem de pequena magnitude reforça a ideia da adequação do modelo baseado na distribuição normal dos votos da percepção subjetiva dos ambientes considerados.

A equação (4.15) não é mais do que a função cumulativa da distribuição normal esperada em torno de um voto médio, sabendo que a dispersão da distribuição aumenta à medida que o ambiente avaliado piora. Sendo a função de erro definida como:

$$ERF(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4.17)$$

a equação (4.15) pode ser explicitada para cada um dos ambientes considerados, resultando

para o ambiente Acústico:
$$Ac.PPD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{-1000-6AcPMV}{1020-2.04AcPMV}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.18)$$

para a Qualidade do Ar:
$$AQ.PPD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{-1000-6AQ.PMV}{1080-1.5AQ.PMV}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.19)$$

para o ambiente Luminoso:
$$Lu.PPD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{-1000-6LuPMV}{1140-1.2LuPMV}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.20)$$

para o Ambiente Interior (global):
$$IE.PPD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{-1000-5IE.PMV}{925-1.75IE.PMV}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.21)$$

As equações (4.18) a (4.21) fornecem um modelo matemático que traduz de forma satisfatória as percentagens de insatisfação registadas para os vários ambientes interiores, baseado no simples facto de o nível de consenso em relação a um determinado ambiente aumentar à medida que a percepção da qualidade do mesmo também melhora. Contudo, do ponto de vista do cálculo analítico direto dos valores de percentagem de insatisfeitos, as expressões apresentadas podem acarretar algum custo computacional, tal como por exemplo o recurso a métodos numéricos.

Em alternativa, é apresentada uma função que permitem aproximar as percentagens de insatisfeitos para cada um dos ambientes interiores considerados, de forma direta a partir do voto médio. A função em causa é a sigmoidal de Gompertz

$$PPD = \alpha \cdot e^{\left[\beta \cdot e^{(\gamma \cdot v)} \right]} + \delta \quad (4.22)$$

Sendo:

v - Voto médio para o ambiente considerado;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ - Constantes cujos valores são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Constantes da função de aproximação das percentagem previsíveis de insatisfeitos.

	Acústico	Qualidade do Ar	Luminoso	Ambiente Interior (Global)
α	0,849984	0,918546	0,897529	0,853639
β	$-8,157968 \times 10^{-3}$	$-6,249050 \times 10^{-2}$	$-2,978068 \times 10^{-2}$	$-5,838539 \times 10^{-3}$
γ	10,310671	6,527080	7,432716	10,160417
δ	0	0	0	$1,826141 \times 10^{-2}$

Os valores das percentagens previsíveis de insatisfeitos estimados usando a função de Gompertz, são apresentados na Figura 4.17 juntamente com os mesmos valores calculados usando o modelo da função cumulativa de densidade de probabilidade e os valores experimentais registados após análise dos inquéritos.

Em cada uma das funções sigmoidais de Gompertz apresentadas, a constante α representa o valor máximo de percentagem de insatisfeitos expectável para cada um dos ambientes considerados. Para cada uma destas constantes foi imposta no modelo de regressão a seguinte condição de fronteira:

$$\alpha \leq \frac{1}{2} \left[1 + \text{ERF} \left(\frac{DT - 500}{\sigma \cdot \sqrt{2}} \right) \right] \quad (4.23)$$

Como tal, os valores máximos de percentagens de insatisfeitos previstos obtidos por cada uma das funções sigmoidais coincide com os respetivos valores calculados através das respetivas funções cumulativas de densidade de probabilidade.

Constata-se pela observação da Figura 4.17 uma grande concordância de resultados nas faixas onde incidiram as respostas dos votos da perceção subjetiva para os vários ambientes interiores. A mesma concordância de resultados é patente na Tabela 4.10. Registam-se diferenças maiores entre os resultados apresentados pela função de sigmoidal de Gompertz e o modelo normal na faixa de votos mais negativos. A função sigmoidal de Gompertz apresenta tendencialmente níveis de saturação da percentagem previsível de insatisfeitos superiores aos apresentados pelo modelo normal.

Estas diferenças no nível de saturação da percentagem de insatisfeitos em ambientes percecionados como "maus" resultam do facto de os coeficientes da função sigmoidal terem sido otimizados usando apenas os valores experimentais recolhidos. Será necessário conceber a realização de ensaios em ambientes interiores consideradas "maus" para poder alargar o domínio de aplicação do modelo.

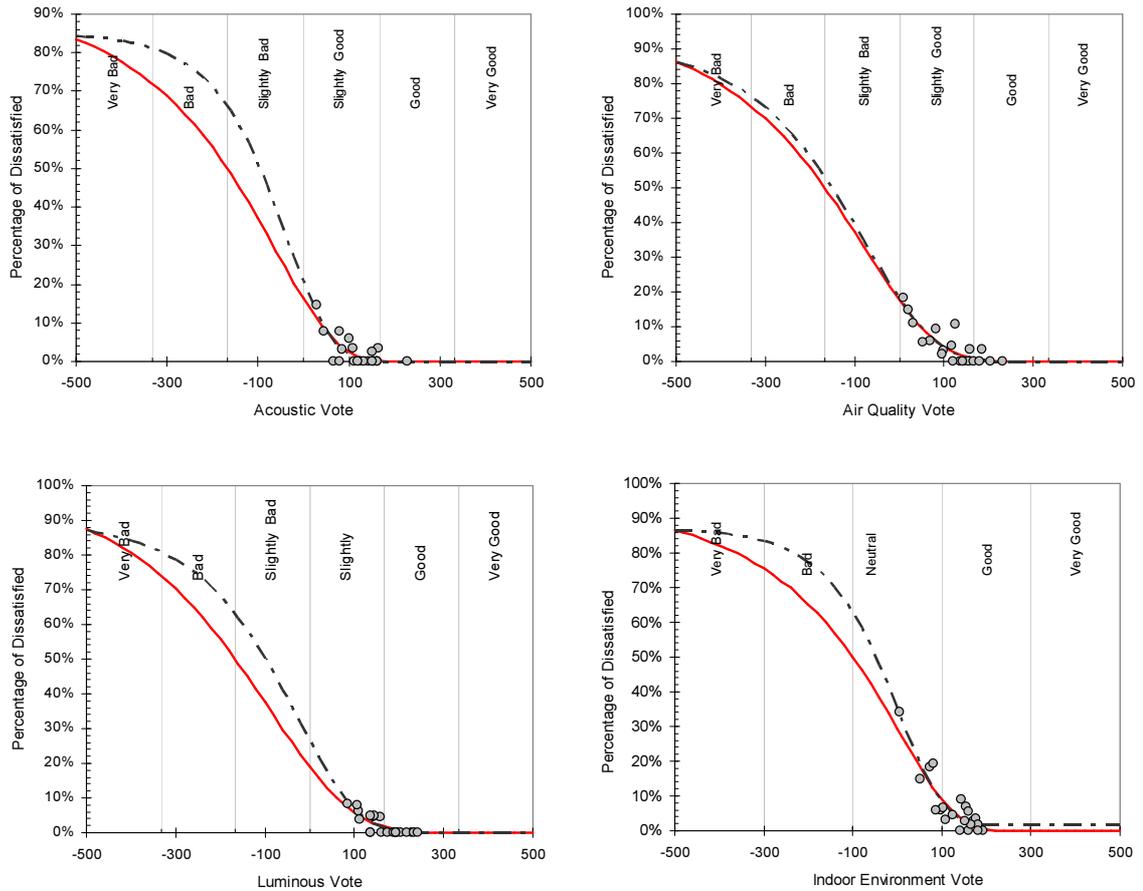


Figura 4.17 - Comparação de resultados obtidos usando o modelo de função cumulativa de densidade de probabilidade (a traço contínuo) e a função sigmoial de Gompertz (a traço descontinuo).

Um facto a salientar do conjunto de coeficientes obtidos é o de, no caso da avaliação do Ambiente Interior na sua globalidade, a função sigmoial que melhor ajusta os resultados experimentais prever a existência de um nível de insatisfeitos residual da ordem de 2%, mesmo para valores elevados do voto médio. Também neste caso, será necessário efetuar ensaios de forma sistemática em ambientes interiores percecionados como "muito bons" para poder concluir se independentemente de se registar um voto médio elevado pode existir ou não uma percentagem residual de insatisfeitos.

Tabela 4.10 - Indicadores de adequação das regressões de percentagens de insatisfeitos com os vários ambientes interiores usando a função sigmoial de Gompertz. Para cada valor obtido é apresentado entre parêntesis o correspondente, usando as equações (4.18) a (4.21).

	Acústico	Qualidade do Ar	Luminoso	Ambiente Interior (Global)
RMSE	2,29 % (2,36)	2,61 % (2,62)	1,59 % (1,65)	3,30 % (3,56)
R²	0,646 (0,613)	0,764 (0,760)	0,707 (0,708)	0,839 (0,820)

Tal como foi mencionado anteriormente, não é possível prever o voto médio da avaliação global do ambiente interior baseado em combinações lineares dos votos térmico, acústico, luminoso e de qualidade do ar, tal e qual como resultam da tradução numérica dos votos nas escalas usadas.

Verificou-se que o ambiente para o qual foi registado um voto médio mais elevado (242) foi também aquele em que os utilizadores possuem o maior nível de controlo sobre as variáveis: o ambiente luminoso. Quer a perceção do ambiente acústico, quer a da qualidade do ar registaram um valor máximo do voto médio idêntico para ambos os casos: 230 (mais precisamente 229 e 232 respetivamente). Para estes dois ambientes, o nível de controlo que os utilizadores possuem sobre as variáveis que influenciam ambos é semelhante. Resulta da abertura e fecho de janelas e porta. Relativamente ao ambiente térmico, o nível de controlo que os utilizadores possuem é semelhante ao dos ambientes acústico e de qualidade do ar. Como tal, considerou-se que numa votação em escala unipolar, nestas circunstâncias, o valor máximo registado para o voto térmico seria semelhante ao registado para os ambientes acústico e de qualidade do ar caso as escalas de voto fossem iguais.

Assumindo então um valor máximo do voto térmico ($V_{t_{lim}}$) de 230, e efetuando a conversão de voto a partir da transformada apresentada na equação (4.12) pode ser traçada graficamente a percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico registada nos ensaios em função do voto térmico convertido para a escala unipolar.

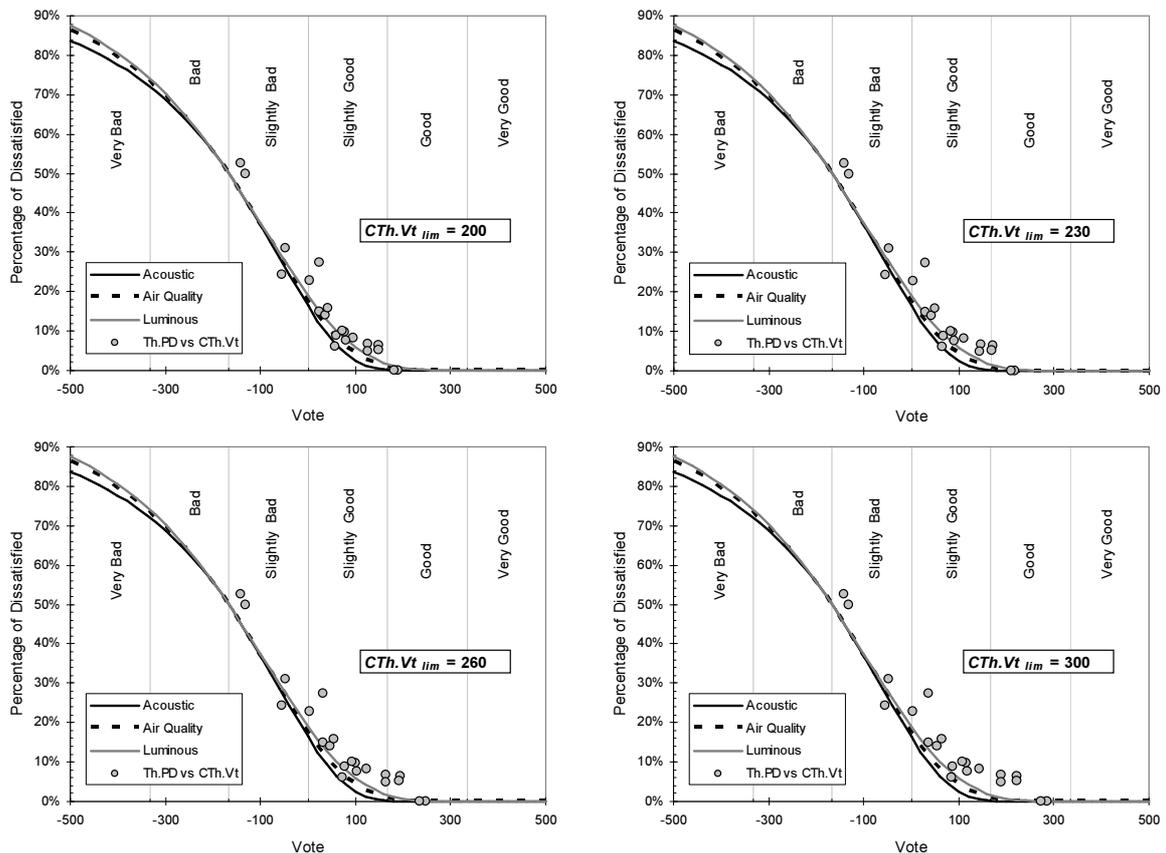


Figura 4.18 - Percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico ($ThPD$) em função do voto térmico convertido para escala unipolar ($CTh.Vt$) pela transformada (4.12). São também apresentadas na figura, as curvas de percentagens previsíveis de insatisfeitos com os ambientes acústico, luminoso e de qualidade do ar calculadas pelos modelos respetivos das funções cumulativas de densidade de probabilidade.

Observa-se na Figura 4.18 uma notável concordância entre o comportamento da percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico registada nos ensaios em função do voto térmico convertido para escala unipolar e as curvas de percentagens previsíveis de insatisfeitos com os demais ambientes votados na mesma escala. Tal como mencionado anteriormente, seria expectável a existência de algum nível de ruído, afetando essencialmente os resultados com um voto convertido positivo e nomeadamente aqueles que apresentam um valor mais elevado, uma vez que pequenas diferenças que existam no posicionamento do voto da escala bipolar em relação à palavra "Confortável" são amplificados na conversão para a escala unipolar. O fator de amplificação é tanto maior quanto mais elevado for o valor do voto limite. Considerando $V_{lim} = 230$, o fator de amplificação resultante é 3,22. É necessário ter em consideração que as curvas de percentagens de insatisfeitos para cada um dos ambientes apresentam especificidades próprias, apesar de todas elas exibirem um comportamento sigmoidal. No caso do ambiente térmico registou-se o mais baixo número de ensaios em que a percentagem de insatisfeitos é nula. Apenas 2/21, enquanto para a qualidade do ar esse valor foi de 9/21 e para os ambientes acústico e luminoso se registou um valor de 13/21 ensaios com zero indivíduos insatisfeitos.

Salvaguardadas as devidas diferenças, pode concluir-se que, sendo a percepção do ambiente térmico convertida para a mesma escala unipolar empregue para os ambientes acústico, luminoso e de qualidade do ar, esta apresenta um comportamento da percentagem de insatisfeitos (*Th.PD*) semelhante aos comportamentos sigmoidais observados para os demais ambientes referidos (*Ac.PD*, *Lu.PD* e *AQ.PD*).

O comportamento da percentagem de insatisfeitos com determinado ambiente é função do voto da percepção subjetiva em relação a esse mesmo ambiente. A percentagem de insatisfeitos é representada por uma função cumulativa da densidade de probabilidade com um desvio-padrão variável e também ele dependente do voto da percepção subjetiva. As funções de desvios-padrão são diferentes para cada um dos ambientes em causa. Mas dependem unicamente do voto da percepção subjetiva e da estrutura da escala de voto usada. No caso das escalas unipolares com as classes de voto igualmente espaçadas, os desvios-padrão apresentam um comportamento linear.

É possível analisar a metodologia de conversão do voto térmico em escala bipolar de sete classes para a escala unipolar de seis classes à luz do comportamento dos desvios-padrão.

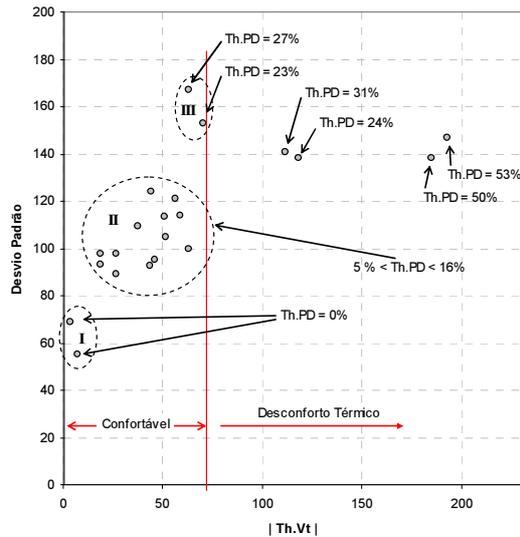


Figura 4.19 - Desvios-padrão das votações da percepção térmica em função do valor absoluto do voto térmico em escala bipolar. A linha vertical assinala a fronteira da classe "Confortável", sendo o desconforto térmico crescente à medida que o valor absoluto do voto térmico aumenta.

Verificou-se em relação aos ambientes acústico, luminoso e de qualidade do ar, que o nível de consenso entre a população aumenta com a percepção da qualidade do mesmo ambiente. O nível de consenso para este efeito pode ser parametrizado pelo inverso do desvio-padrão. Quanto menor é o desvio-padrão da votação, menor é também a dispersão de resultados de voto e conseqüentemente maior o nível de consenso entre a população em causa. Para os três votos da percepção mencionados, os respectivos desvios-padrão diminuem linearmente com o voto médio da percepção respetiva. Verifica-se então que o desvio-padrão funciona neste caso como um indicador do voto médio em causa.

A análise dos desvios-padrão dos votos térmicos em escala bipolar permite observar que existe uma tendência de aumento do nível de consenso da população à medida que a qualidade do ambiente aumenta. No caso desta escala, a qualidade do ambiente considerado diminui à medida que o valor absoluto do voto médio aumenta. Dentro da classe "Confortável", verifica-se a ocorrência de uma grande disparidade de desvios-padrão. Os únicos ensaios onde não foram registados descontentes com o ambiente térmico apresentam valores de desvios-padrão inferiores aos restantes, mas na vizinhança das fronteiras da classe "Confortável" registam-se percentagens de insatisfeitos ao nível das que se registam quando o voto médio é "Ligeiramente frio" ou "Ligeiramente quente".

Constata-se que os desvios-padrão se comportam como indicadores em relação à adequação de determinada escala de voto para a caracterização de um ambiente interior. O valor do desvio-padrão de uma votação, considerada isoladamente, nada representa. Mas o comportamento de uma linha de tendência de desvios-padrão para um número significativo de ensaios realizados nas mesmas condições é relevante. Nestas condições, o facto de na mesma classe de voto se registarem valores muito díspares pode significar que nessa classe não é proporcionado um nível de detalhe suficiente para a expressão do voto da percepção subjetiva ou então que a escala de voto não foi bem compreendida pelos participantes. Esta dispersão de resultados dos desvios-padrão é patente na Figura 4.19 para a zona correspondente à classe "Confortável". Observam-se valores muito baixos de desvios-padrão, registados em ensaios onde se registaram zero insatisfeitos com o ambiente térmico, quer valores muito elevados em ensaios onde se registou uma percentagem de insatisfeitos acima de 20%. Nestes últimos casos, os valores dos votos médios encontram-se dentro da classe "Confortável" embora próximos da sua

fronteira superior (limiar do "Ligeiramente quente"). É possível agrupar os desvios-padrão registados para um valor médio de voto "Confortável" em três conjuntos diferentes: Um primeiro conjunto (I) de dois pontos com um valor de desvios-padrão baixo, correspondendo aos únicos ensaios onde não se registou nenhum insatisfeito com o ambiente térmico; Um segundo conjunto (II) onde se registaram percentagens de insatisfeitos compreendidas entre 4,9 e 15,8% e em que o comportamento dos desvios-padrão pode ser ajustado por uma reta; Um terceiro conjunto de pontos (III), próximo da fronteira da classe de conforto e que regista valores de desvios-padrão ao nível do que seria expectável caso o voto médio ocorresse fora da classe de conforto.

Também desta forma se conclui que a escala bipolar de sete classes usada para o voto térmico não proporciona na classe "Confortável" um nível de detalhe adequado para a determinação de um índice global de qualidade do ambiente interior

A mesma análise pode ser repetida para o voto térmico convertido para escala unipolar, permitindo avaliar desta forma a adequação da transformada de conversão do voto empregue. Os resultados obtidos são apresentados a Figura 4.20. Verifica-se um comportamento dos desvios-padrão semelhante aos apresentados pelas perceções dos ambientes interiores cujo voto foi assinalado diretamente em escala unipolar de seis classes.

Pelos motivos apresentados anteriormente, considerou-se que 230 seria um valor razoável de aproximação do voto limite térmico. No entanto, este valor é apenas uma estimativa que poderá vir a ser confirmada efetuando um elevado número de ensaios com a utilização simultânea de escalas de voto bipolares e unipolares. Como tal, na figura é também efetuada uma análise de sensibilidade ao valor do voto limite considerando valores compreendidos entre 200 e 300.

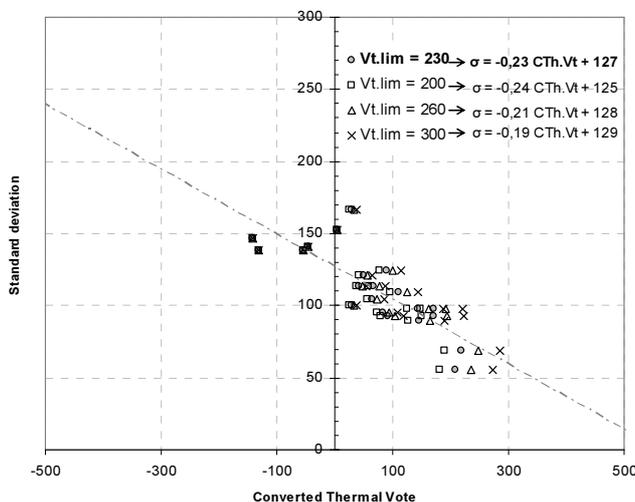


Figura 4.20 - Desvios-padrão das votações da percepção térmica em função do voto térmico convertido para a escala unipolar. Os resultados são apresentados considerando valores de $Vt_{lim} = 200; 230, 260$ e 300 .

O efeito do voto limite apenas se faz sentir para votos térmicos convertidos superiores a zero. Todos os valores negativos são absolutamente coincidentes, uma vez que neste caso a transformada de conversão é independente do valor do voto limite. Para os votos médios positivos, verifica-se que o efeito do voto limite é tanto maior quanto mais elevado for também o valor do voto médio convertido. Do ponto de vista das regressões efetuadas a cada um dos conjuntos de pontos, a análise de

sensibilidade efetuada permite concluir que o valor do voto limite não provoca nenhuma distorção significativa nos conjuntos de pontos, de forma a que qualquer um deles deixe de poder ser ajustado linearmente. Regista-se também que as ordenadas na origem são praticamente insensíveis ao valor do voto limite, sendo o valor do declive apenas moderadamente afetado por este valor. Ainda assim, qualquer um dos declives registados na análise de sensibilidade é enquadrável dentro dos valores registados para outros ambientes votados em escalas unipolares de seis classes. Em resumo, verifica-se que o efeito do voto limite praticamente só se faz sentir ao nível dos dois ensaios onde não foi registado nenhum voto se insatisfação térmica.

Sendo os desvios-padrão das votações um indicador da adequação da escala de voto em relação à caracterização pretendida do ambiente interior e comportando-se a curva da percentagem de insatisfeitos em função do voto como uma "impressão digital" da escala usada, estes dois fatores permitem pelo menos concluir que a metodologia empregue para a conversão do voto em escala bipolar para unipolar é adequada. Os resultados obtidos para o voto térmico convertido apresentam um comportamento semelhante aos evidenciados pelos demais ambientes interiores cujas perceções subjetivas foram registadas em escalas unipolares de seis pontos.

Neste ponto, faz sentido efetuar uma reanálise da curva de percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico em função do respetivo voto médio.

Verifica-se que também para o voto térmico, à semelhança do que foi registado para todos os demais votos das perceções subjetivas, que o desvio padrão votação aumenta à medida que o valor médio da votação se afasta das condições de conforto. Esta observação permite concluir que para o voto térmico, tal como para os demais votos, o nível de consenso da população em relação ao ambiente térmico aumenta com o nível de conforto térmico.

Considerando o valor do voto térmico retirado da escala de voto bipolar de 1000 pontos usada para a expressão do mesmo. O facto de a curva de desvios-padrão em função do voto ser simétrica em relação em relação ao eixo das ordenadas para um voto médio de zero é condição necessária e suficiente para que a curva da percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico seja também ela simétrica em relação ao mesmo eixo. Assumindo esta hipótese como verdadeira, o desvio pode ser obtido por regressão linear em função do valor absoluto do voto térmico, obtendo-se a expressão:

$$\sigma = 80 + 0,25\sqrt{v^2} \quad (4.24)$$

Para o voto térmico e considerando a escala bipolar de 1000 pontos dividida em sete classes de conforto distintas, existem dois limiares de desconforto:

$$DT = \begin{cases} -\frac{1500}{n} \Leftarrow \text{Limiar de desconforto por frio} \\ \frac{1500}{n} \Leftarrow \text{Limiar de desconforto por calor} \end{cases} \quad (4.25)$$

sendo então a função da percentagem previsível de insatisfeitos em função do voto térmico médio simétrica em relação ao eixo das ordenadas que passa no valor ótimo de voto, então a função

cumulativa de densidade de probabilidade pode ser obtida considerando apenas o valor absoluto do voto térmico médio e o valor absoluto do limiar de desconforto. A função correspondente é apresentada na Equação (4.26).

$$Th.PPD = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1500 - \sqrt{Th.PMV^2}}{560 - 1,75\sqrt{Th.PMV^2}}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.26)$$

Graficamente, o resultado proporcionado pela equação da função cumulativa de densidade de probabilidade é comparado com os valores experimentais obtidos e com a função de percentagem previsível de insatisfeitos apresentada na norma ISO (ISO 7730, 2005)

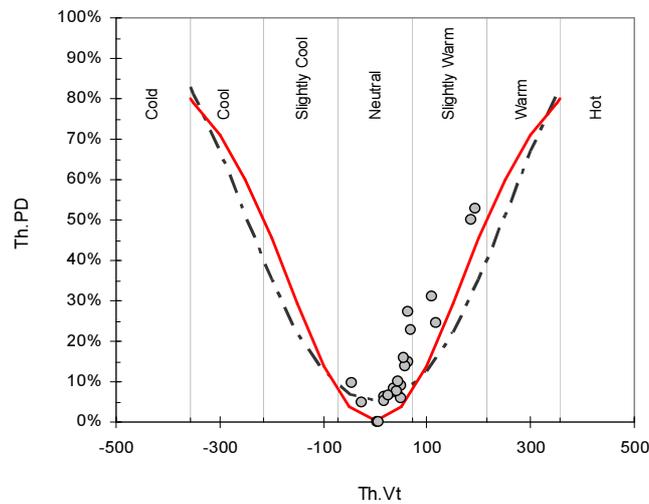


Figura 4.21 - Percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico e curvas de percentagem previsível de insatisfeitos. A curva interrompida (— - —) representa a função de percentagem previsível de insatisfeitos da norma ISO (ISO 7730, 2005) e a curva contínua (—) representa a percentagem previsível de insatisfeitos como função cumulativa de densidade de probabilidade

Globalmente, ambas as funções apresentam um bom nível de ajustamento aos resultados experimentais obtidos possuindo a função cumulativa de densidade de probabilidade uma prestação ligeiramente superior, tal como pode ser constatado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Comparação de resultados de percentagem previsível de insatisfeitos.

	<i>Th.PPD</i> <i>Função cumulativa densidade probabilidade</i>	<i>Th.PPD</i> <i>Norma ISO 7730 (2005)</i>
RMSE	8,92%	9,572%
R²	0,880	0,8667

A função obtida no âmbito deste trabalho para exprimir a percentagem previsível de insatisfeitos em função do voto térmico médio possui a vantagem de proporcionar uma explicação física coerente para os resultados obtidos. Para além disso esta função permite retirar conclusões adicionais em relação ao

comportamento da percentagem previsível de insatisfeitos. Constatou-se que todas as percentagens previsíveis de insatisfeitos com os diversos ambientes considerados apresentam um comportamento semelhante em relação aos respetivos votos médios. Esse comportamento é determinado pela variação do desvio padrão da amostra de resultados com o valor médio da mesma. Neste caso, (tal como nos demais) o valor do desvio padrão aumenta linearmente à medida que o voto médio diverge do valor central. Sendo o nível de consenso de uma população representado pela variância do voto expresso em relação ao ambiente considerado, pode concluir-se que o nível de consenso térmico diminui à medida que as condições físicas se afastam do ponto ótimo de conforto.

Avaliação da percepção do ambiente térmico em trabalhos futuros:

A utilização da escala de uma única escala bipolar de sete classes (ou sete pontos), comumente designada por escala de McIntyre, para a expressão do voto da percepção térmica levanta problemas de baixo nível de resolução ao nível da classe "Confortável". Contudo esta escala de voto tem sido usada, com enorme sucesso, desde há longos anos em estudos de conforto térmico.

Importa pois definir qual a melhor metodologia para a recolha do(s) votos de percepção subjetiva do ambiente térmico.

Uma das razões do sucesso na utilização da escala de McIntyre reside no facto de ela traduzir a forma como as pessoas expressam a sua avaliação do conforto térmico no dia a dia. Este facto permite a identificação imediata da classe que traduz a percepção individual, permitindo a colocação do voto de forma intuitiva e rápida.

Aquando da construção dos inquéritos da avaliação das percepções subjetivas foram tidos em consideração três fatores importantes:

- Intuitividade;
- Rapidez no preenchimento;
- Não-redundância: A existência de perguntas que possam ser consideradas redundantes provoca algum nível de saturação nas pessoas que se encontram a responder ao inquérito. Esta saturação é tanto mais importante num estudo de longo curso temporal, uma vez que a mesma pessoa irá preencher o mesmo inquérito diversas vezes com uma periodicidade aproximada de um mês.

A juntar a estas há ainda que acrescentar:

- Equivalência das escalas para todas as classes.

Uma primeira hipótese passaria pela utilização de apenas uma escala unipolar de seis pontos para a caracterização do ambiente térmico, tal como a apresentada na Figura 4.6. Esta solução possui o mérito de apresentar todas as avaliações das percepções subjetivas dos diversos ambientes em escalas de voto absolutamente iguais, pelo que deste ponto de vista não há necessidade de efetuar conversões de votos e a equivalência entre escalas estaria garantida. A solução é igualmente boa do ponto de vista da não-redundância uma vez que a avaliação do ambiente térmico é efetuada apenas uma vez. Esta solução resultaria ainda num aumento de resolução importante na zona do conforto, mas numa perda de

informação crítica nas zonas de desconforto. Essa perda de informação resulta do facto de não se poder diferenciar o desconforto provocado por calor do desconforto provocado por frio.

Dois hipóteses são equacionáveis para a resolução deste problema: (1) Utilização de uma escala bipolar não uniforme, com amplificação da zona de conforto de forma a permitir o desagregamento da informação; (2) Utilização das duas escalas em paralelo: Bipolar de conforto térmico + Unipolar de avaliação do ambiente térmico.

A primeira hipótese possui o mérito de ser uma solução compacta, mas seria difícil diferenciar o "*Convictamente confortável*" correspondente ao "*Bom*", do "*Exceccionalmente confortável*" correspondente ao "*Exceccional*" tendo a escala uma estrutura de base bipolar. Mesmo adotando uma variante desta hipótese que é a de perguntar adicionalmente se a pessoa desejava sentir-se mais fria ou mais quente, dificilmente forneceria a resolução pretendida ao nível do "*Exceccional*".

A segunda hipótese possui o mérito de fornecer toda a informação pretendida, mas encerra em si mesma um potencial perigo: O de poder dar a ideia que a informação está a ser solicitada de forma redundante. O que pode tornar as pessoas menos disponíveis para colaborar em ensaios subsequentes de estudos de longa duração. Mesmo considerando ser esta a melhor opção, há que ter cuidado com a informação oral que é dada aos participantes e com a estrutura do inquérito para que o seu preenchimento não se torne fastidioso.

Qualidade do Ar

Tal como mencionado no Capítulo 3, foram monitorizados dois parâmetros como indicadores da qualidade do ar interior: A concentração de dióxido de carbono (CO_2) e as partículas em suspensão no ar (PM1, PM2.5, PM5, PM10). Cada inquirido, exprimiu qualitativamente nas escalas contínuas analisadas anteriormente, as suas perceções relativamente a: Cheiros/Odores; Ar viciado/fresco; Qualidade do ar (global).

Tal como foi concluído na análise das perceções subjetivas, o voto da perceção de qualidade do ar interior pode ser obtido de forma precisa em função dos votos das perceções parcelares de cheiros/odores e de ar viciado/fresco. É contudo importante ter em atenção que também foi observado para a perceção da qualidade do ar interior que as ponderações relativas de cada uma das perceções parcelares variam consoante o tipo de contexto (aula normal ou exame).

Neste ponto, pretende-se perceber quais as grandezas físicas mensuráveis que permitem descrever o comportamento da perceção da qualidade do ar interior ou a percentagem de insatisfeitos com o mesmo. Tal como também já foi demonstrado anteriormente, a percentagem de insatisfeitos com o ar interior é função do voto médio de perceção da qualidade do ar pelo que havendo a possibilidade de expressar uma delas em função de grandezas físicas mensuráveis para o ambiente em questão, também a outra poderá ser completamente caracterizada em função das mesmas grandezas.

A análise dos resultados obtidos permite concluir que não há uma relação entre a concentração de dióxido de carbono no interior da sala aquando do momento de preenchimento dos inquéritos e a expressão da perceção subjetiva da qualidade do ar interior, apresentada na Figura 4.22 ($R^2 = 0,076$; Valor- $p = 0.253$).

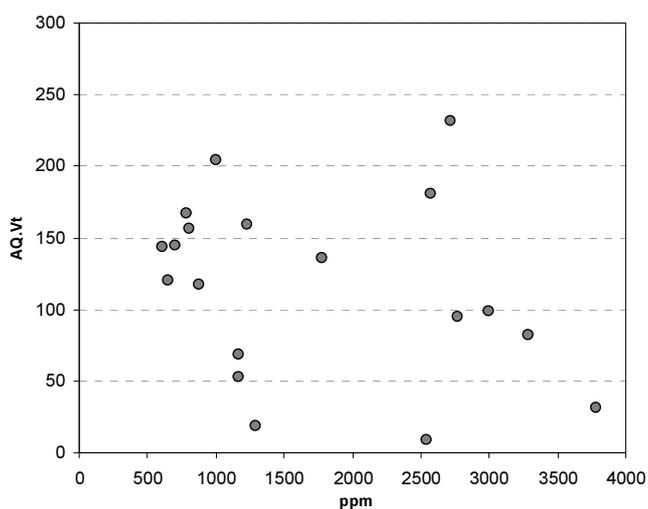


Figura 4.22 - Voto médio de perceção da qualidade do ar em função da concentração de dióxido de carbono.

Também para a perceção de Cheiros/Odores e Ar Viciado/Fresco, não foi registada nenhuma correlação relevante ou significância estatística com a concentração de dióxido de carbono no interior da sala

aquando do momento do voto (Ar viciado/fresco: $R^2 = 0,062$; *Valor-p* = 0,303; Cheiros/Odores: $R^2 = 0,038$; *Valor-p* = 0,426). Os resultados são apresentados graficamente na Figura 4.23.

De um ponto de vista meramente teórico, a percepção subjetiva de "Ar Fresco/Viciado" é o fator onde mais fortemente se poderia fazer sentir o efeito da concentração de dióxido de carbono no interior. Mas, mesmo para esta percepção, não se constatou nenhuma influência direta da concentração de dióxido de carbono no interior da sala.

É importante ter em consideração que no âmbito do trabalho realizado todos os inquiridos foram submetidos a um tempo de exposição de pelo menos uma hora ao mesmo ambiente interior antes de procederem ao preenchimento dos inquéritos. Os efeitos conhecidos acerca do tempo de exposição a uma atmosfera interior encontram-se apresentados em maior detalhe no Capítulo 2.

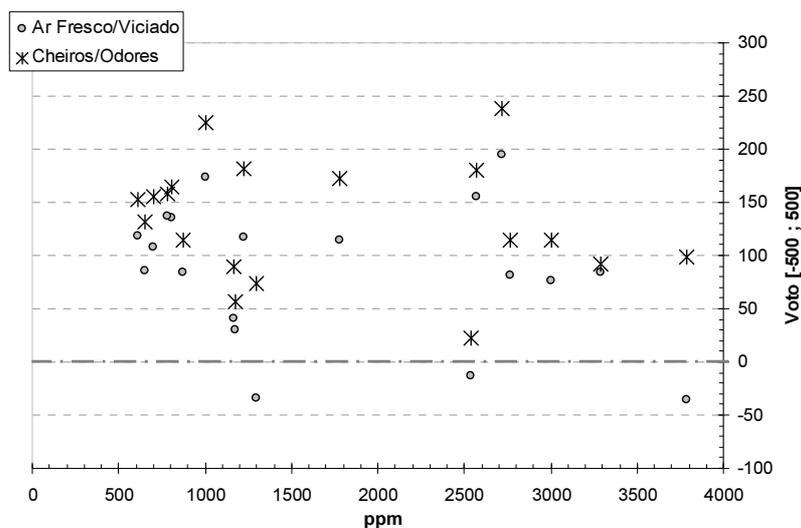


Figura 4.23 - Voto médio das percepções da qualidade do Ar fresco/viciado e de Cheiros/odores em função da concentração de dióxido de carbono no instante de recolha das percepções.

A concentração de dióxido de carbono no instante da votação pode não ser representativa da evolução do aumento da concentração registada no interior da sala face ao mesmo valor registado aquando da entrada da população para a sala.

Contudo, considerando a curva de concentrações de dióxido de carbono, verificou-se que também neste caso, a percentagem de insatisfeitos com o ar interior não apresenta correlação visível com a evolução temporal da mesma grandeza no espaço interior, tal como pode ser observado na Figura 4.24.

Um outro aspeto tido em consideração como variável potencialmente interessante para a descrição da percepção da qualidade do ar interior foi a taxa de renovação de ar.

A definição de ar viciado ou ar fresco está intimamente relacionada com o número de renovações de ar do espaço em questão e com a taxa de produção de dióxido de carbono, por via da atividade metabólica humana. Considerando uma situação em que se regista uma concentração de dióxido de carbono superior à concentração no exterior e uniformemente distribuída no interior do compartimento. A situação mais comum é a resultante da actividade metabólica de uma população humana. A partir do momento em que todas as pessoas abandonam a sala verifica-se um decaimento da concentração de dióxido de carbono. Não ocorrendo mais geração destas moléculas no interior e excluindo as hipóteses de deposição do gás e da sua absorção pelas paredes ou por qualquer outra superfície, o

comportamento da concentração no interior da espécie química considerada pode ser descrito através da Equação:

$$C(t) - C_{\infty} = -\tau \frac{dC(t)}{dt} \quad (4.27)$$

Sendo:

- τ , a taxa de renovação de ar;
- $C(t)$, a concentração de CO₂;
- $C_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} C(t)$

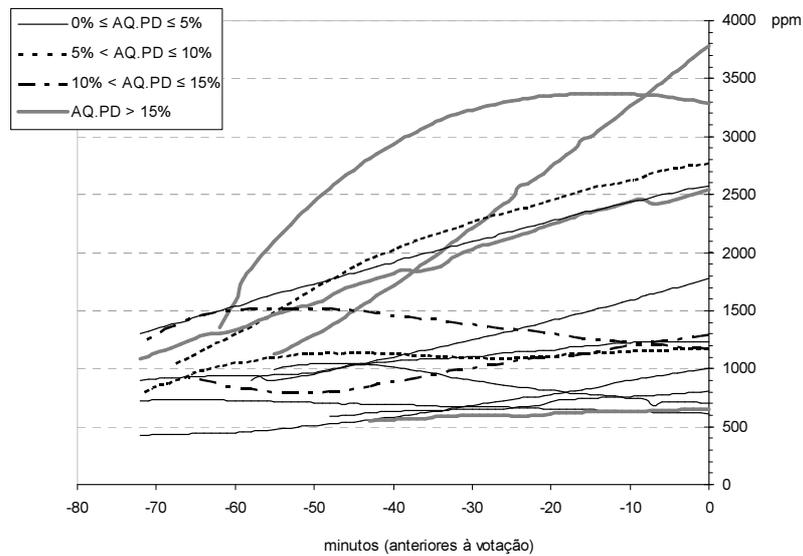


Figura 4.24 - Percentagem de insatisfeitos com a qualidade do ar interior em função da respetiva curva de concentração de dióxido de carbono no interior da sala. O instante $t = 0$ assinala o momento em que foram preenchidos os inquéritos de avaliação da percepção subjetiva.

Resolvendo a Equação (4.27) e tendo em consideração as respetivas condições (de fronteira) iniciais, obtém-se:

$$\ln \left(\frac{C(t) - C_{\infty}}{C_i - C_{\infty}} \right) = -\tau.t \quad (4.28)$$

sendo C_i , a concentração de CO₂ no início do decaimento;

Um dos métodos mais usados como referência para determinar a taxa de renovação de ar ou o tempo médio de vida do ar num espaço interior envolvem a utilização de gases traçadores, de acordo com os procedimentos descritos nas normas internacionais respetivas (ASTM E 741, 2006; ISO 12569, 2012). A utilização de técnicas de gases traçadores para medir taxas de ventilação efetivas apresenta um bom nível de concordância com os valores respetivos medidos com outras técnicas ou suando simulações numéricas (Buratti, Mariani, & Moretti, 2011; Sherman, 1990). Uma variante de um destes métodos

consiste na utilização do dióxido de carbono de carbono produzido pela atividade metabólica humana como gás traçador. A taxa de renovação de ar é determinada pela análise do decaimento do CO₂ a partir do momento em que todas as pessoas abandonem o espaço.

Para avaliar a aplicabilidade desta metodologia a salas de aula de edifícios naturalmente ventilados, ela foi primeiramente ensaiada num espaço interior de prestação de serviços. Os resultados são apresentados na Figura 4.25. As concentrações de CO₂ no interior da sala foram usadas para determinar a taxa de renovação de ar resultante das infiltrações do exterior e trocas gasosas com os espaços interiores confinantes. Os requisitos básicos que necessitam de ser cumpridos encontram-se definidos em duas normas (ASTM E 741, 2006; ISO 12569, 2012) no que concerne ao equipamento de teste, duração e frequência da amostragem, uniformidade de concentração de gás no espaço interior e metodologia de cálculo.

A utilização da técnica de decaimento do gás traçador em espaços interiores individuais de edifícios com múltiplas zonas individuais, apresenta como dificuldade adicional o facto de as trocas gasosas não ocorrerem apenas com o ar exterior, através da envolvente exterior do edifício, mas também para outros espaços interiores. Os percursos por onde pode ocorrer difusão de espécies químicas incluem, neste caso, frestas de portas e condutas de cablagens elétricas e de redes.

Em espaços com CO₂ gerado pelos utilizadores existe ainda um aspeto crítico adicional não contemplado nas normas: o facto de na maioria dos edifícios, os seus ocupantes não a abandonarem em simultâneo e demorarem algum tempo a fazê-lo, provocando um decaimento na concentração de CO₂. Dependendo da concentração máxima atingida no interior e do tempo que os ocupantes demoraram a abandonar o edifício, o valor de CO₂ no interior do edifício vazio, pode ser demasiado baixo para que se obtenha uma medição de decaimento fiável.

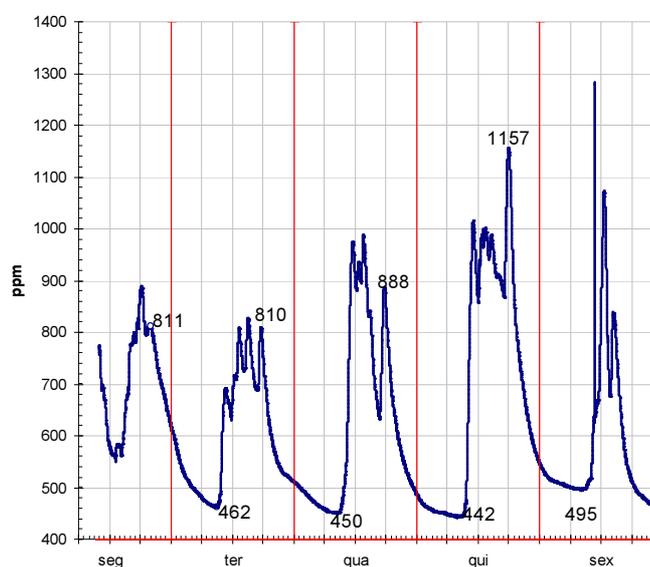


Figura 4.25 - Evolução semanal da concentração de dióxido de carbono num espaço interior, de prestação de serviços. Para cada dia pode verificar-se o início do decaimento da concentração de dióxido de carbono próximo das 18h.

A norma ASTM (ASTM E 741, 2006) estabelece como valor indicativo uma duração mínima do ensaio de 4 horas, considerando uma taxa média de renovação de ar de 0,25 h⁻¹ e considerando uma incerteza de 10% nos resultados obtidos para um intervalo de confiança de 95%.

A taxa de renovação de infiltração de ar registada para cada um dos decaimentos logarítmicos pode ser determinada através de uma regressão linear da curva respetiva apresentada na Figura 4.26. No caso dos ensaios efetuados verificou-se que à medida que a concentração no interior se aproxima da concentração de equilíbrio no exterior, verifica-se a ocorrência de algum ruído no valor calculado da constante de tempo do sistema. Na Figura 4.26 é patente este fenómeno quando o tempo de decaimento ultrapassa as 10 horas. Para outros espaços interiores, o intervalo de tempo após o qual se verifica a ocorrência deste fenómeno depende da taxa de renovação de ar em causa.

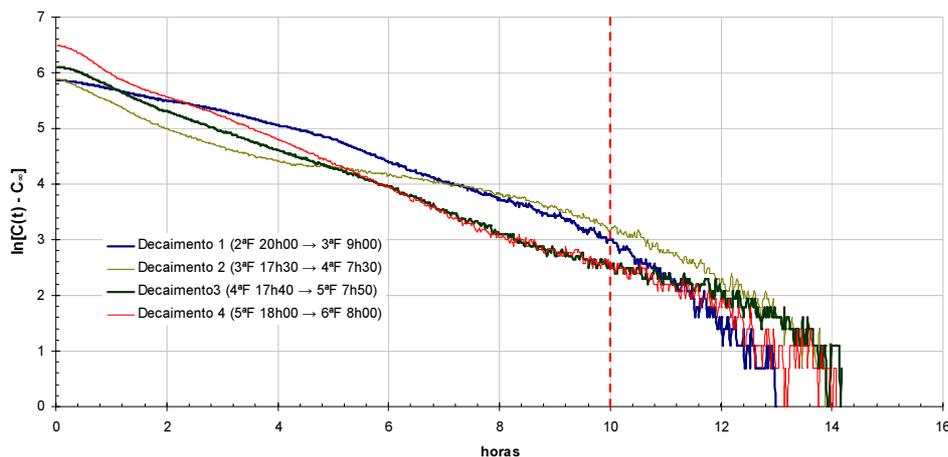


Figura 4.26 - Evolução temporal do logaritmo diferença de concentrações entre o interior e o exterior.

No caso do exemplo apresentado, as taxas de renovação / infiltração de ar observadas são relativamente baixas ($0,292 \text{ h}^{-1}$; $0,225 \text{ h}^{-1}$; $0,364 \text{ h}^{-1}$ e $0,406 \text{ h}^{-1}$, para as séries de decaimento de 1 a 4, respetivamente). O espaço interior foi alvo de obras de reconversão e as janelas exteriores são oscilobatentes, de alumínio lacado e vidro duplo com boa qualidade construtiva. Possui também uma lareira aberta, que apesar de nunca ter sido usada pode constituir a principal fonte de infiltração de ar. Contudo, as condições de renovação de ar durante o período diurno de ocupação são dinâmicas e diferentes das que se registam após as 18h. Cada série de decaimento de CO_2 foi obtida estando as janelas fechadas e a porta da sala igualmente fechada. Os resultados obtidos pelas séries permitem determinar qual a taxa de infiltração de ar no espaço em questão apenas nestas condições. Durante o período diurno há alterações nas condições de ventilação da sala. Na Figura 4.25, e essencialmente na 3ª, 4ª e 5ª feira, é visível o efeito da abertura e janela, efetuada diversas vezes a partir do meio-dia. Mesmo em casos em que a concentração de dióxido de carbono no interior é perturbada pela abertura de janelas é possível ainda assim determinar taxas médias de renovação de ar, selecionando convenientemente o período de amostragem para a análise de decaimento (Manuel Gameiro da Silva, 2011). No caso dos ensaios realizados em salas de aula esta determinação assume um nível de complexidade adicional, porque a seguir à aula em que é realizado o ensaio a sala será ocupada com uma nova população e as condições interiores serão alteradas. Para além disso, também durante o período correspondente à rampa ascendente da concentração de dióxido de carbono, as condições de ventilação natural não são constantes. A abertura e fecho janelas e de portas ou a sua colocação em posições de abertura intermédia são disso um exemplo. A análise efectuada em ensaios preliminares foi apresentada para fundamentar o motivo pelo qual, numa primeira abordagem, não foi usada a taxa de renovação de ar como variável candidata a possuir significância estatística para a perceção de qualidade do ar interior.

É importante mencionar neste ponto que as condições de ventilação durante a realização dos ensaios de campo são dinâmicas. Não é pretendido que sejam alteradas nem as rotinas de funcionamento das aulas, nem os graus de liberdade dos ocupantes em relação aos controlos ambientais, nos quais se incluem a abertura de janelas e porta de entrada. Estando uma ou mais janelas abertas para o exterior as condições de ventilação passam a estar dependentes também da velocidade e direção do vento no exterior. A alteração de qualquer parâmetro de controlo ambiental é registada manualmente no decurso do ensaio. Mas ainda assim, quer o nível de complexidade associado à determinação da taxa de ventilação para cada uma das diversas configurações observadas em cada sala, quer o nível de incerteza associado, faz com que a taxa de renovação de ar não seja uma variável interessante para descrever (a este nível) a perceção da qualidade do ar.

Para além da concentração de dióxido de carbono foram também medidas as partículas em suspensão no ar. Mais precisamente, foram medidas as PM1, PM2.5, PM5, e PM10 de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3.

Na análise aos resultados obtidos não foi possível encontrar qualquer correlação significativa entre os valores medidos e a perceção de qualidade do ar interior. A análise de significância estatística é apresentada na Tabela 4.12 e os votos da perceção subjetiva da qualidade do ar interior em função das várias dimensões de partículas em suspensão no ar interior são apresentados na Figura 4.27.

Tabela 4.12 - Correlações e valores-p entre as partículas em suspensão no ar e os votos de perceção subjetiva do ar interior.

	<i>ASt.Vt</i>		<i>ASm.Vt</i>		<i>AQ.Vt</i>	
	<i>R²</i>	<i>Valor-p</i>	<i>R²</i>	<i>Valor-p</i>	<i>R²</i>	<i>Valor-p</i>
<i>PM1</i>	0,0023	0,845	0,0073	0,727	0,0100	0,683
<i>PM2.5</i>	0,0000	0,993	0,0002	0,953	0,0010	0,900
<i>PM5</i>	0,0244	0,523	0,0395	0,415	0,0342	0,448
<i>PM10</i>	0,0446	0,386	0,0847	0,227	0,0722	0,266

Há diversos motivos que podem justificar a não inclusão da qualidade do ar interior num índice global da perceção da qualidade do ambiente interior.

O principal motivo é o seguinte: Considerando os quatro parâmetros ambientais que contribuem para a qualidade do ambiente interior: Conforto Térmico; Acústica; Luminosidade e Qualidade do Ar, há uma enorme diferença que separa estes parâmetros: A métrica de qualidade dos três primeiros é o Homem enquanto no último não é.

No caso do conforto térmico, os modelos e normas existentes foram construídos com base no corpo humano (perdas/ganhos térmicos do corpo humano, mecanismos de termoregulação humana, ...). O conceito de qualidade de um ambiente térmico coincide com a perceção humana da qualidade do mesmo ambiente.

No caso da acústica ou da luminosidade de um ambiente interior, os modelos e normas existentes foram construídos com base no ouvido e olhos humanos, respetivamente. Também nestes casos, o conceito de qualidade acústica ou luminosa de um ambiente interior coincide com a perceção humana da qualidade do mesmo ambiente.

No caso do ar interior e para uma situação de exposição de longa duração ao mesmo, há suficientes evidências que os seres humanos não conseguem ter a perceção da qualidade do ar nesse espaço confinado, quando se trate de contaminantes inodoros. Talvez o exemplo mais extremo seja o facto de, mesmo quando a qualidade da atmosfera interior é baixa, a ponto de se tornar tóxica, não é garantido que os ocupantes do espaço interior consigam detetar o nível de perigosidade presente no ar que respiram. Há diversos registos de mortes acidentais por intoxicação com monóxido de carbono nesta situação. A capacidade adaptativa da pituitária humana em exposições de longa duração desempenha neste caso um papel importante, mas ainda assim a conclusão permanece inalterada: Em situações de exposição prolongada a uma atmosfera interior o sistema olfactivo do ser humano não garante uma métrica completamente fiável da qualidade do ar interior.

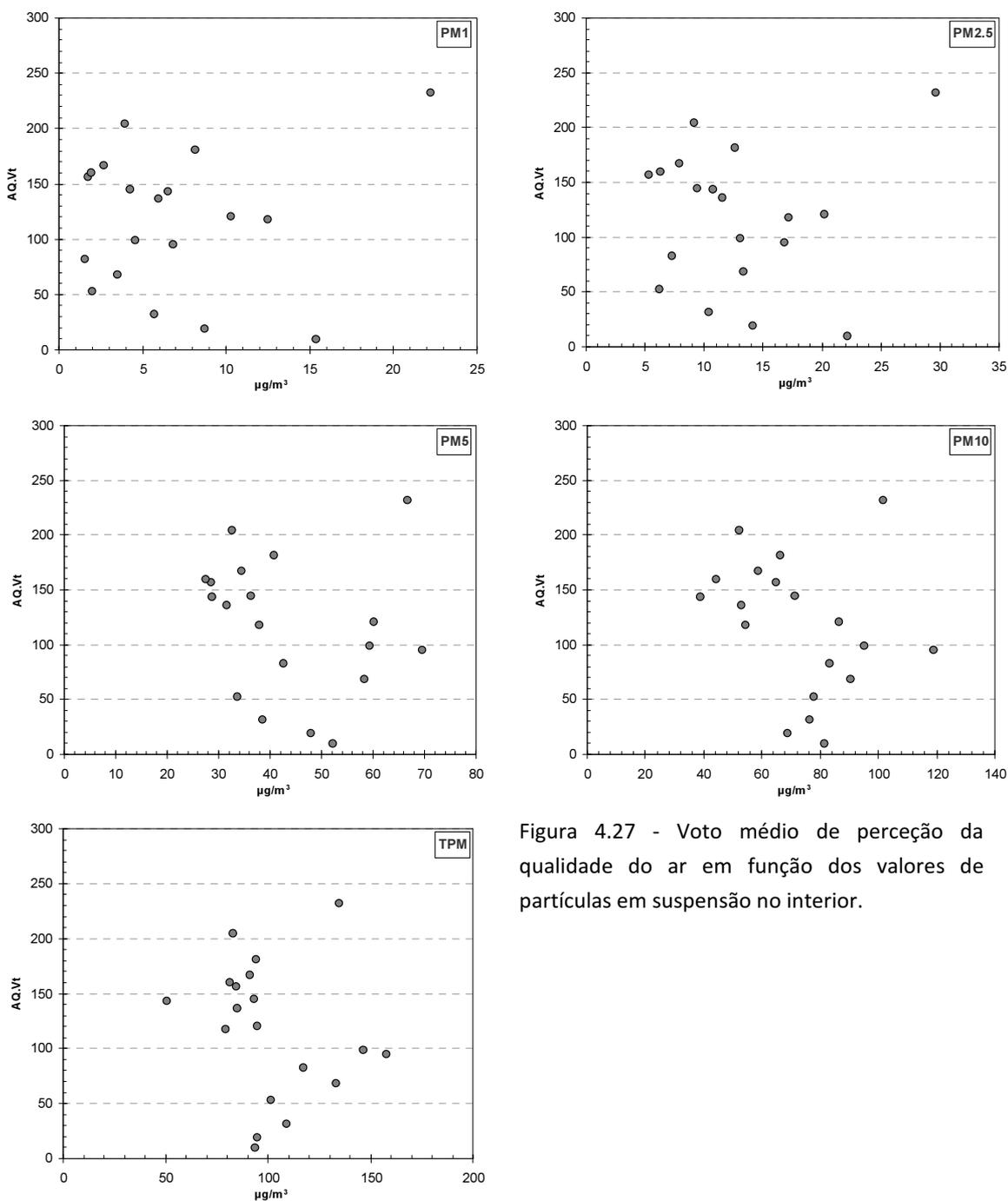


Figura 4.27 - Voto médio de perceção da qualidade do ar em função dos valores de partículas em suspensão no interior.

Outro motivo prende-se com a dificuldade em medir grandezas físicas que sejam descritoras da percepção de qualidade do ar. Pelo menos em relação às duas grandezas analisadas (dióxido de carbono e partículas em suspensão), a análise dos resultados obtidos, nas condições descritas, permite concluir que nenhuma delas é estatisticamente significativa

Ou seja, numa situação de exposição longa a um determinado ambiente interior, não foi encontrada nenhuma variável ambiental relacionada com a qualidade do ar que permita descrever a percepção de qualidade ou a percentagem de insatisfeitos com o mesmo. Também no caso da percepção olfativa, a sensibilidade da pituitária humana é muito superior à dos métodos instrumentais existentes. Os seres humanos conseguem facilmente detetar odores na faixa de concentrações de 1 parte por bilião (10^{12}) enquanto as melhores tecnologias analíticas existentes estão limitadas a aproximadamente 0,1 partes por milhar de milhão (10^9) (Spengler, Samet, & McCarthy, 2000). Para além disso, os odores são usualmente uma mistura complexa de várias componentes odoríferas, pelo que, sabendo-se à *priori* que nestas condições de ensaios só excepcionalmente seria detetada a prevalência de um cheiro em particular, a recolha de amostras de ar para subsequente análise química seria um exercício, mais que provavelmente, infrutífero.

Há ainda que ter em consideração a análise efetuada aos votos das percepções subjetivas da qualidade do ar. Esta permitiu concluir que a influência das componentes olfativa e ar fresco/viciado no resultado final variam consoante a disposição espacial dos indivíduos no interior do espaço. Ou seja, nas condições dos ensaios realizados, a influência da percepção de cheiros/odores na percepção do ar interior é pelo menos função de (*dose, tempo de exposição, distância à fonte de odor*). Verificou-se que o voto da percepção subjetiva de cheiros/odores pode ser estatisticamente não-significativo para o voto de qualidade do ar, numa situação em que a distância à fonte aumenta. Desta forma, qualquer modelo que possa vir a ser obtido com base em grandezas mensuráveis será ainda assim dependente da distribuição espacial dos seres humanos no interior do espaço.

Um motivo adicional prende-se com a elevada sobreposição que se registou entre a percepção da qualidade do ar interior e a percepção da qualidade do ambiente interior. Tal como foi apresentado anteriormente, os votos médios destas duas grandezas apresentam um coeficiente $R^2 = 0,80$.

Uma possível explicação para a sobreposição registada entre as variáveis "*ar interior*" e "*ambiente interior*" resulta da sobreposição semântica que por vezes existe entre os mesmos termos. Mencionam-se alguns exemplos: Uma expressão usada frequentemente para referir que o ambiente interior é tenso é: "lá dentro o ar está pesado".

Embora a expressão usada ("Qualidade do ar") no campo respetivo de preenchimento dos inquéritos de avaliação da percepção subjetiva esteja tecnicamente correta, é possível que ela induza outro tipo de interpretações não-desejadas pelo autor. É também possível que o nível de sobreposição semântica varie de acordo com a língua em que o inquérito esteja a ser realizado.

Para tentar evitar efeitos de sobreposição semântica entre "*ar interior*" e "*ambiente interior*" foram equacionadas algumas possíveis soluções respeitando a premissa de estarem escritas em português simples e que não suscitem dúvidas de interpretação. Por exemplo, solicitar ao inquirido para avaliar a qualidade do "*Ar que respira*", "*Ar nos pulmões*" ou "*Ar inalado*". Se esta pequena alteração conduzir o inquirido a inalar uma vez antes de preencher a resposta para conscientemente se focar sobre a qualidade do ar atmosférico que lhe está a entrar nos pulmões, então esse é indicador de que a pergunta foi formulada corretamente. Este será sem dúvida um aspeto a ter em consideração em ensaios futuros.

Ambiente Térmico

O ambiente térmico constitui uma referência de entre os quatro que contribuem para a perceção de qualidade do ambiente interior. Para este ambiente é possível prever o voto médio (*Th.PMV*) e a percentagem de insatisfeitos (*Th.PPD*) para um domínio bastante abrangente de espaços interiores, condições térmicas e tempos de exposição ao ambientes em causa. Estes dois índices encontram-se ainda definidos em normas internacionais.

As grandezas que permitem o cálculo dos índices de temperatura e de conforto térmico foram registadas em cada ensaio de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3. Como tal, faz sentido que sejam comparados os resultados dos votos térmicos médios expressos nos inquéritos com os dos respetivos votos térmicos médios previsíveis calculados de acordo com a norma respetiva (ISO 7730, 2005). Os valores comparativos são apresentados graficamente na Figura 4.28.

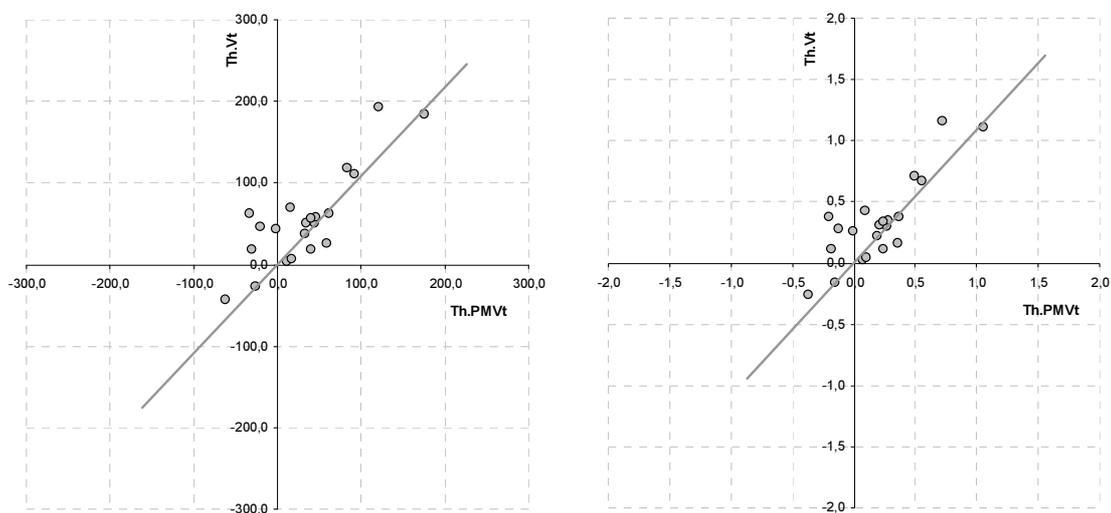


Figura 4.28 - Voto térmico médio em função do voto médio previsto, calculado de acordo com a norma ISO (ISO 7730, 2005). Do lado esquerdo são apresentados os valores numa escala de [-500 ; +500] usada para a recolha de todas as avaliações subjetivas. Do lado direito, os mesmos valores são apresentados, de forma equivalente, na escala de [-3 ; 3] comumente usada em estudos de ergonomia do ambiente térmico.

Tal como foi mencionado anteriormente, todos os registos de voto expressos nas escalas contínuas foram convertidos para um valor numérico compreendido no intervalo de [-500 ; +500]. Contudo, no caso do conforto térmico, é frequentemente usada uma escala de sete pontos. Ambas as escalas são perfeitamente equivalentes e a operação de conversão é de aritmética simples. Apenas por uma questão de facilidade de interpretação são neste caso apresentados dois gráficos equivalentes lado-a-lado. Em ambos os gráficos da Figura 4.28 é apresentada a reta de regressão linear entre o *Th.Vt* e o *Th.PMV* com interseção na origem. Em relação à perceção do ambiente térmico expressa nos inquéritos, o índice *Th.PMV* apresenta $RMSE = 38,10$ na escala de [-500 ; 500] (ou $RMSE = 0,229$ na escala de [-3 ; 3]); $R^2 = 0,7037$; $F(1,20) = 69,04$; $valor-p = 7,24 \times 10^{-8}$.

O $Th.PMV$ pode ser calculado com base nas seguintes grandezas físicas: Temperatura do ar, Temperatura média radiante, Humidade do ar e Velocidade do ar, Nível de atividade metabólica e nível de vestuário dos participantes. As grandezas temperatura do ar; temperatura média radiante; humidade e velocidade do ar têm que ser medidas *in-loco* com recurso a instrumentação adequada para o efeito.

O nível de atividade metabólica pode ser estimado através da utilização de tabelas de atividades específicas com precisão de $\pm 20\%$ (ISO 8996, 2004). Sendo necessário um nível de precisão mais elevado, pode ser calculado com base na mesma norma internacional, a partir do registo do batimento cardíaco em condições definidas (precisão de $\pm 10\%$) ou ainda com base na medição efetiva do consumo de oxigénio (precisão de $\pm 5\%$). Os dois últimos processos mencionados para a determinação do nível de atividade metabólica são intrusivos. Foram excluídos como hipótese para a determinação da atividade metabólica nas condições dos ensaios de campo realizados, porque iriam colidir com o normal funcionamento da aula. O nível de atividade metabólica foi desta forma determinado com recurso à utilização das tabelas de atividade da norma ASHRAE (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2010).

No quadro do presente trabalho, a determinação do nível de atividade metabólica apresenta uma grande simplificação: Todos os discentes, presentes no interior da sala estão constringidos ao mesmo nível de atividade. Tal já não acontece relativamente ao nível de isolamento proporcionado pelo vestuário. A liberdade de escolha de indumentária repercute-se na diversidade de níveis individuais de isolamento térmico do vestuário.

O nível de vestuário é um elemento-chave na aplicação do *standard* de conforto térmico adaptativo. Este *standard*, por sua vez, encerra um potencial muito grande de poupança de energia e consequentemente de redução das emissões de gases de estufa associadas à manutenção dos níveis de conforto térmico no interior de edifícios. O potencial de poupança de energia resulta do facto de, pela aplicação deste *standard* a temperatura interior de conforto ser ajustada para cima em dias mais quentes e para baixo em dias mais frios. A importância do *standard* de conforto térmico adaptativo é ainda enfatizada pelo facto de nos últimos anos o número de aparelhos de ar condicionado ter vindo a aumentar nos países do sul da Europa, sendo que nesta zona do globo, o setor dos edifícios é responsável por 40% das necessidades energéticas globais. Este facto cria importantes dificuldades nas horas de ponta, problema que tem por consequência um aumento do preço da energia elétrica e uma deterioração do equilíbrio energético nesses países. Consequentemente deverá ser dada prioridade a estratégias que contribuam para melhorar o comportamento térmico dos edifícios (Directive 2010/31/EU, 2010).

Mas para que se possa determinar corretamente a temperatura interior de conforto, o conhecimento do nível de vestuário torna-se crítico. O conhecimento antecipado do nível de vestuário que uma população irá envergar permitiria, ajustar a temperatura de edifícios naturalmente ventilados ou funcionando em modo híbrido para valores de conforto, com uma antecipação que seria a proporcionada pelo nível de antecipação possível no vestuário. No âmbito do presente trabalho é demonstrado que é possível prever o nível de vestuário da população com um dia de antecedência, ou mais, dependendo do nível de incerteza associado às previsões meteorológicas.

A forma mais precisa de se determinar o valor do isolamento térmico proporcionado por um conjunto de peças de vestuário é através de ensaios em laboratório e/ou numa câmara climática. Nessas condições, é possível avaliar o nível de isolamento térmico de qualquer combinação de peças de

vestuário, nível de trabalho, velocidade do vento e temperatura (Goldman, 1981). Alguns dos procedimentos mais rigorosos para a determinação do nível de vestuário envolvem medições com manequins aquecidos (McCullough & Jones, 1985; B.W. Olesen & Nielsen, 1983) ou medições usando sujeitos ativos (Gonzalez, Nishi, & Gagge, 1974; Nishi, Gonzalez, & Gagge, 1978). A utilização de manequins não é adequada neste tipo de trabalho de campo devido à diversidade de combinações de peças de roupa usadas pela população em estudo. A utilização de sujeitos ativos foi descartada porque envolvia um nível de intrusão das medições experimentais, que não seria autorizado num ensaio de campo realizado em condições normais do dia a dia. Desta forma, neste âmbito nenhum destes métodos se apresenta como uma opção viável. No âmbito do trabalho de campo realizado, cada pessoa era livre de fazer as suas escolhas relativamente ao nível de vestuário usado, sem qualquer espécie de pré condicionamento. O mesmo se pode referir em relação à possibilidade de alterar o nível vestuário em função do ambiente envolvente.

O vestuário pode ser definido como um ambiente pessoal portátil. Torna possível a adaptação do ser humano a praticamente todos os ambientes conhecidos. Não só no interior de edifícios e veículos, mas também no ambiente exterior. De um ponto de vista de gestão da energia, o vestuário proporciona uma forma barata e limpa de controlar o microclima individual (Tamura, 2007). A importância do vestuário é ainda enfatizada pelo facto de o maior impacto exercido pelos edifícios durante o seu ciclo de vida decorrer da energia consumida para criar um microclima interior confortável (C.-A. Roulet, 2001).

Do ponto de vista da teoria do conforto térmico, o vestuário pode ser definido como uma camada de isolamento térmico uniformemente interposta entre a superfície do corpo humano e o ambiente térmico exterior que o envolve (Fanger, 1970). Esta é uma definição física de vestuário que admite abordagens e definições complementares. O vestuário pode ser analisado pelas subclasses de critérios sociais que cada uma das peças de roupa, bem como a indumentária no seu todo tem que cumprir. As subclasses de critérios sociais marcam definitivamente a compra do vestuário ou a sua seleção a partir do guarda roupa disponível. As subclasses de critérios identificadas a este nível são: Personalidade; Estatuto social; Grupo de culto; Estado de alma; Religião; Estado civil, Organizacional e Código de indumentária profissional obrigatório. Ao nível destas duas últimas diferencia-se a subclasse de indumentária organizacional da indumentária profissional obrigatória. No caso da primeira, a seleção de indumentária não é condicionada pelo cumprimento de códigos de vestuário, mas sim pelas tarefas que o indivíduo irá desempenhar. Critérios adicionais relacionados com a saúde e segurança podem ser relevantes ou até obrigatórios neste caso. Mas, em todo o caso, uma seleção com base em critérios puramente organizacionais permite que a indumentária possa ser ajustada pelo indivíduo ao melhor compromisso entre as tarefas que irá desempenhar e as restantes subclasses de critérios que lhe sejam relevantes. No último caso (código de vestuário obrigatório), o indivíduo encontra-se obrigado a usar uma determinada indumentária ou farda no âmbito das tarefas profissionais que desempenha. O nível de adequação da indumentária às condições térmicas do meio envolvente pode ser substancialmente diferente nestes dois casos.

Um outro aspeto que desempenha um papel importante na seleção do vestuário é a moda. Este aspeto é de difícil definição. Para alguns a moda é uma de arte e para outros é apenas uma indústria ou um negócio. No contexto da presente análise define-se a moda como sendo um método usado para realçar ou esconder algumas características pessoais da fisionomia individual. Este aspeto, presente aquando do momento de tomar decisões de seleção de indumentária não é quantificável em termos de ponderação numérica e é transversal a todas as subclasses de critérios sociais. Desta forma, todos os

dias a maioria das pessoas tem que tomar decisões multicritério no que concerne à escolha do vestuário. Este processo de decisão envolve a informação climática disponível, exterior e interior, os tempos de exposição a cada ambiente, bem como conjuntos de subclasses de critérios sociais que a indumentária tenha que cumprir. A ponderação relativa dos critérios relevantes combinada com a exatidão da informação disponível acerca dos ambientes térmicos dita o resultado final da escolha de indumentária perante as opções que se apresentem disponíveis. Independentemente dos critérios que presidiram ao processo de decisão multicritério, o conjunto final de peças de vestuário que formará a indumentária completa pode ser quantificado numericamente em termos de isolamento térmico e em unidades adequadas: clo ou $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$.

As unidades clo e met foram propostas (Gagge et al., 1941) como medidas do nível de isolamento do vestuário e da atividade metabólica, respetivamente. Ambas as unidades têm sido amplamente usadas internacionalmente para representar as duas quantidades e foram adotadas por algumas normas internacionais na área do conforto térmico (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2010; ISO 7730, 2005). A unidade met representa a quantidade de atividade metabólica que um indivíduo médio realiza enquanto sentado, em situação de repouso e em condições de neutralidade térmica. Um met é equivalente a $58,15 W/m^2$ ou $50 kcal/m^2 \cdot h$. A unidade clo representa o isolamento proporcionado pelo vestuário que mantém um indivíduo sentado e em situação de repouso, confortável num espaço normalmente ventilado (velocidade do ar de $0,1 m/s$) à temperatura de $21 ^\circ C$ e humidade relativa inferior a 50% . Foi assumido (Gagge et al., 1941) que 24% das perdas metabólicas ocorrem por evaporação a partir da pele, sendo os remanescentes $44,2 W/m^2$ dissipados através do vestuário por condução, convecção e radiação. É geralmente aceite que a temperatura média da pele de uma pessoa se situa no intervalo de 33 a $34 ^\circ C$ (Fanger, 1973) desde que a pessoa se encontre em situação fisiológica de conforto e que não transpire nem trema. Assumindo uma temperatura média da pele de $33 ^\circ C$, o isolamento total proporcionado pelo vestuário e camada de ar é dado por:

$$I_t = (33 - 21)/44,19 = 0,2715 m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1} \quad (4.29)$$

Foi assumido que o isolamento térmico proporcionado pelo ar envolvente ao corpo humano, nesta condição é: $I_a = 0,1206 m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$. O isolamento térmico proporcionado pelo vestuário pode, nestas condições ser calculado a partir de uma simples subtração aritmética, resultando: $I_{cl} = I_t - I_a = 0,151 m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$. Consequentemente, $1 clo$ é igual a $0,151 m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$. Transpondo este valor para um conjunto de peças de vestuário, tal corresponde a uma indumentária composta por roupa interior de manga curta, camisa, calças, casaco, meias e sapatos (ISO 7730, 2005).

O nível de vestuário foi determinado com a utilização do questionário de peças de roupa apresentado na Figura 4.29. A listagem de peças de roupa foi adaptada a partir da norma (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2010)

Por uma questão de facilidade de preenchimento dos inquéritos, pretendeu-se reduzir o número de opções disponíveis e adequá-las ao contexto da população em estudo. Para tal, foi efetuado um estudo prévio com a realização de 272 inquéritos, em condições semelhantes às dos ensaios de campo, para avaliação do nível de adequação dos inquéritos aos objetivos. No caso do vestuário, foi explicado aos participantes, aquando do preenchimento dos inquéritos, que quer a roupa interior, quer os sapatos, já eram contabilizados de forma automática. A única questão não contemplada no inquérito prendeu-se com a utilização de sandálias, que surgiu pontualmente em dois ensaios realizados em dias mais quentes. Tratando-se de situações pontuais, estes factos foram registados manualmente nos

inquéritos respetivos, aquando da recolha dos mesmos e a correção respetiva foi contabilizada nos cálculos efetuados posteriormente.

Vestuário

Calças	<input type="checkbox"/>	Camisola Interior	<input type="checkbox"/>	Camisola Fina	<input type="checkbox"/>
Saia	<input type="checkbox"/>			Camisola Normal	<input type="checkbox"/>
Calções	<input type="checkbox"/>	T-Shirt	<input type="checkbox"/>	Camisola Grossa	<input type="checkbox"/>
Vestido	<input type="checkbox"/>	Camisa	<input type="checkbox"/>		
Fato	<input type="checkbox"/>			Casaco	<input type="checkbox"/>

Figura 4.29 - Lista de peças de vestuário usada para determinação do nível de isolamento da roupa

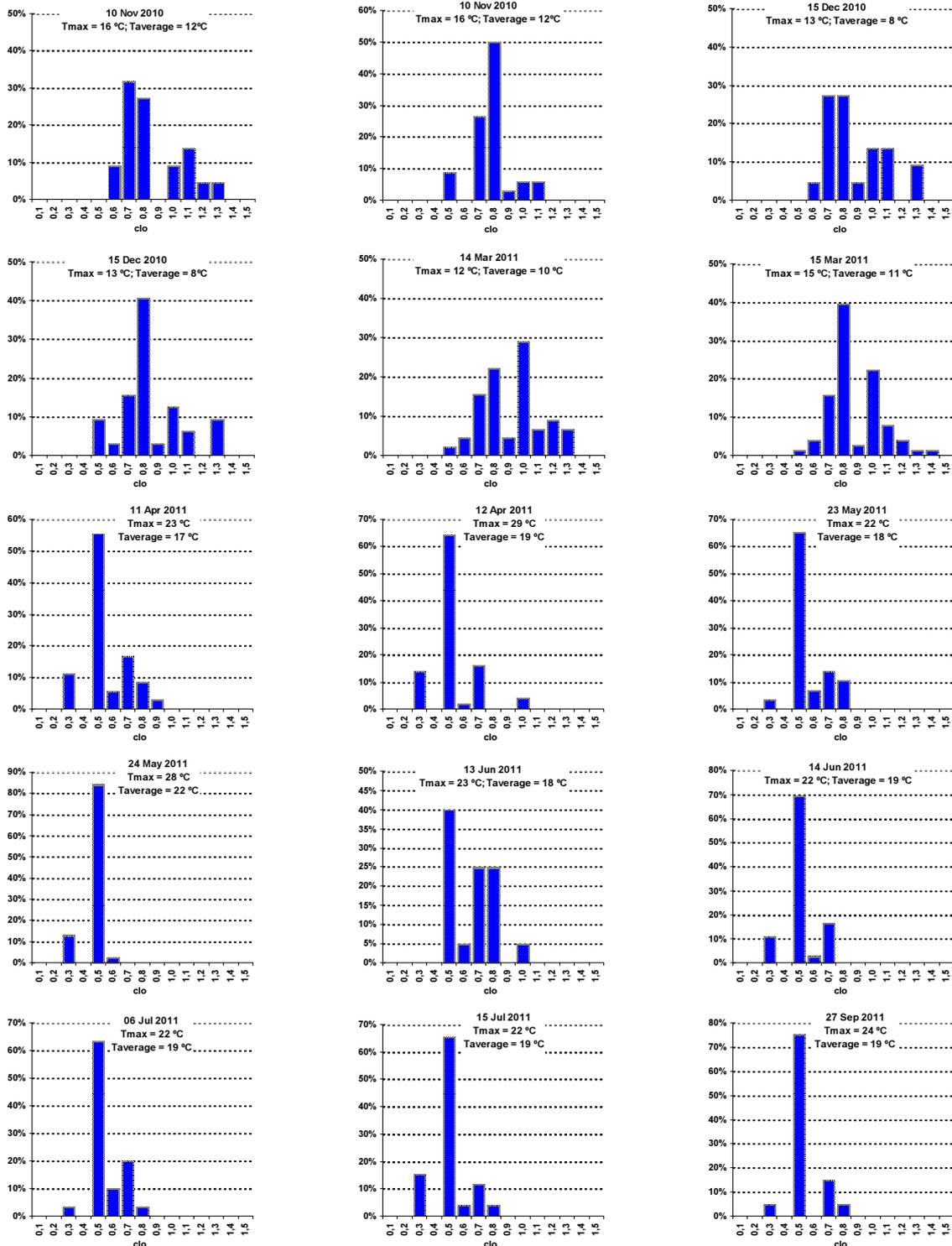
O valor do nível de vestuário foi determinado usando tabelas de níveis de isolamento das peças individuais de roupa (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2010). Usando esta metodologia a norma apresenta um valor de incerteza de $\pm 20\%$ para o valor obtido do nível de isolamento da indumentária. As explicações para este nível de incerteza apontam para as diferenças de tecidos, materiais de fabrico, espessuras e variações no conjunto das peças usadas. Estas diferenças provocam modificações na sub-camada de ar existente abaixo da camada externa do vestuário e que por sua vez influencia o nível de isolamento proporcionado pelo vestuário (Craig Morgan & de Dear, 2003). Outra possível contribuição para o nível de incerteza advém da forma subjetiva como a adjetivação "*fin*", "*normal*" ou "*grossa*" é interpretada.

Comportamentos adaptativos

Foi observado que algumas pessoas alteravam o seu nível de vestuário através do ato de despir o casaco, imediatamente após a entrada na sala e previamente a ocuparem o seu lugar, sentadas. Este tipo de comportamento é consistente com os observados em outros trabalhos de campo realizados em ambiente de escritórios, onde apenas ajustes menores ao nível de vestuário foram registados entre os registos matinais e os registos efetuados da parte da tarde (Rowe, 2001). Mas, para além do comportamento mencionado, não se verificaram outras alterações do nível de vestuário após os primeiros minutos de início efetivo das aulas ou exames. Estas observações consubstanciam a ideia que, de facto as pessoas fazem um número de alterações negligenciável ao seu nível de vestuário se o seu horizonte temporal de exposição a esse ambiente for de uma ordem de grandeza horária, sugerindo que o vestuário não é usado para ajustar o conforto térmico a esta escala temporal (Baker & Standeven, 1996). Outros comportamentos de adaptação dos ambientes térmico, acústico, luminoso e da qualidade do ar eram possíveis de ser realizados pelos ocupantes do espaço interior. Esses comportamentos incluíam a abertura e fecho de janelas ou da porta da sala; ligar, desligar ou regular os radiadores do sistema de aquecimento; regulação de estores e persianas ou ainda ligar/desligar as luzes do quadro e ligar/desligar parcial ou totalmente as luzes da sala.

A abertura de janelas e porta(s) conjugada com o ajuste de estores ou persianas foram os comportamentos adaptativos mais frequentemente registados no decurso dos ensaios efetuados. Nos dias mais quentes, a regulação das janelas, porta e controlo do sombreamento aparentemente correspondia ao melhor compromisso entre os ambientes térmico e acústico. A abertura das janelas e

portas era ditada pela necessidade de ajustar o ambiente térmico e o seu fecho durante alguns períodos de tempo provocado por questões de ininteligibilidade da fala. A ponderação destes dois fatores depende da intensidade de cada um dos estímulos de desconforto em questão. Observações do trabalho de campo indicam que, quando os estudantes no interior da sala se encontram a realizar um exame, as janelas e porta encontram-se fechadas, em situações de ambientes térmico e acústico que numa aula normal ditariam a abertura das mesmas.



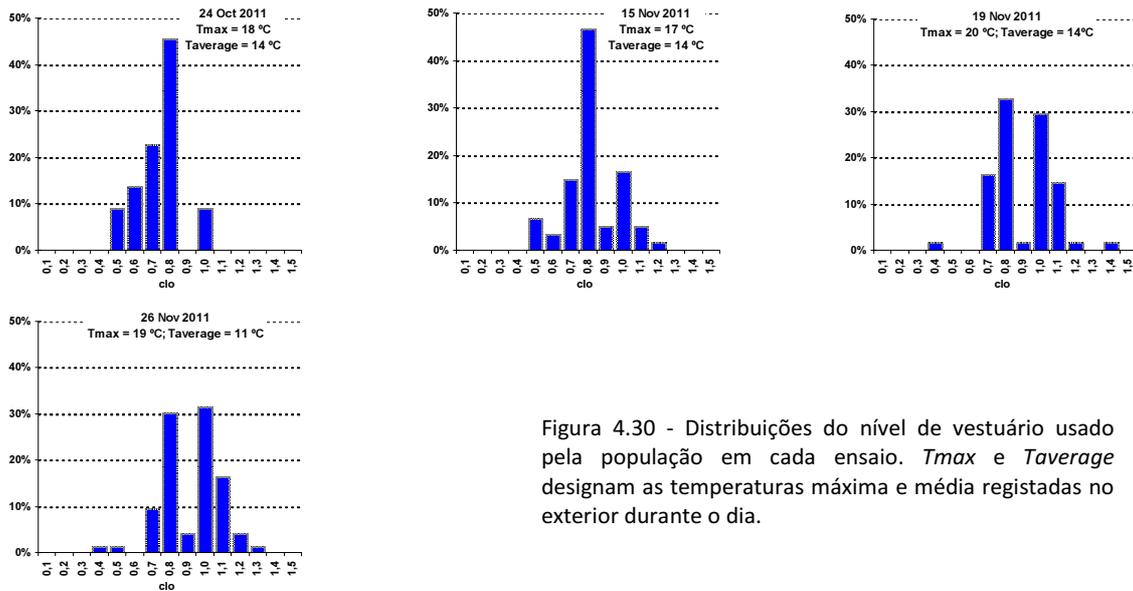


Figura 4.30 - Distribuições do nível de vestuário usado pela população em cada ensaio. *Tmax* e *Taverage* designam as temperaturas máxima e média registadas no exterior durante o dia.

Cada indivíduo possui liberdade para escolher o lugar na sala, de acordo com as suas preferências. Esta escolha pode ser efetuada sem restrições nas aulas normais. Nos exames, a liberdade de escolha é restrita aos lugares previamente designados pelo professor ou previamente assinalados com uma folha de prova. Em condições de aula normal, o(a) aluno(a) pode ainda trocar de lugar se por algum motivo estiver desconfortável com algum dos estímulos do ambiente interior. No entanto, nunca foi registada uma troca de lugar no decurso dos ensaios realizados.

O nível de atividade metabólica não é uma variável que pudesse ser usada para efetuar adaptação térmica. Todos os ensaios foram realizados ou em aulas teóricas ou em situações de exames, para que tal não pudesse acontecer. Desta forma, todos os indivíduos no interior da sala estavam compelidos a realizar a mesma atividade sedentária correspondente a um nível de atividade metabólica de 1,2 *met* (ISO 7730, 2005). Este valor, obtido de acordo com as tabelas de referência para vários tipos de atividades tipificadas apresenta uma incerteza de $\pm 20\%$ (ISO 8996, 2004).

A observação dos resultados dos inquéritos mostrou que a variância do nível de vestuário é menor nos dias mais quentes do que nos dias mais frios, tal como apresentado na Figura 4.31.

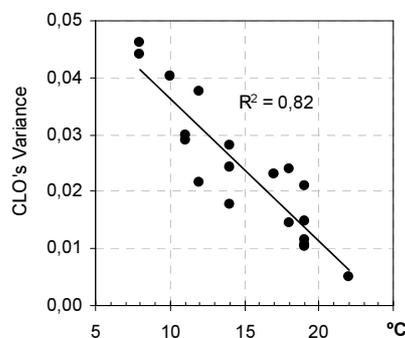


Figura 4.31 - Variância do nível de vestuário (em *clo*) em função da temperatura média exterior registada no dia.

A uniformidade do vestuário aumenta com a temperatura exterior média diária, mesmo na ausência de qualquer código de vestuário ou farda. Este resultado é expectável na medida em que nos dias mais quentes há uma redução do número de peças individuais de roupa presentes em cada uma das indumentárias individuais. Uma constatação dos trabalhos de campo revelou que para esta população há uma indumentária que é claramente dominante nos dias de maior calor: calças de ganga e *t-shirt*.

O nível de isolamento do vestuário foi analisado em função de: temperatura máxima exterior registada durante o próprio dia ($maxT_{day,x}$); temperaturas exteriores médias dos 7 dias precedentes ($T_{day,x-1}, T_{day,x-2}, \dots, T_{day,x-7}$); temperatura efetiva no interior da sala (ET) e a média móvel exponencialmente ponderada das temperaturas médias diárias no exterior (T_{rm}).

A média móvel usada é semelhante a uma série de decaimento de meia-vida tal como apresentado na equação seguinte.

$$\begin{aligned} T_{rm} &= (1 - \alpha)T_{day,x-1} + \alpha T_{rm-1} \\ &= (1 - \alpha)(T_{day,x-1} + \alpha T_{day,x-2} + \alpha^2 T_{day,x-3} + \dots) \end{aligned} \quad (4.30)$$

Foi demonstrado (M.A. Humphreys, 1973) que, para este efeito, a meia-vida de uma média móvel de temperaturas médias é aproximadamente $0.69/(1 - \alpha)$. A constante α usualmente empregue em estudos de conforto térmico adaptativo, é 0,80. Tal corresponde a uma meia-vida de 3,5 dias.

A escolha destas variáveis como candidatas a descrever com rigor o nível de vestuário usado por uma população foi assente na informação de que as pessoas dispõem, aquando do processo de tomada de decisão em relação à indumentária que terão que usar. A inclusão da média móvel de temperaturas é justificada pelo facto de ser usada nos cálculos de modelos de conforto térmico adaptativo. Cada uma destas variáveis será analisada em maior detalhe adiante, bem como o significado físico da sua contribuição para o nível de vestuário.

Foi observado que a temperatura efetiva no interior da sala e a temperatura máxima registada no exterior durante o dia analisado possuem um idêntico nível de correlação com o isolamento do vestuário usado no interior da sala aquando do momento de resposta aos inquéritos. Nota-se um decaimento gradual na correlação à medida que vão sendo consideradas temperaturas médias exteriores cada vez mais distantes no tempo em relação ao dia de ensaio.

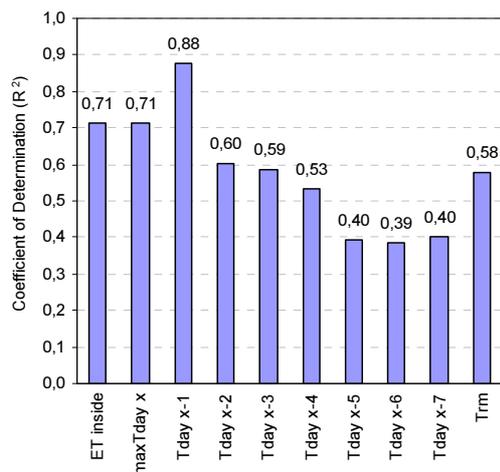


Figura 4.32 - Coeficientes de determinação (R^2) entre o valor médio do nível de vestuário (clo) em cada ensaio e os valores correspondentes a: Temperatura efetiva no interior (ET); Temperatura exterior máxima no próprio dia ($maxT_{day,x}$); Temperaturas médias diárias dos dias precedentes ($T_{day\ x-1}, \dots, T_{day\ x-7}$); Média móvel ponderada exponencialmente das temperaturas médias diárias (T_{rm}).

Foram implementadas regressões lineares múltiplas e foi feita alguma análise estatística usando as várias variáveis candidatas. As temperaturas médias: $T_{dia,x-2}$ e temperaturas dos dias anteriores não apresentaram suficiente nível de significância estatística para serem incluídos no modelo: $T_{dia,x-2}$ *valor-p* = 0,912; $T_{dia,x-3}$ *valor-p* = 0,808; $T_{dia,x-4}$ *valor-p* = 0,924; $T_{dia,x-5}$ *valor-p* = 0,120; $T_{dia,x-6}$ *valor-p* = 0,414; $T_{dia,x-7}$ *valor-p* = 0,963.

A média móvel ponderada exponencialmente também não apresentou suficiente significância estatística para ser considerada no modelo. Esta variável apresenta um valor *valor-p* de 0,114, quando combinada num modelo com a variável estatisticamente mais significativa ($T_{dia,x-1}$). Esta fraca performance de T_{rm} como descritora do nível de isolamento do vestuário, quando comparada com a temperatura média diária no exterior, foi também observada por outros autores (Haldi & Robinson, 2011).

O melhor modelo encontrado usando a metodologia descrita ($F=75,4$, *Valor-p* < 0,00000001) apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0,904. As variáveis com significância estatística para o mesmo são: $maxT_{dia,x}$ ($R^2 = 0,71$; *valor-p*=0,047446) e $T_{dia,x-1}$ ($R^2 = 0,88$; *valor-p* = 0,000034). O resultado é apresentado na equação seguinte.

$$clo = 1.48 - 0.04272 \cdot T_{day,x-1} - 0.009827 \cdot \max T_{day,x}$$

O modelo encontrado mostra que a temperatura média exterior do dia anterior possui um peso maior (81%) do que a temperatura máxima do próprio dia (19%) no nível de isolamento do vestuário envergado pela população. A utilização da temperatura máxima registada no exterior durante esse dia é aqui justificada pelo facto de as informações meteorológicas mais usadas para as previsões do dia seguinte serem: a temperatura máxima e a ocorrência (ou não) de pluviosidade. Assumindo que as previsões meteorológicas para o dia seguinte são fidedignas e precisas, este resultado pode indicar que, ainda assim, a população em estudo confia mais na sua memória térmica recente (representada por $T_{dia,x-1}$) do que em previsões meteorológicas fiáveis para o dia seguinte.

A inclusão da variável $maxT_{dia,x-1}$ produz uma variação de 30,1% no coeficiente da variável $T_{dia,x-1}$, quando comparando o resultado obtido pelo modelo apresentado acima com o de um modelo univariado

considerando apenas a variável estatisticamente mais significativa. Efetuando a mesma análise para o termo independente, verifica-se que o mesmo não é afetado pela utilização de um modelo univariado ou bi-variado.

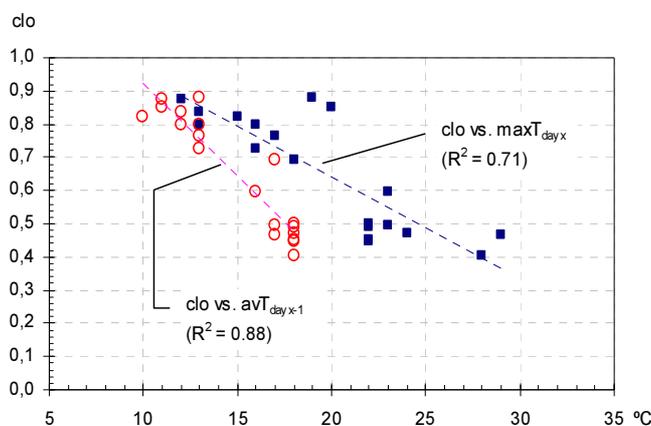


Figura 4.33 - Regressões lineares univariadas entre o nível de vestuário e as duas variáveis estatisticamente significativas: A temperatura máxima do próprio dia ($\max T_{day\ x}$) e a temperatura média do dia anterior ($avT_{day\ x-1}$).

O emprego de regressões lineares múltiplas implica assumções de normalidade e independência das variáveis. Na prática, a hipótese de relação linear entre variáveis pode virtualmente nunca conseguir ser confirmada. Em todo o caso, a Figura 4.33 mostra que pelo menos não há nenhuma curvatura evidente em nenhuma das variáveis independentes. Quanto à condição de normalidade, as duas variáveis presentes no modelo apresentam um coeficiente de correlação significativo entre elas ($R^2 = 0,63$), o que de alguma forma é uma debilidade do modelo apresentado. Este fator tem como consequência que possa ser discutível o nível de estabilidade dos coeficientes apresentados no modelo. Ainda assim, este resultado era de todo expectável, uma vez que é perfeitamente normal que a temperatura exterior do dia de amanhã possua algum nível de correlação com a mesma temperatura, mas que se faz sentir hoje. Estes resultados são consistentes com outros trabalhos (Craig Morgan & de Dear, 2003) desenvolvidos na mesma área e apresentam um bom suporte para as hipóteses da "memória térmica recente" e "previsões meteorológicas" no modelo do nível de vestuário.

A associação estatística entre o nível de isolamento do vestuário usado e a temperatura efetiva no interior da sala foi também analisada. O modelo de regressão foi alargado de forma a incluir a temperatura efetiva. Com a inclusão deste índice no grupo das outras variáveis já analisadas verificou-se que apenas a temperatura média do dia anterior apresentava significância estatística em relação ao nível de vestuário ($T_{dia\ x-1}$ valor- $p = 0,0090$). A fraca correlação entre o valor de clo e a temperatura equivalente no interior é consistente com observações efetuadas no âmbito de trabalhos efetuados por outros. Em ensaios de campo realizados nas habitações das pessoas e nos escritórios onde trabalhavam, constatou-se que os votos de sensação térmica apresentavam uma correlação fraca com o índice temperatura operativa e com os votos previstos (Oseland, 1995). Outros resultados sugerem ainda que nenhuma relação aparente, estatística ou outra, existe entre o valor médio de clo e as temperaturas interiores, independentemente do intervalo de tempo aplicado. Estes resultados também indiciam que a memória térmica recente representa o fator preponderante no nível de vestuário (Craig Morgan & de Dear, 2003), mesmo em edifícios climatizados por ventilação forçada e onde as pessoas têm que cumprir códigos de vestuário rigorosos.

É inquestionável que o clima interior exerce uma influência no nível de vestuário usado pelas pessoas. As condições térmicas no interior influenciam diretamente as temperatura e humidade da pele. Por sua vez, estas duas têm um impacto direto no balanço térmico do corpo humano, que por sua vez é o mecanismo principal do desconforto térmico (Craig Morgan & de Dear, 2003).

Tabela 4.13 - Valores observados com relevância para o ambiente térmico. O campo hora designa o instante do dia em que os inquiridos forma respondidos. As temperaturas ($\max T_{dia,x}$; $T_{dia,x-1}$ e $T_{hora,h-1}$) são apresentadas em °C. $T_{hora,h-1}$ designa a temperatura exterior à hora de início da aula. CLO designa o nível de vestuário nessas mesmas unidades

Estação	Data	Hora	N	N/Nmax	$\max T_{dia,x}$	$T_{hora,h-1}$	$T_{dia,x-1}$	CLO
Outono	10-11-2010	12:10	22	26%	16	14	13	0,80
	10-11-2010	16:26	34	63%	16	15	13	0,73
	15-12-2010	12:30	22	26%	13	10	12	0,84
	15-12-2010	16:55	32	59%	13	13	12	0,80
Inverno	14-03-2011	15:15	45	57%	12	12	11	0,87
	15-03-2011	15:15	76	69%	15	15	10	0,82
Primavera	11-04-2011	15:02	36	46%	23	23	17	0,50
	12-04-2011	15:20	50	45%	29	26	17	0,46
	23-05-2011	14:58	29	37%	22	22	18	0,50
	24-05-2011	15:41	38	35%	28	27	18	0,40
	13-06-2011	15:00	20	25%	23	23	16	0,59
	14-06-2011	15:24	36	33%	22	22	18	0,45
Verão	06-07-2011	11:45	30	38%	22	18	18	0,49
	15-07-2011	16:30	26	37%	22	22	18	0,45
Outono	27-09-2011	16:10	20	37%	24	23	18	0,47
	24-10-2011	11:25	22	26%	18	15	17	0,69
	15-11-2011	14:55	60	63%	17	17	13	0,77
	19-11-2011	11:30	61	41%	20	10	11	0,85
	26-11-2011	11:35	73	49%	19	5	13	0,88

A teoria do conforto térmico observa a motivação para a escolha do nível de vestuário como qualquer outro mecanismo termoregulatório e sendo proporcional à intensidade da sensação consciente de desconforto térmico. Então, sendo esta a relação causal entre o nível de vestuário e as temperaturas interiores, como é possível que a memória térmica recente apresente um nível de influência tão elevado sobre o valor médio de *clo*? Os dois principais motivos poderão ser:

1. O momento em que a decisão de seleção da indumentária é tomada e a forma como essa decisão é influenciada pela informação térmica disponível nesse instante.

O processo de seleção do vestuário é efetuado, tipicamente, de manhã pouco depois de acordar ou em alguns outros casos na véspera, antes de ir para a cama. No momento de tomada de decisão em relação ao vestuário, todos os *inputs* considerados relevantes para a pessoa em causa são ponderados para produzirem uma indumentária global que seja a mais adequada para a exposição térmica a que a pessoa em causa irá estar sujeita durante o resto do dia (ou dia seguinte). Nesse momento, as informações disponíveis para que a pessoa possa efetuar as suas decisões são a memória térmica recente (neste caso $T_{dia,x-1}$) e as previsões meteorológicas para o resto do dia (ou para o dia seguinte, consoante o momento em que a decisão é tomada).

As previsões meteorológicas à disposição da pessoa nesse instante podem ter duas proveniências: Uma institucional e outra pessoal. A institucional é disponibilizada gratuitamente pelo instituto português responsável pelas previsões de meteorologia (Instituto Português do Mar e da Atmosfera). Praticamente

todos os órgãos de comunicação social baseiam as suas informações meteorológicas nas previsões deste instituto e difundem-na amplamente. A informação difundida pela comunicação social normalmente inclui a previsão de temperaturas máximas locais ($\max T_{dia,x}$) para o dia em questão, associada a informação acerca de ocorrência (ou não) de precipitação.

A fonte de informação individual, é frequentemente tipificada pelo ato de abrir a janela pela manhã e estimar quais serão as condições meteorológicas para o resto do dia pela amostragem matinal e baseando ainda esta avaliação no conhecimento empírico da própria pessoa em relação ao clima local onde irá decorrer o resto do seu dia. Por muito importante que estas fontes de informação possam ser há obviamente um fator de incerteza associado a cada uma destas previsões que é necessário quantificar ou eliminar. No âmbito da análise efetuada a incerteza associada a previsões meteorológicas foi eliminada através da utilização da real temperatura máxima registada durante esse dia.

2. O ciclo diário de exposição térmica: Todas as pessoas que colaboraram neste estudo são estudantes que assistem a várias aulas de duas horas ao longo do seu dia de trabalho. Quando uma aula termina, todos os indivíduos recolhem os seus apontamentos e saem da sala para um intervalo de 10 a 20 minutos antes de se deslocarem para uma outra sala de aulas. Neste processo de rotação diária pelas salas de aulas é altamente provável que as pessoas tenham contacto com o ambiente exterior durante o período do intervalo. Para além disso, o ambiente térmico interior na sala de aula para onde se deslocam pode ser diferente do da sala de aula precedente. Desta forma, é provável que a escolha do nível de vestuário tenha em consideração o ciclo diário de exposição térmica. Esta informação, neste caso em particular, também é conhecida pela pessoa no instante em que são tomadas as decisões em relação à indumentária a usar uma vez que os estudantes sabem o horário para o dia seguinte e as respetivas salas.

O modelo de conforto térmico adaptativo assume que a temperatura exterior desempenha um papel importante na determinação da temperatura de conforto interior. Este modelo sugere que a temperatura de conforto (T_{comf}) em espaços interiores naturalmente ventilados pode ser expressa em função da temperatura exterior de referência por uma equação da forma $T_{comf} = a.T_{out.ref} + b$, onde $T_{out.ref}$ é a temperatura exterior de referência. Para o cálculo deste valor, é sugerida a utilização de uma média móvel baseada nas temperaturas exteriores para um período de um mês. Este período de referência foi apresentado para efeitos de cálculo do conforto térmico adaptativo (CTA) devido à profusão e quantidade de informação climatérica disponível a nível mundial. Contudo, a utilização de informação climatérica do mês anterior só pode fazer sentido se usada no modelo se possuir algum nível de influência sobre o nível de isolamento do vestuário usado pelas pessoas. Seguramente, a informação climática de há um mês não tem qualquer influência sobre o nível de atividade metabólica, perdas térmicas por respiração, transpiração ou qualquer outra variável da equação de conforto térmico. Também alguns dos autores que mais defendem o modelo de conforto térmico adaptativo sugerem que a escala temporal usada nos cálculos deste modelo devia ser inferior à de um mês usada atualmente (CA Morgan & de Dear, 2002; Craig Morgan & de Dear, 2003; J. F. Nicol & Humphreys, 2002).

Os resultados do presente estudo evidenciam que a história térmica anterior à véspera não possui significância estatística para que possa ser usada num modelo de determinação do nível de vestuário. Assim sendo, a utilização de informação climática referente ao período do mês anterior irá resultar num processo de utilização de dados em excesso (*over fitting*). Mas este não é o principal problema da utilização do período de um mês para efeitos de cálculo no modelo de conforto adaptativo.

O principal problema é que não proporciona nenhuma ligação física entre as variáveis usadas no modelo e os comportamentos adaptativos adotados pelas pessoas. Seguramente que ninguém no interior de uma sala se lembrará de abrir uma janela baseada na memória climática de há um mês atrás.

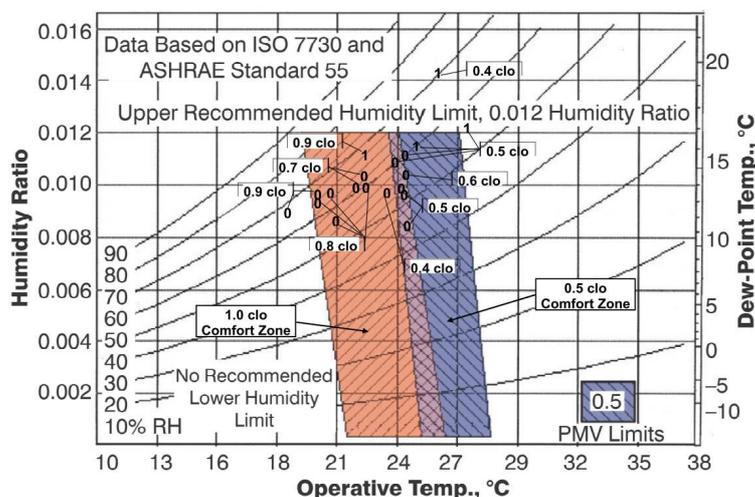


Figura 4.34 - Resultados dos ensaios assinalados no gráfico psicrométrico. Cada ensaio encontra-se assinalado com um valor "0" ou "1" de acordo com o voto médio de conforto térmico numa escala de -3 a +3. As duas áreas gráficas assinaladas assinalam as zonas de conforto correspondentes a um TPD de 10% para pessoas com um nível de vestuário de 0,5 e 1,0 clo, respetivamente. [Retirado de Olesen & Brager (B W Olesen & Brager, 2004)]

Muito provavelmente, a necessidade de estender a informação climática ao intervalo temporal do mês anterior resulta do facto de não ter sido tomada em consideração uma variável importante: As previsões meteorológicas.

A temperatura máxima prevista para o dia em questão possui um poder de previsão significativo no que concerne ao nível de vestuário que a população irá envergar. Desta forma, é expectável considerar-se que esta variável possa ter um papel importante nos cálculos do modelo de CTA. É um facto que as previsões meteorológicas possuem sempre um fator de incerteza associado ao horizonte temporal a que é feita a previsão. Contudo, qualquer modelo bem construído pode apresentar erros de acordo com circunstâncias diversas. Assumindo que a incerteza na previsão meteorológica é quantificável de acordo com a distância temporal à qual essa previsão está a ser efetuada, torna a temperatura máxima prevista para o dia uma variável perfeitamente apta para ser utilizada nos cálculos de CTA. Tal como foi mencionado anteriormente, nesta análise os cálculos foram efetuados usando a temperatura máxima real registada localmente nesse dia pela estação meteorológica mais próxima. Desta forma, a incerteza preditiva da temperatura máxima para o dia foi eliminada.

Para efeitos do modelo de conforto térmico adaptativo, foi calculada uma temperatura exterior de referência usando a mesma ponderação percentual das temperaturas significativas para o cálculo do nível de vestuário. Assim, a temperatura exterior de referência resulta de uma média ponderada de duas variáveis em que a temperatura do dia anterior representa cerca de 81% e a temperatura máxima prevista para o próprio dia representa os remanescentes 19%, tal como apresentado na equação (4.31):

Tabela 4.14 - Ponderação relativa das variáveis relevantes para o cálculo do nível de vestuário.

Temperature	clo weighting	R ²
$\max T_{day,x}$	18.7%	0.711
$T_{day,x-1}$	81.3%	0.876

$$T_{ext.ref} = 0.187 \max T_{dia,x} + 0.813 T_{dia,x-1} \quad (4.31)$$

A temperatura interior de conforto (T_{conf}) foi definida como a temperatura operativa para a qual um sujeito médio vota "confortável" ou "neutro" na escala de McIntyre. Este valor pode ser calculado usando o modelo TPMV-TPPD de Fanger. Deste ponto de vista, o *standard* de conforto térmico adaptativo é absolutamente coerente com a teoria clássica de conforto térmico.

Este fator é importante, na medida em que o modelo de conforto térmico adaptativo encerra um potencial grande de redução dos consumos de energia associados aos sistemas de arrefecimento dos edifícios mas não sacrificando de nenhuma forma o conforto térmico das pessoas. Por outras palavras, a determinação das condições de aceitabilidade do ambiente térmico interior usando o modelo adaptativo pode resultar em poupanças de energia significativas e ao mesmo tempo não apresentar consequências significativas na performance mental dos ocupantes (Toftum, Andersen, & Jensen, 2009). A temperatura de conforto foi, desta forma, calculada para todos os ensaios de campo realizados. Efetuando uma simples regressão linear em função da temperatura exterior de conforto calculada de acordo com a equação (4.31) produz:

$$T_{conf} = 18.8 + 0.30 T_{ext.ref} \quad (4.32)$$

A equação da temperatura de conforto é apresentada desta forma para evidenciar a sua semelhança com as equações de temperaturas de conforto apresentadas por trabalhos de desenvolvimento do modelo adaptativo (McCartney & Fergus Nicol, 2002; F. Nicol & Humphreys, 2010). Do ponto de vista formal, a equação da temperatura de conforto expressa desta forma é idêntica à apresentada na norma EN 15251 (EN 15251, 2007), com a pequena diferença de o coeficiente da temperatura de referência apresentado na norma ser 0,33 em vez do valor 0,30 proposto no âmbito deste trabalho. Mas a maior diferença resulta precisamente da forma como é calculada $T_{ext.ref}$. A norma (EN 15251, 2007) apresenta uma temperatura exterior de referência calculada com base na equação (4.30) que dificilmente tem tradução física em comportamentos térmicos adaptativos ou outros tidos pelas pessoas no dia a dia. Combinando as equações (4.31) e (4.32) a temperatura interior de conforto pode ser apresentada na forma:

$$T_{conf} = 18.8 + 0.056 \max T_{dia,x} + 0.244 T_{dia,x-1} \quad (4.33)$$

Esta equação apresenta um coeficiente de correlação (R^2) de 0,798 com as temperaturas de conforto obtidas experimentalmente para cada um dos ensaios de campo. A equação (4.33) bem como as temperaturas de conforto calculadas para cada um dos ensaios são apresentadas na Figura 4.35.

Na mesma figura são apresentadas três classes de temperaturas. A classe I estabelece uma faixa de temperaturas correspondente a um valor de percentagem previsível de termicamente insatisfeitos inferior a 6%. Esta faixa de temperaturas é aplicável em ambientes com uma elevada expectativa de satisfação térmica por parte dos ocupantes. Essencialmente deve ser usada quando estão em causa pessoas muito sensíveis ou com uma constituição frágil (EN 15251, 2007; F. Nicol & Humphreys, 2010).

Os valores de temperaturas de conforto calculados para cada um dos ensaios realizados encontram-se todos compreendidos na faixa estreita correspondente à classe I.

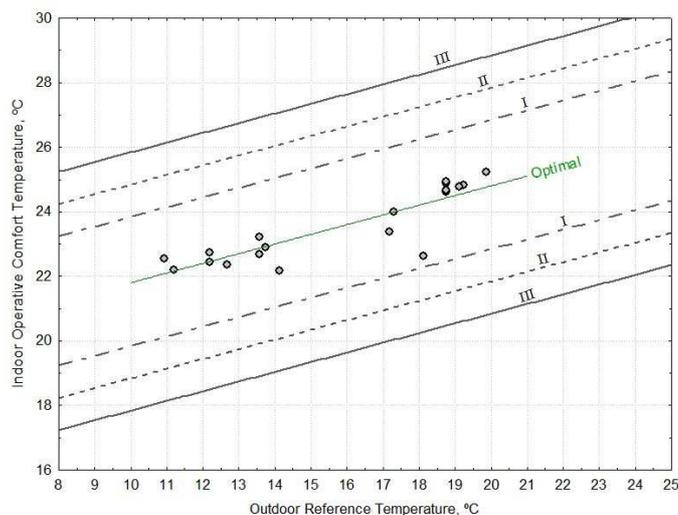


Figura 4.35 - Temperaturas operativas de conforto determinadas para cada um dos ensaios por aplicação direta do modelo TPMV-TPPD a partir na norma ISO 7730. A linha assinalada como "ótima" corresponde à aplicação direta da equação (4.33). As linhas (— - —) delimitam a faixa I de temperaturas, correspondente a TPPD < 6%. A faixa II é delimitada pelas linhas (---) e corresponde a um valor TPPD < 10%. A faixa III, delimitada pelas linhas contínuas corresponde a TPPD < 15%.

Várias combinações entre as duas temperaturas usadas para determinar o nível de vestuário foram usadas para obter uma temperatura de referência que pudesse ser usada para efeitos de cálculo de conforto térmico adaptativo. O objetivo era minimizar os resíduos quadráticos entre a linha da temperatura de conforto ótima e as várias temperaturas de conforto calculadas de acordo com a teoria clássica de conforto térmico para cada um dos ensaios. Esta análise mostrou que os coeficientes ótimos são os apresentados na Equação (4.33).

Mas estes são os mesmos coeficientes que representam a contribuição percentual das respectivas variáveis para a determinação do nível de vestuário. Este resultado apresenta como domínio de validade uma atividade metabólica igual a 1,2 *met*. Mas, ainda assim, reforça a ideia que em edifícios naturalmente ventilados, nos quais a atividade metabólica da população seja idêntica e constante, a determinação da temperatura de conforto é dependente das mesmas variáveis que condicionam o nível de vestuário e exatamente nas mesmas ponderações.

Influência da Obesidade

Considerou-se provável que o nível de obesidade pudesse influenciar a seleção das peças de vestuário e desta forma ter algum nível de repercussão no nível de *clo*. Esta hipótese foi analisada tendo sido escolhida como grandeza representativa o índice de massa corporal (comumente designado pela sigla *BMI* do inglês *Body-Mass Index*). O *BMI* é um índice de peso por altura usado para avaliar o nível de gordura corporal de um indivíduo, classificando-o como "abaixo do peso", "acima do peso" ou "obeso". É definido como o peso de um indivíduo em quilograma dividido pela sua altura ao quadrado (kg/m^2). Os valores do *BMI* são independentes da idade e iguais para ambos os sexos (World Health Organization, 2011).

Tabela 4.15 - Valores de referência para o BMI de acordo com a Organização Mundial de Saúde (World Health Organization, 2011).

Classification	BMI (kg/m ²)
Abaixo do peso	<18,50
Normal	18,50 - 24,99
Acima do peso	≥25,00
Obeso	≥30,00

O valor médio do BMI da população em estudo varia de um ensaio de campo para outro. Mesmo nos casos em que os ensaios foram conduzidos com apenas um mês de intervalo, na mesma sala de aula e usando teoricamente a mesma população. Tal facto pode facilmente ser explicado pela frequência do número de alunos nas aulas teóricas que apresenta sempre algum nível de decaimento ao longo do semestre e também por alguma variabilidade nos alunos que estão presentes em cada aula. O valor do BMI médio das populações estudadas variou entre 22,44 to 25,06 kg/m².

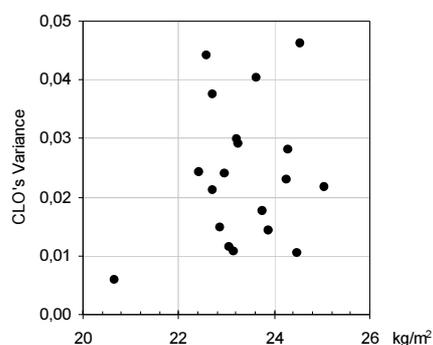


Figura 4.36 - Variância do nível de vestuário com o índice de massa corporal (BMI) da população.

A variância do nível de isolamento do vestuário não apresenta nenhuma relação visível com o índice de massa corporal, tal como apresentado na Figura 4.36. Este resultado é claramente distinto do que se verifica quando é analisada a variância do vestuário em função da temperatura média no exterior, tal como foi apresentado na Figura 4.31.

Efetuada uma análise estatística, o *BMI* não demonstra suficientes valores de correlação ($R^2 = 0,06$) ou significância estatística ou com o nível de vestuário usado. Juntando a variável *BMI* às outras das variáveis significativas ($T_{dia.x-1}$; $\max T_{dia.x}$) e efetuando uma análise estatística mostra, também neste caso que a variável *BMI* não possui relevância estatística suficiente para que seja considerada no modelo (*valor-p* = 0,897).

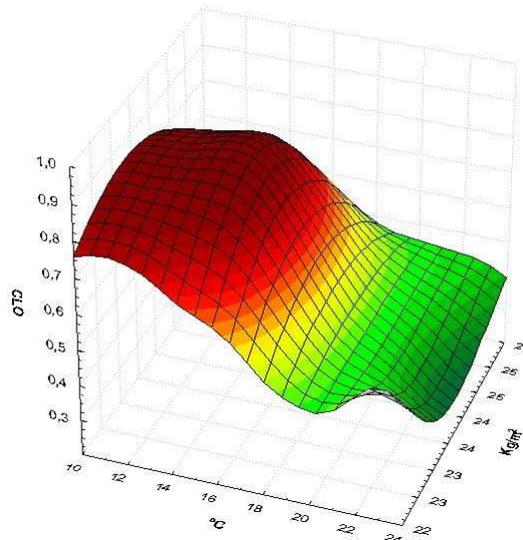


Figura 4.37 - Nível de isolamento do vestuário em função da temperatura exterior de referência e do índice de massa corporal da população.

O facto de o valor de obesidade não demonstrar significância estatística em relação ao nível de vestuário não significa necessariamente que as escolhas de indumentária não sejam influenciadas pela quantidade de gordura corporal da pessoa. No âmbito deste estudo, nenhuma análise foi feita no sentido de avaliar se a variável BMI possui alguma influência na seleção das peças individuais de vestuário ou nos tamanhos das mesmas. Contudo, o valor apresentado para o nível de isolamento térmico da indumentária no seu todo não é dependente do índice de massa corporal.

Domínio etário de aplicação dos resultados

As pessoas que participaram neste estudo através do preenchimento dos inquéritos constituem uma população jovem com uma idade média de 21 anos e praticamente toda compreendida na faixa etária dos 19 aos 26 anos, tal como mencionado anteriormente. Este fator tem novamente que ser mencionado porque o metabolismo diminui ligeiramente com a idade. Contudo, diversos estudos revelaram que as preferências térmicas de populações mais novas não são diferentes das preferências de populações mais velhas (ASHRAE, 2009). O metabolismo das pessoas mais idosas é menor do que o das mais jovens. No entanto, este fator é compensado pelo facto de as perdas evaporativas também serem menores nos idosos (Collins & Hoinville, 1980).

Esta homogeneidade etária das preferências térmicas parece desafiar o senso comum e as constatações da maioria das pessoas. É patente que os níveis de temperatura nas habitações de pessoas idosas são normalmente mais elevados do que os usualmente encontrados nas habitações de pessoas mais jovens. A explicação para este facto advém do nível de atividade metabólica das pessoas mais idosas. Estas são normalmente sedentárias durante a maior parte do dia. A diferença nas preferências térmicas entre estes dois grupos etários existe de facto, mas é fruto da diferença de atividades metabólicas entre ambos.

Desta forma, os resultados obtidos no âmbito deste estudo deverão ser também válidos para outras faixas etárias diferentes da população participante.

Importância e domínio de aplicação dos resultados

O modelo de conforto térmico adaptativo aplica-se a edifícios naturalmente ventilados. Contudo, se estes edifícios (por definição) não dispõem de nenhum sistema centralizado de AVAC então de nada serve estar a efetuar cálculos em tempo real com algumas horas de antecipação (ou dias) para determinar as temperaturas de conforto no interior?

Mesmo para edifícios que dependam de sistemas de ventilação mecânica há uma porção significativa destes que podem funcionar no modo híbrido. Estes edifícios operam em modo naturalmente ventilado sempre que as condições exteriores permitam por si só proporcionar conforto térmico no interior no âmbito do modelo térmico adaptativo. Só quando as condições exteriores se desviam das necessárias para manter os níveis de conforto térmico no interior estes edifícios comutam para modo de sistema centralizado de AVAC.

Há ainda que ter em consideração como fator adicional em edifícios com sistemas centralizados de AVAC o tempo de exposição ao ambiente interior. Os indivíduos que permanecem expostos durante pouco tempo ao ambiente interior adotam frequentemente comportamentos adaptativos de ponderação dos tempos de exposição com reflexos ao nível do vestuário. Uma vez que sabem previamente que vão estar expostos durante algum tempo a um ambiente interior (ainda que seja controlado) e posteriormente estarão expostos ao ambiente exterior, é frequente observar os visitantes a assumir comportamentos adaptativos em situações de aquecimento, como por exemplo retirar o casaco. Já em situações de arrefecimento, na maior parte dos casos não é possível aos visitantes adotarem comportamentos adaptativos em relação ao nível de vestuário. Frequentemente esta situação conduz a um desajustamento entre os requisitos de conforto térmico de visitantes e de ocupantes o que conduz a reclamações em relação ao nível de climatização do interior do edifício.

O potencial de poupança de energia, redução das emissões de gases de efeito de estufa e redução da dependência petrolífera de países não produtores como seja o caso de Portugal é óbvia.

Para edifícios naturalmente ventilados que se encontram dotados de um sistema de aquecimento central, o modelo apresentado proporciona uma ferramenta que permite calcular antecipadamente a temperatura de conforto no interior durante a estação de aquecimento.

Índice de conforto térmico em espaços interiores naturalmente ventilados

Idealmente, a temperatura equivalente no interior de um espaço naturalmente ventilado deverá ser igual à temperatura de conforto térmico calculada pelo índice $Th.PMV-Th.PPD$ (usualmente designado apenas por $PMV-PPD$).

Sendo ϕ a razão de equivalência térmica definida como:

$$\phi = \frac{T_{eq}}{T_{conf}} = \frac{T_{eq}}{18,8 + 0,056 \max T_{dia,x} + 0,244 T_{dia,x-1}} \quad (4.34)$$

É expectável que qualquer afastamento da temperatura equivalente em relação ao valor preconizado para a temperatura de conforto resulte num afastamento do voto médio da perceção térmica, em relação ao valor central da sua escala. Foi também assumido como hipótese que a função seria simétrica em relação ao seu ponto ótimo.

Foram efetuadas diversas regressões lineares e não lineares, tendo sido testadas várias famílias de funções (lineares, polinomiais, potências, exponenciais, sigmoidais e logarítmicas). A função que melhor ajusta os resultados obtidos sem apresentar descontinuidades ou pontos de inflexão sem significado físico aparente é a função linear apresentada na Equação (4.35).

$$Th.Vt = 1046,5(\phi - 1) \quad (4.35)$$

Os resultados para este índice de temperaturas, definido com base na razão de equivalência térmica, são apresentados graficamente na Figura 4.38.

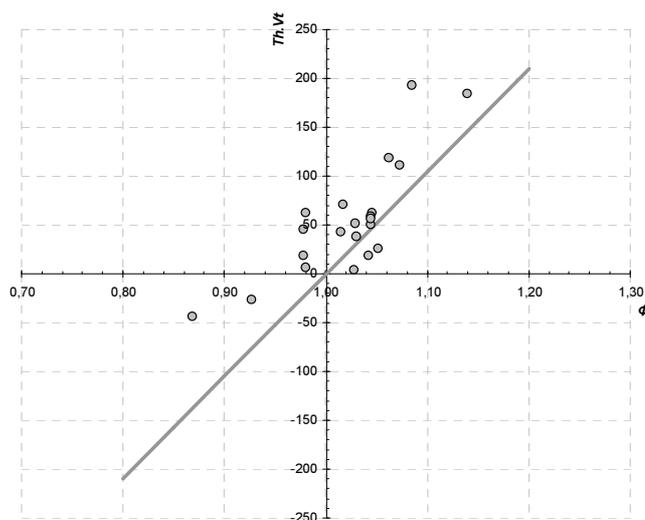


Figura 4.38 - Voto da percepção térmica, comparado com a reta de regressão obtida a partir da razão de equivalência térmica, tal como definida na Equação (4.35).

O nível de ajuste do voto térmico médio obtido com o índice da razão de equivalência térmica não é tão bom ($RMSE = 47,79$; $R^2 = 0,650$) como o obtido com o índice $Th.PMV-Th.PPD$ ($RMSE = 38,10$; $R^2 = 0,704$). Ainda assim, poderia fazer sentido empregar o índice da razão de equivalência térmica por uma questão de simplicidade de cálculo. Contudo, a temperatura de conforto empregue neste índice, é válida apenas para um nível de atividade metabólica de $1,2 \text{ met}$. Qualquer outro valor diferente deste implica o cálculo da temperatura de conforto com base no modelo $Th.PMV-Th.PPD$.

Como tal, e no âmbito deste trabalho, foi usado o índice $Th.PMV-Th.PPD$ como descritor do voto da percepção térmica.

Conclusões do capítulo

A utilização do modelo de conforto térmico adaptativo possui como principal objetivo a capacidade de diminuir os consumos energéticos em edifícios naturalmente ventilados ou que funcionem no modo híbrido sem comprometer o conforto térmico. Verificou-se que as variáveis que condicionam a escolha do vestuário são exatamente as mesmas que permitem a correta determinação da temperatura de conforto. Numa situação em que o nível de atividade metabólica é constante e idêntico para toda a população em causa, a ponderação com que cada uma das variáveis de temperatura contribui para o nível de vestuário é exatamente a mesma com que contribui para a temperatura de conforto. No

contexto climático em que este trabalho foi realizado, verificou-se que apenas a memória térmica recente afeta decisões do nível de vestuário e consequentemente dos cálculos de conforto térmico adaptativo. A memória térmica do dia anterior é a variável que mais contribui para as decisões ao nível do vestuário. Os dias anteriores à véspera são estatisticamente insignificantes para as decisões de seleção do vestuário. Um outro elemento - chave para a determinação do nível de vestuário e do cálculo da temperatura de conforto é a previsão meteorológica. Esta variável tem sido negligenciada ao nível do *standard* de conforto térmico adaptativo devido à incerteza associada às previsões meteorológicas e ao horizonte temporal com que as mesmas são efetuadas. Contudo, a temperatura máxima registada durante o dia possui relevância preditiva suficiente para ser usada nos cálculos de conforto térmico adaptativo. Para além disso, a inclusão desta variável aporta um nível de simplicidade e relação direta com aspetos do dia a dia que a utilização de uma média móvel exponencialmente ponderada não permitia. Ou seja, assumindo que a escolha do vestuário está a ser feita no próprio dia pela manhã:

As decisões do nível de vestuário são suportadas em 80% (aproximadamente) pela temperatura média do dia anterior e em 20% pela previsão meteorológica para o próprio dia.

O cálculo da temperatura de conforto efetuado com base no modelo *Th.PMV-Th.PPD* (também conhecido por PMV-PPD) mostrou que todas as temperaturas determinadas se encontra dentro de uma estreita faixa correspondente a um percentagem de insatisfeitos inferior a 6%.

A equação da temperatura de conforto obtida desta forma apresenta uma semelhança notável com a equação proposta pelo modelo de conforto térmico adaptativo. Assim, sugere-se que existe uma relação causal entre a teoria do conforto térmico clássica e o modelo adaptativo, podendo a equação da temperatura de conforto deste último ser deduzida se forem conhecidas *à priori* os nível de vestuário e atividade metabólica da população.

A análise dos resultados deste trabalho sugere ainda a existência de uma relação causal entre a previsão da exposição térmica a que as pessoas vão estar sujeitas ao longo do dia e o nível de vestuário selecionado para o mesmo dia. Não foi no entanto possível confirmar esta hipótese com base nos dados recolhidos.

Ambiente Acústico

Para a modelação do voto médio de avaliação do ambiente acústico foram usadas duas grandezas do comportamento acústico do edifício e da sala: o isolamento acústico da fachada exterior ($D_{2m,nT,w}$) e o tempo de reverberação no interior da sala (RT). Ambas as grandezas foram medidas de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 3.

Os resultados das medições são apresentados na Tabela 4.16. Na mesma Tabela são também apresentados os requisitos legais para cada um dos valores obtidos, de acordo com as normas respetivas. A fachada exterior deve proporcionar um isolamento acústico igual ou superior a 33 dB e o tempo de reverberação no interior da sala não deve ultrapassar o valor de referência, calculado de acordo com a Equação (4.36).

$$RT_0 = 0,15V^{1/3} \quad (4.36)$$

Sendo, V = Volume da sala [m^3]

Constata-se que três das salas não cumprem o requisito legal do tempo de reverberação e duas delas não cumprem o requisito do isolamento acústico (mínimo) da fachada exterior.

Tabela 4.16 - Características acústicas das salas no que concerne ao tempo de reverberação (RT) e ao isolamento acústico da fachada exterior ($D_{2m,nT,w}$). Para cada um destes valores é apresentado o correspondente requisito legal, calculado de acordo com as normas respetivas e com a legislação portuguesa vigente (Decreto-Lei 9/2007, 2007; Decreto-Lei 96/2008, 2008; ISO 16283-1, 2012; ISO 3382-2, 2008)

Sala	RT [s]	RT_0 (Req. Legal) [s]	$D_{2m,nT,w}$ [dB]	$D_{2m,nT,w}$ Req. Legal [dB]
A.Anfiteatro 1	1,30	≤ 1,08	48	≥ 33
A.Anfiteatro 2	0,85	≤ 1,08	47	≥ 33
Sala A0.0	2,94	≤ 1,49	38	≥ 33
Sala A0.5	1,13	≤ 1,13	37	≥ 33
Sala A1.5	0,85	≤ 0,96	27	≥ 33
Sala A1.12	0,85	≤ 0,92	27	≥ 33
Sala A2.3	1,00	≤ 1,04	37	≥ 33
Sala A2.5	0,87	≤ 1,04	45	≥ 33
Sala B1	1,88	≤ 0,84	34	≥ 33

Em situações de aula normal, o ambiente acústico no interior é marcado pela comunicação oral entre o docente e a audiência discente. Tal já não se verifica em situações de exames finais. Neste caso, o interior da sala encontra-se silencioso durante a maior parte do tempo. Numa análise sumária acerca da influência do tempo de reverberação em relação a estas duas situações poder-se-ia vaticinar que a contribuição do tempo de reverberação para a perceção subjetiva do ambiente acústico seria menor em

situação de exames finais do que em aulas normais. Pelos resultados apresentados na Figura 4.39, não é possível retirar conclusões que validem ou rejeitem em definitivo esta hipótese.

Também não foi possível derivar um comportamento bem definido do voto acústico em função do tempo de reverberação ou do tempo de reverberação adimensionalizado. Nem no global de todos os ensaios efetuados, nem desagregando os ensaios realizados em aula dos realizados em situação de exame final.

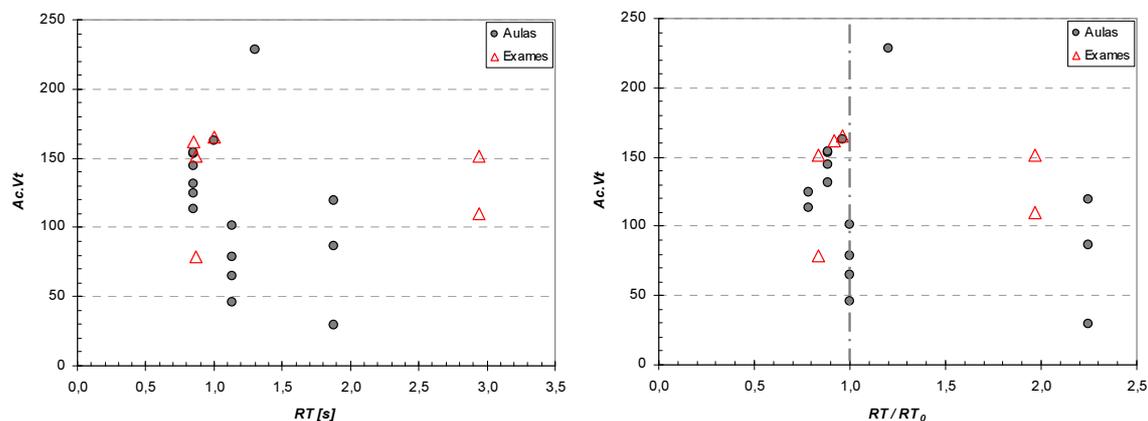


Figura 4.39 - Voto da percepção do ambiente acústico em função do tempo de reverberação no interior da sala (à esquerda). É também apresentado o voto acústico em função do tempo de reverberação adimensionalizado pelo valor do respetivo requisito legal (à direita). A linha vertical de traço interrompido assinala a fronteira acima da qual o requisito legal não é cumprido.

De forma análoga, também em situação de exames finais poder-se-ia esperar que o isolamento acústico da fachada exterior apresentasse uma maior preponderância na percepção subjetiva do ambiente acústico do que em situação de aulas teóricas normais. O voto do ambiente acústico em função do isolamento da fachada exterior é apresentado na Figura 4.40. Também em relação ao isolamento acústico da fachada não é possível inferir uma relação direta ou linha de tendência entre este e o voto acústico. Também não é possível inferir uma diferença notória de comportamento do voto acústico em função do isolamento da fachada entre as situações de exames finais e as de aulas teóricas normais.

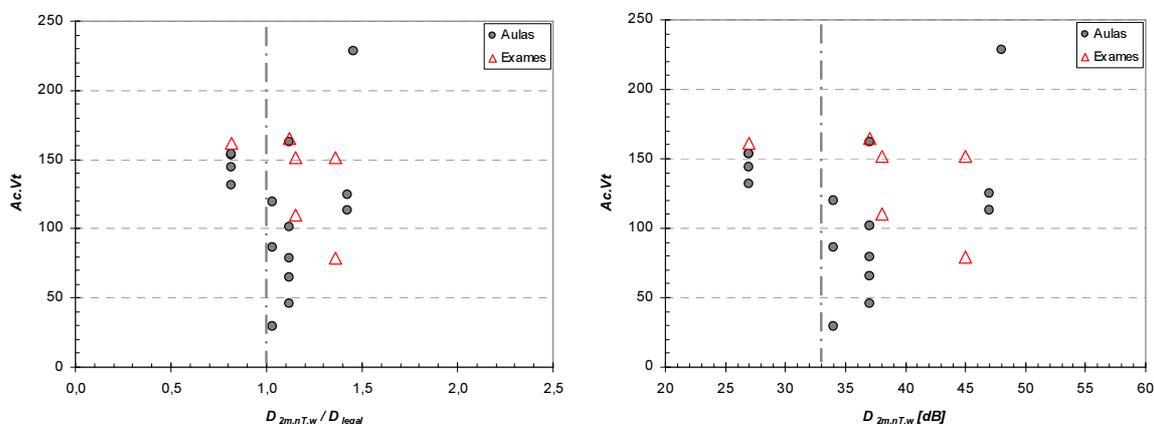


Figura 4.40 - Voto da percepção do ambiente acústico em função do isolamento acústico da fachada exterior. É também apresentado (à direita) o voto acústico em função do isolamento acústico da fachada adimensionalizado pelo valor do respetivo requisito legal. A linha vertical de traço

interrompido, em ambas as figuras, assinala a fronteira abaixo da qual o requisito legal de isolamento não é cumprido.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, o voto de avaliação do ruído proveniente do exterior deveria ser mais dependente do isolamento acústico da fachada do que o voto de avaliação do ruído proveniente do interior da sala. A situação deveria inverter-se considerando agora como parâmetro em análise o tempo de reverberação no interior da sala. Na prática não foi possível constatar nenhuma das hipóteses apresentadas.

Observando a Figura 4.41, constata-se que não há diferenças muito significativas de comportamento dos votos de ruído provenientes do interior e exterior em relação ao tempo de reverberação. Da mesma forma se verifica que não há diferenças apreciáveis entre o comportamento dos dois votos em relação ao isolamento acústico da fachada.

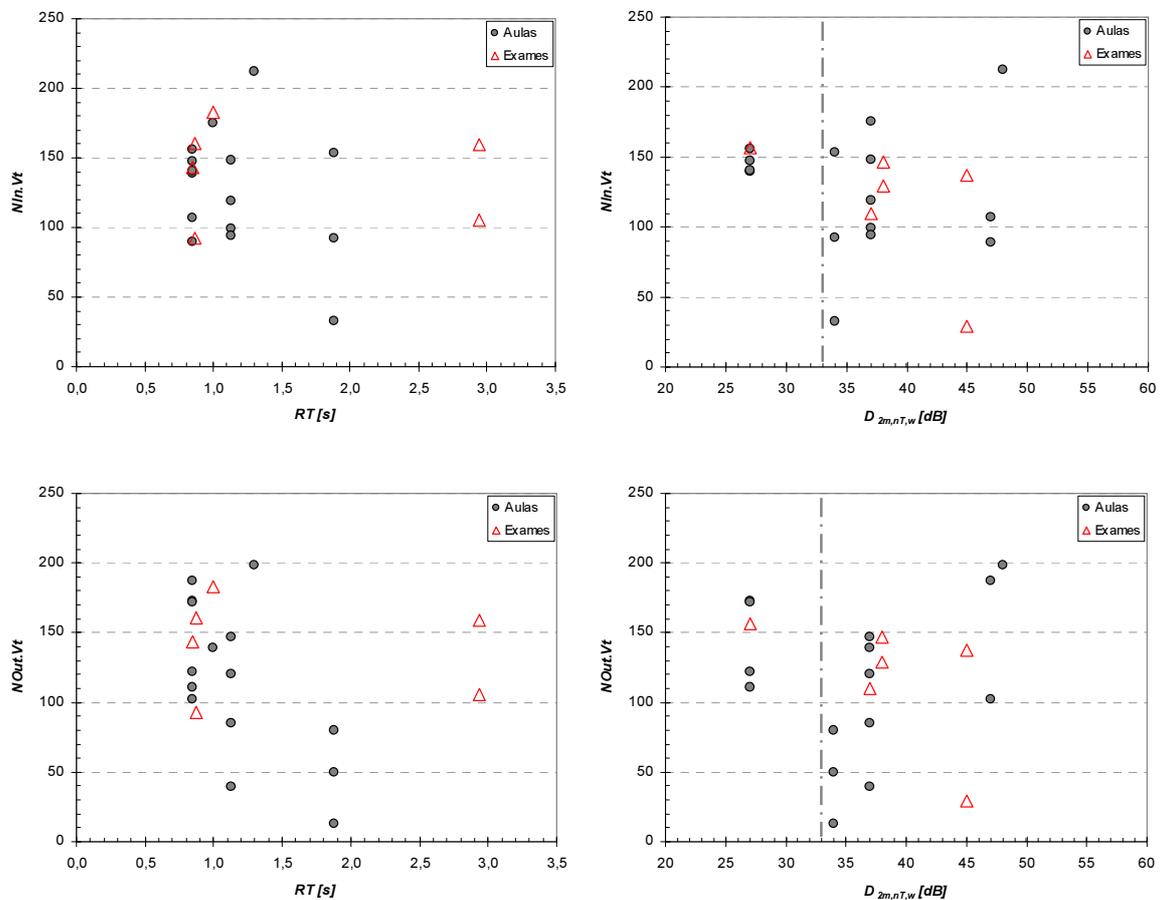


Figura 4.41 - Votos da percepção subjetiva de ruído exterior e ruído interior em função do tempo de reverberação e do isolamento acústico da fachada. *N_{in}.Vt* e *N_{out}.Vt* designam os votos de ruído proveniente do interior e exterior da sala, respetivamente.

Tal não significa de maneira nenhuma que estes dois fatores não sejam importantes para a formação do voto da percepção acústica. Este facto pode ter duas leituras possíveis.

Numa primeira análise poder-se-ia colocar como hipótese que os indivíduos no interior da sala, embora consigam ter a percepção do nível de ruído global, não conseguem diferenciar claramente as proveniências interiores e exteriores. Contudo, para tal os votos da avaliação subjetiva dos ruídos provenientes do interior e exterior teriam, também eles, que ser significativamente correlacionados. Tal

não se verifica, sendo que apenas 39,1% da variância do voto de avaliação do ruído proveniente do interior é explicada pela variância do voto de avaliação do ruído proveniente do exterior. consequentemente, esta hipótese não parece plausível, pelo que deve ser rejeitada.

Uma segunda explicação resulta das variações no nível de isolamento acústico da fachada e no tempo de reverberação. A determinação do nível de isolamento da fachada foi efetuada com as janelas fechadas e de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 3. Contudo, esta situação apenas se verificou de forma sistemática durante os ensaios realizados em condições de temperaturas exteriores mais baixas. Tipicamente em ensaios realizados em dias frios ou de inverno. Desta forma, há alguma variabilidade, de ensaio para ensaio ao nível deste parâmetro. Mesmo durante a realização do mesmo ensaio foram registados comportamentos adaptativos de abertura e fecho de janelas e porta. Foi efetuado um registo manual da abertura e fecho de janelas e porta. No caso da porta de entrada, registo manual indica se a porta é aberta pontualmente pela entrada ou saída de uma pessoa e ainda se esta se encontra totalmente aberta ou apenas parcialmente. Contudo, os comportamentos adaptativos de abertura e fecho de janelas e porta não foram inibidos para não alterar o normal funcionamento das condições letivas ou condições de avaliação. Como também foi mencionado anteriormente, a abertura e fecho de janelas e porta (total ou parcialmente) parece ser motivada pelo melhor compromisso entre o conforto térmico e a inteligibilidade da fala no interior. Tipicamente a justificação apresentada para efetuar a abertura de janelas ou solicitar ao docente a abertura da porta é o facto de "*estar calor no interior*". Por vezes, durante o mesmo ensaio ocorre o fecho de janelas e/ou porta quando o nível de ruído proveniente do exterior aumenta pontualmente tornando difíceis as condições de comunicação acústica no interior da sala. A situação típica associada a este tipo de comportamento é o início ou conclusão de uma aula em sala adjacente àquela em que decorre o ensaio. Esta situação é também uma situação que normalmente apenas demora alguns minutos, podendo as condições de abertura e fecho da porta e/ou janelas ser reposta após este período.

Também o tempo de reverberação está sujeito a oscilações de ensaio para ensaio decorrentes essencialmente da presença de um maior ou menor número de pessoas e da distribuição espacial das mesmas no interior da sala. Tal como descrito no Capítulo 3, a medição do tempo de reverberação foi efetuada de acordo com as normas aplicáveis, no espaço interior vazio. A presença de pessoas no interior da sala implica uma diminuição do tempo de reverberação.

Desta forma, os valores medidos do isolamento acústico da fachada e do tempo de reverberação correspondem aos valores máximos de cada um destes parâmetros. No caso do isolamento acústico da fachada, a diminuição deste valor só tem consequências no caso de se registar a ocorrência de ruído proveniente do exterior da sala. No caso do tempo de reverberação, a diminuição deste valor em consequência da presença de "mobiliário humano" adicional no interior da sala é positivo, especialmente no caso das salas em que o valor máximo legal desta grandeza é ultrapassado.

Assim, e no âmbito deste trabalho ao ser referido o isolamento acústico da fachada exterior, deve ser tido em consideração que se trata do valor máximo de isolamento acústico que a fachada consegue proporcionar. Também no caso do tempo de reverberação o valor medido corresponde ao de uma ocupação da sala por duas pessoas.

A análise do efeito conjugado do tempo de reverberação e isolamento acústico da fachada no voto da perceção subjetiva do ambiente acústico revelou que ambas as variáveis são estatisticamente

significativas. Foram testadas funções matemáticas de diversas famílias de equações em análises de regressão não linear do voto acústico em função das variáveis mencionadas.

Em todas as regressões efetuadas, os coeficientes foram estimados através de algoritmos diferenciais genéticos evolutivos, tanto para as equações não lineares como para os parâmetros-objetivo de ajustamento não Gaussiano (Phillips, 2013).

Os resultados foram analisados tendo sido excluídas as funções que apresentavam descontinuidades (de $\pm\infty$) no domínio de validade da regressão e também as funções cuja tradução física seja desprovida de significado ou contrária à lógica.

A função que melhor ajusta o conjunto de resultados obtido (traduzido pelo menor valor de *RMSE*) e em que simultaneamente todos os coeficientes são estatisticamente significativos é apresentado na Equação (4.37). Esta equação apresenta: $RMSE = 28,89$; $R^2 = 0,602$; $R^2_{ajustado} = 0,469$; $F = 4,53$; $Valor-p = 0,010$; $\chi^2 = 17526,3$.

$$Ac.PMV = a + b.RT + c.RT^2 + d.D_{2m,nT,w} + f.RT.D_{2m,nT,w} + g.RT^2.D_{2m,nT,w} \quad (4.37)$$

Sendo os coeficientes e os valores-p das variáveis do modelo apresentadas na tabela seguinte.

Variável	Coefficiente	Valor -p
Independente	a = 4225,1360286893478	6,55 x 10 ⁻³
RT	b = -6887,5592121566242	1,13 x 10 ⁻²
RT ²	c = 2530,0808328001835	1,90 x 10 ⁻²
D _{2m,nT,w}	d = -103,32636048594031	7,66 x 10 ⁻³
RT . D _{2m,nT,w}	f = 174,69948686589714	1,11 x 10 ⁻²
RT ² . D _{2m,nT,w}	g = -64,863682878142754	1,99 x 10 ⁻²

Tabela 4.17 - Coeficientes e estatística das variáveis na Equação (4.37).

Graficamente, a equação obtida é apresentada na Figura 4.42. Pela análise do gráfico, verifica-se que dentro do domínio de validade da função há regiões em que o voto acústico previsto aumenta com o tempo de reverberação e diminui com o nível de isolamento acústico da fachada. O que do ponto de vista físico não faz sentido. Como tal, mesmo sendo esta a função que melhor ajusta os resultados obtidos, apresentado simultaneamente todas as variáveis (e respetivos coeficientes) estatisticamente significativos, ela é rejeitada pelo facto de não apresentar coerência física.

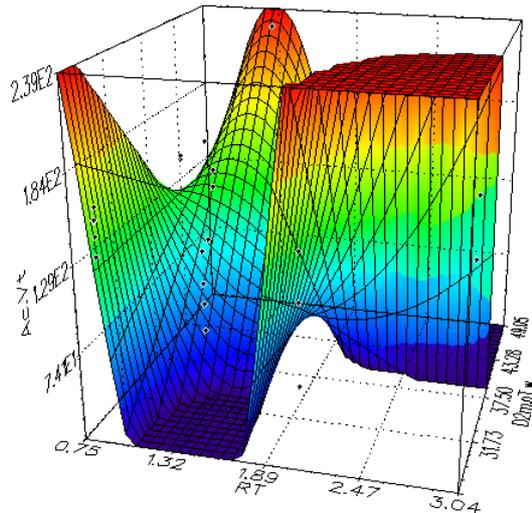


Figura 4.42 - Modelo de previsão do voto acústico médio baseado na Equação (4.37) e rejeitado por inconsistência dos resultados apresentados em algumas zonas do gráfico.

Verificou-se que os termos quadráticos do tempo de reverberação provocam a incongruência de resultados na Equação (4.37). Para além disso, temos de isolamento da fachada com grau igual ou superior a dois não possuem significância estatística. Desta forma limitando o grau máximo de ambas as variáveis no polinómio a um resulta:

$$Ac.PMV = a + b.D_{2m,nT,w} + c.RT + d.RT.D_{2m,nT,w} \quad (4.38)$$

Esta equação apresenta: $RMSE = 34,82$; $R^2 = 0,422$; $R^2_{ajustado} = 0,319$; $F = 4,13$; $Valor-p = 0,0227$; $\chi^2 = 25462,4$. Os coeficientes (a, b, c, d) são apresentados na Tabela 4.18, juntamente com os Valores-p associados a cada uma das variáveis do modelo.

Variável	Coefficiente	Valor -p
Independente	$a = 7,6300717372168731 \times 10^2$	$9,22861 \times 10^{-4}$
RT	$b = -6,8232446238221235 \times 10^2$	$2,91127 \times 10^{-3}$
$D_{2m,nT,w}$	$c = -1,6914059145999239 \times 10^1$	$4,21993 \times 10^{-3}$
$D_{2m,nT,w} \cdot RT$	$d = 1,8098436095360064 \times 10^1$	$3,22026 \times 10^{-3}$

Tabela 4.18 - Coeficientes e estatística das variáveis significativas para o voto acústico médio previsível.

Foi também analisada a possibilidade de obter a equação de $Ac.PMV$ usando valores adimensionalizados do tempo de reverberação e do isolamento acústico da fachada. Em ambos os casos, os valores adimensionalizados correspondem à razão entre a variável e o respetivo valor legal. Repetindo a mesmas análises efetuadas anteriormente, verifica-se que para todas as famílias de equações que apresentam os melhores resultados, os valores da função objetivo ($RMSE$) são sempre maiores quando comparados com os valores obtidos através da utilização das mesmas variáveis com dimensões. A

utilização de variáveis adimensionalizadas possui como grande vantagem o facto de tornar o modelo dimensionalmente consistente, uma vez que o voto acústico é também ele adimensional. Contudo, sendo a equação obtida desta forma uma equação empírica conseguida através de resultados experimentais, faz sentido que seja usado o modelo que melhor ajusta os resultados obtidos, pelo que foi adotada para o modelo

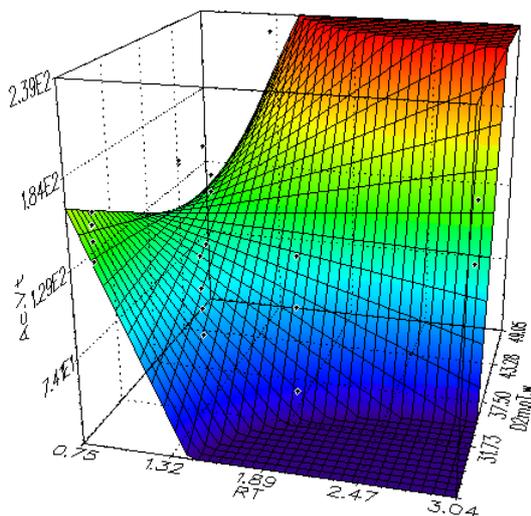


Figura 4.43 - Voto acústico médio previsível ($Ac.PMV$) em função do tempo de reverberação máximo (RT) e do isolamento acústico da fachada ($D_{2m,nT,w}$).

Graficamente, os resultados da Equação (4.38) são apresentados na Figura 4.43. Verifica-se que na gama inferior do domínio de valores de $D_{2m,nT,w}$, o valor de $Ac.PMV$ diminui com o aumento do tempo de reverberação. Mas para a gama superior de valores de $D_{2m,nT,w}$, o modelo prevê que o $Ac.PMV$ aumente com o tempo de reverberação. Este resultado, é de alguma forma inesperado. Muito provavelmente resulta do facto de apenas terem sido usadas variáveis das características do comportamento acústico do edifício para a obtenção do modelo de voto acústico médio previsível.

A utilização de apenas variáveis de características de comportamento acústico do edifício ou do espaço interior apresenta algumas vantagens, mas também algumas limitações. A maior limitação do modelo construído desta forma resulta do facto de não entrar em consideração com as fontes de ruído. Quer a fonte de ruído exterior quer a interior. Em ensaios futuros equaciona-se a possibilidade de utilização de dois sonómetros. Um colocado no exterior do edifício e o outro no interior da sala. Este procedimento permitiria o cálculo de variáveis adicionais tais como o índice de articulação e desejavelmente melhorar o ajustamento do modelo. É possível que a utilização de variáveis adicionais no modelo permita corrigir incongruências físicas do mesmo provocadas pelos termos com RT^2 .

Em todo o caso, o modelo acústico apresentado, possui uma grande vantagem: A sua simplicidade. É necessário ter em consideração que para este modelo, tal como para os demais que contribuem para o índice global da percepção de qualidade do ambiente interior, o objetivo é o de descrever a percepção subjetiva humana com base no menor número de variáveis possível. Neste caso, e com base em apenas variáveis do comportamento acústico do edifício, é possível prever o voto acústico médio. O valor de $RMSE$ entre o modelo acústico apresentado e os resultados experimentais respetivos

é por exemplo inferior ao mesmo valor obtido pelo modelo térmico baseado na norma internacional (ISO 7730, 2005).

Seria também desejável possuir uma maior diversidade de características de comportamento acústico das salas. Contudo, nem sempre em situações de ensaios de campo, os parâmetros de comportamento acústico (ou outros) dos espaços podem ser previamente impostos ou controlados. Esta é uma das desvantagens deste tipo de ensaios relativamente aos realizados em condições laboratoriais. Por outro lado, em condições de ensaio laboratorial, a única forma de conseguir a participação voluntária de uma população superior a vinte indivíduos, confinada numa sala durante um período de tempo superior a uma hora seria estabelecendo uma gratificação pecuniária. Mas ainda assim, dificilmente em laboratório seria possível replicar o ambiente de um exame final, impondo aos participantes o mesmo nível de consequências pessoais em relação ao sucesso/insucesso pela sua prestação na prova.

Uma consideração final refere-se ao contexto em que os resultados foram obtidos: em ambiente de sala de aula. Este contexto é importante porque ele representa uma grande percentagem do tempo dispendido diariamente pela esmagadora maioria da população com idade inferior a 20 anos, em todo o mundo, e especialmente em países com taxas de escolaridade mais elevadas. Mas é também um contexto muito particular de comunicação bidirecional entre um indivíduo (docente) e uma audiência (discente), pelo que o modelo obtido é aplicável apenas nestas circunstâncias.

Ambiente Luminoso

Para a descrição do ambiente luminoso foram usadas como variáveis, numa primeira análise, a iluminância ao nível do plano de trabalho e as características arquitetónicas das salas apresentadas na Tabela 4.20.

Sala	A [m ²]	V [m ³]	A _w [m ²]	F [m ²]	A _w / F
A.Anfiteatro 1	89,0	375,6	1,85	161,204	1,15%
A.Anfiteatro 2	89,0	375,6	1,85	153,564	1,20%
Sala A0.0	202,0	989,8	8,50	295,960	5,74%
Sala A0.5	129,6	429,0	3,52	155,901	2,26%
Sala A1.5	79,0	263,7	15,00	122,177	12,28%
Sala A1.12	70,0	233,8	15,00	114,829	13,06%
Sala A2.3	100,0	330,0	20,00	140,646	14,22%
Sala A2.5	99,2	331,2	20,00	141,950	14,09%
Sala B1	60,1	173,1	11,50	93,082	12,35%

Tabela 4.19 - Características arquitetónicas das salas de aula. "A" designa a área da sala, "V" o volume, A_w a área de envidraçados exteriores e "F" a área total da envolvente exterior e interior.

O valores da iluminância apresentados na Figura 4.44 correspondem ao momento do preenchimento dos inquiridos da percepção subjetiva. Ao nível da constância desta variável, os dois contextos de ensaios realizados configuram também duas situações completamente distintas. Em situações de exame a iluminância ao nível do plano de trabalho não sofre alterações significativas ao longo do ensaio e em situações de aulas teóricas é frequente serem efetuados ajustes na iluminação da sala que ao longo do ensaio, que se podem traduzir em níveis de iluminância muito distintos. Neste caso, há diversos cenários que se podem colocar tais como: [1] Projeção de conteúdos multimédia numa tela, sem necessidade de escrita de apontamentos por parte dos discentes; [2] Projeção de elementos numa tela, com necessidade de escrita de apontamentos por parte dos discentes; [3] Escrita no quadro da sala ou [4] Comunicação oral sem escrita no quadro. No caso dos cenários [1] e [2], o facto de os indivíduos presentes na sala terem necessidade de escrever no seu plano de trabalho à medida que são projetados conteúdos na tela normalmente implica níveis diferentes de iluminação artificial da sala e da posição das cortinas, que se traduzem em níveis também diferentes de iluminância no plano de trabalho.

No caso dos cenários [1], [2] e [3] há fenómenos de ofuscação afetando apenas pessoas localizadas numa zona localizada ou num ponto da sala que podem surgir. Quando surge um fenómeno deste género ele é anulado ou atenuado com recurso ao sombreamento localizado de uma ou mais janelas combinado com a utilização da luz do quadro ou com o desligar das luzes de iluminação artificial em torno da área onde ocorra a projeção dos elementos.

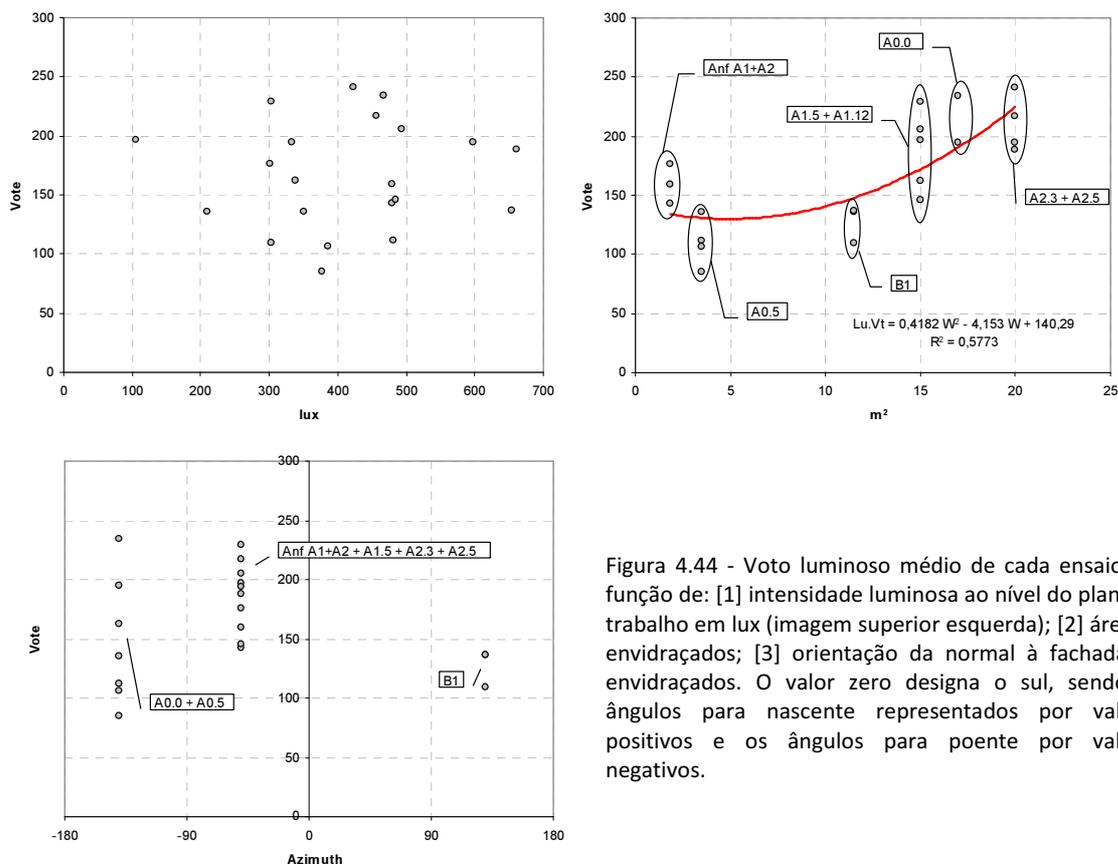


Figura 4.44 - Voto luminoso médio de cada ensaio em função de: [1] intensidade luminosa ao nível do plano de trabalho em lux (imagem superior esquerda); [2] área de envidraçados; [3] orientação da normal à fachada de envidraçados. O valor zero designa o sul, sendo os ângulos para nascente representados por valores positivos e os ângulos para poente por valores negativos.

Estes fenómenos poderiam determinar a utilização preferencial de algumas zonas das salas de aula em detrimento de outras. O que se traduziria numa assimetria espacial da população no interior de determinada sala. A localização em relação à janela poderia também ser um fator preferencial que condicionasse a uniformidade da distribuição dos alunos pela sala. Tal como já foi mencionado anteriormente, em situações de aula normal, cada indivíduo é livre de escolher o seu lugar na sala e mesmo de trocar de lugar se por algum motivo estiver desconfortável. Em situações de exame, cada indivíduo é também livre de escolher seu lugar, sendo que esta decisão se encontra restringida aos lugares previamente designados ou assinalados com uma folha de prova. No entanto, em todos os ensaios realizados nunca foi registada nenhuma troca de lugar por motivos de desconforto com algum dos estímulos analisados. Em situações de aula normal, verificou-se que a distribuição dos lugares nas salas em que uma das paredes laterais é envidraçada não sofre assimetrias visíveis em relação à janela. Nesta situação, tal como em outras onde as janelas se encontra no fundo da sala, a distribuição dos alunos é uniforme e dependendo da taxa de ocupação da sala são preferencialmente usados os lugares mais próximos do quadro. Como tal, depende-se que a escolha dos lugares não é visivelmente condicionada pela proximidade à janela, mas sim pelas condições de visibilidade do quadro e tela de projeção.

A iluminância no plano de trabalho não apresentou em nenhuma das análises efetuadas, significância estatística para a sua inclusão no modelo e a percentagem da variância do voto luminoso explicada por esta variável é praticamente nula (0,2%).

Foram ainda testadas outras variáveis independentes como sejam o azimute solar no momento do preenchimento dos inquéritos, bem como o ângulo de incidência do sol nas janelas no mesmo instante. Nenhuma destas variáveis apresentou relevância estatística para o modelo.

Para o processo de regressão dos dados experimentais, foram testadas equações de diversas famílias: polinomiais, de potências, exponenciais, logarítmicas, sigmoidais, trigonométricas e funções racionais. Para o conjunto de dados experimentais obtido, foram ajustadas linearmente 23141 equações e não-linearmente 289 equações. Em todas as regressões efetuadas, os coeficientes foram estimados através de algoritmos diferenciais genéticos evolutivos, tanto para as equações não lineares como para os parâmetros-objetivo de ajustamento não Gaussiano (Phillips, 2013).

A análise dos resultados das regressões efetuadas determinou que as funções polinomiais são aquelas que melhores resultados de ajustamento apresentam. Tanto ao nível da minimização do *RMSE* como também na coerência em termos de tradução física da função obtida.

A função (polinomial) que melhor ajusta o conjunto de resultados experimentais e possuindo simultaneamente significância estatística em todos os coeficientes é apresentada na Equação (4.39).

$$Lu.PMV = a + b.z + c.z.A_w \quad (4.39)$$

Esta equação apresenta a seguinte informação estatística: $RMSE = 24,98$; $R^2 = 0,686$; $R^2_{ajustado} = 0,651$; $F = 19,5$; $Valor-p = 3,0 \times 10^{-5}$; $\chi^2 = 13104,0$ e as variáveis independentes nela contidas são:

z - Valor absoluto do azimute de orientação da janela em relação ao "sul" em [radianos];

A_w - Área de envidraçados exterior em [m²]

Os coeficientes (a, b, c) da Equação (4.39) são apresentados na tabela seguinte, conjuntamente com os valores-p associados às variáveis.

Tabela 4.20 - Coeficientes e estatística das variáveis significativas para o voto luminoso médio previsível.

Variável	Coefficiente	Valor -p
Independente	$a = 2,0399 \times 10^2$	$2,08449 \times 10^{-11}$
z	$b = -52,3023$	$1,40078 \times 10^{-5}$
$z \cdot A_w$	$c = 2,7200$	$1,66660 \times 10^{-4}$

Organizando a Equação (4.39) de outra forma, ela pode ser escrita como:

$$Lu.PMV = 204 + 2,72.z(A_w - 19,23) \quad (4.40)$$

Graficamente, a função do voto médio luminoso previsto é apresentada na Figura 4.45. O valor z é sempre uma grandeza compreendida no intervalo $0 \leq z \leq \pi$ radianos. Quando a janela é orientada a sul, o valor z é nulo e quando a janela é orientada a norte, o valor é π . Para as demais orientações é sempre considerado o valor absoluto do ângulo azimutal. Observa-se pela figura que, para valores de z mais elevados (ou seja janelas cada vez mais orientadas a norte) a sensibilidade do voto luminoso à área de envidraçados exterior aumenta. Ou seja, no contexto de salas de aula, a área de envidraçados na fachada exterior contribui sempre positivamente para a percepção do ambiente luminoso. Contudo, a

necessidade de áreas de envidraçados exteriores aumenta à medida que a fachada exterior possua uma orientação cada vez mais a norte.

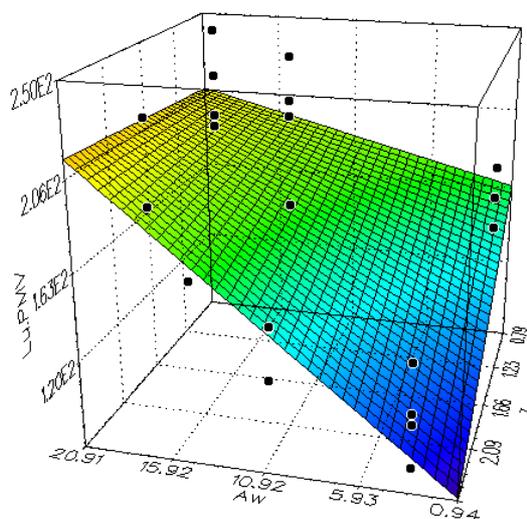


Figura 4.45 - Voto luminoso médio previsível ($Lu.PMV$) em função da área exterior de envidraçados (A_w) e da respetiva orientação azimutal (z)

Foi também analisada a possibilidade de utilização de variáveis adimensionalizadas no modelo. Nomeadamente adimensionalizar a área de envidraçados pelo valor da área da sala ou da área total da envolvente. A variável de orientação azimutal da janela é desde logo adimensional, uma vez que o seu valor é apresentado em *radianos*. A grande vantagem da adimensionalização das variáveis reside no facto de tal aportar consistência dimensional ao modelo de voto luminoso médio previsível. Contudo, todas as variáveis adimensionais ensaiadas comportam-se pior nas análises de regressão efetuadas do que a variável A_w .

A análise de resultados mostrou que o modelo luminoso é aquele que apresenta uma menor dispersão do voto médio expresso nos inquéritos em relação ao voto médio previsível, traduzida pelo menor dos valores de *RMSE* quando comparado com os outros modelos. A consistência deste resultado e a interpretação física das equações obtidas, suportam a hipótese de, mesmo em outras situações não letivas, o voto luminoso poder ser estimado com base nas mesmas variáveis.

Índice Global da Perceção do Ambiente Interior

O índice global da perceção do ambiente interior é obtido pela combinação das perceções dos ambientes térmico, acústico e luminoso. Para cada um destes ambientes em particular é apresentado um conjunto de equações que permitem calcular o respetivo voto médio previsível e também a percentagem previsível de insatisfeitos.

Ambiente Térmico:

No âmbito do trabalho efetuado verificou-se uma boa concordância entre os valores de voto térmico médio previsível ($Th.PMV$) calculado de acordo com a norma (ISO 7730, 2005) e os votos térmicos expressos nos inquéritos da perceção subjetiva.

No caso da percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente térmico, a mesma norma apresenta uma equação que permite o seu cálculo em função do $Th.PMV$. No âmbito deste trabalho verificou-se que a percentagem de insatisfeitos com o ambiente térmico ($Th.PPD$) é uma função cumulativa de densidade de probabilidade em que a variância é função do voto térmico médio. A equação, obtida desta forma, permite dar a esta grandeza ($Th.PPD$) uma nova interpretação com tradução física dos resultados obtidos. Permite ainda que se retirem conclusões adicionais e mantém um bom nível de ajustamento em relação aos resultados experimentais obtidos. Como tal, é proposto o cálculo da percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente térmico a partir de:

$$Th.PPD = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1500 - \sqrt{Th.PMV^2}}{560 - 1,75\sqrt{Th.PMV^2}}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.41)$$

Ambiente acústico:

$$Ac.PMV = 736 - 682,3D_{2m,nT,w} - 16,9RT + 18,1RT.D_{2m,nT,w} \quad (4.42)$$

Sendo a percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente acústico obtida a partir do voto acústico médio previsível de acordo com:

$$Ac.PPD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{-1000 - 6Ac.PMV}{1020 - 2,04Ac.PMV}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.43)$$

Ambiente Luminoso:

$$Lu.PMV = 204 + 2,72.z(A_w - 19,23) \quad (4.44)$$

Sendo a percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente luminoso obtida a partir do respetivo voto médio previsível de acordo com:

$$Lu.PPD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{-1000-6Lu.PMV}{1140-1.2Lu.PMV}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.45)$$

Qualidade do Ar :

A perceção da qualidade do ar interior não é considerada para a construção do índice global da perceção do ambiente interior pelos motivos apresentados anteriormente. Tão pouco foi possível identificar um conjunto de grandezas físicas mensuráveis que permitam de forma simples descrever a perceção humana do ar interior (AQ.PMV) em condições de exposição prolongada. Contudo, foi possível identificar que a percentagem previsível de insatisfeitos com o ar interior (AQ.PPD) pode ser expressa em função do voto médio respetivo da mesma forma que para os demais ambientes considerados. Ou seja:

$$AQ.PPD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{-1000-6AQ.PMV}{1080-1.5AQ.PMV}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.46)$$

Ambiente Interior (Global):

O voto da avaliação subjetiva da qualidade do ambiente interior é obtido como conjugação dos efeitos combinados das perceções subjetivas dos ambientes térmico, acústico e luminoso. Pelos motivos apresentados anteriormente, é proposta uma rede neuronal artificial do tipo multicamada de perceptrões (MLP)

Verificou-se, no âmbito deste trabalho que a percentagem previsível de insatisfeitos com o ambiente interior no seu global é também ela traduzida pela mesma forma que as percentagens de insatisfeitos com cada um dos ambientes contribuintes para este mesmo índice. Ou seja, este índice (IE.PPD) é também ele uma função cumulativa de densidade de probabilidade com a variância função do voto médio previsível respetivo. Ou seja:

$$IE.PPD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{-1000-5IE.PMV}{925-1.75IE.PMV}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (4.47)$$

5. Conclusões

Há algumas conclusões e contribuições que resultam do trabalho efetuado. Hierarquizar as conclusões obtidas e eleger a principal implica definir à partida quais os critérios de ordenação considerados mais importantes. A escolha da principal conclusão ou principal contribuição deste trabalho é também ela uma avaliação subjetiva. Desta forma, a escolha recaiu não sobre a conclusão que pode representar o maior impacto em termos económicos, nem sobre aquela que representou o maior volume de trabalho. A escolha recaiu sobre aquele que é desde o início o objetivo principal do trabalho: A criação de um índice da perceção da qualidade de um ambiente interior.

Num contexto de sala de aula a perceção subjetiva global do ambiente interior pode ser calculada com base nas perceções subjetivas dos ambientes térmico, acústico e luminoso. Por sua vez a perceção subjetiva de cada um destes ambientes pode ser obtida a partir de grandezas físicas, objetivas e mensuráveis. Para cada um dos ambientes mencionados e também para a avaliação global subjetiva do ambiente interior, a percentagem previsível de insatisfeitos é uma função univariada do voto médio respetivo.

A perceção da qualidade do ar interior não deve ser considerada num índice global de perceção da qualidade do ambiente interior em situações de exposição longa à atmosfera interior, por quatro motivos diferentes: [1] Nesta situação (exposição de longa duração), há suficientes evidências que os seres humanos não conseguem ter a perceção global da qualidade do ar nesse espaço confinado; [2] A pituitária humana possui por um lado uma sensibilidade muito maior a concentrações pequenas de moléculas odoríferas do que os equipamentos atualmente disponíveis. Por outro lado, em situações de exposição prolongada, possui muito baixa ou nenhuma sensibilidade a substâncias inodoras como sejam o dióxido de carbono ou as partículas em suspensão no ar; [3] Há uma grande sobreposição entre os valores das perceções de "Qualidade do ar interior" e "Qualidade do ambiente interior". Neste ponto é recomendável a adoção de uma nova formulação para esta pergunta, por forma a clarificar se a sobreposição identificada é meramente semântica ou resultado de outros fatores; [4] A perceção subjetiva do ar interior não pode ser obtida apenas com base nas perceções subjetivas de cheiros/odores e ar viciado/fresco sem variáveis adicionais como sejam (neste caso) a matriz de distribuição humana no interior da sala.

As percepções subjetivas dos ambientes Acústico e Luminoso podem ser descritas pela combinação linear das percepções de ruído interior e ruído exterior e das percepções de iluminações natural e artificial, respetivamente. Em contexto de sala de aula, as contribuições relativas de cada uma das percepções não se alteram consoante o tipo de tarefa desempenhada (aula teórica ou exame) ou o tipo de distribuição humana pelos lugares disponíveis (distribuição localmente densa ou distribuição esparsa). A percepção da qualidade do ar interior pode ser descrita de forma rigorosa pela combinação linear das percepções de ar fresco/viciado e cheiros/odores. Contudo, neste caso por um lado estas duas variáveis não são absolutamente independentes uma da outra: Existe um nível não negligenciável de correlação entre ambas. Por outro lado, verificou-se que as ponderações relativas destas duas percepções dependem da distância(s) à(s) fonte(s) de odores ou da distribuição espacial humana no interior da sala.

O estado de espírito individual ou a auto avaliação da performance face às expectativas individuais iniciais não influencia nenhuma das percepções subjetivas relativas aos ambientes acústico, luminoso e de qualidade do ar. Tão pouco a avaliação global do ambiente interior, no seu todo, é afetada pelo estado de espírito individual.

Verificou-se que a metodologia adotada para as escalas de voto, com utilização de gradientes de cor e legendas para permitir uma rápida identificação das classes existentes e consequentemente o rápido preenchimento dos inquéritos se revelou adequada para o objetivo pretendido. No entanto, para o caso do voto térmico na zona de conforto, verificou-se que o nível de detalhe proporcionado pela escala de voto bipolar especificamente na zona de conforto, é inferior ao proporcionado pelas escala unipolares.

Considerando o resultado do voto térmico expresso na escala bipolar de sete classes e os votos acústico e luminoso expressos em escala unipolares de seis classes, não é possível obter as contribuições independentes de cada uma destas percepções para o voto de avaliação global do ambiente interior.

No entanto, convertendo o voto térmico da escala bipolar usada para uma escala unipolar semelhante à usada para as outras três variáveis de percepção subjetiva independentes, é possível obter a contribuição individual, linear e independente das várias percepções subjetivas para o índice global da percepção subjetiva da qualidade do ambiente interior. Usando esta metodologia verificou-se que 81% da variância da percepção global do ambiente interior é explicada pelas contribuições lineares e independentes das percepções térmica, acústica e luminosa.

Há componentes do índice global não lineares e dependentes das percepções combinadas de mais do que um ambiente interior com ponderações relativas distintas. Entrando em linha de conta com todas as contribuições lineares e não lineares, verifica-se que 94% da variância da percepção global do ambiente interior pode ser explicada pela contribuição das percepções: Térmica, Acústica e Luminosa. A componente não linear e não linearmente separável das três percepções consideradas representa uma diferença de 13% entre os valores da variância da percepção global explicada pelas três percepções mencionadas.

Efetuada uma análise de sensibilidade à contribuição da percepção térmica para o índice global, constatou-se que: [1] Considerando apenas as contribuições lineares e independentes das percepções subjetivas verifica-se que a contribuição térmica é da ordem de 25%; [2] Considerando todas

contribuições cruzadas, lineares e não lineares incluídas modelo obtido usando, redes neuronais artificiais, verifica-se que a contribuição térmica passa a ser da ordem de 50%.

Verificou-se que a percentagem de insatisfeitos com um ambiente interior é função cumulativa de densidade de probabilidade do voto médio em relação a esse mesmo ambiente. A função da percentagem previsível de insatisfeitos depende em cada caso da variação do nível de consenso da população e do limiar de desconforto definido pela escala usada e respetivas classes.

Todas as perceções subjetivas (térmica, acústica, de qualidade do ar, e global do ambiente interior) apresentam um comportamento semelhante e que pode ser descrito por um modelo matemático comum:

Em todos os casos se verificou que o nível de consenso da população (descrito pelo desvio-padrão dos votos) em relação a um determinado ambiente aumenta à medida que a perceção da qualidade do mesmo também melhora. Em todos os casos, o desvio padrão varia linearmente. Estas conclusões são válidas também para o voto térmico expresso em escala bipolar, sendo a respetiva função apresentada também neste trabalho.

Em termos de conforto térmico, verificou-se que ao longo de cerca de dois anos de ensaios de campo em edifícios naturalmente ventilados, não se registou nenhuma situação de voto térmico médio acima do limiar de desconforto quente ou abaixo do limiar de desconforto frio. As condições de conforto são mantidas por comportamentos adaptativos com dois níveis de incidência: Ajuste do nível de vestuário e abertura e fecho de janelas e porta. Nestas condições, o índice *Th.PMV* (*Thermal Predicted Mean Vote*) proposto por Fanger (Fanger, 1970) apresentou um bom nível de concordância com o voto térmico expresso nos ensaios.

Nestas condições, o conhecimento prévio do nível de vestuário médio de uma população é de capital importância para a determinação das condições de conforto térmico no interior. A este nível, verificou-se que o nível médio de vestuário que uma determinada população enverga pode ser calculado com elevada precisão apenas com base na memória térmica do dia precedente (temperatura média do dia anterior) e na previsão meteorológica para esse dia (temperatura máxima do dia).

Neste âmbito, constatou-se que a temperatura efetiva interior de conforto calculada com base na satisfação da igualdade $Th.PMV = 0$ de acordo com a norma respetiva (ISO 7730, 2005) é concordante com a temperatura interior de conforto preconizada pelo *standard* térmico adaptativo (EN 15251, 2007). Mas para o cálculo da temperatura exterior de referência preconizada pelo *standard* adaptativo, os resultados do presente estudo evidenciam que a história térmica anterior à véspera não possui significância estatística para que possa ser usada no modelo. Como tal, a utilização de informação climática referente ao período do mês anterior não é mais do que um processo de utilização de dados em excesso (*over fitting*), que não proporciona nenhuma ligação física entre as variáveis usadas no modelo e os comportamentos adaptativos adotados pelas pessoas. O presente estudo concluiu que a temperatura exterior de referência é determinada pelas mesmas variáveis que condicionam o nível de vestuário (temperatura média do dia anterior e previsão de temperatura máxima para o dia em causa) e exatamente nas mesmas ponderações em que condicionam a escolha do nível de vestuário (cerca de 80% para a temperatura média do dia anterior e 20% para a temperatura máxima prevista para o dia em questão).

A perceção da qualidade acústica das salas pode ser modelada apenas com base em duas características do comportamento acústico do espaço interior em questão: o tempo de reverberação e o isolamento acústico da fachada exterior. A grande vantagem do modelo obtido desta forma é a sua

simplicidade. Contudo, este é também o modelo em que se encontra em último lugar no *ranking* de ajustamento de resultados. O modelo acústico apresenta pois algum potencial de melhoramento em ensaios futuros. A este nível é importante ter em consideração que todos os modelos foram construídos de forma independente uns dos outros e combinados não linearmente para a obtenção de um resultado final de percepção da qualidade do ambiente interior. Como tal, qualquer refinamento no modelo acústico (tal como em qualquer um dos outros) pode ser efetuado sem afetar os demais modelos e implica sempre uma melhoria ao nível do índice global da percepção de qualidade.

A percepção de qualidade do ambiente luminoso das salas durante o período diurno pode ser obtida unicamente com base nas áreas de envidraçados exteriores e orientação dos mesmos. Nas condições de ensaios de campo efetuados o nível de iluminância medido ao nível do plano de trabalho não apresenta significância estatística para o modelo proposto. Verificou-se também que a sensibilidade da percepção de qualidade do ambiente luminoso à área de envidraçados exterior diminui à medida que a orientação da mesma se aproxima do ponta cardeal sul.

Desenvolvimentos Futuros

Um dos desenvolvimentos futuros envolve sem dúvida a realização de mais ensaios de campo com medição simultânea dos níveis de pressão sonora (L_{eq}) no exterior e interior da sala.

Também no sentido da realização de mais ensaios de campo, os inquéritos de avaliação da percepção subjetiva encontram-se a ser revistos tendo em vista três aspetos diferentes:

1. Na avaliação da qualidade do ar interior as perguntas terão que ser reformuladas de forma a induzir os participantes a refletir sobre a qualidade do fluido que se encontra no interior dos seus pulmões. É ainda importante que nesta reformulação não seja "perda de vista" a premissa principal de simplicidade nas perguntas. Cada pergunta deve ser clara, compacta e imediatamente compreendida na sua plenitude;
2. É importante proceder a ajustes na avaliação da percepção subjetiva do ambiente térmico. Constatou-se que a escala bipolar de sete classes, por si só, não proporcionava na classe de conforto, um nível de detalhe semelhante ao proporcionado pelas escala unipolares de seis classes. A solução que está a ser equacionada, passa por manter a escala bipolar de sete classe, mas usando em paralelo uma outra unipolar da seis classes. Esta solução pode apresentar alguns perigos ou desvantagens que terão que ser ponderados e anulados (ou minimizados). O principal é o de poder induzir os participantes no estudo a sentirem que estão a responder às mesmas perguntas em duplicado. O que poderia diminuir o nível de concentração e interesse com que o inquérito é preenchido.
3. A escala de cinco classes empregue para a avaliação da percepção do ambiente interior no seu global deverá ser repensada. As vantagens do ponto de vista da agregação de resultados, que se pensou inicialmente que pudessem existir, não se evidenciaram no decurso da análise de resultados efetuada. A existência de uma classe de avaliação "Neutra" nesta escala foi introduzida inicialmente pelo facto de se considerar que uma avaliação positiva num determinado ambiente conjugada com uma avaliação negativa num outro poderia resultar numa avaliação global "Neutra". No entanto, a análise de resultados efetuada não veio confirmar este facto. E a sensibilidade recolhida durante o tratamento dos resultados é a de

que há vantagens em que a escala usada para a variável dependente seja igual às usadas para todas as variáveis independentes.

Um aspeto que se revelou sensível para a perceção da qualidade do ar interior foi a densidade de distribuição espacial das pessoas no interior da sala. Seria muito importante que, para cada inquérito preenchido, fosse possível determinar a localização da pessoa na sala e a densidade de pessoas na sua vizinhança próxima. Algumas das soluções que estão a ser pensadas para serem incorporadas nos inquéritos passam pela referenciação, através de códigos, dos vários lugares existentes na sala. Desta forma, os inquéritos não deixariam de ser anónimos, mas permitiriam reconstituir a matriz de distribuição espacial de pessoas no interior da sala para cada um dos ensaios realizados.

Um outro aspeto que se equaciona abordar em ensaios futuros prende-se com questões de conforto no âmbito da ergonomia física. Questões como o conforto das cadeiras ou a adequação da posição de escrita. A abordagem de variáveis deste âmbito levanta alguns problemas do ponto de vista da aquisição de grandezas experimentais objetivas relevantes que terão que ser analisadas detalhadamente.

Finalmente, é importante também proceder à realização de ensaios em ambientes interiores climatizados com sistemas de ventilação mecânica, por forma a confirmar (ou não) a hipótese de os comportamentos adaptativos registados em edifícios naturalmente ventilados também se registarem em edifícios com ventilação mecânica, embora neste último caso dependentes do horizonte temporal de permanência no interior do edifício.

Bibliografia

Agência Portuguesa do Ambiente. (2010). *Manual de métodos e de procedimentos operativos das redes de monitorização da qualidade do ar - Amostragem e análise* (p. 284). Lisboa.

Akashi, Y., & Boyce, P. R. (2006). A field study of illuminance reduction. *Energy and Buildings*, 38(6), 588–599. doi:10.1016/j.enbuild.2005.09.005

Alcobia, C. J. O. P. J. (2006). *Ergonomia Ambiental em Veículos*. University of Coimbra.

Alcobia, C. J. O. P. J., & Silva, M. C. G. (1999). A comfort field study in public transportation buses. (SAE Paper 1999-01-0894, Ed.) *SAE Technical Paper 1999-01-0894*. doi:10.4271/1999-01-0894

Alfano, F. R. A., Bellia, L., Boerstra, A., Dijken, F. van, Ianniello, E., Lopardo, G., ... da Silva, M. C. G. (2010). *Indoor Environment and Energy Efficiency in Schools*. (F. R. A. Alfano, Ed.). REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations.

Andersson, J., Boerstra, A., Clements-Croome, D., Fitzner, K., & Hanssen, S. O. (2006). *Indoor climate and productivity in offices*. (P. Wargocki & O. Seppänen, Eds.) (REHVA Guid.). Brussels: REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations.

ANSI/ASHRAE Standard 55. (2010). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ANSI/ASHRAE Standard 62.1. (2010). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.

Aries, M. B. C., Veitch, J. a., & Newsham, G. R. (2010). Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology*, 30(4), 533–541. doi:10.1016/j.jenvp.2009.12.004

ASHRAE. (2009). *Handbook of Fundamentals*. ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASTM E 741. (2006). Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. ASTM International.

- ASTM E544-10. (2010). Standard Practices for Referencing Suprathreshold Odor Intensity. ASTM International. doi:10.1520/E0544-10
- ASTM E679-91. (1997). Standard Practice for Determination of Odor and Taste Thresholds By a Forced-Choice Ascending Concentration Series Method of Limits. ASTM International. doi:10.1520/E0679-91R97
- Awbi, H. B. (2013). *Ventilation of Buildings* (p. 536). Routledge.
- Baker, N., & Standeven, M. (1996). Thermal comfort for free-running buildings. *Energy and Buildings*, 23(3), 175–182. doi:10.1016/0378-7788(95)00942-6
- Balazova, I., Clausen, G., & Wyon, D. (2007). The influence of exposure to multiple indoor environmental parameters on human perception, performance and motivation. In *Proceedings of Clima 2007 - Wellbeing Indoors*. Retrieved from http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive\clima2007\A01\A01B1133.pdf
- Basheer, I. A. (1998). *Neuromechanistic-based Modeling and Simulation of Constitutive Behavior of Fine-grained Soils* (p. 820). ProQuest. Retrieved from http://books.google.pt/books/about/Neuromechanistic_based_Modeling_and_Simu.html?id=qyxXwAACAAJ&pgis=1
- Berglund, L., & Cain, W. (1989). Perceived air quality and the thermal environment. In *IAQ '89 - The human equation: Health and comfort proceedings* (pp. 93–99). Retrieved from http://www.inive.org/lbase_search/search-detail-airbase-001.asp?ID=4207
- Billings, J. (1893). Ventilation and Health. *The Engineering Record*.
- Blondeau, P., Lordache, V., Poupard, O., Genin, D., & Allard, F. (2005). Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools. *Indoor air*, 15(1), 2–12. doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00263.x
- Bodmann, H. (1967). Quality of interior lighting based on luminance. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*. Retrieved from https://webvpn.uc.pt/http/0/scholar.google.pt/scholar?q=related:oY6zX2H-pyQJ:scholar.google.com/&hl=pt&as_sdt=0,5#0
- Boyce, P R, Veitch, J. A., Newsham, G. R., Jones, C. C., Heerwagen, J., Myer, M., & Hunter, C. M. (2006). Lighting quality and office work: two field simulation experiments. *Lighting Research and Technology*, 38(3), 191–223. doi:10.1191/1365782806lrt161oa
- Boyce, Peter Robert, & Boyce, P. R. (2010). *Human Factors in Lighting* (Second Edi., p. 602). Taylor & Francis.
- Bradley, J. S., Reich, R. D., & Norcross, S. G. (1999). On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility. *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(4), 1820–1828. doi:http://dx.doi.org/10.1121/1.427932
- Branis, M., Rezáčová, P., & Domasová, M. (2005). The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM(10), PM(2.5), and PM(1) in a classroom. *Environmental research*, 99(2), 143–9. doi:10.1016/j.envres.2004.12.001
- Braniš, M., Šafránek, J., & Hytychová, A. (2009). Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school. *Building and Environment*, 44(6), 1246–1252. doi:10.1016/j.buildenv.2008.09.010

- Bringslimark, T., Hartig, T., & Grindal Patil, G. (2011). Adaptation to Windowlessness: Do Office Workers Compensate for a Lack of Visual Access to the Outdoors? *Environment and Behavior*, 43(4), 469–487. doi:10.1177/0013916510368351
- Broadbent, D. E. (1971). *Decision and stress* (p. 522). London: Academic Press.
- BS 5925. (1991). Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation.
- Budd, G. M. (2008). Wet-bulb globe temperature (WBGT)--its history and its limitations. *Journal of science and medicine in sport / Sports Medicine Australia*, 11(1), 20–32. doi:10.1016/j.jsams.2007.07.003
- Building Bulletin 101. (2006). *Ventilation of School Buildings* (pp. 1–62). British Department for Education. Retrieved from <http://www.education.gov.uk/aboutdfe/executiveagencies/efa/schoolscapital/buildingsanddesign/a0058229/ventilation-and-indoor-air-quality-in-schools-building-bulletin-101>
- Building Bulletin 93. (2004). *Acoustic design of schools: A design guide* (p. 89). Retrieved from <https://www.education.gov.uk/publications/standard/publicationDetail/Page1/BB93>
- Buratti, C., Mariani, R., & Moretti, E. (2011). Mean age of air in a naturally ventilated office: Experimental data and simulations. *Energy and Buildings*, 43(8), 2021–2027. doi:10.1016/j.enbuild.2011.04.015
- Cao, B., Ouyang, Q., Zhu, Y., Huang, L., Hu, H., & Deng, G. (2012). Development of a multivariate regression model for overall satisfaction in public buildings based on field studies in Beijing and Shanghai. *Building and Environment*, 47, 394–399. doi:10.1016/j.buildenv.2011.06.022
- Chang, C., & Chen, P. (2005). Human response to window views and indoor plants in the workplace. *HortScience*, 40(5), 1354–1359. Retrieved from <http://hortsci.ashspublications.org/content/40/5/1354.short>
- Chauvel, P., Collins, J. B., Dogniaux, R., & Longmore, J. (1982). Glare from windows: current views of the problem. *Lighting Research and Technology*, 14(1), 31–46. doi:10.1177/096032718201400103
- Che, ZG, Chiang, T., & Che, Z. (2011). Feed-forward neural networks training: a comparison between genetic algorithm and back-propagation learning algorithm. *Int J Innov Comput Inf*. Retrieved from <https://webvpn.uc.pt/http/0/www.ijicic.org/ijicic-10-03015.pdf>
- Che, ZH. (2010). PSO-based back-propagation artificial neural network for product and mold cost estimation of plastic injection molding. *Computers & Industrial Engineering*. Retrieved from <https://webvpn.uc.pt/http/0/www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835210000069>
- CIE 117. (1995). Discomfort Glare in Interior Lighting. International Commission on Illumination.
- CIE 55. (1983). Discomfort glare in the interior working environment. International Commission on Illumination.
- Clausen, G., Carrick, L., Fanger, P., & Kim, S. (1993). A Comparative Study Of Discomfort Caused By Indoor Air Pollution, Thermal Load And Noise. *Indoor Air*, 3(4), 255–262. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0668.1993.00006.x/abstract>
- Collins, K., & Hoinville, E. (1980). Temperature requirements in old age. *Building Services Engineering Research And Technology*, 1(4), 165–172. Retrieved from <http://bse.sagepub.com/content/1/4/165.short>

- Corgnati, S. P., Ansaldi, R., & Filippi, M. (2009). Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: Assessment through objective and subjective approaches. *Building and Environment*, 44(4), 785–792. doi:10.1016/j.buildenv.2008.05.023
- Corgnati, S. P., da Silva, M. C. G., Ansaldi, R., Asadi, E., Costa, J. J., Filippi, M., ... Wargocki, P. (2011). *Indoor Climate Quality Assessment*. (S. P. Corgnati & M. C. G. da Silva, Eds.). Brussels: REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations.
- Crandell, C., & Smaldino, J. (2000). Classroom acoustics for children with normal hearing and with hearing impairment. *Language, speech, and hearing services in ...*, 31(October), 362–370. Retrieved from <http://lshss.asha.org/cgi/content/abstract/31/4/362>
- Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of control, signals and systems*, 2, 303–314. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02551274>
- De Carvalho, P. M. (2006). *Influência das Oscilações de Carga e de Regime nas Emissões de Poluentes de um Motor de Explosão*. Universidade Técnica de Lisboa.
- De Carvalho, P. M., da Silva, M. G., & Ramos, J. E. (2013). Influence of weather and indoor climate on clothing of occupants in naturally ventilated school buildings. *Building and Environment*, 59, 38–46. doi:10.1016/j.buildenv.2012.08.005
- De Dear, R. J., & Brager, G. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Trans*, 104, 145–167. Retrieved from <http://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6.pdf>
- De Dear, Richard, & Brager, G. S. (1998). Thermal Adaptation in the Built Environment: a Literature Review. *Energy and Buildings*, 27(1), 83–96. Retrieved from <http://escholarship.org/uc/item/5ts1r442>
- De Dear, Richard J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549–561. doi:10.1016/S0378-7788(02)00005-1
- Dear, R De. (2004). Thermal comfort in practice. *Indoor Air*, 14 Suppl 7(Suppl 7), 32–9. doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00270.x
- Dear, Richard De, Brager, G., & Cooper, D. (1997). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE RP- 884*, (March).
- Dear, R.J., Ring, J. W., & Fanger, P. O. (1993). Thermal Sensations Resulting From Sudden Ambient Temperature Changes. *Indoor Air*, 3(3), 181–192. doi:10.1111/j.1600-0668.1993.t01-1-00004.x
- Decreto-Lei 111/2002. (2002). Diário da República 1ª Série A nº 89 de 16 de Abril de 2002. Diário da República Electrónico.
- Decreto-Lei 9/2007. (2007). Regulamento Geral do Ruído. Portuguese Law: Diário da República Electrónico.
- Decreto-Lei 96/2008. (2008). Regulamento dos requisitos acústicos de edifícios. Portuguese Law: Diário da República Electrónico.
- Diapouli, E., Chaloulakou, A., Mihalopoulos, N., & Spyrellis, N. (2008). Indoor and outdoor PM mass and number concentrations at schools in the Athens area. *Environmental monitoring and assessment*, 136(1-3), 13–20. doi:10.1007/s10661-007-9724-0

- Directiva 2002/91/CE de 2003 com correções COM/0780 de 2008. (2008). Desempenho energético dos edifícios. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Desempenho+energico+dos+edificios#5>
- Directive 2010/31/EU. (2010). on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, 153, 13–35.
- DuBois, E. F. (1941). The temperature of the human body in health and disease. *Temperature: Its measurement and control in science and industry*.
- Duffee, R. A., & O'Brien, M. (2000). Response to Odors. In J. D. Spengler, J. M. Samet, & J. F. McCarthy (Eds.), *Indoor Air Quality Handbook* (pp. 21.1–21.12). McGraw-Hill. doi:10.1093/infdis/jis087
- Einhorn, H. D. (1969). A new method for the assessment of discomfort glare. *Lighting Research and Technology*, 1(4), 235–247. doi:10.1177/14771535690010040201
- Einhorn, H. D. (1979). Discomfort glare: a formula to bridge differences. *Lighting Research and Technology*, 11(2), 90–94. doi:10.1177/14771535790110020401
- EN 12341. (1998). Air quality - Determination of the PM 10 fraction of suspended particulate matter - Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods. Brussels: CEN - European Committee for Standardization.
- EN 15251. (2007). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels: CEN - European Committee for Standardization.
- EPA. (2013). Health | Particulate Matter | Air & Radiation | US EPA. *US Environmental Protection Agency*. Retrieved July 01, 2013, from <http://www.epa.gov/pm/health.html>
- Fang, L., Clausen, G., & Fanger, P. (1998a). Impact of Temperature and Humidity on Perception of Indoor Air Quality During Immediate and Longer Whole-Body Exposures. *Indoor Air*, 8(4), 276–284. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0668.1998.00008.x/abstract>
- Fang, L., Clausen, G., & Fanger, P. (1998b). Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *Indoor Air*, 8(2), 80–90. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x/abstract>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. (Danish Technical Press, Ed.) (p. 244). Copenhagen.
- Fanger, P. O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine*, 30(4), 313–24. Retrieved from <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1069471&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- Fanger, P. O. (1988). Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors. *Energy and Buildings*, 12(1), 1–6. doi:10.1016/0378-7788(88)90051-5
- Fanger, P. O. (2000). Perceived Air Quality and Ventilation Requirements. In J. D. Spengler, J. M. Samet, & J. F. McCarthy (Eds.), *Indoor Air Quality Handbook* (pp. 22.1–22.11). McGraw-Hill. doi:10.1093/infdis/jis087

- Ferreira, V. (2012). Revisiting psychophysical work on the quantitative and qualitative odour properties of simple odour mixtures: a flavour chemistry view. Part 1: intensity and detectability. A review. *Flavour and Fragrance Journal*, 27(2), 124–140. doi:10.1002/ffj.2090
- Fletcher, H., & Munson, W. A. (1933). *Isophonic Curves*.
- Gagge, A. P. (1940). Standard operative temperature, a generalized temperature scale applicable to direct and partitioned calorimetry. *American Journal of Physiology*, 131(93).
- Gagge, A. P., Burton, A. C., & Bazett, H. C. (1941). A practical system of units for the description of heat exchange of man with his environment. *Science*, 94, 428–430.
- Gagge, A. P., & Stolwijk, J. A. J. (1972). An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. *Memoirs of the Faculty of*, 77(1), 247–262. Retrieved from http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/37901/1/13Suppl_21-36.pdf
- Giuli, V. De, Da, O., & Carli, M. De. (2012). Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools. *Building and Environment*, 56, 335–345. doi:10.1016/j.buildenv.2012.03.024
- Goldman, R. F. (1981). Evaluating the effects of clothing on the wearer. In K. Cena & J. A. Clark (Eds.), *Bioengineering, thermal physiology, and comfort* (pp. 41–55). Amsterdam: Elsevier.
- Gonzalez, R. R., Nishi, Y., & Gagge, A. P. (1974). Experimental evaluation of standard effective temperature: a new biometeorological index of man's thermal discomfort. *International Journal of Biometeorology*, 18(1), 1–15. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4845140>
- Gunnarsen, L., & Ole Fanger, P. (1992). Adaptation to indoor air pollution. *Environment International*, 18(1), 43–54. doi:10.1016/0160-4120(92)90209-M
- Haldi, F., & Robinson, D. (2011). Modelling occupants' personal characteristics for thermal comfort prediction. *International Journal of Biometeorology*, 55(5), 681–694. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21347586>
- Hancock, P., & Pierce, J. (1985). Combined effects of heat and noise on human performance: A review. *The American Industrial Hygiene*. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15298668591395346>
- Hartig, T., Evans, G. W., Jamner, L. D., Davis, D. S., & Gärling, T. (2003). Tracking restoration in natural and urban field settings. *Journal of Environmental Psychology*, 23(2), 109–123. doi:10.1016/S0272-4944(02)00109-3
- Hassal, J. R., & Zaveri, K. (1988). *Acoustic Noise Measurements* (p. 310). Bruel & Kjaer.
- Hassoun, M. (1995). *Fundamentals of artificial neural networks*. MIT Press. Retrieved from www.google.com/books?hl=pt-PT&lr=&id=Otk32Y3QkxQC&oi=fnd&pg=PR13&dq=hassoun+1995&ots=da6PbFwfT0&sig=mFtENEufdF-k9qw1ielHLDCBzhl
- Haykin, S. (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* (p. 700). Prentice Hall. Retrieved from http://books.google.pt/books/about/Neural_Networks.html?id=3-1HPwAACAAJ&pgis=1
- Holmér, I. (2004). Thermal manikin history and applications. *European journal of applied physiology*, 92(6), 614–8. doi:10.1007/s00421-004-1135-0

- Hopkinson, R. (1963). *Architectural Physics: Lighting*. Retrieved from <https://webvpn.uc.pt/http/0/www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/recordDetail?accno=ED035236>
- Hopkinson, R. (1972). Glare from daylighting in buildings. *Applied Ergonomics*.
- Hopkinson, R., & Bradley, R. (1960). A study of glare from very large sources. *Illuminating Engineering*.
- Horie, G., Sakurai, Y., Noguchi, T., & Matsubara, N. (1985). Synthesized evaluation of noise, lighting and thermal conditions in a room. In *Proceedings of the International Conference of Noise Control Engineering* (pp. 491–496). Krakow. Retrieved from <http://ci.nii.ac.jp/naid/10005736963/>
- Humphreys, M.A. (1973). Clothing and comfort of secondary school children in summertime. In *Proceedings of CIB Symposium W45 (Human Requirements)*.
- Humphreys, M.A. (1977a). Clothing and the outdoor microclimate in summer. *Building and Environment*, 12(3), 137–142. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(77\)90010-5](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(77)90010-5)
- Humphreys, M.A. (1977b). A study of the thermal comfort of primary school children in summer. *Building and Environment*, 12(4), 231–239. doi:10.1016/0360-1323(77)90025-7
- Humphreys, Michael A. (2005). Quantifying occupant comfort: are combined indices of the indoor environment practicable? *Building Research & Information*, 33(4), 317–325. doi:10.1080/09613210500161950
- IES. (2012). *Lighting Handbook*. (D. DiLaura, K. Houser, R. Mistrick, & G. Steffy, Eds.) (p. 1328). Illuminating Engineering Society. Retrieved from <http://pt.scribd.com/doc/46634221/IESNA-Lighting-Handbook>
- Inkarojrit, V. (2005). *Balancing comfort: occupants' control of window blinds in private offices*. University of California, Berkeley. Retrieved from <https://webvpn.uc.pt/http/0/citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.61.4599&rep=rep1&type=pdf>
- ISO 12569. (2012). Thermal performance of buildings and materials — Determination of specific airflow rate in buildings — Tracer gas dilution method. ISO - International Organization for Standardization.
- ISO 13301. (2002). Sensory analysis - Methodology - General guidance for measuring odour, flavour and taste detection thresholds by a three-alternative forced-choice. ISO - International Organization for Standardization.
- ISO 14644-1. (1999). Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness. ISO - International Organization for Standardization.
- ISO 16283-1. (2012). Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation. ISO - International Organization for Standardization.
- ISO 3382-2. (2008). Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. ISO - International Organization for Standardization. Retrieved from <http://www.scribd.com/doc/100814017/BS-EN-ISO-3382-2-2008-Acoustics---Measurement-of-room-acoustic-parameters---Part-2-Reverberation-time-in-ordinary-rooms-1#page=1>
- ISO 532. (1975). Acoustics - Method for calculating loudness level. ISO - International Organization for Standardization.

- ISO 717-1. (2013). Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation.
- ISO 7243. (1989). Hot environments - Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature). ISO - International Organization for Standardization.
- ISO 7726. (1998). Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities. ISO - International Organization for Standardization.
- ISO 7730. (2005). Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Organization for Standardization.
- ISO 8996. (2004). Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic heat production. ISO - International Organization for Standardization.
- ISO CIE 8995. (2002). Lighting of indoor work places. ISO - International Organization for Standardization. Retrieved from <http://pt.scribd.com/doc/56661895/ISO-CIE-8995-2002>
- Jakubiec, J., & Reinhart, C. (2011). The “adaptive zone” - A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces. *Lighting Research and Technology*, 44(2), 149–170. doi:10.1177/1477153511420097
- Karlaftis, M. G., & Vlahogianni, E. I. (2011). Statistical methods versus neural networks in transportation research: Differences, similarities and some insights. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(3), 387–399. doi:10.1016/j.trc.2010.10.004
- Linhart, F., & Scartezzini, J.-L. (2011). Evening office lighting – visual comfort vs. energy efficiency vs. performance? *Building and Environment*, 46(5), 981–989. doi:10.1016/j.buildenv.2010.10.002
- Luoma, M., & Batterman, S. A. (2001). Characterization of Particulate Emissions from Occupant Activities in Offices. *Indoor Air*, 11(1), 35–48. doi:10.1034/j.1600-0668.2001.011001035.x
- Mackie, R. R., McCauley, M., & O’Hanlon, J. F. (1974). *A Study of Heat, Noise, and Vibration in Relation to Driver Performance and Physiological Status. Final Report* (p. 274).
- Mackie, Robert R., & O’Hanlon, J. F. (1977). A Study of the Combined Effects of Extended Driving and Heat Stress on Driver Arousal and Performance. *NATO Conference Series*, 3, 537–558.
- Madsen, T. L. (1971). A new instrument for measuring thermal comfort. In *Proceedings of the 5th Int. Congress for Heating Ventilating and Air Conditioning*. Copenhagen.
- Madsen, T. L., Olesen, B. W., & Cristensen, N. K. (1984). Comparison between operative and equivalent temperature under typical indoor conditions. *ASHRAE transactions*, 1077–1090. Retrieved from <http://www.ibe.dtu.dk/upload/institutter/byg/publications/rapporter/lfv-160.pdf>
- Madsen, T. L., & Popiolek, Z. (1994). An instrument for draught measurements caused by fluctuations in air temperature and/or velocity. In *Proceedings of Roomvent’94, Air Distribution in Rooms Fourth International Conference* (pp. 337–345). Kraków, Poland.
- Manuel Gameiro da Silva, J. J. C. (2011). The influence of wind on the infiltration rates in a web-based monitored service building. In *RoomVent 2011 - 12th International conference on air distribution in rooms*. Trondheim, Norway.

- Martinho, N.A.G., Silva, M. C. G., & Ramos, J. A. . (2004). Evaluation of thermal comfort in a vehicle cabin. *Journal of Automobile Engineering*, 218(Part D), 159–167.
- Martinho, Nuno Alexandre Gonçalves. (2012). *Modelo termofisiológico computacional completo para avaliação do conforto térmico humano*. Universidade de Coimbra.
- McCartney, K. J., & Fergus Nicol, J. (2002). Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, 34(6), 623–635. doi:10.1016/S0378-7788(02)00013-0
- McCullough, E. A., & Jones, B. W. (1985). A comprehensive data base for estimating clothing insulation. *ASHRAE Trans*. Retrieved from http://www.researchnest.com/all_reports/13159061621RP411.pdf
- McIntyre, D. A. (1978). Seven point scales of warmth. *Building Services Eng.*, 45, 215–226.
- Melikov, A. K. (1988). *Quantifying draught risk*. *Technical Review Bruel & Kjaer* (Vol. 2, p. 40).
- Monn, C., Fuchs, A., Högger, D., Junker, M., Kogelschatz, D., Roth, N., & Wanner, H.-U. (1997). Particulate matter less than 10 µm (PM10) and fine particles less than 2.5 µm (PM2.5): relationships between indoor, outdoor and personal concentrations. *Science of The Total Environment*, 208(1-2), 15–21. doi:10.1016/S0048-9697(97)00271-4
- Morgan, CA, & de Dear, R. (2002). Climate Clothing and adaptation in the built environment. *Indoor Air*, 98–103. Retrieved from <http://en.scientificcommons.org/41700753>
- Morgan, Craig, & de Dear, R. J. (2003). Weather, clothing and thermal adaptation to indoor climate. *Climate Research*, 24(3), 267–284. doi:10.3354/cr024267
- Mumovic, D., Palmer, J., Davies, M., Orme, M., Ridley, I., Oreszczyn, T., ... Way, P. (2009). Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England. *Building and Environment*, 44(7), 1466–1477. doi:10.1016/j.buildenv.2008.06.014
- Myhrvold, A., Olsen, E., & Lauridsen, O. (1996). Indoor environment in schools—pupils health and performance in regard to CO2 concentrations. *Indoor Air*, 369–71. Retrieved from [http://www.ullrigg.no/internet/student.nsf/199f312efd2a0cacc125680e00635b85/50ce6056e4792486c125768f004f61c2/\\$FILE/1996-353.pdf](http://www.ullrigg.no/internet/student.nsf/199f312efd2a0cacc125680e00635b85/50ce6056e4792486c125768f004f61c2/$FILE/1996-353.pdf)
- National Bureau of Standards. (2006). The International System of Units [SI]. National Institute of Standards and Technology. doi:10.1119/1.2351766
- Navvab, M., & Altland, G. (1997). Application of CIE glare index for daylighting evaluation. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 115–128.
- Nelson, P. (2003). Sound in the Classroom: Why Children Need Quiet. *ASHRAE journal*, (February). Retrieved from <http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/recordDetail?accno=EJ664549>
- Nicol, F., & Humphreys, M. (2010). Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. *Building and Environment*, 45(1), 11–17. doi:10.1016/j.buildenv.2008.12.013
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572. doi:10.1016/S0378-7788(02)00006-3
- Nilsson, H. O. (2004). *Comfort Climate Evaluation With Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*. University of Gävle, Stockholm. Retrieved from

https://webvpn.uc.pt/http/0/scholar.google.pt/scholar?q=nilson+2004+comfort+climate+evaluati+on+manikins&btnG=&hl=pt-PT&as_sdt=0,5#9

- Nilsson, H. O. (2007). Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods. *Building and Environment*, 42(12), 4000–4005. doi:10.1016/j.buildenv.2006.04.027
- Nishi, Y. (1981). Measurement of thermal balance in man. *Bioengineering, thermal physiology and comfort*, 29–39.
- Nishi, Y., Gonzalez, R. R., & Gagge, A. P. (1978). Clothing insulation as a biometeorological parameter during rest and exercise. *International Journal of Biometeorology*, 22(3), 177–89.
- Niskar, A. S., Kieszak, S. M., Holmes, A., Esteban, E., Rubin, C., & Brody, D. (1998). Prevalence of hearing loss among children 6 to 19 years of age. *Journal of American Medical Association*, 279(14), 1071–1075. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9546565>
- NP 1796. (2007). Segurança e Saúde no Trabalho - Valores limite de exposição profissional a agentes químicos.
- Olesen, B W, & Brager, G. S. (2004). A Better Way to Predict Comfort: The New ASHRAE Standard 55-2004. *ASHRAE Journal*. Retrieved from [http://repositories.cdlib.org/cedr/cbe/ieq/OlesenBrager2004 comfort](http://repositories.cdlib.org/cedr/cbe/ieq/OlesenBrager2004%20comfort)
- Olesen, B.W., & Nielsen, R. (1983). *Thermal insulation of clothing measured on a movable thermal manikin and on human subjects*. Lyngby. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Thermal+insulation+of+clothing+measured+on+a+moveable+manikin+and+on+human+subjects#0>
- Onusic, H., & Hage, M. M. (2005). Parameters used for acoustic qualification/quantification of automotive vehicles. *International journal of vehicle design*, 37(1), 81–98.
- Oseland, N. (1995). Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes. *Energy and Buildings*, 23, 105–115. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778895009345>
- Parsons, K. C. (2000). Environmental ergonomics: a review of principles, methods and models. *Applied Ergonomics*, 31(6), 581–594. doi:10.1016/S0003-6870(00)00044-2
- Paul, B., & Einhorn, H. D. (1999). Discomfort glare from small light sources. *Lighting Research and Technology*, 31(4), 139–144. doi:10.1177/096032719903100402
- Persily, A. (1996). The relationship between indoor air quality and carbon dioxide. In *Indoor Air '96* (Vol. 2, pp. 961–966). Nagoya, Japan: 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Retrieved from <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build96/PDF/b96103.pdf>
- Persily, A. (1997). Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide. *ASHRAE Transactions*, 103. Retrieved from <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build97/PDF/b97044.pdf>
- Phillips, J. R. (2013). Online Curve Fitting and Surface Fitting. Retrieved from <http://zunzun.com/>
- RCCTE. (2006). Decreto-Lei 80/2006 - O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. Portuguese Law: Diário da República - I Série A - n° 67 de 4 de Abril.
- Report EUR 14449 EN. (1992). *Guidelines Ventilation Requirements in Buildings*.

- Ring, J. W., & Dear, R. (1991). Temperature Transients: A Model for Heat Diffusion through the Skin, Thermoreceptor Response and Thermal Sensation. *Indoor Air*, 1(4), 448–456. doi:10.1111/j.1600-0668.1991.00009.x
- Ripley, B. D. (1996). *Pattern Recognition and Neural Networks* (p. 403). Cambridge University Press.
Retrieved from
http://books.google.pt/books/about/Pattern_recognition_and_neural_networks.html?id=2SzT2p8vP1oC&pgis=1
- Roulet, C. A., Johner, N., Flourentzou, F., & Greuter, G. (2003). Multicriteria analysis method of health , IEQ and energy use for sustainable. In *Healthy Buildings*.
- Roulet, C.-A. (2001). Indoor environment quality in buildings and its impact on outdoor environment. *Energy and Buildings*, 33(3), 183–191. doi:10.1016/S0378-7788(00)00080-3
- Rowe, D. (2001). Activity rates and thermal comfort of office occupants in Sydney. *Journal of Thermal Biology*, 26(2001), 415–418. Retrieved from
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306456501000535>
- RSECE. (2006). Decreto-Lei 79/2006 - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios. Portuguese Law: Diário da República - I Série A - n^o 67 de 4 de Abril.
- Rumelhart, D. E., Durbin, R., Golden, R., & Chauvin, Y. (1996). Backpropagation: the basic theory. In P. Smolensky, M. Mozer, & D. E. Rumelhart (Eds.), *Mathematical Perspectives on Neural Networks* (pp. 533–566). New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Samet, J. M. (2000). Radon. In J. D. Spengler, J. M. Samet, & J. F. McCarthy (Eds.), *Indoor Air Quality Handbook* (pp. 40.1 – 40.19). McGraw-Hill. doi:10.1093/infdis/jis087
- Sherman, M. H. (1990). Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment*, 25(4), 365–374. doi:10.1016/0360-1323(90)90010-O
- Shield, B., & Dockrell, J. (2003). The effects of noise on children at school: a review. *Building Acoustics*, 10(2), 97–106. Retrieved from <http://multi-science.metapress.com/index/b70w706127932x78.pdf>
- Silva, M C Gameiro da. (2002). Measurements of comfort in vehicles. *Measurement Science and Technology*, 13(6), R41–R60. doi:10.1088/0957-0233/13/6/201
- Silva, M.C. Gameiro da, Alcobia, C. J. O. P. J., Martinho, N. A. G., & Ramos, J. A. . (2006). Indoor environment in vehicles. *International journal of Vehicle Design*, 42, 35–48. Retrieved from <http://inderscience.metapress.com/index/86dphlr9cyfn21t7.pdf>
- Spengler, J. D., Samet, J. M., & McCarthy, J. F. (2000). *Indoor Air Quality Handbook* (Vol. 205, p. 1600). McGraw-Hill. doi:10.1093/infdis/jis087
- Stevens, S. S. (1986). *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural, and social prospects* (p. 329). Transaction Publishers.
- Tamura, T. (2007). Clothing as a Mobile Environment for Human Beings — Prospects of Clothing for the Future. *Journal of the Human-Environmental System*, 10(1), 1–6.
- Teixeira, M. A., Rodríguez, O., & Rodrigues, A. E. (2010). The perception of fragrance mixtures: A comparison of odor intensity models. *AIChE Journal*, NA–NA. doi:10.1002/aic.12043

- Tittarelli, A., Borgini, A., Bertoldi, M., Desaeger, E., Ruprecht, A., Stefanoni, R., ... Crosignani, P. (2008). Estimation of particle mass concentration in ambient air using a particle counter. *Atmospheric Environment*, 42(36), 8543–8548. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.056
- Toftum, J., Andersen, R. V., & Jensen, K. L. (2009). Occupant performance and building energy consumption with different philosophies of determining acceptable thermal conditions. *Building and Environment*, 44(10), 2009–2016. doi:10.1016/j.buildenv.2009.02.007
- Tuch, T., Mirme, A., Tamm, E., Heinrich, J., Heyder, J., Brand, P., ... Kreyling, W. G. (2000). Comparison of two particle-size spectrometers for ambient aerosol measurements. *Atmospheric Environment*, 34(1), 139–149. doi:10.1016/S1352-2310(99)00248-4
- Veitch, J., Newsham, G., & Boyce, P. (2008). Lighting appraisal, well-being and performance in open-plan offices: A linked mechanisms approach. *Lighting Research and*, 40(2), 133–151. doi:10.1177/1477153507086279
- Viteles, M., & Smith, K. (1946). An experimental investigation of the effect of change in atmospheric conditions and noise upon performance. *Heating, Piping and Air Conditioning*. Retrieved from http://scholar.google.pt/scholar?hl=en&q=Viteles+Smith+1946&btnG=&as_sdt=1,5&as_sdtpr=#0
- Wargocki, P., Wyon, D., & Fanger, P. (2000). Productivity is affected by the air quality in offices. In *Healthy Buildings* (Vol. 1, pp. 635–640). Retrieved from <http://senseair.se/wp-content/uploads/2011/05/1.pdf>
- Weijers, E. (2004). Variability of particulate matter concentrations along roads and motorways determined by a moving measurement unit. *Atmospheric Environment*, 38(19), 2993–3002. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.02.045
- Werbos, P. J. (1974). *Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioural sciences*. Harvard University.
- Widrow, B., & Hoff, M. (1960). Adaptive switching circuits. In *Proceedings of the 1960 IRE WESCON Convention Record* (pp. 96–104). New York. Retrieved from <http://www-isl.stanford.edu/people/widrow/papers/c1960adaptiveswitching.pdf>
- Wolkoff, P. (2013). Indoor air pollutants in office environments: Assessment of comfort, health, and performance. *International journal of hygiene and environmental health*, 216(4), 371–94. doi:10.1016/j.ijheh.2012.08.001
- World Health Organization. (2000). *Air quality guidelines for Europe* (p. 273). World Health Organization. Retrieved from <http://www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/pre2009/air-quality-guidelines-for-europe>
- World Health Organization. (2011). BMI classification. *World Health*. World Health Organization. Retrieved from http://apps.who.int/bmi/index.jsp?introPage=intro_3.html
- Wyon, D., Larsson, S., Forsgren, B., & Lundgren, I. (1989). Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin. *SAE transactions*. Retrieved from <https://webvpn.uc.pt/http/0/cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=19747351>
- Xiao, R., & Chandrasekar, V. (1997). Development of a neural network based algorithm for rainfall estimation from radar observations. *Geoscience and Remote Sensing*, Retrieved from https://webvpn.uc.pt/http/0/ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=551944

- Yaglou, C. P., Riley, E. C., & Coggins, D. I. (1936). Ventilation requirements. *ASHVE Transactions*, 42, 133–162.
- Yamazaki, K., Nomoto, S., Yokota, Y., & Murai, T. (1998). The effects of temperature, light, and sound on perceived work environment. *ASHRAE Transactions*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:The+effects+of+temperature,+light+and+sound+on+perceived+work+environment#0>
- Zannin, P. H. T., & Marcon, C. R. (2007). Objective and subjective evaluation of the acoustic comfort in classrooms. *Applied ergonomics*, 38(5), 675–80. doi:10.1016/j.apergo.2006.10.001
- Zannin, P. H. T., & Zwirtes, D. P. Z. (2009). Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools. *Applied Acoustics*, 70(4), 626–635. doi:10.1016/j.apacoust.2008.06.007
- Zupan, J., & Gasteiger, J. (1993). *Neural Networks for Chemists: A Textbook* (p. 306). Bèta Boeken Belfeld.

Anexo

Nas páginas seguintes é apresentado o anexo correspondente ao inquérito de avaliação da percepção subjetiva usado nos ensaios de campo e mencionado âmbito do presente trabalho

Qualidade do Ambiente Interior

P.F. preencha o questionário colocando uma **X** em cima da escala ou no quadrado correspondente. Exemplo:



Dados Pessoais

Idade: 70 60 50 40 30 20
Sexo: M F
Altura: 1,90 1,80 1,70 1,60 1,50 1,40
Peso: 100 90 80 70 60 50

Vestuário

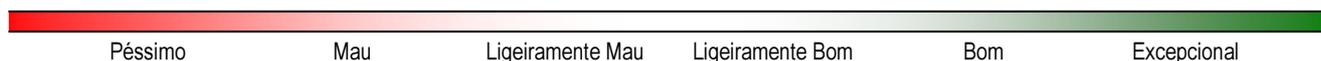
Calças Camisola Interior Camisola Fina
 Saia T-Shirt Camisola Normal
 Calções Camisa Camisola Grossa
 Vestido Casaco
 Fato

Conforto Térmico

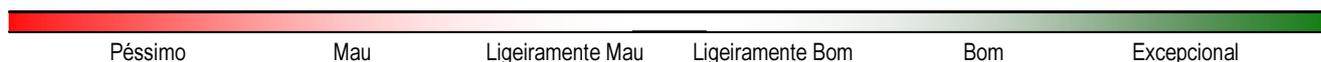
Muito Frio Frio Ligeiramente Frio Confortável Ligeiramente Quente Quente Muito Quente

Ruído / Insonorização

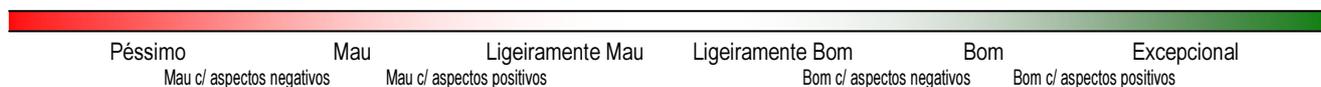
Ruído / Insonorização Exterior



Ruído / Insonorização Interior e dos Sistemas do Edifício (p.ex. ventilação)

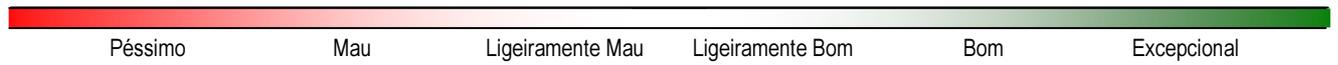


Ruído (Avaliação Global)

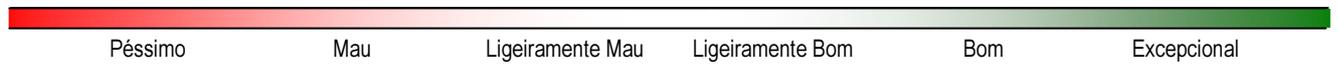


Qualidade do Ar

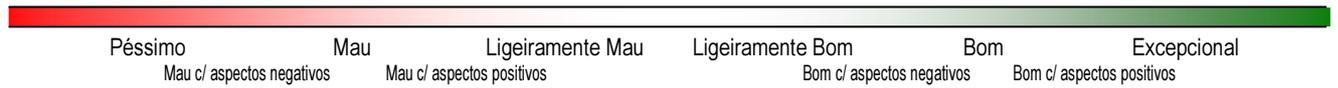
Ar Viciado / Ar Limpo



Cheiros / Odores

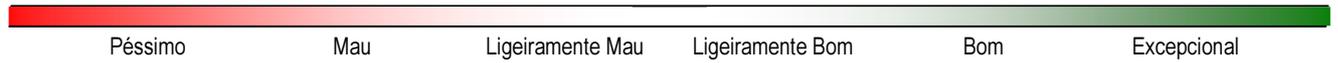


Qualidade do Ar (Global)

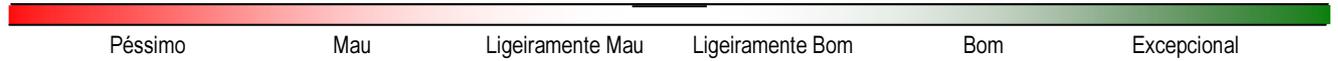


Iluminação

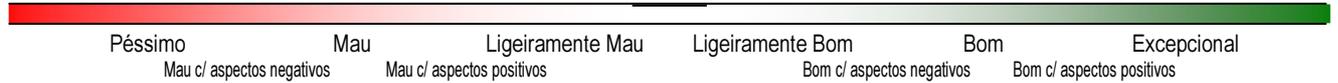
Luz Natural (Não aplicável)



Luz Artificial (Não aplicável)



Iluminação (Global)



AVALIAÇÃO GLOBAL (AMBIENTE INTERIOR)

