



FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Ergonomia Ambiental em Veículos

Por:

Carlos José de Oliveira Pereira e Jorge Alcobia

Coimbra
2006

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Ergonomia Ambiental em Veículos

Por:

Carlos José de Oliveira Pereira e Jorge Alcobia

Dissertação para Doutoramento em
Ciências de Engenharia Mecânica
(Aerodinâmica)

COIMBRA
2006

ISBN: 978-972-8954-12-3

À Maria João,
À Joana e Gonçalo



A realização deste trabalho beneficiou de co-financiamento do Fundo Social Europeu

Agradecimentos

Pretendo aqui deixar expresso o meu profundo e sincero agradecimento a todos aqueles que colaboraram, directa e/ou indirectamente, na realização deste trabalho.

Antes de mais, um especial agradecimento ao meu orientador, o Professor Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva, responsável pela minha iniciação científica nos domínios do conhecimento aqui versados. A convivência tida ao longo da última década em diversas actividades profissionais e inclusive, pessoais, permitiram uma vez mais, demonstrar que metodologias de trabalho distintas, se podem complementar na perfeição, o que se deve, sem dúvida, à natureza profícua do seu carácter. Agradeço a alegria, a descontração e o profissionalismo que sempre dedicou à nossa convivência.

Ao Mestre Mário Mateus, pela sua viva e activa colaboração nas mais diversas áreas científicas, com especial destaque na instrumentação e acústica. A sua colaboração e o seu acompanhamento, durante o trabalho desenvolvido, revelou-se de fulcral importância, dada o seu elevado profissionalismo e sentido de rigor. Agradeço-lhe também a sua pronta receptividade para a troca de ideias, de extrema importância para o esclarecimento e aprofundamento de conhecimentos.

À equipa maravilha da área de Acústica e Veículos da ADAI, constituída pelos amigos Sra. D. Ana Rosa, Eng. José Barbosa, Eng. Bruno Martins e Dr^a. Ana Sofia, aos quais agradeço a forma calorosa como sempre manifestaram a sua prontidão para colaborar nas diversas tarefas desenvolvidas em conjunto. De todos eles tenho uma especial admiração pela forma dedicada e disponível com que sempre se envolvem nos diferentes projectos.

À empresa Marcopolo S.A. devo o meu agradecimento pela simpatia e empenho demonstrado por todos os seus colaboradores nos diversos percursos realizados a bordo

dos seus veículos. De todos eles, devo destacar o espírito de inovação do Eng. António Catarino e do Eng. Miguel Andrade. Foi graças ao empenho de ambos que foi possível desenvolver uma candidatura a um projecto de investigação e desenvolvimento. Ainda relativamente às pessoas ligadas a esta empresa, gostaria de agradecer a pronta disponibilidade de todos os que colaboraram quer na elaboração do projecto Autocomfort quer no acompanhamento dos diferentes percursos. O meu muito obrigado à Eng. Paula Matos, ao Dr. Sérgio Mourão, ao Márcio, à Carla e ao Paulo Gomes, bem como aos demais funcionários desta empresa.

O trabalho aqui reportado inclui algumas das tarefas desenvolvidas no projecto Combistress. Neste âmbito agradeço a colaboração da empresa Caetano Bus, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria e do apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia. Gostaria de destacar a excelente colaboração do Mestre Nuno Martinho e do Doutor João Ramos na execução deste projecto. Também gostaria de agradecer a simpática colaboração dos professores da Escola Superior de Educação de Leiria.

Ao longo deste trabalho tive o imenso prazer de colaborar com diversos finalistas do curso de Engenharia Mecânica, destacando-se entre eles o Eng. Nuno Janicas, o Eng. João Pedro e o Eng. Riccardo Issoglio nos contributos dados relativos à análise das vibrações no interior dos veículos.

Gostaria ainda de agradecer a colaboração dos diversos motoristas que colaboraram nos percursos efectuados, em especial ao Sr. José, ao Sr. Carvalho e ao Sr. Guedes.

Ao meu amigo e colega de percurso, Mestre Avelino Virgílio, pelas suas palavras de encorajamento e preciosas trocas de opinião.

Ao meu querido amigo e colega, Doutor João Carlos Ferreira Mendes, pela enorme amizade existente entre ambos e pela sua sempre pronta colaboração.

À Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, pela disponibilização dos meios técnicos e humanos utilizados nas diversas tarefas executadas, destacando a pronta colaboração de todos manifestada no acompanhamento deste trabalho.

A todos os funcionários, colegas e amigos do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pelo seu permanente apoio e incentivo.

A todo o Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pelas facilidades concedidas durante a realização deste trabalho, e em especial ao Grupo de Construções Mecânicas, pela disponibilização da máquina de ensaios de fadiga, utilizada na calibração do sistema de medição de vibrações.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pelo apoio institucional concedido para a execução deste trabalho.

Ao PRODEP (Medida 5/Ação 5.3), pela comparticipação financeira atribuída que, ao permitir a minha dispensa do serviço docente, tornou possível a concretização deste projecto.

Aos meus pais, Maria Amélia e Francisco, pelos princípios de vida transmitidos e a quem devo tudo o que sou. Aos meus irmãos, Maria José e António, pela amizade e espírito de união que nos caracteriza.

A todos os familiares e amigos, cujo apoio e incentivo se revelaram fundamentais nas diversas fases do trabalho, destacando-se de entre eles a Maria Vasco e o Carlos Mendes.

Aos meus filhos, Joana e Gonçalo, que apesar da sua tenra idade demonstraram uma enorme compreensão pela ausência do pai, em especial na fase final do trabalho.

Por último, à Maria João, pelo enorme apoio prestado ao longo deste trabalho bem como, a sua paciência e compreensão demonstrada durante as fases mais críticas da sua execução. O seu apoio foi fundamental para levar a cabo um trabalho desta natureza com um espírito alegre e motivado.

R_esumo

As condições ambientais no interior dos veículos representam, hoje em dia, uma área de investigação e desenvolvimento preferencial por parte de muitos fabricantes.

Face ao incremento da análise entre o ser humano e os diversos estímulos ambientais que influenciam o conforto no interior dos veículos, surge a necessidade de desenvolver metodologias que permitam modelar a resposta do ser humano a estímulos de desconforto ambiental, de um modo parcial e, de uma forma conjugada, entre eles.

O principal objectivo do trabalho desenvolvido, diz respeito à avaliação e modelação da resposta do ser humano relativamente a estímulos de desconforto ambientais, bem como a sua integração ao nível da sensação de desconforto global no interior de veículos.

Foram desenvolvidas duas metodologias de avaliação distintas: uma, sobre o desconforto acústico no interior dos autocarros e outra, no mesmo tipo de veículos, relacionada com o desconforto global que permite simultaneamente a análise dos estímulos de uma forma individual.

Relativamente à primeira, realizaram-se ensaios psico-acústicos obtendo uma modelação do nível de desconforto acústico através de um índice, obtido por regressão linear múltipla e por uma rede neuronal artificial, designado *NDDA* (*Nível de Desconforto Acústico em Autocarros*), cujas variáveis são: o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A, o índice de articulação, a sonoridade e a agudez dos sons.

A segunda metodologia desenvolvida, diz respeito à modelação da resposta humana relativamente ao nível de desconforto global, em função dos diversos estímulos ambientais de desconforto considerados: o ambiente térmico, as vibrações, o ruído, a qualidade do ar e a luminosidade. Os parâmetros métricos eleitos para caracterizar as diferentes grandezas físicas, foram os seguintes: a temperatura equivalente para o

ambiente térmico, o valor de vibração total para as vibrações, o nível sonoro contínuo equivalente para o ruído, a concentração de dióxido de carbono para a qualidade do ar e a iluminância para a luminosidade. No total, obtiveram-se 530 votações dos passageiros relativamente ao desconforto ambiental, através de um questionário desenvolvido onde indicavam, no final de cada percurso, a sua sensação de desconforto relativamente ao ambiente térmico, às vibrações, ao ruído, à qualidade do ar, à luminosidade e à avaliação relativa ao nível de desconforto global.

Foi desenvolvido um modelo da resposta humana quer através de regressão linear múltipla, quer de redes neuronais artificiais, tendo sido eleita uma rede neuronal artificial, por ter sido a que melhor se adaptou à resposta humana. Este modelo pode ser considerado um passageiro virtual, que utiliza as relações obtidas entre os diversos parâmetros físicos e as escalas de desconforto parciais, por forma a que as mesmas representem os parâmetros de entrada para a rede neuronal artificial, obtendo-se assim o nível médio de desconforto global, a partir das diversas grandezas físicas medidas.

Abstract

Nowadays, the environmental conditions inside a vehicle represent a goal of research and development for most manufacturers.

Given the increase of the analysis between the human being and the different environmental stimulus which influence comfort inside a vehicle, comes the need to develop new methods which allow the modulation of the individual and combined response of the human response to environmental discomfort stimulus.

The main goal of the developed work concerns the evaluation and modulation of the human being's response regarding different environmental discomfort stimuli, as well as their integration at a global discomfort sensation level inside a bus.

Two evaluation methodologies were developed: one about the noise discomfort inside the bus; and the other related to the global discomfort, which also allows an individual analysis of the stimuli.

Regarding the first methodology, psychoacoustic tests were conducted, giving origin to a modulation of the acoustic discomfort level through a rate, designated *ADLB* (*Acoustic Discomfort Level in Buses*), where the following variables are taken into account: the sound pressure level A-weighting, the articulation index, loudness and sharpness.

The second methodology concerns the human response modulation regarding the global discomfort level, according to the different environmental discomfort stimuli considered: thermal environment, vibration, noise, air quality and lighting. The metric parameters chosen to characterize the different physical quantities were the following: the equivalent temperature for thermal environment, vibration total value for the accelerations, the continuous equivalent sound level for noise, the carbon dioxide

concentration for air quality and the illuminance for the lighting. A total of 530 subjective evaluations were collected regarding the environmental discomfort, through a questionnaire where passengers should point out, by the end of each journey, their feelings of discomfort regarding the thermal environment, vibration, noise, air quality, lighting and the evaluation concerning the global discomfort level.

A human response model was developed through either a linear multiple regression or a neural network, being an artificial neural network chosen as the one that best adapts the human response. The model may be considered as a virtual passenger, who uses the obtained relations between the several physic parameters and the partial discomfort rates, in a way that these represent the input parameters of neural network, thus obtaining the global discomfort average level, through the different measured physical quantities.

ndice

Agradecimentos	VII
Resumo	XI
Abstract	XIII
Índice	XV
Nomenclatura	XXI
Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Ergonomia ambiental.....	2
1.3. Ergonomia ambiental em veículos	5
1.4. Enquadramento do trabalho desenvolvido.....	7
1.5. Principais objectivos	9
1.6. Estrutura da dissertação	9
Capítulo 2. Resposta humana ao ambiente.....	13
2.1. Introdução.....	13
2.2. Psicofisiologia.....	14
2.3. Métodos de ergonomia ambiental	21
2.4. Conforto em veículos	22
2.5. Estímulos de desconforto em veículos	25
2.6. Passageiro virtual	26

Capítulo 3. Redes neuronais artificiais	31
3.1. Introdução.....	31
3.2. Inspiração biológica	32
3.2.1. Neurónio biológico	32
3.2.2. Analogia	34
3.2.3. Neurónio artificial.....	35
3.2.4. Perceptrão	37
3.2.5. Comparação entre as redes neuronais naturais e artificiais.....	38
3.3. Breve revisão histórica	39
3.4. Comparação entre as redes e a regressão linear múltipla.....	40
3.5. Aplicações típicas	41
3.6. Classificação das redes	43
3.7. Regras de aprendizagem.....	44
3.8. Modelação de dados através de redes neuronais.....	45
3.9. Algoritmo de retropropagação.....	46
3.10. Desenvolvimento de redes neuronais	46
Capítulo 4. Modelos de ergonomia ambiental – estado da arte.....	49
4.1. Introdução.....	49
4.2. Ambiente térmico	50
4.2.1. Balanço térmico.....	50
4.2.2. Índices e normas	52
4.2.3. Métodos de medição.....	59
4.2.3.1. Sensores individuais.....	60
4.2.3.2. Sensores aquecidos.....	61
4.2.3.3. Manequins térmicos	63
4.2.3.4. Medições subjectivas	66
4.2.4. Aplicação em veículos.....	67
4.3. Vibrações.....	74
4.3.1. Sistema sensorial humano	74
4.3.2. Índices e normas	77
4.3.3. Métodos de medição.....	83
4.3.4. Aplicação em veículos.....	84
4.4. Ruído	88
4.4.1. Som.....	88
4.4.2. Sistema sensorial humano	89

4.4.3.	Índices e normas	94
4.4.3.1.	Bandas críticas	99
4.4.3.2.	Sonoridade	101
4.4.3.3.	Agudez.....	105
4.4.3.4.	Índice de articulação	107
4.4.3.5.	Outros índices	111
4.4.4.	Métodos de medição.....	112
4.4.5.	Qualidade do som	113
4.4.6.	Aplicação em veículos.....	115
4.5.	Qualidade do ar	119
4.5.1.	Sistema sensorial humano	119
4.5.2.	Índices, normas e métodos de medição.....	121
4.5.3.	Aplicação em veículos.....	129
4.6.	Luminosidade.....	133
4.6.1.	Luz.....	133
4.6.2.	Sistema sensorial humano	134
4.6.3.	Índices e normas	137
4.6.4.	Métodos de medição.....	142
4.6.5.	Aplicação em veículos.....	144
4.7.	Outros estímulos de desconforto	145
4.8.	Estímulos conjugados	146
Capítulo 5. Métodos experimentais desenvolvidos		155
5.1.	Introdução.....	155
5.2.	Análise da qualidade acústica	155
5.2.1.	Metodologia geral	156
5.2.2.	Sistema de gravação de sons.....	157
5.2.3.	Sistema de reprodução de sons.....	161
5.2.4.	Avaliação subjectiva.....	166
5.3.	Análise de desconforto ambiental	169
5.3.1.	Metodologia geral de ensaio	170
5.3.2.	Medições objectivas	171
5.3.2.1.	Ambiente térmico	171
5.3.2.2.	Vibrações.....	174
5.3.2.2.1.	Equipamento de aquisição e condicionamento	175
5.3.2.2.2.	Programa de computador.....	176
5.3.2.2.3.	Calibração do sistema.....	184

5.3.2.2.4.	Ensaio comparativo	187
5.3.2.2.5.	Outras aplicações.....	188
5.3.2.3.	Ruído	189
5.3.2.4.	Qualidade do ar	191
5.3.2.5.	Luminosidade	192
5.3.2.6.	Disposição global dos equipamentos de medida.....	193
5.3.3.	Avaliações subjectivas	194
Capítulo 6. Apresentação e análise de resultados.....		197
6.1.	Introdução.....	197
6.2.	Análise da qualidade acústica	197
6.2.1.	Amostra de sons.....	198
6.2.1.1.	Caracterização métrica	198
6.2.1.2.	Comparação entre índices métricos	204
6.2.2.	Avaliação subjectiva	206
6.2.3.	Comparação entre as respostas subjectivas e objectivas.....	212
6.2.3.1.	Regressão linear múltipla	221
6.2.3.2.	Rede neuronal artificial	222
6.2.3.3.	Comparativo entre tipo de veículos.....	223
6.3.	Avaliação do desconforto ambiental.....	225
6.3.1.	Caracterização dos percursos.....	225
6.3.2.	Caracterização dos passageiros.....	227
6.3.3.	Ambiente térmico	229
6.3.4.	Vibrações.....	238
6.3.5.	Ruído	246
6.3.6.	Qualidade do ar	250
6.3.7.	Luminosidade	255
6.3.8.	Nível de desconforto global	259
6.3.9.	Modelação da resposta humana: passageiro virtual.....	264
Capítulo 7. Conclusões		277
7.1.	Principais conclusões	277
7.2.	Desenvolvimentos futuros	281
Bibliografia.....		285

Anexos	305
Anexo A. Questionário (Qualidade acústica)	307
Anexo B. Questionário (Desconforto ambiental)	311
Anexo C. Rede neuronal artificial (Resultados).....	315

Nomenclatura

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>	<i>Unidade</i>
a_{eq}	Valor equivalente de aceleração	ms^{-2}
a_i	<i>rms</i> da aceleração para a <i>i</i> -ésima banda de terço de oitava	ms^{-2}
A_n	Coefficientes da série de Fourier (amplitude do sinal elementar)	Pa
a_v	Vibração total ponderada segundo os eixos X, Y e Z	ms^{-2}
a_w	Aceleração ponderada para um determinado eixo	ms^{-2}
a_{wx}	Aceleração ponderada segundo o eixo X	ms^{-2}
a_{wy}	Aceleração ponderada segundo o eixo Y	ms^{-2}
a_{wz}	Aceleração ponderada segundo o eixo Z	ms^{-2}
C	Concentração do gás traçador	mg/m^3
C_i	Concentração do gás no instante inicial	mg/m^3
C_o	Concentração inicial do gás traçador	mg/m^3
C_t	Concentração do gás no instante t	mg/m^3
f	Frequência	Hz
$F(t)$	Série de Fourier da variável t	Pa
f_{cl}	Relação entre a área do corpo vestida e despida	adimensional
h_C	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$Wm^{-2}C^{-1}$
h_R	Coefficiente de transferência de calor por radiação	$Wm^{-2}C^{-1}$
HR	Humidade relativa	%
I_{cl}	Resistência térmica do vestuário	m^2CW^{-1}
k_x, k_y, k_z	Factores de ponderação em função do tipo de análise pretendida	adimensional

$L(f)$	Espectro do som	dB(A)
L_{Aeq}	Nível sonoro contínuo equivalente ponderado segundo a curva A	dB(A)
L_b	Luminância média de fundo	cd/m ²
$L_l(f)$	Límite inferior da zona de conversação	dB(A)
L_s	Luminância média de cada fonte de ofuscação no campo de visão	cd/m ²
$L_u(f)$	Límite superior da zona de conversação	dB(A)
M	Nível metabólico	Wm ⁻²
n	Número de fontes de ofuscação no campo de visão	adimensional
$NDAA$	Nível de desconforto acústico em autocarros	%
$NDVobj$	Nível de desconforto vibracional objectivo	%
NPS	Nível de pressão sonora	dB
$P(f)$	Ponderação em frequência	adimensional
p_0	Pressão acústica de referência	Pa
p_a	Pressão parcial do vapor	Pa
PMV	Votação média previsível	adimensional
PPD	Percentagem previsível de insatisfeitos	%
Q	Taxa de renovação de ar	mg/s
rms	Raiz da média quadrática	adimensional
t	Tempo	s
T_a	Temperatura média do ar	°C
T_{cl}	Temperatura média da superfície do vestuário	°C
T_{eq}	Temperatura equivalente	°C
$T_{ext.}$	Temperatura do ar exterior	°C
T_o	Temperatura operativa	°C
T_r	Temperatura média radiante	°C
U	Velocidade média do ar	ms ⁻¹
V	Volume de ar	m ³
W	Trabalho exterior	Wm ⁻²
w_i	Factor de ponderação para a i -ésima banda de terço de oitava	adimensional
\dot{m}	Caudal de gás traçador	mg/s
Ω	Ângulo sólido da fonte visto do ponto de observação	sr
ω	Ângulo sólido subtendido pela fonte	sr
α_n	Ângulo de fase	rad
Φ	Grandezas físicas	adimensional
Ψ	Sensações psicológicas	adimensional
Δt	Intervalo de tempo definido entre os instantes t e $t+1$	s

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

O crescimento sustentável da sociedade, por um lado, e a evolução tecnológica, por outro, têm vindo a determinar, nas últimas décadas, um aumento das condições de exigência da sociedade relativamente a diversos aspectos na sua vivência. O meio ambiente onde os seres humanos passam o seu tempo, quer seja em lazer ou em trabalho, não ficou alheio a esta evolução, originando por isso diversos estudos, cujo objecto de análise visa a avaliação do seu efeito sobre a saúde, o conforto e o desempenho.

Cada vez mais, a generalidade das pessoas permanece uma importante parte do seu tempo no interior de veículos, pelo que é também cada vez mais importante avaliar a sua interacção com as condições de conforto ambiental que lhe são proporcionadas. É precisamente por esse factor que facilmente se compreende a razão de alguns fabricantes de transportes terrestres, marítimos e aéreos elegerem, como destino preferencial de investigação e desenvolvimento, o conforto ambiental no interior dos seus veículos. Assim, tendo por objectivo o aumento do nível de conforto será necessário, antes de mais, compreender quais os aspectos que o afectam.

1.2. Ergonomia ambiental

A ergonomia deriva das palavras gregas *ergon* (trabalho) e *nomos* (leis). Foi em 1857 que o termo ergonomia foi utilizado pela primeira vez por um polaco, de nome Wojciech Jastrzebowski que intitula uma das suas obras "Ensaio de ergonomia ou ciência do trabalho, baseada nas leis objectivas da ciência sobre a natureza". A ergonomia foi definida como sendo a ciência da utilização das forças e das capacidades humanas. No início da década de 50 do século XX, Murrell, engenheiro de origem, deu um conteúdo mais preciso a este termo, fazendo o reconhecimento desta disciplina científica através da criação da primeira associação nacional de ergonomia, em Inglaterra, a "Ergonomic Research Society", que reunia fisiologistas, psicólogos e engenheiros interessados na adaptação do trabalho ao homem. O aparecimento desta sociedade marcou o início do desenvolvimento desta área em diversos países industrializados e em vias de desenvolvimento.

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

Existem diversas definições sobre ergonomia, tendo sido aprovado pela IEA desde Agosto de 2000, o conceito de ergonomia (ou estudo dos factores humanos) como sendo a disciplina científica relacionada com a compreensão das interacções entre os seres humanos e os outros elementos de um sistema, e a profissão que aplica os princípios teóricos, dados e métodos pertinentes para conceber produtos com vista a otimizar o bem-estar humano e o desempenho global do sistema. Dentro da disciplina, os domínios de especialização representam competências mais profundas em atributos específicos humanos ou características de interacção humana, tendo sido aprovados três grandes domínios de especialização:

- ergonomia física, que diz respeito às características humanas anatómicas, antropométricas, fisiológicas e biomecânicas que se relacionam com a actividade física. Os tópicos relativos incluem posturas de trabalho, manipulação de materiais, movimentos repetitivos, lesões músculo-esqueléticas relacionadas com o trabalho, configuração do posto de trabalho, segurança e saúde;
- ergonomia cognitiva, que diz respeito aos processos mentais, como a percepção, memória, raciocínio, e resposta motora, que afectam as

interacções entre os seres humanos e outros elementos de um sistema. Os tópicos relevantes incluem a carga de trabalho mental, tomada de decisão, desempenho especializado, interacção homem-computador, fiabilidade humana, stress do trabalho, e formação relacionadas com a concepção homem-sistema;

- ergonomia organizacional, que diz respeito à optimização de sistemas socio-técnicos, incluindo as suas estruturas organizacionais, políticas e processos. Os tópicos relevantes incluem comunicação, gestão de recursos de equipas, concepção do trabalho, organização do tempo de trabalho, trabalho em equipa, concepção participativa, trabalho cooperativo, novos paradigmas do trabalho, cultura organizacional, organizações virtuais, tele-trabalho, e gestão da qualidade.

Ainda de acordo com a definição internacional de ergonomia da IEA, os domínios de especialização anteriormente indicados evoluem constantemente podendo ser criados novos domínios bem como alguns dos indicados adoptarem novas orientações.

Apesar deste conceito ter sido aprovado, actualmente ainda são utilizadas, por diversas organizações, classificações consideradas mais específicas acerca das especialidades da ergonomia, em função da diversidade de matérias onde se pode intervir e do elevado grau de interdisciplinaridade que apresenta. Assim, é frequente considerar as seguintes sete áreas de especialização:

- antropometria, que é uma das áreas fundamentais da ergonomia e que trata das medidas do corpo humano no que se refere ao seu tamanho, forma, força e capacidade de trabalho;
- biomecânica e fisiologia, onde se combina o estudo do corpo humano sob o ponto de vista da mecânica clássica ou newtoniana e a biologia. O seu objectivo é o estudo do corpo humano com a finalidade de projectar tarefas e actividades para que a maioria das pessoas as possam realizar sem risco de sofrer lesões ou danos físicos;
- ergonomia ambiental, onde é analisada a interacção entre as condições físicas que rodeiam o ser humano, tal como seja a temperatura ambiente e as suas variações, o nível de ruído, a iluminação, as vibrações, entre outras;
- ergonomia cognitiva, que apresenta a expressão mais importante do contributo da psicologia na área da ergonomia, e onde são analisados temas do género do processo de recepção de informação por parte do ser humano, a sua habilidade em a processar e actuar com base nela, nos conhecimentos e na experiência prévia;

- ergonomia de projecto e desenvolvimento de produtos, onde é feita a análise e acompanhamento do desenvolvimento de equipamentos, sistemas e espaços de trabalho, utilizando como base conceitos e dados obtidos em medições antropométricas, avaliações biomecânicas, características sociológicas e costumes do público-alvo;
- ergonomia de necessidades específicas, onde se destaca principalmente o projecto e desenvolvimento de equipamentos para pessoas que apresentam alguma deficiência física, crianças, escolas e pequenos ambientes autónomos;
- ergonomia preventiva, que é a área que trabalha em íntima relação com as disciplinas encarregadas da segurança e higiene no trabalho. Dentro das suas actividades principais encontra-se o estudo e a análise das condições de segurança, saúde e conforto laboral.

Como se referiu, a ergonomia ambiental concentra-se na interacção entre o utilizador e o meio físico que o rodeia, sendo este caracterizado pelas seguintes grandezas: ambiente térmico (temperatura, humidade, radiação), ruído, vibrações, luminosidade, pressão, etc. A ergonomia ambiental, enquadra-se no domínio da ergonomia física de acordo com os domínios de especialização anteriormente referidos e aprovados pela IEA.

Apesar dos muitos trabalhos desenvolvidos durante anos, acerca da resposta humana relativamente ao meio ambiente, foi apenas com o desenvolvimento da ergonomia como disciplina que os princípios da ergonomia ambiental começaram a surgir. O consolidar da análise das respostas humanas relativamente ao meio ambiente inibiu de uma forma paradoxal o desenvolvimento da ergonomia ambiental visto ter provocado a criação de associações que geraram alguma inércia na aceitação de uma abordagem ergonómica sobre o assunto. Exemplos disso são sociedades e conferências em aspectos específicos tais como ruído, luminosidade, ambiente térmico ou vibrações. Em 1984 decorreu o primeiro encontro da “International Society for Environmental Ergonomics” tendo sido organizadas desde então conferências regulares sobre esta área. Apesar do objectivo inicial ser o de abordar de uma forma global o ambiente, depressa se tornou num espaço relacionado apenas com o ambiente térmico.

A “International Organization for Standardization” (ISO) e a “European Standards Organization” (CEN) efectuaram recentemente importantes contribuições na área da ergonomia ambiental sendo de destacar o actual programa da comissão técnica ISO TC 159 SC5 que tem como objectivo desenvolver a norma ISO 15742, intitulada: “Ergonomics of the Physical Environment – combined effects of thermal environment, air pollution, acoustics and illumination”. No entanto, a existência de comités específicos

para o ruído, vibrações, luminosidade e outros estímulos têm originado o desenvolvimento de produtos apenas em estímulos específicos não tendo como base essencial o ser humano no seu todo. É, no entanto, assumido que as pessoas estão expostas a ambientes totais e que os métodos ergonómicos são essenciais para a sua aplicação prática.

Hoje em dia, é reconhecida a existência de uma interacção contínua e dinâmica entre as pessoas e o meio físico envolvente, produzindo uma tensão fisiológica e psicológica no ser humano. Daqui derivam possíveis situações de desconforto, irritação, afectação do seu desempenho, diminuição de produtividade, afectação da saúde e segurança, podendo por em perigo a própria vida das pessoas.

Apesar dos factores ambientais terem sido de um modo geral considerados de forma separada, nos últimos anos a ergonomia ambiental tem-se direccionado para a integração dos diferentes factores, reconhecendo-se que existe até à data um conhecimento insuficiente nesta área.

1.3. Ergonomia ambiental em veículos

De acordo com diversos relatórios, o crescimento da mobilidade do ser humano nos transportes, quer terrestres, marítimos ou aéreos irá continuar a aumentar de um modo significativo. A título de exemplo, pode citar-se o valor apresentado no relatório elaborado pela ERTRAC (“European Road Transport Research Advisory Council”) intitulado “Vision 2020 and Challenges” que prevê um crescimento de 24% no número de quilómetros percorridos por passageiros para o ano de 2010 tendo por referência os percorridos no ano de 1998.

Em virtude deste aumento de mobilidade, não é de estranhar que a área de investigação e desenvolvimento relativa aos transportes incluída no VII Programa-quadro de apoio da Comunidade Europeia para o período de 2007 a 2013, figure como uma das três que maior orçamento tem, logo a seguir ao sector de informação e tecnologias de comunicação, e da saúde. Entre as diferentes actividades previstas no sector dos transportes aéreos, ferroviários, terrestres e marítimos, figura o desenvolvimento de produtos e tecnologias com vista a incrementar o conforto dos passageiros, sendo o ambiente no interior dos mesmos, um tópico relevante neste contexto.

Não é apenas de agora que existe interesse nesta área, pois já ao longo das últimas décadas têm existido diversos apoios à investigação e desenvolvimento no sector da ergonomia ambiental em veículos; a título de exemplo, pode referir-se o VI Programa-quadro de apoio da Comunidade Europeia que incluía o programa TREN-3, dedicado a

novas tecnologias e conceitos relativos aos meios de transporte (rodoviários, ferroviários e marítimos), onde existiam linhas de apoio financeiro específicas para esta área.

No que diz respeito ao estudo de cada um dos estímulos de forma independente a bibliografia é muito vasta, existindo inúmeros trabalhos publicados sobre o modo como o conforto térmico, a qualidade do ar, o ruído, a luminosidade e as vibrações, afectam o conforto e a produtividade das pessoas. Os ambientes em análise, na sua grande maioria, são espaços confinados no interior de edifícios. Tem existido uma tentativa de adaptar os índices desenvolvidos na análise dos ambientes de edifícios para o interior dos habitáculos dos veículos por se tratarem, tais como as salas dos edifícios, de espaços confinados. No entanto, por vezes a sua aplicabilidade tem sido algo limitada atendendo às particularidades do ambiente em questão.

Os trabalhos ao nível da análise entre os passageiros e o ambiente no interior de veículos remontam a várias décadas passadas, existindo no que diz respeito à avaliação do conforto no interior de veículos, diversos estudos e metodologias de medição. Tal como nos edifícios, na maioria dos trabalhos publicados é apenas considerado o efeito de um estímulo de desconforto, havendo uma pequena minoria que considera a influência de múltiplos estímulos de desconforto, havendo poucos onde são considerados mais do que dois estímulos em simultâneo assentando, a sua maioria, numa análise conjunta de vibrações com ruído e, mais recentemente, do conforto térmico com a qualidade do ar.

Relativamente ao sector de veículos terrestres, a Associação Italiana do Automóvel (ATA) organizou, com alguma periodicidade, conferências dedicadas ao tema do conforto em veículos, onde foram apresentados diversos artigos sobre o impacto individual dos diversos factores físicos que afectam o conforto em veículos (conferências internacionais da ATA sobre o Conforto em Veículos que decorreram em Bolonha nos anos de 1992, 1995 e 1996). Também nas conferências anuais e em seminários organizados pela SAE ("Society of Automotive Engineers") um número razoável dos artigos apresentados versa esta temática, tendo esta sociedade publicações exclusivamente dedicadas à análise da interacção entre o ser humano e os veículos. Também a SIA ("Société des Ingénieurs de l'Automobile") organiza desde 1996, uma conferência bianual intitulada "Confort automobile et ferroviaire".

Nos últimos anos também o sector aeronáutico tem-se dedicado bastante à ergonomia ambiental sendo de salientar diversos projectos, tais como o IDEA PACI ("Identification of an Aircraft Passenger Comfort Index"), o HEACE ("Health Effects in Aircraft Cabin Environment"), o FACE ("Friendly Aircraft Cabin Environment") e mais recentemente o ACE ("Aircraft Cabin Environment"). No capítulo quatro será feita uma breve descrição acerca dos objectivos destes projectos.

Não obstante o elevado número de eventos internacionais organizados sobre o conforto em veículos, a literatura científica disponível, contém pouca informação sobre o grau de desconforto provocado pela interacção de diferentes estímulos de desconforto em simultâneo. Também a bibliografia e os trabalhos desenvolvidos são relativamente escassos no que aos autocarros diz respeito sendo sobretudo versada, a indústria de automóveis ligeiros, a indústria aeronáutica e a indústria ferroviária.

1.4. Enquadramento do trabalho desenvolvido

O trabalho aqui reportado integra-se na área de investigação de conforto em veículos da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) que se dedica à análise do conforto em veículos desde longa data, tendo sido, a primeira publicação de destaque a tese de doutoramento de Silva (1993) onde foi feita uma primeira abordagem ao conforto térmico no interior dos autocarros da empresa Salvador Caetano IMVT.

No ano de 2003 foi criada na ADAI uma área de investigação e desenvolvimento designada de desempenho e conforto em veículos, sendo o autor investigador na mesma.

A forte ligação ao sector dos autocarros deriva da produção automóvel nacional, pois os fabricantes nacionais de veículos rodoviários têm uma expressão importante em dois segmentos: veículos rebocados de transporte de mercadorias e veículos pesados de transporte de passageiros.

Apesar da participação deste grupo de investigação da ADAI em vários projectos relacionados com a análise do conforto ambiental em veículos, o trabalho que aqui se apresenta enquadra-se particularmente em dois projectos de investigação:

- “Combistress - Desenvolvimento de uma Metodologia de Avaliação do Efeito Conjugado de Estímulos de Desconforto em Veículos de Passageiros”, projecto apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia com a referência POCTI/EME/2000/34266. O projecto decorreu no período compreendido entre o ano de 2000 e 2003, tendo tido como principais objectivos: pesquisar os índices mais apropriados para caracterizar as grandezas físicas (ambiente térmico, vibrações, ruído e qualidade do ar) consideradas como mais relevantes na sua influência relativamente ao conforto no interior dos passageiros de autocarros; desenvolvimento de métodos de avaliação subjectiva sobre as grandezas anteriormente indicadas; desenvolvimento de métodos experimentais que permitissem criar uma amostragem de dados para avaliar a interacção entre as

respostas subjectivas e os índices físicos existentes; desenvolvimento de ferramentas de aquisição e processamento de dados para algumas destas grandezas físicas; desenvolvimento de competências ao nível das redes neuronais por forma a desenvolver métodos de avaliação do efeito conjugado dos estímulos de desconforto nos veículos pesados de passageiros. Neste projecto foram parceiros a empresa Caetano Bus e a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria.

- “Autocomfort”, projecto de investigação em consórcio, com uma duração prevista de dois anos e seis meses. Este projecto é apoiado pelo Programa IDEIA da Agência de Inovação (ADI). O promotor líder do consórcio é a empresa Marcopolo SA, tendo como associados a Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria e uma empresa relacionada com o ambiente térmico no interior dos veículos, a Carrier Sutrak Ibérica SA. O projecto assenta basicamente em duas vertentes: por um lado, a optimização aerodinâmica externa de modelos de veículos actualmente em fabrico e, por outro, o desenvolvimento de metodologias de avaliação do conforto interior nos autocarros. Relativamente à avaliação dos principais factores físicos que afectam o conforto no interior dos autocarros, os principais objectivos são:
 - caracterização dos modelos produzidos relativamente ao ruído, vibrações, ambiente térmico e qualidade do ar. Apresentação de propostas de melhoria relativamente a estes estímulos de desconforto e verificação do desempenho das mesmas, quer através de métodos numéricos quer de métodos experimentais;
 - desenvolvimento de processos de avaliação e sistemas de medição para avaliar o conforto global no interior dos veículos. Pretende-se analisar o efeito combinado dos diferentes parâmetros físicos que agem como estímulos de desconforto num autocarro e estabelecer correlações entre as avaliações subjectivas dos passageiros e as grandezas físicas medidas, através do recurso a diferentes ferramentas matemáticas: regressões lineares múltiplas, inteligência artificial, etc.
 - desenvolvimento de um sistema de medição e avaliação inovador (“manequim multi-sensorial”) que permita a medição conjunta do ambiente térmico, vibrações, ruído, qualidade do ar e luminosidade, quantificando o conforto global no interior dos veículos.

1.5. Principais objectivos

Os objectivos principais do trabalho aqui descrito estão directamente ligados com os anteriormente indicados, relativamente aos projectos referidos, podendo enumerar-se os seguintes:

- criação de uma base de dados bibliográfica sobre os diversos parâmetros que influenciam o conforto no interior de veículos;
- efectuar o levantamento dos principais aspectos ambientais que afectam o conforto em veículos e os índices utilizados na sua quantificação;
- desenvolver métodos de avaliação subjectiva relativamente aos aspectos ambientais parcelares que influenciam a sensação de conforto dos passageiros bem como uma avaliação global sobre o mesmo;
- efectuar medições objectivas e subjectivas das condições ambientais em viagens nos veículos;
- identificar constrangimentos nas medições realizadas;
- desenvolver uma base de dados experimentais de testes em viagens;
- desenvolvimento de ferramentas de avaliação objectiva e subjectiva relativamente à qualidade sonora no interior dos veículos;
- criar metodologias para a medição do conforto que permitam apoiar decisões ao nível do projecto dos veículos;
- desenvolver um modelo de resposta humana relativo ao conforto dos passageiros através da análise do efeito combinado dos diferentes parâmetros físicos que agem como estímulos de desconforto num autocarro, através do recurso a diferentes ferramentas matemáticas: regressões lineares múltiplas, inteligência artificial, etc.

1.6. Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em sete capítulos e três anexos. Após este, introdutório, onde foi definido o conceito de ergonomia ambiental, o enquadramento do trabalho realizado e os seus principais objectivos, o segundo capítulo está consagrado à descrição da resposta humana em função do ambiente, no que diz respeito ao conforto. Neste capítulo, numa primeira secção, são descritos alguns conceitos que estão na base da interacção do ser humano com as grandezas físicas que o rodeiam referindo-se algumas das leis mais utilizadas na psicofisiologia, tais como a lei de Stevens ou a lei de Fechner. São descritas as metodologias de trabalho utilizadas em ergonomia ambiental,

bem como os conceitos de conforto e desconforto. São indicados os estímulos de desconforto em veículos, com especial incidência para os estímulos ambientais. Por fim, apresenta-se o conceito de passageiro virtual que tem sido bastante popularizado nas últimas décadas, face ao elevado desenvolvimento dos meios informáticos.

No terceiro capítulo apresenta-se o conceito de rede neuronal artificial que constitui uma alternativa relativamente aos métodos estatísticos tradicionais. É descrita a constituição de um neurónio biológico e de uma rede neuronal natural comparando-os aos conceitos de neurónio artificial e de rede neuronal artificial. Apresenta-se ainda um breve resumo histórico acerca da evolução das redes neuronais artificiais bem como as suas principais áreas de aplicação. Em virtude da sua utilização como alternativa à modelação de dados através de regressões lineares múltiplas, apresenta-se um comparativo entre ambos os conceitos. No final do capítulo apresentam-se as principais redes neuronais utilizadas na modelação de dados, bem como as diversas fases e opções para o desenvolvimento de uma rede neuronal artificial.

No quarto capítulo é relatado o actual estado da arte da ergonomia ambiental relativamente à avaliação dos estímulos de desconforto ambientais. Procurou-se manter uma sequência uniforme na abordagem dos diversos estímulos individuais considerados (ambiente térmico, vibrações, ruído, qualidade do ar e luminosidade) começando pela explicação do sistema sensorial humano, seguido dos principais índices e normas existentes, métodos de medição e exemplos de aplicação em veículos. A metodologia aqui indicada foi sendo adequada, consoante o tipo de estímulo considerado, pois cada um apresenta as suas próprias especificidades. Na secção relativa ao ruído, foi feita uma descrição mais detalhada, em virtude de um dos métodos experimentais desenvolvidos focar especificamente este estímulo. Na parte final do capítulo apresenta-se uma breve súpula acerca de outros estímulos de desconforto em veículos bem como os principais trabalhos que têm sido publicados considerando diversos estímulos de desconforto em simultâneo. Na última década, tem aumentado o interesse na análise conjunta de estímulos de desconforto em virtude do ser humano estar sempre exposto simultaneamente aos vários tipos de estímulos, existindo já algumas tentativas de modelação da resposta humana relativamente ao ambiente global.

O quinto capítulo é dedicado à descrição dos métodos experimentais desenvolvidos. É composto por duas secções distintas, porquanto desenvolveram-se dois métodos experimentais cujos objectivos visavam avaliar a qualidade acústica no interior dos autocarros, o nível de desconforto global destes veículos bem como dos factores ambientais de uma forma parcial. Começando pela avaliação da qualidade acústica no interior dos autocarros é descrito o procedimento dos ensaios realizados, seguido do sistema de gravação e reprodução de sons desenvolvido e a metodologia de avaliação

subjectiva utilizada. Relativamente ao segundo método experimental descreve-se o procedimento geral de ensaio utilizado e de seguida, de um modo pormenorizado, os equipamentos de medida utilizados para caracterizar o ambiente térmico, as vibrações, o ruído, a qualidade do ar e a luminosidade. Destes estímulos, as ferramentas desenvolvidas para a medição e análise das vibrações mereceram uma descrição especial uma vez que foi desenvolvido de raiz todo um sistema de medida. Para concluir a descrição deste método experimental é indicada a disposição dos equipamentos de medida utilizados no interior dos autocarros, bem como o método de avaliação subjectivo.

No capítulo sexto apresentam-se e discutem-se os principais resultados obtidos. Tal como no capítulo anterior também aqui, é feita uma divisão entre duas secções em função dos distintos métodos experimentais desenvolvidos. De um modo análogo, inicia-se a apresentação e análise de resultados pela avaliação da qualidade acústica, sendo o objectivo a avaliação do nível de desconforto acústico no interior dos autocarros através da votação de um painel de avaliadores a diferentes sons em ambiente controlado. São efectuadas comparações com os valores limites estabelecidos na norma portuguesa NP 1674 (1997), que respeita à caracterização do ruído no interior dos automóveis pesados de passageiros. Apresentam-se ainda as correlações obtidas entre os índices métricos e as respostas subjectivas obtidas, quer por regressão linear múltipla, quer através de uma rede neuronal artificial. Na parte final desta secção é feito um comparativo entre os resultados obtidos para os dois tipos de autocarros utilizados. Numa segunda secção são apresentados os principais resultados e análises feitas sobre as avaliações efectuadas em viagens típicas de autocarros. Ao todo, validaram-se, para esta análise, um total de 31 percursos com 530 votações subjectivas sobre o nível de desconforto induzido nos passageiros pelo ambiente térmico, vibrações, ruído, qualidade do ar e luminosidade. Os passageiros indicavam ainda a sua avaliação em termos do nível de desconforto ambiental global, relativamente a cada percurso efectuado. São apresentados os percursos efectuados bem como as principais características dos passageiros que neles participavam. Para todos os estímulos de desconforto ambiental considerados são apresentados os resultados, quer das avaliações objectivas, quer das avaliações subjectivas, estabelecendo para cada um dos estímulos, as comparações possíveis entre ambas as avaliações. A parte final do capítulo é composta pela integração dos diversos estímulos considerados num índice global de desconforto ambiental nos autocarros, através de regressão linear múltipla, bem como de redes neuronais artificiais.

Por fim, no sétimo e último capítulo, são indicadas as principais ilações acerca das metodologias experimentais desenvolvidas, sendo feita uma súpula das conclusões

descritas durante todo o texto. São ainda indicadas, neste capítulo, algumas linhas de orientação para trabalhos futuros previstos nesta área de investigação.

O anexo A é constituído pelo questionário que foi utilizado na avaliação subjectiva dos diversos sons pelo painel de avaliadores que efectuou a análise da qualidade acústica dos autocarros. No anexo B, apresenta-se o questionário utilizado nas avaliações subjectivas do desconforto ambiental. Por último, apresentam-se no anexo C, diversas representações gráficas do nível de desconforto global, obtido através da rede neuronal de retropropagação descrita no capítulo seis, em função da conjugação dos diversos estímulos de desconforto considerados.

Capítulo 2

RESPOSTA HUMANA AO AMBIENTE

2.1. Introdução

A percepção que as pessoas têm acerca das características do meio ambiente é feita através do designado sistema sensorial, existindo uma analogia entre este e um sistema de medida, podendo fazer-se corresponder o aspecto físico à terminologia de engenharia (ver figura 2.1), no qual os transdutores humanos (tais como: olhos, ouvidos, nariz, entre outros), possuem características estáticas e dinâmicas consoante os estímulos a que sejam submetidos.

Em resposta aos sinais dos seus transdutores, o corpo humano reage aos diferentes estímulos ambientais, através de sistemas de controlo, de modo a manter o seu equilíbrio. Um exemplo de um sistema de controlo é o sistema de regulação térmica, que representa uma reacção típica do corpo humano onde, por exemplo, ao aumento da temperatura ambiente, o corpo reage de uma forma consistente para manter a sua temperatura interna, através do mecanismo de sudção, originando dessa forma, a perda de calor por evaporação.

Esta é na verdade uma abordagem simplista do fenómeno, pois o modo como um estímulo é recebido por um ser humano condiciona a sua resposta fazendo-a depender de múltiplos factores, nomeadamente: o seu estado emocional, as suas experiências anteriormente vividas, etc. É a conjugação destes diversos factores físicos, fisiológicos e psicológicos que, ao nível da ergonomia ambiental, deve ser tida em conta, por forma a

poder obter-se uma solução prática acerca da resposta dos seres humanos relativamente ao ambiente que os rodeia.

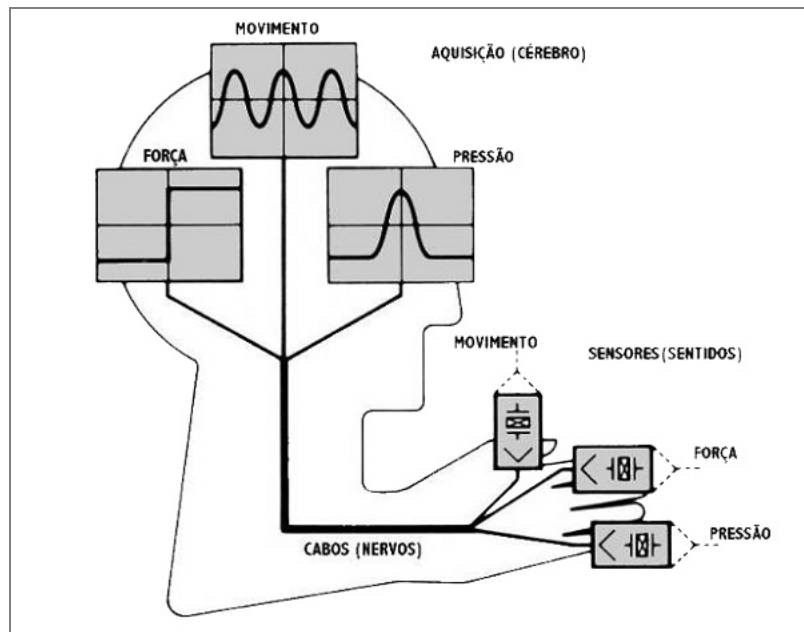


Figura 2.1 Emulação do sistema sensorial humano

Um factor adicional a ter em conta ao nível da ergonomia ambiental é o que atende às diferenças individuais entre as pessoas. Estas, podem ser divididas ao nível das diferenças inter-indivíduos, que são as diferenças entre pessoas (por exemplo: homens e mulheres, altos e baixos) e as diferenças intra-indivíduos que são as diferenças que ocorrem, na mesma pessoa, ao longo do tempo (por exemplo: estado emocional, etc.). O modo mais adequado para descrever as diferenças passa pelo recurso a parâmetros estatísticos da população tal como seja a média e o desvio padrão das respostas; para além disso, deve atender-se também ao facto de a própria ergonomia ambiental estar intimamente ligada à resposta do ser humano, relativamente ao ambiente que o rodeia. Posto isto, importa, antes de mais, fazer uma apresentação de alguns conceitos que estão na sua base.

2.2. Psicofisiologia

A homeostase (ou homeostasia), termo introduzido em 1932 por Walter Cannon a partir do grego *homeo* (similar ou igual) e do *stasis* (estático), é a propriedade de um sistema aberto, de regular o seu ambiente interno mediante múltiplos ajustes de equilíbrio dinâmico controlados por mecanismos de regulação interrelacionados de modo a manter uma condição estável. O uso mais frequente deste conceito ocorre

relativamente à homeostase biológica, sendo porém, igualmente aplicado a ambientes externos de maiores dimensões. Na área ecológica e social há sistemas que também podem ser considerados homeostáticos, em virtude de manterem o seu equilíbrio contrariando qualquer mudança, podendo inclusive interromper o seu próprio funcionamento, caso não sejam bem sucedidos na reposição do equilíbrio. Sistemas complexos, como é o corpo humano, precisam de homeostase para manter a sua estabilidade e sobrevivência tendo em vista a adaptação ao seu ambiente externo.

Os sistemas homeostáticos exibem certas propriedades, donde se destacam as seguintes:

- estabilidade: são extremamente estáveis;
- organização: toda a sua organização interna, estrutural e funcional, contribui para a manutenção do equilíbrio;
- imprevisibilidade: pois o resultado de uma determinada acção pode mesmo ser o oposto do esperado.

A título exemplificativo, indicam-se agora, alguns dos mais importantes exemplos de homeostase que são comuns nos mamíferos:

- a regulação da quantidade de água e minerais no corpo, conhecida como osmorregulação, e que tem lugar principalmente nos rins;
- a regulação da temperatura corporal, realizada principalmente pela pele e pela circulação sanguínea;
- a regulação dos níveis de glicose no sangue, realizada principalmente pelo fígado e pela insulina segregada pelo pâncreas.

À mudança de uma qualquer variável, o sistema humano reage de acordo com dois tipos básicos de resposta:

- uma resposta negativa, que é a reacção pela qual o sistema responde de modo a reverter a direcção da mudança, forçando as variáveis a manterem-se estáveis, o que vai permitir a manutenção da homeostase. Exemplos típicos de respostas negativas: quando a concentração corporal de dióxido de carbono aumenta, os pulmões são estimulados a aumentar a sua actividade e expelir mais dióxido de carbono; quando, face a uma alteração ascendente ou descendente da temperatura corporal, os receptores situados na pele e no hipotálamo a detectam, e desencadeiam uma ordem do cérebro que dá início a uma reacção no sentido de aumentar a geração interna de calor ou alterar os mecanismos de perda de calor.
- uma resposta positiva, que corresponde a uma alteração do limiar de resposta, para valores mais elevados. Este tipo de resposta é menos comum nos sistemas naturais do que a resposta negativa. Exemplos de respostas

positivas são: o sistema nervoso, onde um potencial eléctrico limite despoleta a geração dum potencial de acção muito mais elevado; a coagulação do sangue, que é um processo que ocorre após a ruptura de um vaso sanguíneo de modo a formar um coágulo sanguíneo para cessar a hemorragia.

A homeostase biológica representa como se expôs, uma característica fundamental dos seres vivos, dado que permite a manutenção do ambiente interno dos mesmos, dentro de limites toleráveis.

Relativamente a um dado parâmetro, um organismo vivo, pode ser conformista ou regulador. Enquanto que os reguladores tentam manter o parâmetro a um nível constante, independentemente da sua variação no ambiente externo, os conformistas permitem que seja o ambiente externo a determinar o parâmetro. Como exemplo, podem indicar-se os animais endotérmicos, que mantêm uma temperatura corporal constante, e os animais heterotérmicos, que exibem uma grande variação deste parâmetro. Isto não significa porém, que os organismos conformistas não tenham adaptações que lhes permitam exercer algum controlo sobre o parâmetro em questão. Note-se como é frequente observar-se, pelas manhãs, répteis sobre pedras aquecidas pelo Sol a fim de elevar a sua temperatura corporal. Uma vantagem da regulação homeostática é precisamente a de permitir um funcionamento mais eficiente do organismo. Sabe-se que os animais heterotérmicos tendem a ficar letárgicos a baixas temperaturas, enquanto que os animais endotérmicos mantêm uma actividade normal. Por outro lado, a regulação requer energia, sendo uma das razões pelas quais alguns répteis conseguem sobreviver com uma refeição semanal, precisamente por requererem muito menos energia para manter a sua homeostase.

A homeostase no corpo humano é afectada por todo um leque de factores, a saber: a temperatura, a salinidade, as concentrações de nutrientes (glicose, diversos iões, oxigénio) e os resíduos (dióxido de carbono e ureia). Considerando que estes factores afectam as reacções químicas que mantêm o corpo vivo, este possui mecanismos fisiológicos para os manter dentro dos limites desejáveis. Alguns exemplos destes mecanismos são:

- a regulação térmica, traduzida quer na geração de calor através do tremer dos músculos esqueléticos ou do metabolismo da gordura quando a temperatura corporal é muito baixa, quer na promoção de produção de suor quando a temperatura corporal é muito elevada, determinando assim o arrefecimento do corpo através do processo de evaporação;
- a regulação química efectuada em diversos órgãos: pelo pâncreas, por exemplo, que produz insulina e glucagon a fim de regular a concentração de

açúcar no sangue; pelos pulmões, que absorvem oxigénio e libertam dióxido de carbono; e, pelos rins, que eliminam ureia regulando as concentrações de água e duma grande variedade de iões.

Muitos destes órgãos são controlados por hormonas segregadas pela glândula pituitária, cuja acção é por sua vez regulada pelo hipotálamo.

Quando um nervo sensorial e um nervo motor comunicam entre si ocorre o chamado estímulo nervoso, sendo a ciência que estuda estes relacionamentos designada por 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. Inicialmente, Fechner pensou que a psicofisiologia iria resolver antigas controvérsias filosóficas. No entanto, e após o lançamento do seu livro (Fechner, 1860) o mesmo conclui que a psicofisiologia seria aceite como uma nova área de estudo, independente da filosofia. O seu objectivo 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 objectos 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 (Ψ) são uma função logarítmica dos valores físicos (Φ), daqui resultando a lei de Fechner:

$$\Psi = a \log \Phi + b \quad (2.1)$$

onde a e b são constantes que dependem do tipo de grandeza física analisada.

De entre as diversas leis nesta área, a lei de Stevens, que afirma que o valor subjectivo é uma função de potência do valor físico, tem sido a base de diversos estudos:

$$\Psi = c \Phi^n \quad (2.2)$$

onde n é o expoente da função potência que varia de acordo com a natureza do estímulo, e c é uma constante que depende do módulo e do padrão do estímulo, não sendo por vezes considerado o seu efeito. Na literatura existem diversos valores de n consoante o tipo de grandeza em análise (Stevens, 1986).

O termo estímulo mencionado ao longo do presente texto, define-se como sendo uma alteração do ambiente interno ou externo detectável pelo ser humano sendo frequentemente, o primeiro componente de um sistema de controlo homeostático. Ao aplicar um estímulo a um receptor sensorial, ele induz um reflexo através de uma transdução do estímulo.

A definição de "sentido" do ser humano não sendo totalmente consensual nomeadamente no que diz respeito à quantidade de sentidos que uma pessoa tem, em virtude das diversas definições de "sentido" é, de um modo genérico, uma faculdade através da qual os estímulos exteriores são percebidos. Normalmente indica-se, numa abordagem inicial, a classificação sugerida por Aristóteles de que existem cinco sentidos (ver figura 2.2):

- a visão, localizada nos olhos, que descreve a habilidade de detectar ondas electromagnéticas dentro da escala visível (luz) pelo olho e pelo cérebro para interpretar a imagem. Há quem entenda que na visão existem dois sentidos considerando de forma independente os receptores responsáveis pela percepção da cor (frequência dos fotões da luz) e os responsáveis pelo brilho (amplitude/intensidade - número de fotões da luz);
- o gosto ou paladar, localizado na língua, é um dos dois sentidos "químicos". Partindo do pressuposto que a língua agrega quatro tipos de gosto (receptores) há quem considere que cada um destes, constitui um sentido diferente uma vez que cada receptor comunica com uma região diferente do cérebro. Os quatro receptores detectam o doce, o salgado, o ácido e o amargo. Recentemente confirmou-se a existência de um quinto receptor na língua, que detecta o aminoácido glutamato que é um sabor encontrado geralmente na carne e em alguns aromatizantes artificiais;
- o cheiro ou olfacto, localizado na pituitária no interior do nariz, é outro sentido "químico". Ao contrário do gosto onde, como se referiu, estão presentes, pelo menos, quatro receptores, no cheiro ou olfacto, de acordo com a teoria actual, existem centenas de receptores olfactivos, cada um com a sua característica molecular particular. No cérebro, o olfacto é processado pelo sistema olfactivo. Os neurónios olfactivos do receptor no nariz diferem da maioria de outros neurónios em virtude de morrem e de se regenerarem de uma forma regular;
- a audição, localizada nos ouvidos, é o sentido da percepção e da interpretação de pequeníssimas fibras no ouvido interno que detectam o movimento de uma membrana que vibra em função de mudanças na pressão exercida por partículas atmosféricas numa gama de frequências de

20 a 20000 Hertz. O som, em especial nas frequências mais baixas e mais elevadas, também é detectado como vibrações conduzidas através do corpo pelo movimento táctil;

- o tacto, localizado nos terminais nervosos da pele, é o sentido da percepção da pressão, geralmente na pele. Há uma variedade de receptores da pressão que respondem às variações da pressão (firme, toques leves, etc).

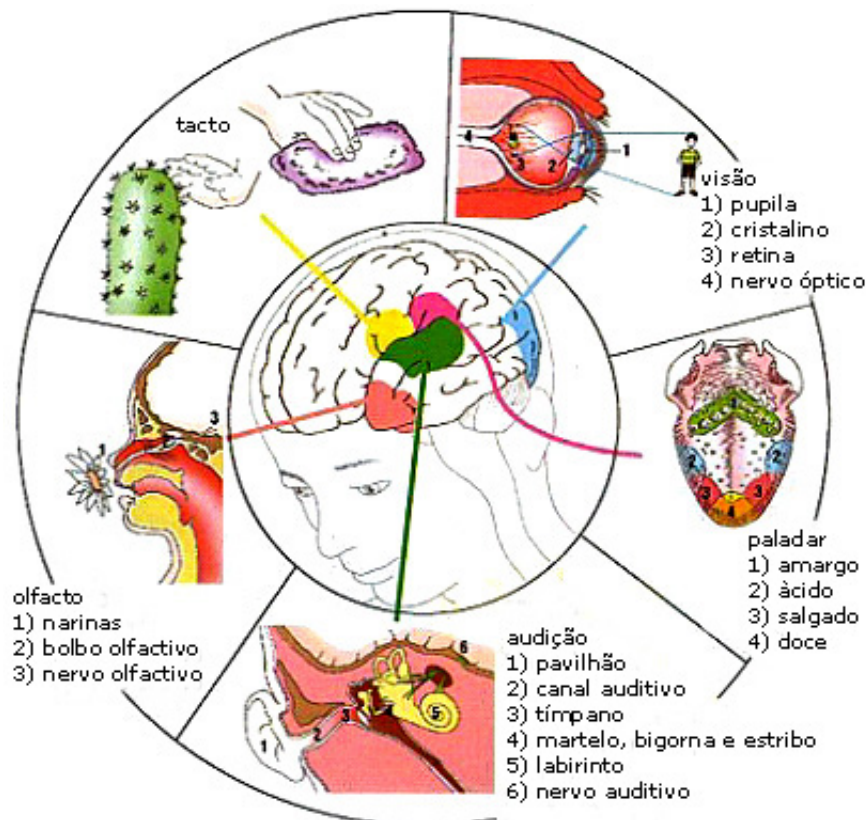


Figura 2.2 Sistema sensorial humano de cinco sentidos sugerido por Aristóteles

A definição mais consensual do que é um "sentido" é a que refere que "é um sistema que consiste num tipo de células sensoriais (ou grupo de células) que responde a um tipo específico de energia física, e ao qual corresponde uma região definida (ou grupo de regiões) dentro do cérebro, onde os sinais são recebidos e interpretados". Saber que tipo de células sensoriais e quais as regiões do cérebro onde actuam os órgãos dos sentidos é que gera alguma controvérsia entre diversos autores, tendo sido identificados desde nove a vinte e um sentidos, para além de outras experiências do ser humano que podem ou não ser consideradas como sentido, tal como seja o caso da consciência sensorial da fome e da sede.

É consensual o entendimento que o ser humano possui, pelo menos, nove sentidos incluindo-se o da visão, o do paladar, o do olfacto e o da audição na classe dos sentidos

especiais, em contraponto com o tacto que já se inclui nos sentidos somáticos juntamente com a sensação térmica e a sensação da dor. A sensação térmica, sendo um sentido somático, representa o sentido do calor e do frio. Por sua vez, a sensação de dor pode ser classificada como um, dois ou três sentidos, dependendo do método da sua classificação. Os três tipos de receptores da dor são: cutâneos (pele), somáticos (junções e ossos) e viscerais (órgãos do corpo). Diversas pesquisas vieram comprovar que a dor é um fenómeno distinto que intervém com todos os outros sentidos, incluindo o toque, contrariando a ideia de que a mesma provenha simplesmente do sobrecarregar dos receptores da pressão.

Para além dos sentidos especiais e somáticos existem mais dois que complementam aqueles nove e que são:

- o sentido de equilíbrio, que é um sentido vestibular, que representa a percepção do contrapeso e que está relacionado com as cavidades que contêm o líquido na orelha interna. Neste enquadramento, existe algum desacordo relativamente ao facto de, por vezes, se incluir neste sentido, o sentido de direcção ou orientação;
- e o sentido da percepção do corpo, que é chamado o sentido cinestésico, ou seja, a consciência de onde as várias regiões do corpo estão situadas a todo o momento.

Do ponto de vista da biologia e das ciências cognitivas, os sentidos são os meios através dos quais os seres vivos percebem e reconhecem outros organismos e as características do meio ambiente em que se encontram, sendo o adjectivo sensorial correspondente aos sentidos. O sistema sensorial representa a parte do sistema nervoso responsável pelo processamento da informação sensorial, constituindo-se por receptores sensoriais, transmissores neurológicos e partes do cérebro envolvidas na percepção sensorial.

Sob o ponto de vista da engenharia, o sistema sensorial humano apresenta as seguintes limitações: campos de medida reduzidos, limiares de medida elevados, problemas de resolução espacial, baixa resposta em frequência, memória limitada e não permanente, reprodutibilidade limitada, resposta não linear e responde preferencialmente a transitórios. É devido a estas características que têm sido desenvolvidos equipamentos e sensores específicos para avaliar a resposta do ser humano relativamente a diversas grandezas ambientais, procurando assim ultrapassar estas limitações.

A ergonomia ambiental tem por base a psicofisiologia sendo objecto de análise de vários intervenientes desde engenheiros, arquitectos e psicólogos que trabalham no seu desenvolvimento.

Dos nove sentidos acima descritos, aqueles que são objecto de actuação sobre o meio envolvente para promover alterações no ser humano são: a sensação térmica (ambiente térmico), a audição (ruído), a pressão (vibrações), o olfacto (qualidade do ar) e a visão (luminosidade).

2.3. Métodos de ergonomia ambiental

As três abordagens ao nível dos objectivos da ergonomia ambiental são: o efeito na saúde, o conforto proporcionado pelo meio envolvente e o modo como esse mesmo meio afecta o desempenho do ser humano.

Por outro lado, são quatro os principais métodos ergonómicos ambientais para avaliar a resposta humana relativamente ao meio ambiente, a saber: métodos subjectivos, métodos objectivos, métodos comportamentais e modelação da resposta humana.

Os métodos subjectivos incluem o uso de escalas de avaliação feitas através de respostas dadas por pessoas. A avaliação do conforto térmico, através do recurso a questionários de avaliação, é um exemplo deste tipo de método. Têm a vantagem de serem relativamente fáceis de se implementar, de fornecerem valores subjectivos directos, sendo bastante indicados para avaliar as respostas psicológicas relativamente ao conforto e ao incómodo. Têm no entanto, a desvantagem de, por vezes, ser difícil a extrapolação de valores obtidos não se afigurando apropriados para avaliar o efeito do ambiente externo na saúde. Para além disso, também requerem, frequentemente, o uso de uma amostra representativa da população exposta ao ambiente de interesse.

Os métodos objectivos têm a vantagem de fornecer medidas quantificadas da resposta humana. As variáveis em causa são medidas directamente, como por exemplo: a temperatura do corpo, a acuidade da audição ou o desempenho numa tarefa. Como principais desvantagens enumeram-se: a necessidade de obter uma amostra representativa da população e do ambiente de interesse, o facto de por vezes os instrumentos de medição interferirem com o que se pretende medir e de não permitirem, por si só, inferir resultados subjectivos tais como o nível de conforto.

Os métodos comportamentais, em que o comportamento de uma pessoa ou de um grupo de pessoas é observado e relacionado com respostas ao meio ambiente. Como exemplo deste tipo de método pode citar-se a observação de mudanças de postura, de mudança de roupa, o ajuste do ambiente, etc.

Os modelos de resposta humana aos ambientes incluem aqueles onde as previsões da resposta humana são feitas baseadas na experiência da resposta humana em

ambientes previamente investigados (modelos empíricos) ou modelos racionais de resposta humana aos ambientes que tentam simular o sistema subjacente podendo daqui ser usados para relacionar a causa e o efeito. Têm a vantagem de ser consistentes na sua resposta, são fáceis de usar, dão uma resposta rápida e podem ser usados durante o projecto e desenvolvimento de produtos. As principais desvantagens são a de os modelos fornecerem somente respostas aproximadas, por não considerarem todo o ambiente real onde o ser humano está inserido.

Na maioria das aplicações, as análises de ergonomia ambiental utilizam uma combinação dos diversos métodos referidos.

2.4. Conforto em veículos

A expressão conforto, deriva do latim *confortare* e o seu significado aparece nos dicionários como sendo, por exemplo: “o acto ou efeito de confortar”, “bem-estar material ou moral”, “dar força a”. Assim, o conforto é um conceito complexo que consiste numa mistura de sentimentos, da percepção, do modo e da situação. Por vezes é também definido como sendo: “Um sentimento agradável de satisfação física ou mental livre de dor e de sofrimento, ou algo que fornece este sentimento”, “Um sentimento de liberdade de preocupação ou de desapontamento”, “Liberdade de dificuldade financeira que promove um estado confortável”, “Bem-estar material, com conveniências que fazem a vida mais fácil e mais agradável”, etc.

Todas as definições encontradas, têm como denominador comum, o facto de associarem a noção de conforto a um estado positivo ou de ausência de estados negativos, podendo então ser interpretado com uma escala bipolar, na qual a noção de conforto é explicada pela ausência de desconforto. Esta noção de bipolaridade não reúne consenso ao nível dos investigadores, existindo análises que consideram o conforto e o desconforto como uma dimensão bipolar contínua ou como duas dimensões experimentais distintas.

Quehl (2001), ao investigar o modo como o ruído e as vibrações no interior de aviões afectam o conforto dos passageiros, efectuou através de um inquérito a setenta e um indivíduos (ver figura 2.3), uma análise acerca do que as pessoas consideram conforto; a maioria dos entrevistados considerou o conforto como estando ligado a sensações de bem-estar e relaxação.

Na noção de conforto está implícito um elevado grau de subjectividade, isto é, se para uma pessoa um ambiente é confortável, pode não o ser para outra. Pode mesmo

acontecer, que a mesma pessoa sujeita duas vezes às mesmas condições, possa dar respostas diferentes.

Questão: *Para si, o que significa o termo conforto?*

Categorias	Nº de ocorrências	Frequência da resposta
Bem-estar	17	23,9
Atmosfera agradável	13	18,3
Relaxação e alívio	9	12,7
Tranquilidade e comodidade	9	12,7
Ausência de aborrecimento e incómodo	7	9,9
Luxo e extras	6	8,5
Segurança	4	5,6
Liberdade e voluntariedade	3	4,2
Silêncio	3	4,2
	--	--
Total	71	100,0

Figura 2.3 Resultados de um questionário experimental sobre o conceito de conforto (adaptado de Quehl, 2001)

A importância do conforto no interior dos veículos tem vindo a aumentar nas últimas décadas, tanto ao nível económico como ao nível social. Além disso, o conforto é cada vez mais usado no sentido de publicitar determinados veículos pelas marcas construtoras. No fundo, é um factor importante a ter em conta quando se opta por viajar. Associada à noção de conforto, está também uma noção de desempenho, pois alguns estudos (Norin e Wyon, 1992; Mackie *et al.*, 1974) revelam que em situações de conforto existe um aumento do desempenho profissional de cada um.

Relativamente a veículos de transporte de passageiros, o conforto pode ser analisado sob diferentes pontos de vista científicos: psicológico, físico, sociológico e tecnológico (Dumur *et al.*, 2004).

O ponto de vista psicológico representa o sentimento do conforto ligado a um estado de prazer, de um sentimento livre de preocupações, aborrecimentos, dificuldades financeiras, etc. Deste ponto de vista o conforto, nos seres humanos, está relacionado com a percepção, física e mental, e com as emoções.

O ponto de vista físico está relacionado com o sentimento das pessoas no que concerne à liberdade da dor e sofrimento, a sensações de relaxamento, sentimentos agradáveis e de satisfação, sentimentos de bem-estar físico. Estar num veículo de transporte de passageiros não é um estado humano natural, e como tal, tem as suas consequências psicológicas, donde, é extremamente importante ter em conta aspectos

físicos tais como a qualidade do ar interior, a pressão, o ruído, a falta de movimento, entre outros, que vão afectar o conforto ambiental dos passageiros.

O ponto de vista sociológico está relacionado com o conceito que cada pessoa tem individualmente de conforto, e que está intimamente ligado com o grupo e cultura onde o passageiro se enquadra. Neste aspecto, duas classificações distintas podem ser feitas:

- uma percepção geográfica e étnica do conforto, pois a noção do conforto varia consoante os países. Por exemplo, em muitas civilizações não ocidentais, como seja a Índia ou África, as posturas de descanso são muito diferentes da Europa ou dos Estados Unidos da América. Assim, também as cores dos assentos e do interior dos veículos têm significados diferentes em culturas diferentes, tais como: a cor vermelha tem um significado muito diferente em culturas chinesas e europeias;
- percepção do conforto em função da classe social. Nalgumas classes sociais da população, o conforto é relacionado ao luxo, à pompa e ao cerimonial, não tendo a mesma relevância para outras classes sociais.

Do ponto de vista tecnológico diz respeito ao tipo de produtos e serviços que facilitam o modo de viver e a tornam agradável. Assim, do ponto de vista tecnológico a noção de conforto focaliza-se no fornecimento de sensações agradáveis, através do recurso a meios tecnológicos, tais como: os assentos, equipamentos áudio, disposição geral do habitáculo, etc.

Tendo por base esta análise acerca dos diversos parâmetros envolvidos no conforto em veículos de transporte de passageiros e, pretendendo-se trabalhar na promoção e incremento do conforto, é necessário dar atenção a diversos aspectos (Dumur *et al.*, 2004), tais como:

- variáveis directamente ligadas com o passageiro, ou seja: idade, género, finalidade da viagem (trabalho, lazer), tipo de acompanhamento do passageiro (sozinho, com família, colegas), experiência ou não de viajar, tamanho e outras características do assento, etc;
- equipamentos disponíveis, isto é: encosto de cabeça, descanso para os braços e pés, controlos, cinto de segurança, luz, música, vídeo, informação sobre a viagem, telefone, ar condicionado, compartimento de bagagem, jornais e livros, alimentação, avisos durante a viagem, etc;
- actividades: dormir, ler, trabalhar, escrever, ouvir música, ver vídeos, comer, comunicação com outros passageiros, movimentação no interior do habitáculo, etc;
- variáveis ambientais: tripulação, outros passageiros, decoração, duração da viagem, ponto de partida e destino, design do habitáculo, disposição da

cabine, condições físicas no habitáculo (temperatura, luminosidade, ruído, qualidade do ar).

Assim, o conforto ambiental tem como objectivo adequar os princípios físicos envolvidos e as necessidades de carácter ambiental - térmicas, visuais, acústicas, vibracionais e da qualidade do ar interno - aos projectos construtivos.

De forma resumida pode dizer-se que o conforto ambiental pode descrever-se como sendo um estado de espírito em que o indivíduo exprime satisfação, com o ambiente que o rodeia, a partir de informações captadas pelos diversos órgãos dos sentidos.

2.5. Estímulos de desconforto em veículos

Centrando a análise nas grandezas físicas no interior de um habitáculo, estas podem ser agrupadas (Corbridge, 1987) em dinâmicas (rápidas mudanças), ambientais (variações lentas) e factores espaciais (ver tabela 2.1).

O som está incluído nos factores ambientais, no entanto as suas variações podem ser bastante rápidas, podendo este enquadrar-se nas variáveis dinâmicas. Todas as variáveis físicas indicadas na tabela 2.1, podem interferir e influenciar o conforto de forma directa ou indirecta.

Dinâmicos	Ambientais	Dimensionais
	Pressão	
	Temperatura	
Acelerações	Humidade	Dimensões do assento
Choques	Ventilação	Forma do assento
Mudanças de velocidade	Odores	Ajuste do assento
Curvas	Fumo	Espaço para as pernas
Turbulências	Qualidade do ar	Firmeza do assento
	Iluminação	
	Som	

Tabela 2.1 Factores de desconforto em veículos

Qualquer condição ambiental pode, no entanto, ser caracterizada a partir de um conjunto de grandezas físicas mensuráveis correspondendo, em última análise, ao que é avaliado pelo indivíduo. Por isso, as metodologias de análise, para cada um dos aspectos parcelares que podem ser considerados na avaliação do conforto, têm evoluído no sentido da criação de índices baseados nessas grandezas físicas permitindo, deste modo,

uma avaliação objectiva através do relacionamento da evolução das grandezas em jogo com a resposta média da sensibilidade humana.

De acordo com Griffin (1995), as escalas de avaliação utilizadas nestes índices de conforto podem ser classificadas, por ordem crescente de sofisticação, como sendo: nominais, ordinais, de intervalos e relativas. As nominais avaliam, de uma forma exclusivamente qualitativa (por exemplo: muito frio, frio, etc.), um dado ambiente; as ordinais correspondem ao estabelecimento de uma convenção numérica para as anteriores. Estes dois tipos de escalas permitem simplesmente detectar diferenças entre condições, hierarquizando-as por ordem de preferência. Também são feitas avaliações mais elaboradas com possibilidade de previsão do número de pessoas que se incluem num dado estado, utilizando as escalas de intervalos e as escalas relativas, o que permite inclusivamente, que estas últimas, prevejam o número de pessoas insatisfeitas num dado ambiente. O desenvolvimento de um índice para avaliação de um qualquer factor de desconforto constitui um processo moroso que segundo o referido autor deve ter as seguintes fases:

- ponderação do efeito das grandezas físicas nos indivíduos;
- integração dos efeitos das várias grandezas e construção de escalas de intervalos para avaliação subjectiva dos efeitos do ambiente sobre os indivíduos;
- transformação das grandezas medidas para escalas adaptadas à sensibilidade humana e correlacionadas linearmente com as avaliações subjectivas;
- criação de escalas relativas de desconforto.

No capítulo quatro irão ser apresentados diferentes índices utilizados para a avaliação parcelar do conforto em função de diversos estímulos de desconforto, que foram obtidos através deste tipo de análise.

2.6. Passageiro virtual

De um modo similar a outras áreas, também ao nível da ergonomia ambiental global se investiga o conceito do passageiro virtual, ou seja, uma representação ou modelo virtual de um passageiro típico que tenha a capacidade de simular uma função de transferência entre as variáveis físicas do ambiente e as respostas subjectivas dos passageiros.

Na ergonomia física existem diversas aplicações de modelos virtuais no desenvolvimento de veículos em diversas áreas, citando-se a título de exemplo:

- a análise do ambiente térmico em veículos, conhecida como a engenharia de conforto térmico virtual que tem desenvolvido diversos modelos virtuais de passageiros que simulam a resposta térmica do ser humano no interior dos veículos. Existem mais de uma dúzia de modelos térmicos virtuais (Nilsson, 2004). Na figura 2.4, apresenta-se uma imagem da utilização de um manequim virtual para a previsão do conforto térmico durante o desenvolvimento de um habitáculo. Este tipo de ferramenta permite explorar diferentes estratégias de controlo do ambiente térmico de uma forma expedita e com baixos custos.

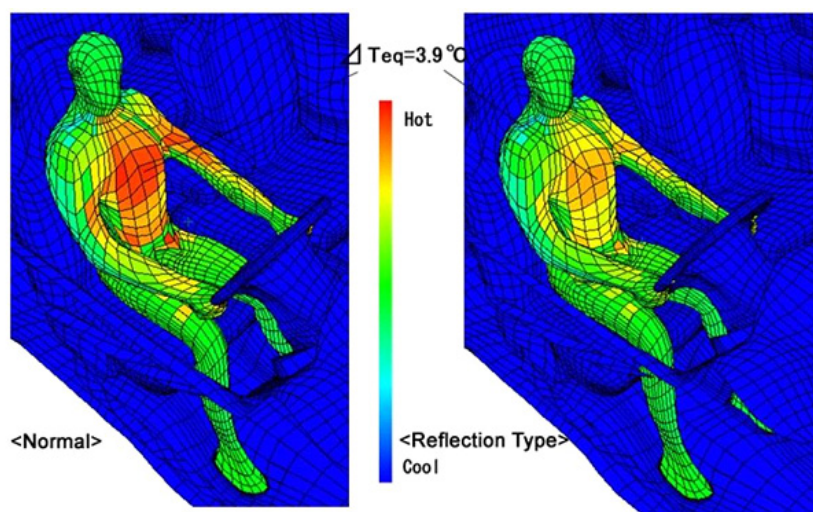


Figura 2.4 Manequim térmico virtual (adaptado de Tanabe, 2002)

- a análise de características antropométricas dos veículos que tem, cada vez mais, utilizado este tipo de ferramentas. Por exemplo, Mellberg e Loczi (2003), desenvolveram todo o projecto relativo à visibilidade do condutor de autocarros escolares, bem como o posicionamento dos seus pedais, baseado num sistema visual tridimensional através de modelação de passageiros virtuais, neste caso baseadas na ferramenta RAMSIS (“Realistic Anthropological Mathematical System for Interior Comfort Simulation”) que é um modelo alemão de aplicação em antropometria (ver figura 2.5). Existe uma grande diversidade de modelos disponíveis a este nível tais como: o SAMMIE, o ERGOMAN, o ANTHROPOS, o COBIMAN, etc.

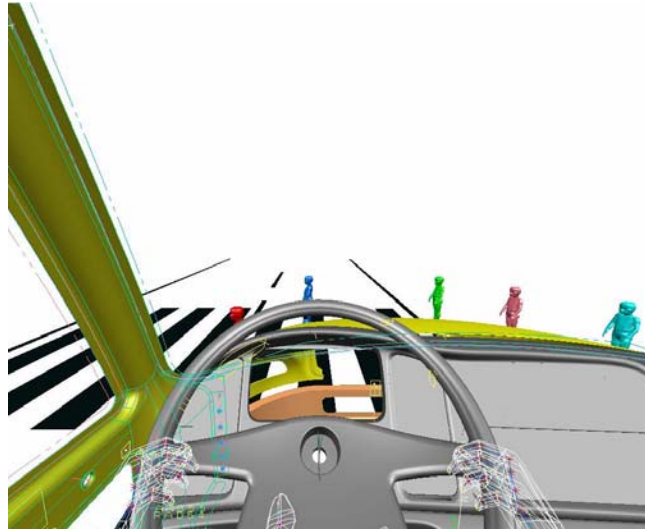


Figura 2.5 Visibilidade virtual do motorista de autocarro (adaptado de Mellberg e Loczi, 2003)

- o estudo ao nível das vibrações, área em que existem diversos passageiros virtuais para prever o seu efeito no corpo humano. A título de exemplo, apresenta-se na figura 2.6 uma imagem do trabalho reportado por Verver e Van Hoof (2002), onde os autores descrevem a utilização da aplicação designada por MADYMO para determinar os níveis de conforto, relativamente às vibrações verticais, para um condutor sentado.

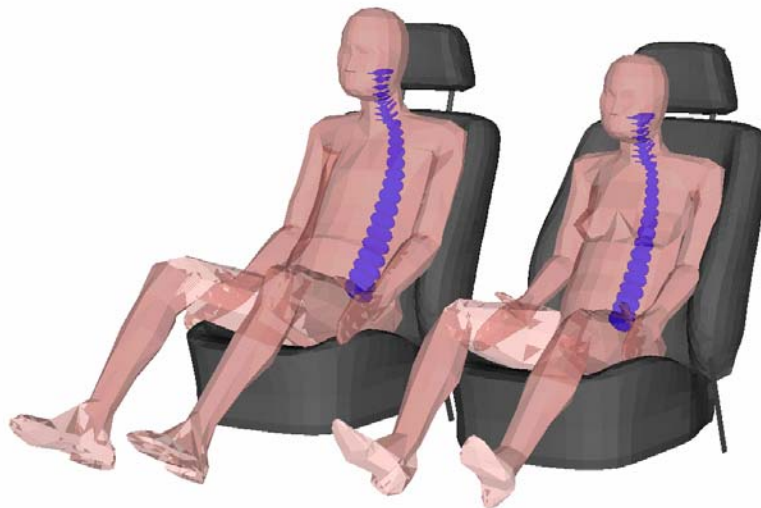


Figura 2.6 Modelação do corpo humano da aplicação MADYMO (adaptado de Verver e Van Hoof, 2002)

O conceito de passageiro virtual, face ao desenvolvimento das ferramentas computacionais, tem-se expandido a diversas áreas do desenvolvimento ergonómico de veículos, existindo mesmo uma comissão técnica na SAE, a G13 (“Human Modeling

Technology and Standards Committee”) sobre modelação humana e suas normas em veículos, bem como publicações específicas sobre a sua aplicabilidade em veículos (Chaffin, 2001).

Este tipo de ferramenta tem como principal objectivo a diminuição do tempo e do custo no desenvolvimento dos veículos, permitindo analisar sob o ponto de vista computacional, qual o grau de conforto previsível dos passageiros. Claro está que, embora a previsão possa não ser totalmente segura, será sempre uma mais-valia ter um indicador quantitativo relativo ao conforto no interior dos veículos.

Relativamente à ergonomia ambiental e em virtude da similaridade de conceitos entre o sistema sensorial humano e as redes neuronais artificiais, estas últimas têm sido encaradas como uma boa hipótese para a modelação da resposta humana relativamente ao conforto no interior dos veículos, como forma de integrar os efeitos das diversas variáveis físicas características de um ambiente global. Na figura 2.7, está representado de forma esquemática o conceito de passageiro virtual em ergonomia ambiental, consistindo na obtenção de um tipo de função de transferência que integre os diversos estímulos físicos que afectam o conforto, permitindo obter o nível previsional de conforto dos passageiros.

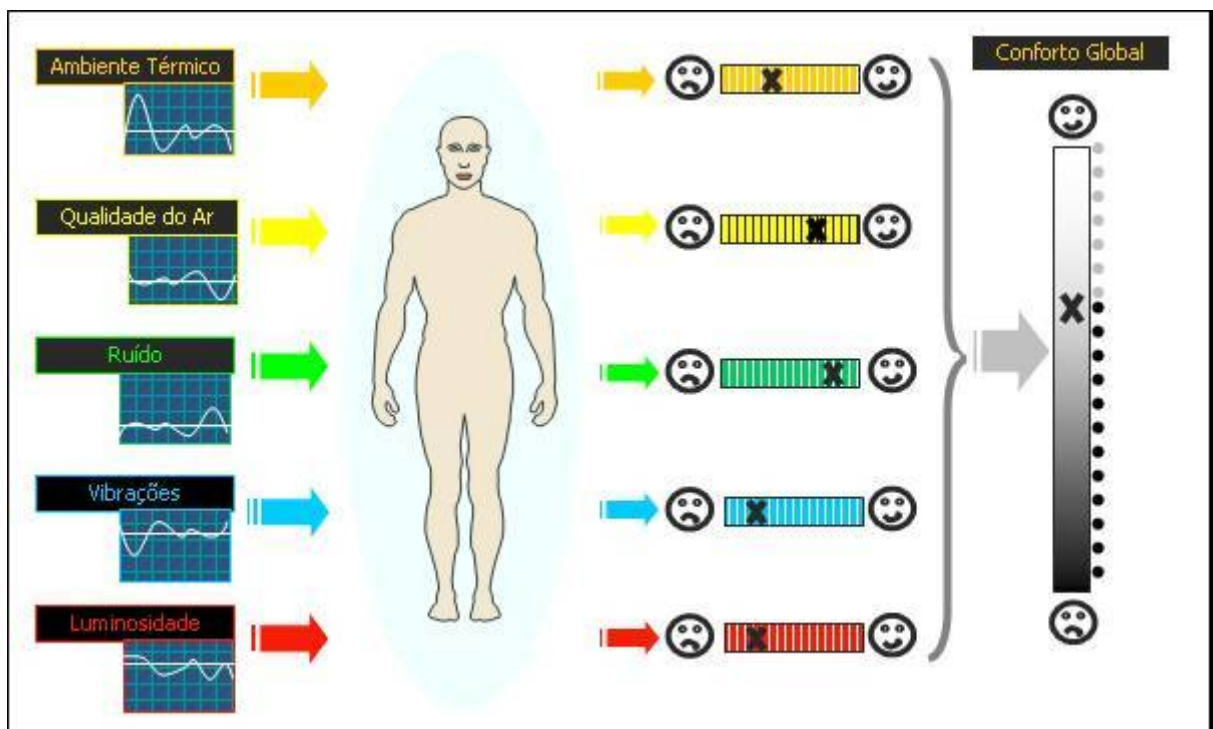


Figura 2.7 Passageiro virtual relativo a um ambiente físico global

Capítulo 3

REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

3.1. Introdução

Ao longo do trabalho desenvolvido, as redes neuronais artificiais, adiante designadas por RNA, constituíram uma alternativa relativamente aos métodos estatísticos tradicionais para avaliar o nível de desconforto acústico assim como o nível de desconforto global no interior dos autocarros. A sua eleição, em detrimento de outras ferramentas, baseou-se na sua popularidade e consolidação ao longo da última década sendo a sua inspiração biológica o sistema nervoso central do ser humano. Assim, as RNA são ferramentas de modulação computacional não algorítmica, caracterizadas por sistemas que tentam imitar a estrutura do cérebro humano.

As RNA podem ser definidas como estruturas constituídas por elementos de processos simples adaptáveis e altamente inter-ligados (designados neurónios artificiais ou nodos), capazes de executar cálculos computacionais de processamento de dados e representação do conhecimento (Hecht-Nielsen, 1990; Schalkoff, 1997). Apesar das RNA serem abstracções drásticas das suas contrapartes biológicas, o seu fundamento não é reproduzir a operação dos sistemas biológicos, mas sim, fazer uso do que é conhecido sobre a funcionalidade das cadeias biológicas para resolver problemas complexos. O aspecto atractivo das RNA provém da informação notável que as mesmas processam e que são características do sistema biológico natural, tais como seja: a não linearidade, o

elevado paralelismo, a sua robustez, a habilidade para decifrar informação imprecisa e difusa e a sua capacidade de generalização (Jain e Mao, 1996).

O principal objectivo das RNA visa o desenvolvimento de algoritmos matemáticos que permitam desenvolver um processo de aprendizagem de forma a que elas aprendam a partir da informação processada, simulando deste modo a aquisição de conhecimento por parte do cérebro humano. Deste modo, as RNA são modelos empíricos por natureza, podendo, contudo, fornecer soluções bastante precisas quer para problemas simples, quer para fenómenos onde apenas existem dados e observações experimentais.

As RNA têm sido utilizadas na modelação de memória associativa, reconhecimento de padrões, representação de funções contínuas, previsão de séries temporais, etc. A sua área de intervenção é bastante genérica, podendo citar-se a título de exemplo:

- a física de alta energia;
- os processos industriais, robótica, indústria de defesa e aeroespacial;
- a indústria de telecomunicações, electrónica, automóvel, transportes e de prospecção petrolífera;
- a medicina e biomedicina;
- o reconhecimento de texto, imagem e voz;
- a economia, gestão, análise financeira e banca;
- os seguros.

Durante este capítulo são apresentadas algumas noções-base de introdução às redes neuronais artificiais versando diversos aspectos tais como a sua inspiração biológica, a sua classificação e apresentação de algumas das RNA mais utilizadas. Será dado um especial ênfase à aplicação das redes em problemas de regressão, em virtude de a sua aplicação ao longo deste trabalho incidir sobre este objectivo.

3.2. Inspiração biológica

Sendo o neurónio biológico a pedra basilar do sistema nervoso, a sua abordagem será feita tendo em atenção o funcionamento do neurónio artificial assim como a analogia existente entre as RNA e as cadeias biológicas.

3.2.1. Neurónio biológico

O sistema nervoso do ser humano é composto por biliões de neurónios de vários tipos e dimensões em função da sua localização no corpo (Schalkoff, 1997). Na figura 3.1

apresenta-se uma representação esquemática de um neurónio biológico simplificado onde se identificam três unidades funcionais principais: as dendrites, o corpo da célula (também designado por soma) e o axónio. As dendrites recebem sinais dos axónios de outros neurónios, encaminhando-os para o corpo da célula. O pequeno espaço (falha) entre o axónio de um neurónio e a dendrite de outro é chamado sinapse ou terminal sináptico. O corpo da célula, por sua vez, tem um núcleo que contém informação sobre características de hereditariedade e um plasma que armazena as estruturas moleculares necessárias para o funcionamento do neurónio (Jain e Mao, 1996). A área receptora total das dendrites de um neurónio típico é de cerca de $0,25 \text{ mm}^2$ (Zupan e Gasteiger, 1993). O axónio, que se ramifica de um modo colateral, recebe sinais do corpo da célula transmitindo-os para as dendrites de neurónios vizinhos.

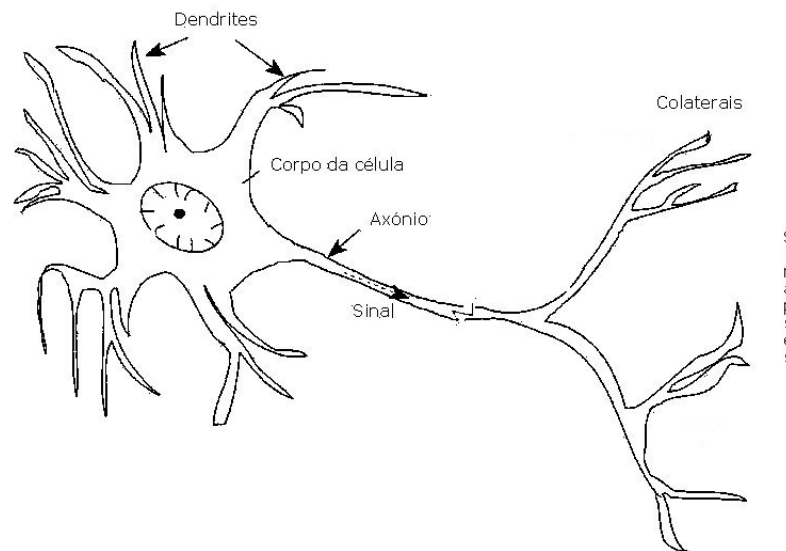


Figura 3.1 Esquema de um neurónio biológico

As diversas dendrites de um neurónio conduzem os impulsos para o corpo da célula. A função de um neurónio é integrar as diversas entradas recebidas, através das diversas sinapses, e gerar ou não, uma saída. Esta saída, que consiste numa tensão eléctrica, tem a duração aproximada de 1 milissegundo e $0,1 \text{ mV}$ de amplitude, sendo a sua velocidade de propagação de 120 ms^{-1} . Quando este sinal atinge a sinapse na cauda do axónio, o sinal eléctrico é convertido num sinal químico, que é, de imediato, transmitido para outro neurónio através da referida falha. Nos terminais sinápticos do neurónio receptor, o sinal químico é novamente convertido para um sinal eléctrico que viajará através da dendrite para o corpo da célula. Por outro lado, uma sinapse pode ser excitante ou inibitória. Se for excitante, aumenta o nível interno de activação do neurónio; se for inibitória, este nível é reduzido. Em termos de controlo, pode afirmar-se que os neurónios têm um controlo do tipo "on-off". Acima de um certo nível superior, o neurónio produz uma saída enquanto que abaixo de um nível inferior, não produz

qualquer saída. Perante elevados níveis de actividade, as saídas aumentam em frequência mas não em amplitude, existindo no entanto, uma frequência máxima a partir da qual a saída assume uma frequência constante. Uma ilustração esquemática do processo sináptico entre dois neurónios está representada na figura 3.2.

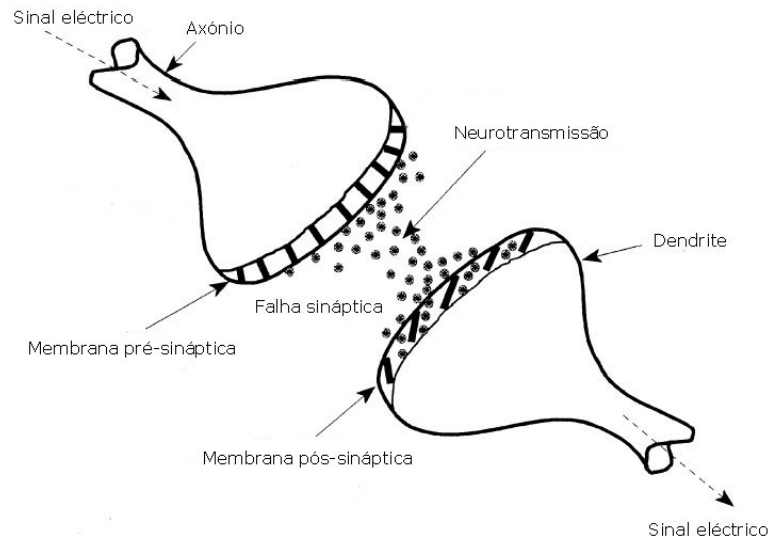


Figura 3.2 Mecanismo de transferência de sinal entre dois neurónios biológicos

A quantidade de sinal que atravessa um neurónio receptor depende da intensidade de emissão dos neurónios emissores, das suas forças de sinapse e do limite de activação do neurónio receptor. O facto de um neurónio ser composto por um elevado número de dendrites e sinapses, permite que o mesmo possa receber e transferir em simultâneo, uma diversidade de sinais.

Foi baseado nesta simplicidade do mecanismo de transferência de sinal entre neurónios que assentou a base fundamental de desenvolvimento da neurocomputação, do qual é exemplo a unidade de limite binária de McCulloch e Pitts (1943).

3.2.2. Analogia

A analogia entre o neurónio artificial e o neurónio biológico consiste no facto de as ligações entre nodos representarem as ligações entre os axónios e as dendrites, os pesos das ligações representarem as sinapses, e a função de activação representar a actividade no corpo da célula. Na figura 3.3, ilustram-se n neurónios biológicos com vários sinais de intensidade x e força sináptica w que alimentam um neurónio com um limite de activação b , bem como o respectivo sistema de neurónios artificial equivalente.

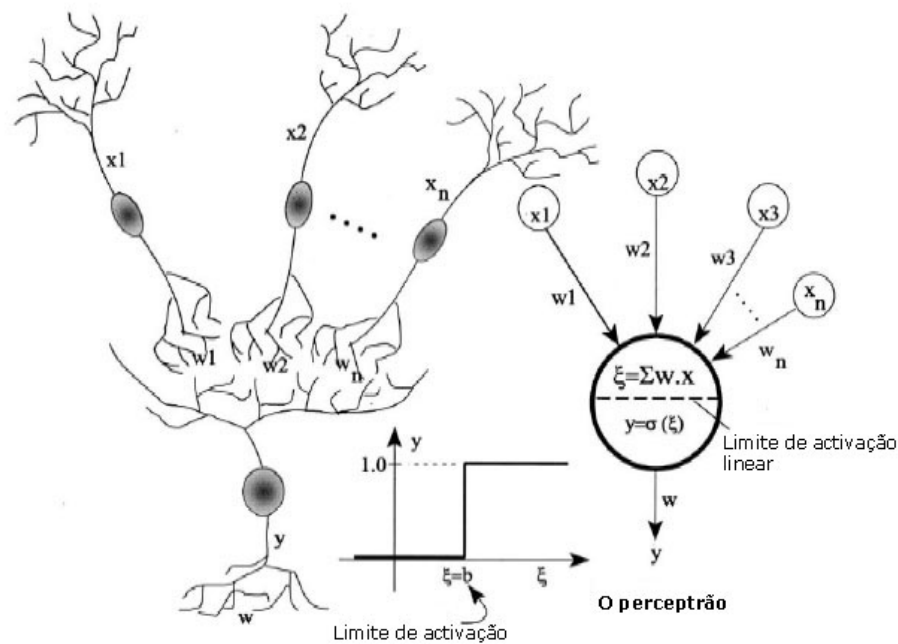


Figura 3.3 Analogia entre neurónio biológico e neurónio artificial

A aprendizagem da cadeia biológica tal como das RNA é feita através do ajuste dos pesos ou forças sinápticas. Um neurónio artificial computacional tenta modelar algumas destas características biológicas. Em termos de simulação, uma rede neuronal é constituída por unidades básicas de processamento, designadas por neurónios, que estão interligados entre si. Cada neurónio possui várias entradas a que estão associados pesos. Um somatório efectua a soma ponderada das entradas encontrando-se na saída do mesmo uma função de activação. As redes contêm vários neurónios ligados por forma a que as saídas de uns estão ligadas às entradas de outros.

3.2.3. Neurónio artificial

O neurónio de processo artificial recebe as entradas como sendo estímulos provenientes do ambiente, combinando-os de um modo especial, formando uma rede de entrada (ξ), que passando por um limite de activação linear, transmite o sinal (saída, y) para outro neurónio ou para o ambiente, tal como se representa na figura 3.3. Só quando ξ excede o limite de activação do neurónio (também designado de termo de polarização, b), é que a saída será activada. A rede de entrada consiste no somatório do produto interno dos sinais de entrada (x) e respectivos pesos (w). Para n sinais, a operação do neurónio é expressa por:

$$y = \begin{cases} 1, & \text{se } \sum_{i=1}^n w_i x_i \geq b, \\ 0, & \text{se } \sum_{i=1}^n w_i x_i < b, \end{cases} \quad (3.1)$$

Na equação anterior o valor unitário indica o estado 'on' enquanto o valor nulo indica o estado 'off', ou a classe A e B, respectivamente, na resolução de problemas de classificação. Os pesos positivos ($w_i > 0$) aumentam o sinal da rede (ξ) que vão excitar o neurónio, sendo a ligação neste caso, designada de excitante; por outro lado, caso os pesos sejam negativos, o valor de ξ vai diminuir inibindo a actividade do neurónio, sendo esta ligação designada de inibitória. O sistema descrito anteriormente e representado na figura 3.3 é designado de "Percepção" estabelecendo uma ligação entre os estímulos de entrada e o sinal de saída do neurónio. Na equação 3.1, o limite de activação do neurónio pode ser considerado como uma entrada adicional cujo valor é constante e unitário ($x=1$) sendo o seu peso de ligação, igual a b . Neste caso, o somatório indicado na equação 3.1 é efectuado de 1 a n , e o sinal da rede ξ é comparado com o limite de activação.

O limite de activação assim descrito é definido como sendo a função de activação binária unipolar. Existem diversas funções de activação, também designadas de funções de transferência, dependendo a sua escolha da aplicação em causa. Na tabela 3.1 apresentam-se, a título exemplificativo algumas funções de activação.

Função de activação	Equação	Representação gráfica
Binária unipolar	$\sigma(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$	
Linear	$\sigma(x) = x$	
Sigmoidal unipolar (função logística)	$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}$	

Tabela 3.1 Exemplos de funções de activação

3.2.4. Perceptrão

O perceptrão, apresentado na secção anterior, representa a rede neuronal mais simples, sendo utilizada para classificar padrões linearmente separáveis, consistindo num neurónio simples, com pesos ajustáveis e um termo de polarização, podendo ser treinado através de uma série de exemplos utilizando uma determinada regra de aprendizagem (Hecht-Nielsen, 1990). Os pesos do perceptrão (inclusive o limite de activação) podem ser alterados em função da diferença (erro) entre o objectivo (valor correcto), Y , e a solução obtida pelo perceptrão, y , para cada exemplo. O erro é uma função de todos os pesos e forma um hiperplano multidimensional complexo e irregular com diversos cumes e vales. Através de uma técnica de procura especializada, o processo de aprendizagem procura obter a combinação de pesos que correspondem ao valor de erro mínimo global. Rosenblatt (1962) obteve a regra de perceptrão que permite obter um vector óptimo de pesos num número finito de iterações, de um modo independente relativamente aos valores iniciais dos pesos. Contudo, esta regra só é aplicável a classes de dados linearmente separáveis (Hecht-Nielsen, 1990), nas quais um hiperplano linear pode colocar uma classe de dados de um lado do plano, e a outra classe de dados no outro.

As duas regiões do hiperplano do perceptrão são definidas pela seguinte expressão:

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i + b = 0 \quad (3.2)$$

Por forma a ultrapassar esta limitação, e para permitir a separação de dados não lineares, é necessário introduzir uma ou mais camadas adicionais entre a camada de entrada e o neurónio que gera a saída, gerando uma arquitectura de RNA designada de redes multi-camadas, que se encontra representada na figura 3.4. Devido ao facto destas camadas não terem contacto directo com o exterior, são vulgarmente designadas de camadas escondidas, sendo os seus nodos designados nodos escondidos. A utilização de camadas escondidas veio reavivar a utilização do perceptrão visto que através delas se tornou possível a resolução de problemas de classificação não lineares. O funcionamento do neurónio com camadas escondidas é semelhante ao anteriormente descrito, onde os neurónios escondidos processam a informação proveniente dos nodos de entrada passando-a para a camada de saída. Neste caso, o processo de aprendizagem não é tão simples como o do perceptrão simples. Por exemplo, a rede de retropropagação representa um tipo de rede multi-camada cuja aprendizagem é feita pela chamada regra delta (Zupan e Gasteiger, 1993). O processo de aprendizagem é no entanto, tal como

noutras redes, uma extensão do algoritmo de perceptrão simples para otimizar o valor dos pesos ligados aos nodos escondidos.

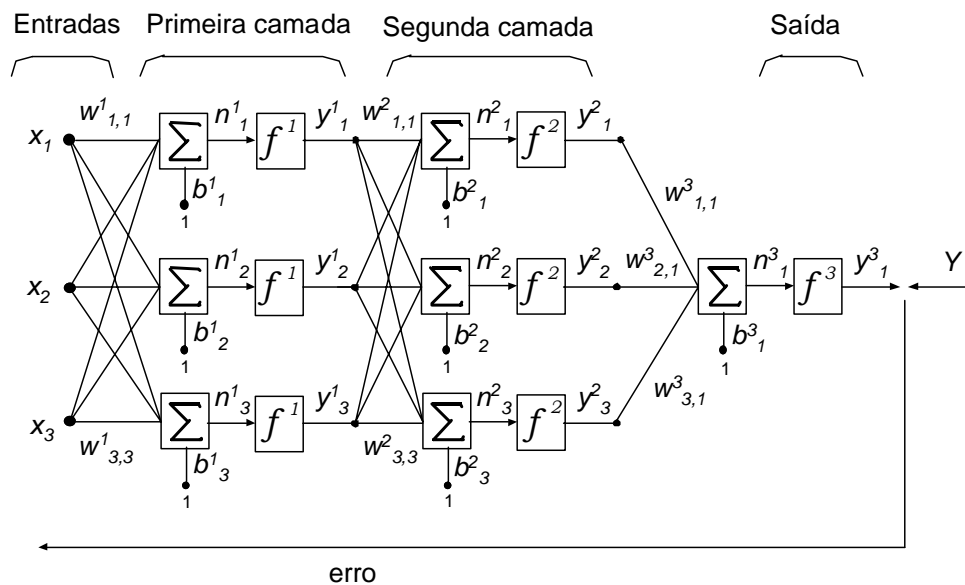


Figura 3.4 Rede neuronal artificial multi-camada

3.2.5. Comparação entre as redes neuronais naturais e artificiais

O córtex cerebral é a base da rede neuronal biológica e consiste numa fina camada de neurónios densamente interligados com uma área de cerca de 2200 cm² onde se estima existirem cerca de 10 biliões de neurónios e 60 triliões de sinapses. Cada neurónio está ligado a cerca de 1000 a 10000 outros neurónios (Schalkoff, 1997), executando cerca de 10¹⁴ a 10¹⁵ ligações sinápticas. Em contraste, as RNA, de uma forma genérica, são compostas por 10 a 10000 neurónios nas redes mais sofisticadas com uma densidade de ligações que varia entre cinco a cem ligações por neurónio (Wythoff, 1993). Relativamente ao seu modo de operação e à sua estrutura interna, as RNA são consideradas homogéneas e com um modo de operação determinístico enquanto que as redes do córtex humano são extremamente heterogéneas e têm um modo de operação bastante complexo. Um neurónio é cerca de cinco a seis vezes mais lento do que uma porta lógica de silício, todavia o cérebro ultrapassa esta lentidão através de uma estrutura maciçamente paralela, complexa e não linear.

A habilidade para aprender é uma característica peculiar dos sistemas inteligentes, biológicos e outros. Nos sistemas artificiais, a aprendizagem é vista como sendo o processo de actualização da representação interna do sistema em resposta aos estímulos externos de forma a executar uma tarefa específica. Isto inclui modificar a arquitectura

da rede através do ajuste dos valores dos pesos das ligações, eliminação ou criação de ligações entre nodos e alterações das funções de activação dos próprios nodos. As RNA aprendem através de um modo iterativo à medida que lhe vão sendo fornecidos exemplos de treino, num processo que se assemelha ao modo como o ser humano aprende através da experiência. Pode dizer-se que uma RNA aprendeu caso ela consiga manipular dados imprecisos sem que a qualidade da sua resposta seja notada e que consiga generalizar as tarefas que assimilou em situações desconhecidas.

3.3. Breve revisão histórica

Os progressos da psicofisiologia permitiram aos investigadores desenvolver modelos de neurónios para simularem o comportamento do cérebro. A história das redes neuronais remonta ao início dos anos 40 quando um dos primeiros modelos abstractos de um neurónio foi introduzido por McCulloch e Pitts (1943). Nas duas décadas seguintes, o estudo incidiu sobre as técnicas de aprendizagem de uma rede neuronal tendo sido desenvolvido o algoritmo de aprendizagem do perceptrão. Posteriormente, Widrow e Hoff desenvolveram uma importante variação deste algoritmo que ficou conhecido como regra Widrow-Hoff. Em 1969, Minsky e Papert, apontaram as limitações teóricas dos modelos de redes neuronais com uma camada, no seu livro "Perceptrons", no qual identificaram algumas simples tarefas, tais como a simples operação OU-exclusivo (*XOR*), que o perceptrão não era capaz de resolver. Esta visão pessimista determinou que a investigação sobre as redes neuronais ficasse eclipsada durante praticamente duas décadas.

Em 1986, Rumelhart, Hinton e Williams introduzem uma solução poderosa para o treino de uma rede de várias camadas que destronou os perceptrões e que ficou conhecida como o algoritmo de retropropagação ("backpropagation"). O sucesso desta abordagem ficou demonstrado pelo sistema "NETtalk" desenvolvido por Sejnowski e Rosenberg (1987) que convertia um texto escrito em inglês para voz de uma forma bastante perceptível. Porém, uma das grandes limitações iniciais das redes neuronais advinha do facto destas exigirem um grande poder computacional. Actualmente, tal facto foi minimizado faltando no entanto, ainda muito, para se poder simular uma rede da dimensão do cérebro humano.

Uma revisão histórica detalhada sobre redes neuronais pode ser encontrada em Anderson e Rosenfeld (1988), ou em Nelson e Illingworth (1991), entre outros.

3.4. Comparação entre as redes e a regressão linear múltipla

Apesar de existirem, entre as RNA e a estatística clássica muitas diferenças, o que é facto é que entre elas também existem muitas semelhanças (Hanson, 1995; Wythoff, 1993). Algumas RNA podem ser consideradas como generalizações de modelos estatísticos, enquanto outras são extremamente parecidas com modelos estatísticos existentes existindo outras ainda, que são totalmente distintas dos modelos estatísticos existentes (White, 1989).

Na regressão linear múltipla é obtida uma estimativa da variável dependente (Y) através de uma função do tipo $Y = f(A, X)$, onde X é um vector de variáveis independentes $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, A é o vector dos coeficientes da regressão $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$, e f é uma função obtida pela regressão linear e que relaciona X com Y . A regressão, baseada na minimização do erro quadrado de uma função linear, requer que a expressão matemática da equação de regressão e as variáveis independentes sejam conhecidas à priori, não existindo nenhuma garantia acerca da optimização do modelo obtido. Por seu lado, nas RNA a estimativa da variável independente é obtida por $Y = \sigma(W, X)$, onde W é o vector dos pesos das ligações e limites de activação da rede e σ é uma função complexa que representa a estrutura interna da rede neuronal artificial. A principal diferença entre estes dois modelos é que, nas regressões lineares múltiplas, f representa um conjunto de operadores lineares, enquanto que nas RNA a função σ representa uma combinação linear de várias funções não lineares, como sejam as funções sigmoidais. Rumelhart *et al.* (1996) e White (1990) referem-se às RNA como sendo uma regressão estatística não linear, e Werbos (1974) descreve a rede de retropropagação como sendo uma ferramenta superior à regressão tradicional. Muitos outros autores consideram as RNA como generalizações de regressão clássica ou como uma 'super regressão' (Wythoff, 1993), na qual a regressão efectuada pelas RNA é executada de um modo adaptativo utilizando leis de aprendizagem não lineares. Apesar de tudo, existe um consenso acerca da melhor performance das RNA comparativamente com a técnica tradicional de regressão linear múltipla (Masters, 1994; Sun *et al.*, 1997), sendo que esta característica torna-se sobretudo evidente com o aumento da dimensionalidade e da não linearidade do problema em análise.

Na aproximação polinomial existe uma limitação óbvia que consiste no facto de esta apenas poder ser utilizada para a previsão de uma única variável dependente enquanto que as RNA permitem operar com diversas variáveis dependentes (Specht, 1991).

A opção entre a utilização das RNA e a estatística clássica depende do problema em análise, no entanto para a modelação de dados que apresentem níveis de complexidade baixos ou para aproximação de funções simples, as técnicas clássicas devem ser

primeiramente utilizadas, só se devendo recorrer às RNA caso se pretendam níveis de precisão mais elevados. Em virtude deste entendimento não reunir consenso geral ao nível dos investigadores, recomenda-se a utilização de ambas as ferramentas para se fazer a comparação do desempenho de ambas.

3.5. Aplicações típicas

De um modo genérico, as RNA são ferramentas mais robustas apresentando melhores performances em diversas áreas de aplicação. As principais áreas de actuação onde estas se têm expandido e consolidado são:

- na classificação de padrões, que consiste na separação de classes de dados baseada em determinadas propriedades dos mesmos, utilizando uma aprendizagem através de exemplos (ver figura 3.5a). Ao contrário das análises estatísticas discriminativas, as RNA não necessitam de assumir um carácter linear entre as classes podendo ser aplicadas para separar classes não lineares (Garth *et al.*, 1996);
- no agrupamento de dados (“clustering”), obtido através de uma aprendizagem não supervisionada na qual os agrupamentos (classes) são formados através da exploração de semelhanças e antagonismos entre os padrões introduzidos baseando-se nas interligações existentes entre eles (ver figura 3.5b). A rede neuronal procura similaridades entre os dados para promover o seu agrupamento;
- na aproximação de funções (modelação) que envolve um processo de treino da RNA através de dados de entrada e respectivas saídas de modo a serem estabelecidas regras subjacentes às relações entre ambos (ver figura 3.5c). As RNA multi-camada são consideradas como aproximadores universais de qualquer função arbitrária para qualquer nível de precisão (Hecht-Nielsen, 1990). A aproximação de funções aplica-se a problemas onde não existe nenhum modelo teórico, sendo utilizados dados obtidos de experiências ou observações, ou para substituir modelos teóricos que são difíceis de calcular analiticamente, utilizando dados obtidos dessa modelação;
- na previsão de séries temporais, que inclui o treino de uma RNA através de amostras de uma série de dados temporais que caracterizam determinado fenómeno, por forma a que ela aprenda o seu comportamento e

desenvolva capacidade de previsão acerca do seu comportamento futuro (ver figura 3.5d);

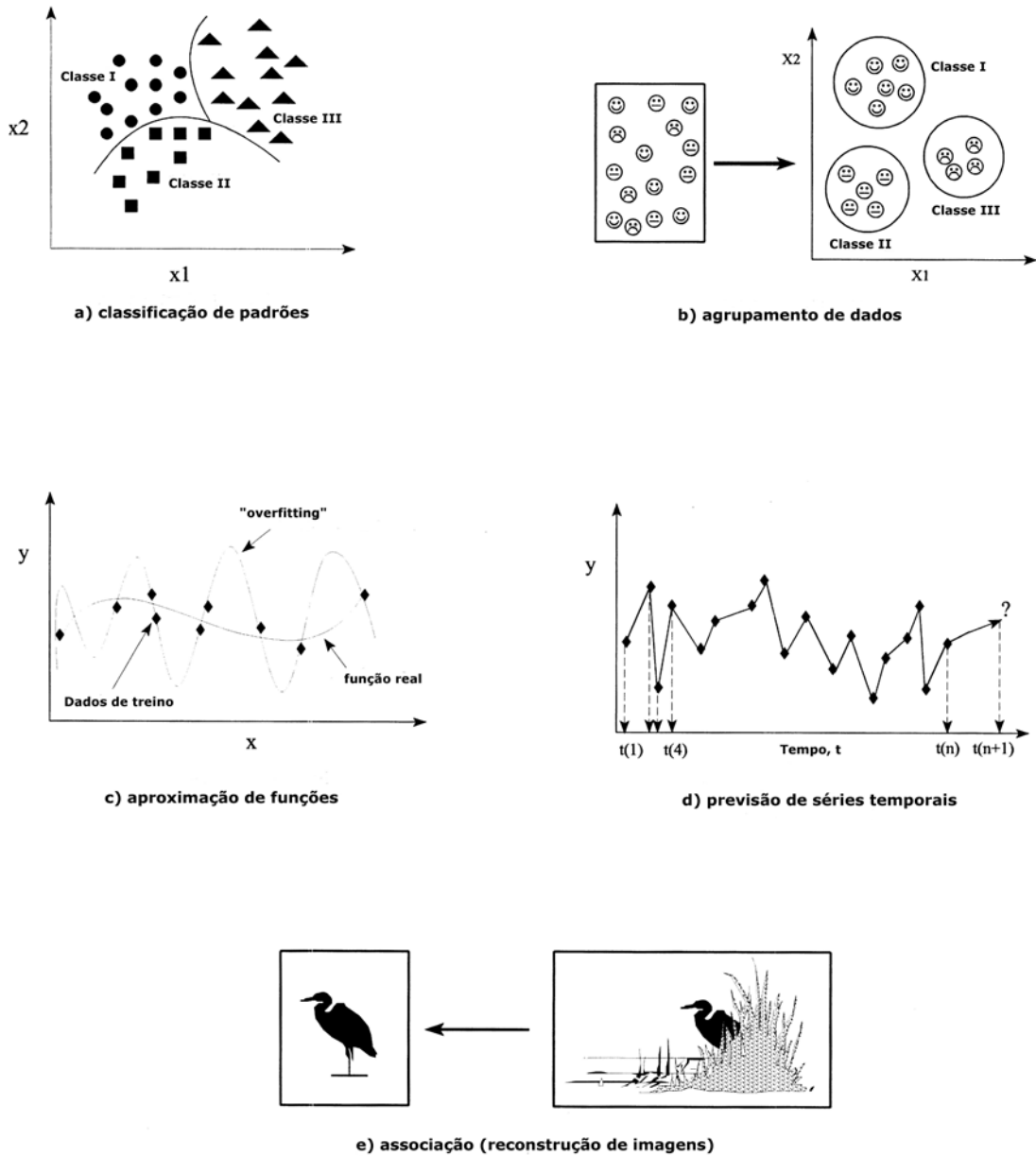


Figura 3.5 Exemplos de aplicações de RNA

- na otimização, ou seja na obtenção de uma solução que maximize ou minimize uma função objectiva submetida a determinados constrangimentos. Apesar da otimização de funções ser uma área bem consolidada em termos matemáticos, a utilização das RNA na otimização de problemas complexos e não lineares, tem apresentado melhores

resultados comparativamente aos obtidos através da abordagem tradicional (Pham, 1994);

- na associação, que envolve o desenvolvendo de uma RNA padrão treinada em dados com ruído para posteriormente utilizar essa rede para classificar dados corrompidos. A rede associativa pode também ser usada para reconstruir dados corrompidos ou dados completamente perdidos, como é exemplificado na figura 3.5e;
- na área do controlo, através do desenvolvimento de redes que actuem sobre o controlo automático de sistemas.

3.6. Classificação das redes

As redes neuronais artificiais podem ser classificadas de diversos modos de acordo com as suas características. De um modo geral, podem classificar-se as redes baseados nos seguintes critérios:

- na aplicação para a qual a mesma é construída, como por exemplo para o reconhecimento de padrões, aproximação de funções, etc;
- no nível de ligação existente entre os neurónios da rede (parcial/completo);
- na direcção do fluxo de informação dentro da rede (recorrente ou não recorrente), sendo as redes recorrentes sistemas dinâmicos nos quais o estado em qualquer momento é dependente dos estados prévios;
- no tipo de algoritmo de aprendizagem, que representa um conjunto de equações sistemáticas que utilizam as saídas da rede juntamente com uma medição arbitrária do seu desempenho para actualizar a estrutura interna da rede;
- na regra de aprendizagem;
- no grau de supervisão de aprendizagem necessário para treinar a rede. A aprendizagem supervisionada envolve o treino de uma RNA com as respostas correctas sendo determinado para todos os exemplos, e usando a divergência (erro) da solução da RNA para determinar a adaptação necessária a impor a cada peso. A aprendizagem com reforço crítico é supervisionada, sendo no entanto fornecida à rede em vez da resposta correcta uma saída indicativa. A aprendizagem sem supervisão não requer uma resposta correcta para os exemplos de treino, porém a rede, por exploração da estrutura subjacente aos dados estabelece a correlação

entre os vários exemplos, organizando-os em agrupamentos (categorias), baseados na existência ou não de semelhança entre eles (por exemplo, redes de Kohonen). Existem ainda os procedimentos de aprendizagem híbridos que combinam a aprendizagem com supervisão e sem supervisão.

3.7. Regras de aprendizagem

Uma regra de aprendizagem define o modo de como os pesos da rede são ajustados (actualizados) entre ciclos de treino sucessivos, sendo estes últimos designados por épocas. De acordo com Hassoun (1995) e Haykin (1999) existem quatro tipos básicos de regras de aprendizagem:

- a regra da correcção do erro, que é utilizada na aprendizagem supervisionada e na qual a diferença aritmética (erro) entre a solução da rede em qualquer fase (ciclo) durante o treino e a resposta correcta correspondente, é usada para modificar os pesos de ligação para reduzir o erro global da rede gradualmente;
- a regra de aprendizagem de Boltzmann, que é uma regra que deriva de princípios termodinâmicos e da teoria de sinal (Anderson e Rosenfeld, 1988), sendo semelhante à anterior, distingue-se da mesma em virtude de cada neurónio gerar uma saída (ou estado) baseado numa distribuição estatística de Boltzmann, o que implica um processo de aprendizagem mais lento;
- a regra de aprendizagem de Hebbian (Hebb, 1963), baseada em experiências de neurobiologia, é a regra de aprendizagem mais antiga, que afirma que “se os neurónios de dois lados de uma sinapse são activados de um modo síncrono e repetidamente, a força sináptica é incrementada de um modo progressivo”. Por esta regra, ao contrário das anteriores, a aprendizagem é feita através do ajuste dos pesos sinápticos com base na actividade dos neurónios;
- a regra da aprendizagem competitiva, onde todos os neurónios são forçados a competir entre eles de tal modo que só um neurónio será activado numa determinada iteração com todos os pesos inerentes ao seu ajuste.

3.8. Modelação de dados através de redes neuronais

De seguida, apresenta-se uma breve referência sobre algumas das RNA que são mais utilizadas em problemas de regressão:

- redes neuronais lineares: correspondem à implementação de um modelo linear básico, sendo constituídas pelas entradas, os pesos das ligações, o termo de activação e as saídas. A função de activação consiste na função linear;
- redes de retropropagação: também designadas vulgarmente de MLPs (“Multilayer Perceptrons”) são as redes mais populares e que apresentam elevados desempenhos em múltiplos domínios de aplicação. Uma rede MLP consiste numa camada de entrada de dados onde os nodos representam as variáveis do problema, numa camada de saída cujos nodos representam as variáveis dependentes, e numa ou mais camadas escondidas constituídas por diversos nodos por forma a obter a não linearidade contida nos dados. Através de um processo de aprendizagem supervisionado, estas redes apresentam uma capacidade bastante elevada de aprendizagem com possibilidade de generalização para dados desconhecidos. O termo de retropropagação diz respeito ao modo como o erro é calculado na camada de saída e qual o seu efeito nas camadas anteriores até à camada de entrada. Neste tipo de redes, os dados são alimentados de uma forma unidireccional e sem ligação entre os neurónios da mesma camada. Estas redes apresentam uma enorme versatilidade podendo ser utilizadas na modelação de dados (regressão), classificação, previsão de séries temporais, controlo, e reconhecimento de padrões (Hassoun, 1995);
- redes de base radial (RBF): estas redes representam um caso especial de uma MLP sendo constituídas por três camadas: a camada de entrada, uma camada escondida e a camada de saída. Podem ser treinadas por diversos algoritmos de aprendizagem incluindo até processos híbridos. A camada escondida é utilizada para promover o agrupamento de dados de entrada da rede. Ao contrário das MLPs que utilizam a função sigmoideal como função de activação, este tipo de redes utiliza uma função radial base do tipo gaussiana (Haykin, 1999). As redes RBF têm um período de aprendizagem inferior às MLPs convencionais, não sendo, no entanto, tão versáteis como estas últimas nem tão rápidas durante a sua utilização;

A decisão sobre qual das redes se deve utilizar depende do problema em análise, sendo certo que, sempre que se torne possível, devem experimentar-se diversos tipos de

modulação de dados, procurando obter a rede neuronal que melhor se adapta aos dados do fenómeno em análise.

3.9. Algoritmo de retropropagação

É o método mais utilizado para o treino de redes neuronais e enquadra-se na aprendizagem supervisionada. Normalmente é aplicado a redes com múltiplas camadas do tipo unidireccional, ou seja, onde existe propagação numa só direcção. É uma extensão do método apresentado por Widrow e Hoff (1960) para uma única camada de neurónios. Neste método, designada 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 da regra delta nenhum método eficiente para treino. Foi Werbos, em 1974, que desenvolveu bases teóricas para um método de cálculo de derivadas parciais ordenadas, que deu origem ao algoritmo de retropropagação apresentado por Rumelhart *et al.* (1986).

A ideia básica deste algoritmo é actualizar os pesos da última camada de acordo com a regra delta e para as outras camadas, indo propagando o erro para trás (da saída para a entrada) o que vai alterar os pesos de acordo com a influência destes na saída. Obtém-se uma superfície de erro, que representa o mesmo em função dos pesos da rede, utilizando-se como objectivo a descida de gradiente para procurar o erro mínimo. Apresentações mais simplistas ou detalhadas deste algoritmo podem ser encontradas, entre outros, em Zupan e Gasteiger (1993), Haykin (1999) e Basheer (1998).

3.10. Desenvolvimento de redes neuronais

O desenvolvimento de uma RNA genérica consiste num projecto que pode ser dividido em seis fases distintas:

Fase 1: definição do problema e sua formulação, com especial ênfase na análise das relações entre as variáveis de saída e de entrada. Devem ser avaliados quais os benefícios da aplicação de RNA relativamente a outras técnicas, caso estas existam, para o problema em causa;

Fase 2: desenvolvimento do sistema, sendo o primeiro passo a definição do tipo de RNA a ser projectada e a regra de aprendizagem adequada para o problema.

Esta fase também envolve a obtenção dos dados, o seu pré-processamento para os ajustar ao tipo de análise pretendida, a obtenção da sua estatística descritiva, bem como a divisão em três subconjuntos distintos: treino, teste e validação;

Fase 3: realização do sistema, o que envolve o treino da rede utilizando os dados de treino e subconjuntos de teste, sendo simultaneamente avaliado o desempenho do método através da análise do erro das saídas obtidas. Existem diversos parâmetros que podem variar na rede, tais como a dimensão, o método de aprendizagem, o número de épocas de treino, o erro aceitável, entre outros que afectam o desempenho final da rede;

Fase 4: verificação do sistema, pois apesar de, durante o desenvolvimento da rede, esta comparar os dados de treino e teste com os valores desejados, a posterior utilização de dados de validação da rede constitui uma boa prática, de modo a testar a sua capacidade de generalização. Nesta fase deve também ser feita a comparação com outras técnicas, se disponíveis, de modo a analisar as eventuais vantagens da rede neuronal;

Fase 5: implementação do sistema, que inclui a validação da rede e a sua execução, seja como controlador de hardware, ou como programa de computador;

Fase 6: manutenção do sistema, o que envolve uma actualização da rede desenvolvida caso existam dados novos, ao longo do tempo, que afectem as suas variáveis, implicando um novo ciclo de desenvolvimento.

Na descrição das diversas fases de desenvolvimento das redes neuronais artificiais, existem diversos itens que condicionam o nível de precisão da solução obtida, destacando-se os seguintes: o método de obtenção dos dados, a dimensão da amostra de dados, bem como a sua divisão (treino, teste e validação), as técnicas de pré-processamento dos dados, a normalização dos dados, o método de inicialização dos pesos, o critério de convergência definido, as funções de transferência a utilizar, o número de épocas limite definido, o método de aprendizagem, o número de nodos em cada camada escondida e o número de camadas escondidas. Em virtude do objectivo definido neste capítulo consistir numa abordagem introdutória sobre esta técnica de análise de dados, não será descrito o modo como cada um destes itens pode afectar o desempenho das RNA remetendo-se essa explicação para a diversa bibliografia citada ao longo do presente capítulo.

O desenvolvimento das redes neuronais artificiais pode ser efectuado através de diversas possibilidades, podendo optar-se por:

- utilizar software comercial, sendo os mais populares o SAS Enterprise Miner Software, o MATLAB Neural Network Toolbox, o STATISTICA Neural Networks e o Clementine;
- utilizar software gratuito de código aberto tal como o Stuttgart Neural Network Simulator (SNNS) cujo código fonte é em C, o Joone (Java Object Oriented Neural Engine), ou a ferramenta estatística designada de R;
- desenvolver uma rede própria no ambiente pretendido.

Face às múltiplas tarefas envolvidas nos objectivos definidos inicialmente, a última opção nunca seria uma alternativa viável em termos do limite temporal e do seu enquadramento no trabalho realizado, tendo-se optado inicialmente pela utilização do MATLAB Neural Network Toolbox e, posteriormente, pelo software STATISTICA Neural Networks. Esta ferramenta permite desenvolver diversos tipos de redes com diversos algoritmos de aprendizagem, bem como proceder à optimização dos diversos parâmetros já referidos, através da geração de inúmeras redes, podendo optar-se por reter aquelas que apresentam níveis de precisão mais elevados. Esta opção residiu no facto de as redes neuronais constituírem uma ferramenta de apoio na análise dos dados obtidos, não tendo sido o seu desenvolvimento, o objectivo principal do trabalho de doutoramento do autor.

Capítulo 4

MODELOS DE ERGONOMIA AMBIENTAL – ESTADO DA ARTE

4.1. Introdução

Neste capítulo vão ser apresentados os modelos de ergonomia ambiental relativos a cada um dos estímulos de desconforto considerados. Tal como referido, ao nível da ergonomia ambiental, são geralmente definidos três métodos de análise distintos, consoante a análise pretendida: saúde, conforto e desempenho do ser humano. Atendendo a que o trabalho versou sobre a análise do conforto em veículos pesados de transporte de passageiros, na descrição que se segue dos modelos de ergonomia ambiental, serão apenas apresentados os que dizem respeito à análise do conforto.

Para cada grandeza será feita uma breve descrição do sistema sensorial humano, onde se podem identificar alguns dos conceitos apresentados no capítulo três relativamente às redes neuronais biológicas, bem como as principais metodologias de medição e as correspondentes normas existentes.

A abordagem ao ruído será feita de um modo mais detalhado por forma a introduzir os conceitos relativos à qualidade do som que serão utilizados nos capítulos posteriores.

No final do texto relativo a cada grandeza física, apresenta-se uma breve súmula com exemplos de aplicação dos métodos descritos, com especial ênfase para a avaliação do conforto em veículos, não procurando porém ser um item exaustivo, pois o elevado número de publicações sobre cada uma das áreas tornaria essa missão extremamente complicada.

Para além das grandezas físicas consideradas de um modo individual, é apresentado no final do capítulo um resumo sobre algumas tentativas da sua integração como ambiente global.

4.2. Ambiente térmico

4.2.1. Balanço térmico

A fonte de energia do corpo humano baseia-se na oxidação dos alimentos ingeridos apresentando o corpo humano baixos valores de eficiência mecânica, entre cinco e dez por cento (Nishi, 1981). Assim sendo, a maior parte da energia produzida é convertida em energia térmica, sendo transmitida até à superfície cutânea por condução, entre os tecidos corporais, e por convecção, através da circulação sanguínea.

Na figura 4.1 representam-se os diversos fenómenos que contribuem para o balanço de energia entre o corpo humano e o ambiente que o rodeia. O balanço de energia para o corpo humano pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Q = M - W_m = C_{res} + E_{res} + E \pm K \pm C \pm R + S \quad (4.1)$$

Esta equação indica que o calor produzido internamente (Q), representado pela diferença entre a actividade metabólica (M) e o trabalho mecânico realizado (W_m), é igual às perdas de calor por convecção (C_{res}) e evaporação ao nível das vias respiratórias (E_{res}), acrescidas das perdas de calor por evaporação ao nível da pele (E), e das transferências de calor por condução (K), convecção (C) e radiação (R). O termo final da equação (S) representa o calor armazenado, que em condições de equilíbrio tem um valor nulo.

O sistema termo-regulador humano age nos diversos parâmetros indicados na equação anterior para manter a temperatura do corpo dentro de limites seguros, evitando problemas de saúde que podem resultar de hipertermia ou hipotermia. O centro regulador situa-se no hipotálamo que controla, em função do erro térmico, 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 °C para uma pessoa com elevada actividade). O erro térmico representa a diferença entre o valor de referência do centro termoregulador e uma temperatura calculada pelo mesmo em função das informações provenientes da temperatura profunda e da temperatura da pele. O processo de controlo mais utilizado é a mudança da taxa de

fluxo sanguíneo do interior do corpo para a zona cutânea, que é conseguida através da alteração da área de passagem do sangue e respectivo ajuste do batimento cardíaco.

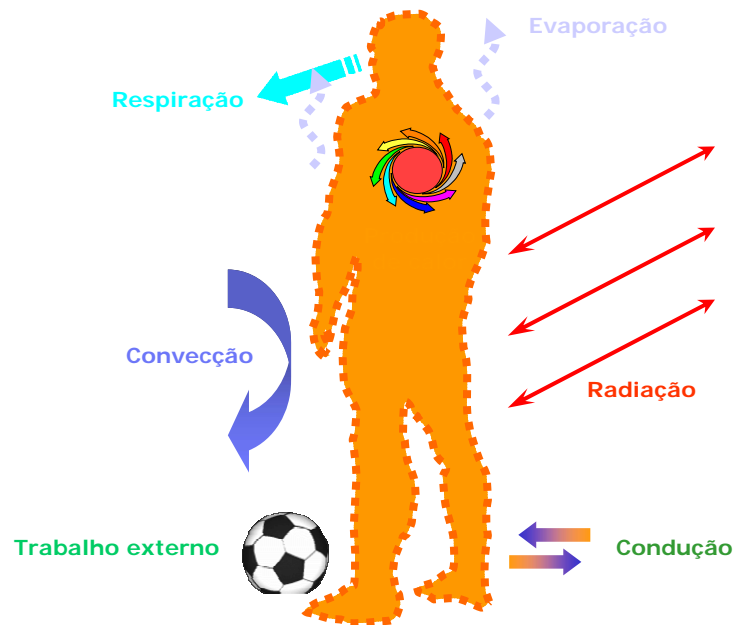


Figura 4.1 Balanço térmico do corpo humano

Por vezes a alteração do fluxo de sangue torna-se um mecanismo insuficiente para repor o equilíbrio térmico, sendo activados outros mecanismos auxiliares. Quando está frio, uma resposta é o tiritar involuntário, que é accionado por uma instrução do cérebro para incrementar a produção de calor através do nível metabólico. Em ambientes quentes, um mecanismo adicional é a sudação, que consiste no bombear de suor, pelas glândulas sudoríparas, para a superfície da pele onde este é evaporado, aumentando assim as perdas de calor do corpo para o ambiente.

Na figura 4.2 representam-se de forma esquemática os processos que o centro termoregulador pode desencadear para a correcção do erro térmico: a regulação comportamental e a regulação fisiológica.

Os receptores sensoriais sensíveis ao frio respondem a temperaturas inferiores a 17 °C, enviando informação do valor da temperatura para o sistema nervoso central sob a forma de impulsos eléctricos enquanto os receptores sensoriais sensíveis ao calor actuam de forma semelhante na resposta às temperaturas mais elevadas. Ambos os tipos de receptores estão localizados imediatamente abaixo da pele em pontos discretos e separados, apresentando um diâmetro de cerca de 1 milímetro. Na maior parte das áreas do corpo há três a dez vezes mais receptores de frio que receptores de calor, sendo o seu número, nas diferentes áreas do corpo, variável entre 15 a 25 receptores de frio por centímetro quadrado nos lábios, até 3 a 5 receptores de frio por centímetro

quadrado no dedo, a menos de 1 receptor por centímetro quadrado em algumas áreas amplas da superfície do tronco. De modo correspondente, há um número menor de receptores de calor.

Ambos os tipos de receptores, desigualmente distribuídos ao longo do corpo são sensíveis tanto ao nível de temperatura (resposta estática), como às variações de temperatura (resposta dinâmica), (Hensel, 1952 e Ring e Dear, 1991).

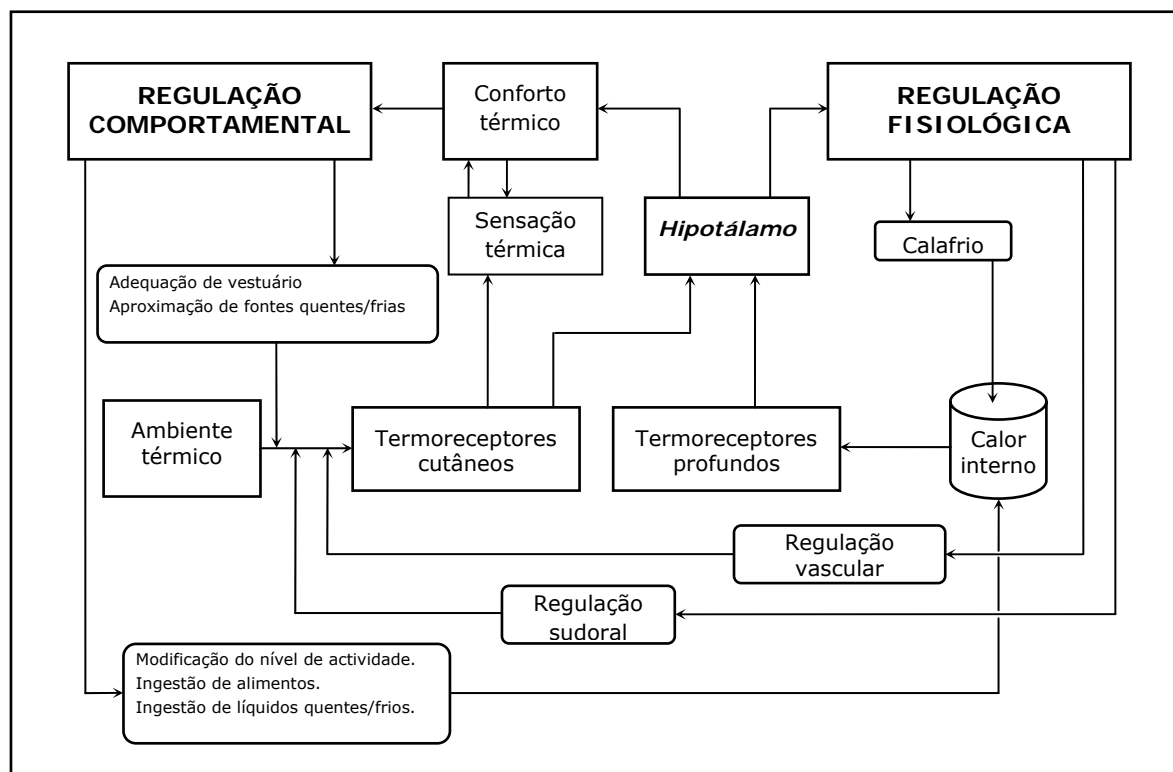


Figura 4.2 Esquema da termoregulação humana (adaptado de Mairiaux e Malchaire, 1990)

4.2.2. Índices e normas

O conceito de conforto térmico é definido pela "American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning" (ASHRAE 55-1992) e pela "International Organization for Standardization" (ISO 7730-2005) como sendo "o estado de espírito em que o indivíduo expressa satisfação em relação ao ambiente térmico".

O conforto térmico depende basicamente de seis parâmetros (ver figura 4.3), estando quatro deles relacionados com grandezas físicas ambientais: a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a velocidade média do ar e a humidade relativa; e, os

outros dois, relativos ao indivíduo: o nível metabólico e o isolamento térmico proporcionado pelo vestuário.

A temperatura do ar circundante ao corpo de um indivíduo influencia os processos de transferência de calor por convecção natural ou mista e, por evaporação.

A temperatura média radiante influencia a troca de calor sob forma de radiação entre uma pessoa e as superfícies que se encontram em seu redor. Se a temperatura média da superfície exterior do vestuário for superior à das superfícies circundantes, existirá um processo de perda de calor por radiação por parte do organismo, caso contrário haverá um ganho.

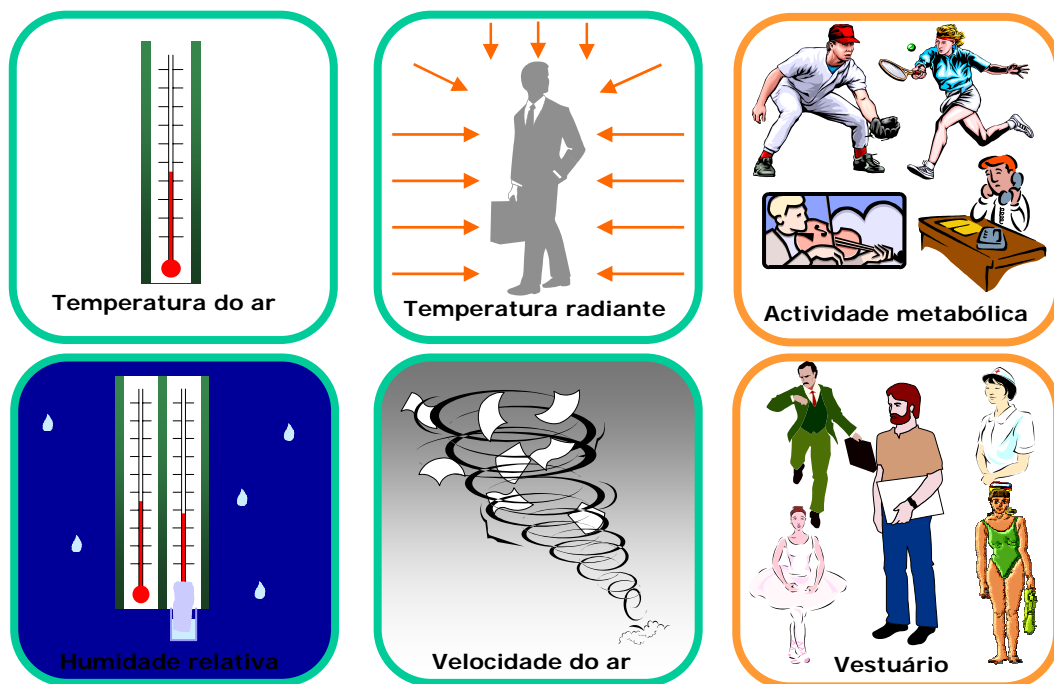


Figura 4.3 Parâmetros que influenciam o conforto térmico

A velocidade média do ar influencia os processos de perda de calor por parte do organismo, nomeadamente o processo de transferência de calor por convecção forçada, ou mista, e por evaporação.

A humidade relativa influencia os processos de perda de calor por evaporação. Em ambientes térmicos moderados e em situações de baixa actividade metabólica, a influência da humidade relativa é muito pequena.

O nível de actividade metabólica representa uma medida da produção interna de calor por parte do organismo de um ser humano. É normalmente quantificado numa unidade designada por "met", que deriva da palavra inglesa "metabolism". Um met corresponde a uma produção de 58,15 watts por metro quadrado de área de superfície do corpo humano ($1 \text{ met} = 58,15 \text{ Wm}^{-2}$). Uma pessoa adulta tem uma superfície corporal

média de 1,8 m² o que corresponde, quando está em repouso, a uma produção aproximada de 100 watts.

O último parâmetro que influencia o conforto térmico é o nível de vestuário, que funciona normalmente como uma resistência à perda de calor. A unidade de medida é o "clo", que deriva da palavra inglesa "clothing", sendo 1 clo = 0,155 m²°C/W. O valor da resistência sensível provocada pelo vestuário pode ser determinada pela combinação das diversas peças de roupa ou seja, a partir do somatório das respectivas resistências térmicas.

Devido ao elevado número de parâmetros que influenciam o conforto térmico, a sua avaliação numa dada situação ou ambiente torna-se difícil e complexa. Muitos esforços foram feitos para simplificar este processo, através da introdução de índices onde as influências de alguma ou de todas as variáveis acima mencionadas são consideradas. As primeiras tentativas consistiram na redução do ambiente real a um ambiente imaginário caracterizado apenas por um valor de temperatura.

Os diversos índices existentes para avaliar o efeito do ambiente térmico no ser humano, podem ser divididos em três classes: índices subjectivos, baseados nas respostas das pessoas para um ambiente através da utilização de escalas subjectivas; índices objectivos, baseados num valor numérico de um instrumento de medida que responde a factores ambientais que afectam a resposta térmica das pessoas; e, índices racionais ou comportamentais, derivados de modelos matemáticos que descrevem o comportamento do corpo humano em termos térmicos.

Um dos primeiros índices que surgiu, desenvolvido por Houghten e Yaglou (1923), e apresentado pela ASHRAE, foi a temperatura efectiva (*ET*) que representa uma medida do conforto térmico avaliado a partir das respostas subjectivas de indivíduos, envolvendo o efeito combinado da temperatura de bolbo seco, da temperatura de bolbo húmido e da velocidade média do ar. Mais tarde, Vernon (1932) apresentou o conceito de temperatura efectiva corrigida (*CET*) onde é incluída a influência da radiação térmica, a partir do valor da temperatura de globo, que é a temperatura medida por um termómetro de globo negro, em detrimento da temperatura de bolbo seco.

Outro conceito, apresentado por Gagge em 1937, foi a denominada temperatura operativa (*T_o*), que representa uma média ponderada da temperatura do ar e da temperatura média radiante em que os coeficientes de ponderação são os coeficientes de transferência dos respectivos processos de troca de calor:

$$T_o = \frac{h_c T_a + h_r T_r}{h_c + h_r} \quad (4.2)$$

onde h_c e h_r , representam respectivamente, o coeficiente de transferência de calor por convecção e por radiação. Este conceito integra os efeitos da temperatura do ar (T_a), da temperatura radiante (T_r) e, de forma indirecta, através do coeficiente de transmissão de calor por convecção, o efeito da velocidade do ar.

Em 1971, Gagge *et al.* indicaram uma nova fórmula para a temperatura efectiva como sendo a temperatura de um ambiente, com uma humidade relativa de 50% e que provoca a mesma perda de calor pela pele que se perderia no ambiente real. Esta temperatura efectiva é definida por:

$$ET^* = t_o + w i_m LR (p_a - 0,5 p_{ET^*,s}) \quad (4.3)$$

em que:

- t_o - temperatura operativa [°C]
- w - fracção de pele húmida
- i_m - índice de permeabilidade da humidade
- LR - relação de Lewis
- p_a - a pressão parcial do vapor [Pa]
- $p_{ET^*,s}$ - pressão de vapor saturado para o valor de ET^* [Pa]

Este índice é função da temperatura operativa (t_o), combinando o efeito da temperatura radiante (t_r), da temperatura do ar (t_a) e de forma indirecta o valor da velocidade do ar. O grau de humidade da pele w e o índice de permeabilidade i_m são específicos e apresentam um valor constante para uma dada linha de ET^* para uma situação particular.

A temperatura operativa húmida t_{oh} é definida como sendo a temperatura de um espaço fechado com uma humidade relativa de 100% na qual um indivíduo perde o mesmo calor que no ambiente real avaliado. O seu cálculo é muito parecido com o da temperatura efectiva, diferindo apenas no valor da humidade para o qual é calculada:

$$t_{oh} = t_o + w i_m LR (p_a - 0,5 p_{oh,s}) \quad (4.4)$$

Botsford (1971) apresentou outro índice designado por temperatura de bolbo húmido (WGT), que é obtido através do valor da temperatura no centro de um globo de cobre, de 2,5 polegadas de diâmetro, coberto por uma camada de tecido negro humedecido. Este valor é obtido após uma exposição deste equipamento no local a analisar de 10 a 15 minutos.

De forma a evitar a dependência do vestuário e do nível de actividade metabólica, Kohri *et al.* (1995) basearam-se no método da temperatura homogénea equivalente (*EHT*) obtida a partir de um manequim térmico (Matsunaga *et al.*, 1993) e o método de avaliação baseado no modelo de termoregulação matemático (Komoriya, 1992), introduzindo o conceito de temperatura efectiva padrão (*SET*). Esta temperatura é definida como sendo a temperatura do ar de um meio isotérmico com 50% de humidade relativa, no qual uma pessoa vestida com roupa padrão para a actividade em causa, tem a mesma actividade termoregulatória e térmica que no ambiente real considerado.

O conceito de temperatura equivalente (T_{eq}) utiliza de forma directa os efeitos da temperatura do ar, da temperatura radiante, da velocidade do ar (U) e, inclusivamente, do isolamento térmico devido ao vestuário (I_{cl}), existindo diversos métodos para a sua obtenção. Madsen *et al.* (1984) sugerem a sua obtenção através da seguinte expressão:

$$T_{eq} = 0,55 T_a + 0,45 T_r + \frac{0,24 - 0,75\sqrt{U}}{1 + I_{cl}} (36,5 - T_a) \quad (4.5)$$

Este é o índice mais utilizado para avaliação do habitáculo de veículos, sendo desde 1993 indicado pela norma SAE J2234. A norma ISO 14505-2, cujo texto final ainda não foi publicado, descreve o método de obtenção da temperatura equivalente em veículos.

Considera-se a temperatura equivalente como sendo a temperatura uniforme de um espaço imaginário, no qual a velocidade do ar é nula e em que um indivíduo trocaria com o meio a mesma quantidade de calor sensível que troca no ambiente considerado (ver figura 4.4).

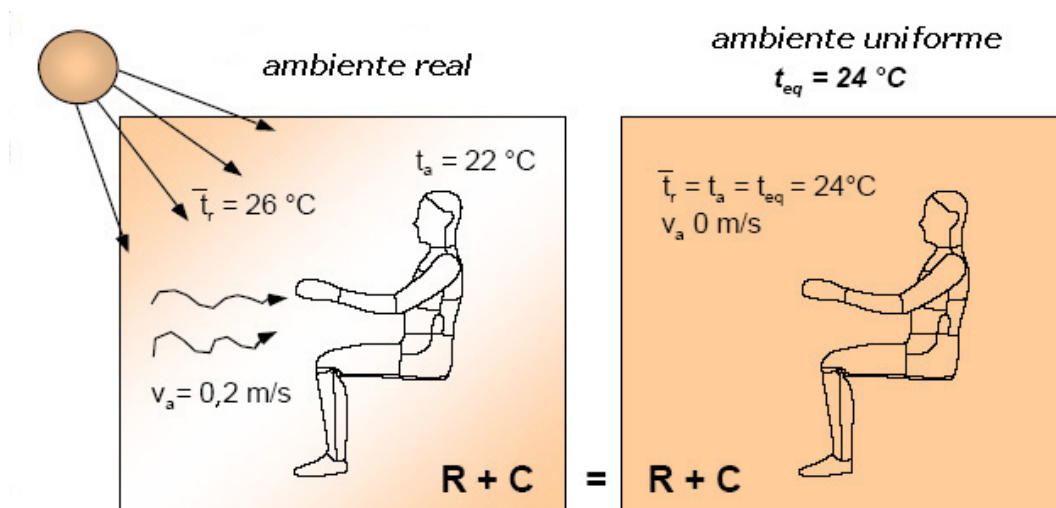


Figura 4.4 Ilustração do conceito de temperatura equivalente

Gagge *et al.* (1941) apresentaram uma escala de sete pontos que vai desde -3 (muito frio) a +3 (muito quente) para a avaliação de conforto em ambientes moderados. Fanger (1972) utilizou esta escala, desenvolvendo uma teoria que tem em conta os efeitos de todos os parâmetros em jogo, sendo a análise do ambiente feita através da utilização de dois índices: o *PMV* ("Predicted Mean Vote") e o *PPD* ("Previsible Percentage of Dissatisfied"). O valor de *PMV* corresponde à votação média previsível de um painel de pessoas relativamente à qualidade do ambiente térmico, na escala de Gagge. O valor do índice *PPD* varia de forma gaussiana (ver figura 4.5) com o valor de *PMV* e permite prever a percentagem de insatisfeitos num determinado ambiente. Devido às diferenças individuais, mesmo para uma condição de *PMV* igual a zero, correspondente à neutralidade térmica para a maior parte das pessoas, o índice *PPD* apresenta valores de 5%, o que significa que é impossível ter condições ambientais que agradem simultaneamente a todas as pessoas.

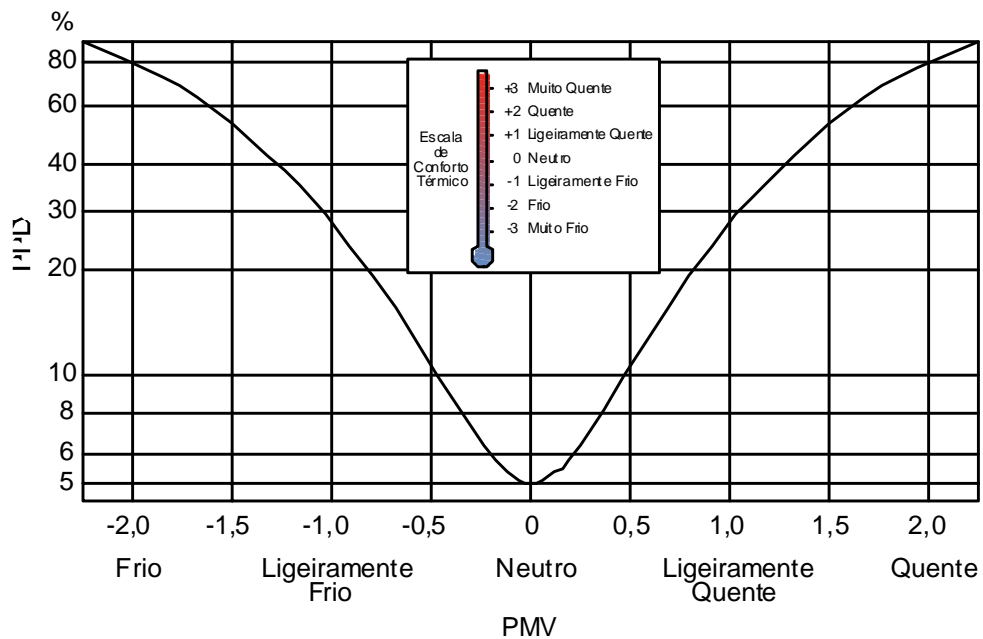


Figura 4.5 Escala de Fanger para o conforto térmico e relação entre os índices PMV e PPD

A metodologia de avaliação proposta permite, a partir da medição das várias grandezas físicas, calcular os índices de satisfação referidos, uma vez que foram obtidas expressões analíticas de correlação entre as avaliações subjectivas de painéis de avaliadores e os ambientes a que os mesmos foram sujeitos. A norma ISO 7730 utiliza este método de avaliação do conforto térmico, sendo o *PMV* e o *PPD* obtidos pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
PMV = & \left(0,303e^{-0,036M} + 0,028 \right) \left\{ (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \times \right. \\
& \times [5.733 - 6,99(M - W) - pa] - 0,42[(M - W) - 58,15] - \\
& - 1,7 \times 10^{-5}M(5.867 - pa) - 0,0014M(34 - Ta) - \\
& \left. - 3,96 \times 10^{-8}f_{cl} \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(T_{cl} - Ta) \right\}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-\left(0,03353 \times PMV^4 + 0,2179 \times PMV^2\right)} \tag{4.7}$$

onde:

$$\begin{aligned}
T_{cl} = & 35,7 - 0,028 (M - W) - I_{cl} \times \\
& \times \left\{ 3,96 \times 10^{-8}f_{cl} \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + \right. \\
& \left. + f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) \right\}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25} & \text{para } 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{U} \\ 12,1 \sqrt{U} & \text{para } 2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25} < 12,1\sqrt{U} \end{cases} \tag{4.9}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2\text{oCW}^{-1} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{oCW}^{-1} \end{cases} \tag{4.10}$$

em que:

- PMV - votação média previsível
- PPD - percentagem previsível de insatisfeitos
- M - nível metabólico [Wm^{-2}]
- W - trabalho exterior [Wm^{-2}]
- p_a - pressão parcial do vapor [Pa]
- T_a - temperatura média do ar [$^{\circ}\text{C}$]
- f_{cl} - relação entre a área do corpo vestida e a área despida
- T_{cl} - temperatura média da superfície do vestuário [$^{\circ}\text{C}$]
- T_r - temperatura média radiante [$^{\circ}\text{C}$]

- h_c - coeficiente de transmissão de calor por convecção [$\text{Wm}^{-2}\text{°C}^{-1}$]
 I_{cl} - resistência térmica do vestuário [$\text{m}^2\text{°CW}^{-1}$]
 U - velocidade média do ar [ms^{-1}]

A norma ISO 7730 (2005) recomenda a utilização do índice *PMV* para valores de *PMV* compreendidos entre -2 e +2 e para os seguintes intervalos dos parâmetros em análise:

- M = 46 a 232 Wm^{-2} (0,8 a 4,0 met)
 I_{cl} = 0 a 0,31 $\text{m}^2\text{°CW}^{-1}$ (0 a 2 clo)
 T_a = 10 a 30 °C
 T_r = 10 a 40 °C
 U = 0 a 1 ms^{-1}
 p_a = 0 a 2.700 Pa
 HR = 30 a 70 %

A referida norma considera o ambiente confortável, se o valor de *PMV* estiver compreendido entre os valores de -0,5 a +0,5, o que implica um valor de *PPD* < 10% e, estabelece como nível aceitável para a 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), o valor de 3 °C para uma pessoa sentada e com uma actividade sedentária.

Refinações posteriores do método de Fanger consistiram na consideração dos efeitos das componentes flutuantes da velocidade do ar e da temperatura. Assim, Melikov (1988) introduziu a noção de desconforto local, utilizada para calcular a percentagem de pessoas insatisfeitas devido aos resfriamentos provocados por correntes de ar. Os factores considerados no cálculo são aos valores médios temporais da temperatura e da velocidade do ar e a componente flutuante desta última, a intensidade de turbulência. Mais recentemente, Madsen e Popiolek (1994) passaram a considerar também o efeito da componente flutuante da temperatura.

Dear e Brager (1998) desenvolveram um modelo adaptativo de conforto térmico em edifícios nos quais a temperatura de conforto é variável em função de ajustamentos comportamentais, fisiológicos e psicológicos.

4.2.3. Métodos de medição

O habitáculo de um veículo representa um caso muito particular de análise ambiental relativamente ao ambiente térmico em virtude das circunstâncias climáticas

externas terem uma variabilidade temporal e local muito elevada, da área envidraçada ser muito importante, da taxa da ocupação por volume e por área ser bastante elevada, da quantidade do material isolante ser limitado por limitações do peso, e das elevadas assimetrias que apresentam a velocidade do ar, a temperatura de ar, e a temperatura radiante.

As particularidades indicadas são variáveis relativamente ao tipo de veículo considerado, pois, pese embora serem comuns a todos eles, o efeito de cada uma é distinto consoante seja um veículo ligeiro, um autocarro, um comboio ou um avião, entre outros. No entanto, e desde há alguns anos que os fabricantes de veículos, tendo conhecimento da influência do ambiente térmico na saúde, segurança, conforto e desempenho dos seus utilizadores procuram otimizar essas mesmas particularidades. Tal como descrito por Mackie *et al.* (1974), Norin e Wyon (1992), as condições climatéricas podem ter um forte impacto no desempenho do ser humano, diminuindo a sua habilidade e a sua concentração.

Os diferentes métodos de avaliação do ambiente térmico dentro dos veículos podem dividir-se entre sensores individuais, sensores aquecidos, manequins térmicos e medições subjectivas.

4.2.3.1. Sensores individuais

Na utilização de sensores individuais, para avaliar o conforto térmico no habitáculo de um veículo, 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 na norma ISO 7726 (1985).

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 termoresistências. Na medição da temperatura do ar deve ter-se em atenção o efeito da radiação, por forma a que esta influencie o menos possível a sua medição.

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 efectuar a sua medição é através de um termómetro de globo negro, que consiste numa esfera de cobre oca, normalmente com um diâmetro de 150 mm revestida por uma camada de tinta preta e com um sensor de temperatura localizado no centro da mesma.

Detalhes sobre a sua medição, através da utilização de um termómetro de globo negro, podem ser consultados em Silva (2002). Madsen *et al.* (1984) sugerem que a camada de tinta preta provoca uma sobrevalorização da absorção de radiação relativamente ao corpo humano, sugerindo alternativamente a utilização de um sensor elipsoidal pintado de cor cinzenta. Outro método experimental para a sua obtenção consiste na medição dos seis valores da temperatura radiante plana. A temperatura média radiante pode também ser calculada por métodos analíticos, a partir do conhecimento de todas as temperaturas das superfícies vizinhas e utilizando os factores de forma, sendo este um meio menos expedito para a sua obtenção.

A velocidade do ar representa a variável com o maior grau de dificuldade na sua medição, em virtude de apresentar características vectoriais, bem como elevadas flutuações no seu valor em amplitude. Dos vários métodos disponíveis para a sua medição, a anemometria de fio quente e a velocimetria laser de efeito Doppler são os mais adequados, tendo em conta o campo de medida e o tipo de escoamento que normalmente caracteriza os ambientes próximos das zonas de conforto. A velocimetria laser de efeito Doppler, atendendo à sua complexidade, é normalmente utilizada como um método de referência e pouco vezes utilizada em medições. Klemp *et al.* (1991), Castellini *et al.* (1996), Zemsch (1999) e Conceição *et al.* (1998), são alguns exemplos de trabalhos onde se apresenta a aplicação destas técnicas na obtenção do campo de velocidades no interior de habitáculos.

4.2.3.2. Sensores aquecidos

Quando se pretendem medir todos os parâmetros físicos que influenciam o conforto térmico através da medição individual de cada um deles, a tarefa torna-se complexa e pouco prática, pois implica a utilização de bastante instrumentação. Quando o ambiente em causa é o habitáculo de um veículo, esta complexidade fica acrescida em virtude da portabilidade necessária e da necessária adequação dos instrumentos dentro do mesmo. Outra desvantagem, ao optar-se por este tipo de medição, é o facto de não ser fisicamente possível colocar todos os instrumentos no mesmo ponto de medição, implicando assim uma perda de precisão.

Neste contexto, Madsen (1971) desenvolveu o primeiro medidor de conforto térmico (ver figura 4.6) utilizando um só sensor que determina, não só a temperatura equivalente do ambiente em causa, como também os valores de *PPD* e *PMV*, a partir da potência eléctrica que é necessário fornecer a um corpo, com a forma de um elipsóide, para que ele mantenha uma dada temperatura. O sensor é aquecido à temperatura

externa da roupa da pessoa que está a simular, e responde ao efeito combinado da temperatura do ar, da temperatura média radiante, e da velocidade do ar. Por forma a ter em conta o efeito da humidade do ar, o operador tem que introduzir o valor da pressão de vapor do local analisado, bem como o nível metabólico e a quantidade de vestuário dos hipotéticos ocupantes para se obter os índices *PMV* e *PPD*. No capítulo cinco, o princípio de funcionamento deste sensor será abordado de forma mais detalhada por ter sido o método de medição utilizado nas medições experimentais realizadas nos autocarros.



Figura 4.6 Medidor de conforto térmico

Palazetti *et al.* (1993) patentearam uma adaptação deste princípio de medição especialmente concebida para utilização no habitáculo de veículos automóveis ligeiros, em que o elemento sensor tem uma forma que permite a sua instalação nos cintos de segurança. Este tipo de sensor seria utilizado como elemento de recolha de informação para o controlo dos sistemas de climatização montados a bordo dos veículos.

Mingrino (1995) indicou um processo que utiliza como variável de controlo o valor da temperatura equivalente, em vez dos sistemas até agora utilizados que usam os valores da temperatura do ar. Uma outra inovação foi proposta por Freiburger (1995), consistindo na utilização de um sensor de temperatura de infravermelhos colocado de forma a ter um campo de visão que abarca praticamente todo o espaço do habitáculo integrando, dessa forma, a informação sobre todos os vários corpos no interior do veículo.

Schwab e Mayer (1989) desenvolveram um sensor de superfície plano, para simular o comportamento da pele humana. Este trabalho é baseado na correlação existente entre a temperatura equivalente e a temperatura superficial da pele quando aquecida por um fluxo de calor constante.

Madsen *et al.* (1992) desenvolveram outro tipo de sensor, designado por medidor de desconforto local que consiste num fino elemento aquecido dos dois lados. A diferença entre os fluxos de calor dos dois lados opostos representam a assimetria térmica entre o lado ocupado pela pessoa simulada e o ambiente circunvizinho. O valor de uma quantidade chamada "fluxo de calor perceptível" que representa a sensação de desconforto térmico local, é calculada por um microprocessador incluído no sistema de medida.

4.2.3.3. Manequins térmicos

A análise térmica dos passageiros no interior de habitáculos de veículos tem evoluído no sentido da utilização de manequins térmicos, normalmente divididos em várias secções, que permitem uma recolha de informação mais completa e detalhada acerca dos efeitos térmicos dos ambientes. A sua utilização garante uma simulação mais realística de vários factores que devem ser tidos em conta, como sejam: os aspectos anatómicos, o constrangimento físico imposto ao escoamento, a influência dos assentos nas trocas de calor e a não uniformidade das diversas partes do corpo relativamente à exposição solar. Estes manequins são já utilizados por muitos construtores de diversos tipos de veículos.

Muitos dos manequins actualmente disponíveis apenas conseguem simular as perdas de calor sensíveis, devido à dificuldade que existe em construir e operar um manequim que simule a transpiração existindo, também, alguns que simulam a respiração. No entanto, tal facto, não pode ser considerado como um factor limitativo para a utilização desta técnica de medição pois, ao pretenderem-se climas moderados, não se verifica transpiração por parte das pessoas.

Segundo Wyon *et al.* (1989) os primeiros manequins térmicos desenvolvidos tinham como objectivos fins militares tendo sido desenvolvidos nos Estados Unidos da América. Foram construídos em cobre, apresentando uma postura rígida, sem secções independentes e não tinham mecanismos de regulação da sua temperatura superficial. Desde o final da Segunda Guerra Mundial, assistiu-se a uma grande evolução deste tipo de instrumento de medida, existindo actualmente diversos tipos de manequins que se podem classificar quanto à sua postura, número de partes do corpo, modo de controlo e tipo de utilização (Martinho, 2002).

O seu princípio de funcionamento baseia-se num sistema de aquecimento de resistências eléctricas 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. Eles são feitos de forma similar aos manequins que são utilizados nas vitrinas das lojas, cuja construção é feita a partir de resina ou plástico, apresentando assim uma capacidade térmica moderada, 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 para os manequins usados hoje em dia.

Existem diversos modos de controlo para operar os manequins. No projecto europeu de investigação, designado de EQUIV (1999), efectuou-se uma comparação entre os diversos modelos de controlo, que são: de fluxo de calor constante, de acordo com a equação de conforto e através de uma regulação da temperatura superficial constante.

No primeiro método, de fluxo de calor constante, pode impor-se o mesmo valor para todas as secções ou seleccionar valores distintos de fluxo de calor para cada uma das partes do manequim. Este método apresenta como principais vantagens a sua estabilidade e a sua utilização em situações transitórias, em virtude de não ser necessária nenhuma adaptação ao processo de controlo. As suas desvantagens residem no facto dos valores das temperaturas equivalentes indicados pelo manequim apresentarem valores distintos dos reais, bem como o tempo de resposta do mesmo que apresenta valores elevados quando comparado com o processo real de termoregulação humano.

Em 1976, Madsen desenvolveu o primeiro manequim baseado no modo de controlo de equação de conforto. A temperatura da pele deste manequim é regulada de acordo com uma expressão adaptada da equação de conforto de Fanger, dada por:

$$t_{pele} = 35,7 - 0,028 Q_t \quad (4.11)$$

Na expressão 4.11, o termo Q_t representa a perda de calor total do corpo humano.

Em virtude deste manequim térmico não simular as perdas de calor latentes, que ocorrem através do processo de transpiração e respiração, a equação teve de ser adaptada. Assim, assumindo uma pressão de vapor de 1,5 kPa, correspondendo a um ambiente com um temperatura do ar de 24 °C e uma humidade relativa de 50%, obteve-se a seguinte equação, onde Q_s representa o calor perdido:

$$t_{pele} = 36,4 - 0,054 Q_s \quad (4.12)$$

Este modo de controlo permite obter uma simulação da resposta do corpo humano mais realística, ajustando a temperatura de pele em função das condições ambientais e

do vestuário em cada parte do corpo. As principais desvantagens deste método são: o tempo de resposta que apresenta em situações transitórias, e a transferência de calor interna entre as diferentes secções do manequim em virtude de estas terem temperaturas diferentes.

Nos manequins Voltman e Aiman (Holmer, 1992 e Wyon *et al.*, 1985), foi utilizado o método de temperatura superficial constante. Neste método, a superfície externa do manequim é mantida a uma temperatura constante de cerca de 34 °C. A sua principal vantagem é o menor tempo de resposta que apresenta, sendo no entanto, algo instável em virtude do seu processo de regulação.

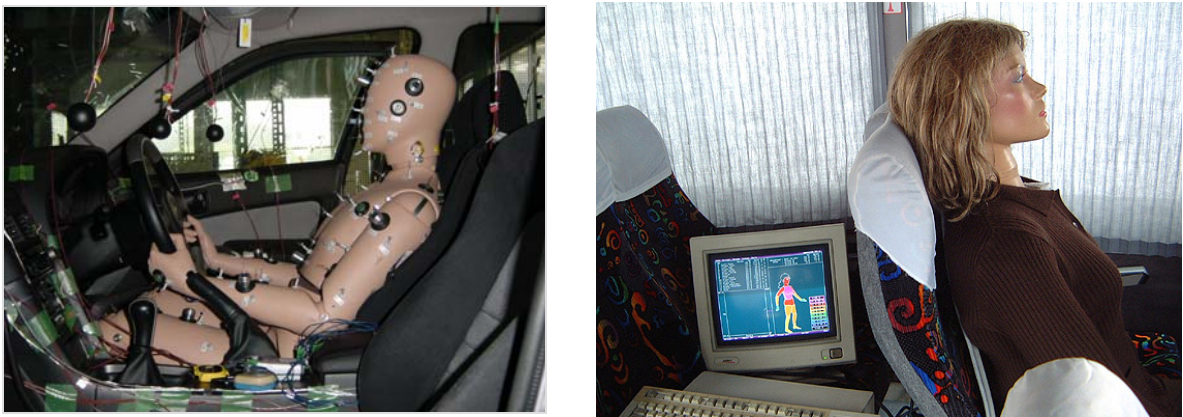


Figura 4.7 Manequins térmicos utilizados no interior de veículos

Os manequins térmicos são previamente calibrados em câmaras climatéricas onde são expostos a ambientes uniformes com os correspondentes valores de temperatura equivalente, utilizando a seguinte expressão para obter o valor da temperatura equivalente de cada secção i :

$$t_{eqi} = t_{pelei} - \frac{Q_i}{h_{cali}} \quad (4.13)$$

Durante a calibração e de acordo com a expressão 4.13, obtêm-se os valores do coeficiente de transferência de calor global para cada uma das secções do manequim a partir dos valores dos fluxos de calor e das temperaturas da pele medidas pelo manequim, conhecido o valor da temperatura equivalente imposta. Estes coeficientes serão posteriormente utilizados durante as medições experimentais efectuadas para se obter a temperatura equivalente de cada secção com base nas leituras da temperatura de pele e do fluxo de calor de cada secção.

Wyon *et al.* (1989) e Holmer *et al.* (1995), baseados no valor da temperatura equivalente de cada secção dos manequins térmicos, desenvolveram o perfil ideal de

temperaturas equivalentes para as diferentes partes do corpo humano através de métodos experimentais com painéis de avaliadores executados dentro de uma câmara climatérica. Obtiveram-se perfis distintos consoante o nível de actividade, para a situação de condução do veículo ou de passageiro, e para condições de Verão e de Inverno. Na figura 4.8 apresentam-se os perfis ideais bem como os desvios padrões associados às respectivas zonas de conforto.

Uma descrição detalhada sobre as diversas teorias e métodos de medição, do conforto térmico, através do recurso a manequins térmicos pode ser consultada em Nilsson (2004).

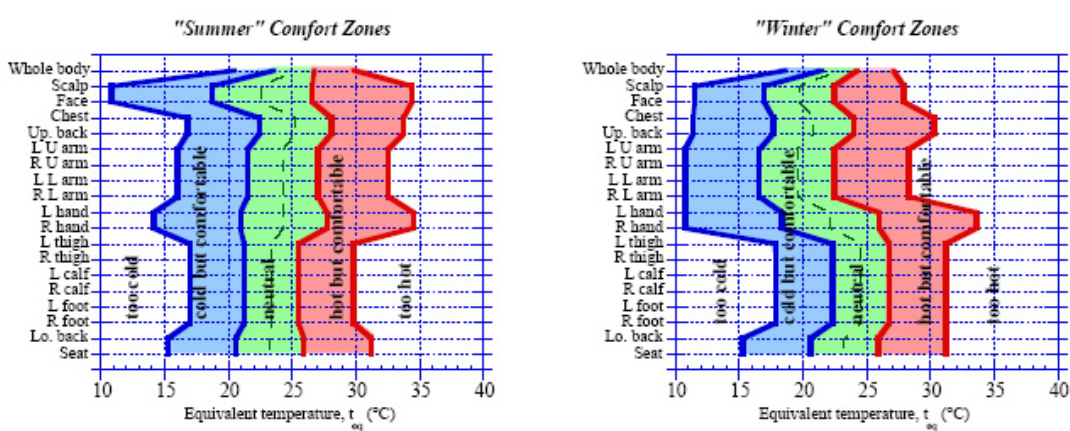


Figura 4.8 Perfis ideais de temperatura equivalente (adaptado de Nilsson, 2004)

4.2.3.4. Medições subjectivas

Durante diversas décadas, diferentes metodologias de avaliação subjectivas foram sendo utilizadas por diversos investigadores para caracterizar a resposta do ser humano relativamente ao ambiente térmico.

Em Junho de 2006, foi publicada a norma ISO 14505-3 que indica e especifica um método de teste para a análise, através da utilização de painéis de avaliadores, do conforto térmico em veículos. O método pode ser usado para determinar uma medida do desempenho de um veículo para condições de interesse, em termos da obtenção de situações de conforto térmico para as pessoas, podendo ser utilizado durante o desenvolvimento de um veículo ou simplesmente para proceder à sua avaliação.

A publicação desta norma representou um dos objectivos do já referido projecto europeu EQUIV, levado a cabo a partir da cooperação entre grupos de investigadores e a indústria.

A metodologia indicada pode ser aplicável a todos os tipos de veículos, desde veículos ligeiros, autocarros, camiões, veículos todo-o-terreno, comboios, aviões, navios, submarinos, entre outros espaços semelhantes.

A análise pode ser feita quer do ponto de vista dos passageiros, quer do ponto de vista dos condutores dos veículos, visto a sua aplicação não interferir com a operação segura do veículo.

A utilização desta norma tem como objectivo:

- avaliar o conforto térmico em veículos;
- estabelecer métodos de avaliação normalizados relativamente ao conforto térmico em veículos;
- comparar medições subjectivas de conforto térmico em veículos com métodos de previsão objectivos (modelos, índices);
- obter relações entre medições objectivas de conforto térmico tais como sejam as temperaturas de pele, com medições subjectivas de conforto térmico.

A norma é constituída por diversos anexos, sendo apresentado no anexo B, a título exemplificativo, um modelo de questionário para proceder à avaliação subjectiva do conforto térmico no interior de veículos, enquanto que no anexo A é indicada uma metodologia de avaliação do conforto térmico no interior de veículos bem como os critérios para determinar se o mesmo pode ser considerado confortável. São indicados vários critérios em função da escala de avaliação utilizada. No caso da escala de sete pontos, que pode ser convertida no valor de *PPD*, o critério para definir que um veículo é desconfortável sob o ponto de vista térmico é: apresentar um valor médio das respostas de *PPD* superior a 26,1%, a que corresponde um valor de *PMV* compreendido entre -1 e +1, e/ou que 37,5% das pessoas inquiridas indiquem um valor de *PPD* superior a 76,8% ($+2 < PMV < -2$). De modo a que seja possível adoptar este critério de avaliação, a norma indica a necessidade de se obter pelo menos a avaliação subjectiva de oito passageiros relativamente ao ambiente em questão. Este critério de avaliação será aplicado no capítulo seis relativamente aos veículos e percursos efectuados.

4.2.4. Aplicação em veículos

De entre todos os estímulos, o aspecto térmico foi, tal como sucedeu na área de edifícios, o estímulo que apresentou uma maior expansão ao nível da ergonomia ambiental. Trata-se de um dos mais importantes factores que afecta o conforto global das pessoas no interior dos veículos. A análise do conforto térmico em veículos é mais

complicada do que nos edifícios, em virtude das situações transitórias a que o ambiente no seu interior está sujeito. Estas situações conduzem a um aquecimento ou arrefecimento do habitáculo, sendo ocasionadas sobretudo pela influência, não uniforme, da radiação solar, da temperatura exterior e dos sistemas de ar condicionado.

Rholes e Wallis (1979) reportam um resumo de uma série de testes que tiveram lugar entre 1973 e 1977 envolvendo mais de três mil pessoas, com o objectivo de determinar os factores que contribuem para o conforto térmico dos passageiros de automóveis ligeiros, durante a utilização do ar condicionado em situações típicas de Verão. Os ensaios foram realizados numa câmara climatérica, onde os factores postos em evidência, como contribuindo para a avaliação do conforto humano, foram o caudal de ar proveniente do equipamento do ar condicionado, a temperatura e a localização do passageiro no veículo. Considerou-se que o tamanho das entradas de ar não influencia o conforto térmico. Uma sugestão destes autores é a de que os ensaios em condições reais de funcionamento são fundamentais para a evolução desta área de investigação.

Madsen *et al.* (1986) efectuaram uma série de ensaios simulando condições de Verão e de Inverno num túnel de vento climatérico com a finalidade de estudar três modos de avaliar o conforto térmico no habitáculo. Os métodos utilizados foram: sensores de temperatura do ar nos pés e na cabeça; sensores de conforto térmico que medem a temperatura equivalente em três posições (pés, abdómen, cabeça); e um manequim térmico que mede a temperatura equivalente e o fluxo de calor perdido pelo corpo humano em dezasseis partes diferentes do manequim, dispostos conforme indica a figura 4.9.

A grandeza utilizada por Madsen, para caracterizar o ambiente em questão, foi a temperatura equivalente. A conclusão final foi a de que o sensor de conforto humano tem como limitação o facto de apenas ter em conta um determinado ponto em análise, enquanto que o manequim dá uma melhor relação com todo o corpo. Os sensores de temperatura do ar, representados na figura 4.9 pela letra "A", revelaram-se como sendo a pior opção, pois estes efectuam a leitura de apenas um dos seis parâmetros que influenciam o conforto humano.

Olesen (1987), colaborador no trabalho anteriormente descrito, fez um novo ensaio com os sensores de conforto térmico para situações termicamente uniformes e de transição. O problema de medição em poucos pontos, quando comparado com um manequim térmico, foi resolvido através da introdução de mais sensores de conforto térmico. Assim, consoante o grau de resolução que se pretenda, Olesen sugere a utilização de vários sensores de acordo com a figura 4.10 onde o problema da área de exposição de uma pessoa é resolvido.

Com a configuração indicada na figura é igualmente possível atribuir valores diferentes do isolamento do vestuário para a situação que se pretenda analisar, assim como a utilização de um esqueleto como suporte dos sensores permite fazer uma leitura mais correcta acerca do campo de velocidades do ar e do efeito da radiação solar.

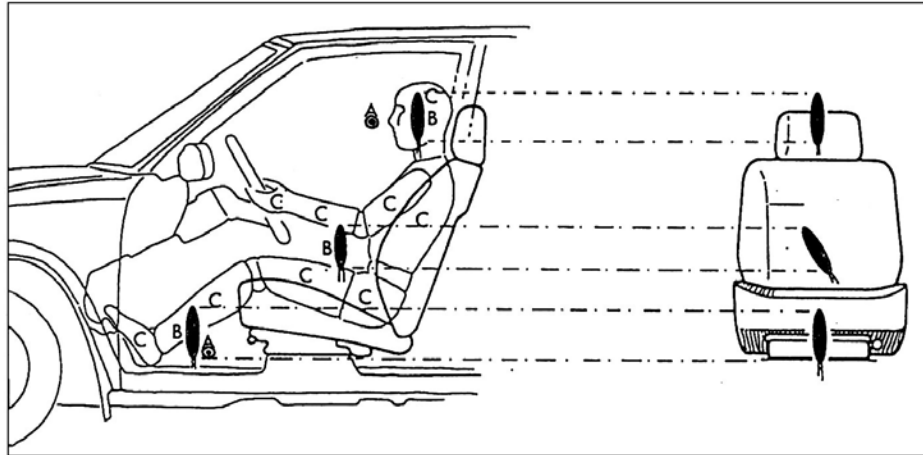


Figura 4.9 Posição dos três sistemas de medição no habitáculo do veículo: A) sensores de temperatura; B) sensores de conforto térmico; C) diferentes segmentos do manequim térmico (adaptado de Madsen *et al.*, 1986)

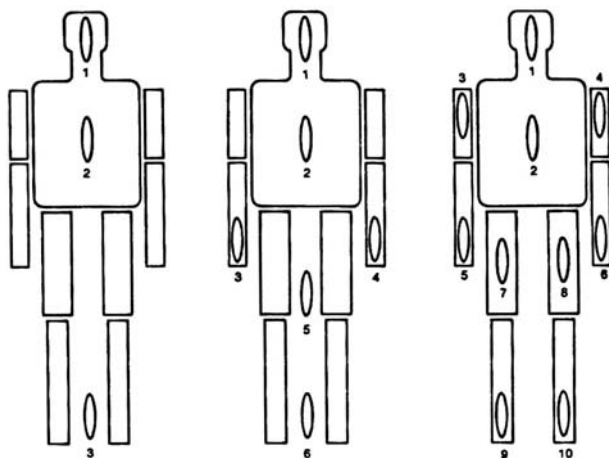


Figura 4.10 Distribuição dos sensores de conforto térmico em veículos (adaptado de Olesen, 1987)

Tanabe *et al.* (1990) efectuaram uma experiência semelhante à anteriormente descrita acrescentando, porém, respostas subjectivas de quarenta e cinco participantes. Tal como no trabalho de Olesen, o ensaio decorreu numa câmara climatérica e o parâmetro utilizado para descrever o conforto térmico foi a temperatura equivalente obtida através de três sensores de conforto térmico idênticos aos utilizados por Olesen. A comparação entre os valores de *PMV* calculados e os valores subjectivos apresentou uma boa correlação.

Holmér *et al.* (1992, 1995) utilizaram um manequim térmico para avaliar o conforto térmico no interior do habitáculo de camiões. Efectuaram medições do fluxo de calor de cada um dos segmentos constituintes do manequim e compararam esses valores com as respostas subjectivas de indivíduos sujeitos a situações idênticas. Obtiveram boas correlações entre o fluxo de calor de cada segmento e o voto térmico médio das pessoas em relação aos mesmos segmentos do corpo humano. Estes fluxos de calor podem ser convertidos, através de uma calibração feita em ambiente controlado, numa temperatura equivalente homogénea (*THE*). Através de uma regressão entre os votos térmicos médios em valores de *THE*, definiram os intervalos de temperaturas correspondentes a situações de conforto para dezanove segmentos do corpo humano. Sugerem a utilização destes manequins térmicos por permitir uma análise mais realística, prática e com melhor resolução nas medições objectivas em veículos.

Os ensaios das condições ambientais no interior de veículos recorrendo a manequins têm-se popularizado devido à boa performance conseguida. Assim, são vários os ensaios realizados com estes manequins (Wyon *et al.* (1989), Sudo *et al.* (1993), Kohri *et al.* (1995)) em diversos tipos de veículos. O ensaio realizado por Conceição (1996) tem a particularidade de ter utilizado um manequim térmico num módulo laboratorial de um veículo pesado de passageiros.

Pachiaudi *et al.* (1992) realizaram, com o apoio da Renault, um estudo acerca do conforto térmico em veículos ligeiros. Nesta análise é chamada a atenção para as limitações que o modelo do *PMV* de Fanger tem aquando da sua aplicação em veículos, nomeadamente o facto de as condições num habitáculo por vezes variarem de forma muito rápida e, no que diz respeito ao conforto térmico, a expectativa dos seres humanos ser diferente numa sala ou num veículo. A experiência levada a cabo por Pachiaudi consistiu em viagens típicas em estradas normais no Inverno e no Verão, efectuadas por quinze pessoas com idades entre os vinte e dois e os cinquenta e dois anos. No interior do habitáculo, as condições ambientais eram seleccionadas pelo condutor durante uma parte da viagem e impostas por um operador o resto do tempo, sem o condutor saber. Durante todas as quarenta e cinco viagens efectuadas, tendo sido realizadas trinta no Inverno e quinze no Verão, com uma duração aproximada de duas horas, a temperatura foi medida em sete pontos em torno dos assentos da frente. Os dados subjectivos eram recolhidos, de quinze em quinze minutos, através de um questionário que era apresentado aos condutores e que consistia em quatro questões:

- 1ª estimação global da temperatura e avaliação da sensação térmica na escala de sete pontos de Fanger;
- 2ª a existência de gradientes térmicos;
- 3ª a expectativa de mais ou menos calor;

4ª efeitos diversos tais como: arrepios, transpiração, etc.

As principais conclusões a que Pachiaudi chegou foram as seguintes:

- em cerca de 80 % dos casos, a utilização da temperatura do ar entre 16 °C e 31 °C no Inverno e entre 17,5 °C e 32,5 °C no Verão, conduz a situações de conforto térmico dos passageiros;
- o intervalo de temperaturas, para o qual foi expresso um conforto global e uma escolha de sensação térmica neutra ($PMV = 0$) foi, na maioria das situações, de 22 °C e 26 °C;
- as zonas mais sensíveis em termos de desconforto térmico são as pernas e a cabeça;
- enquanto que em recintos fechados em edifícios é imposto o critério de um gradiente entre a cabeça e os pés inferior a 3 °C, no habitáculo de veículos tal imposição não é um factor determinante na avaliação do conforto térmico.

Della Rolle *et al.* (1992) efectuaram um estudo no Verão de 1991 com a colaboração de 100 proprietários de carros com ar condicionado. O objectivo foi o de melhorar as metodologias para a avaliação do conforto térmico nos veículos, obtendo informação acerca do modo como o ar condicionado é utilizado pelas pessoas na sua vida quotidiana. Os aspectos que se revelaram de maior importância na avaliação do estado climatérico do habitáculo por parte das pessoas inquiridas, foi o ruído emitido pelos sistemas de ventilação, a distribuição do escoamento do ar no interior do veículo e as situações de transição térmica.

Grivel *et al.* (1992) efectuaram uma análise com o objectivo de relacionar as sensações subjectivas das pessoas com a temperatura ambiente e a temperatura da superfície da pele. Os testes foram realizados numa câmara climatérica com ambiente homogéneo. Segundo estes autores, a caracterização de situações uniformes obtidas em câmaras climatéricas pode funcionar como condição padrão, para analisar situações térmicas semelhantes que ocorram nos veículos.

Olesen (1992) fez uma aplicação da ISO 7730 aos veículos, para condições de regime uniforme, onde estabeleceu as seguintes condições:

- o nível de actividade nos veículos varia entre 1,2 e 1,6 met;
- o isolamento proporcionado pelo vestuário situa-se entre 0,3 e 1,5 clo, mais 0,2 clo adicionais para contabilizar o efeito do assento, tendo em conta que cerca de 20 % da superfície do corpo está em contacto com o mesmo;
- a pressão parcial de vapor situa-se entre 0,8 e 1,8 kPa. Os valores mais baixos obtidos são no Inverno e situam-se entre 30 a 70 % de humidade

relativa para uma temperatura de 22 °C, sendo a influência da humidade muito pouco significativa para condições de regime permanente;

- para se obter um $PMV = 0$ e para 0,5 clo, correspondente a 0,7 clo devido ao assento, condução em auto-estrada, e 1,2 met no Verão, a temperatura equivalente deve ser de 23 °C; no Inverno, sendo o nível de actividade idêntico e para 1,5 clo a temperatura equivalente deve ser de 18 °C.

Em relação às condições de desconforto térmico local, Olesen indica que o diferencial de temperatura do ar entre o nível da cabeça e o dos pés deve ser inferior a 3 °C, que as assimetrias radiantes verticais para superfícies frias devem ser inferiores a 14 °C e, para superfícies quentes, devem ser inferiores a 23 °C. O índice de resfriamento, calculado de acordo com a ISO 7730 deve ser inferior a 15 % de insatisfeitos. Efectuada a análise das condições em regime transitório, verifica-se que nas situações perto da neutralidade ($PMV = 0$) existe uma certa histerese na resposta dos indivíduos em relação às condições de neutralidade. Durante o período de transição, os valores indicados não são válidos sendo o objectivo principal a obtenção o mais depressa possível das condições de neutralidade. O parâmetro recomendado por Olesen para caracterizar o conforto térmico no interior dos veículos é a temperatura equivalente, sugerindo a necessidade de serem realizados mais testes no interior de veículos, quer em condições de transição, quer em regime permanente, tendo sempre em atenção que é fundamental fazer uma comparação das leituras efectuadas com as respostas subjectivas dos passageiros.

Paumier *et al.* (2001) verificaram uma boa correlação entre valores de temperatura equivalente medidos, especialmente por um manequim térmico, e avaliações subjectivas de indivíduos sujeitos, permanentemente, a uma aplicação de difusão suave do ar no habitáculo. Esta aplicação consistiu na introdução de ar no habitáculo através de uma grande área do painel frontal do mesmo. Desta forma foi melhorada a homogeneidade do escoamento em cada assento e em torno do corpo permitindo assim evitar resfriamentos na cara, não homogeneidade nos valores da temperatura em volta do corpo, diferenças de conforto entre os assentos frontais e traseiros e assimetrias significativas no clima do habitáculo.

Hosni *et al.* (2003) apresentaram um sistema de medição desenvolvido especificamente com o intuito de avaliar o conforto térmico no interior de veículos para situações de regime permanente e transitórias, designado de Stickman, que permite avaliar as quatro grandezas físicas que afectam o conforto térmico no interior dos mesmos. Apesar de algumas vantagens enumeradas pelos autores, o manequim desenvolvido não apresenta a configuração física do ser humano nem a simulação do metabolismo e inerente libertação de calor por parte do mesmo para o ambiente.

Mola *et al.* (2004), efectuaram uma análise comparativa entre medições objectivas através do recurso a um manequim térmico comparando as suas medições ao nível da temperatura equivalente com as respostas subjectivas de passageiros, tendo obtido um nível de correlação entre as grandezas subjectivas e objectivas de 89%.

Do já citado programa EQUIV, com a finalidade de desenvolverem uma norma internacional sobre métodos e medição da temperatura equivalente no interior dos veículos foram, até à data, publicados diversos artigos relativos a medições da temperatura equivalente, através de diversos métodos da sua obtenção com medições subjectivas em diversos tipos de veículos; a título exemplificativo, pode citar-se o trabalho de Cisternino (1999), Nilsson *et al.* (1999), Schwab *et al.* (1999), Nilsson *et al.* (2000) e Rosendahl e Olesen (2006). Uma importante conclusão do projecto EQUIV foi o de ter reconhecido o índice da temperatura equivalente como sendo o parâmetro mais relevante da medida do conforto térmico em habitáculos de veículos (Holmer *et al.*, 1999). Neste projecto, os manequins térmicos foram considerados o instrumento “padrão” a partir do qual os verdadeiros valores de temperatura equivalente medidos devem ser usados para comparação com outros métodos de medição.

Os trabalhos descritos anteriormente versaram-se sobretudo os veículos ligeiros pois, fruto da sua popularidade e quantidade de produção, foram estes que inicialmente concentraram a atenção da comunidade científica. Hoje em dia, as outras áreas dos transportes, com especial incidência na indústria aeronáutica e ferroviária têm sido objecto de diversas análises, existindo inúmeros textos científicos publicados relativos quer à avaliação objectiva quer à avaliação subjectiva bem como, às relações entre ambas.

Relativamente aos veículos pesados de transporte de passageiros encontram-se na bibliografia, alguns trabalhos sobretudo ao nível da optimização do funcionamento de equipamentos de climatização e ventilação; exemplo disso, é o trabalho reportado por Chang e Kim (1993) que faz uma aplicação de mecânica dos fluidos computacional na análise do ar condicionado instalado na parte dianteira inferior de um autocarro, comparando os valores numéricos obtidos com as velocidades do escoamento à saída das grelhas de insuflação do ar no interior do habitáculo; outra aplicação semelhante foi apresentada por Seong-Kook *et al.* (1998) através do desenvolvimento de um algoritmo de controlo automático para o ar condicionado ao nível da temperatura, humidade e qualidade do ar, instalado no tecto dos autocarros da marca Hyundai. Não foi, no entanto, encontrada nenhuma bibliografia específica sobre avaliações subjectivas bem como correlações entre respostas objectivas e subjectivas neste tipo de veículos.

4.3. Vibrações

4.3.1. Sistema sensorial humano

No capítulo dois foram referidos diversos receptores sensoriais que se podem agrupar nos seguintes tipos:

- mecanorreceptores, sensíveis à energia mecânica que detectam a deformação mecânica do receptor ou dos tecidos adjacentes ao receptor;
- termorreceptores, sensíveis ao calor e ao frio que detectam alterações da temperatura, uns detectando o frio e outros o calor;
- nociceptores, receptores de dor, sensíveis aos danos nos tecidos. Uma intensa estimulação de qualquer receptor também é percebida como dor que detecta a presença de lesão física ou química do receptor ou do tecido que imediatamente o circunda;
- fotoreceptores, que respondem a estímulos no comprimento de onda de luz visível, designados de receptores electromagnéticos que detectam a luz que atinge a retina;
- quimiorreceptores, sensíveis a elementos químicos específicos e que são os responsáveis pela gustação, olfacto, e pelos níveis de oxigénio e CO₂ no sangue;
- osmorreceptores, que detectam alterações na concentração dos solutos existentes nos fluidos corporais bem como as alterações resultantes da actividade osmótica.

Os receptores sensoriais sensíveis às vibrações no corpo humano são:

- os mecanorreceptores cutâneos situados principalmente nos músculos e tendões;
- os receptores situados no ouvido humano, ligados ao sistema auditivo;
- e, os receptores visuais.

Existem diversos tipos de receptores sensitivos tácteis que são sensíveis a diferentes frequências de vibração.

A sensibilidade somática é composta por todo o tipo de modalidades sensoriais que permitem a um organismo situar-se no espaço que o envolve, e definir a sua posição nesse mesmo espaço. Os mecanismos nervosos que recolhem informação sensitiva do corpo são designados de sentidos somáticos e são classificados em três tipos fisiológicos diferentes: sentidos somáticos mecanoreceptivos, estimulados por deslocamento mecânico de alguns tecidos do corpo; sentidos termoreceptivos, que detectam calor e

frio; e o sentido da dor, que é activado por qualquer factor que lese esses tecidos (Guyton e Hall, 1986).

Os sentidos mecanorreceptores, incluem os sentidos do tacto, pressão e vibração (sentidos tácteis). As modalidades sensoriais conduzidas pelos sistemas sensoriais somáticos incluem o tacto discriminativo (precisamente localizado), o tacto grosseiro (mal localizado), a pressão e a vibração, e os sentidos da posição estática do corpo e do movimento deste.

Embora o tacto, a pressão e a vibração sejam, frequentemente classificados como sensações distintas, estas são detectadas pela mesma classe de receptores tácteis: os mecanorreceptores. Há pelo menos seis tipos de mecanorreceptores classificados como receptores tácteis, a saber:

- terminações nervosas livres: apresentam uma densidade variável nas diversas áreas da pele, inclusive na córnea do olho, podendo detectar tacto e pressão;
- corpúsculo de Meissner: é um receptor táctil, o qual possui uma terminação nervosa encapsulada, que excita uma grande fibra nervosa sensitiva mielinizada. No interior da cápsula existem muitas circunvalações de filamentos nervosos terminais. Estes receptores são responsáveis pela capacidade de reconhecer exactamente qual o ponto do corpo que foi tocado e a textura dos objectos que tocaram;
- discos de Merkel: conhecidos como receptores de extremidades dilatadas. Diferem dos corpúsculos de Meissner, pois, transmitem primeiro um sinal forte parcialmente adaptável e, em seguida, um sinal contínuo mais fraco, que se adapta lentamente. Acredita-se que sinalizem o toque contínuo de objectos contra a pele. Situam-se nas áreas não pilosas da pele e também, em menor número nas partes pilosas do corpo;
- órgãos terminais de pêlo: adaptam-se facilmente, detectando principalmente, movimentos de objectos na superfície do corpo, que desloca os pêlos. São emaranhados em torno da base de cada pêlo na superfície corporal;
- órgãos terminais de Ruffini: são terminações nervosas, multi-ramificadas, encapsuladas que se localizam na pele e nos tecidos mais profundos, bem como nas cápsulas articulares. Adaptam-se muito pouco, sinalizando a pressão e tacto contínuo aplicados à pele, ou o movimento em torno da articulação onde estão localizados;
- corpúsculos de Pacini: localizam-se na pele e nos tecidos mais profundos. Como os seus receptores têm um rápido tempo de resposta, estes

corpúsculos são estimulados apenas por movimentos muito rápidos dos tecidos. São importantes para detectar a vibração ou outras alterações rápidas do estado mecânico dos tecidos.

A maioria destes receptores sensitivos tácteis transmite os seus sinais por meio de fibras mielinizadas relativamente grandes e a uma elevada velocidade à excepção das terminações nervosas livres que têm uma velocidade de transmissão lenta. Assim, os tipos mais críticos de sinais sensitivos são transmitidos por meio de fibras nervosas sensitivas do tipo de condução rápida; e os tipos grosseiros de sinais, como o tacto grosseiro, comichão e cócegas, são transmitidos através de fibras nervosas mais lentas, as quais necessitam de um espaço menor nos nervos.

Tal como já foi referido, os diversos receptores tácteis envolvidos na detecção da vibração são sensíveis a diferentes frequências de vibração. Os corpúsculos de Pacini detectam os estímulos vibratórios mais rápidos (30 a 800 Hz) e estão ligados às grandes fibras mielinizadas, com elevadas velocidades de transmissão. As vibrações de baixa frequência (até 80 Hz) estimulam os corpúsculos de Meissner e outros receptores tácteis que, normalmente apresentam velocidades de transmissão mais baixas, adaptando-se de uma forma mais lenta que os corpúsculos de Pacini.

Nas figuras 4.11 e 4.12 ilustram-se o tipo e disposição dos diversos mecanoreceptores.

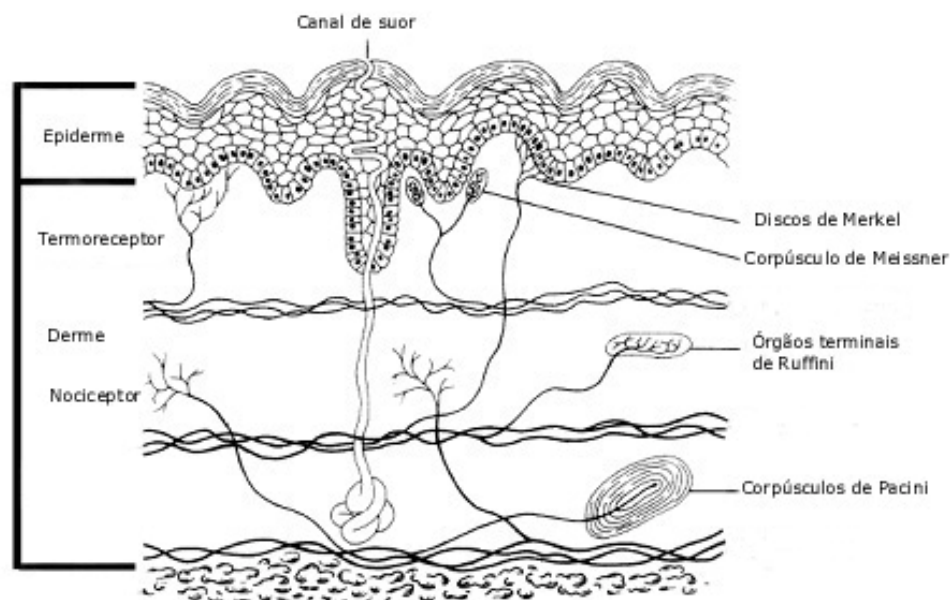


Figura 4.11 Tipos de mecanoreceptores e sua distribuição

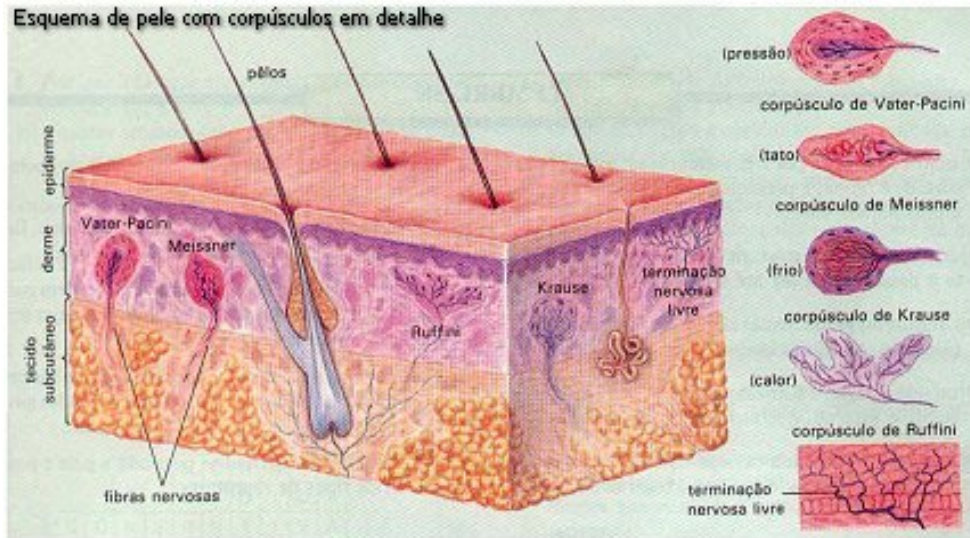


Figura 4.12 Esquema de distribuição dos diversos corpúsculos

4.3.2. Índices e normas

Considera-se que um corpo está em vibração quando o mesmo descreve um movimento oscilatório relativamente a uma posição de referência (ver figura 4.13). A quantificação do nível de vibração induzida no corpo humano é feita a partir do desvio padrão da componente flutuante da aceleração sentida pelo corpo. Matematicamente é a raiz média quadrática das flutuações da aceleração que é vulgarmente designada por *rms* (do inglês, "root-mean-square"), do sinal correspondente ao registo temporal da evolução da aceleração sentida pelo corpo. Esta grandeza, que se denomina como valor equivalente de aceleração a_{eq} [ms^{-2}], quando adimensionalizada relativamente a um valor de referência, correspondente normalmente a 10^{-6}ms^{-2} , e representada numa escala logarítmica, é expressa em decibel [dB] (cf. equação 4.14). O valor de referência usado na adimensionalização representa a aceleração mínima à qual o corpo humano é sensível e a que corresponde um valor da aceleração equivalente de zero decibel.

$$a_{eq}[\text{dB}] = 20 \log_{10} \left[\frac{a_{eq} [\text{ms}^{-2}]}{a_{ref} [\text{ms}^{-2}]} \right] \quad (4.14)$$

O carácter mais ou menos impulsivo de uma dada vibração é analisado a partir do factor de crista que é definido pela razão entre o valor do pico máximo instantâneo da aceleração ponderada e o valor equivalente de aceleração durante o período de medição. O factor de crista é um bom indicador da magnitude de choques de curta duração,

correspondendo, a valores mais elevados do factor de crista, vibrações mais impulsivas. Por vezes, é também utilizado como um indicador do efeito maléfico contido na vibração em análise.

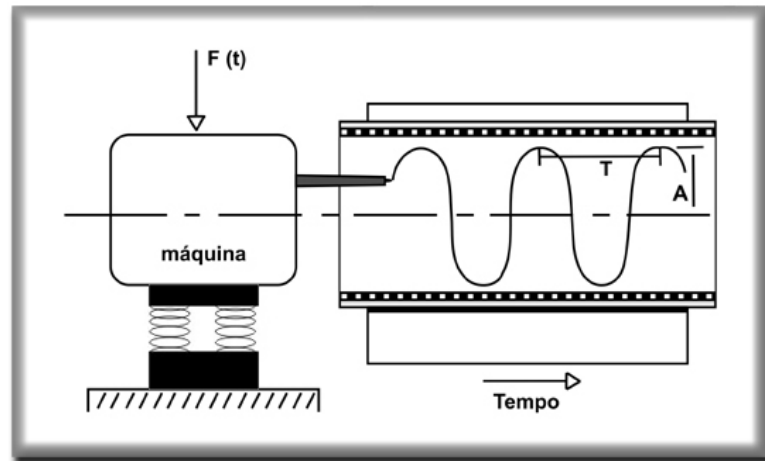


Figura 4.13 Exemplo de uma massa em vibração

As vibrações transmitidas ao corpo humano podem ser classificadas em dois tipos, de acordo com a região do corpo atingida:

- vibrações de corpo inteiro ou corpo completo: são de baixa frequência e alta amplitude, situam-se na faixa de frequências entre 1 e 80 Hz, com especial incidência entre 1 e 20 Hz. Estas vibrações são específicas para actividades de transporte sendo a sua avaliação feita de acordo com a norma ISO 2631;
- vibrações de extremidades (também conhecidas como segmentais, localizadas ou de mãos e braços): situam-se na faixa de 6,3 a 1250 Hz, ocorrendo nos trabalhos com ferramentas manuais sendo a sua avaliação normalizada pela norma ISO 5349.

Quando se estuda o efeito das vibrações nas pessoas, há que ter em conta o facto de o corpo humano ser constituído por várias partes, com comportamentos diversos, quando solicitadas por fenómenos vibratórios. Deste modo, as sensações de desconforto resultantes de vibrações, quando analisadas no seu efeito global dependem, substancialmente, quer do sentido de aplicação, quer da frequência, dos estímulos que as originam. Outros factores a considerar na análise das vibrações sofridas pelo corpo humano são, naturalmente, a intensidade da vibração em causa e o tempo de exposição em que a pessoa está sujeita a ela.

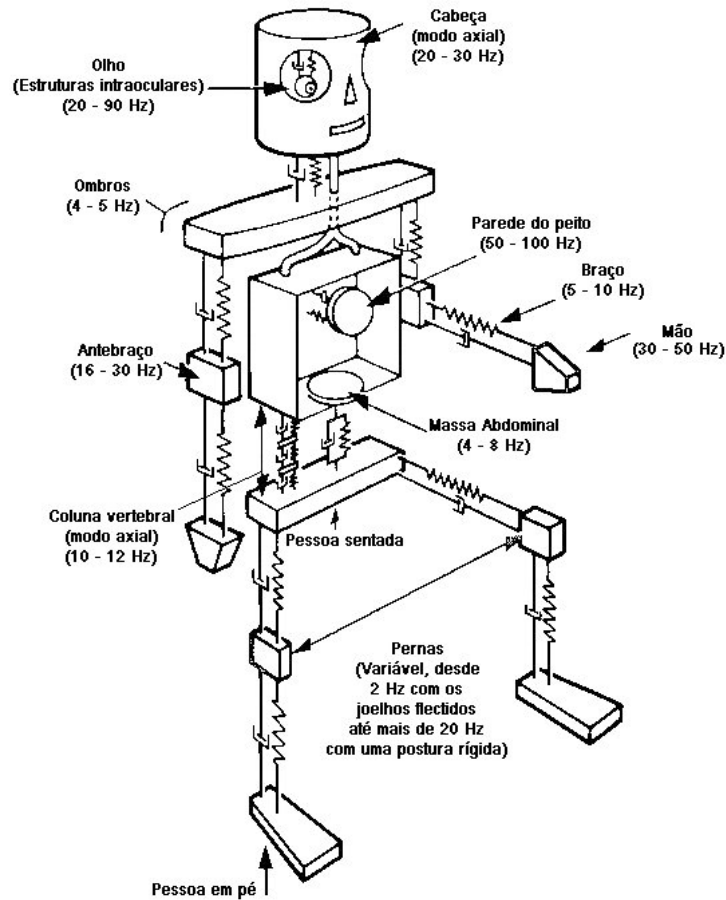


Figura 4.14 Modelo mecânico do corpo humano

A figura 4.14 representa um modelo biomecânico que simula o corpo humano, no que diz respeito à sua resposta às vibrações. Cada parte é substituída pelas suas equivalentes massa, unidade elástica e unidade amortecedora. Na figura representam-se ainda as frequências naturais típicas de cada órgão.

Os parâmetros a ter em conta para a análise das vibrações no corpo humano total estão indicados na parte 1 da já mencionada norma ISO 2631 (1997). Esta, define os métodos de medição a utilizar para vibrações periódicas, aleatórias e transitórias aplicadas a todo o corpo humano, indicando os principais factores a combinar para a determinação do nível de exposição às vibrações. A gama de frequências abrangida é de 0,5 a 80 Hz na análise dos riscos de saúde, do conforto e da percepção das vibrações, e de 0,1 a 0,5 Hz para avaliar o enjoo. Esta parte da norma aplica-se às vibrações transmitidas ao conjunto do corpo humano através da superfície de apoio, que podem ser os pés de um indivíduo de pé, o assento de uma pessoa recostada ou a superfície de suporte de um indivíduo deitado (ver figura 4.15).

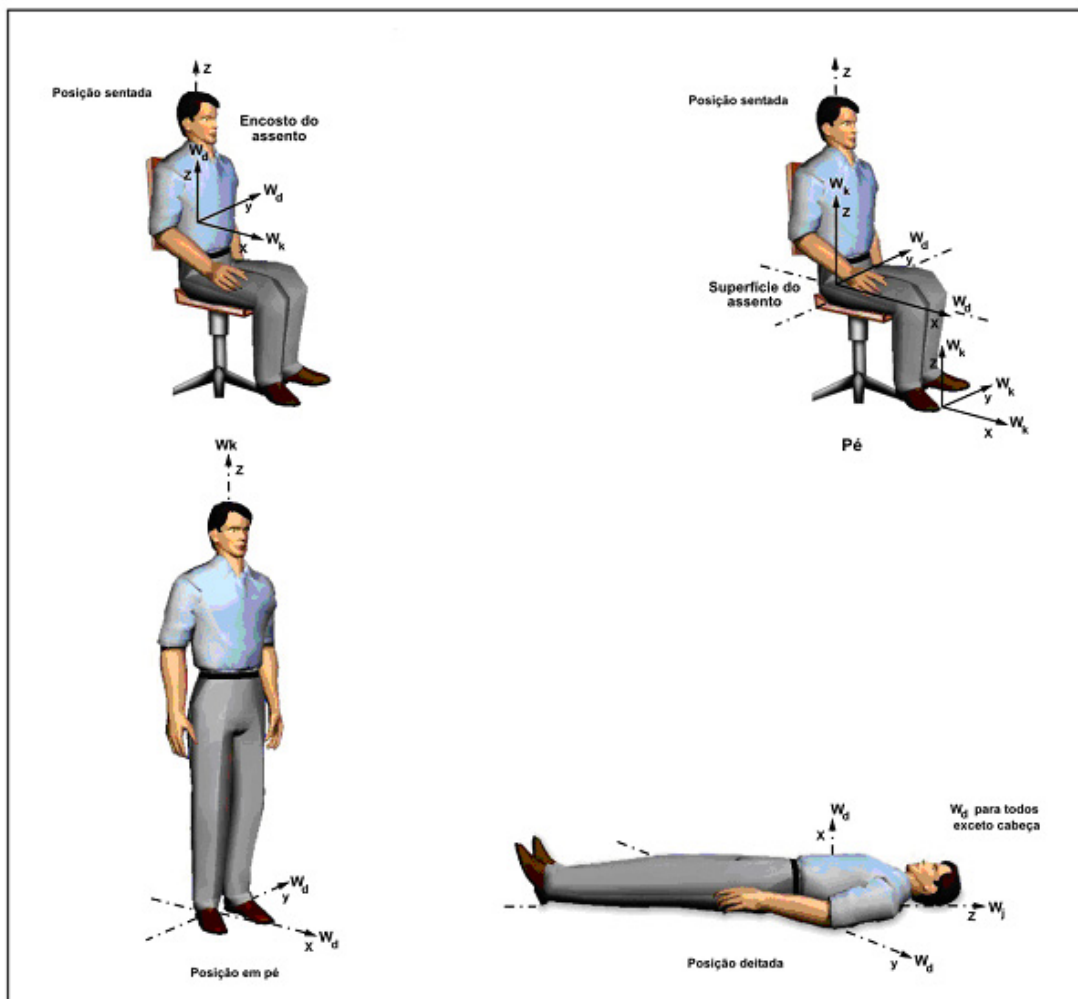


Figura 4.15 Sistema de eixos utilizado pela norma ISO 2631 (1997), consoante a posição da pessoa em análise

Como já se referiu, o modo como as vibrações afectam a saúde, o conforto, a percepção e o enjoo depende da sua frequência, sendo, por isso, utilizados diferentes factores de ponderação na análise das mesmas. Diferentes eixos têm diferentes factores de ponderação. A norma define, em função dos três eixos ortogonais, dois conjuntos de factores de ponderação (w_k e w_d) relativos à saúde, conforto e percepção. Outros factores de ponderação estão consagrados, nomeadamente para a situação de enjoo (w_f) e para situações especiais com factores adicionais (w_c , w_e e w_f).

No anexo A daquela norma apresentam-se as expressões matemáticas que permitem obter as curvas de ponderação em função da frequência da vibração. O corpo humano apresenta picos de sensibilidade em função da frequência da vibração consoante a aceleração seja na direcção Z (4-10 Hz) ou nas direcções X e Y (0,5-2 Hz).

Para factores de crista superiores a 9 a norma indica outros métodos de avaliação, tais como: o método do *rms* móvel e o método da quarta potência da dose de vibração.

A análise do sinal da aceleração pode ser feita através dum espectro de banda de largura constante ou de banda de largura proporcional da aceleração não ponderada. Utilizando bandas de terço de oitava, a aceleração ponderada é determinada de acordo com a seguinte equação:

$$a_w = \left[\sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.15)$$

onde:

- a_w - aceleração ponderada para um determinado eixo
- w_i - factor de ponderação para a i -ésima banda de terço de oitava
- a_i - *rms* da aceleração para a i -ésima banda de terço de oitava

O valor dos coeficientes de ponderação w_k e w_d em função da frequência estão representados graficamente na figura 4.16.

O valor da vibração total, determinado a partir do valor de *rms* da aceleração ponderada em cada uma das coordenadas ortogonais é obtido através da seguinte equação:

$$a_v = \sqrt{(k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2)} \quad (4.16)$$

onde:

- a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} - acelerações ponderadas para os eixos X, Y e Z, respectivamente
- k_x, k_y, k_z - são os factores de ponderação em função do tipo de análise pretendida

O uso do valor da vibração total, a_v , é recomendado para efectuar a avaliação do conforto e da percepção.

Para a avaliação das vibrações relativamente à saúde, deve considerar-se cada eixo de forma independente. Neste caso, a avaliação do efeito das vibrações deve ser feita para o eixo que apresentar maior valor de aceleração ponderada. No entanto, quando as vibrações em dois ou mais eixos forem similares, o valor da vibração total (a_v) deve ser usado para estimar os riscos de saúde.

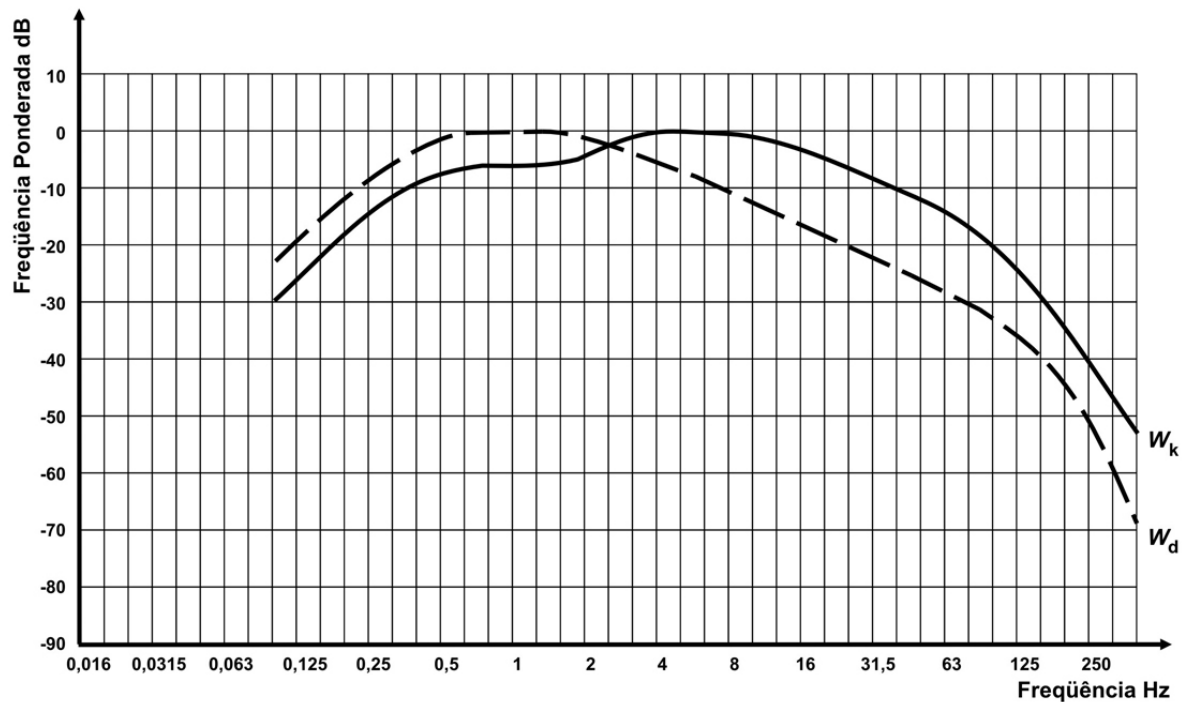


Figura 4.16 Coeficientes de ponderação w_k e w_d em função da frequência indicados na norma ISO 2631

Na situação em que se enquadra o trabalho aqui reportado, ou seja, conforto no interior de veículos, é recomendado utilizar o valor de a_v . Na análise de um indivíduo num veículo de passageiros, não é, até à data, conclusiva a evidência que suporte uma dependência da vibração em função do tempo no efeito do conforto.

Na norma são indicados valores indicativos numa escala de desconforto (ver tabela 4.1) que, de acordo com as experiências realizadas até à data, correspondem a valores aproximados das respostas das pessoas em relação às vibrações totais a que os indivíduos estão sujeitos em transportes públicos.

Valores de a_v [ms^{-2}]	Escala de desconforto
< 0,315	não é desconfortável
0,315 a 0,63	um pouco desconfortável
0,5 a 1,0	razoavelmente desconfortável
0,8 a 1,6	desconfortável
1,25 a 2,5	muito desconfortável
> 2,0	extremamente desconfortável

Tabela 4.1 Escala de desconforto indicado na norma ISO 2631 (1997)

Griffin (1990) desenvolveu um índice, designado por *SEAT*, com o objectivo de avaliar o desempenho de assentos de veículos. Este índice representa a relação de perturbação percebida pelo passageiro, quando sentado no assento em repouso e a perturbação que ele sentiria caso o assento fosse rígido. Este índice contém informação acerca do espectro de vibração induzida, da percepção humana e do comportamento do próprio assento, sendo definido por:

$$SEAT (\%) = 100 \sqrt{\frac{\int G_{ss}(w)W^2(w)dw}{\int G_{ff}(w)W^2(w)dw}} \quad (4.17)$$

onde $G_{ss}(w)$ é a função de densidade espectral da vibração medida no assento, $G_{ff}(w)$ é a função de densidade espectral da vibração medida no solo e $W(w)$ representa a percepção da vibração pelo ser humano relativa ao eixo vibracional.

No ano de 1992, foi publicada a norma ISO 10326-1 para normalizar os métodos de avaliação dos assentos de veículos no que às vibrações diz respeito, sendo o *SEAT* o índice de referência utilizado para este propósito. A norma define o modo de montagem do sistema de medição das vibrações nos assentos, com especial incidência no tipo de acelerómetros a utilizar e sua localização.

4.3.3. Métodos de medição

O elemento sensor primário num sistema de medida de vibrações do corpo humano é um acelerómetro. Os acelerómetros são constituídos por uma massa inercial que converte a aceleração numa força que é posteriormente convertida num sinal eléctrico proporcional à aceleração sentida pela massa inercial. Existem acelerómetros com diferentes princípios de funcionamento como por exemplo os capacitivos, indutivos, piezoeléctricos, piezoresistivos, entre outros. Alguns sistemas de medição necessitam de condicionadores de sinal eléctrico, para que o sinal eléctrico proporcional à aceleração sofrida pelo sensor possa ser lido pelos sistemas convencionais de leitura e/ou armazenamento de dados.

A aquisição do sinal de aceleração bem como o seu processamento e amostragem requer na sua grande maioria, dispositivos com rápidas velocidades de processamento e capacidade de memória. Quando os sinais de vibração apresentam um carácter muito aleatório, uma ferramenta importante consiste na sua análise em frequência, por forma a identificar o seu conteúdo energético em função da frequência. As vibrações no corpo humano têm, como já referido, um campo de medida em frequência bem definido,

existindo dispositivos especialmente concebidos para este tipo de análise. No que diz respeito ao sistema de corpo completo, estes dispositivos baseiam-se em acelerómetros tri-axiais, cujo método de construção se encontra normalizado, e na existência de um sistema de filtragem e ponderação dos valores de aceleração em função da sua frequência e do tipo de análise pretendida. O parâmetro mais importante que estes devem apresentar é a capacidade de calcular o nível de aceleração equivalente por eixo, o valor do factor de crista e o valor de a_v .

No capítulo cinco será apresentado em pormenor um sistema de medição desenvolvido no âmbito do trabalho aqui reportado.

4.3.4. Aplicação em veículos

Dos cinco factores de desconforto seleccionados, a vibração é o único cuja análise e desenvolvimento tem sido centrada nos veículos, ao invés dos outros onde existe a natural tendência de procurar adaptar os índices desenvolvidos em edifícios para os habitáculos de veículos. Claro está que esta particularidade surge da inerência da própria grandeza física, pois o seu efeito de desconforto assume uma relevância evidente nos habitáculos dos veículos quando comparada com os níveis no interior dos edifícios.

Os principais factores que influenciam as vibrações induzidas aos passageiros são: o tipo de veículo, as propriedades de atenuação do sistema de suspensão (onde se inclui os pneumáticos) e a transmissibilidade do assento. Na figura 4.17 representa-se o efeito de amortecimento existente nos veículos, relativamente a vibrações no sentido vertical, onde se pode observar que o último elemento de absorção da energia mecânica induzida pelas vibrações é o próprio corpo humano.

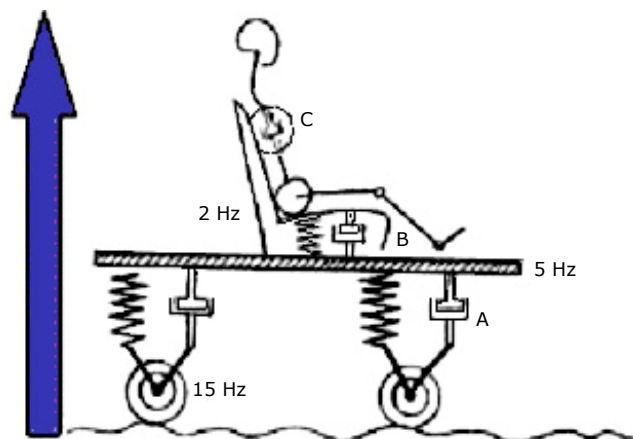


Figura 4.17 Elementos de absorção da energia mecânica oriunda das vibrações provenientes do pavimento, segundo o eixo vertical

Existem variáveis que podem ser directamente controladas pelos ocupantes dos veículos e que vão influenciar o seu nível de desconforto, tais como a velocidade do veículo, a qualidade do pavimento ou a postura do passageiro. Relativamente à postura do passageiro, recomenda-se que o mesmo viaje com uma leve inclinação das costas para trás (5 a 10° em relação a um plano horizontal), bem como a utilização de um suporte lombar que irá contribuir para uma diminuição da carga na coluna vertebral (ver figura 4.18).

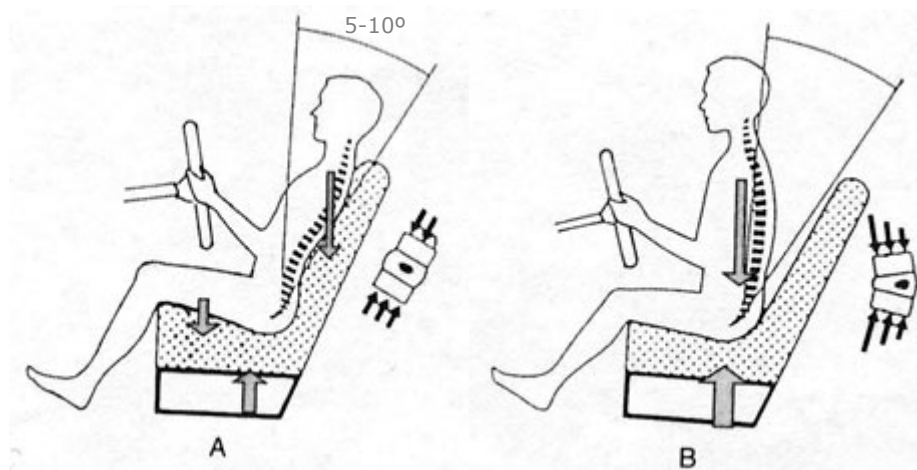


Figura 4.18 Postura em veículos: A) correcta B) incorrecta

As vibrações ao nível do eixo vertical (eixo Z) são as que mais contribuem para o nível de desconforto sentido pelos ocupantes dos veículos. Como tal, deve evitar-se a transmissão de vibrações segundo esta direcção, na faixa de frequências de 4 a 8 Hz, pois é onde se encontra a frequência de ressonância do tronco do ser humano.

Ao nível do corpo humano, as vibrações de origem mecânica dissipam-se em direcção aos discos inter-vertebrais, que actuam como amortecedores intrínsecos, representando a última linha de defesa humana contra as vibrações. Ao longo do tempo de vida, o corpo humano, tende a perder a sua flexibilidade, reduzindo-se assim a capacidade de o mesmo suportar a vibração mecânica.

Quando as vibrações são muito fortes, como acontece no caso de condutores de maquinaria pesada, podem ter como resultado micro-lesões do sistema osteo-articular, cujos efeitos se vão somando e avolumando em virtude de uma prolongada vida activa. As vibrações que invadem todo o corpo provocam uma diminuição da concentração e, em geral, perturbam os mecanismos cognitivos centrais responsáveis pelo tratamento das informações da memória a curto prazo.

Relativamente à influência da ressonância sobre os órgãos do corpo humano, quando as frequências de vibração são baixas (inferiores a 1 Hz), o corpo inteiro actua como uma massa homogénea, diminuindo a sensação de desconforto. Até aos 2,5 e os

3 Hz mantém-se a frequência natural das partes do corpo humano, garantindo-se assim que o passageiro esteja sujeito a níveis de desconforto reduzidos. Com frequências mais elevadas ocorre uma diminuição da sensibilidade, sendo entre os 3 e os 5 Hz que se despoletam os problemas estomacais e intestinais, e entre os 5 e 8 Hz que aparecem os fenómenos de lombalgia. Quando a frequência aumenta, os órgãos ressoam individualmente (a parte do corpo mais resistente às vibrações é o globo ocular, que apenas é afectado a partir dos 18 Hz). A 8 Hz, a cintura de uma pessoa tende a posicionar-se para uma situação de contracção, originando um risco mais elevado de aparecerem problemas nas costas.

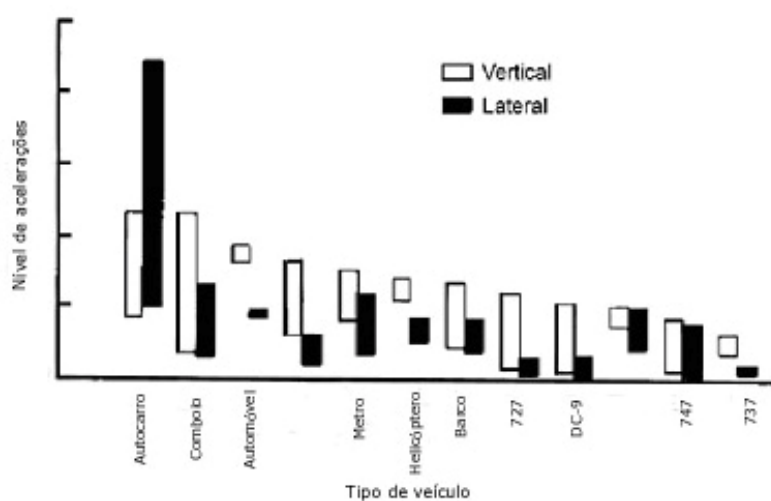


Figura 4.19 Valores típicos de acelerações em veículos (adaptado de Quehl, 2001)

Na figura 4.19 estão representados, a título indicativo valores médios das acelerações a que os passageiros são submetidos em diversos tipos de veículos. Tal como se pode observar, os autocarros representam o meio de transporte com valores de acelerações mais elevados. Tal facto suscita a necessidade de intervenção nestes veículos, para diminuir este estímulo de desconforto.

De seguida será feita uma breve referência a alguns trabalhos que ao longo do tempo têm permitido a evolução na análise acerca do modo como as vibrações induzidas aos passageiros dos veículos afectam o seu conforto.

Griffin *et al.* (1979) efectuaram uma série de medições das vibrações em veículos em condições reais de funcionamento, onde tiveram em conta, para além dos três eixos translacionais, também os três eixos rotacionais nas zonas de contacto entre o passageiro e o veículo. Nos ensaios realizados em laboratório, Griffin e os seus colaboradores concluíram que as vibrações, segundo os eixos ortogonais, afecta mais o conforto do que as vibrações angulares. Os resultados obtidos indicaram que a principal fonte de desconforto são as vibrações segundo o eixo vertical dependendo, no entanto

das condições que são analisadas; como tal, é recomendado que em estudos para avaliar as condições de conforto, sejam medidas as vibrações segundo os seis eixos.

Kozawa *et al.* (1986) apresentaram um índice para servir como uma medida objectiva acerca do conforto dos passageiros de veículos designado por *VN* (“Vibration Number”). Este índice foi obtido através de uma série de ensaios laboratoriais em que apenas foram avaliadas as vibrações em dois eixos ortogonais (vertical e lateral), sendo as vibrações avaliadas nos pés, nádegas e costas e, de seguida, ponderadas de acordo com a sensibilidade do corpo humano, dando origem ao *VN*, obtido através de uma regressão múltipla entre estas três medições. A correlação entre o índice de desconforto e as respostas subjectivas foi bastante elevada.

Gebauer *et al.* (1988) desenvolveram um dinamómetro que permite simular um veículo em condições reais de funcionamento sendo, deste modo, possível avaliar as vibrações e o ruído transmitidos pelo veículo aos seus ocupantes.

Giuliano e Ugo (1992) aplicaram um método estatístico baseado num ciclo iterativo de cinco passos:

- 1º definição de um procedimento adequado de recolha de dados;
- 2º definição da escala de recolha de dados subjectivos;
- 3º selecção dos veículos a utilizar e tipo de dados objectivos a recolher nos ensaios;
- 4º análise dos dados recolhidos;
- 5º análise estatística (quer dos dados objectivos quer dos subjectivos).

Este último passo permite efectuar alterações nos anteriores, por forma a que se obtenham melhores resultados. É descrito, pelos autores, a aplicação deste modelo na análise das vibrações no corpo humano, em situações de condução reais, tendo sido obtido um índice de qualidade através do modelo descrito anteriormente.

Como já foi referido, o nível de conforto depende do tipo de veículo em análise, sendo comuns os estudos combinados das vibrações com o ruído, visto que um influencia o outro. Apesar da maioria dos estudos serem dedicados aos veículos ligeiros, existem actualmente diversas análises sobre outro tipo de veículos. Assim, Gucciardino *et al.* (1992) estudaram a ergonomia de alguns carros de combate do exército italiano em que as vibrações e o ruído foram os factores em análise. Na análise das vibrações, os critérios utilizados como limite de fadiga foram os estabelecidos na norma ISO 2631 (1985).

Meier *et al.* (1997) desenvolveram na Ford Motor Company um simulador para estudar as vibrações de um veículo, em que o assento tem seis graus de liberdade, o volante quatro e o chão e os pedais um. Com este simulador é possível reproduzir as vibrações de um ensaio em condições reais. Foram realizados testes onde as pessoas fizeram a sua avaliação subjectiva em pista relativamente ao nível das vibrações

sofridas, numa escala de sete pontos (desde extremamente satisfatório +3 a extremamente insatisfatório -3) sendo o sinal gerado pelas vibrações armazenado para posterior simulação no simulador com nova avaliação subjectiva por parte das mesmas pessoas. Também foi feita uma comparação das medições objectivas com as subjectivas, sendo o valor da dose de vibração *VDV* (ver ISO 2631 (1997)) o parâmetro objectivo utilizado para o efeito.

A capacidade de reprodução em laboratório, com condições ambientais controladas que permitem diminuir o número de estímulos de desconforto sem controlo, tem sido um dos caminhos nesta área de investigação e desenvolvimento. Para além do já citado trabalho de Meier *et al.* (1997), existem actualmente diversas empresas que comercializam equipamentos de gravação e reprodução simultânea dos níveis de vibração e ruído em veículos. Através destes simuladores, que variam entre si no modo como é reproduzido o som, o número de agitadores de vibração e os respectivos graus de liberdade, torna-se possível submeter os passageiros a condições reais de percursos controlando os outros estímulos de desconforto, conseguindo-se obter uma melhor consistência e repetibilidade nas avaliações efectuadas neste domínio.

Outra ferramenta que se tem desenvolvido relativamente a este estímulo de desconforto é a utilização de métodos computacionais, tal como seja a aplicação *MADYMO* já referida no capítulo dois, por forma a obter o espectro de vibrações que o veículo irá transmitir aos seus ocupantes comparando-o com os valores indicados na norma ISO 2631.

4.4. Ruído

4.4.1. Som

As ondas sonoras podem ser geradas e transmitidas nos diversos meios físicos: gasoso, líquido ou sólido.

A sua análise mais comum, relativamente ao sistema auditivo humano, diz respeito à propagação das ondas sonoras no ar. Neste meio físico, as ondas sonoras são vibrações de ar que se deslocam e que consistem em regiões de alta pressão, provocadas pela compressão das moléculas de ar, alternando com regiões de baixa pressão, causadas pela rarefacção das moléculas de ar. Um objecto capaz de produzir este distúrbio nas moléculas de ar é também um objecto que produz som.

As moléculas de ar perturbadas inicialmente pela fonte de som vão perturbar outras moléculas de ar adjacentes, originando novas regiões de compressão e de rarefacção,

ocorrendo a designada propagação de som. As ondas sonoras, à medida que se vão afastando da fonte original do som, vão-se dissipando gradualmente. A intensidade do som vai diminuindo, acabando por desaparecer, até a última onda sonora não possuir “força” suficiente para perturbar as moléculas em seu redor.

Para além de se deslocarem no ar, as ondas sonoras também podem deslocar-se noutros meios, como por exemplo na água onde, devido à maior inércia dos fluidos, é necessária uma maior pressão para provocar movimentos moleculares.

As ondas sonoras sentidas pelo ouvido humano são ondas geradas mecanicamente com frequências entre 20 e 20000 Hz. Para os ouvidos de uma pessoa numa posição fixa, uma onda sonora representa uma flutuação da pressão do ar ao longo do tempo, em torno do valor médio da pressão atmosférica desse local. O som é simplesmente a sensação que é produzida pelo ouvido quando este é estimulado por esta pressão oscilante. A evolução temporal desta pressão oscilante é uma onda sonora.

Existem três propriedades que caracterizam o som: o tom, a intensidade e o timbre.

O tom de um som, por exemplo um Dó ou um Ré, é determinado pela frequência das vibrações. Quanto maior a frequência da vibração, mais elevado é o tom.

A intensidade de um som depende da amplitude da onda sonora, ou seja da diferença de pressão entre uma zona de compressão (alta pressão) e uma zona de rarefacção (baixa pressão). Quanto maior a amplitude, mais intenso é o som, dentro da gama de audição.

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 deste modo reconhecer a fonte sonora.

4.4.2. Sistema sensorial humano

O ouvido é o órgão responsável pela audição do ser humano sendo constituído por três partes: o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno.

A parte externa e média do ouvido transportam ondas sonoras com origem no ar para o ouvido interno, que se encontra preenchido por um fluido, amplificando a energia sonora durante este processo. No ouvido interno localizam-se dois sistemas sensoriais diferentes: a cóclea, onde se encontram os receptores que convertem as ondas sonoras em impulsos nervosos, tornando assim possível a audição; e o vestíbulo, necessário para o sentido do equilíbrio.

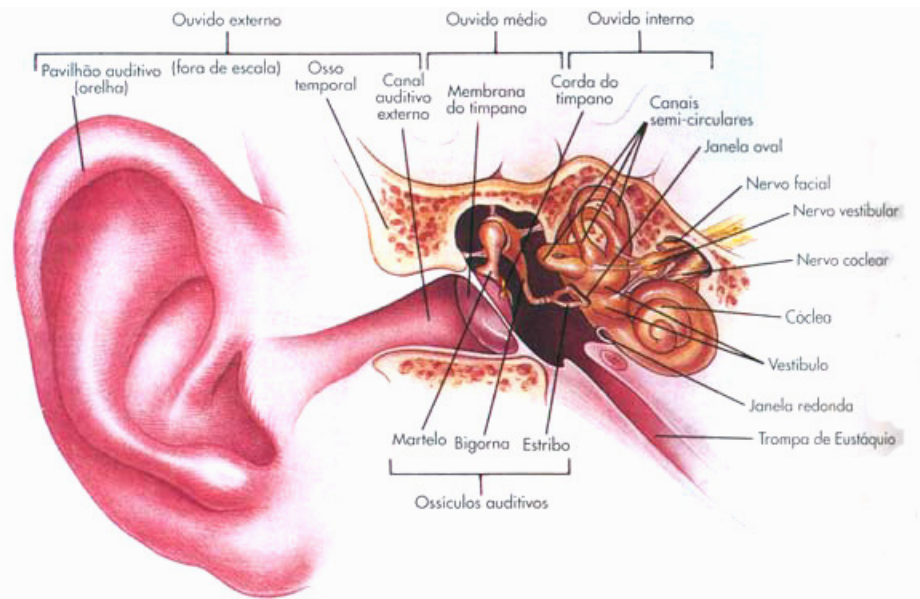


Figura 4.20 Esquema dos componentes do ouvido humano

O ouvido externo é constituído pelo pavilhão auditivo, canal auditivo externo e membrana do tímpano.

O pavilhão auricular tem como função recolher o som e direccioná-lo para o canal auditivo externo. Devido à sua forma, bloqueia parcialmente as ondas sonoras provenientes por detrás da pessoa, ajudando a distinguir a direcção de proveniência do som.

O canal auditivo externo é basicamente um tubo com aproximadamente 0,7 cm de diâmetro e 2,5 cm de comprimento, é revestido por pêlos e possui glândulas produtoras de cerúmen, vulgarmente chamada de "cera dos ouvidos". Os pêlos e o cerúmen impedem a chegada de partículas do ar à parte mais interna do canal auditivo externo, onde se poderiam acumular ou danificar a membrana do tímpano. O canal auditivo pode fazer ressoar e amplificar sons num intervalo de frequências entre 2000 a 5500 Hz, com um factor de amplificação de 10.

A membrana do tímpano encontra-se esticada ao longo da entrada do ouvido médio e vibra quando atingida por ondas sonoras. As regiões alternantes de baixas e altas pressões fazem com que o tímpano se dobre para dentro ou para fora, em sintonia com a frequência da onda sonora. Para o tímpano se encontrar livre para poder vibrar quando atingido por ondas sonoras, a pressão de repouso sentida no lado externo deve ser igual à sentida no lado interno. Do lado externo, o tímpano encontra-se exposto, através do canal auditivo externo, à pressão atmosférica; do lado interno, o tímpano encontra-se exposto também à pressão atmosférica, através da trompa de Eustáquio que liga o ouvido médio à faringe.

O ouvido médio transfere os movimentos vibratórios do tímpano para o fluido do ouvido interno. Esta transferência é facilitada por uma cadeia móvel de três pequenos ossos ou ossículos, o martelo, a bigorna e o estribo, que se estende ao longo do ouvido médio. O martelo encontra-se ligado ao tímpano e o estribo à janela oval. À medida que o tímpano vibra em resposta às ondas sonoras, a cadeia de ossículos inicia um movimento à mesma frequência, transmitindo-a para a janela oval. A pressão sentida na janela oval devido a cada vibração produz movimentos ondulatórios no fluido do ouvido interno, à mesma frequência das ondas sonoras iniciais.

Dois mecanismos relacionados com o sistema ossicular amplificam a pressão das ondas sonoras, de modo a iniciar a vibração do fluido da cóclea, que tratando-se de um fluido líquido apresenta maior inércia ao movimento. Primeiro, como a área da superfície do tímpano é muito maior do que a área da janela oval, a pressão aumenta à medida que a força exercida no tímpano é “empurrada” para a janela oval, de acordo com a lei de Pascal. Segundo, a acção de alavanca dos ossículos confere uma vantagem mecânica adicional. Assim, a força exercida na janela oval é vinte vezes superior à que seria exercida se a onda sonora atingisse directamente a janela oval. Esta força adicional é suficiente para iniciar o movimento do fluido coclear.

A cóclea encontra-se dividida ao longo da maioria do seu comprimento em três compartimentos longitudinais preenchidos por fluido. O compartimento central é fechado e tem o nome de canal coclear. O compartimento superior, que segue os contornos interiores da espiral, tem o nome de rampa do vestíbulo; o compartimento inferior, que segue os contornos exteriores da espiral, tem o nome de rampa do tímpano. O fluido contido no canal coclear tem o nome de endolinfa. A perilinfa é um fluido ligeiramente diferente e encontra-se na rampa vestibular e na rampa timpânica. A região, para além da ponta do canal coclear onde a perilinfa dos dois compartimentos é contínua designa-se por helicotrema. A separar a rampa vestibular do ouvido médio está a janela oval; a janela redonda separa a rampa timpânica do ouvido médio. A membrana vestibular forma o “tecto” do canal coclear e separa-o da rampa vestibular; a membrana basilar forma o “chão” do canal coclear e separa-o da rampa timpânica. A membrana basilar é de especial importância, pois nela encontra-se o órgão sensorial da audição: o órgão de Corti.

O órgão de Corti possui células pilosas receptoras de som. Estas células encontram-se distribuídas na cóclea, ao longo do comprimento da membrana basilar, em quatro filas paralelas: uma fila de células pilosas internas e três filas de células pilosas externas. Da superfície de cada célula pilosa saem cerca de 100 pêlos conhecidos por estereocílios, que são microvilosidades fortalecidas com actina. Quando estes pêlos são deformados mecanicamente em associação com os movimentos do fluido do ouvido interno, as

células pilosas geram sinais neuronais. Sobre o órgão de Corti e ao longo de todo o seu comprimento, encontra-se uma projecção de tecido, a membrana tectoria, onde estão embebidos os estereocílios.

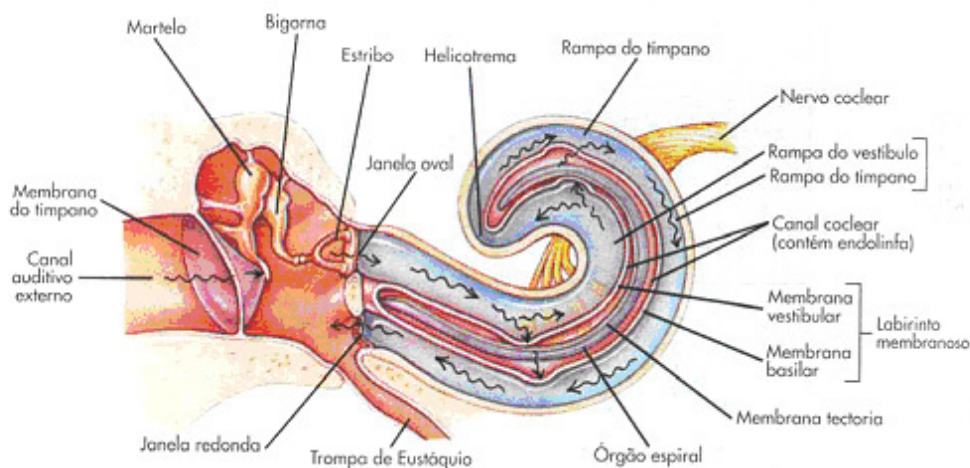


Figura 4.21 Esquema da cóclea e movimento das ondas de pressão no seu interior

A acção do estribo contra a janela oval, como se fosse um pistão, inicia ondas de pressão na rampa vestibular. Como o fluido é incompressível, a pressão é dissipada de duas formas, à medida que o estribo causa a deformação, para o interior, da janela oval: deslocamento da janela redonda e deflexão da membrana basilar. No primeiro caso, a onda de pressão empurra a perilinfa para a frente na rampa vestibular, à volta do helicotrema, até à rampa timpânica, onde provoca a deformação da janela redonda para o exterior, para a cavidade do ouvido interno, compensando deste modo o aumento de pressão. Enquanto o estribo balança para trás e puxa a janela oval para fora, para o ouvido médio, a perilinfa muda para a direcção oposta, deslocando a janela redonda para dentro. Neste caso não há produção de som, sendo um mecanismo apenas de dissipação de pressão.

As ondas de pressão de frequências associadas à recepção de som seguem um atalho. Neste caso elas são transferidas da rampa vestibular, através da membrana vestibular, para o canal coclear e depois através da membrana basilar para a rampa timpânica, onde provocam uma deformação alternada, para dentro e para fora, da janela redonda. Neste percurso a transmissão das ondas de pressão através da membrana basilar provoca uma vibração da mesma em sintonia com a onda de pressão. Visto que o órgão de Corti se encontra sobre a membrana basilar, as células pilosas que o constituem vão também oscilar em sintonia com a onda de pressão. Como os estereocílios se encontram embebidos na membrana tectoria e esta não é móvel, eles dobram-se para trás e para a frente quando a membrana basilar oscilante muda a sua posição em relação a esta. Esta deformação mecânica das pilosidades, para trás e para a

frente, alternadamente abre e fecha canais iónicos na célula, resultando numa despolarização e hiperpolarização alternadas das mudanças de potencial – potencial de recepção – à mesma frequência que a do estímulo sonoro original.

As células pilosas internas transformam a força mecânica do som em impulsos eléctricos da audição (potenciais de acção que propagam mensagens auditivas para o córtex cerebral). Estas células são receptoras especializadas que comunicam, por meio de uma sinapse química, com os terminais das fibras nervosas que constituem o nervo coclear. A despolarização destas células, que ocorre quando a membrana basilar é deflectida para cima, aumenta a sua velocidade de libertação de transmissores, o que determina a velocidade de transmissão nas fibras aferentes e vice-versa.

As células pilosas externas transmitem pouca informação aferente, recebendo principalmente sinais do cérebro através de fibras eferentes. Estas células não vibram em sintonia com a membrana basilar mas antes, ressaltam para cima e para baixo a um ritmo frenético. Esta rápida mobilidade é provavelmente activada por mensagens neuronais transportadas através de fibras eferentes e deve ser importante na aceleração do movimento da membrana basilar. Pensa-se que esta alteração do movimento da membrana basilar melhora a resposta das células pilosas internas, os verdadeiros receptores sensoriais da audição, tornando-as extremamente sensíveis à intensidade sonora e altamente discriminativas entre várias frequências do som.

Cada frequência apresenta um pico de vibração a uma posição diferente ao longo da membrana. Tons de elevada frequência provocam uma maior vibração da região da membrana junto à janela oval, enquanto que tons de baixa frequência provocam uma maior vibração junto ao helicotrema. Os tons intermédios distribuem-se ao longo do comprimento da membrana. A energia da onda de pressão é dissipada com a oscilação vigorosa da membrana, e por isso a onda morre na região de deslocação máxima da membrana.

As células pilosas da região do pico de vibração da membrana basilar sofrem uma maior deformação, sendo portanto as mais excitadas. O padrão de estimulação das células pilosas é interpretado no sistema nervoso central como um som de uma determinada frequência.

A discriminação do timbre é feita pelas frequências adicionais que se sobrepõem à principal e provocam a vibração menos intensa e simultânea de vários pontos ao longo da membrana basilar, sendo assim possível discernir o timbre do som.

A discriminação da intensidade depende da amplitude da vibração. As ondas sonoras originárias de sons mais altos provocam uma vibração mais vigorosa do tímpano, mas à mesma frequência que um som mais baixo do mesmo tom. A maior deflexão da membrana do tímpano é convertida numa maior amplitude do movimento da

membrana basilar na região do pico de resposta. O sistema nervoso central interpreta uma maior oscilação da membrana basilar como um som mais alto.

Tal como as várias regiões da membrana basilar estão associadas a tons particulares, também o córtex auditivo está tonotopicamente organizado. Cada região da membrana basilar está ligada a uma região específica do córtex auditivo no lobo temporal. Assim, neurónios corticais específicos são activados apenas por tons particulares; cada região do córtex auditivo é excitada apenas em resposta a um tom específico detectado por uma porção seleccionada da membrana basilar.

Os neurónios aferentes que recolhem os sinais auditivos das células pilosas internas saem da cóclea pelo nervo auditivo. O caminho neuronal entre o órgão de Corti e o córtex auditivo envolve várias sinapses seguidas, sendo as mais notáveis no tronco cerebral e no núcleo geniculado interno do tálamo.

O ouvido de uma pessoa saudável consegue ouvir sons que estejam situados no intervalo de 20 Hz a 20000 Hz de frequência, e de 20 μ Pa a 100 Pa, de nível de pressão, apresentando maior sensibilidade nas frequências entre os 500 Hz e os 4000 Hz, que correspondem à banda de frequências na qual se concentra a maior parte da energia contida na voz humana.

4.4.3. Índices e normas

O ruído é geralmente definido como sendo um som indesejado. Em virtude de ser um sinal flutuante variável ao longo do tempo, o som necessita de diferentes parâmetros para descrever a sua energia, o seu conteúdo em frequência, e a sua história temporal.

Num determinado ponto, a pressão sonora é a diferença entre a pressão instantânea medida e a pressão do meio ambiente, normalmente designada pressão atmosférica. Visto tratar-se de uma pressão, a sua unidade é o Pascal (Pa), sendo o valor médio quadrático da pressão sonora, durante um determinado período de tempo (T), obtido a partir da seguinte expressão:

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int p^2 dt \quad (4.18)$$

Esta grandeza não é considerada como sendo a mais adequada para caracterizar o ruído, em virtude da elevada amplitude sonora apresentada pelo sistema auditivo humano entre o limiar de audição e o limiar da dor. Assim, definiu-se o nível de pressão sonora, adiante designado *NPS*, que consiste em adimensionalizar o valor médio quadrático da pressão sonora relativamente a um valor de referência (equação 4.19). O

valor de referência utilizado normalmente é de 20 μPa , que representa o limiar de audição de uma pessoa, com uma capacidade de audição normal, sujeito a um tom puro de 1000 Hz. Para este nível de pressão corresponde um valor do nível de pressão sonora de zero decibel.

$$NPS = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_{ref}^2} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_{ref}} \quad [\text{dB}] \quad (4.19)$$

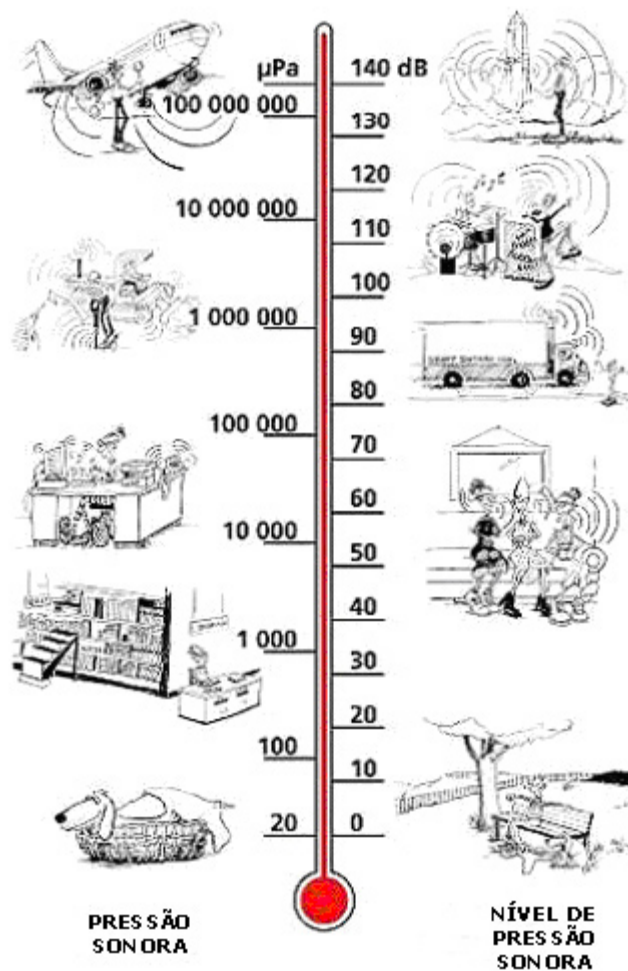


Figura 4.22 Equivalência entre os valores de pressão sonora e o nível de pressão sonora

Em termos acústicos podem definir-se outras grandezas base tais como seja a potência e a intensidade sonora. O nível de potência sonora é obtido pela expressão 4.20 onde a potência acústica (W) de uma fonte sonora é comparada com um valor de referência convencionalmente arbitrado ($10^{-12} W$). A intensidade sonora, num determinado ponto, é obtida a partir da equação 4.21, onde c representa a velocidade do

som no ar [ms^{-1}], ρ_0 a massa volúmica do ar [kgm^{-3}], W a potência acústica [W] e A a área [m^2]. A grandeza logarítmica correspondente é o designado nível de intensidade sonora (L_i), definido pela equação 4.22 em que $I_{ref} = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$.

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} \text{ [dB]} \quad (4.20)$$

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho_0 c} = \frac{W}{A} \quad (4.21)$$

$$L_i = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}} \text{ [dB]} \quad (4.22)$$

O índice normalmente utilizado quando é necessário caracterizar o efeito sonoro num determinado período de tempo é o nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}) e corresponde ao nível de pressão sonora 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 (valor *rms*), como se descreve na seguinte equação:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{\overline{p_{rms}^2}}{p_{ref}^2} \right) \quad (4.23)$$

A expressão anterior pode ser modificada, dando origem à expressão 4.24, que é o modo mais habitual de apresentar o L_{eq} .

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int 10^{\frac{NPS}{10}} dt \right) \quad (4.24)$$

Caso a evolução temporal do nível de pressão sonora seja obtida de uma forma discreta em vez de um modo contínuo, o nível sonoro contínuo equivalente pode ser calculado através da denominada média energética dos níveis sonoros, definida pela equação 4.25:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{NPS_i}{10}} \right) \quad (4.25)$$

Os parâmetros métricos definidos anteriormente, referem-se apenas à grandeza física da variação da pressão sem ter em consideração o seu conteúdo em frequência, o

que significa que nenhum destes parâmetros reflecte o modo como o ser humano interpreta as características do som.

Fazendo um breve resumo histórico acerca dos principais índices métricos utilizados para expressar a perceptibilidade sonora do ser humano, Fletcher e Munson apresentaram, nos anos trinta, de acordo com Lei de Weber-Fechner, as curvas isofónicas que pretendem representar a correlação entre a pressão sonora (objectiva) e a sensação sonora (subjectiva), tendo em conta o intervalo de frequências audíveis e os níveis extremos correspondentes ao limiar de audição e limiar de dor. Estas curvas foram inicialmente obtidas para tons puros, mas estudos levados a cabo por Robinson e White permitiram a obtenção de curvas isofónicas para níveis de pressão sonora em bandas de oitava (ver figura 4.23). Em 1955, Stevens apresentou um conceito análogo, tentando introduzir variações lineares (sones) em vez de variações logarítmicas (fones). O mesmo autor, no ano de 1957, fez uma proposição, relativamente a 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.

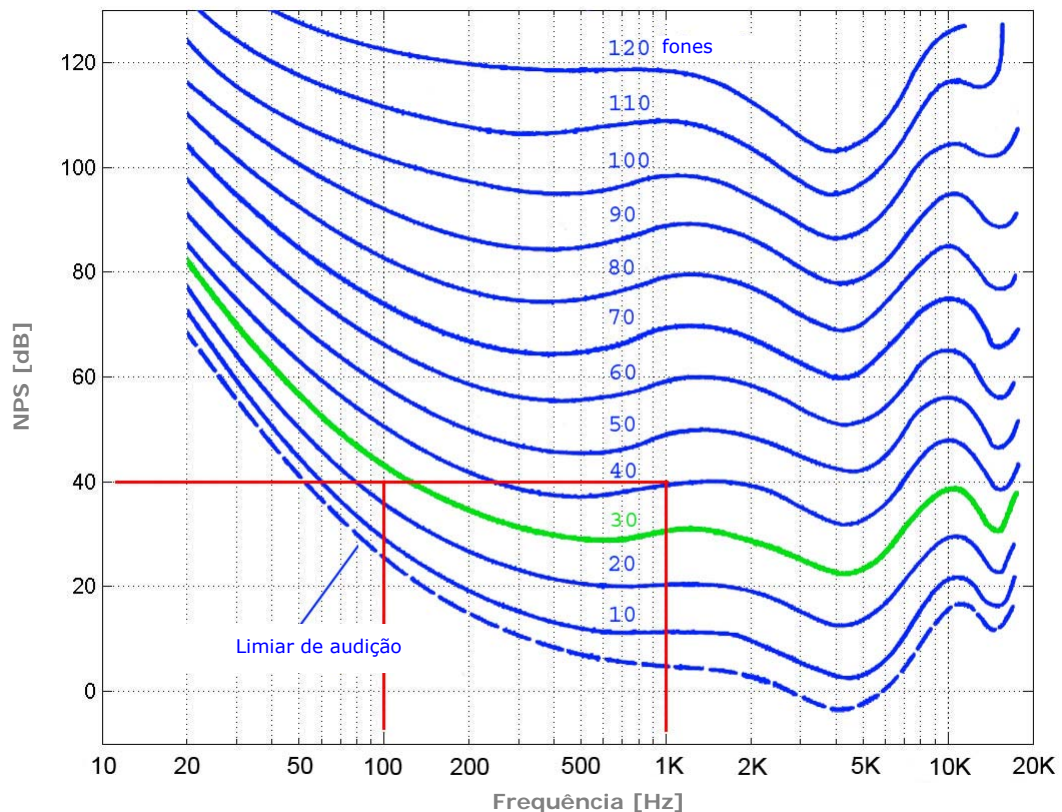


Figura 4.23 Curvas isofónicas

Assim, nos anos cinquenta, existiam diversos métodos híbridos para medir os níveis de ruído, para além da sonoridade atrás mencionada, não existindo contudo nenhum tipo

de normalização. Estes métodos baseavam-se em curvas de ponderação em frequência conhecidos como curvas de ponderação A, B e C. Estas curvas estão representadas na figura 4.24, e ainda hoje são conhecidos como as curvas de ponderação para 40, 70 e 100 fones. Nalguns países a medida em decibel linear era também utilizada, a qual era designada por uma resposta em frequência plana. A curva de ponderação D, criada para efectuar medições em aeroportos e aviões, era também utilizada nalgumas situações.

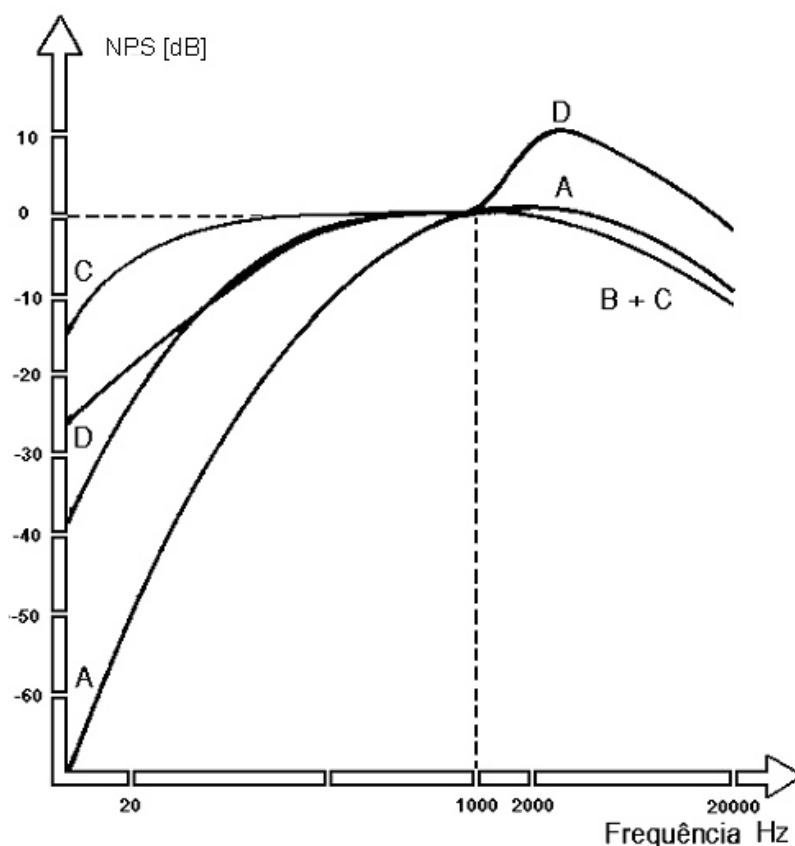


Figura 4.24 Curvas de ponderação A, B, C e D

A falta de uniformidade, ao nível do índice de caracterização acústica afectou diversos tipos de actividades, com repercussões ao nível económico bem como vários problemas no desenvolvimento de equipamentos acústicos. Assim, a comunidade internacional solicitou que a Organização Internacional de Normalização (ISO) promovesse uma uniformização relativamente ao método de medição. O método de medição que acabou por ser considerado como aquele que melhor representava o sistema auditivo humano foi a curva de ponderação A.

Relativamente ao sector de veículos em análise neste trabalho, é fundamental referenciar a norma ISO 5128, publicada em 1980 e intitulada "Acoustics – Measurement of noise inside motor vehicles", cujo principal objectivo foi o de estabelecer procedimentos uniformes da medição do ruído no interior de veículos de modo a que

diferentes medições pudessem ser comparáveis. O índice métrico adoptado foi o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A. A norma especifica o tipo de equipamentos a utilizar, os locais de medição, os cuidados a ter com as condições ambientais bem como o modo de operação dos veículos, não sendo no entanto indicados valores limites.

Em Portugal foi publicada, no ano de 1997, a norma NP 1674 baseada na norma ISO 5128, referente à caracterização do ruído no interior de automóveis pesados de passageiros, na qual o método de medição e metodologia de ensaio descrito é idêntico ao da referida norma ISO. A norma NP 1674 indica valores limites que não devem ser excedidos (ver tabela 4.2).

Utilização do veículo	Valores limites [dB(A)]		
	Veículo imobilizado	Veículo a 40 km/h \pm 5 Km/h	Veículo a outras velocidades
Urbana	65	75	80
Interurbana	65	72	75

Tabela 4.2 Valores máximos admissíveis para os níveis sonoros no interior de veículos pesados de passageiros de acordo com a norma NP 1674

Apesar da uniformidade recomendada pela ISO em torno da curva de ponderação A, durante os últimos anos, a importância do valor de sonoridade, bem como de outros parâmetros que caracterizam o som, aumentou imenso sobretudo devido ao desenvolvimento da psico-acústica no campo da qualidade sonora. São, por isso, apresentados de seguida alguns dos parâmetros métricos objectivos que têm evidenciado ao nível da análise acústica, com especial relevo para os que são mais utilizados para o interior de veículos.

4.4.3.1. Bandas críticas

Diversas experiências e testes de audição mostraram que o sistema auditivo humano efectua associações entre estímulos sonoros que têm frequências próximas umas das outras em intervalos particulares de frequências. Estes intervalos são designados de "bandas críticas". Através da ordenação destas bandas numa escala de frequências criou-se a chamada "relação de bandas críticas" cuja unidade é o "Bark". O intervalo de frequências audíveis pelo ouvido humano foi organizado por Zwicker em 24

bandas críticas numa escala de 0 a 24 Bark (Zwicker, 1960 e 1982). Na tabela 4.3 apresenta-se este agrupamento de frequências.

Banda crítica z [Bark]	f [Hz]	Δf [Hz]	Banda crítica z [Bark]	f [Hz]	Δf [Hz]	Banda crítica z [Bark]	f [Hz]	Δf [Hz]
0	0	100	8	920	160	16	3150	550
1	100	100	9	1080	190	17	3700	700
2	200	100	10	1270	210	18	4400	900
3	300	100	11	1480	240	19	5300	1100
4	400	110	12	1720	280	20	6400	1300
5	510	120	13	2000	320	21	7700	1800
6	630	140	14	2320	380	22	9500	2500
7	770	150	15	2700	450	23	12000	3500
						24	15500	

Tabela 4.3 Relação entre banda crítica e frequência (Zwicker, 1982)

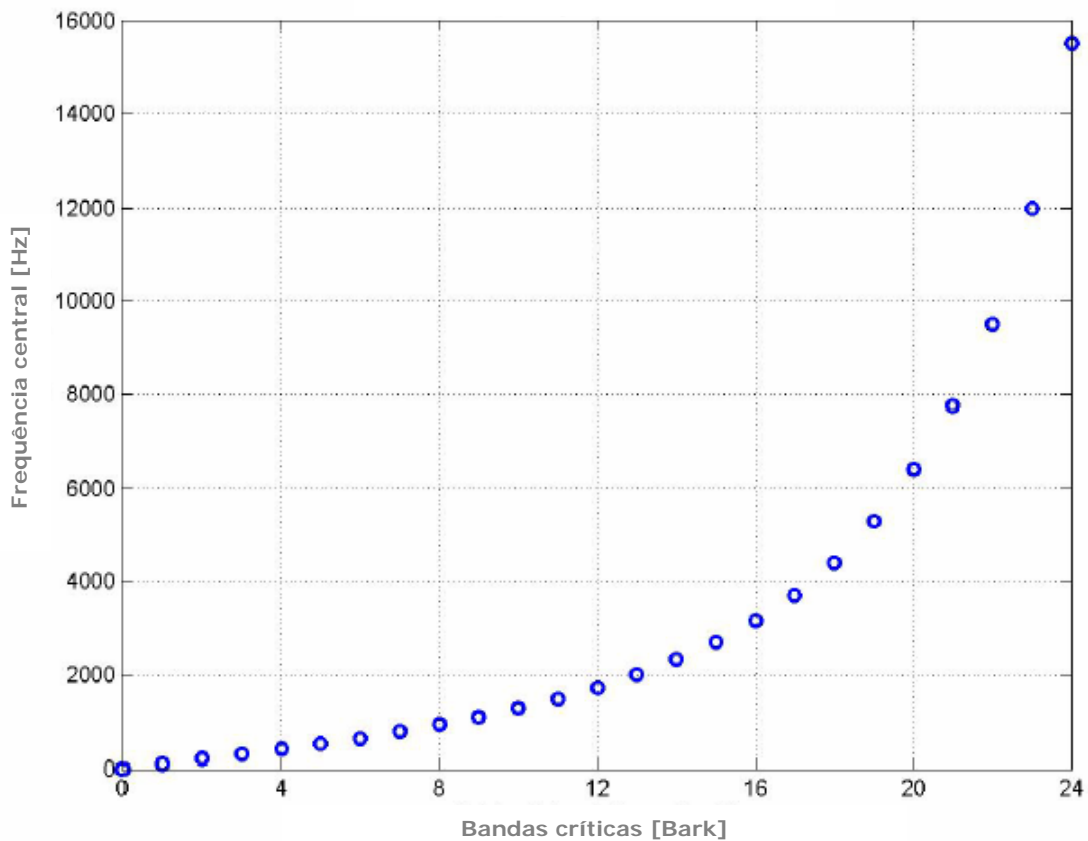


Figura 4.25 Ilustração da ordenação das bandas críticas

A conversão dos valores de frequência (f , em Hz) para o valor de frequência crítica em Bark (z , em Bark) é estabelecida pela equação 4.26, sendo a sua ilustração apresentada na figura 4.25.

$$z = 13 \tan^{-1} \left(\frac{0,76f}{1000} \right) + 3,5 \tan^{-1} \left(\frac{f}{7500} \right)^2 \quad (4.26)$$

4.4.3.2. Sonoridade

A sonoridade é uma medida da percepção do conteúdo de energia do som no ouvido humano. Está relacionada, mas não é igual ao nível de pressão sonora. Uma dificuldade na utilização da escala logarítmica é o facto de, para um aumento para o dobro de pressão sonora, não corresponder um aumento para o dobro do nível de pressão sonora, mas antes um aumento de 6 decibéis, o que, por vezes, dificulta a compreensão deste tipo de escala, dado que o ser humano apresenta maior sensibilidade para pensar em diferenças relativas. O valor de sonoridade é obtido em função da amplitude do som bem como do seu conteúdo em frequência. Por exemplo, um som de baixa frequência, 40 dB e 100 Hz, seria perceptivelmente mais silencioso para uma pessoa de audição normal do que um som a 1000 Hz e 40 dB; de facto, o tom de 1000 Hz soaria quase quatro vezes mais alto. Este efeito está ilustrado na figura 4.23 através das já referidas curvas isofónicas, onde se pode constatar que o valor de sonoridade do tom a 1000 Hz e 40 dB corresponde a 40 fones, enquanto que a 100 Hz e 40 dB corresponde a aproximadamente 25 fones.

Na figura 4.23 está representado a traço interrompido o limiar de audição, que representa o nível a partir do qual os tons são perceptíveis ao sistema auditivo humano. Verifica-se que este limite varia em função da frequência, ou seja a sonoridade de um nível de pressão sonora não é a mesma para todo o espectro de frequência. A dificuldade na utilização de parâmetros na psico-acústica em termos de nível de pressão do som está no modo como estes são relacionados com um nível padrão e a que frequências. Apesar de a unidade "fone" ser conveniente para relacionar a sonoridade com a escala logarítmica, ela não é frequentemente utilizada em avaliações acústicas com recurso a pessoas. É mais natural e mais fácil para os ouvintes entenderem quando lhes pedem que avaliem a sonoridade relativamente a um som que funcione como referência, ou comparar a sonoridade entre múltiplos sons. Assim sendo foi desenvolvida, através de testes comparativos, a unidade de sone, cuja terminologia derivou do latim "sonare". Por definição, um sinal sinusoidal com uma frequência de 1000 Hz e um nível de 40 dB tem uma sonoridade de 1 sone, ou seja, um sone é igual a 40 fones. Sones são quantidades lineares, pelo que, dois sones são duas vezes mais altos que um sone, e assim por

diante. Na figura 4.26 está representada a relação entre sone (N) e fone (L_N), que pode ser expressa, de acordo com a norma DIN 45631 (1991), por:

$$L_N = \begin{cases} 40 + 33,22 \times \log(N) & \text{para } N \geq 1 \text{ sone} \\ 40 \times (N + 0,0005)^{0,35} & \text{para } N < 1 \text{ sone} \end{cases} \quad (4.27)$$

A unidade utilizada na caracterização da sonoridade de sons é o Bark, relativamente à relação de bandas críticas (frequência), e o sone para a amplitude (sonoridade). A utilização destas unidades baseia-se no modelo matemático de aproximação da sonoridade humana em que a sonoridade não é um produto de linhas espectrais ou que se obtém directamente da distribuição espectral do som, mas que a sonoridade total é a soma da sonoridade específica de cada banda crítica. Estudos empíricos demonstraram que este método é o que obtém melhores resultados em avaliações psico-acústicas.

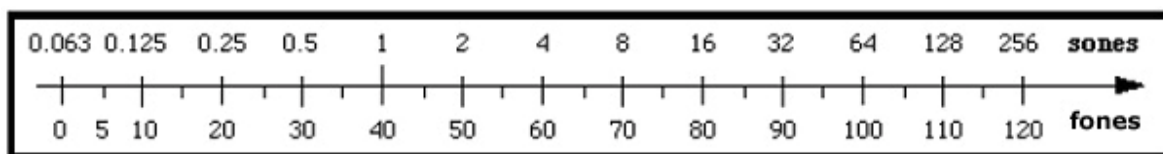


Figura 4.26 Relação entre sone e fone

A obtenção da sonoridade específica iniciou-se com a lei de Stevens, referida no capítulo dois, de que “uma sensação psíquica aumenta com o valor físico da mesma de acordo com uma lei de potência”. Assim, ao assumir-se que uma mudança relativa na sonoridade é proporcional a uma mudança relativa em intensidade, um modelo de sonoridade específica pode ser aplicado utilizando essa lei. Demonstrou-se que em vez de intensidade por faixa crítica, deveria ser utilizado o nível de excitação. Assim, a sonoridade específica (N') de um som pode ser determinada de acordo com a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta N'}{N'} = k \frac{\Delta E}{E} \quad (4.28)$$

onde N' é a sonoridade específica, $\Delta N'$ é a variação da sonoridade específica, E é o nível de excitação, ΔE é a variação do nível de excitação, e k é uma constante de proporcionalidade. Usando o limiar de audição como um nível básico ou mínimo de

excitação, e uma referência de sonoridade específica, Zwicker e Fastl desenvolveram uma expressão para a sonoridade específica dada por:

$$N' = N_0' \left(\frac{E_{TQ}}{s \cdot E_0} \right)^k \left[\left(1 + \frac{s \cdot E}{E_{TQ}} \right)^k - 1 \right] \quad (4.29)$$

Na equação 4.29, a variável E_{TQ} , representa o nível de excitação no limiar de audição, E_0 é o nível de excitação que corresponde à intensidade de referência ($I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$), e N_0' é uma referência da sonoridade específica. A variável s e o expoente k são obtidos experimentalmente.

O resultado de numerosos testes de avaliação usando tons específicos e ruídos de banda larga levaram à seguinte aproximação, formulada por Zwicker e Fastl, para o cálculo da sonoridade específica em cada banda crítica, cuja unidade é sone por Bark:

$$N' = 0,08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_0} \right)^{0,23} \left[\left(0,5 + \frac{E}{2 \cdot E_{TQ}} \right)^{0,23} - 1 \right] \quad (4.30)$$

O cálculo da sonoridade total é o resultado da soma das diversas sonoridades específicas ao longo de todas as bandas críticas (equação 4.31):

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N' dz \quad (4.31)$$

Esta expressão matemática representa a sensação de sonoridade do sistema audível humano, incluindo o efeito de mascaramento e a relação não linear entre a sonoridade e a frequência, fornecendo um modelo empírico validado.

A título exemplificativo, do cálculo da sonoridade específica e total, considere-se um tom puro de 1000 Hz com uma amplitude de 70 dB, representado na figura 4.27. Utilizando as equações 4.30 e 4.31, o valor de sonoridade total obtido é de 8,02 sones. Utilizando a equação 4.27 para obter o valor em fones, este é igual a 70 fones que está de acordo com os 70 dB a 1000 Hz representados nas curvas isofônicas. Na figura 4.28 representa-se a sonoridade específica em função da relação de bandas críticas para o mesmo tom puro, sendo interessante notar a existência da percepção de frequências que não estão presentes bem como o decaimento da curva como resultado dos efeitos de mascaramento do sistema audível humano. Este efeito de mascaramento é modelado com precisão no cálculo da sonoridade através da formulação de Zwicker.

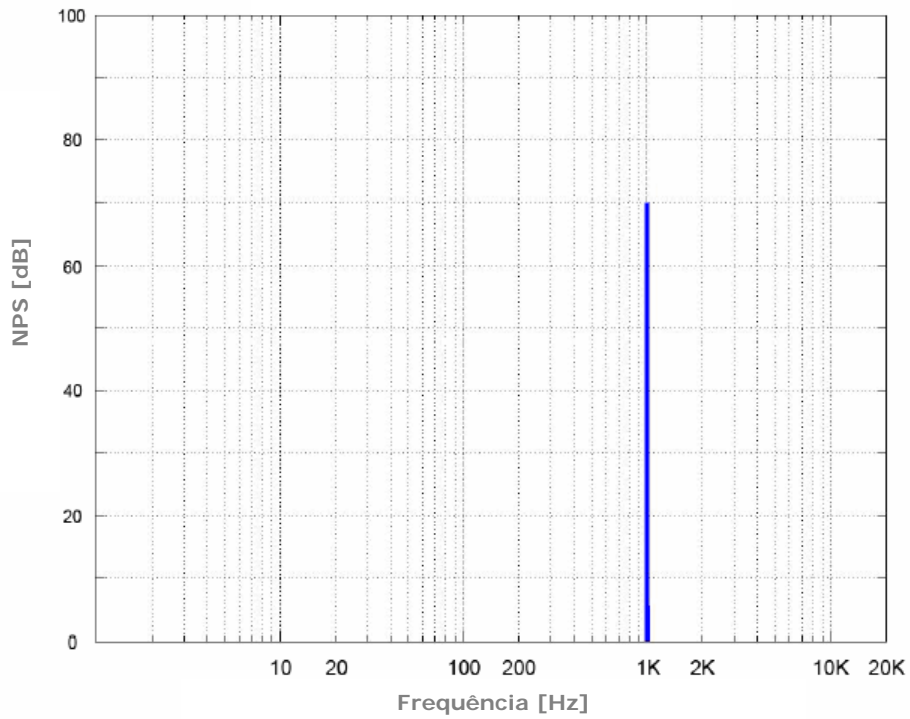


Figura 4.27 Distribuição espectral de tom puro de 70 dB a 1000 Hz

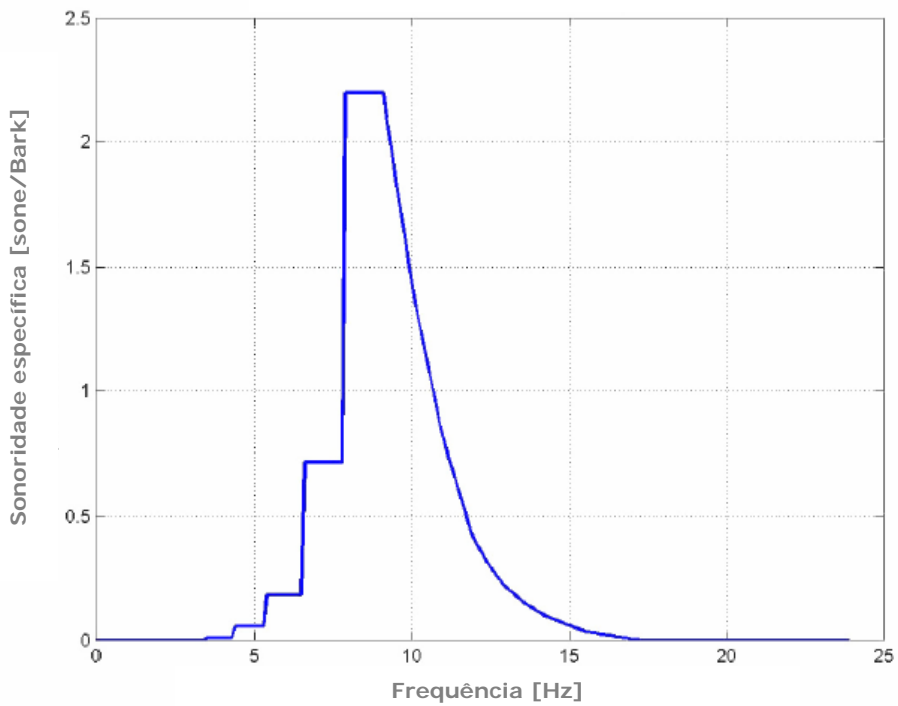


Figura 4.28 Sonoridade específica de Zwicker de tom puro de 70 dB a 1000 Hz

O modelo de cálculo da sonoridade acima descrito baseia-se em obter um valor calibrado do sinal adquirido em decibéis, submetendo-o a um processo de filtragem por

uma série de vinte e quatro filtros em bandas de terços de oitava para decompor a resposta espectral nas bandas críticas. Como a única variável nas equações (4.30) e (4.31) é o nível de excitação (E) do som numa banda crítica particular, este é aproximado usando o nível de pressão sonora. Esta conversão é complexa, sendo feita de acordo com as normas ISO 532 (1975) e DIN 45631 (1991). O resultado é uma matriz que pode ser interpretada como sendo a representação do nível de excitação do nervo coclear relativamente ao espectro audível. Esta matriz é posteriormente somada por forma a obter o valor de sonoridade total de um indivíduo exposto a esse som.

Apesar de existirem diversos métodos de cálculo da sonoridade de um som, o modelo anteriormente descrito, baseado no método de Zwicker e cujo fluxograma de cálculo se apresenta na figura 4.29, encontra-se normalizado nas normas ISO 532 (1975) e DIN 45631 (1991).

Alguns métodos existentes baseiam-se na filtragem do sinal utilizando directamente os valores centrais e de largura de banda em frequência idênticos às bandas críticas em vez de os obter a partir da filtragem em terços de oitava.

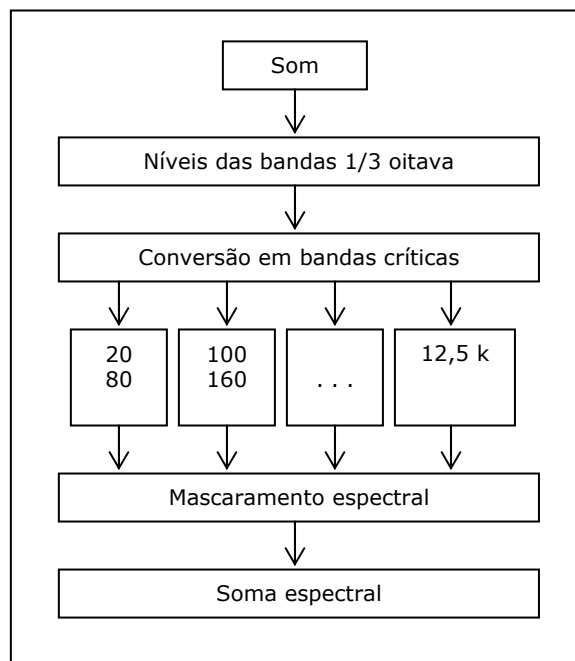


Figura 4.29 Fluxograma de cálculo da sonoridade de acordo com a norma ISO 532 (1975)

4.4.3.3. Agudez

A agudez, em inglês "sharpness", é uma medida do conteúdo de energia das frequências elevadas de um som. Para a sua obtenção utiliza-se uma curva de

ponderação relativamente ao cálculo da sonoridade específica, dando ênfase às frequências mais altas. A sua unidade de medida é o "acum", que deriva da palavra "afiado" em latim, tendo sido mencionada desde os anos setenta e enfatizada por Zwicker desde 1990. Na figura 4.30 está representada a curva de ponderação em função da relação de bandas críticas, onde se pode ver que a ponderação é unitária até 16 Barks, crescendo exponencialmente a partir daí até um factor de 4, para a banda de 24 Barks.

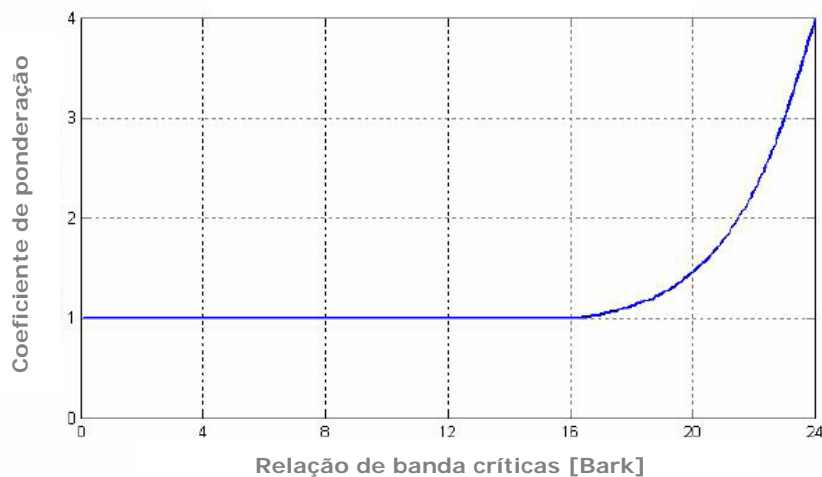


Figura 4.30 Curva de ponderação da agudez vs. bandas críticas

A agudez é normalizada relativamente ao nível de pressão sonora e frequência baseando-se na relação de que 1 acum corresponde a um ruído com uma banda estreita em frequência centrado em 1000 Hz e tendo uma amplitude de 60 dB.

A agudez, obtida a partir do método de cálculo da sonoridade anteriormente descrito, é obtida simplesmente através de uma ponderação da distribuição da relação de bandas críticas de sonoridade específica definida pela equação 4.30, onde $g(z)$ representa a ponderação apresentada na figura 4.30, obtendo-se assim:

$$S = 0,11 \frac{\int_0^{24\text{Bark}} N' \cdot g(z) \cdot z dz}{\int_0^{24\text{Bark}} N' dz} \quad (4.32)$$

Na figura 4.31, apresenta-se o resultado dos valores de agudez obtidos a partir de sinais sonoros com amplitudes idênticas mas com frequências dominantes distintas, onde é visível o efeito das altas frequências no seu cálculo.

Existem modelos de cálculo deste índice que alguns autores consideram ser mais elaborados, tais como o modelo de Aures ou o de Widmann. Porém, o método de cálculo anteriormente descrito tem demonstrado elevada concordância com a resposta do ser humano. Não existindo normalização acerca do cálculo da agudez, deve sempre indicar-se qual o método utilizado na sua obtenção.

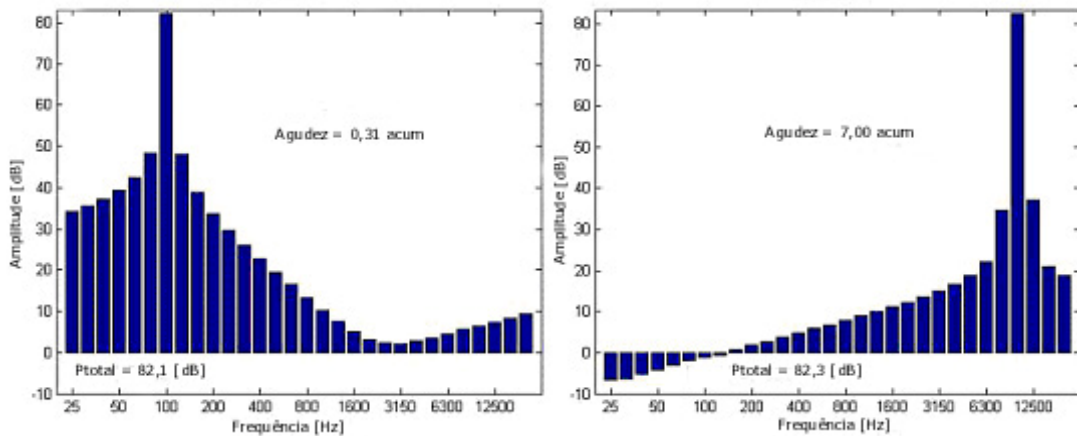


Figura 4.31 Efeito da frequência no cálculo da agudez

4.4.3.4. Índice de articulação

Outro indicador utilizado para a avaliação do ambiente sonoro, que tem ganho especial relevo no sector automóvel, é denominado por índice de articulação (*IA*). Avalia a facilidade com que pode ser estabelecida uma conversação, face à existência de um ruído de fundo perturbador. O método usado pondera as componentes de um determinado ruído nas diferentes frequências, tendo em conta a sua importância relativa, de forma a avaliar o modo como este prejudica a inteligibilidade da conversação. Os valores obtidos são expressos numa escala de 0 a 1, aos quais correspondem os limites de 0% e 100% de inteligibilidade, respectivamente. Geralmente considera-se um nível de inteligibilidade inaceitável para valores inferiores a 5% e um nível elevado de inteligibilidade para valores superiores a 80%.

Originalmente o índice era um critério utilizado para caracterizar a influência de ruído parasita na capacidade de conversação de sistemas de comunicação, tendo sido desenvolvido por Fletcher nos Laboratórios de Bell. Alguns progressos, no seu desenvolvimento, foram efectuados por French e Steinberg na mesma companhia. Em 1947, Beranek publicou um artigo relativo a um método de cálculo para caracterizar a capacidade de um sistema de comunicação para transmitir o sinal de forma inteligível na presença de ruído, cujas principais conclusões foram:

- as frequências abaixo de 200 Hz e acima de 6000 Hz em nada contribuem para a inteligibilidade de conversação;
- existem vinte bandas de frequências que afectam de forma idêntica o índice de articulação;
- o intervalo dinâmico de conversão é de cerca de 30 dB em cada uma das vinte bandas de frequências determinadas.

Kryter (1962) publicou um artigo com o propósito de indicar procedimentos para calcular este índice, propondo algumas modificações e variações na versão de cálculo base, estabelecendo relações entre este e o conceito de inteligibilidade de conversação.

Em 1969, a ANSI ("American National Standards Institute") publicou uma norma que contém diversos modos para calcular o índice de articulação, através de análises em bandas de oitavas e bandas de terços de oitava. No entanto, estes métodos são considerados de difícil aplicabilidade prática.

Nos anos setenta, a empresa Interkeller AG, seguindo o trabalho de Beranek, apresentou um procedimento de cálculo considerado mais simples de utilizar, que é baseado na análise em terços de oitava e cujo desenvolvimento visava a avaliação do índice de articulação no interior de veículos. Esta metodologia tem vindo a ser bastante popularizada na análise do ruído interno de veículos de modo a avaliar o seu espectro nas médias e altas frequências.

Freq. central em 1/3 oitava [Hz]	Limite inferior [dB(A)]	Limite superior [dB(A)]	Coefficiente de ponderação
200	23,1	53,1	1,00
250	30,4	60,4	2,00
315	34,4	64,4	3,25
400	38,2	68,2	4,25
500	41,8	71,8	4,50
630	43,1	73,1	5,25
800	44,2	74,2	6,50
1000	44,0	74,0	7,25
1250	42,6	72,6	8,50
1600	41,0	71,0	11,50
2000	38,2	68,2	11,00
2500	36,3	66,3	9,50
3150	34,2	64,2	9,00
4000	31,0	61,0	7,75
5000	26,5	56,5	6,25
6300	20,9	50,9	2,50

Tabela 4.4 Limites e coeficientes de ponderação para a obtenção do índice de articulação

O índice de articulação é calculado a partir dos níveis da pressão sonora nas bandas de terços de oitava centradas em 200 Hz até 6300 Hz, sendo utilizados os coeficientes de ponderação e os limites da zona de conversação indicados na tabela 4.4 e representados nas figuras 4.32 e 4.33. A metodologia de cálculo para a contribuição de cada banda de terço de oitava baseia-se nos seguintes critérios:

- se o nível em terço de oitava ponderado de acordo com a curva A estiver entre os valores limites inferior e superior da zona de conversação dessa banda, então a sua contribuição será um valor linear entre 0 e 1;
- se o nível for superior ao limite superior, irá assumir o valor zero;
- se o nível for inferior ao limite inferior, irá assumir o valor de um.

Após a multiplicação dos valores calculados para cada banda de terço de oitava pelo coeficiente de ponderação, o índice de articulação é obtido através do somatório de todos estes factores.

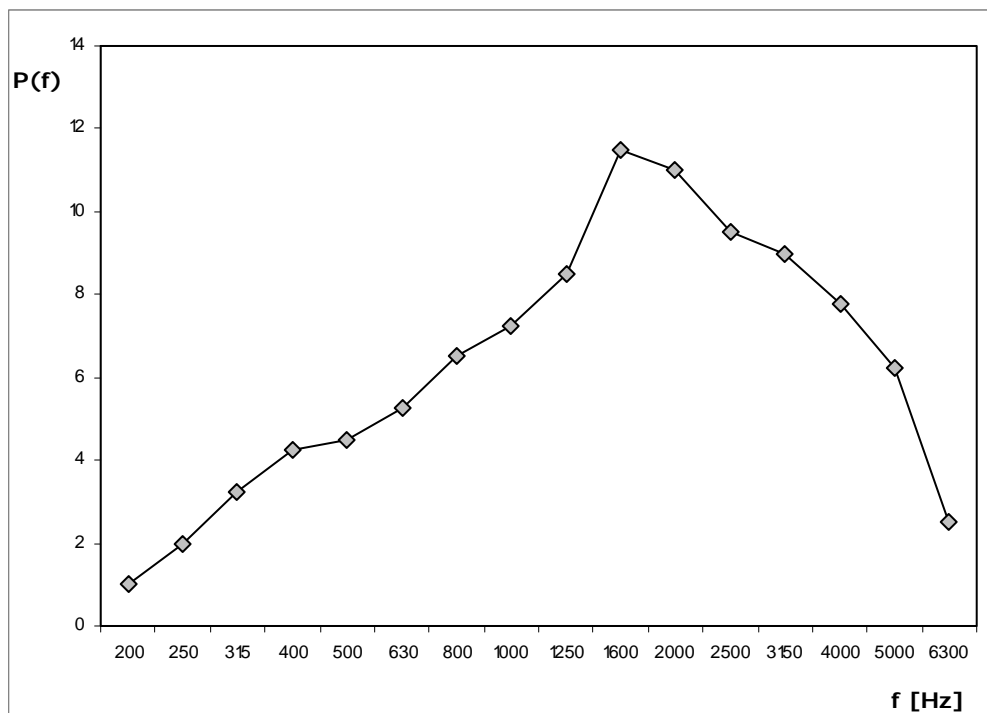


Figura 4.32 Curva de ponderação do índice de articulação em função do centro de banda de 1/3 de oitava

Este método de obtenção do índice de articulação está representado na equação 4.33.

$$IA = \sum_f IA_f P(f) \quad (4.33)$$

$$\begin{cases} IA_f = \frac{L_s(f) - L(f)}{30} & \text{se } L_i(f) < L(f) < L_s(f) \\ IA_f = 0 & \text{se } L(f) \geq L_s(f) \\ IA_f = 1 & \text{se } L(f) \leq L_i(f) \end{cases}$$

onde:

IA - índice de articulação

IA_f - índice de articulação da banda f

f - representa o centro de frequências em bandas de terço de oitava entre 200 Hz e 6000 Hz

$L(f)$ - espectro do som em f

$L_s(f)$ - é o limite superior da zona de conversação

$L_i(f)$ - é o limite inferior da zona de conversação

$P(f)$ - ponderação em frequência

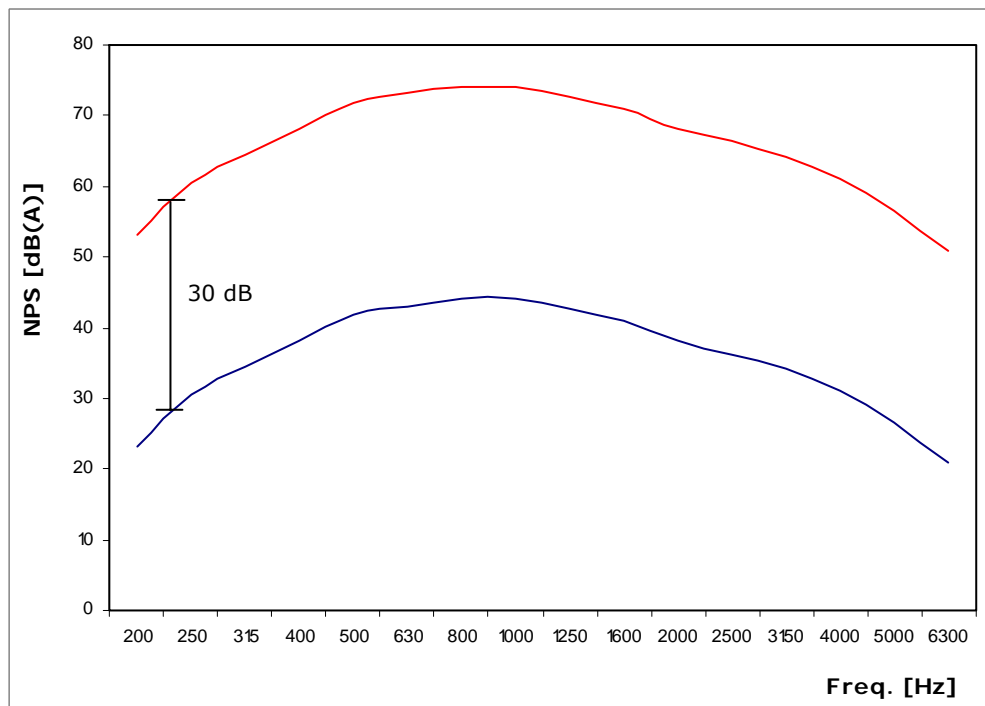


Figura 4.33 Limites do índice de articulação em função do centro de banda em 1/3 de oitava

O somatório da equação anterior obedece às condições anteriormente mencionadas, ou seja: no caso de se $L(f)$ ser menor ou igual que $L_i(f)$, a contribuição de $P(f)$ é máxima, caso $L(f)$ seja maior ou igual do que $L_s(f)$ a sua contribuição para o valor do índice de articulação será nula.

4.4.3.5. Outros índices

Para além dos índices acústicos aqui descritos, existem outros parâmetros métricos para descrever o ruído. De seguida apresentam-se, de um modo sucinto, alguns desses parâmetros.

A aspereza, em inglês "roughness", é um parâmetro que quantifica a percepção subjectiva relativa a rápidas modelações da amplitude do sinal entre 15 e 300 Hz, sendo a sua unidade de medida o "asper". Um asper é definido como sendo a aspereza produzida por um tom de 1000 Hz e amplitude de 60 dB, cuja amplitude é modulada 100% na frequência de 70 Hz (Zwicker e Fastl, 1990).

A força de flutuação, sendo um parâmetro semelhante à aspereza, quantifica a percepção subjectiva relativa a modelações da amplitude do sinal mais lentas (até 20 Hz). A unidade de medida da força de flutuação é o "vacil", sendo definido que um vacil é a força de flutuação produzida por um tom de 1000 Hz e amplitude de 60dB que é 100% modulado em amplitude numa frequência de 4 Hz.

A tonalidade de um som está relacionada com a proeminência tonal do mesmo, existindo diversos modelos para a sua obtenção.

O método de obtenção do índice de crescimento, do inglês "booming", é semelhante ao método de cálculo descrito anteriormente para a agudez, distinguindo-se deste em virtude de se concentrar nas baixas e médias frequências, sendo considerados conceitos opostos. Este índice é muito utilizado em veículos para quantificar a qualidade sonora dos motores de combustão interna. Pode ser calculado através de um método idêntico ao já descrito para o cálculo da agudez, só que a ponderação relativa às bandas críticas é diferente (ver figura 4.34).

O nível de interferência na conversação (*SIL*) representa um parâmetro métrico onde é feita uma análise em frequência do ruído de fundo, nas oitavas centradas nas frequências de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz, por serem aquelas que contêm a maior parte do espectro da voz humana. O valor do índice é calculado a partir da média aritmética dos níveis de pressão sonora das componentes do sinal em cada uma das oitavas consideradas. Numa publicação da ISO (ISO/TR 3352-1974) são estabelecidas, em função dos valores de *SIL*, as distâncias máximas entre duas pessoas para que a

conversação seja inteligível, sendo consideradas duas situações: as pessoas a falarem com voz normal ou em voz alta.

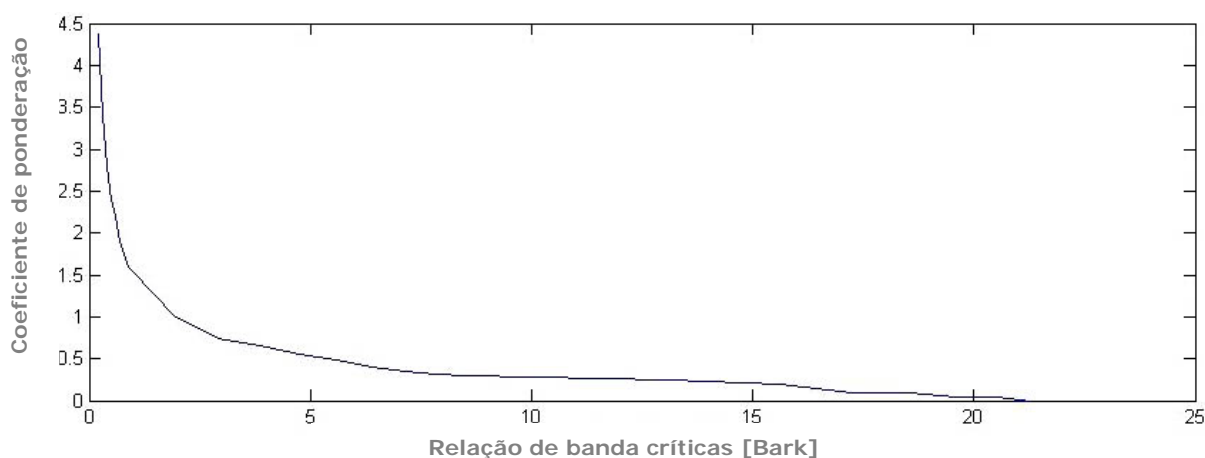


Figura 4.34 Curva de ponderação do índice de crescimento vs. bandas críticas

Existem ainda outros índices métricos que por vezes são utilizados na caracterização dos sons, tais como: o timbre, a impulsividade, o nível de poluição sonora (*LNP*), o índice do ruído do tráfego (*TNI*), o *CRP* ("Composite Rate of Preference"), etc.

4.4.4. Métodos de medição

A medição do ruído apresenta sempre como sensor primário um microfone, cujo princípio de funcionamento pode ser do tipo indutivo, capacitivo ou piezoelétrico. Os microfones são constituídos por uma fina membrana que simula o tímpano humano, sendo o deslocamento dessa membrana, provocado pelo sinal de vibração, convertido num sinal eléctrico proporcional.

O sinal eléctrico pode ser objecto de diferentes tratamentos em função do tipo de análise pretendida, desde análises mais simplistas, como a sua conversão para o valor do nível de pressão sonora em decibéis, até análises em frequência. Hoje em dia, existem no mercado diversos tipos de sonómetros e dosímetros com capacidade para efectuar múltiplas análises do valor da pressão sonora.

Para além da abordagem clássica, através do recurso a simples microfones, a utilização de dois microfones nos ouvidos de manequins de tronco (ver figura 4.35), simulando de um modo mais realista o sistema auditivo humano, tem vindo a assumir um papel de destaque ao nível da acústica, com especial relevo na análise da qualidade do som. O recurso a estes manequins é o método de medição recomendado para

efectuar a gravação de sons que se pretendem apresentar a um painel de avaliadores, à posteriori.



Figura 4.35 Manequim acústico

4.4.5. Qualidade do som

Não existe uma definição típica de qualidade sonora, no entanto, esta pode ser definida como sendo o índice acústico, vulgarmente designado por valor métrico objectivo, que expressa a preferência subjectiva de um som. A popularidade da utilização do conceito tem sido extensível a diversos tipos de ambientes e produtos, desde o sector automóvel e seus componentes, a computadores, frigoríficos, máquinas de lavar roupa e louça, motos, auditórios, salas de espectáculos, entre outros. A percepção de qualidade sonora baseia-se no processo de "escutar" sons e interpretar a informação contida no sinal. Em virtude de só as pessoas poderem ouvir e exprimir o efeito mental induzido pelo sinal acústico que lhes é apresentado, este campo exige a avaliação subjectiva das mesmas.

A metodologia de análise da qualidade sonora, apesar de variar consoante o produto ou ambiente em análise, consiste nas seguintes tarefas:

- obtenção de amostras de sons representativos do processo em análise para submeter à avaliação subjectiva das pessoas;
- desenvolvimento de vocabulário e questionário adequado para descrever os atributos subjectivos que se pretende que as pessoas avaliem nos sons;
- identificação das preferências e das reacções indicadas na avaliação subjectivas dos sons;

- estabelecimento de correlações entre os parâmetros métricos objectivos (quantidades mensuráveis) e as avaliações subjectivas, baseadas em métodos estatísticos, regressão linear e não linear, análise factorial, redes neuronais, ou outras;
- desenvolvimento de um modelo de preferência que permita num futuro avaliar qualquer som semelhante em função do parâmetro métrico objectivo;
- alterações nos ambientes ou produtos para obter as características sonoras preferidas pelos consumidores.

Os parâmetros métricos acústicos utilizados dependem muito do tipo de análise e do conteúdo dos sons em análise. Pode ser utilizado qualquer um dos índices anteriormente referidos (L_{eq} , sonoridade, índice de articulação, agudez, tonalidade, etc.), bem como desenvolver parâmetros métricos novos para aplicações particulares que venham a demonstrar uma boa correlação com a avaliação acústica do sistema auditivo humano.

Apesar de não existir normalização relativamente à análise da qualidade sonora de ambientes e produtos existem contudo, alguns sectores onde têm sido dadas importantes contribuições no sentido de criar metodologias de trabalho, permitindo assim a troca de dados e experiências. Relativamente à avaliação da qualidade sonora no interior de veículos Otto *et al.* (1999), das empresas Ford Motor Company, Head Acustics e General Motors Corporation, publicaram conjuntamente, um artigo cujo objectivo era estabelecer um guia para avaliações de qualidade sonora no sector automóvel, que tem funcionado como uma referência neste sector.

Uma das etapas numa análise de qualidade sonora consiste na recolha das amostras dos sons, que devem ser feitas de tal modo que eles possam ser apresentados ao painel de avaliação, por forma a simular a presença do avaliador no próprio local de gravação dos sons. Para tal, é necessário que as gravações não contenham nenhuma distorção ou ruído estranho que distraia os avaliadores e que o sistema de gravação tenha sido calibrado por forma a que possa quantificar-se os níveis de pressão recolhidos. O método actualmente mais comum é o de gravar as amostras sonoras em suporte digital num computador, devendo o sistema de reprodução ser equalizado e calibrado de forma a que se consiga atingir este objectivo.

O modo como as amostras de sons são apresentados ao painel de avaliadores pode ser feita de dois modos: através de altifalantes ou auscultadores. A opção pelos auscultadores é sempre preferível, pois os altifalantes implicam que se tenha em conta o efeito acústico do local onde se vai realizar a avaliação acústica, por forma a simular correctamente os sons gravados no local de origem.

Relativamente ao tipo de avaliação subjectiva a ser empregue, ela pode ser bastante diversa, atendendo ao objectivo em mente, existindo os métodos de comparação entre diversos sons, o método de indicação da sua magnitude, o método de avaliação através de semântica oposta, entre outros.

Apesar das melhorias atingidas actualmente nos sistemas de gravação e reprodução dos sons, existe ainda bastante desenvolvimento a ser feito, onde se inclui o efeito conjunto das vibrações com os sons, bem como a influência dos aspectos visuais neste contexto de avaliação.

As principais causas de erro identificadas, numa análise de qualidade sonora em veículos, são:

- efectuar gravações sem prévia calibração;
- as gravações conterem sons indesejados que vão afectar a avaliação subjectiva do painel de avaliação;
- o ambiente de reprodução ser inadequado, não permitindo que os avaliadores sintam a sensação de estar no habitáculo do veículo;
- a reprodução dos sons ser feita com níveis impróprios ou sem equalização;
- a metodologia de avaliação dos sons pelo painel de avaliadores ser confusa;
- a metodologia de avaliação subjectiva causar fadiga e/ou distrações nas pessoas que estão a avaliar os sons.

Actualmente, este tipo de análise no sector automóvel é bastante popular, sendo aplicado a diversas áreas, tais como seja o som do abrir e fechar das portas, o som transmitido do motor para o interior do habitáculo, entre outros. Um desafio inerente a esta área de actuação consiste no aperfeiçoamento dos métodos de pesquisa e técnicas de simulação, procurando diminuir os custos inerentes a este tipo de análise bem como reduzir o seu tempo de desenvolvimento. Exemplos da aplicação desta metodologia encontram-se descritos em diversos artigos científicos tais como em Irato e Ruspa (1992), Brambilla *et al.* (1992), Ruspa *et al.* (1995), Cerrato e Crewe (1999) e Amnan e Blommer (1999).

4.4.6. Aplicação em veículos

O ruído no interior de um veículo é resultante da combinação do ruído emitido pelo motor, do ruído de rolamento, do ruído do sistema de admissão de ar e de exaustão dos gases de escape, do ruído aerodinâmico, do ruído de diversos componentes, entre outros (Harrison, 2004). Contudo, a sua transmissão para o interior do habitáculo é função da

chamada transmissibilidade aérea e estrutural, vulgarmente designado de ruído aéreo e ruído estrutural.

Diversos estudos têm sido efectuados para calcular os níveis de pressão sonora no interior dos habitáculos em função das diversas variáveis acima identificadas, através do recurso a métodos analíticos, métodos numéricos e métodos experimentais.

Baret *et al.* (1992) analisaram o ruído proveniente do sistema de transmissão dos veículos, comparando as medições efectuadas com as obtidas através de um modelo analítico.

Berta e Braschi (1999) descrevem uma metodologia para estudar as fontes de ruído em veículos ligeiros e comerciais, que consiste em efectuar diversas divisões relativamente aos órgãos do veículo para melhor identificar as fontes, tendo sido identificado que as principais fontes de ruído num veículo podem agrupar-se em três tipos, em função da sua proveniência: motor, transmissão e pneumáticos; componentes do habitáculo e ruído aerodinâmico.

Fish *et al.* (1999) analisaram o ruído de rolamento de diversos veículos, concluindo que a maioria da energia está centrada nas bandas de oitava de 63 a 125 Hz, alertando para as diferenças existentes entre o ruído proveniente do eixo dianteiro e do eixo traseiro.

Lida e George (1999) relatam diversas técnicas para a medição do ruído aerodinâmico externo, a sua transmissão e o ruído interno de veículos, sugerindo que deve ser utilizada a distribuição da intensidade sonora como o método ideal para compreender qual o percurso de entrada do ruído para o habitáculo. Relativamente à quantificação do conforto acústico no interior dos habitáculos sugerem a utilização do índice de articulação como o parâmetro métrico objectivo de avaliação do conforto acústico, sugerindo que valores do índice superiores a 50% conduzem a níveis de conforto dos passageiros. Este autor refere a necessidade de se desenvolver e adoptar um índice que se aproxime às avaliações feitas pelos passageiros.

Existem poucos textos nos quais os veículos em análise são autocarros, tendo Kiraly (1987) descrito a metodologia utilizada numa empresa de autocarros húngara com o objectivo de reduzir o ruído externo e interno dos autocarros, indicando um caso prático de isolamento do habitáculo e materiais utilizados, com vista à diminuição dos níveis sonoros de um modelo de autocarro.

Mais recentemente têm sido publicados diversos trabalhos sobre a utilização do controlo activo do ruído no interior dos veículos, cujo objectivo é gerar ruído artificial com a mesma amplitude mas em oposição de fase e transmiti-lo através de colunas de som para a área dos passageiros, anulando assim ruídos indesejados. Esta técnica é

adequada para as baixas frequências em virtude dos equipamentos de filtragem de geração de sinal apresentarem limitações para as altas frequências.

Para além das análises indicadas, o ruído no interior dos veículos é um dos estímulos de desconforto que apresenta um elevado desenvolvimento, existindo diversas abordagens sobre o mesmo. Existem diversos estudos em curso que têm como objectivo principal tentar obter apenas um índice de conforto/desconforto que caracterize o ruído no interior de veículos.

No trabalho citado anteriormente de Brambilla *et al.* (1992), foi efectuada uma análise acerca das vantagens e desvantagens da realização de ensaios laboratoriais de simulação de ruído no interior de diversos veículos, comparando-os com os resultados subjectivos dos mesmos ensaios mas realizados em pista. Os ruídos foram gravados durante os ensaios em pista sendo, mais tarde, reproduzidos em laboratório. Foram efectuadas três perguntas às pessoas inquiridas acerca do desconforto provocado pelo ruído, do grau de desconforto que o nível de ruído provocaria numa viagem longa e se, nos testes em pista, seria fácil concentrarem-se apenas no ruído que sentiam. As respostas acerca do desconforto eram dadas numa escala de dez pontos: desde zero (nenhum desconforto) até nove (extremamente desconfortável). Na data, provou-se que a utilização das novas tecnologias de gravação poderia ser bastante útil para o desenvolvimento de um índice sobre ruído no interior de veículos. Um facto que sobressaiu dos ensaios foi o de ser aconselhável utilizar, para este tipo de ensaios, condutores mais experientes assim como um ambiente laboratorial que, de certa forma, simule o interior do veículo em análise.

Weisch *et al.* (1997) desenvolveram um índice para quantificar o nível de ruído no interior dos veículos. Este índice foi desenvolvido tendo por base uma regressão linear múltipla entre as respostas subjectivas e os diversos parâmetros objectivos. Segundo os autores, os descritores do ruído vulgarmente utilizados (dB, dB(A), etc.) não representam o ruído real no interior do veículo na medida em que foram desenvolvidos para condições de condução ideais como sejam: asfalto de boa qualidade, sem lombas e sem irregularidades do solo. Em condições reais de funcionamento, surgem outras fontes de ruído que, apesar de não serem dominantes no nível sonoro do veículo, são importantes na análise subjectiva dos passageiros acerca da qualidade sonora no interior do mesmo. Weish, para ultrapassar esta barreira, utilizou um software psico-acústico por forma a criar um índice do ruído interior, baseado em cerca de quarenta veículos diferentes e setenta pessoas que emitiram as respostas subjectivas sendo, o índice obtido através de uma análise de regressão múltipla, dada por:

$$Y_s = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k + e \quad (4.34)$$

onde: Y_s - resposta subjectiva; b_i - coeficientes de ponderação; X_i - parâmetros objectivos (dB, dB(A), dB(B), dB(C), dB(D), *SIL*, etc.); e - resíduo. O índice obtido apresentou elevadas correlações com as respostas subjectivas para cada um dos veículos utilizados.

A situação ideal para a utilização deste índice passa pelo desenvolvimento de um equipamento simples que possa facilmente ser utilizado na avaliação do ruído no interior dos veículos.

Bisping *et al.* (1997) desenvolveram uma escala para quantificar a qualidade do som no interior dos veículos. Foi considerado que essa qualidade pode ser obtida através de diversos factores tais como a potência, o brilho e a resposta impulsiva do ruído. Com base nestes factores, desenvolveram uma escala absoluta e uma relativa concluindo que ambas as escalas fornecem valores estatísticos comparáveis podendo, assim, comparar directamente a escala de "impulsividade" com a escala de "potência".

Tal como já foi referido durante a abordagem às vibrações, actualmente o equipamento mais sofisticado no desenvolvimento de avaliações psico-acústicas consiste em simuladores à escala real do interior de veículos. Já há diversas empresas a comercializar simuladores de vibrações e ruído existindo, no entanto, diversos construtores de veículos que optam por criar os seus próprios simuladores. Na figura 4.36 apresenta-se um esquema de um simulador que reproduz o campo sonoro através do recurso a colunas de som, existindo outros onde se opta por reproduzir os sons, através de auscultadores.

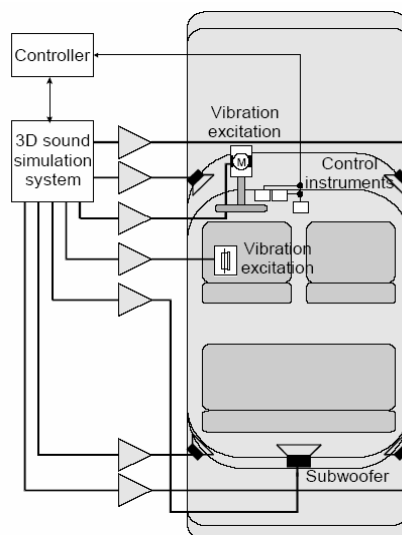


Figura 4.36 Esquema de um simulador vibro-acústico de um habitáculo de veículo (adaptado de Genuit e Bray, 2001)

Também na área da acústica no interior de veículos, o conceito de passageiro virtual, tem sido popularizado na última década em diversos tipos de veículos, com especial ênfase nos veículos ligeiros, comboios e aviões (LMS News (2000), Wilson e Clapper (1999), Leost *et al.* (1999)). O objectivo deste tipo de modelação virtual é permitir simular o habitáculo dos passageiros relativamente ao campo acústico, antes mesmo da construção do primeiro protótipo. A validação deste tipo de aplicações informáticas é feita em conjunto com a construção de simuladores reais, descritos anteriormente, onde os passageiros são expostos às condições acústicas permitindo assim desenvolver métodos subjectivos de avaliação.

4.5. Qualidade do ar

4.5.1. Sistema sensorial humano

A qualidade do ar está intimamente ligada ao sistema olfativo. O epitélio olfativo humano contém cerca de 20 milhões de células sensoriais, cada qual com seis pêlos sensoriais.

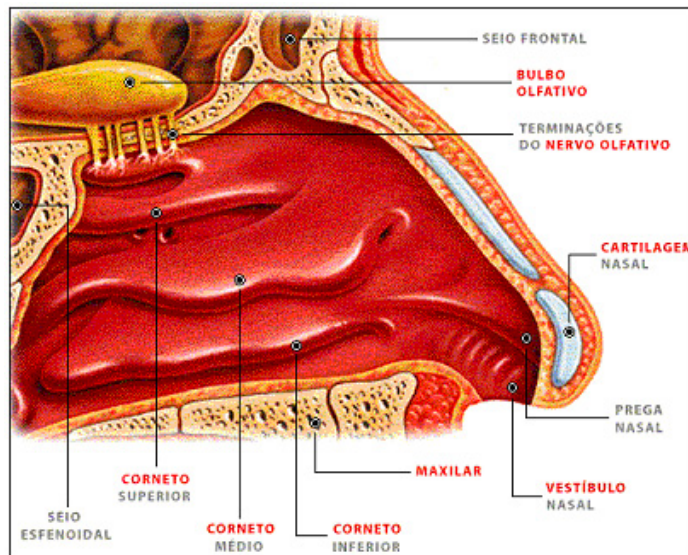


Figura 4.37 Cavidade nasal

A cavidade nasal, representada na figura 4.37, começa a partir dos orifícios nasais do nariz, contendo no seu interior os órgãos do sentido do olfacto, e é forrada por um epitélio secretor de muco. Ao circular pela cavidade nasal, o ar é purificado, aquecido e humedecido. O órgão olfativo designa-se por mucosa e forra a parte superior das fossas nasais, sendo por vezes chamada de mucosa olfactiva ou amarela, para se distinguir da

mucosa vermelha que forra a parte inferior (ver figura 4.38). A mucosa vermelha é dessa cor por ser muito rica em vasos sanguíneos, e contém glândulas que segregam muco, mantendo a região húmida.

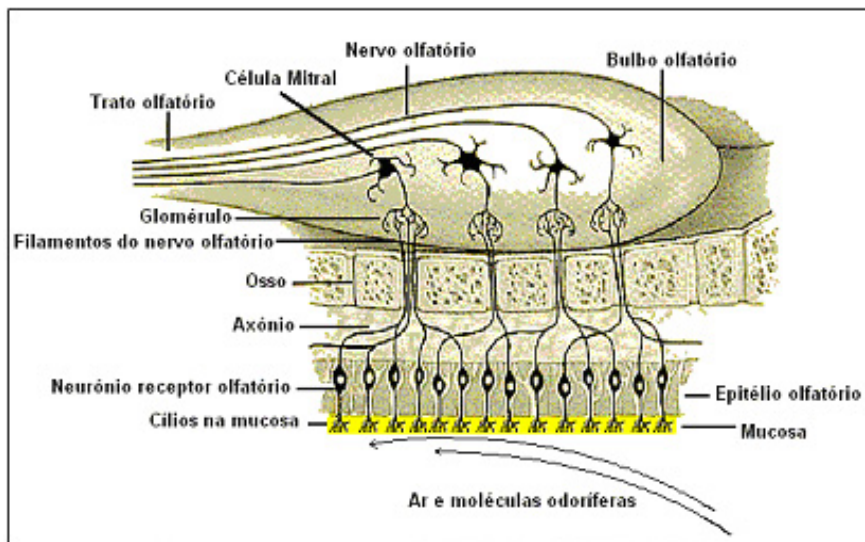


Figura 4.38 Sistema sensorial olfativo

A mucosa amarela é muito rica em terminações nervosas do nervo olfativo. As dendrites das células olfativas possuem prolongamentos sensíveis, designados de pêlos olfativos, que ficam mergulhados na camada de muco que recobre as cavidades nasais. Os produtos voláteis ou provenientes de gases perfumados bem como as substâncias lipossolúveis que se desprendem de diversas substâncias, ao serem inspirados, entram nas fossas nasais e dissolvem-se no muco que impregna a mucosa amarela, atingindo os prolongamentos sensoriais. Dessa forma, geram-se impulsos nervosos, que são conduzidos até ao corpo celular das células olfativas, de onde atingem os axónios e que comunicam com o bulbo olfativo. Os axónios estão agrupados entre 10 a 100 e penetram no osso etmóide para chegar ao bulbo olfativo, onde convergem para formar estruturas sinápticas chamadas glomérulos, que constituem grupos de ligações que convergem para as células mitrais. Fisiologicamente essa convergência aumenta a sensibilidade olfativa que é enviada ao sistema nervoso central, onde o processo de sinalização é interpretado e decodificado.

Actualmente, é aceite a teoria de que existem alguns tipos básicos de células do olfacto, cada uma com receptores para um determinado tipo de odor. De acordo com tal teoria, os milhares de cheiros diferentes que uma pessoa consegue distinguir resultam da integração de impulsos gerados por cerca de cinquenta estímulos básicos, no máximo. A integração desses estímulos seria feita numa região localizada em áreas laterais do córtex cerebral, que constituem o centro olfativo.

A mucosa olfactiva é tão sensível que poucas moléculas são suficientes para a estimular, produzindo a sensação de odor. A sensação será tanto mais intensa quanto maior for a quantidade de receptores estimulados, o que depende da concentração da substância odorífera no ar.

O olfacto tem também um importante papel na distinção dos alimentos. Enquanto mastigamos, sentimos simultaneamente o paladar e o cheiro. Do ponto de vista adaptativo, o olfacto tem uma nítida vantagem em relação ao paladar: não necessita do contacto directo com o objecto percebido para que haja a excitação, conferindo maior segurança e menor exposição a estímulos lesivos.

O olfacto, como a visão, possui uma enorme capacidade adaptativa. No início da exposição a um odor muito forte, a sensação olfactiva pode ser bastante forte, mas, após um minuto, aproximadamente, o odor será quase imperceptível.

Porém, ao contrário da visão, que é capaz de reconhecer um grande número de cores ao mesmo tempo, o sistema olfactivo detecta a sensação de um único odor de cada vez. Contudo, um odor percebido pode ser a combinação de diferentes odores. Se tanto um odor pútrido quanto um aroma doce estiverem presentes no ar, o dominante será aquele que for mais intenso, ou, se ambos forem da mesma intensidade, a sensação olfactiva será algo entre doce e pútrida.

4.5.2. Índices, normas e métodos de medição

Até finais da década de 80, as recomendações existentes para o cálculo de sistemas de ventilação e ar condicionado, como seja a norma ASHRAE 62 de 1989, estabeleciam o número de renovações de ar necessário para um dado espaço, em função do tipo de utilização e do número de ocupantes previstos para o mesmo. Desta forma, os ocupantes eram considerados como os únicos responsáveis pela geração de poluentes sendo, ainda assim, consideradas duas situações consoante se esperasse ou não a presença de indivíduos fumadores. Os trabalhos de vários autores, alguns dos quais motivados pelas situações actualmente designadas por "síndrome do edifício doente" foram, entretanto, chamando a atenção para a necessidade de considerar outras formas de poluição. Entre eles, podem citar-se Fanger (1988a) e Grieve (1991). Por isso, nas últimas décadas a qualidade do ar interior e exterior estão na ordem do dia.

A permanência de pessoas em espaços confinados com ausência de ventilação adequada origina uma degradação da qualidade do ar no interior dos mesmos. Esta perda de qualidade do ar é devida, principalmente, à libertação de gases bioefluentes resultantes dos processos respiratórios. Pode, no entanto, derivar de outras causas que

também podem contribuir para a carga poluente do ar em recintos interiores, como sejam: a humidade, os produtos derivados de combustão, os compostos orgânicos voláteis, as partículas e fibras, os bioaerossóis (alergénios e patogénicos), o formaldeído e o gás radioactivo rádon. As três vias para alcançar uma boa qualidade do ar no interior de um dado compartimento são: reduzir a carga poluente a que ele está sujeito, utilizar filtros ou um sistema de ventilação que garanta uma eficaz remoção dos contaminantes mediante um número adequado de renovações do volume de ar por unidade de tempo.

Segundo Yontz (2003), os poluentes do ar interior podem dividir-se em dois tipos: agentes microbiológicos e agentes químicos. Nos agentes microbiológicos incluem-se as bactérias, os fungos, os vírus, as pequenas poeiras, e produtos metabólicos derivados dos mesmos. Nos agentes químicos incluem-se os compostos orgânicos voláteis (VOCs), o ozono, o dióxido de carbono, o monóxido de carbono, o rádon, etc.

Brown (1997) dividiu os indicadores da qualidade do ar no interior de recintos fechados nos seguintes grupos:

- indicadores do nível de ventilação: temperatura, humidade e dióxido de carbono;
- indicadores de poluentes: monóxido de carbono, formaldeídos, dióxido de azoto, ozono;
- indicadores multi-poluentes: VOCs, partículas.

Existe outra abordagem relativamente à divisão dos indicadores do nível da qualidade do ar interior, sugerida por diversas entidades, que consiste na sua divisão em apenas duas classes: uma primeira, relativa aos indicadores de conforto/nível de ventilação, e uma segunda classe, agrupando indicadores específicos sobre a fonte de poluentes. Nesta abordagem, os indicadores de conforto sugeridos dizem respeito a uma análise do conforto térmico, enquanto que a ventilação diz respeito à monitorização da concentração do dióxido de carbono numa perspectiva da necessidade de fornecimento de ar fresco. Relativamente aos indicadores de fonte de poluição, estes consistem na realização de medições com vista a identificar ou monitorizar as fontes de poluição, tais como sejam o rádon, o fumo do tabaco, partículas suspensas respiráveis, poeiras contaminantes microbiológicas, formaldeído, compostos orgânicos voláteis, pesticidas, dióxido de azoto, monóxido de carbono, dióxido de carbono ou ozono.

Ao contrário de outros sentidos, o sistema olfactivo humano descrito na secção 4.5.1 apresenta maior dificuldade na sua substituição por processos analíticos baseados em sensores. Na verdade, são utilizados diversos métodos de forma complementar para avaliar a qualidade do ar interior, em virtude de não existir um índice que quantifique a qualidade do ar em recintos fechados. Actualmente, a qualidade do ar é vulgarmente expressa através do nível de ventilação prescrito ou pela concentração de dióxido de

carbono. Os critérios mais difundidos são os relacionados com a saúde e com o conforto. Regra geral, os critérios estabelecidos para a saúde do sistema respiratório são obtidos caso o espaço cumpra os requisitos de ventilação estabelecidos para o nível de conforto. Os efeitos da saúde estão sobretudo relacionados com as concentrações dos poluentes sendo por vezes o critério de conforto mais associado à percepção da qualidade do ar relativo a odores e irritações. Na norma CEN prEN15251 (2005), cujo texto final ainda não foi publicado, consideram-se três critérios distintos relativamente à qualidade do ar em recintos fechados:

- o nível de ventilação em função dos bioefluentes libertados pelas pessoas e poluentes emitidos no espaço considerado;
- o nível de ventilação em função do número de pessoas ou por metro quadrado do recinto, sendo apenas considerados, como fontes de poluentes, os ocupantes;
- o nível de ventilação baseado num balanço de massa relativamente aos níveis de concentração de CO₂.

Em Portugal, foi aprovado no dia 4 de Abril de 2006, pelo Decreto-Lei nº 79/2006, o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE). Este diploma é sobretudo orientado para os edifícios de serviços, tendo como preocupação básica a actuação ao nível dos edifícios com climatização e com consumos de energia elevados, moderando-os e melhorando a qualidade dos sistemas energéticos nesses edifícios. O RSECE aumenta ainda as exigências ao nível do dimensionamento e manutenção das instalações de equipamentos e seu funcionamento e das auditorias à qualidade do ar interior em edifícios climatizados, estabelecendo índices e parâmetros de caracterização energética dos edifícios e da qualidade dos sistemas de climatização. Relativamente à qualidade do ar, os critérios utilizados neste regulamento baseiam-se na taxa de renovação do ar em função do número de ocupantes ou em função da área dos espaços em análise, bem como na indicação das concentrações máximas de referência de diversos poluentes (partículas suspensas no ar, dióxido de carbono, monóxido de carbono, ozono, formaldeído e VOCs) no interior de edifícios.

Existem outras hipóteses de avaliar a qualidade dos processos de ventilação através de processos de modelação (física ou numérica) e de métodos designados por descritivos. A modelação física consiste na simulação laboratorial, em modelos à escala real ou reduzida, dos fenómenos em estudo, acompanhada da medição exaustiva das grandezas físicas relevantes (p. ex.: a temperatura, a velocidade do ar, etc.). Os processos de modelação numérica correspondem à resolução, por via computacional, das equações que regulam o comportamento dos escoamentos em causa. Quanto aos métodos descritivos, eles baseiam-se na determinação de grandezas às quais pode ser

reduzida a qualidade dos processos como sejam, por exemplo, a taxa de renovação, a idade do ar e a eficiência de ventilação.

Para a utilização dos métodos descritivos, torna-se necessária a medição da concentração de gases no interior dos espaços em análise recorrendo-se, normalmente, à utilização de gases traçadores que têm por objectivo “traçar” isto é, seguir os movimentos do ar. Como traçadores, devem ser usados gases normalmente não presentes no ar atmosférico ou de muito baixa concentração no mesmo. Estes gases não devem ser tóxicos ou inflamáveis nem ser, nas concentrações utilizadas, prejudiciais para a saúde, nem devem igualmente ser absorvíveis pelas paredes ou acessórios existentes no interior do compartimento. Além destas características, estes gases devem apresentar uma massa específica muito próxima da do ar ou do poluente cujo comportamento se pretende estudar, para seguirem, de forma o mais aproximada possível, os fenómenos em análise. As características do espaço e dos processos estudados condicionam a opção por um dos três métodos de realização dos ensaios experimentais: método do decaimento da concentração, método da concentração crescente e método da concentração constante.

Assim, a medição da concentração de diversos gases é um método bastante comum na análise da qualidade do ar, em virtude da sua importância na composição do ar de forma equilibrada para a respiração do ser humano em termos da sua saúde, desempenho e conforto. Os sistemas de medida mais utilizados neste tipo de análise baseiam-se na espectroscopia de emissão e absorção de infra-vermelhos.

A partir da evolução temporal da concentração dos gases traçadores, é possível determinar um conjunto de parâmetros que caracterizam, na sua globalidade, os processos de ventilação, tais como: a taxa de renovação, a idade do ar e a eficiência de ventilação. A concentração dos gases traçadores pode ser calculada, num recinto fechado, através de um simples balanço de massa, expresso na equação 4.35 (Grieve, 1991):

$$V \frac{dC(t)}{dt} = \dot{m} + QC_0 - QC(t) \quad (4.35)$$

onde:

- V - volume de ar [m^3]
- C - concentração do gás traçador [mg/m^3]
- C_0 - concentração inicial do gás traçador [mg/m^3]
- t - tempo [s]
- \dot{m} - caudal de emissão de gás traçador [mg/s]
- Q - taxa de renovação de ar [mg/s]

A taxa de renovação de um recinto é definida como sendo a relação entre o volume de ar que entra num determinado espaço por unidade de tempo e o seu volume efectivo. Vulgarmente, esta grandeza é definida comparativamente ao período temporal correspondente a uma hora, que consiste em determinar o volume de ar fresco que substitui o ar interior durante uma hora. A grandeza inversa designa-se de constante do ar (Z_n). A taxa de renovação de ar de um espaço (Q) pode ser definida pela expressão 4.36, onde V representa o volume do espaço e n o número de renovações num determinado período de tempo.

$$Q = n V \quad (4.36)$$

Utilizando o método de decaimento da concentração no registo da evolução do decaimento do gás traçador, previamente libertado e diluído no compartimento em estudo, a taxa de renovação de ar pode ser obtida pela seguinte equação:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{C_{t+1}}{C_i}\right) - \ln\left(\frac{C_t}{C_i}\right)}{\Delta t} \quad (4.37)$$

onde:

- C_t - concentração do gás no instante t
- C_i - concentração do gás no instante inicial
- Δt - intervalo de tempo definido entre os instantes t e $t+1$

Na figura 4.39, apresenta-se o registo da evolução temporal dos decaimentos da concentração de um gás traçador para duas velocidades dos extractores que equipam um autocarro urbano. O valor da taxa de renovação n pode ser obtido a partir do simétrico do expoente da curva de regressão exponencial aplicada aos pontos experimentais. Por seu lado, na figura 4.40 pode observar-se a mesma evolução utilizando no eixo das ordenadas os valores dos logaritmos dos valores adimensionalizados da concentração do gás traçador. Neste tipo de representação, a taxa de renovação pode ser obtida a partir do simétrico do declive da recta de regressão linear dos pontos experimentais.

Qualquer um dos métodos referidos, para determinar a taxa de renovação de ar de um compartimento, encontra-se descrito de um modo detalhado em Sandberg e Sjoberg (1983), Roulet (1991), Sandberg (1993) ou Sateri (1992).

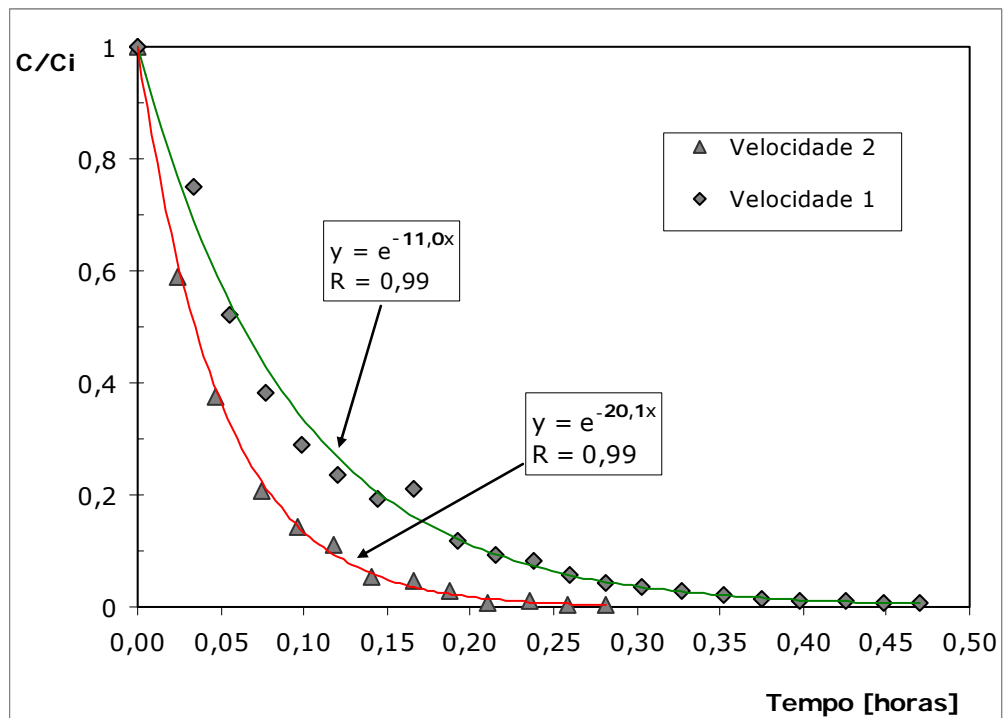


Figura 4.39 Decaimento da concentração do gás traçador durante ensaios efectuados num autocarro urbano para duas velocidades de extracção

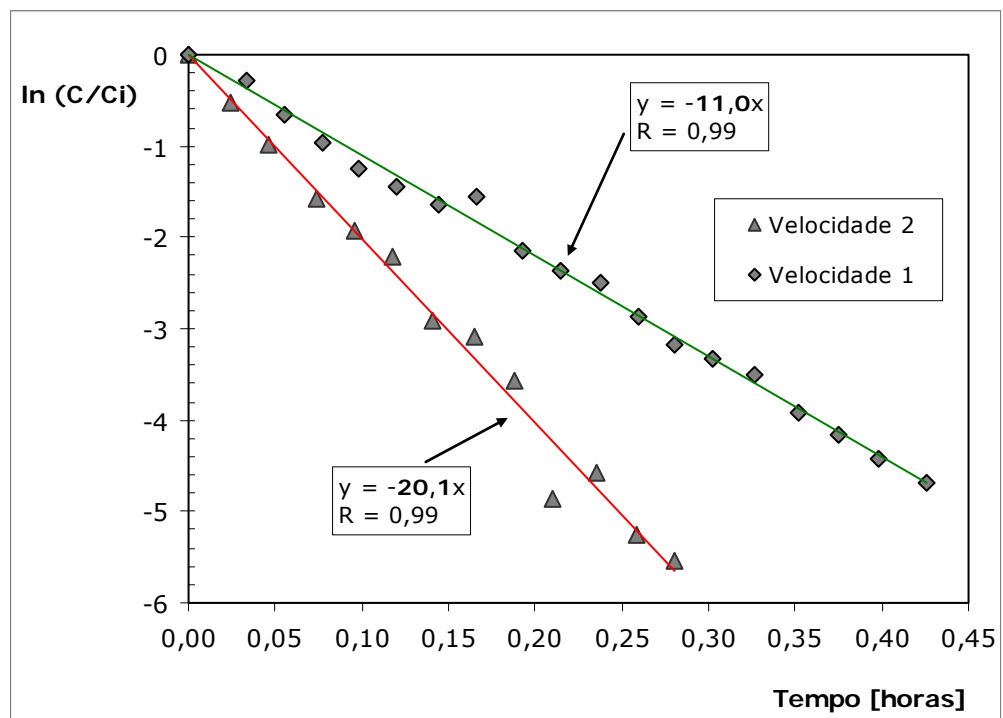


Figura 4.40 Decaimento da concentração do gás traçador durante ensaios efectuados num autocarro urbano para duas velocidades de extracção

Outro indicador da qualidade do ar é a idade do ar que pode ser definida, para uma determinada partícula, como sendo o tempo que a mesma demorou a percorrer um determinado percurso no interior do recinto em análise. Em virtude da existência de diversas partículas, que podem percorrer caminhos distintos, relativamente a um ponto,

é utilizada a idade média local do ar, como uma média das partículas que chegam a esse ponto. As expressões para calcular a idade do ar, bem como a eficiência de ventilação, encontram-se descritas em Conceição *et al.* (1997).

Jokl (1998), baseado na referida lei de Fechner (equação 2.1) onde a resposta subjectiva é proporcional ao logaritmo do estímulo físico imposto, propôs duas novas grandezas para a avaliação da qualidade do ar em recintos fechados, através do conceito de decibel, baseadas na concentração de CO₂ e de compostos orgânicos voláteis: o decicarbdiox e o decitvoc. De acordo com a escala sugerida por Yaglou (Fanger e Berg-Munch, 1983), ao limiar de percepção em termos de odores é atribuído um valor unitário, correspondendo a este, um limite de satisfação das pessoas de 5,8% que, sendo aplicado aos limites de percepção de CO₂ e de VOCs, obtém, como valor limite inferior de satisfação: (1) um limiar de percepção da concentração de CO₂ igual a 485 ppm, a que corresponde o valor de 0 dB, ou seja, 0 dCd (decicarbdiox), e (2), um limiar da concentração de VOCs de 50 µgm⁻³, a que corresponde o valor de 0 dB, ou seja, 0 dTv (decitvoc). Os limites superiores foram determinados em função dos valores limite de toxicidade, sendo: (1) para o CO₂ são 15000 ppm, a que correspondem 134 dCd, e (2) para os VOCs são 25000 gm⁻³, que dá 135 dTv. Estas grandezas foram adaptadas de acordo com o nível de satisfação sugerido na escala da recomendação existente na norma EUR 14449 EN (ver figura 4.41) sendo compatível com a norma BSR/ASHRAE 62-1989 R. Estes conceitos procuram estabelecer um paralelismo com a avaliação da pressão sonora através do nível de pressão sonora adimensionalizado na escala de decibéis. Na figura 4.42 apresentam-se as escalas de conforto relativo à qualidade do ar baseadas na concentração de CO₂, sugeridas por este autor.

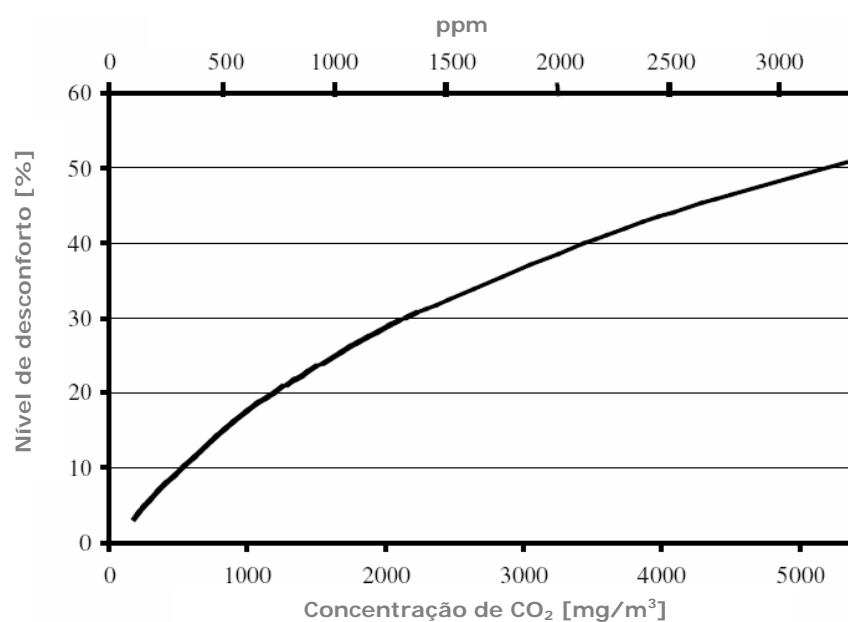


Figura 4.41 Nível de desconforto em função da concentração de CO₂ (EUR 14449 EN)

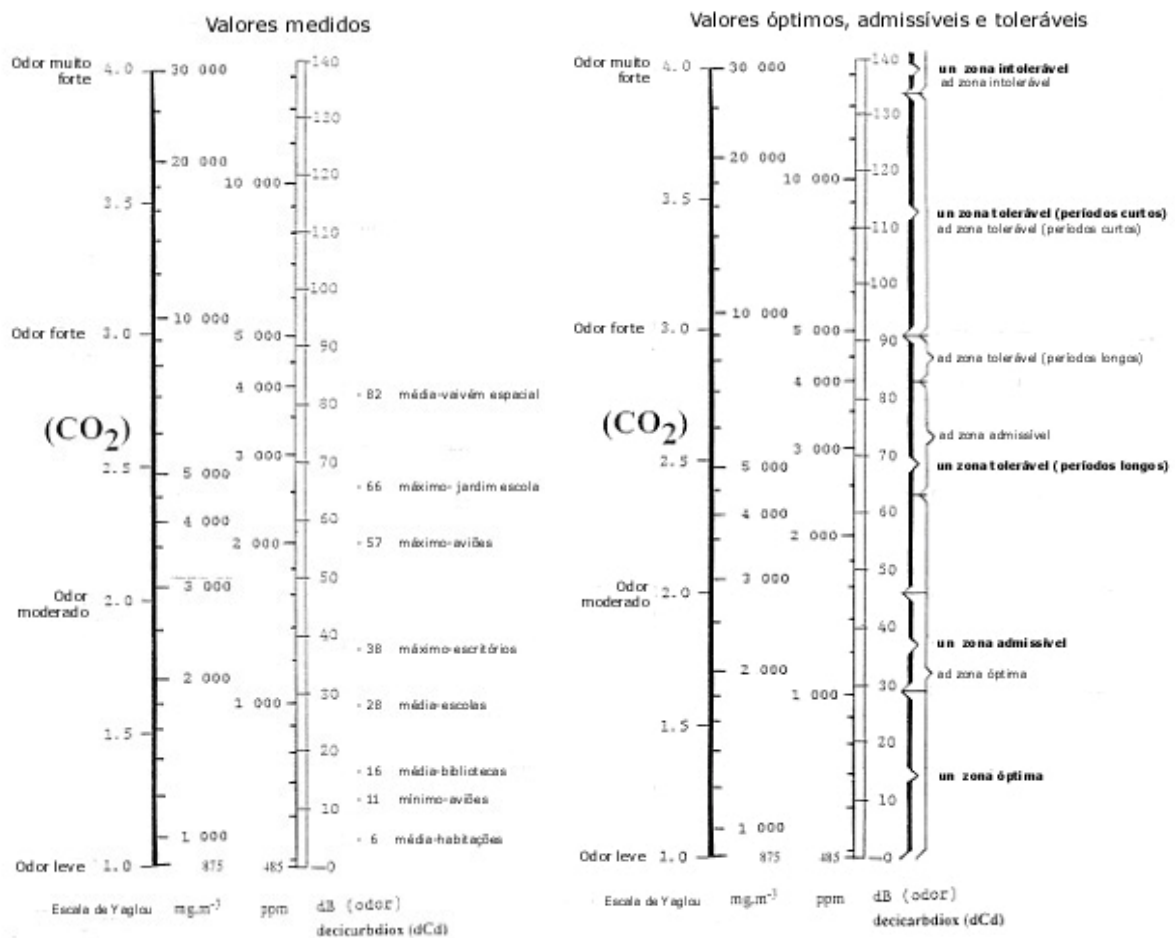


Figura 4.42 Valores de CO₂ medidos e escala de desconforto de qualidade do ar para pessoas adaptadas (ad) e pessoas não adaptadas (un) ao ambiente (adaptado de Jokl, 1998)

Dado que a percepção olfactiva humana, ao contrário de alguns dos outros sentidos, ainda é dificilmente substituível por processos analíticos baseados em sensores, a única forma de medir a qualidade do ar é através do recurso a painéis de avaliadores.

Fanger propôs, entretanto, uma metodologia de avaliação que utiliza como unidade para quantificação da carga poluente o "olf", que representa a taxa de emissão de uma pessoa standard. Esta pessoa é um adulto trabalhador que tem higiene padrão de 0,7 banhos por dia e que se sente termicamente neutro. Todas as outras fontes de carga poluente são expressas de uma forma equivalente, ou seja, a partir do número de pessoas padrão. Para a qualidade do ar, a unidade considerada foi designada por "decipol" representando o seu valor unitário a qualidade do ar que resulta da situação em que um indivíduo padrão é ventilado com um caudal de 10 l/s de ar não poluído. Os ambientes são classificados, conforme o nível de qualidade requerido, em A, B e C, para os quais as percentagens de pessoas insatisfeitas são, respectivamente, de 10, 20 e 30%. A estas percentagens de insatisfeitos correspondem, de acordo com uma expressão analítica determinada por Fanger, a partir das avaliações subjectivas de 168 pessoas, ambientes com uma qualidade do ar de 0,6, 1,4 e 2,5 decipols.

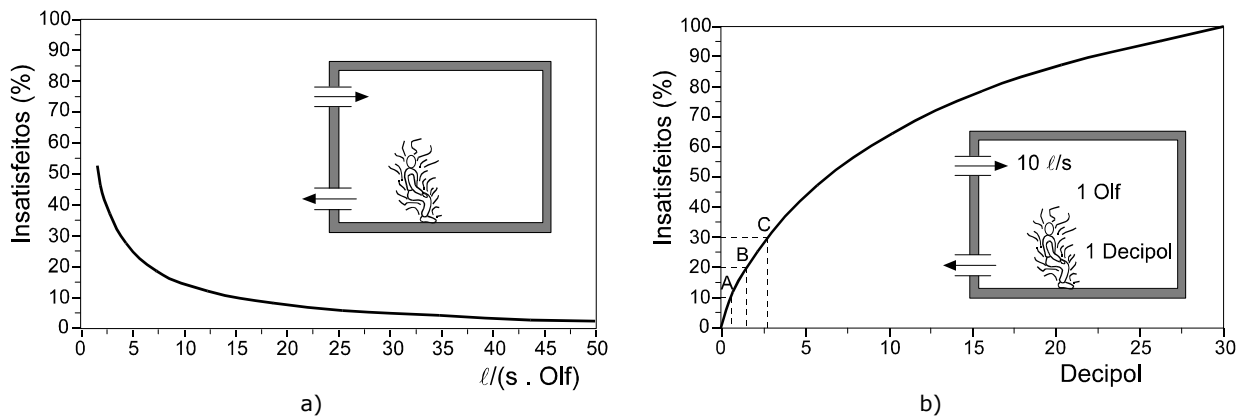


Figura 4.43 Evolução da percentagem de pessoas insatisfeitas em função do caudal volumétrico de ar não poluído vindo do exterior (a) e, em função da poluição do ar no interior do compartimento (b)

A curva da figura 4.43 a) é descrita pela seguinte expressão:

$$\begin{cases} PD = 395 \exp(-1,83 q^{0,25}) & \text{para } q = 0,32 \text{ l s}^{-1} / \text{pessoa} \\ PD = 100 & \text{para } q < 0,32 \text{ l s}^{-1} / \text{pessoa} \end{cases} \quad (4.38)$$

Uma comparação detalhada das mais importantes normas internacionais relativamente à avaliação da qualidade do ar interior, foi feita por Olesen (1997), onde estão incluídas: a norma ASHRAE 62-1989 revista em 1996, a proposta europeia CEN prENV 1752 (1996), a norma britânica CIBSE Guide A (1993), a norma alemã DIN 1946 parte 2 (1995), e a nórdica NKB-61 (1991). Todas estas normas incluem um procedimento de cálculo para determinar a taxa de renovação de ar mínima baseada, quer num critério de conforto, quer num critério de saúde. Existe uma versão actualizada da recomendação europeia com a referência CEN CR 1752 (1998).

4.5.3. Aplicação em veículos

Muitas das análises revelam, tal como sucedeu com outros estímulos, a tentativa de aplicar nos habitáculos dos veículos, os métodos de análise desenvolvidos para o interior de edifícios.

Cocchi (1992) aplicou a equação de conforto desenvolvida por Fanger (1988a) ao habitáculo de um veículo com quatro passageiros, considerando uma eficiência de ventilação de 100 % e o ar externo poluído com 0,2 decipols. No caso de não existirem fumadores e, com o objectivo de se obter uma percentagem de insatisfeitos de 10 %, o caudal de ventilação teria que ser de 50 l/s ou seja, 180 m³/h. No entanto, se dois

passageiros fumassem, estes valores passariam para 72 e 260 l/s, respectivamente. Existe, no entanto, outro critério que tem de ser respeitado por forma a que se consiga obter o conforto térmico, correspondendo, esse critério, a uma velocidade do ar, perto dos passageiros, de 0,15 m/s. Partindo desta premissa, a velocidade à saída dos injectores não poderia ser superior a 0,5 m/s o que, para 50 l/s corresponde a 1 m² de área de entrada do ar.

Pese embora não se tratar de um estudo em condições reais Chen e Dalhuijsen (1992), desenvolveram um modelo matemático de modo a calcular a percentagem de desconforto dos passageiros, utilizando o índice de resfriamento e a equação de conforto desenvolvida por Fanger em relação à qualidade do ar. O modelo de previsão para o conforto térmico baseia-se na equação de resfriamento da ISO 7730 onde são utilizados, como parâmetros de análise, a velocidade do ar local, a temperatura do ar e a intensidade de turbulência. Para calcular o desconforto sentido pelos ocupantes devido à qualidade do ar são utilizadas as unidades do olf e decipol. O método matemático apresentado calcula o campo de velocidades, de temperaturas, da intensidade de turbulência e o campo de percepção da qualidade do ar, para o interior de habitáculos, sendo possível alterar as várias configurações em termos das entradas e saídas do ar.

Meyer *et al.* (1995) efectuaram, num projecto conjunto entre a Valeo e a Renault, uma análise dos odores existentes no habitáculo de veículos ligeiros. O método usado foi a utilização de um painel de avaliadores treinados especificamente para este efeito. A técnica de utilização destes avaliadores é muito aplicada na área dos perfumes. O estudo incidiu na avaliação feita pelo painel dos avaliadores acerca da utilização de um filtro na unidade de ar condicionado em comparação com uma situação de odor simulada com placebo. Os resultados sugerem que a utilização destes avaliadores pode ser de grande utilidade servindo, como análise subjectiva, para uma comparação com métodos objectivos.

Conceição *et al.* (1997) publicaram um texto acerca da utilização do método de decaimento da concentração de gases traçadores para avaliar o desempenho de um sistema de ventilação de um autocarro interurbano, baseado numa conduta de extracção onde o escoamento é induzido pela diferença de pressão, devido ao deslocamento do veículo, entre as secções de entrada e saída. Neste artigo são também apresentados diversos critérios a impor nos sistemas de ventilação dos autocarros relativos ao número de renovações por hora, sendo que o critério mais exigente relativo ao conforto implica a existência de 85,2 renovações de ar por hora no Verão e 65,5 renovações por hora no Inverno. Nas medições efectuadas, em condições reais de funcionamento, obtiveram valores médios entre 12 a 13 renovações de ar por hora.

Alcobia e Silva (1999), apresentaram resultados de medidas com um sensor electroquímico de qualidade do ar, sensível a bioefluentes gasosos, tabaco, e outros odores, na área dos passageiros de um autocarro urbano de transporte público, que estão reproduzidos na figura 4.44. A evolução temporal do número de ocupantes do autocarro também é descrita na mesma figura. Tal como se pode ver nesta figura, a qualidade do ar indicada pelo sensor acompanha a evolução da taxa de ocupação do veículo com o natural tempo de resposta associado à evolução da concentração dos poluentes.

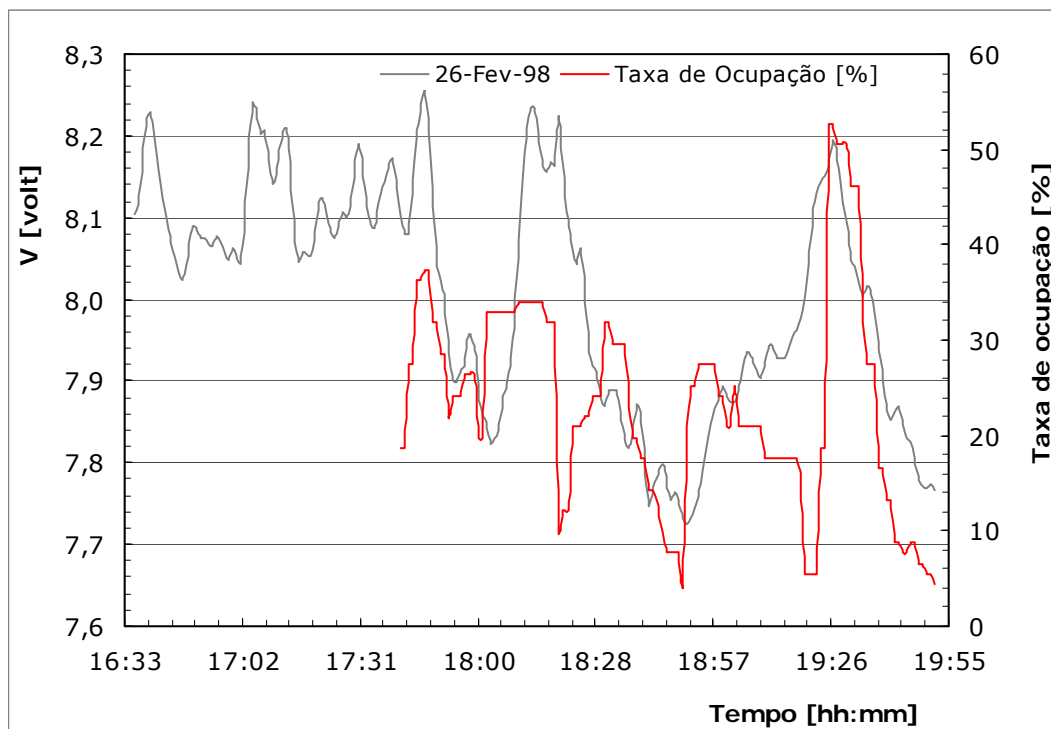


Figura 4.44 Evolução temporal da concentração de poluentes (medidos através de um sensor electroquímico) em função da taxa de ocupação

Janckzewski (1999) e Pierce *et al.* (1999), efectuaram uma análise, com o apoio da ASHRAE, para avaliar a qualidade do ar no interior dos aviões. O projecto consistiu em avaliações subjectivas efectuadas pelos passageiros e em diversas medições objectivas das concentrações de diversos poluentes: CO, CO₂, O₃, VOCs, formaldeído, partículas, entre outros. Foram efectuados um total de oito voos com 930 passageiros, não tendo dos mesmos resultado quaisquer conclusões definitivas tendo, no entanto, sido obtidos valores de alguns parâmetros objectivos que indicam não existirem situações de risco para os passageiros e tripulação.

Wargocki *et al.* (2000) obtiveram elevadas correlações entre o nível da qualidade do ar em edifícios comerciais e o desempenho de trabalhadores em algumas tarefas onde são requeridos elevados níveis de concentração. Será de esperar que relativamente ao

desempenho na condução de veículos o mesmo suceda, com a melhoria de segurança rodoviária inerente.

Na Austrália, Galatsis *et al.* (2000) estudaram o modo como a qualidade do ar no interior de um veículo ligeiro afecta a fadiga e a prevenção de acidentes. Para além do desenvolvimento de um sistema de monitorização da qualidade do ar interior, outro objectivo deste trabalho foi a identificação de situações que provocam uma reduzida qualidade de ar e o desenvolvimento de limites e algoritmos de sensação para a monitorização da qualidade do ar. A ideia destes autores era desenvolver um sistema de alarme baseado na monitorização contínua dos níveis de oxigénio e monóxido de carbono por forma a alertar o motorista ou activar algum procedimento automático (abertura das janelas, desligar do motor, etc) para evitar riscos de saúde para os ocupantes dos veículos, já que o número de mortes das pessoas em veículos provocados por intoxicação justifica este tipo de actuação.

Chow (2002) apresenta a aplicação dos critérios de ventilação para os comboios de Hong-Kong por forma a serem obtidos ambientes com baixo nível de concentração de dióxido de carbono. A análise é baseada na norma ASHRAE 62-1989 com uma taxa de ventilação de $8,0 \text{ l s}^{-1}$ ($28,8 \text{ m}^3/\text{h}$) por pessoa, recomendada para veículos, salas de espera e plataformas de transporte. Esta análise é feita de acordo com os índices descritos anteriormente ou seja, a taxa de renovação de ar e a idade do ar.

Carine *et al.* (2004) efectuaram diversos testes acerca da qualidade do ar no interior de veículos ligeiros, tendo concluído que o nível de poluição no habitáculo é sobretudo influenciado pela intensidade de tráfego, nível metabólico dos passageiros e emissão dos materiais existentes no seu interior. Estas condições não são fáceis de reproduzir em laboratório, constituindo tal facto um desafio no desenvolvimento quer de sistemas quer de índices de avaliação.

O Departamento de Protecção Ambiental de Hong-Kong publicou em 2003 uma série de recomendações acerca da qualidade do ar nos autocarros e nas estações. O indicador eleito é o CO_2 , atendendo ao facto de a sua concentração ser um bom indicador da eficácia do sistema de ventilação. São estabelecidos dois níveis para a concentração de CO_2 no interior dos autocarros relativos a uma média horária:

Nível 1 - autocarro confortável (2500 ppm (4500 mg/m^3))

Nível 2 - níveis limites sem risco para a saúde (3500 ppm (6300 mg/m^3))

Em Portugal, o critério que tem sido vulgarmente utilizado, em termos de projecto de renovações de ar relativamente a veículos urbanos de transporte de passageiros, baseia-se na recomendação da UITP ("International Association of Public Transport"), que consiste num valor mínimo de 12 renovações de ar por hora, com o veículo imobilizado. Considerando um autocarro típico urbano com um volume interior de aproximadamente

63 m³ e uma capacidade total de 85 passageiros, o critério que tem sido utilizado nas últimas décadas está a impor cerca de 2,47 ls⁻¹ (8,9 m³/h) por passageiro. Utilizando a expressão 4.38, a este valor corresponde um nível de insatisfeitos de 39,8%. Este valor de renovações de ar imposto, quando comparado com a citada proposta de norma europeia apresenta valores muito baixos, pois o critério mínimo indicado nesta é de 4 ls⁻¹ (14,4 m³/h) por pessoa (30% de insatisfeitos), o que para o autocarro considerado corresponderia a 19,4 renovações por hora. Face a estes dados, julga-se necessária uma intervenção ao nível da ventilação interior destes veículos por forma a incrementar a qualidade de ar no seu interior.

4.6. Luminosidade

4.6.1. Luz

A luz pode ser definida como sendo a radiação electromagnética pulsante num comprimento de onda sensível ao olho humano, ou num sentido mais geral, como sendo qualquer radiação electromagnética que se situa entre as gamas infravermelho e ultravioleta. As três grandezas físicas básicas da luz (e de toda a radiação electromagnética) são: o brilho (ou amplitude), a cor (ou frequência) e a polarização (ou ângulo de vibração). Devido à dualidade onda-partícula, a luz exhibe simultaneamente propriedades quer de ondas quer de partículas. A luz visível é a parte do espectro com comprimentos de onda no ar entre cerca de 400 e 700 nanómetros (ver figura 4.45).

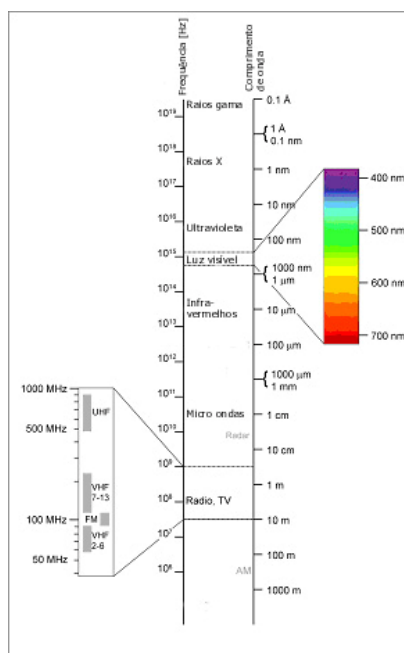


Figura 4.45 Espectro electromagnético

Um raio de luz é a representação da trajectória da luz num determinado espaço, e a sua representação indica de onde a luz sai (fonte) e para onde ela se dirige. Propagando-se num meio homogéneo, a luz percorre sempre trajectórias rectilíneas, descrevendo somente em meios heterogéneos, outras trajectórias.

4.6.2. Sistema sensorial humano

Os globos oculares estão alojados dentro de cavidades ósseas denominadas órbitas, sendo compostos por três túnicas e quatro meios transparentes. As túnicas de cada globo ocular são:

- a túnica fibrosa externa, designada de esclerótica (zona branca do olho), é resistente, feita de tecido fibroso e elástico que envolve externamente o olho (globo ocular). A maior parte da esclerótica é opaca e chama-se esclera, onde estão inseridos os músculos extra-oculares que movem os globos oculares, sendo a parte anterior da esclerótica designada de córnea que é transparente e actua como uma lente convergente;
- a túnica intermédia vascular pigmentada, designada de úvea. Compreende a coróide, o corpo ciliar e a íris. A coróide está situada abaixo da esclerótica e é constituída por inúmeros pigmentos para permitir que a luz chegue à retina, evitando assim a sua reflexão. A íris, que é uma estrutura muscular de cor variável é dotada de um orifício central cujo diâmetro varia, de acordo com a iluminação do ambiente, que se designa por pupila. A coróide une-se na parte anterior do olho ao corpo ciliar, que é uma estrutura formada por músculos lisos e que envolvem o cristalino, modificando a sua forma;
- a túnica interna nervosa, designada de retina. É a membrana mais interna e está debaixo da coróide. É composta por várias camadas de células, designadas de acordo com a sua ligação ao centro do globo ocular. A camada mais interna, denominada camada de células ganglionares, contém os corpos celulares das células ganglionares, que é a única fonte de sinais de saída da retina, através dos axónios do nervo óptico. Na retina encontram-se dois tipos de células fotossensíveis: os cones e os bastonetes, que quando são excitados pela energia luminosa, estimulam as células nervosas adjacentes, gerando um impulso nervoso que se propaga pelo nervo óptico.

A imagem fornecida pelos cones é mais nítida e mais rica em detalhes. Há três tipos de cones: um que se excita com a luz de cor vermelha, outro com luz de cor verde e o terceiro, com luz de cor azul. Os cones são as células capazes de distinguir cores. Os bastonetes são mais sensíveis à luz que os cones, sendo a visão exclusivamente dependente destes em situações de pouca luminosidade.

Há duas regiões especiais na retina: a fóvea central (ou fóvea ou mancha amarela) e o ponto cego. A fóvea está no eixo óptico do olho, onde se projecta a imagem do objecto focalizado, constituindo a região da retina especializada para a visão de alta resolução. A fóvea contém apenas cones e permite que a luz atinja os fotorreceptores sem passar pelas demais camadas da retina, maximizando a acuidade visual.

Os cones encontram-se na sua maioria na retina central, num raio de cerca de 10 graus a partir da fóvea. Os bastonetes, ausentes na fóvea, situam-se principalmente na retina periférica, transmitindo, porém, informação directamente para as células ganglionares.

No fundo do olho está o ponto cego, insensível à luz. No ponto cego não há cones nem bastonetes. Do ponto cego, emergem o nervo óptico e os vasos sanguíneos da retina.

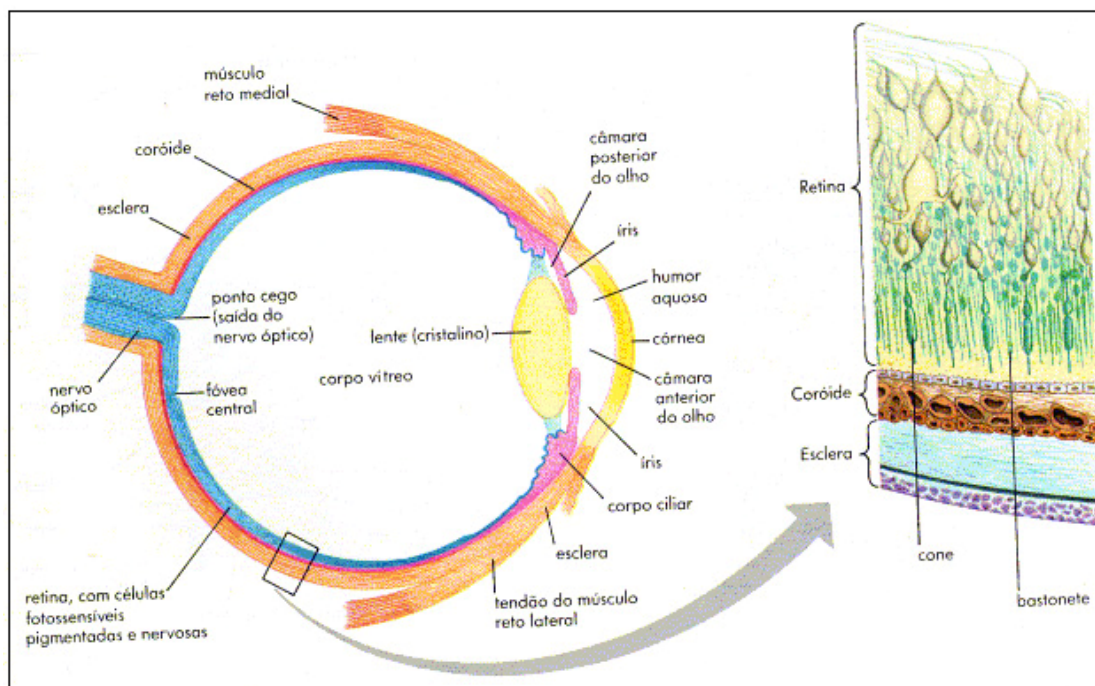


Figura 4.46 Constituição interna do olho

Os meios transparentes são:

- a córnea, que é uma porção transparente da túnica externa (esclerótica). É circular no seu contorno e de espessura uniforme, sendo a sua superfície

lubrificada pela lágrima, que é segregada pelas glândulas lacrimais e drenada para a cavidade nasal através de um orifício existente no canto interno do olho;

- o humor aquoso, é o fluido aquoso que se situa entre a córnea e o cristalino, preenchendo a câmara anterior do olho;
- o cristalino, é uma lente biconvexa coberta por uma membrana transparente. Situa-se atrás da pupila e orienta a passagem da luz até a retina, dividindo o interior do olho em dois compartimentos contendo fluidos ligeiramente diferentes: (1) a câmara anterior, preenchida pelo humor aquoso e (2) a câmara posterior, preenchida pelo humor vítreo; o humor vítreo, é um fluido mais viscoso e gelatinoso situado entre o cristalino e a retina, que preenche a câmara posterior do olho. A pressão deste fluido mantém o globo ocular esférico.

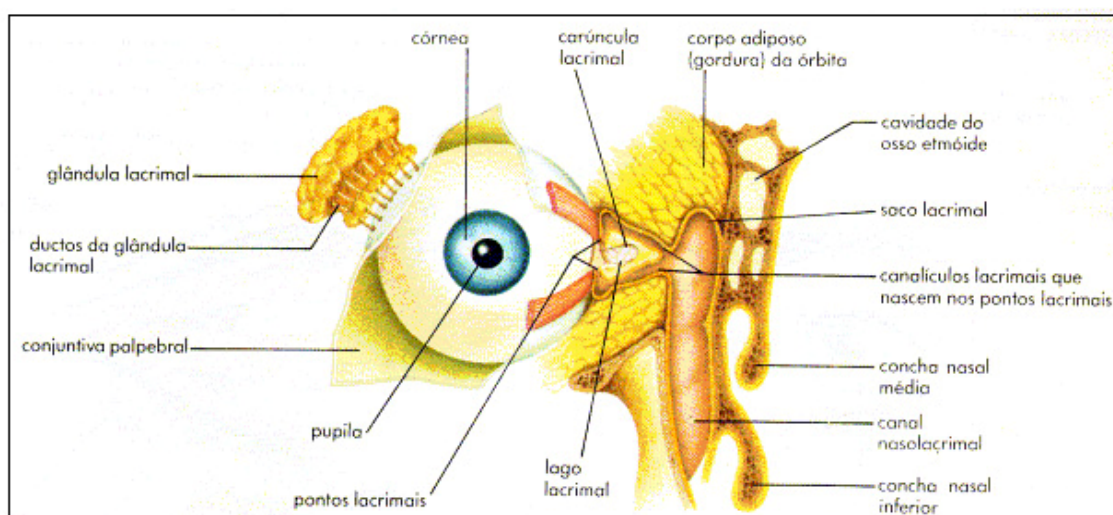


Figura 4.47 Constituição externa do olho

A imagem forma-se quando os raios luminosos atravessam a córnea, o cristalino, o humor aquoso e o humor vítreo e atingem a retina (ver figura 4.48). O mecanismo da visão pode ser melhor entendido, ao comparar-se o globo ocular a uma câmara fotográfica, assim: o cristalino seria a objectiva; a íris, o diafragma; e a retina seria a película. Desta maneira, os raios luminosos, ao penetrarem na córnea e no humor aquoso, passando pela pupila, chegam ao cristalino, que leva a imagem mais para trás ou para a frente, permitindo assim que ela se projecte sobre a retina. Na máquina fotográfica, o meio transparente é a lente e a superfície sensível à luz, o filme. No olho, a luz atravessa a córnea, o humor aquoso, o cristalino e o humor vítreo e dirige-se para a retina, que funciona como o filme fotográfico; a imagem formada na retina também é invertida, como na máquina fotográfica. O nervo óptico conduz os impulsos nervosos

para o centro da visão, no cérebro, que o interpreta e nos permite ver os objectos nas posições em que realmente se encontram.

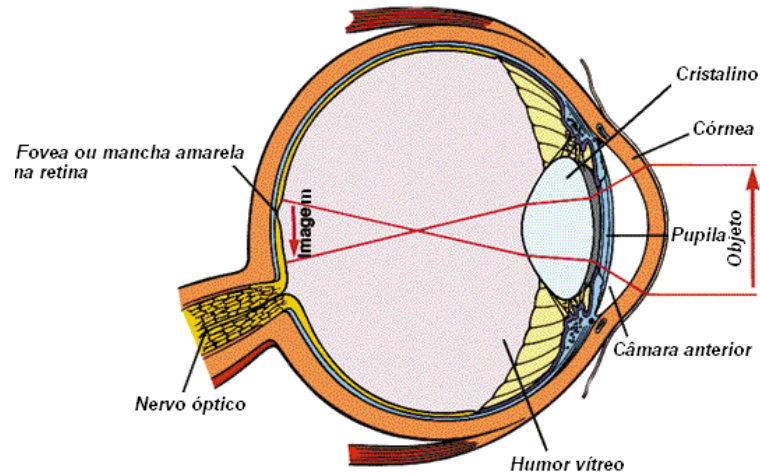


Figura 4.48 Formação da imagem no olho

A transição da visão diurna (baseada nos cones) para a visão nocturna (baseada nos bastonetes) não é instantânea, sendo vulgarmente designada por adaptação ao escuro e depende de diversos factores, entre os quais: a dilatação das pupilas, a regeneração da rodopsina e o ajuste funcional da retina, de forma a que os bastonetes estejam mais disponíveis para as células ganglionares, uma vez que os bastonetes não estão localizados na fóvea, mas apenas na retina periférica.

Em ambientes mal iluminados, por acção do sistema nervoso simpático, o diâmetro da pupila aumenta e permite a entrada de maior quantidade de luz. Em locais muito claros, a acção do sistema nervoso parassimpático acarreta diminuição do diâmetro da pupila e da entrada de luz. Esse mecanismo evita a ofuscação e impede que a luz em excesso lese as delicadas células fotossensíveis da retina.

4.6.3. Índices e normas

Existem diversas unidades fotométricas que são utilizadas para caracterizar a luminosidade, sendo as mais comuns:

- o fluxo luminoso, cuja unidade SI é o "lúmen" [lm], que representa a luz total emitida por uma fonte luminosa ou a luz total incidente numa superfície, sendo uma medida que deriva do fluxo radiante através de avaliações da radiação de acordo com a sensibilidade espectral padrão do olho humano;

- a intensidade luminosa, cuja unidade SI é a “candela” [cd], que representa a potência da fonte ou da superfície receptora da luz numa determinada direcção;
- a iluminância, cuja unidade SI é o “lux” [lx], que representa o fluxo luminoso incidente por unidade de área, ou seja, a incidência perpendicular de 1 lúmen por unidade de área;
- a luminância [cdm^{-2}], que expressa a intensidade da luz emitida numa determinada direcção por unidade de área de uma superfície luminosa ou reflectora.

Tal como outros órgãos do corpo humano também os olhos, não respondem aos estímulos externos de um modo passivo, permitindo assim uma adaptação aos níveis de luminosidade existente no ambiente, o que conduz a um vasto campo de visibilidade por parte do ser humano. Caso o nível de luminosidade varie de forma repentina, a resposta dinâmica do sistema de visão varia em função do nível de adaptação necessário em períodos que podem oscilar entre dois a vinte minutos.

Como consequência da resposta dinâmica do sistema de visão em função do nível de luminosidade, existe o facto de, em situações onde existe uma elevada diversidade de luminância no campo visual, esta poder provocar a designada sensação de ofuscação. Este fenómeno depende da luminância da fonte luminosa comparada com a luz de fundo e a posição do observador relativamente à fonte. Através destas variáveis pode definir-se a ofuscação para uma única fonte luminosa, e através da integração de todo o campo visual do ser humano, definir um índice de ofuscação, apesar das inúmeras diferenças na resposta do sistema visual entre as pessoas.

Assim, a luz, tanto pode causar desconforto para os ocupantes de um ambiente, como provocar sensações positivas e emocionais (frio, calor, etc). Existem recomendações sobre os parâmetros de iluminação de espaços no interior de edifícios que conduzem a situações de desconforto (CIBSE, 1994). Alguns investigadores consideram que a criação de ambientes agradáveis são mais uma questão de arte do que propriamente uma ciência, sendo no entanto consensual a existência de limites de iluminação recomendados para o interior de edifícios correlacionadas com as repostas subjectivas dos ocupantes. Recomendações acerca destes valores limites podem ser obtidos em Boyce (1981) e na referida norma CIBSE (1994). Os parâmetros utilizados nestas bibliografias como directrizes na criação de boa iluminação são: a iluminância e relações de iluminância, a cor da luz e o índice de ofuscação.

De modo a que as pessoas executem determinadas tarefas com uma boa visibilidade, para além das já citadas normas, a norma europeia EN 12464-1 (2002) indica valores mínimos de iluminância para o interior de edifícios, enquanto que a norma

EN 12193 (1999) indica valores mínimos de iluminância para a prática de diversos desportos. Na futura norma europeia EN 15251, a qualidade da luminosidade é avaliada em função da iluminância, tendo sido adoptados os valores indicados na norma EN 12464-1.

A resposta do ser humano relativamente à iluminação é um assunto complexo não havendo nenhum índice que quantifique o nível de desconforto, sendo sugerido por muitos investigadores o desenvolvimento de modelos para prever de um modo mais preciso a avaliação subjectiva do ser humano relativamente a esta grandeza ambiental.

Fisher (1970) estabeleceu uma relação entre o nível de satisfação e a iluminância quando o parâmetro em análise é a identificação de objectos através de uma janela. Na sua relação a iluminância é medida num plano vertical. Na figura 4.49 representa-se a relação inversa, ou seja, o nível de insatisfeitos em função da iluminância, na qual existe um valor mínimo de insatisfação para um valor de iluminância de 2000 lx.

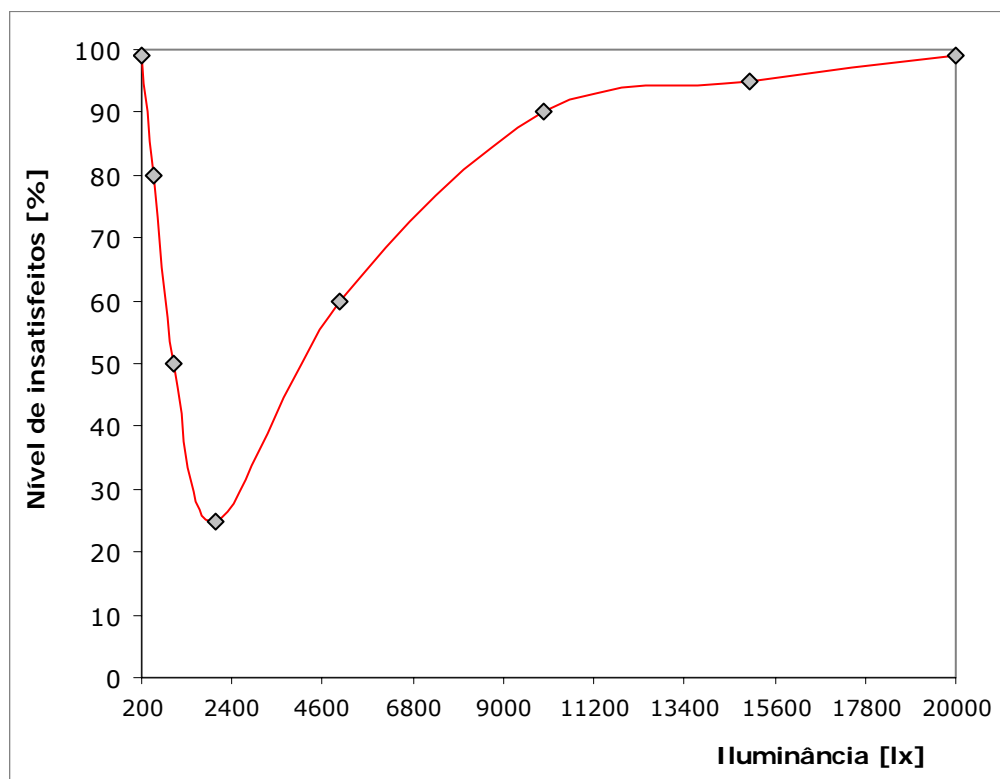


Figura 4.49 Nível de insatisfeitos em função da iluminância (adaptado de Fisher, 1970)

Um índice que tem vindo a ser bastante utilizado na análise da iluminação em ambientes no interior de edifícios é o já citado índice de ofuscação, que é definido pela "International Commission on Illumination" (CIE) como sendo "a condição de visão na qual existe desconforto ou uma diminuição na capacidade de ver detalhes ou objectos, ou ambos, devido a uma distribuição inadequada ou alcance de iluminação ou para

contrastes extremos em espaço ou tempo” (CIE 55, 1983). Existem dois tipos distintos de ofuscação: ofuscação desconfortável, que provoca desconforto sem necessariamente prejudicar a visão de objectos, e uma ofuscação de inaptidão que prejudica a visão sem necessariamente causar desconforto.

Embora possam ocorrer simultaneamente ambas as formas de ofuscação, elas representam fenómenos bastante diferentes. Assim, 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 directa no campo de visão pode causar ofuscação de inaptidão. Por seu turno, a ofuscação de desconforto depende da luminância da fonte e ocorre quando a presença de uma fonte clara, cuja intensidade é superior àquela para o qual o olho humano está adaptado, provoca sensações desagradáveis que variam de uma simples sensação de aborrecimento até situações de dor. A ofuscação de desconforto não diminui necessariamente a visibilidade.

A ofuscação é um fenómeno subjectivo, onde o método primário de investigação envolve normalmente a avaliação subjectiva da sensação de desconforto de pessoas relativamente a diversas fontes de ofuscação com diferentes níveis de luminância. A partir dos resultados obtidos procuram desenvolver-se expressões do índice de ofuscação que produzem directrizes e recomendações para a iluminação de diversos tipos de ambientes.

Actualmente existem diversos modelos de previsão do desconforto visual, tais como: a Probabilidade de Conforto Visual (IESNA, 2000), o Índice Britânico de Ofuscação (Hopkinson e Bradley, 1960; Hopkinson, 1963; Hopkinson e Collins, 1963), o Limite de Luminância (Bodmann, 1967), o Índice de Ofuscação CIE (CIE 55-1983; Navvab e Altland, 1997), e a Escala de Ofuscação Unificada (Einhorn, 1969, 1979, 1998; CIE 117-1995). Todos estes modelos partilham de um modo similar as mesmas variáveis que incluem a luminância da fonte (L_s), a luminância de fundo (L_b), a posição da fonte relativamente à linha de visão (p), e o tamanho aparente da fonte de ofuscação (ω_s) (Boyce, 2003), podendo de uma forma genérica ser expressos pela seguinte expressão:

$$G = \frac{L_s^a \cdot \omega_s^b}{L_b^c \cdot p^d} \quad (4.39)$$

Esta equação sugere que a sensação de desconforto visual 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.

Porém, a maioria destes modelos de ofuscação não pode ser usado para prever a ofuscação de desconforto da luz natural, considerando que um dos seus pressupostos é o

facto do tamanho da fonte de ofuscação ser menor do que 0,01 esterradianos. O Índice de Ofuscação de Luz do Dia (Hopkinson, 1963; Chauvel *et al.*, 1982) é o único modelo que foi amplamente aceite para prever a ofuscação de desconforto de fontes grandes, como é o caso das janelas.

Baseado no Índice de Ofuscação da Luz do Dia de Hopkinson (1963) e em estudos de ofuscação de fontes claras artificiais grandes, Chauvel *et al.* (1982) investigaram a ofuscação de luz natural vista por janelas reais, derivando a seguinte expressão:

$$DGI = 10 \log 0,478 \sum_{i=1}^n \frac{L_s^{1,6} \cdot \Omega^{0,8}}{L_b + (0,007 \omega_s^{0,5} \cdot L_s)} \quad (4.40)$$

onde:

- L_s - luminância média de cada fonte de ofuscação no campo de visão [cd/m^2]
- L_b - luminância média de fundo [cd/m^2]
- Ω - ângulo sólido da fonte visto do ponto de observação [sr]
- ω_s - ângulo sólido subentendido pela fonte, modificada para o efeito da posição do observador em relação à fonte [sr]
- n - número de fontes de ofuscação no campo de visão

Em Inkarojrit (2005), podem ser encontrados detalhes mais específicos acerca do modo de obtenção dos parâmetros indicados na expressão anterior, bem como uma modificação posterior deste índice efectuada por Fisekis *et al.* (2003), que tem vindo a ser utilizada por diversos investigadores. Existem outros índices que podem ser utilizados, tal como o *UGR* ("Unified Glare Rating") que tem sido nos últimos anos, recomendado pela CIE e cujas variáveis são similares às anteriormente descritas para o *DGI*.

Nas avaliações subjectivas acerca da visão, Stevens (1975) concluiu que a função de potência que relacionava o brilho da luminância apresentava um expoente entre 0,33 e 1, dependendo do tempo de exposição e das características do estímulo visual (Tiller e Veitch, 1995). Outros investigadores encontram valores similares (Bodmann e La Toison, 1994; Marsden, 1970; Osterhaus e Bailey, 1992; Osterhaus, 1998). Ao longo dos tempos têm sido desenvolvidos diversos critérios subjectivos, de uma forma similar à utilizada por exemplo na escala de Fanger, relativamente ao conforto térmico para avaliar o desconforto de ofuscação, destacando-se os seguintes: a técnica do critério múltiplo (Hopkinson, 1950; Hopkinson e Collins, 1970), a fronteira entre o conforto e o desconforto, designado de *BCD* (Luckiesh, 1949), e a votação sobre a sensação de ofuscação, designada de *GSV* (Iwata *et al.*, 1990; Iwata e Tokura, 1998).

4.6.4. Métodos de medição

A metodologia tradicional nas medições relacionadas com a luminosidade baseia-se em luxímetros portáteis, que medem a iluminância para avaliar o campo de luminância no espaço em análise, gerando uma informação fotométrica em função dos pontos de medição. Apesar de ser o método mais simples de implementar, apresenta algumas desvantagens: em primeiro lugar, caso se pretenda documentar a luminância de uma grande superfície, são necessárias múltiplas leituras, o que exige bastante tempo; em segundo lugar, os valores de iluminância medidos variam de ponto para ponto de medição, sendo esta amplitude de variação mais elevada consoante a falta de uniformidade da superfície ou onde as condições ambientais apresentam rápidas variações que podem originar erros sistemáticos nas leituras; em terceiro lugar, quando a análise tem que se realizar num tempo limitado, apenas um número pequeno de pontos será utilizado na caracterização do campo visual, ficando uma distribuição grosseira da luminância, caso a área em análise tenha uma dimensão significativa.

Uma questão muito importante e que nos anos oitenta foi fonte de alguma confusão nos dados publicados por diversos autores, consiste na documentação acerca do plano de medição utilizado. 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, exceptuando-se algumas aplicações de usos específicos como para desenho técnico, bibliotecas, estantes, entre outros, onde é utilizado o plano vertical.

Aizlewood (2001), por forma a obter L_s e L_b necessários para calcular o DGI nos diversos ambientes, propôs um método de medição da luminância que consiste na utilização de dois sensores de luminância, sendo um protegido da fonte directa de luz e outro exposto directamente ao campo de visão que se pretende analisar (ver figura 4.51).

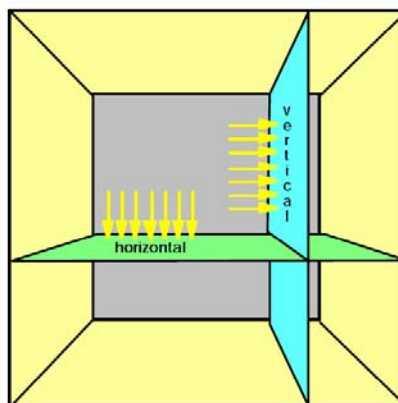


Figura 4.50 Planos de medição da iluminância

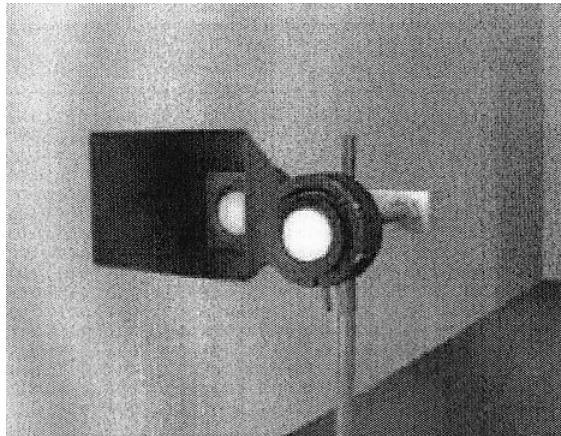


Figura 4.51 Exemplo de sensor de iluminância com e sem protecção para calcular o índice *DGI* (adaptado de Aizlewood, 2001)

Um método alternativo para medir a distribuição de luminância num espaço sem as desvantagens inerentes aos tradicionais medidores de iluminância, consiste na utilização de uma câmara com capacidade para gerar um mapa de luminância do espaço em análise. A utilização desta técnica foi inicialmente proposta por Hopkinson *et al.* (1966), tendo surgido, duas décadas mais tarde, a câmara CCD (“Charge Coupled Device”) que assenta num circuito integrado com células fotossensíveis (Coutelier e Dumortier, 2004). Um exemplo recente da utilização deste método de medição consiste na utilização de uma câmara digital Nikon Coolpix 5400 com uma lente Nikon FC-E9 e com o sistema de mapeamento de luminância Photolux comercializado pela LASH/ENTPE. Por forma a gerar um mapa de luminância, o local em análise é fotografado em diversos ambientes de exposição luminosa. As principais vantagens deste sistema consistem em que toda a informação de luminância num dado espaço poder ser obtida num curto espaço de tempo, as medições fotométricas serem obtidas a partir de uma distribuição espacial global em vez de uma distribuição ponto a ponto, e o mapa de luminância obtido permitir identificar em termos espaciais no local em análise, os valores mínimos, máximos, médios e desvios padrões, desde uma pequena área de interesse até ao campo de visão global. Em função das múltiplas vantagens deste método de medição e face à previsível diminuição de custo, a utilização deste tipo de câmaras revela-se como um método promissor na avaliação da luminância nos espaços ocupacionais. Uma representação de um mapa de luminância através desta técnica encontra-se representada na figura 4.52.

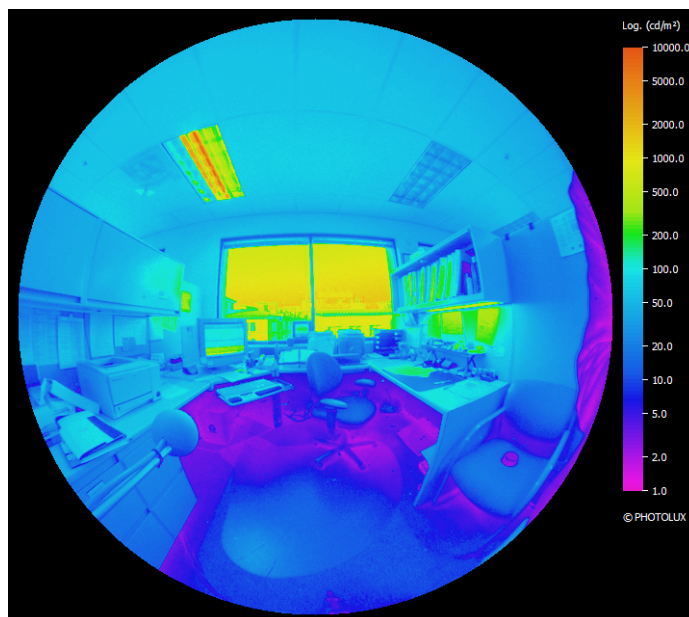


Figura 4.52 Exemplo de um mapa de luminância (adaptado de Inkarojrit, 2005)

4.6.5. Aplicação em veículos

Apesar de haver, na área dos transportes ferroviários e da aviação, alguns trabalhos publicados relacionados com a luminosidade, os mesmos incidem fundamentalmente sobre a perspectiva da capacidade dos ocupantes executarem tarefas, tais como a leitura ou a escrita, e não tanto sobre análises de conforto nos veículos, onde a luminosidade seja considerada como estímulo de desconforto.

Não obstante, a visão é um estímulo fundamental a considerar na simulação dos ambientes virtuais, por forma a que os avaliadores consigam sentir a sensação de viajar dentro de um veículo. Um exemplo deste desenvolvimento é reportado por Monacelli *et al.* (2005) relativamente ao simulador desenvolvido no grupo Fiat para estudos na área da ergonomia cognitiva em veículos, quer em termos de psico-acústica quer em termos antropométricos, constituindo um desafio global na simulação visual dos simuladores desenvolvidos.

Na área dos veículos são também frequentes as análises relacionadas com os sistemas de iluminação das estradas e o modo como estes influenciam os condutores que são submetidos a esses mesmos sistemas. Um exemplo deste tipo de análises foi feito por Bullough *et al.* (2002), que estudaram o efeito das lâmpadas de halogéneo relativamente aos tipos de desconforto de ofuscação acima referidos. Outros exemplos desta abordagem podem ser consultados na norma CIE 93-1992 ou nos textos de Hamm e Steinhart (1999) e Fekete *et al.* (2005).

Como é óbvio, uma das áreas onde a luminosidade é bastante importante no interior dos veículos é aquela que diz respeito às informações provenientes do painel de comandos dos veículos, sendo a bibliografia bastante vasta, neste domínio.

Existem alguns fornecedores de vidros para autocarros que já começam a abordar o conforto visual, como é o caso da empresa Saint-gobain, que relaciona a selecção dos vidros que fabrica para autocarros com a eliminação da água nos vidros laterais, a diminuição da acumulação de lamas, pó e insectos, aumentando assim a visibilidade dos passageiros e dos motoristas.

4.7. Outros estímulos de desconforto

Existem diversas análises sobre múltiplos factores que influenciam o conforto no interior dos veículos. De seguida, enumeram-se apenas alguns exemplos das que se têm vindo a destacar nos últimos anos de investigação.

Uma área que tem sido alvo da atenção de investigadores ligados à indústria automóvel, tendo sido já publicados alguns estudos científicos sobre a mesma e organizados eventos específicos nesse domínio (SAE SP-1539, 2000), é a análise da interacção entre o assento do veículo e o seu ocupante. A distribuição de pressão no assento, a sua deflexão e a sensação térmica devido às coberturas usadas ou sistemas especiais de aquecimento e ventilação utilizados nos assentos têm sido reportadas por vários autores.

Philippe (1995), Kim e Park (2001), e Inagaki *et al.* (2000) são apenas alguns exemplos de investigadores que mediram a distribuição de pressão em assentos devido à presença de ocupantes. As medidas efectuadas permitem criar um mapa de pressões do assento, sendo o sensor normalmente utilizado neste tipo de análises, uma malha condutiva composta por um filme flexível, coberta por uma tinta sensível à pressão. Esta malha condutiva caracteriza-se por alterar a sua resistência eléctrica em função da pressão que é aplicada na sua superfície. Através de um sistema de aquisição de dados, este tipo de sensor pode executar medidas dinâmicas, tornando-se possível obter a evolução temporal de uma distribuição de pressão, ao longo das viagens efectuadas, para passageiros ou motoristas. Esta técnica tem sido muito utilizada para comparar assentos diferentes, características antropométricas dos ocupantes e obter perfis de estradas.

Adams *et al.* (1999) descrevem o desenvolvimento de um manequim com o objectivo de obter uma simulação mais realista da interacção entre o corpo humano e o assento. Este manequim consiste num esqueleto modelado em plástico rígido com um

revestimento capaz de simular a resposta da carne humana. A distribuição de pressão resultante foi comparada com a do ser humano e com a do manequim da SAE "Óscar", que é normalmente usado em medidas dimensionais ergonómicas em veículos.

Os fabricantes de assentos também participaram recentemente em projectos de pesquisa com o objectivo de criar robôs de ingresso e de saída para testar o desempenho de assentos.

Têm também sido investigados outros aspectos relacionados com os assentos, como por exemplo a relação entre o tipo de revestimento exterior do assento e o conforto térmico (Fung, 1995), a influência dos assentos na absorção de ruído interior e o uso de aquecimento ou dispositivos de ventilação no próprio assento, para melhorar a sensação térmica (particularmente nas fases transitórias).

Existem alguns índices de condução onde são estabelecidas correlações entre as respostas subjectivas de pessoas e medidas objectivas de tarefas executadas durante a condução, ao longo de testes de estrada ou em simuladores no laboratório (Scoeggel e Ramschak, 1999; Dorey e Martin, 2000).

Noutra área distinta, Cheng (1999) analisou o uso de medidas para reduzir a electricidade estática dentro de carros e evitar os choques eléctricos desagradáveis que são comuns em ambientes com baixa humidade.

4.8. Estímulos conjugados

Apesar de em muitos casos os parâmetros ambientais serem avaliados de uma forma independente, os passageiros no interior dos habitáculos encontram-se expostos a todos os estímulos ambientais, de forma integrada. Assim, a sensação de conforto que os mesmos têm é função do efeito conjugado do conjunto de estímulos presentes num dado instante.

O modo como a percepção humana da sensação de conforto depende dos vários estímulos e das suas interacções tem sido objecto de diversas análises, não existindo até à data, um entendimento acerca do modo como o ser humano responde a esta conjugação de estímulos. O já referido programa da comissão técnica da ISO que tem como objectivo desenvolver a norma ISO 15742 está vocacionado para edifícios, não incluindo como estímulo ambiental o parâmetro das vibrações que neste trabalho é considerado, pois nos veículos, este estímulo torna-se um elemento indispensável na avaliação do conforto.

O modo como os estímulos de desconforto se conjugam pode ser obtido através da modelação da resposta do sistema nervoso central ou através de métodos experimentais.

Broadbent (1971) sugeriu que os efeitos combinados dos diversos estímulos têm um comportamento aditivo na resposta global, no caso dos mecanismos internos estimulados serem independentes. Caso os mecanismos internos não sejam independentes, o efeito conjugado pode ser aditivo ou sinergista, onde o efeito global é maior do que a soma dos parciais, ou substractivo. O paradigma de estimulação é frequentemente usado em tentativas para explicar os efeitos combinados dos estímulos ambientais, por exemplo, a perda de sono reduzirá a estimulação e pode diminuir o desempenho de uma tarefa de vigilância, porém, se houver ruído, ele irá provocar um aumento na estimulação. Um modelo que tem sido sugerido para prever o efeito de estímulos ambientais combinados é o modelo de acordo com a referida lei de Stevens, onde é sugerido que a magnitude de sensação de um estímulo aumenta como uma função de potência da magnitude da grandeza física. Conhecendo a expoente de cada um dos estímulos individuais, pode tentar-se derivar níveis físicos equivalentes que produzam sensações equivalentes. Este método teórico não tem em conta as diferenças individuais, e tem-se revelado algo difícil de aplicar a situações práticas. Uma metodologia que se afigura mais promissora é a avaliação do efeito combinado de ambientes totais através da avaliação subjectiva do mesmo e a utilização de técnicas de regressão múltiplas, redes neuronais ou análise factorial, de modo a obter um modelo que combina os diversos componentes ambientais.

Tal como descrito em todos os estímulos seleccionados, com excepção das vibrações, a análise de estímulos conjugados tem sido muito difundida em ambientes no interior de edifícios, apresentando-se de seguida alguns trabalhos relevantes neste tipo de ambientes.

Viteles e Smith (1946) analisaram o efeito conjugado do conforto térmico com o conforto acústico, chegando à conclusão que a um aumento da temperatura efectiva de 22,8 °C para 30,6 °C correspondeu um decréscimo de eficiência em sete tarefas, não se tendo verificado nenhuma alteração do desempenho aquando do aumento do nível de ruído de 72 dB para 90 dB.

Sandover (1970) efectuou um pequeno estudo envolvendo quatro indivíduos, tendo como objectivo investigar o efeito das vibrações, para níveis de ruído idênticos. Os resultados sugerem que a avaliação subjectiva para sons no intervalo de frequências entre 125 e 4000 Hz é reduzida na presença de vibrações com uma frequência de 125 Hz.

Miwa e Yonekawa (1973) investigaram a influência do ruído na análise das vibrações pelo ser humano, concluindo que a presença do ruído diminui a sensibilidade em relação à avaliação das vibrações.

Fanger *et al.* (1977) estudaram a influência da cor das paredes e do ruído na preferência da temperatura, concluindo que nem a cor nem o ruído influenciam o conforto térmico das pessoas.

Hancock e Pierce (1985) concluíram que o calor e o ruído afectam, de uma forma independente entre si, diversas actividades humanas.

Horie *et al.* (1985) estudaram o efeito conjugado do ruído, da luminosidade e das condições térmicas no conforto global. Efectuaram experiências ao longo de três anos em salas onde se podiam controlar todos os parâmetros, concluindo que a temperatura era o factor principal que determinava o conforto global. Assim, um aumento de 3 °C (28 °C para 31 °C) na temperatura do ar tem o mesmo efeito negativo que um aumento do nível de ruído de 30 dB (40 dB para 70 dB) não tendo, porém, sido feita nenhuma comparação directa entre os diferentes parâmetros individuais.

Fanger (1988b) estabeleceu uma relação entre a temperatura operativa e a percepção da qualidade do ar (ver tabela 4.5). Apesar de também analisar o efeito conjunto da temperatura e o ruído, Fanger não indica nenhuma relação entre esses dois parâmetros.

Percentagem de Insatisfeitos [%]	Temperatura Operativa [°C]	Percepção da qualidade do ar [decipol]
10	21,3	0,6
20	23,3	1,4
40	26,0	4,1
60	28,4	8,9

Tabela 4.5 Relação obtida por Fanger (1988b) entre a temperatura operativa e a percepção da qualidade do ar

Berglund e Clain (1989) concluíram que a percepção da qualidade do ar por parte dos seres humanos depende da temperatura ambiente, correspondendo a um aumento desta uma sensação de pior qualidade para a mesma composição química do ar.

Clausen *et al.* (1993) estudaram a importância relativa da qualidade do ar, do ruído e da temperatura, sob condições controladas, em duas câmaras climáticas. Numa das câmaras, as pessoas eram expostas a várias condições térmicas e da qualidade do ar. Para cada condição testada nesta câmara, os sujeitos eram, de seguida, expostos a vários níveis sonoros numa câmara adjacente, com condições de neutralidade térmica e boa qualidade do ar com a finalidade de identificar um nível sonoro que causasse a mesma sensação de desconforto. Foram realizadas um total de sessenta e oito comparações entre as condições das duas câmaras pelo mesmo grupo de dezasseis pessoas (oito homens e oito mulheres). Estas comparações efectuaram-se após um

minuto de exposição em cada câmara, utilizando uma escala de desconforto de seis níveis, desde a sensação de não existir incômodo até à sensação de considerar o incômodo como sendo opressor. Os autores obtiveram relações lineares nas quais com o aumento de qualquer um dos estímulos, o grau de insatisfação aumenta. Em espaços com uma boa qualidade do ar e com uma temperatura operativa compreendida entre 23 e 29 °C, uma alteração de 1 °C na temperatura operativa tem o mesmo efeito que uma variação de 2,4 decípol na qualidade do ar ou 3,9 dB(A) no nível de ruído. No entanto, há que referir que os indivíduos, perante o desconforto térmico, podem adaptar-se à situação, alterando a quantidade de vestuário. Para temperaturas neutras e níveis de percepção da qualidade do ar superiores a 10 decípol, uma variação de 1 decípol tem o mesmo efeito no conforto humano que uma variação de 1,2 dB(A) no nível sonoro. Os resultados indicados foram obtidos com apenas um minuto de exposição, o que se pode revelar pouco. Foi ainda estabelecida, por aqueles autores, uma relação entre o nível de pressão sonora do tráfego e a percentagem de insatisfeitos, que se apresenta na figura 4.53.

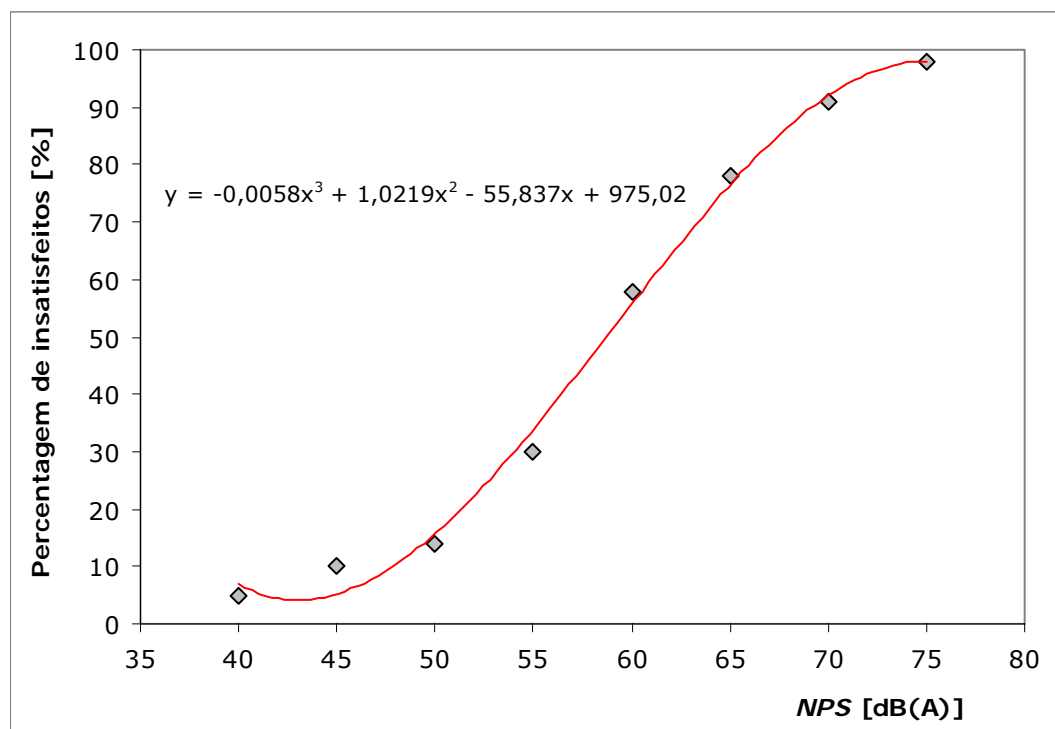


Figura 4.53 Percentagem de insatisfeitos em função do nível de pressão sonora do tráfego, obtida por Clausen *et al.* (1993)

Lang *et al.* (1994), com base em ensaios laboratoriais, estabeleceram um método que relaciona alguns parâmetros ambientais (temperatura, nível sonoro, iluminação) com o comportamento psíquico e fisiológico do organismo humano, em situações de fadiga mental. Para tal, realizaram uma campanha de testes em que cada indivíduo participou

em oito sessões experimentais com a duração de quarenta e cinco minutos cada, com intervalos de quinze minutos entre elas e com condições ambientais diferentes (combinações de dois valores de temperatura (20 °C, 30 °C), nível sonoro (60 dB, 70 dB) e iluminação (920 lx, 350 lx). Durante o período de ensaio, os indivíduos foram submetidos a uma tarefa de processamento de texto. Durante os intervalos, as pessoas respondiam a inquéritos e efectuavam testes fisiológicos e psíquicos tendo em vista a obtenção de respostas subjectivas e objectivas do actual estado dos indivíduos. Os parâmetros objectivos em análise foram não só as prestações da tarefa realizada, quantificada pelo número de caracteres escritos em cada sessão e pela sua qualidade final (o número de erros detectados), bem como a mudança de actividade física dos indivíduos ao longo da experiência reflectida no índice *CFF* ("Critical Fusion Time"), obtido a partir do ritmo cardíaco do indivíduo. O *CFF* está relacionado com a fadiga cerebral, sendo conhecida a sua evolução ao longo de um determinado período de tempo de exposição permanente a trabalhar, diminuindo o seu valor com o passar do tempo sob condições de trabalho contínuo. Neste estudo, outro parâmetro físico medido foi a temperatura da superfície da pele, pois está demonstrado que, quando as pessoas sofrem de stress mental, esta diminui devido ao menor caudal sanguíneo na zona de circulação periférica. Na verdade, está demonstrado que, a um aumento da actividade mental, corresponde uma diminuição do ritmo cardíaco. Os parâmetros subjectivos, considerados por Lang e seus colaboradores, consistiram nas respostas dos indivíduos numa escala de fadiga e nos sintomas de conforto/desconforto por eles expressos num questionário. Não são, no entanto, apresentadas nenhuma conclusão acerca de como os três estímulos afectam quer o conforto quer a eficiência das pessoas.

Yamazaki *et al.* (1998) analisaram a interacção da luminosidade com o ambiente térmico e o ruído, bem como o modo como estes afectam, simultaneamente, a capacidade de trabalhar em escritórios. Esta análise foi feita através da recolha de dados subjectivos em condições ambientais controladas. O estudo baseou-se numa rotina normal em termos de trabalho num escritório, contando com dezasseis participantes que respondiam a diversas questões nomeadamente quanto ao conforto térmico, ao estado de fadiga, etc. Através de uma análise de covariância e de regressão múltipla, foi obtida uma fórmula que caracteriza a aceitabilidade de determinado ambiente para o trabalho em análise.

Humphreys (2005), através dos dados obtidos no projecto europeu SCATS, em que foram recolhidos parâmetros físicos e avaliações subjectivas em 26 escritórios de diversos países europeus, relativamente ao ambiente térmico, à qualidade do ar, ao ruído e à luminosidade, procurou estabelecer um índice global de conforto para os ambientes

avaliados. O autor levanta uma série de questões que um índice deste género deve ter subjacentes, tais como:

- o desconforto provocado por um estímulo afecta o desconforto global?
- a avaliação positiva de um estímulo implica uma avaliação positiva de todo o ambiente?
- o nível de conforto global está correlacionado com o valor médio de satisfação dos diversos estímulos?
- o nível máximo e mínimo de satisfação relativamente a um dos estímulos afecta o nível de conforto global?
- qual é o peso relativo de cada um dos estímulos relativamente à avaliação do ambiente global?
- o índice obtido permite hierarquizar os ambiente no interior dos edifícios de um modo correcto?

A principal conclusão é a de que os dados recolhidos apresentam uma grande influência quer das tarefas desempenhas nos diferentes escritórios avaliados, quer diferenças ao nível das diferentes culturas avaliadas.

Relativamente a veículos, a literatura científica disponível acerca do desconforto ambiental de estímulos conjugados não é muito abundante, existindo na última década um especial interesse neste domínio por parte do sector aeronáutico e ferroviário em particular. De seguida, descrevem-se alguns trabalhos relacionados com a avaliação de estímulos ambientais conjugados em veículos.

Bowman e Beckh (1979) investigaram o efeito combinado da aceleração, do ruído de percussão, da temperatura, e da iluminação no desempenho de um piloto de avião.

Leatherwood (1979) descreve um índice de conforto de viagem, baseado nas vibrações e no ruído, desenvolvido pela NASA para avaliar as condições dos pilotos e astronautas. Mais tarde, Leatherwood e Barker (1984) apresentaram um modelo computacional para calcular este índice de um modo mais célere. Posteriormente, Wood e Leatherwood (1985) desenvolveram um equipamento com capacidade de avaliar esse mesmo índice no interior dos veículos.

Vipiana (1992) faz uma análise dos vários aspectos que devem estar subjacentes na análise do habitáculo de um veículo por parte dos construtores. Ele considera como aspectos a ter em conta na concepção dos habitáculos, o design dos acabamentos interiores de acordo com as características antropométricas dos passageiros, aspectos funcionais, condições ambientais (climática, ruído, vibrações) e a segurança que é oferecida aos passageiros. Em especial, no que diz respeito às condições ambientais, Vipiana utiliza os seguintes critérios de conforto:

- para as vibrações, os limites estabelecidos na já referida norma ISO 2631;

- para o ruído, são indicados os valores limites de 55 dB(A) para actividades que envolvam raciocínio mental, 70 dB(A) para actividades de escritório e 85 dB(A) para as restantes actividades;
- para o ambiente térmico, são recomendadas temperaturas efectivas entre 15 °C e 20 °C para o Inverno e entre 17 °C e 22 °C para o Verão, valores da humidade relativa entre 40 a 70 %, que as temperaturas das superfícies interiores sejam mantidas entre 15 a 25 °C e que a velocidade do ar na zona ocupada do habitáculo seja inferior a 0,25 m/s.

Conforme descrito na secção 2.5, Griffin (1995), sugeriu uma metodologia para a criação de um modelo capaz de integrar diversos estímulos de desconforto e obter as respectivas ponderações de cada um deles.

Alcobia e Silva (1999) avaliaram o conforto em autocarros urbanos através de medições objectivas e subjectivas, tendo eleito como estímulos de desconforto o ambiente térmico, a qualidade do ar, o ruído e as vibrações. Foram relacionados os dados obtidos através de regressões múltiplas e de redes neuronais artificiais. Os coeficientes de correlação obtidos não foram muito elevados o que, de acordo com os autores, tal facto adveio das condições pouco controladas em que se realizaram as viagens bem como do pouco tempo de exposição dos ocupantes no interior dos veículos, cuja média foi inferior a dois minutos.

Mukherjee *et al.* (2003) monitorizaram três viagens típicas em autocarros relativamente ao ruído, ambiente térmico e qualidade do ar. Relativamente ao ruído os valores do L_{Aeq} apresentaram níveis bastante elevados, chegando a atingir os 91 dB(A). O ambiente térmico foi avaliado através do índice *WBGT*, temperatura do ar e humidade. A qualidade do ar foi avaliada através da recolha de amostras. São apresentados diversos resultados para as grandezas referidas. Não houve avaliação subjectiva, nem é estabelecida qualquer relação entre os três parâmetros.

No sector aeronáutico tem havido, desde final da década de noventa até aos nossos dias, uma crescente preocupação com a ergonomia ambiental, existindo programas da Comunidade Europeia específicos para o ambiente no interior da cabina, tais como: o CABINAIR (“Improving Air Quality in Aircraft Cabins”), o HEACE (“Health Effects in the Aircraft Cabin Environment”), o FACE (“Friendly Aircraft Cabin Environment”) ou o IDEA PACI (“Identification of an Aircraft Passenger Comfort Index”). Estes programas têm como principal objectivo promover um melhor conhecimento acerca do efeito do ambiente no interior dos aviões relativamente à saúde e conforto da tripulação e dos passageiros. Pretende-se que esta melhor compreensão permita estabelecer melhorias no fabrico das aeronaves, fomentando assim produtos mais competitivos quer para os fabricantes, quer para as companhias transportadoras. Pretende-se também obter

benefícios indirectos, através de um melhor desempenho, diminuindo assim erros e incrementando a segurança a bordo dos mesmos. Actualmente, existem já diversos resultados disponíveis acerca destes projectos, podendo ver-se nas figuras 4.54 e 4.55 alguns dos simuladores físicos desenvolvidos. No projecto CABINAIR, foi desenvolvido o simulador de um avião da marca Airbus, com 17 metros de comprimento e capacidade para cinquenta passageiros, com o objectivo de analisar aspectos específicos do ambiente no habitáculo em simulações de voo, nos quais é controlado e monitorizado o nível das vibrações, ruído, temperatura, humidade e ventilação.



Figura 4.54 Simulador de habitáculo de avião

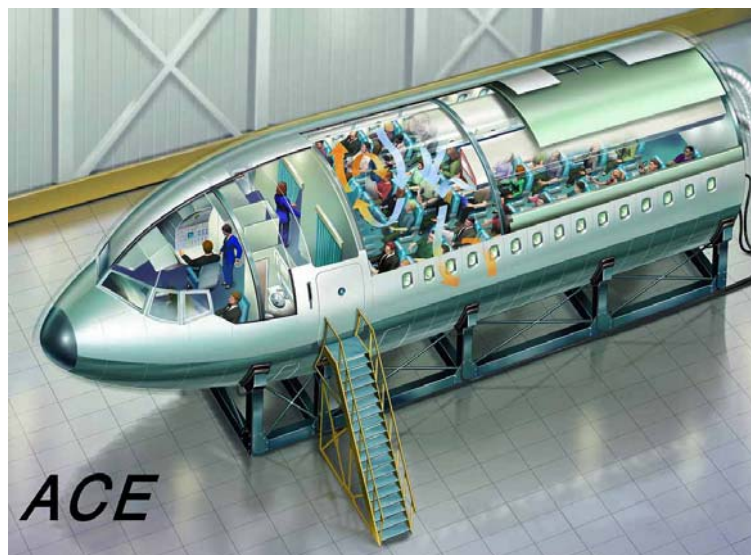


Figura 4.55 Esquema do simulador de habitáculo de avião

Os resultados disponibilizados até ao momento versam sobretudo a análise dos estímulos de um modo parcial, ou à combinação de dois deles, existindo diversas

publicações acerca a análise conjunta do ruído e vibrações. Alguns destes resultados têm sido publicados, entre outros, por Quehl (2001), Baumann *et al.* (2003), Dumur *et al.* (2004), Zhang e Chen (2005).

Os estímulos de desconforto considerados nestes projectos foram: ambiente térmico, vibrações, ruído, qualidade do ar, índice de ofuscação (apenas para a tripulação) e a actividade física (apenas para a tripulação).

Também a indústria ferroviária procura desenvolver o seu passageiro virtual, sendo exemplo disso o artigo científico de Kim *et al.* (2006) sobre o desenvolvimento de um modelo de previsão de conforto para os comboios de alta velocidade. A análise centrou-se nos comboios de alta velocidade da nova geração existentes na Coreia, onde foram realizadas medições objectivas e subjectivas, tendo incluído factores quantitativos e qualitativos. Um dos parâmetros que, segundo os dados obtidos pelos autores, mais influenciava o valor global era a qualidade do assento utilizado nestes comboios.

Pelo exposto, não foram ainda atingidos os objectivos ambiciosos da ergonomia ambiental sendo, por isso, necessário aprofundar o conhecimento acerca das interacções entre os diversos estímulos ambientais. O panorama é bastante optimista face à crescente evolução dos sistemas de medição, quer de grandezas físicas objectivas quer das grandezas subjectivas. A expansão dos simuladores laboratoriais, bem como a consolidação de ferramentas tais como as RNA, afiguram-se como ferramentas bastante importantes nesta área. Também há a referir, que as técnicas de realidade virtual para permitir a simulação computacional de veículos em conjugação com diversos estímulos de desconforto, estão em franco desenvolvimento, sendo este um dos aspectos mais promissores para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 5

MÉTODOS EXPERIMENTAIS DESENVOLVIDOS

5.1. Introdução

Foram desenvolvidos dois métodos experimentais distintos: um primeiro, que diz respeito à avaliação da qualidade acústica no interior dos autocarros, e um segundo, que diz respeito à avaliação do nível de desconforto global dos veículos bem como dos factores ambientais de uma forma parcial.

5.2. Análise da qualidade acústica

O objectivo definido para esta análise acústica foi o de avaliar o nível de desconforto manifestado pelas pessoas relativamente ao ruído no interior de autocarros, bem como o desenvolvimento de ferramentas de trabalho que permitam a sua posterior utilização noutros tipos de análises acústicas.

A metodologia de ensaio baseou-se na vasta bibliografia existente nesta área de aplicação, sendo de destacar o já citado guia de qualidade sonora em veículos, publicado por Otto *et al.* (1999).

Relativamente às correlações entre as avaliações subjectivas realizadas e os valores métricos objectivos, a análise centrou-se na possibilidade de se poderem estabelecer relações com as avaliações feitas nos veículos relativamente ao nível de desconforto

relativo ao ruído, bem como com as normas de referência neste tipo de medições e já citadas no capítulo anterior (ISO 5128 e NP 1730). Qualquer uma destas normas, bem como as avaliações feitas na metodologia desenvolvida para avaliar o nível de desconforto global dos autocarros, utilizam, como parâmetro objectivo de avaliação sonora, o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A.

Nas secções seguintes será descrita a metodologia geral utilizada na realização da avaliação subjectiva dos passageiros ao ruído no interior dos veículos, bem como os métodos de avaliação objectivos desenvolvidos.

5.2.1. Metodologia geral

A metodologia de trabalho é semelhante à de qualquer tipo de análise de qualidade acústica, baseando-se a mesma nas seguintes tarefas:

- desenvolvimento de um sistema de gravação de sons nos veículos e reprodução dos mesmos por forma a que o sistema auditivo do painel de avaliadores seja sujeito a um estímulo sonoro equivalente ao que teria, no interior do próprio veículo;
- construção de uma colecção de amostras de sons representativos do ruído no interior dos veículos de acordo com a metodologia indicada na norma ISO 5128 (1980);
- desenvolvimento de uma metodologia de avaliação subjectiva por um painel de avaliadores do nível de desconforto dos diversos sons;
- selecção dos índices métricos dos sons a utilizar e análise das relações existentes entre os mesmos;
- realização de testes de avaliação subjectiva;
- análise dos dados subjectivos relativos ao nível de desconforto indicado pelos avaliadores relativos aos sons, bem como desenvolver possíveis correlações entre estes e os índices métricos seleccionados.

Foram eleitos dois tipos de autocarros para efectuar a recolha das amostras dos sons: mini-autocarros e autocarros de turismo (ver figura 5.1). Enquanto o mini-autocarro tem uma capacidade para transportar 25 passageiros, o autocarro de turismo utilizado apresenta uma capacidade para transportar 51 passageiros.



a) mini-autocarro

b) autocarro de turismo

Figura 5.1 Tipo de autocarros avaliados

5.2.2. Sistema de gravação de sons

Foram seleccionadas, de acordo com a metodologia descrita na norma ISO 5128 (1980), quatro situações base para a recolha dos sons, em cada um dos veículos: veículo imobilizado com o motor a trabalhar ao ralenti, veículo imobilizado com o motor a trabalhar a uma velocidade de rotação perto do seu valor máximo e veículo em andamento, com e sem o ar condicionado em funcionamento. Assim, as amostras tiveram por base os sons dos dois tipos de veículos eleitos, totalizando um total de oito sons. Nas situações de imobilizado, os sons foram gravados durante um minuto, enquanto que, para as situações dinâmicas, foram utilizados tempos de gravação de dois minutos.

A gravação dos sons efectuou-se através de um manequim acústico de cabeça e tronco da marca Brüel & Kjær tipo 4100, cujos microfones foram ligado a um condicionador de sinal Nexus, modelo 2690, da mesma marca. Os sinais de saída do condicionador foram ligados a uma placa de som interna da marca Realtek inserida num computador portátil. A placa de som permite a leitura de sons no modo mono ou estéreo, através de um conversor analógico-digital de 32 bits, permitindo uma frequência máxima de 192000 amostras por segundo para cada canal. Na figura 5.2 apresenta-se um esquema do sistema de aquisição utilizado. O manequim utilizado possui dois canais auditivos simulados através da utilização de dois microfones da marca Brüel & Kjær, do tipo 4190, ligados a pré-amplificadores do tipo 2669L. Os microfones cumprem os requisitos de tipo 0 e 1 da norma IEC 651 (1979), apresentando uma sensibilidade de 50 mV/Pa e uma gama de frequências compreendida entre os 3,15 Hz e os 20000 Hz.

Os sons foram adquiridos a uma frequência de 44100 Hz com uma resolução de 16 bits sendo, posteriormente, armazenados na memória do computador portátil. Foi utilizado o software Sound Forge, versão 6.0, para a gravação e tratamento dos sons, desenvolvido pela empresa Sonic Foundry. Apesar da placa de som permitir uma resolução de 32 bits, optou-se pela utilização de 16 bits, por ser esta a máxima resolução admitida por um dos softwares utilizados na análise dos sons.

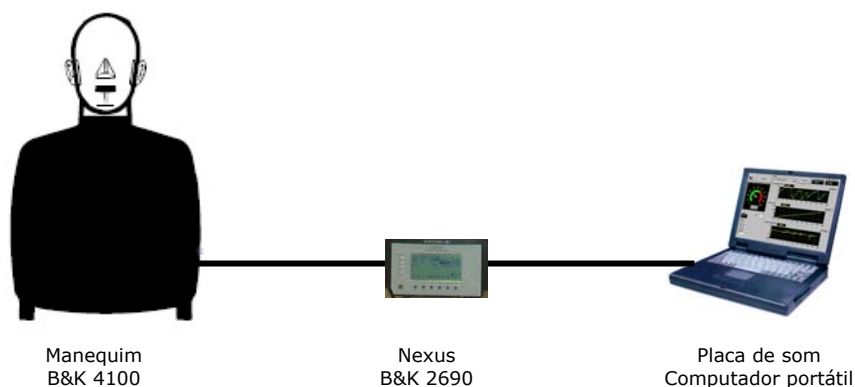


Figura 5.2 Esquema do sistema de gravação de sons utilizado

Optou-se por localizar o manequim na zona central dos autocarros, em virtude deste posicionamento representar um valor médio ao nível do conteúdo energético do som no interior dos mesmos. Este facto ficou evidenciado nas medições que foram previamente efectuadas num autocarro de turismo através da utilização do sónometro integrador BZ 2260 da marca Brüel & Kjær, de acordo com a metodologia descrita na supra citada norma ISO, cujos pontos de medição estão indicados na figura 5.3 sendo, os resultados obtidos, apresentados na tabela 5.1. Os valores indicados dizem respeito ao funcionamento do veículo com todos os sistemas de ventilação e climatização desligados. Devido ao posicionamento traseiro do motor neste tipo de veículos, dos valores indicados na tabela 5.1, pode observar-se que, tal como seria de esperar, com o veículo imobilizado, os níveis de ruído são mais elevados na zona traseira do veículo, o mesmo não se verificando, para a velocidade de andamento mais elevada do autocarro, uma vez que o ruído de rolamento e o ruído aerodinâmico vão-se tornando preponderantes, relativamente ao ruído gerado pelo motor.

Procedimento idêntico foi efectuado para o mini-autocarro, tendo sido obtidos valores que conduziram à mesma conclusão, ou seja, de que a medição numa posição central no interior do autocarro é a que indica um valor médio ao longo da distribuição dos níveis de pressão sonora no interior dos mesmos. Neste tipo de autocarros e contrariamente aos valores apresentados na tabela 5.1, os níveis mais elevados de ruído

ocorreram preferencialmente na zona frontal do veículo em virtude do posicionamento dianteiro do motor.

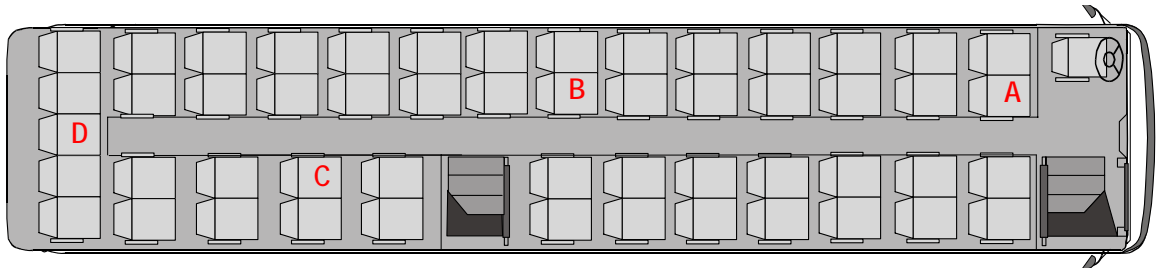


Figura 5.3 Localização de referência das medições de ruído apresentadas na tabela 5.1

Situação	Localização				Média
	A	B	C	D	
Imobilizado ao ralenti	52,5	55,7	57,8	58,6	56,1
Imobilizado às 2000 rpm	59,6	65,1	68,2	69,9	65,7
40 km/h	60,6	65,5	67,3	69,0	65,6
90 km/h	67,4	70,1	71,2	69,2	69,5

Tabela 5.1 Valores de L_{eq} [dB(A)] para um período de integração de 30s

Foi desenvolvido na plataforma de programação Labview, da empresa National Instruments, um aplicativo informático com o objectivo de calibrar o sistema, obter o nível de pressão sonora, o conteúdo espectral dos sons, bem como para proceder ao cálculo do índice de articulação dos mesmos.

O sistema foi calibrado, de forma independente para cada um dos ouvidos, através da geração de um sinal acústico de referência, tendo sido utilizado um calibrador acústico da marca Brüel & Kjær tipo 4230 (ver figura 5.4).



Figura 5.4 Procedimento de calibração do sistema de gravação sonora

Por forma a obter o valor de referência do calibrador no software desenvolvido, e como já era conhecida a sensibilidade do sinal em tensão à saída do condicionador (316 mV/Pa), o valor de pré-ganho foi ajustado de modo a que o nível de pressão sonora fosse igual ao do sinal gerado ou seja, 93,8 dB(A) para ambos os microfones. Na figura 5.5 apresenta-se a interface gráfica da aplicação desenvolvida, e na figura 5.6 o respectivo diagrama de blocos. A aplicação permite a análise conjunta de sinais sonoros em mono ou em estéreo, calculando ainda o valor médio entre ambos os sinais.

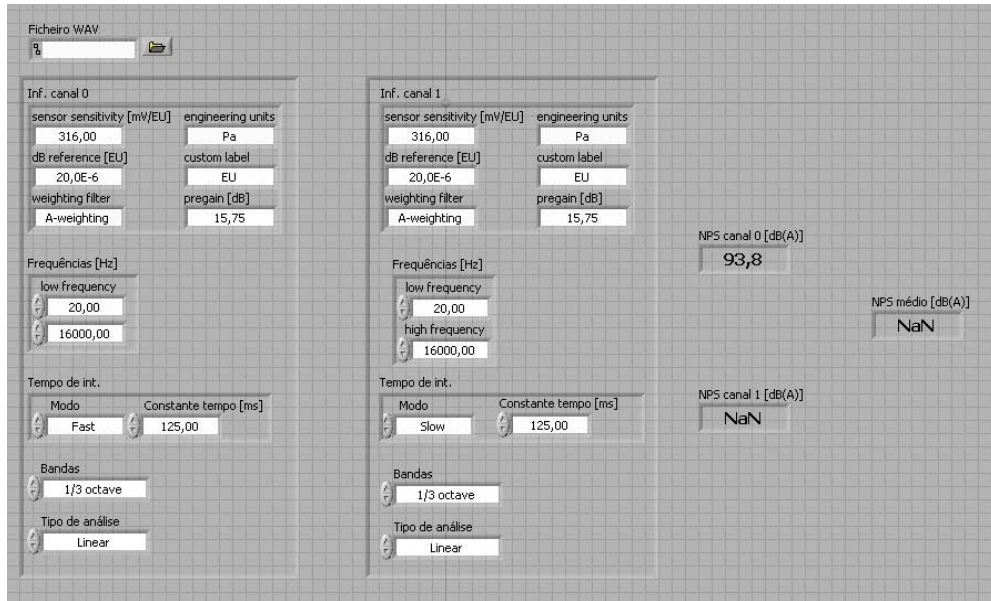


Figura 5.5 Interface gráfica do aplicativo de calibração do manequim

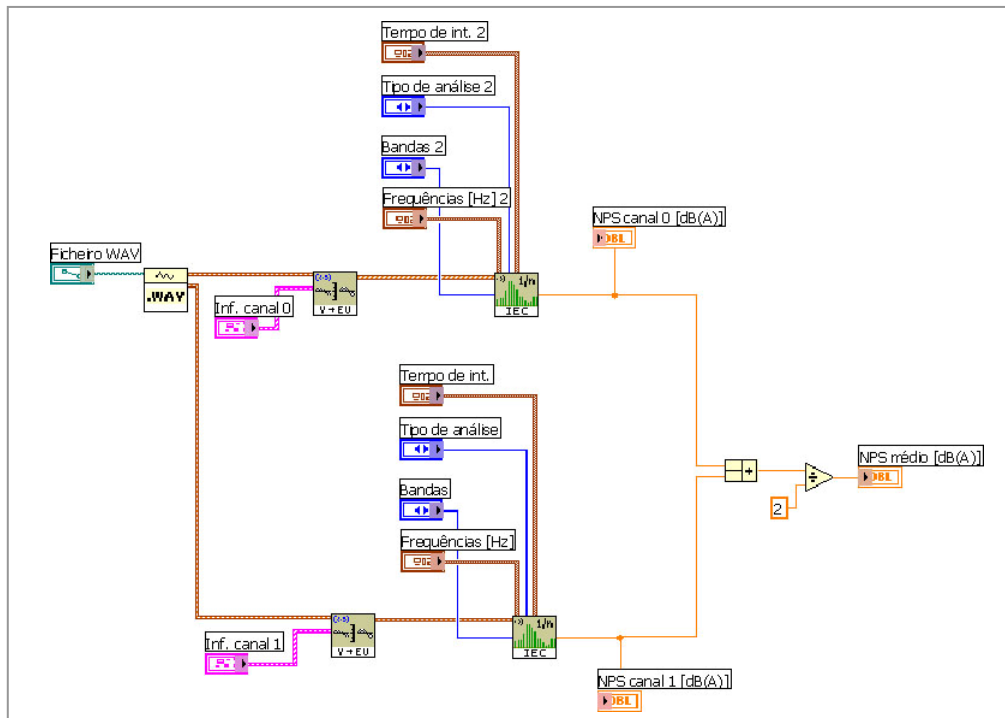


Figura 5.6 Diagrama de blocos do aplicativo de calibração do manequim

5.2.3. Sistema de reprodução de sons

O sistema de reprodução é constituído por um sistema de distribuição por infra-vermelhos para quatro auscultadores da marca Philips, modelo HF200, sendo utilizado como fonte sonora um computador portátil com uma placa de som.

A utilização dos auscultadores tem vindo a ser indicada como uma forma de minimizar os erros neste tipo de análise acústica. Optou-se pela utilização de auscultadores sem fios porque, para além de minimizar os erros, a sua facilidade de manuseamento permite rentabilizar o tempo de realização das avaliações subjectivas, através da reprodução simultânea para várias pessoas do mesmo som.

Os auscultadores apresentam uma resposta dinâmica desde 20 a 20000 Hz, tendo a análise incidindo nas bandas de terço de oitava entre os 25 e os 12500 Hz. Foram testados os quatro conjuntos no sistema de reprodução não se verificando diferenças significativas nos espectros de recepção, o que permitiu a sua utilização simultânea.

Para que o sinal gravado, através do sistema descrito, no interior dos autocarros, fosse reproduzido pelos auscultadores na cadeia de reprodução, teve que se proceder à equalização do sinal em frequência apara ajustar a distorção do mesmo. O objectivo desta operação encontra-se ilustrado na figura 5.7, onde se pretende que o ouvinte seja submetido a um campo sonoro idêntico ao que foi originalmente submetido o manequim.



Figura 5.7 Manequim acústico e avaliador sujeitos ao mesmo campo sonoro

Para efectuar a equalização do sistema de reprodução optou-se por utilizar uma fonte sonora com geração de ruído branco em campo aberto, direccionada para os ouvidos do manequim, a uma distância de 1,5 metros, com um nível sonoro superior a 80 dB(A) medidos na proximidade do manequim, e com ausência de vento susceptível de influenciar as medições. Efectuaram-se duas medições de dez minutos cada, tendo sido monitorizado o ruído ambiente, que em média apresentou valores da ordem dos 45 dB(A).

Dos vinte minutos de gravação efectuados foram retidos treze excertos aleatórios com uma duração de trinta segundos cada, que foram posteriormente reproduzidos no interior de uma câmara climatérica existente no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI), onde o nível de interferência sonora é bastante reduzido (ver figura 5.8).

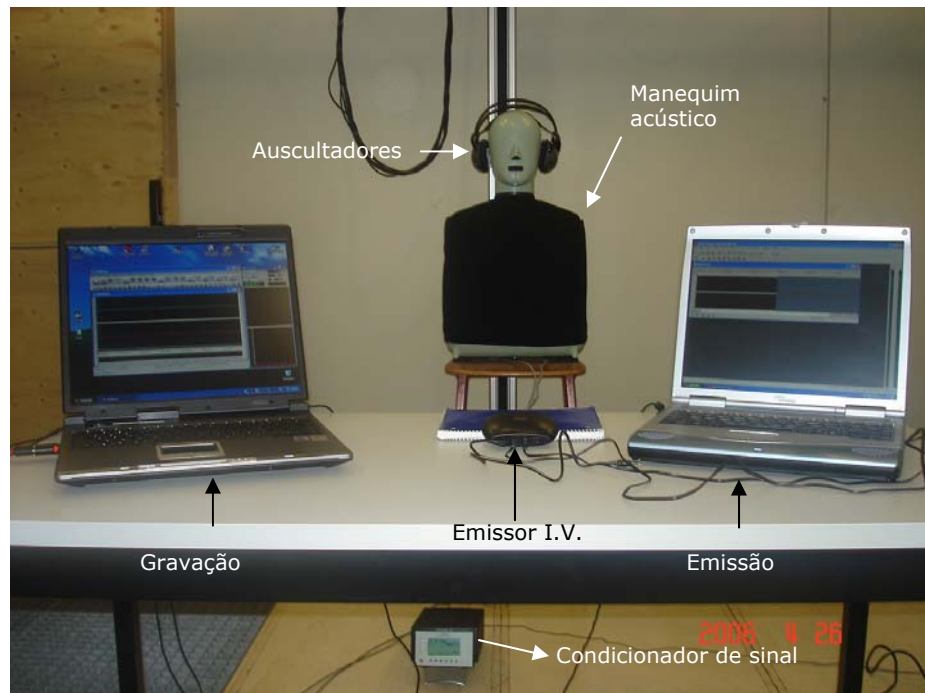


Figura 5.8 Montagem experimental para obtenção das curvas de equalização do sistema de reprodução

Desenvolveu-se outro aplicativo em Labview, por forma a analisar, para os dois canais em simultâneo, as diferenças existentes no espectro em terços de oitava após a gravação e o espectro de gravação obtido após a sua reprodução.

Na figura 5.9, apresentam-se os desvios padrões máximos das treze reproduções nas bandas de terço de oitava relevantes. Pode-se observar que os desvios padrões máximos ocorrem nas baixas frequências tendo no entanto amplitudes que garantem que o sistema de reprodução tem uma elevada reprodutibilidade.

As curvas de equalização para ambos os microfones são obtidas através das diferenças entre os respectivos espectros de gravação e reprodução. Os valores obtidos, para a cadeia de reprodução utilizada, apresentam-se na figura 5.10.

Os valores de correcção obtidos em cada banda de terço de oitava foram aplicados através do software Sound Forge, gerando assim os diversos sons com as modificações em frequência adequadas, por forma a que as pessoas tivessem a mesma sensação auditiva a que o manequim esteve sujeito, durante a gravação dos mesmos.

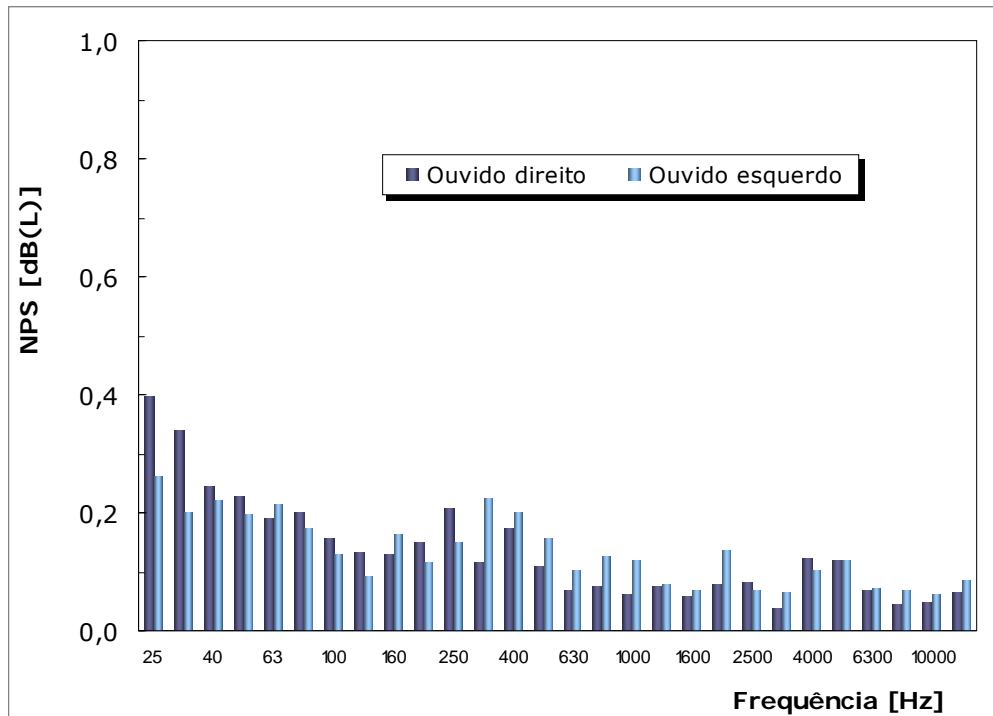


Figura 5.9 Desvios padrões máximos medidos utilizados na obtenção das curvas de equalização

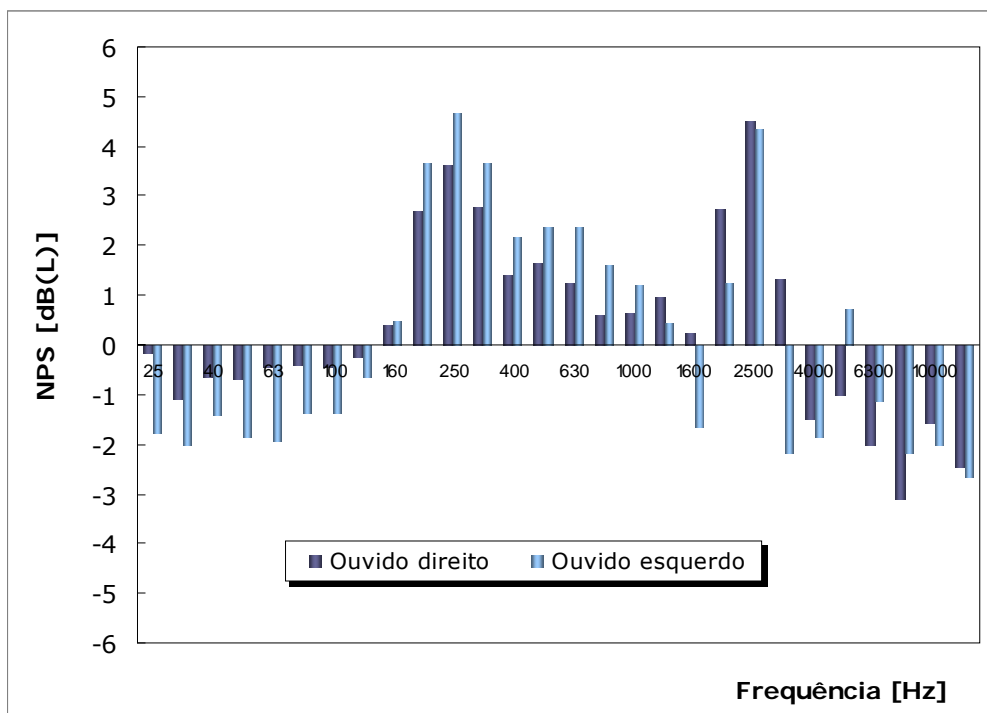


Figura 5.10 Curvas de equalização dos microfones do manequim acústico

A caracterização da matriz dos sons ao nível dos índices métricos referidos, foi feita através do recurso quer de aplicativos desenvolvidos em ambiente Labview, quer através da utilização do aplicativo de qualidade sonora da marca Brüel & Kjær (Sound Quality Program, version 10.3). Através do processo de calibração descrito foi possível utilizar os ficheiros neste programa de qualidade sonora.

Foram eleitos, em função da sua normalização no sector automóvel e da sua popularidade entre os construtores de veículos, os seguintes índices métricos: o nível de pressão sonora ponderado pela curva A [dB(A)], o índice de articulação e a sonoridade. Calcularam-se também os valores do nível de pressão sonora linear, ponderado pela curva B, C e D, bem como os valores da agudez e da aspereza. Todos estes parâmetros métricos objectivos foram calculados de forma independente para cada ouvido, sendo posteriormente considerado como representativo desse som, o valor médio dos dois ouvidos.

A versão 10.3, do programa de qualidade sonora Sound Quality Program, da empresa Brüel & Kjær, permite calcular todos os parâmetros métricos eleitos com excepção do índice de articulação descrito na secção 4.4.3.4., tendo este sido calculado através de um aplicativo desenvolvido em Labview. Neste aplicativo obtém-se também uma análise em frequência baseada em terços de oitava e o nível de pressão sonora linear, ponderado pela curva A, B e C. A comparação das duas ferramentas de cálculo relativamente a estes parâmetros métricos, revela uma elevada concordância entre os valores obtidos.

A sonoridade e a sonoridade específica são calculadas de acordo com a norma DIN 45631/ISO 532 B (Zwicker, 1982) sendo, o valor de agudez, obtido de acordo com o método descrito em Zwicker e Fastl (1990).

Relativamente aos oito sons base eleitos, foram aplicadas modificações em amplitude e em frequência tendo-se gerado uma matriz de 54 sons para serem submetidos a avaliação. As equalizações consistiram na aplicação de filtros digitais aos sinais originais, removendo determinadas zonas de frequências dos sons, tendo-se considerado as baixas frequências como sendo as inferiores a 280 Hz, as médias frequências as compreendidas entre 280 e 2800 Hz e altas frequências as superiores a 2800 Hz. A partir desta divisão criaram-se um total de seis tipos de equalização que estão indicadas na tabela 5.2. Este intervalo de frequências foi estabelecido tendo em atenção as gamas típicas de frequências sonoras que ocorrem no interior dos autocarros em função das diversas fontes de ruído existentes.

Os sons foram ordenados de forma aleatória, de modo a diminuir qualquer tipo de intervenção pessoal na escolha e ordenação dos mesmos, existindo dois sons idênticos

que ficaram aleatoriamente na posição oito e nove com o objectivo de testar a reprodutibilidade da resposta das pessoas.

Equalização	Descrição	Frequências [Hz]
1	Remove as baixas frequências	$f < 280$
2	Remove as baixas e médias frequências	$f < 2800$
3	Remove as médias frequências	$f > 280 \wedge f < 2800$
4	Remove as médias e altas frequências	$f > 280$
5	Remove as altas frequências	$f > 2800$
6	Remove as baixas e altas frequências	$f < 280 \wedge f > 2800$

Tabela 5.2 Equalizações utilizadas sobre os sons base

Os sinais sonoros podem ser decompostos numa soma de sinusóides (ver figura 5.11), obtida através de uma série de Fourier, cuja expressão matemática está indicada na equação 5.1. A equalização efectuada, consistiu na anulação dos coeficientes A_n para as frequências (f) que se pretenderam eliminar, através da utilização de filtragem digital.

$$F(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \alpha_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \alpha_2) + \dots + A_n \sin(2\pi f_n t + \alpha_n) \quad (5.1)$$

em que:

- $F(t)$ - série de Fourier da variável t [Pa]
- A_n - coef. da série de Fourier (amplitude do sinal elementar) [Pa]
- f_n - frequência [Hz]
- α_n - ângulo de fase [rad]

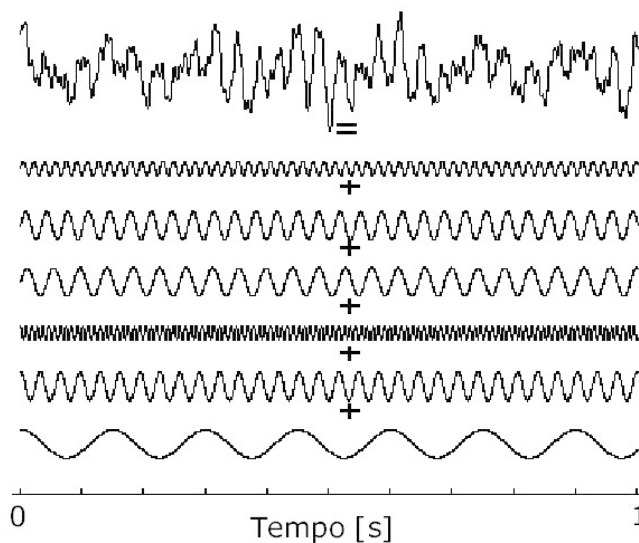


Figura 5.11 Decomposição de um sinal numa soma de sinusóides

5.2.4. Avaliação subjectiva

Seguiu-se a sequência habitual em análises de qualidade sonora, com as seguintes fases de recolha de sons, preparação, manipulação, reprodução e avaliação pelo painel de avaliadores numa determinada escala.

Um dos parâmetros essenciais a ter em conta, para diminuir os desvios durante as avaliações subjectivas, é o ambiente onde as pessoas irão expressar a sua opinião relativamente aos sons que lhe são apresentados. Os cuidados a ter prendem-se com diversos factores, sendo os seguintes considerados como mais importantes: a acústica da sala, o ruído ambiente, o efeito visual, e as condições térmicas (temperatura, humidade e ventilação).

Se nalgum tipo de análises o efeito visual do ambiente de reprodução tem uma baixa influência, relativamente à avaliação de sons no interior de veículos, essa influência, ao nível psicológico, é bastante elevada. Assim sendo, um dos desafios, foi o local de reprodução dos sons. Um objectivo futuro é o de desenvolver um simulador de autocarro, de forma similar aos existentes para aviões e veículos ligeiros, onde possam simular-se e controlar as diversas grandezas ambientais que afectam o conforto ambiental dos passageiros. Nesta fase, em virtude das limitações temporais associadas a este trabalho, não foi ainda possível conceber tal simulador, tendo-se optado, por forma a evitar desvios provenientes da acústica do local de reprodução dos sons bem como do efeito de decoração do espaço, por utilizar o mini-autocarro que tinha sido utilizado na gravação dos sons. Tal como já mencionado, o modo eleito para a reprodução dos sons foi a utilização de auscultadores com as vantagens inerentes e recomendadas em diversas bibliografias, dos mesmos se destacando a não interferência da acústica do ambiente de reprodução. O ambiente de reprodução está representado na figura 5.12.

O veículo foi estacionado no interior do edifício do Laboratório de Aerodinâmica Industrial, tendo as avaliações subjectivas decorrido no período de 24 de Maio a 1 de Junho de 2006. As grandezas características das condições ambientais foram monitorizadas para avaliar os parâmetros ambientais, garantindo que se mantivessem dentro de valores que não influenciassem as respostas dos passageiros. O equipamento utilizado para monitorizar estas grandezas foi o mesmo que foi utilizado para avaliar a qualidade do ar no interior dos autocarros e que será descrito detalhadamente na secção 5.3.2.4.

Atendendo a que os sons em análise dizem respeito a viagens típicas no interior dos autocarros, não existia nenhum critério específico no recrutamento das pessoas para exprimirem a sua sensação acústica relativamente aos mesmos, sendo apenas

questionadas acerca da ausência de qualquer tipo de perturbação no sistema auditivo, de modo a poderem ser consideradas pessoas com um sistema auditivo saudável.



Figura 5.12 Vista interior do ambiente de reprodução dos sons

Outro parâmetro importante neste tipo de avaliação é o número da amostra. Assim, foi estabelecido à partida um número superior a trinta pessoas, com base na consideração mínima, em termos estatísticos, de se obter uma amostra considerada representativa da população. No final, validaram-se um total de quarenta e nove inquéritos de avaliação.

A metodologia seguida, bem como os tempos de avaliação, foi a seguinte:

1. era explicado às pessoas o objectivo da avaliação que consistia em escutar um som e exprimir numa escala subjectiva a sua sensação de desconforto relativamente ao mesmo (10 minutos);
2. preenchimento da primeira página do questionário (ver anexo A) com a recolha dos dados para caracterização da amostra relativa à idade, altura, peso e género (2 minutos);
3. era solicitado às pessoas para colocarem os auscultadores, tendo sempre atenção o modo como os mesmos eram colocados, por forma a garantir que os ouvidos (direito e esquerdo) ficassem submetidos ao mesmo som que tinha sido "ouvido" pelo manequim durante a gravação do mesmo (1 minuto);
4. por forma a adaptar a sensibilidade do sistema auditivo relativamente aos sons sobre os quais lhes iria ser solicitada a votação, apresentava-se uma

sequência contínua de sons durante um minuto contendo os níveis máximos, mínimos e com diversos espectros em frequência (1 minuto);

- de seguida era iniciada a avaliação dos sons que consistia numa sequência de cinquenta e quatro sons, com a duração cada um de cinco segundos e com um período de silêncio entre dois sons consecutivos, de cinco segundos (9 minutos).

Durante a explicação do modo de avaliação, as pessoas eram instruídas para votarem a sua sensação numa escala contínua através o preenchimento de um questionário de desconforto, que se apresenta no anexo A, colocando uma cruz sobre uma linha colorida graduada (ver figura 5.13). Era sugerido que respondessem calmamente e, que caso precisassem, o teste seria interrompido, repetindo-se a avaliação do som onde tinham ficado.

A metodologia foi testada previamente, tendo-se concluído que a sua execução não oferecia dificuldades.

O tempo total das avaliações previsto e medido durante a validação da metodologia foi de cerca de 26 minutos, que é inferior ao tempo máximo recomendado por Otto *et al.* (1999) para este tipo de avaliações.

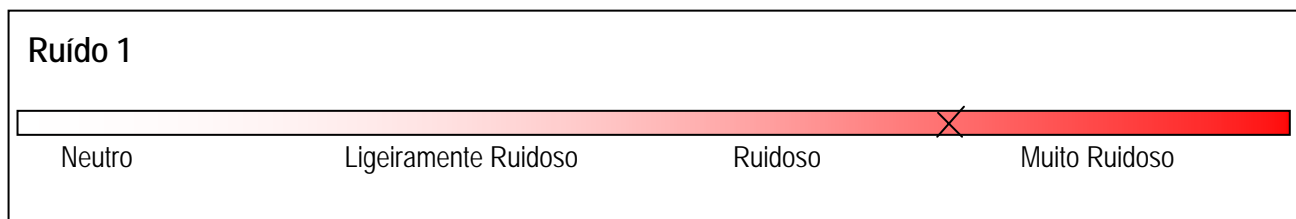


Figura 5.13 Escala subjetiva de desconforto acústico utilizada

Os votos dos avaliadores sobre o nível de ruído de cada um dos sinais (ver fig. 5.13), foram convertidos numa escala quantificada de desconforto, de 0 a 100%, através da sobreposição de uma régua de normalização (conforme fig. 5.14), sendo a leitura feita sempre pela mesma pessoa de modo a minimizar a dispersão da leitura. Consideraram-se os limites inferior e superior ligeiramente dentro da linha em virtude da experiência demonstrar que as pessoas, através deste método de avaliação, não utilizam a zona junto dos cantos extremos para expressar a sua sensação de desconforto.

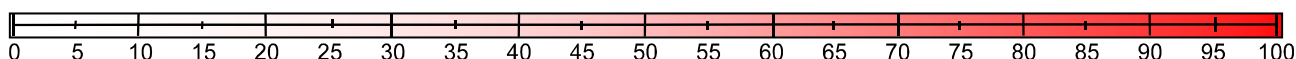


Figura 5.14 Normalização das respostas subjectivas

Os elementos do painel de avaliação foram distribuídos no habitáculo do mini-autocarro de maneira a terem boa luminosidade e a estarem numa zona de boa captação do sinal sonoro, sendo sempre utilizados os mesmos quatro assentos. A imagem apresentada na figura 5.15 exemplifica a disposição de uma sessão de avaliadores.



Figura 5.15 Ensaio de avaliação subjectiva dos sons

5.3. Análise de desconforto ambiental

O objectivo principal definido para a análise do desconforto ambiental no interior dos autocarros foi o de proceder a avaliações métricas objectivas e simultaneamente a avaliações subjectivas sobre o nível de desconforto ambiental relativo a estímulos parciais (ambiente térmico, vibrações, ruído, qualidade do ar e luminosidade) e obter uma avaliação subjectiva do nível de desconforto global relativo a esse ambiente.

Este tipo de metodologia teve um primeiro período que decorreu no âmbito do projecto Combistress, entre o ano de 2000 e 2003, onde foram testados diversos tipos de questionários para a avaliação subjectiva. Durante este período, monitorizaram-se os diversos estímulos ambientais com vista à caracterização das condições típicas dos mesmos no interior dos autocarros, tendo sido apenas utilizados autocarros de turismo e não foi incluído, como estímulo de desconforto, a luminosidade. Assim, de todo o trabalho desenvolvido nesta fase, serão apresentados, durante esta dissertação, alguns tópicos desenvolvidos, como seja o questionário final validado para efectuar as

avaliações subjectivas e os últimos seis testes que, apesar de não incluírem todas as medições métricas objectivas comparáveis com a metodologia validada posteriormente, permitem a utilização de alguns dados na correlação entre dados objectivos e subjectivos assim como toda a avaliação subjectiva que é igual à actualmente utilizada. O segundo período de avaliação decorreu com as análises efectuadas entre o ano de 2005 e 2006 e foram realizadas durante o desenvolvimento do projecto Autocomfort.

A metodologia experimental agora descrita representa uma evolução relativamente à apresentada em Alcobia (1998).

Nas secções seguintes, far-se-à a apresentação da metodologia geral de ensaio bem como dos métodos de medição das grandezas físicas e de avaliação subjectiva pelos passageiros.

5.3.1. Metodologia geral de ensaio

Dos múltiplos ensaios realizados desde o ano de 2000 até à presente data validaram-se 31 viagens com interesse a reportar neste trabalho. Assim, foram apenas validados os ensaios que incluíram uma avaliação simultânea das grandezas físicas eleitas e das avaliações subjectivas, bem como uma avaliação subjectiva sobre o nível de desconforto global.

O primeiro destes ensaios decorreu no dia 20 de Maio de 2002 e o último no dia 28 de Abril de 2006. Ao longo de todos os testes, o procedimento foi o seguinte:

1. instalação prévia dos equipamentos de medição utilizados, na zona central do autocarro;
2. entrada dos passageiros, distribuídos uniformemente ao longo do veículo;
3. explicação sobre o objectivo dos ensaios e exemplificação sobre o método de preenchimento do questionário de avaliação;
4. monitorização das grandezas físicas durante o percurso;
5. paragem e avaliação subjectiva sobre os aspectos parcelares e global do desconforto no período do percurso;
6. tratamento dos dados recolhidos;
7. análise parcial por estímulo das grandezas objectiva e subjectivas.

O tempo mínimo inicialmente previsto para que os órgãos dos sentidos integrassem as diferentes grandezas físicas foi de cerca de dez minutos, não tendo sido definido um valor máximo em virtude de se pretenderem avaliar situações típicas de viagens neste tipo de veículos.

Na selecção dos trajectos, das condições de circulação dos veículos e das condições meteorológicas exteriores procurou-se conseguir as gamas de variação das várias grandezas físicas que tipicamente ocorrem nos habitáculos de autocarros, de modo a que a modelação da resposta humana pudesse ser construída através de dados relativos a um largo intervalo de condições de funcionamento e operação dos mesmos.

Durante os 31 percursos foram utilizados autocarros de turismo e mini-autocarros, dos mesmos fazendo parte tanto percursos citadinos como interurbanos.

5.3.2. Medições objectivas

Os cinco factores físicos eleitos como estímulos de desconforto ambiental foram o ambiente térmico, as vibrações, o ruído, a qualidade do ar e a luminosidade. No capítulo quatro foi indicado o actual estado de arte ao nível dos métodos de medição destas grandezas. Seguidamente serão apresentados os métodos de medida utilizados em cada uma das grandezas físicas, bem como a disposição global de toda a instrumentação.

5.3.2.1. Ambiente térmico

A temperatura equivalente foi escolhida para caracterizar o ambiente térmico, por ser o índice que reúne maior consenso no interior dos veículos. A sua medição pode ser efectuada de diversas formas, tendo sido experimentada durante a execução do projecto Combistress a sua avaliação quer através de um manequim térmico, quer através do medidor de conforto térmico da marca Brüel & Kjær tipo 1212, apresentado na figura 5.16. Nos testes validados de acordo com a metodologia desenvolvida optou-se pela utilização deste segundo método em virtude da elevada instrumentação requerida e do espaço ocupado pelo manequim térmico, sendo este um método mais expedito e simples de configurar, quando conjugado com tantas grandezas físicas em simultâneo.

O medidor utilizado tem um carácter bastante portátil, medindo o efeito do meio ambiente sobre o homem, a partir da simulação da equação do balanço térmico. Este equipamento de medida consiste num sensor de forma elipsoidal, cuja superfície é aquecida até à temperatura supostamente atingida pela superfície exterior do vestuário utilizado pelo indivíduo que o mesmo pretende simular.

A determinação da sua temperatura de funcionamento é feita internamente após introdução dos seguintes parâmetros: valor da resistência térmica do vestuário adoptado, nível de metabolismo correspondente à actividade desempenhada pelo

indivíduo e pressão parcial de vapor de água no ar ambiente. Em função da potência consumida para assegurar a temperatura superficial constante é calculado o valor da temperatura equivalente bem como os valores dos índices *PMV* e *PPD*. A gama de utilização recomendada para o equipamento vai de -12 a +32 °C. A sua alimentação era feita através do recurso a seis baterias, utilizando-se um acessório próprio permitindo assim que a sua utilização nos autocarros não implicasse qualquer tipo de alimentação eléctrica externa.



Figura 5.16 Medidor de conforto Brüel & Kjær 1212

Na figura 5.17 representa-se o esquema de funcionamento do equipamento utilizado. Para além dos parâmetros anteriormente mencionados, este equipamento permite ainda indicar o valor da temperatura operativa, que é função da resistência eléctrica de um fio de níquel que, enrolado na sua superfície, funciona como termoresistência, bem como o valor da temperatura de conforto, que é calculada com base nos parâmetros introduzidos sobre o vestuário e o nível de metabolismo da pessoa simulada. Todos estes valores são apresentados, alternativamente, mediante escolha do operador, no mostrador digital do aparelho, existindo três saídas analógicas em tensão eléctrica: uma, para o valor do índice *PMV*; outra, para o valor da temperatura de conforto; e uma última correspondente ao valor da grandeza escolhida para ser afixada no mostrador.

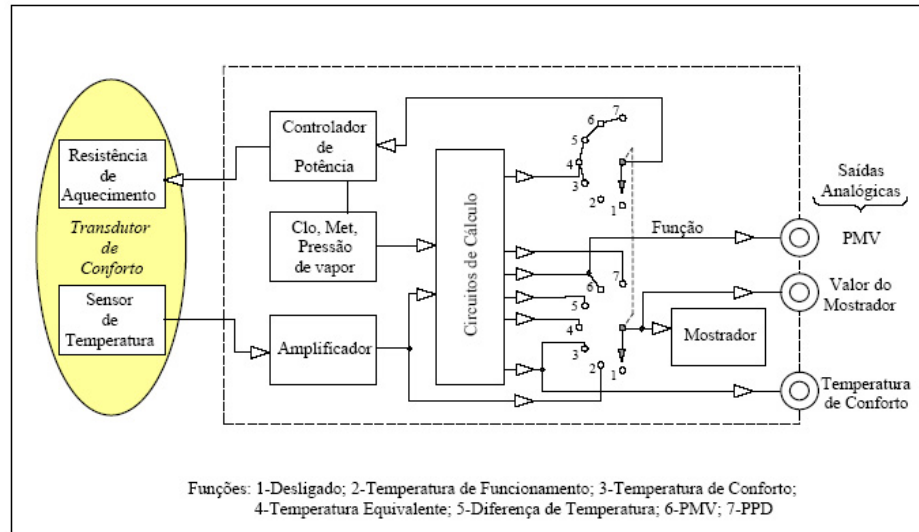


Figura 5.17 Esquema de funcionamento do medidor de conforto Brüel & Kjær 1212

Foi utilizada esta última saída analógica, tendo sido seleccionada a temperatura equivalente. A resolução desta saída é de 0,1 V/°C, tendo o seu registo sido efectuado através do recurso a um sistema de aquisição de dados portátil da marca LI-COR que apresenta uma elevada capacidade de armazenamento de dados. Após a realização de cada ensaio, os dados recolhidos foram transferidos para um computador, através da porta de comunicação RS-232, sendo utilizado um software de transferência de dados existente no próprio sistema operativo Windows. Na figura 5.18 apresenta-se uma imagem do sistema de aquisição relativo a esta grandeza física.

Atendendo ao tempo de resposta do sensor optou-se por um período de aquisição do sinal de um minuto, posicionando-se o sensor a uma altura de 0,6 m acima do assento com uma inclinação 30°, tal como é indicado na norma ISO 7730 (2005), de modo a simular uma pessoa sentada.

Desenvolveu-se, a partir do programa de cálculo anexo à norma ISO 7730 (2005), um aplicativo para obter os valores de *PMV* e de *PPD* corrigidos, tendo em conta o valor do índice de isolamento do vestuário indicado durante as medições, a humidade relativa registada e a possibilidade de considerar diferentes actividades metabólicas. Aos valores do índice de isolamento do vestuário, tal como sugerido por Olesen (1992), foram adicionados 0,2 clo de forma a considerar o efeito do assento dos veículos. A actividade metabólica seleccionada no medidor de conforto foi de 1,0 met.

Em virtude de se pretender obter uma avaliação média das grandezas físicas em análise, optou-se sempre por colocar o sistema de medição do ambiente térmico numa posição central quer nos autocarros de turismo, quer nos mini-autocarros.



Figura 5.18 Esquema global da instrumentação utilizada relativa ao ambiente térmico

5.3.2.2. Vibrações

O parâmetro objectivo eleito para caracterizar as vibrações no interior dos autocarros foi o valor da aceleração ponderada relativamente aos três eixos ortogonais (a_v) obtida de acordo com as expressões apresentadas no capítulo anterior. Com vista à sua obtenção, foi desenvolvido um sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados que será descrito nas secções seguintes.

Em todas as medições seguiram-se as indicações da norma ISO 2631 (1997) relativamente à medição do conforto em veículos, tendo-se assim optado, em virtude de se pretenderem valores médios, pela localização do acelerómetro no meio dos veículos (ver figura 5.19). Nesta figura está também indicado o sistema de eixos utilizado de acordo com a norma ISO 2631 (1997).

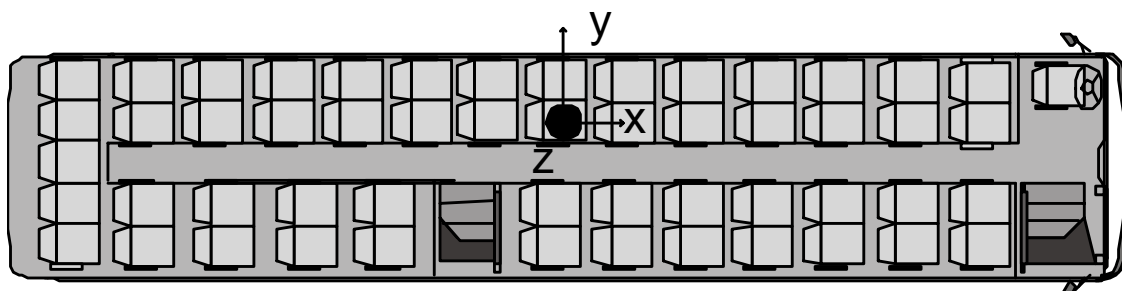


Figura 5.19 Localização do sistema de medição de vibrações nos autocarros de turismo

5.3.2.2.1 Equipamento de aquisição e condicionamento

O sistema de aquisição desenvolvido, e que se esquematiza na figura 5.20, baseia-se num computador pessoal portátil, ligado a uma placa de conversão analógica-digital à qual está ligado um condicionador do sinal proveniente de um acelerómetro piezoeléctrico tri-axial. O sinal adquirido é armazenado e posteriormente tratado com software desenvolvido para o efeito.

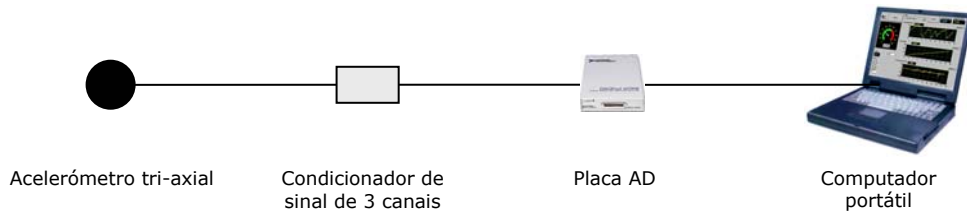


Figura 5.20 Esquema do sistema de aquisição dos sinais das vibrações

O sistema foi desenvolvido tendo como elemento sensor primário um acelerómetro piezoeléctrico tri-axial da marca Brüel & Kjær, do tipo 4322. Este tipo de sensor é vulgarmente designado de sensor de almofada. As sensibilidades axiais do sensor, de acordo com as especificações do fabricante, estão indicadas na tabela 5.3.

Eixo	X	Y	Z	Unidades
Sensibilidade de carga (159,2 Hz)	1,001	1,008	1,014	pC/ms ⁻²
Sensibilidade de carga (1,25 Hz)	1,054	1,061	1,068	pC/ms ⁻²

Tabela 5.3 Sensibilidades do acelerómetro tri-axial da Brüel & Kjær do tipo 4322

A saída do sensor é ligada a um sistema de condicionamento de sinal composto por três canais iguais, cuja saída se destina a ser ligada à placa de aquisição. Cada canal do sistema de condicionamento é composto por dois estágios distintos de amplificação. O estágio de entrada corresponde a um amplificador de carga, cuja função é transformar em tensão o sinal de carga correspondente à saída dos acelerómetros. Esta função é assegurada por um circuito integrado do tipo AD 549. O circuito implementado possui uma frequência de corte de 160 Hz, que é claramente superior à frequência máxima do sinal que se pretende analisar. A saída do amplificador de carga é ligado ao segundo estágio, constituído por um amplificador de instrumentação de precisão, do tipo AD 524. Para ser possível uma boa adaptação da amplitude dos sinais de tensão correspondentes à vibração, é possível seleccionar quatro valores de ganho diferentes: 1, 10, 100 ou

1000. Para além do ganho, é também possível regular o valor do desvio de zero na entrada e na saída, através de potenciómetros multipista.

Cada um dos três canais do sistema de condicionamento é alimentado por um conversor DC/DC cuja saída é de ± 15 volts, o que, para além de possibilitar a alimentação de energia dos circuitos de cada canal, garante um melhor isolamento entre os três canais.

Todo o conjunto, correspondente aos três eixos, encontra-se montado nas respectivas placas de circuito impresso, feitas em fibra "epoxy", devidamente encerradas no interior de uma caixa metálica o que lhe confere uma elevado grau de imunidade a ruídos eléctricos induzidos.

Destinando-se este sistema a ser utilizado para a medição das vibrações no interior de veículos pesados e ligeiros, é possível alimentá-lo directamente de uma bateria ou de uma tomada do veículo, em virtude de a sua alimentação poder ser feita com uma tensão contínua compreendida entre 9 e 28 volts.

A placa de aquisição utilizada é da marca National Instruments, modelo DAQPad-6020E, com uma resolução de 12 bits, capacidade de aquisição máxima de 100000 amostras por segundo, permitindo adquirir sinais em tensão numa gama máxima de ± 10 V, e ligação com o computador portátil através da porta de comunicação USB.

5.3.2.2.2 Programa de computador

Foram desenvolvidos dois programas de computador com vista à aquisição e processamento dos dados relativos à medição e análise do efeito das vibrações sobre o corpo humano. Assim, a primeira versão foi desenvolvida no programa comercial de desenvolvimento de aplicações Testpoint, sendo a segunda versão desenvolvida no programa comercial de desenvolvimento de aplicações Labview. O objectivo de desenvolvimento de um segundo software consistiu sobretudo na possibilidade de criar uma ferramenta mais flexível em termos de sistema operativo dos computadores bem como relativamente às placas de aquisição a utilizar. Outra enorme vantagem da segunda versão consiste na elevada diminuição do tamanho dos ficheiros de dados adquiridos e na velocidade de processamento de dados. Como exemplo deste incremento pode citar-se que um ficheiro que na primeira versão ocupava cerca de 40 MB passou a ter uma dimensão de 13 MB, tendo o seu tempo de processamento diminuído de cerca de dez minutos para menos de um minuto. De seguida, apenas será apresentada a segunda versão de software desenvolvida, que permite ao utilizador controlar todos os parâmetros relevantes de aquisição, tais como: a frequência de varrimento dos canais, o

início e o fim da aquisição, o tipo de ganho utilizado no condicionador, o nome do ficheiro, etc. O menu principal está representado na figura 5.21, onde se pode ver que é constituído por três opções: aceder a uma zona de testes, aceder ao menu para adquirir os dados ou aceder a uma zona de análise e obtenção de resultados. Neste menu principal o operador pode seleccionar qualquer uma destas opções ou alternativamente pode optar por abandonar a aplicação premindo para o efeito o botão com a indicação “Sair”.

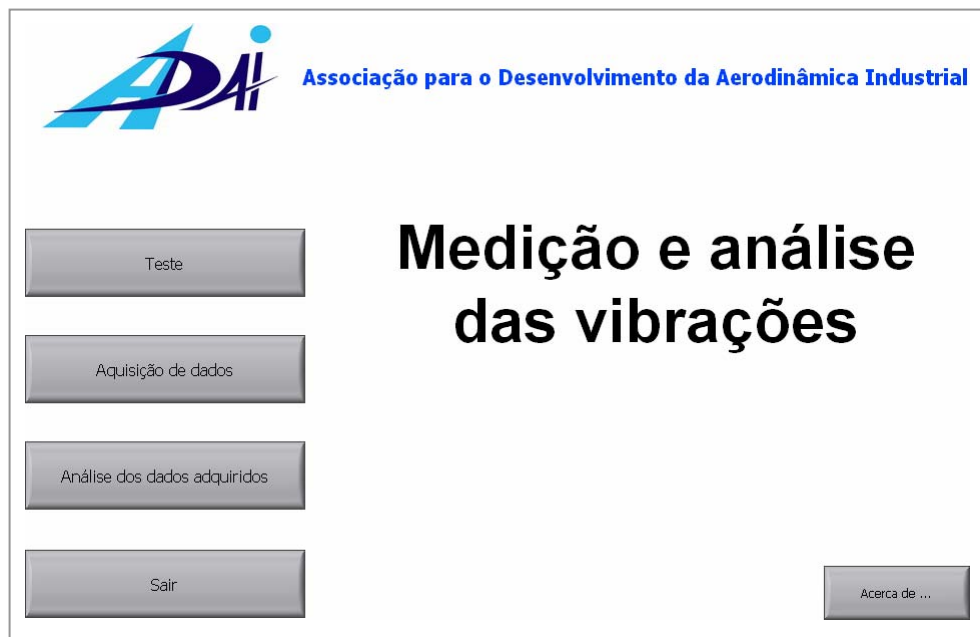


Figura 5.21 Menu de entrada do software de medição e análise das vibrações

Na figura 5.22 apresenta-se uma parte do diagrama de blocos correspondente ao menu principal do software desenvolvido. Este diagrama de blocos é constituído por uma ferramenta do Labview designada de eventos temporais onde o operador pode optar por aceder sequencialmente a diversos menus.

Na anteriormente designada zona de testes (ver figura 5.23), o operador pode testar a funcionalidade do sistema. Para tal, apenas necessita indicar a frequência de aquisição, que por defeito é de 273 Hz, e accionar o botão “Iniciar”. Após este accionamento, a evolução temporal dos sinais provenientes dos três canais serão apresentadas no gráfico representado na figura na unidade de tensão eléctrica, ou seja, em volts. Através do simples abanar com um movimento harmónico, é possível verificar se os três eixos de medição estão a funcionar correctamente. Esta zona é muito importante, pois sem ela não seria possível detectar qualquer tipo de anomalia, nomeadamente ao nível da alimentação dos diversos componentes do sistema de

medida. Quer nesta zona como na de aquisição de dados, existe uma dimensão que foi designada de número de amostras não transferidas que serve para controlar se a frequência de aquisição imposta, permite que ao longo dos períodos, todas as leituras sejam transmitidas para a memória do computador.

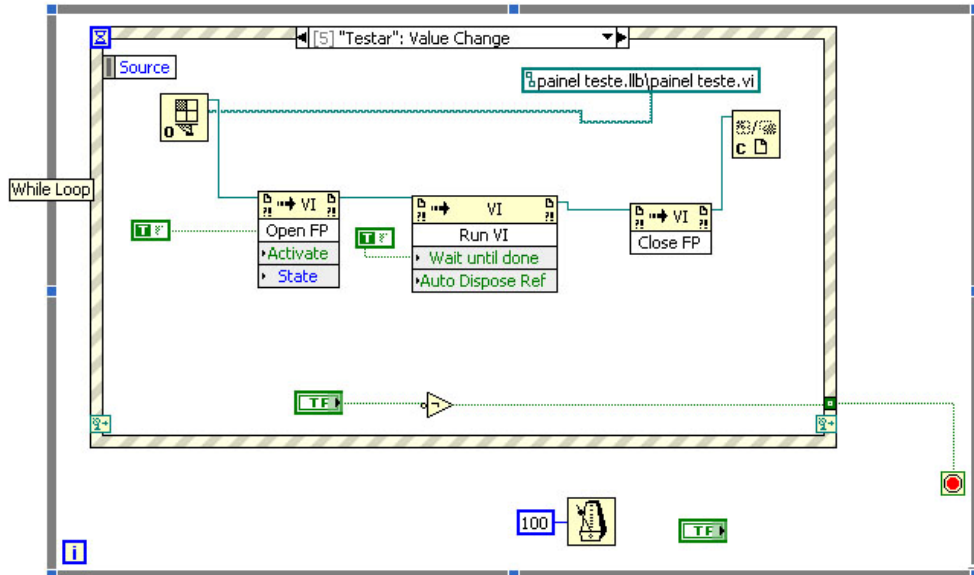


Figura 5.22 Diagrama de blocos do menu de entrada do software

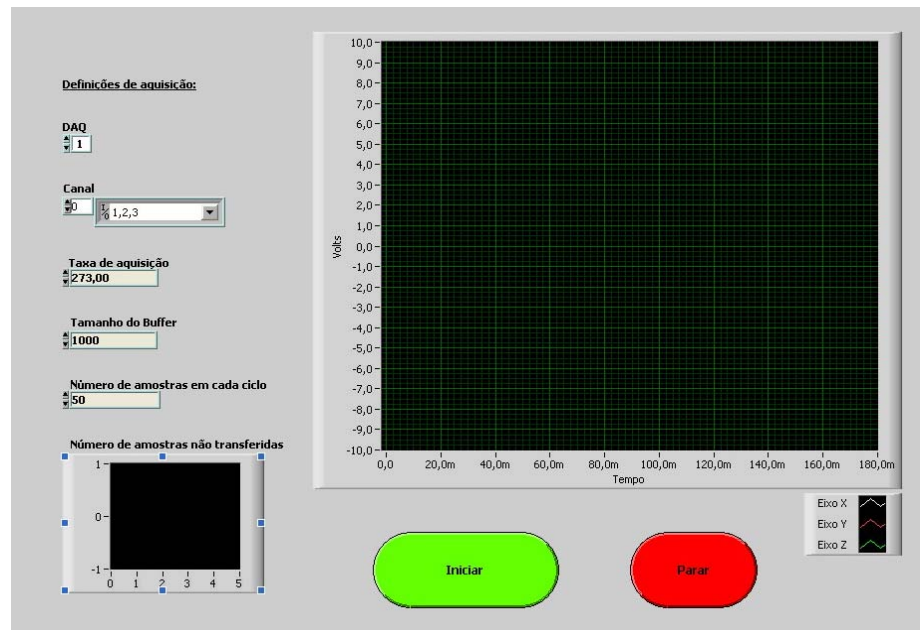


Figura 5.23 Menu de teste do software de medição e análise das vibrações

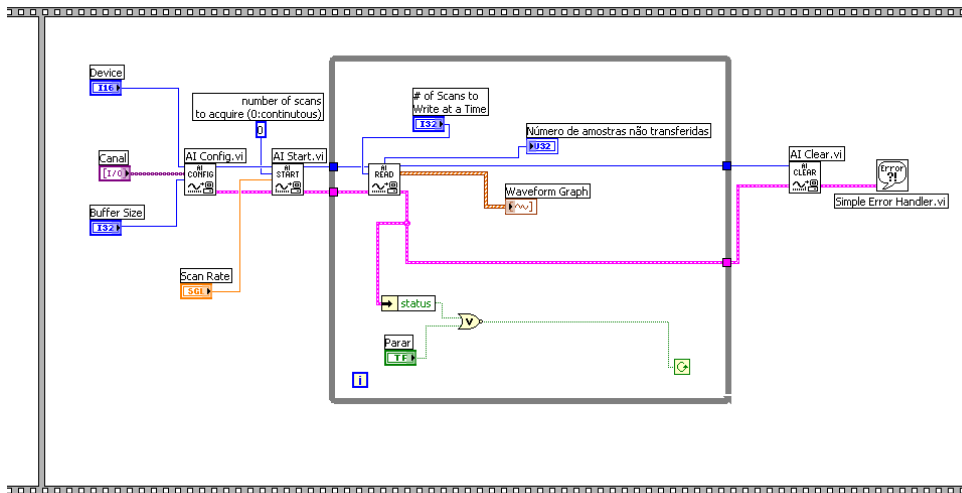


Figura 5.24 Diagrama de blocos do menu de teste

O diagrama de blocos da zona de teste encontra-se representado na figura 5.24, podendo, tal como todo o software desenvolvido, ser adaptado a outro tipo de placas de aquisição de dados. Este diagrama de blocos é constituído por uma primeira operação de configuração sobre a placa de aquisição a utilizar, os canais a medir e a frequência de aquisição, seguindo-se a leitura dos sinais na placa e indicação num gráfico da evolução temporal dos mesmos.

A zona de aquisição dos sinais de vibração encontra-se representada na figura 5.25. Por forma a tornar simples a posterior identificação das leituras efectuadas, o nome do ficheiro onde as leituras serão armazenados é gerado de uma forma automática, através de uma identificação constituída pelo nome “teste” seguida do dia, mês, ano e hora que vai sendo actualizada a cada segundo que passa. Caso o operador queira optar por outra designação para o nome do ficheiro, basta pressionar o campo de cor azul existente nesta zona do software. Na figura 5.26 apresenta-se em detalhe o diagrama de blocos respeitante a esta opção desenvolvida. Para além desta questão, o operador pode ainda definir a placa de aquisição a utilizar tendo que ter o cuidado de definir qual a resolução da mesma, os canais a adquirir, a frequência de aquisição, a amplitude do sinal em tensão e o tempo de aquisição que pretende efectuar. Relativamente ao tempo de aquisição, caso se pretenda uma aquisição contínua, basta optar por indicar nesse campo, o valor nulo. Na escolha da frequência de aquisição dos dados deve ter-se em conta o teorema de Nyquist, segundo o qual “a taxa de amostragem de um sistema que está a adquirir um sinal deve ter uma frequência pelo menos dupla da frequência mais elevada do referido sinal” (Bendat, 1986). Para sinais de vibração no corpo humano, uma frequência de aquisição de 160 amostras por segundo é suficiente, dado que a gama de vibrações a considerar situa-se, de acordo com a norma ISO 2631 (1997), entre os 0,1 e os 80 Hz.

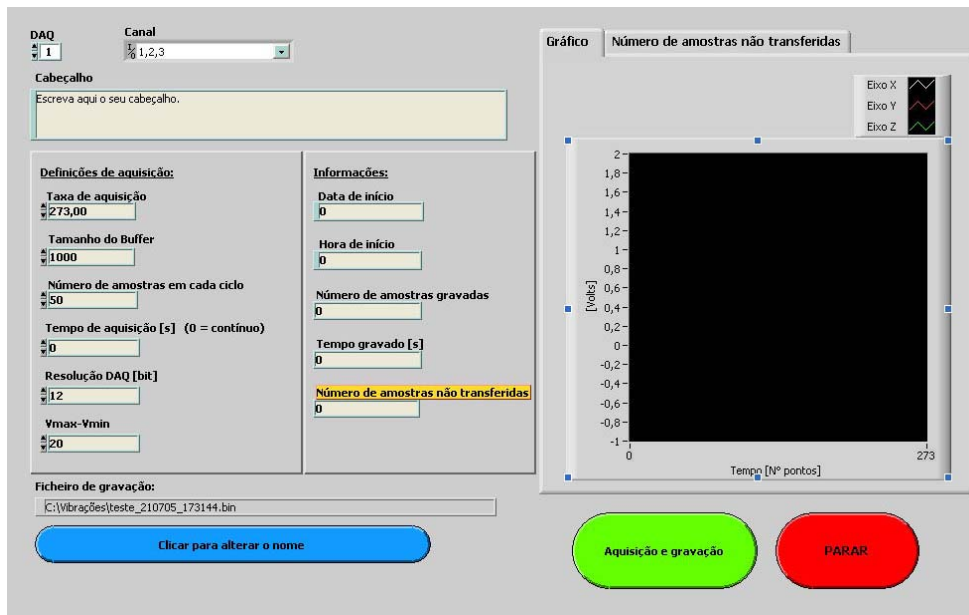


Figura 5.25 Menu de aquisição do software de medição e análise das vibrações

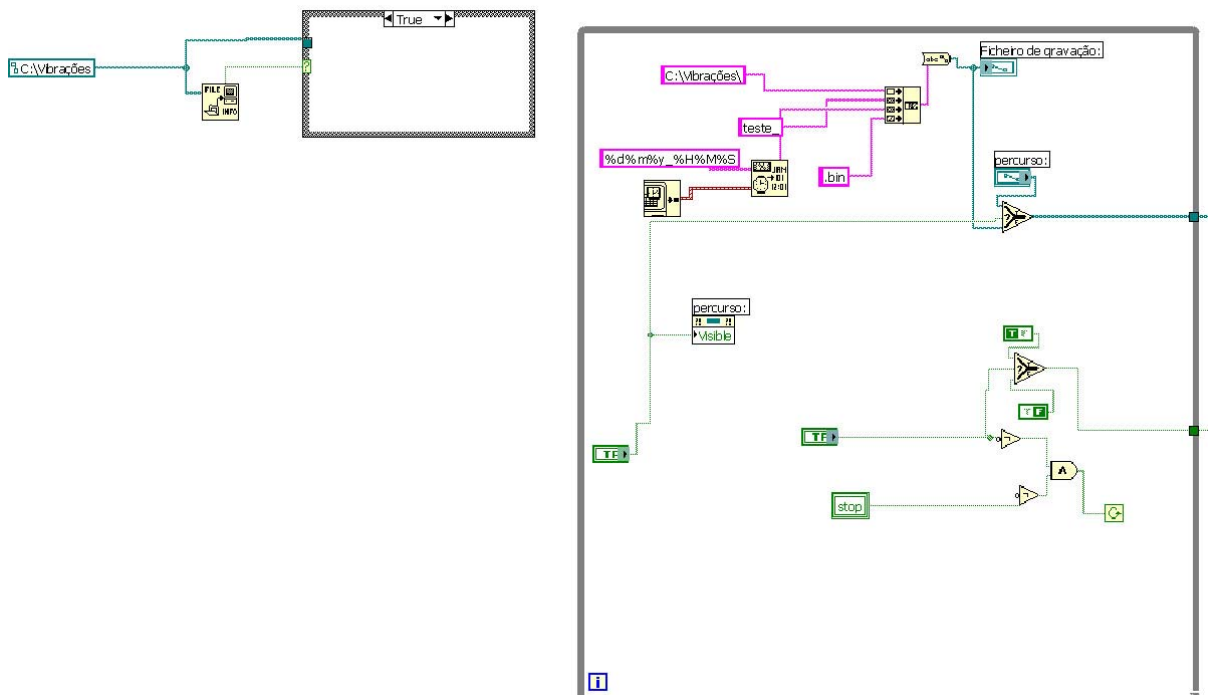


Figura 5.26 Detalhe do diagrama de blocos do menu de aquisição relativo à designação automática do nome do ficheiro de armazenamento dos dados

Após terem sido seleccionados os parâmetros pretendidos, é necessário pressionar o botão de cor verde com vista a adquirir e armazenar os dados na memória do computador. Durante a aquisição dos sinais de vibração, os mesmos vão sendo representados graficamente em função da sua evolução temporal. Também durante esta fase, existe uma zona do menu onde são fornecidas as seguintes informações ao

operador: data e hora de início de aquisição, número de amostras gravadas, tempo total de gravação efectuada e o número de amostras não transferidas. A aquisição do sinal de vibração termina de uma de duas maneiras: ou pelo limite de tempo imposto durante a configuração das medições ou, caso o botão "PARAR" seja pressionado.

Na figura 5.27 apresenta-se uma imagem da interface gráfica do programa de tratamento de dados. Para proceder ao tratamento, o utilizador tem de aceder ao ficheiro de dados. Após seleccionar o ficheiro a analisar, o utilizador pode escolher a situação que pretende analisar dentro das que são abordadas na norma de referência (saúde, conforto ou percepção) ou ainda optar por definir uma situação personalizada para os factores de ponderação K_x , K_y e K_z . As outras opções consistem no facto de pretender escrever em ficheiro os resultados e na geração de uma evolução temporal ou não do sinal de aceleração em metros por segundo quadrado, bem como a dimensão da amostra que se pretende analisar, sendo a segunda opção bastante útil caso se pretenda apenas medir vibrações lineares sem qualquer tipo de ponderação, ou seja, para simplesmente se obter o valor de *rms* linear. Relativamente à dimensão da amostra que se pretende analisar, o programa permite efectuar uma análise a todos os dados de vibração armazenados ou então fazer uma análise parcial que pode ser definida quer em termos de tempo de análise quer de amostras de dados recolhidos (ver figura 5.28).

Após seleccionar as acções pretendidas é necessário pressionar a tecla "Executar" para que o mesmo execute as funções seleccionadas.

O processamento do sinal é bastante rápido e consiste em primeiro lugar na leitura do ficheiro, separando o sinal de cada um dos três eixos. Este sinal, valor em tensão, é convertido para um valor de aceleração instantânea, através da recta de calibração determinada para cada eixo. A etapa seguinte consiste em obter os níveis de aceleração em bandas de terço de oitava entre 0,5 e 80 Hz. Seguidamente é calculado o *rms* do sinal de cada uma das bandas. Depois deste cálculo, obtém-se a aceleração ponderada, para cada eixo, em função do *rms* e do factor de ponderação de cada banda. Finalmente, calcula-se o valor da vibração total, em função da aceleração ponderada de cada eixo e dos factores de ponderação.

Nos sub-menus disponíveis nesta zona do software, é possível visualizar a evolução temporal do sinal de vibração, os resultados da análise efectuada, bem como os espectros em frequência do sinal de vibração linear e ponderado para cada um dos eixos.

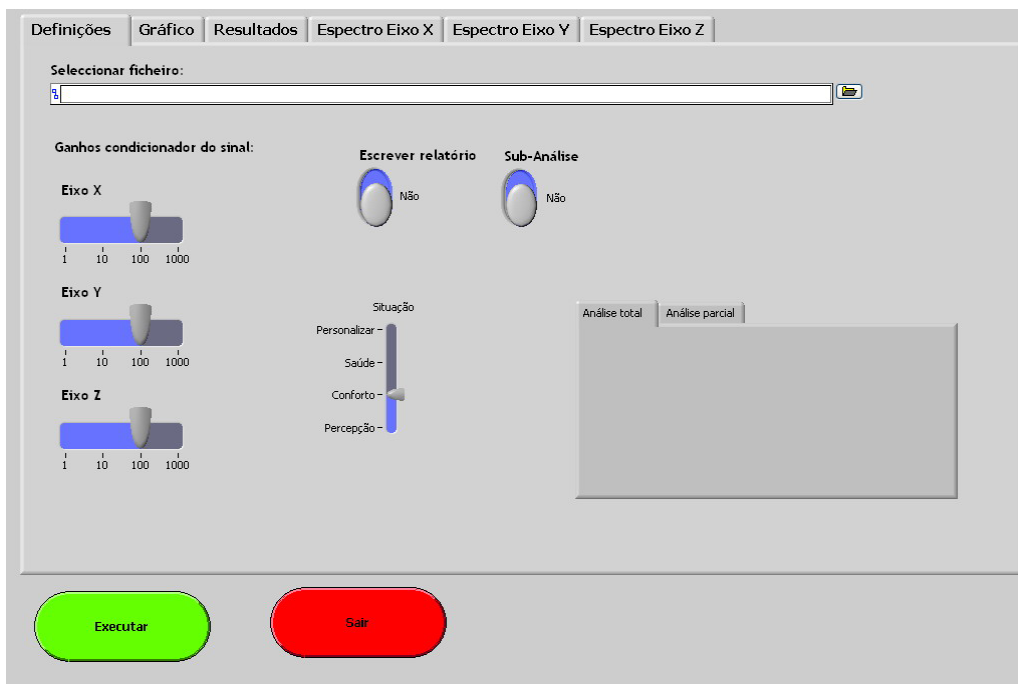


Figura 5.27 Menu de análise do software de medição e análise das vibrações

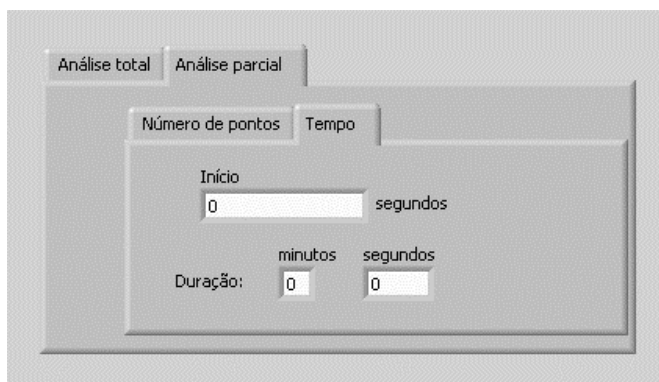


Figura 5.28 Menu de opção da dimensão da amostra a analisar

Nas figuras 5.29, 5.30 e 5.31, apresentam-se os sub-menus de resultados relativamente a um determinado ficheiro. Nelas, pode ver-se a evolução temporal do sinal de vibração segundo os três eixos ortogonais em função do tempo, o valor de *rms* linear para cada um dos eixos, o valor de aceleração ponderada para cada eixo e o valor de vibração total (a_v). Na última figura apresenta-se o espectro do sinal da vibração segundo o eixo X, antes e depois de ser ponderado de acordo com a norma, sendo visível a faixa de sensibilidade entre os 0,5 e 2 Hz apresentados anteriormente na figura 4.16. Representações similares são obtidas para o eixo X e Y.

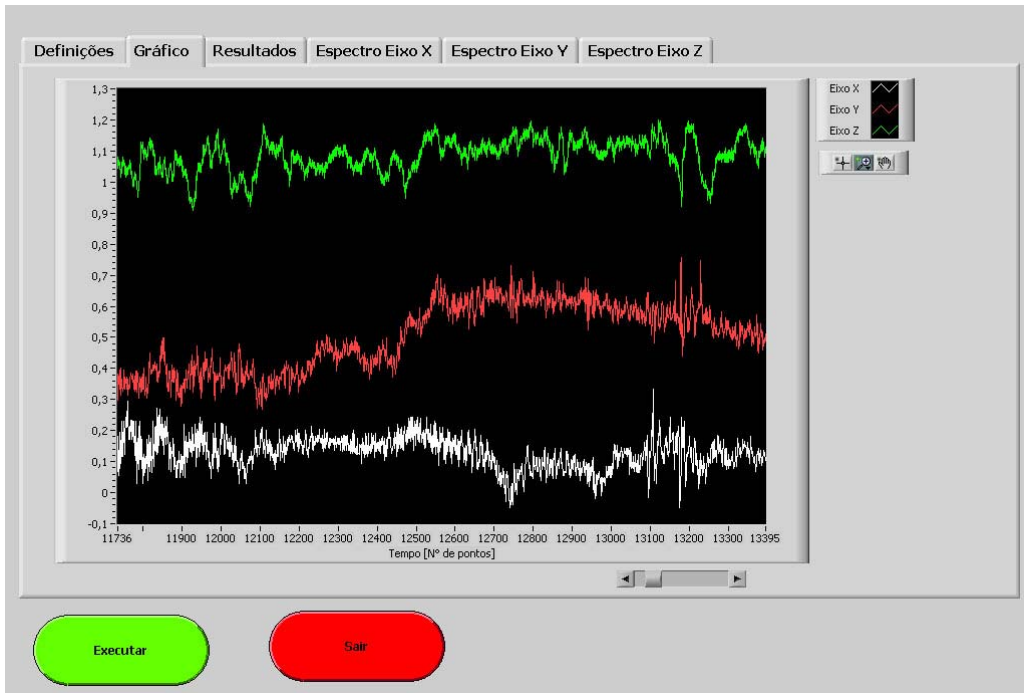


Figura 5.29 Visualização gráfica da evolução das vibrações segundos os três eixos

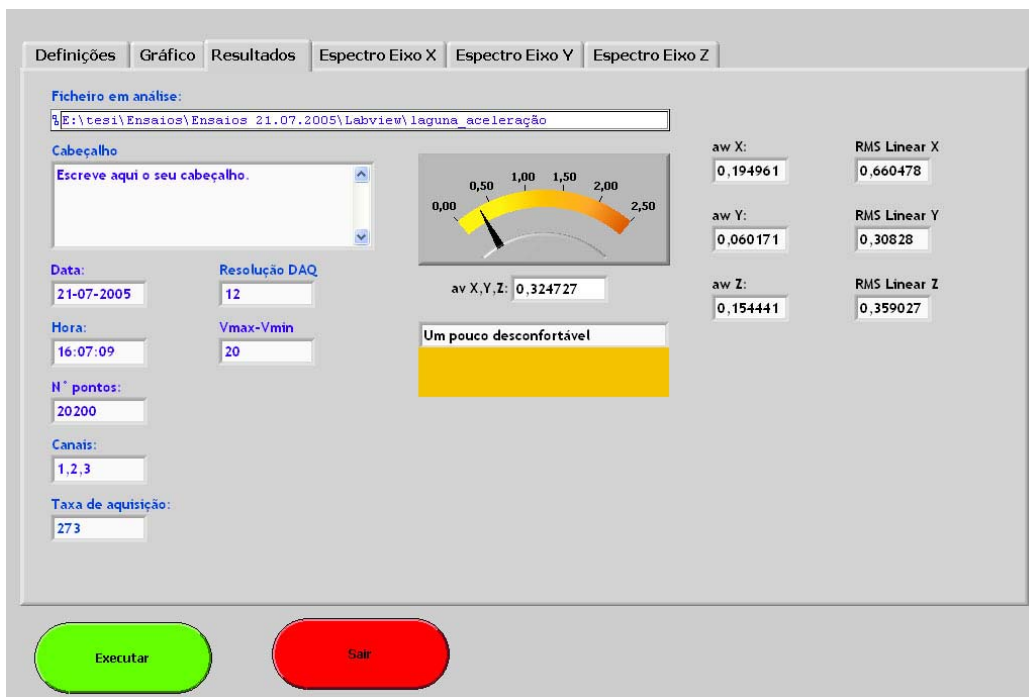


Figura 5.30 Resultados da análise das vibrações

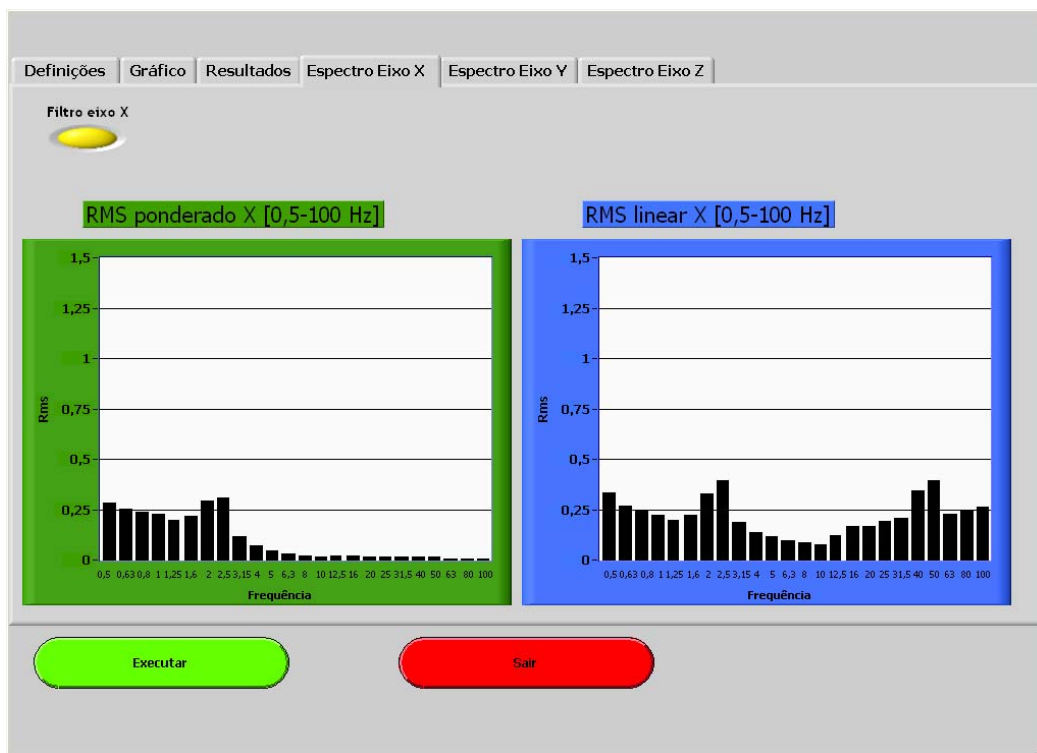


Figura 5.31 Espectro em bandas de terço de oitava, linear e ponderado, das vibrações segundo o eixo X

O programa desenvolvido é facilmente adaptável a diversas placas de aquisição com diferentes resoluções e tipos de ligação entre o acelerómetro e um computador.

5.3.2.2.3 Calibração do sistema

Para a calibração do sistema utilizou-se uma máquina de ensaios de fadiga (ver figura 5.32), onde foi possível gerar um movimento oscilatório de amplitude e frequência constantes, tendo-se obtido as rectas de calibração do sistema para os três eixos ortogonais do sensor.

A referida máquina permite, através de um LVDT (“Linear Variable Differential Transformer”), medir o deslocamento imposto ao acelerómetro, previamente fixado. O sinal seleccionado para calibrar o sistema de aquisição foi o correspondente a um deslocamento harmónico simples.

Em virtude do acelerómetro tri-axial utilizado medir as acelerações nas três direcções ortogonais, calibraram-se cada um dos seus eixos de forma independente.

Foram feitas leituras em diversas frequências de maneira a testar a independência do sistema em relação à frequência de oscilação.

As frequências utilizadas e as respectivas amplitudes de oscilação estão indicadas na tabela 5.4.



Figura 5.32 Calibração para o eixo Z

Frequência [Hz]	1	5	15	30
	2,5	1,5	0,75	0,15
	2,0	1,2	0,60	0,12
Amplitude [mm]	1,5	0,9	0,45	0,09
	1,0	0,6	0,30	0,06
	0,5	0,3	0,15	0,03

Tabela 5.4 Frequências e amplitudes de calibração

Convém referir que, apesar das frequências de utilização do sistema de acordo com a ISO 2631 (1997) serem de 0,5 a 80 Hz, apenas foi possível fazer a calibração para frequências até 30 Hz devido às características da máquina disponível.

Na figura 5.33 representam-se os sinais das saídas em tensão do acelerómetro e do LVDT durante um dos ensaios de calibração realizados. O sinal do LVDT é relativo ao deslocamento, enquanto que o sinal do acelerómetro é relativo à aceleração, pelo que, como seria de esperar, os sinais apresentam um desfaseamento de 180°.

O processamento do sinal do LVDT consistia em determinar a amplitude média do sinal em tensão, converter esta amplitude, através do valor da sensibilidade estática do LVDT (0,015 m/V), no correspondente valor de deslocamento médio e obter o valor da aceleração linear máxima.

Para o sinal do acelerómetro apenas se determinou a média das amplitudes máximas do sinal em tensão, ou seja o pico do sinal.

Com os valores da aceleração linear máxima imposta na máquina e da amplitude do sinal do acelerómetro obtiveram-se as rectas de calibração para cada um dos eixos. Na figura 5.34 está representada uma das rectas de calibração, no caso para o eixo Y.

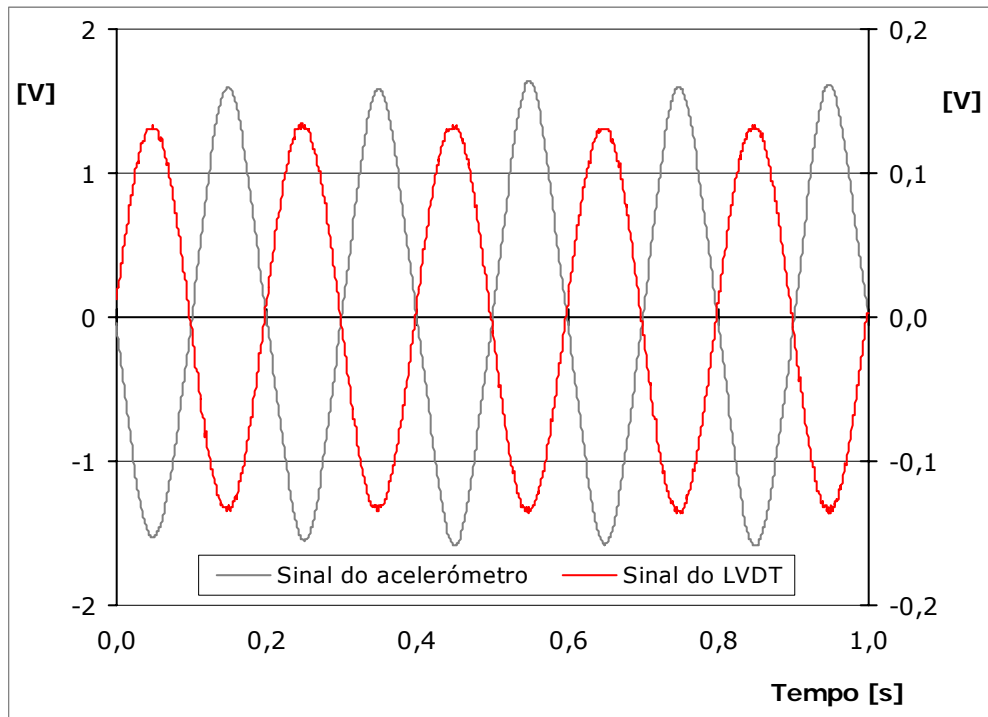


Figura 5.33 Sinal do acelerómetro vs. sinal do LVDT

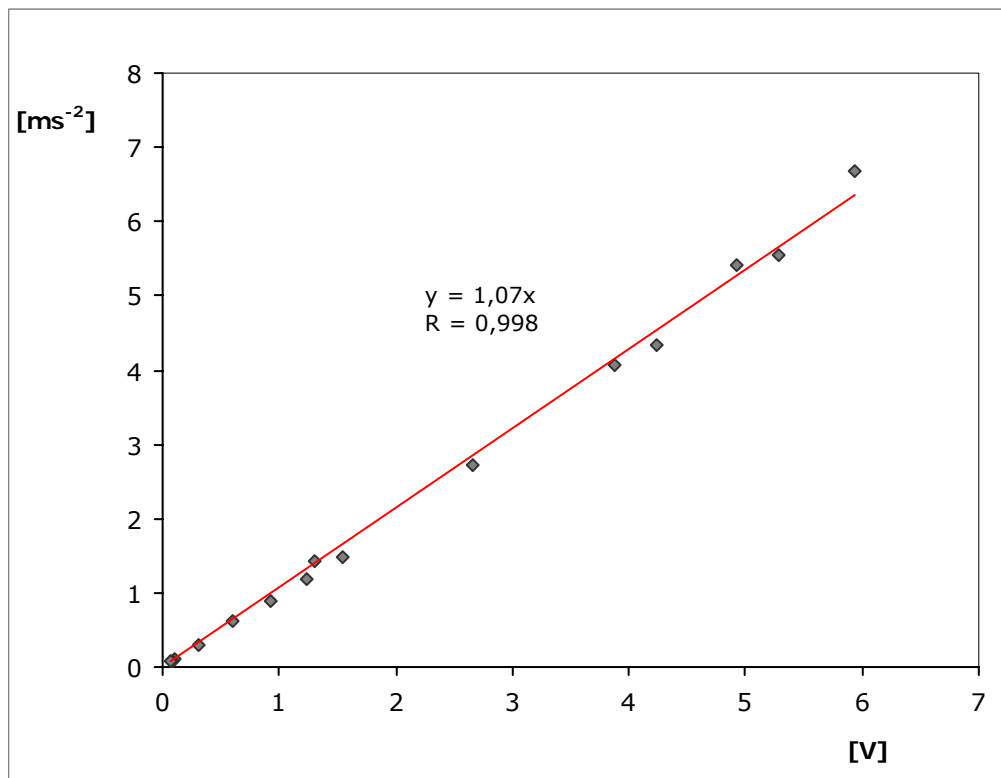


Figura 5.34 Recta de calibração para o eixo Y

Na tabela 5.5, apresentam-se os valores da sensibilidade estática e do coeficiente de correlação para os três eixos de ambos os sensores.

Eixo	Sensibilidade estática	Factor de correlação
X	1,057	0,999
Y	1,070	0,998
Z	9,524	0,999

Tabela 5.5 Sensibilidade estática e factor de correlação do sistema

5.3.2.2.4 Ensaio comparativo

Para testar o sistema efectuaram-se ensaios comparativos com outro sistema de aquisição e análise de vibrações.

Efectuou-se um ensaio comparativo do sistema desenvolvido com um outro sistema baseado num sonómetro Brüel & Kjær que analisa as vibrações do corpo humano de acordo com a versão anterior (1985) da norma ISO 2631. Assim, no software desenvolvido pelos autores foram introduzidos os factores de ponderação em frequência que eram utilizados na versão de 1985. O objectivo deste ensaio foi verificar a concordância da resposta dos dois sistemas.

O ensaio foi realizado na máquina de ensaios de fadiga, impondo uma frequência e amplitude de oscilação constante ao acelerómetro. Os valores da aceleração para cada eixo e o correspondente valor total foram adquiridos e analisados através dos dois sistemas. Tal como durante os ensaios realizados durante a calibração, adquiriu-se o sinal do LVDT da própria máquina por forma a confirmar o sinal de aceleração imposto. O tempo de aquisição de cada uma das leituras foi de vinte segundos.

As frequências e amplitudes impostas, bem como a aceleração total equivalente obtida pelos dois sistemas de medida, estão indicadas na tabela 5.6.

Da análise dos dados obtidos pode verificar-se que existe uma boa concordância entre os valores medidos por ambos os sistemas de leitura.

Freq. [Hz]	Amplitude [mm]	Aceleração BK2231 [ms ⁻²]	Aceleração Sistema [ms ⁻²]	Dif. [%]
10	1,04	2,22	2,33	4,7
	0,54	1,15	1,20	4,2
5	1,73	1,29	1,21	6,6
	0,87	0,65	0,61	6,6

Tabela 5.6 Resultados do ensaio comparativo

5.3.2.2.5 Outras aplicações

Tal como se mencionou, o sistema desenvolvido permite efectuar qualquer tipo de medição de vibrações não se cingindo às medições relativas ao corpo humano. Um exemplo disso foi a sua utilização, reportada em Campos *et. al.* (2005), para medir as vibrações transmitidas ao solo durante o rebentamento de explosivos na construção do túnel do metropolitano de Lisboa, na zona da Alameda até ao prolongamento do bairro de S. Sebastião. Aqui, o sensor foi localizado de um modo solidário ao solo na vertical das explosões para medir o nível da aceleração nos três eixos ortogonais. Exemplo semelhante foi a sua utilização durante o rebentamento de explosivos para a construção do cais da futura marina de Vila do Conde. Nas figuras 5.35 e 5.36 apresenta-se a evolução temporal das vibrações medidas em função do tempo verificando-se a passagem da onda de choque e respectivas reflexões bem como a obtenção da velocidade através da integração dos valores medidos, visto ser este um parâmetro mais comum neste tipo de actividade.

Recentemente, o sistema aqui apresentado foi também utilizado num ensaio entre laboratórios nacionais para avaliar o nível de vibrações a que os motoristas de empilhadores estão submetidos.

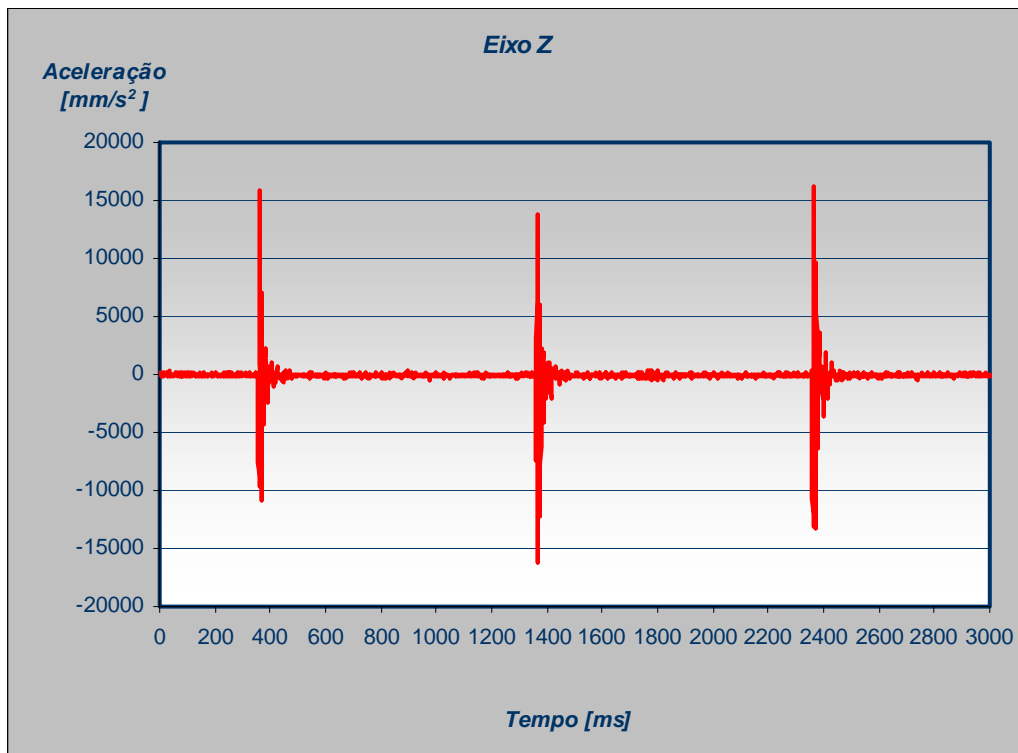


Figura 5.35 Aceleração linear, segundo o eixo Z, medida no rebentamento de explosivos (adaptado de Campos *et. al.*, 2005)

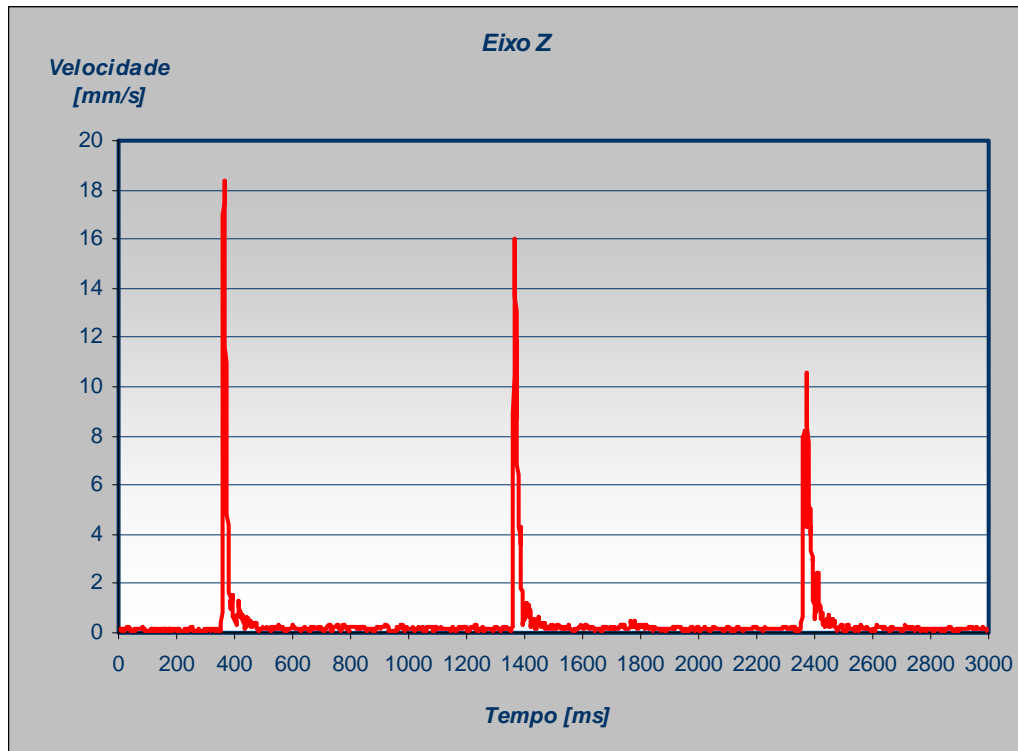


Figura 5.36 Velocidade, segundo o eixo Z, obtida por integração da aceleração medida no rebentamento de explosivos (adaptado de Campos *et. al.*, 2005)

5.3.2.3. Ruído

Nestas avaliações o nível sonoro foi quantificado através de um sonómetro da marca ISO-TECH modelo 1353, registando-se o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A. Trata-se de um equipamento muito versátil para ensaios experimentais, visto que é facilmente transportável, apresentando reduzidas dimensões, conforme se pode observar na figura 5.37.

Este equipamento apresenta uma gama de medida em frequência compreendida entre 31,5 a 8000 Hz e uma amplitude de 30 a 130 dB.

As condições de funcionamento recomendadas pelo fabricante são as seguintes: entre 10 a 90 % de humidade relativa, e entre 5 °C e 40 °C relativamente à temperatura do ar.

Antes de cada ensaio o sonómetro era verificado, através do calibrador da marca Brüel & Kjær tipo 4230, para um valor de 93,8 dB(A) a uma frequência de 1000 Hz.

Este equipamento permite efectuar a leitura do nível de pressão sonora ponderado de acordo com a curva de ponderação A e C, podendo seleccionar-se o tempo de integração bem como o tipo de leitura que se pretende entre o valor medido, instantâneo ou máximo. Os parâmetros seleccionados em todos os testes, de acordo com a referida

norma ISO 5128 (1980) foram: o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A e um tempo de resposta rápido.

A transferência de dados para um computador pessoal é feita através de uma ligação RS-232 e por um software fornecido pela marca.

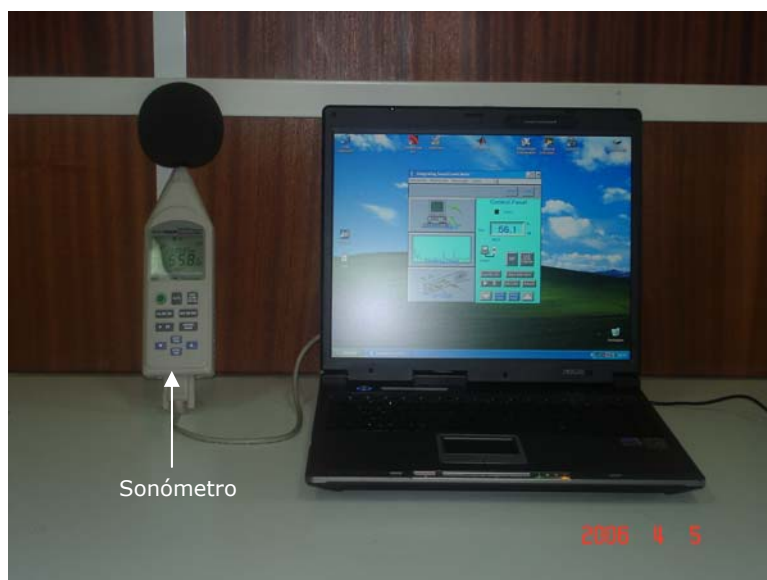


Figura 5.37 Sonómetro ISO-TECH modelo 1353

Para se poder analisar apenas o período de análise pretendido e poder representar tanto a evolução temporal do nível de pressão sonora como o nível contínuo equivalente (L_{eq}), desenvolveu-se um procedimento de cálculo através de uma folha de cálculo em Excel, tendo em vista o cálculo do nível contínuo sonoro equivalente de acordo com a equação 4.25, para quantificar o nível a que os passageiros foram submetidos, durante os diversos percursos efectuados.

Para obter níveis de ruído mais elevados no interior dos veículos através do ruído emitido pelo motor do autocarro, utilizou-se num dos ensaios um sistema de microfone sem fios colocado na proximidade do motor, inserindo o sinal proveniente deste no sistema de som do mesmo. Na figura 5.38 pode ver-se a colocação do microfone para produzir tal efeito.

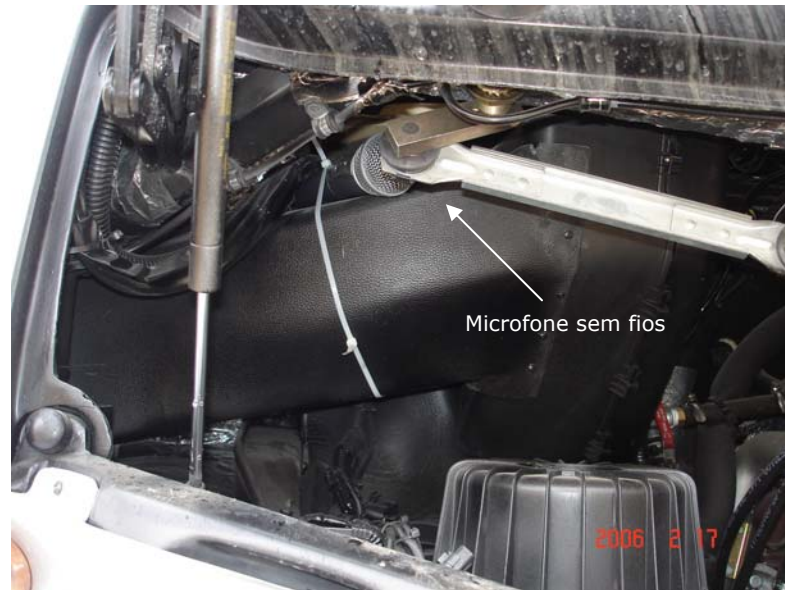


Figura 5.38 Microfone sem fios no interior do compartimento do motor

5.3.2.4. Qualidade do ar

Ao contrário dos estímulos anteriores, a qualidade do ar não é caracterizada por um índice normalizado, permitindo por isso diversas hipóteses de abordagem. Face à necessária portabilidade exigida para o tipo de avaliação efectuada, optou-se por utilizar como elemento representativo da qualidade do ar, a concentração de CO₂. Para tal, utilizou-se um equipamento designado "Indoor Air Quality Monitor" modelo PS31 da empresa Sensotron. Este dispositivo de medida é normalmente indicado para medir e registar a concentração do dióxido de carbono entre 0 e 5000 ppm, a humidade relativa entre 0 e 100%, bem como a temperatura do ar entre 10 e 45 °C.

A medição da concentração de CO₂ é feita através de um sensor de reduzidas dimensões através do método de absorção de infra-vermelhos, que assegura uma rápida resposta e uma elevada estabilidade nas medições. A temperatura e a humidade relativa são medidas através de um elemento semi-condutor. A resolução das leituras é bastante elevada sendo de 1 ppm relativamente à concentração de CO₂, de 0,1 °C para a temperatura do ar e de 0,1% no que à humidade relativa diz respeito. A incerteza nas leituras, de acordo com os dados do fabricante, para um nível de confiança de 95% é de: ± 10 ppm (+ 2% do valor medido) para a concentração de CO₂, ± 3,5% para a humidade relativa, e ± 0,5 °C para a temperatura do ar.

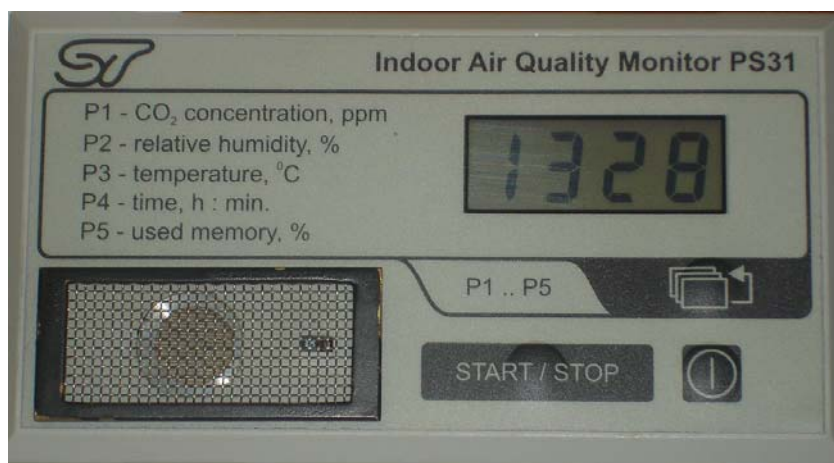


Figura 5.39 Equipamento de medição da qualidade do ar

Este equipamento tem uma memória interna que armazena até 67000 dados, sendo a sua autonomia função da frequência de aquisição definida pelo utilizador, que pode optar entre 10 e 300 segundos entre leituras. Os dados são posteriormente enviados para um computador através de uma porta série RS-232 e de um software desenvolvido pelo fabricante no ambiente LabWindows.

A alimentação eléctrica deste equipamento é assegurada por um conjunto de baterias internas recarregáveis que, segundo o fabricante, permitem efectuar medições durante cerca de 3 semanas, sem necessidade de recarregamento.

Através do seu visor (ver figura 5.39), é possível ir acompanhando o valor das leituras no local em análise.

5.3.2.5. Luminosidade

Relativamente à análise da luminosidade, a avaliação tradicional baseia-se numa medição da luminância do local em análise. Assim, optou-se por utilizar um luxímetro da marca Testo modelo 545 (ver figura 5.40), cujo elemento sensor é um fotodíodo de silicone. O equipamento seleccionado permite efectuar medições da intensidade luminosa entre 0 e 100000 lx, com uma resolução de 1 lx até 32000 lx e de 10 lx quando seleccionada toda a gama de medida, sendo recomendada a sua utilização para temperaturas compreendidas entre os 0 e os 50 °C.

A configuração do equipamento é feita através de software da mesma empresa podendo definir-se o tempo entre cada leitura com um intervalo mínimo entre leituras de dois segundos. Alternativamente a sua configuração pode ser feita no próprio equipamento através das teclas que o mesmo incorpora. Os dados recolhidos são

enviados para o computador através de uma porta série RS-232, podendo ser exportados directamente para uma folha de cálculo de Excel.



Figura 5.40 Equipamento de medição da luminosidade

5.3.2.6. Disposição global dos equipamentos de medida

Em todos os testes realizados os equipamentos de medida foram colocados na zona central dos autocarros.

Uma das limitações deste tipo de análise é a elevada diversidade dos softwares utilizados bem como a dispersão espacial dos sensores que ficam colocados em posições diferentes quando o que se pretende avaliar é o efeito das condições ambientais sobre o corpo humano que necessariamente ocuparia uma só posição no habitáculo do veículo.

Nos procedimentos desenvolvidos durante o projecto Combistress, uma exigência que se verificou ser bastante importante foi a necessidade de se acertar o relógio de todos os equipamentos em função do computador portátil onde era feita a aquisição do nível de vibrações, por forma a que a base de tempo coincidisse entre todas as grandezas monitorizadas.

Na figura 5.41 apresenta-se uma instalação representativa dos vários sistemas de medida a bordo do veículo, onde são ocupados quatro assentos por forma a dispor toda a instrumentação.



Figura 5.41 Disposição global dos equipamentos de medida

Quer no âmbito do projecto Combistress, quer nas campanhas de medições efectuadas em 2005 e 2006, foram efectuados previamente diversos testes, com e sem passageiros, com o objectivo de testar e validar as diversas opções adoptadas no decurso do desenvolvimento da metodologia experimental.

O citado manequim multi-sensorial, que será desenvolvido no âmbito do projecto Autocomfort, irá permitir que as medições das diversas grandezas físicas sejam efectuadas no mesmo local ao invés do que sucedeu durante os testes aqui reportados onde eram medidas em assentos próximos uns dos outros. Outra vantagem consiste também na simplificação na instalação dos equipamentos, bem como na sua análise, pois pretende-se desenvolver uma ferramenta de aquisição de dados que tornará esta tarefa menos morosa.

5.3.3. Avaliações subjectivas

Para recolher a opinião subjectiva dos passageiros, foi elaborado um questionário constituído por duas páginas, onde a primeira indicava os objectivos da avaliação e continha diversos campos destinados a obter a data e a hora da avaliação, o nível de isolamento do vestuário, a localização do passageiro no autocarro, bem como a sua idade, género, peso e altura.

A segunda parte do questionário sofreu diversas alterações ao longo do projecto Combistress, sendo aqui apresentada apenas a versão final validada. Assim, a segunda página destinava-se a obter a votação da sensação de desconforto de cada passageiro relativamente ao ambiente térmico, às vibrações, ao ruído, à qualidade do ar, à luminosidade e à avaliação relativa ao nível de desconforto global.

Após o final de cada percurso, era solicitado aos passageiros para procederem à votação sobre a sua sensação de desconforto no percurso concluído, através da colocação de uma cruz sobre uma faixa colorida graduada, onde os extremos representam situações de neutralidade e de extremo desconforto. Na figura 5.42 apresentam-se as escalas utilizadas para a avaliação subjectiva do ambiente térmico e das vibrações, sendo as restantes escalas similares à indicada para as vibrações. No anexo B, apresenta-se uma reprodução integral do questionário utilizado. Apenas a escala de desconforto térmico apresenta um aspecto gráfico distinto, por forma a identificar se o desconforto provinha de uma sensação de frio ou de calor.

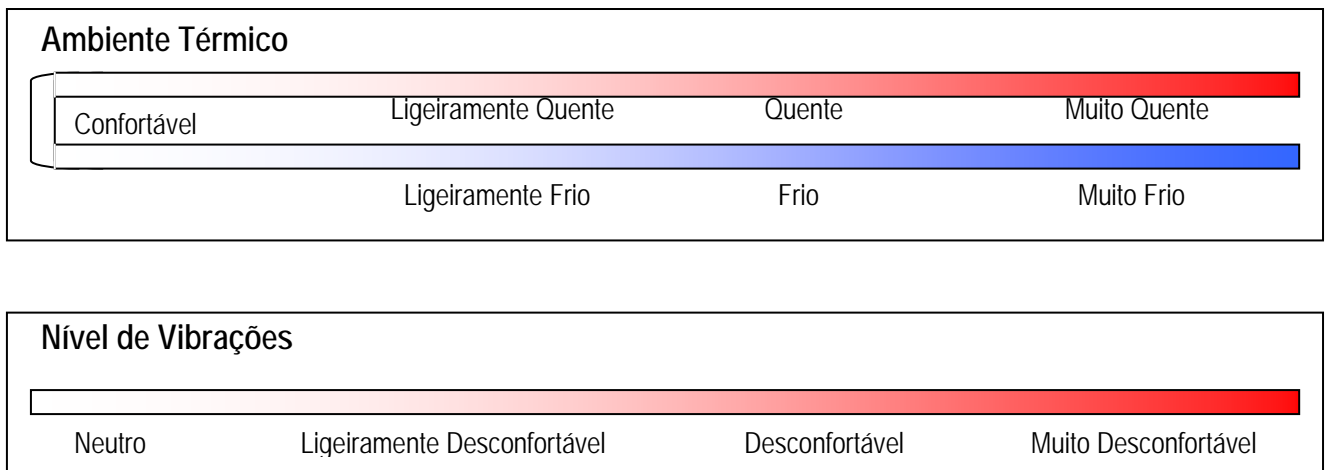


Figura 5.42 Escala subjectiva de desconforto para avaliar o ambiente térmico e as vibrações

O processo de obtenção do valor numérico da votação subjectiva foi idêntico ao descrito na secção 5.2.4 para a avaliação subjectiva de sons.

Na figura 5.43 pode ver-se os passageiros a procederem à avaliação do nível de desconforto de um determinado percurso, estando assinalada a localização da instrumentação utilizada na medição das grandezas físicas consideradas.



Figura 5.43 Avaliação subjectiva do desconforto ambiental global em autocarros

Capítulo 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos métodos experimentais que foram desenvolvidos. Tal como no capítulo anterior, aquando da introdução da explicação dos métodos utilizados, também aqui serão consideradas duas secções distintas: uma relacionada com a avaliação da qualidade sonora no interior dos autocarros e outra relativa à avaliação do desconforto ambiental global no interior dos mesmos.

6.2. Análise da qualidade acústica

A metodologia desenvolvida permitiu criar ferramentas neste domínio de análise, não só para a área do sector automóvel como também para outro tipo de intervenções, tais como a avaliação da qualidade sonora no interior de recintos, a comparação do nível acústico de produtos concorrenciais, entre outras.

Nas secções seguintes irão ser apresentados os principais resultados relativos à caracterização dos sons utilizados e respectiva avaliação subjectiva dada por um painel de avaliadores. Serão ainda apresentadas as principais correlações obtidas entre os valores métricos e a avaliação subjectiva.

6.2.1. Amostra de sons

A recolha das amostras sonoras ocorreu em dois dias distintos. Num dia, foram obtidos os sons relativos a um mini-autocarro, tendo sido utilizado para o efeito um autocarro do modelo Senior da empresa Marcopolo; noutra dia, foram gravados os sons de um autocarro de turismo, tendo sido, neste dia, utilizado o modelo Viaggio da mesma empresa. Ambos os veículos estão representados na figura 5.1.

Para efectuar a gravação do som no interior dos veículos observando a metodologia sugerida na norma ISO 5128, foram seleccionadas quatro situações. Numa primeira situação, mediu-se o ruído no interior dos veículos, encontrando-se os mesmos na condição de imobilizados, com o motor em duas velocidades de rotação distintas: ao ralenti e próximo do seu valor limite de funcionamento. Posteriormente, foram também efectuadas gravações com os veículos a uma velocidade aproximada de 80 km/h para duas situações distintas: com o ar condicionado ligado e com o ar condicionado desligado. O resultado foi um total de oito sons base designados de acordo com a nomenclatura indicada na tabela 6.1.

Designação	Estado do veículo	Velocidade do veículo [km/h]	Velocidade do motor [rpm]	Ar condicionado
senior_semAC	Dinâmico	80	--	Desligado
senior_comAC	Dinâmico	80	--	Ligado
ralenti_senior	Imobilizado	--	750	Desligado
3000rpm_senior	Imobilizado	--	3000	Desligado
viaggio_semAC	Dinâmico	80	--	Desligado
viaggio_comAC	Dinâmico	80	--	Ligado
ralenti_viaggio	Imobilizado	--	500	Desligado
2000rpm_viaggio	Imobilizado	--	2000	Desligado

Tabela 6.1 Nomenclatura dos sons base gravados

Para além da designação indicada na tabela anterior, aos restantes sons foi-lhe atribuída uma designação baseada na anterior acrescentada do tipo de modulação efectuada. Assim, a título ilustrativo, a designação senior_semAC-10, significa que ao som base foram retirados dez decibéis em amplitude, significando a designação 2000rpm_viaggio_eq2, que foi aplicada a curva de equalização número dois (cf. tabela 5.2) ao som correspondente.

6.2.1.1. Caracterização métrica

Nas tabelas 6.2 e 6.3 apresenta-se a classificação de todos os sons em termos da sua caracterização métrica.

Som n°	Designação	Pressão [Pa]	NPS [dB(L)]	NPS [dB(A)]	IA [%]	Sonoridade [sones]	Sonoridade [fones]	Agudez [acum]
1	viaggio_semAC-25	0,0212	60,5	50,2	95,0	7,2	68,6	1,12
2	viaggio_comAC_eq2	0,1535	77,7	78,6	34,2	35,4	91,5	2,82
3	ralenti_senior eq2	0,0068	50,6	51,5	83,4	5,8	65,4	2,46
4	senior_semAC-20	0,0394	65,9	62,4	56,9	16,1	80,1	1,43
5	viaggio_comAC-5	0,1520	77,6	75,1	18,5	39,1	92,9	2,01
6	senior_comAC	0,3440	84,7	80,9	3,4	53,6	97,4	1,48
7	senior_comAC-30	0,0109	54,7	50,9	90,4	7,6	69,2	1,46
8	viaggio_semAC	0,3770	85,5	75,2	24,8	38,8	92,8	1,18
9	viaggio_semAC	0,3770	85,5	75,2	24,8	38,8	92,8	1,18
10	senior_semAC-30	0,0125	55,9	52,4	87,2	8,1	70,2	1,42
11	3000rpm_senior	0,1635	78,2	72,8	24,5	33,1	90,5	1,59
12	2000rpm_viaggio_eq2	0,0173	58,7	58,6	68,9	12,0	75,8	1,85
13	viaggio_comAC-30	0,0085	52,6	50,1	87,7	7,6	69,2	2,06
14	viaggio_semAC-10	0,1190	75,5	65,2	56,7	20,4	83,5	1,18
15	senior_semAC	0,3940	85,9	82,4	2,2	56,7	98,3	1,44
16	senior_comAC_eq4	0,2710	82,6	72,4	52,9	27,8	87,9	0,80
17	viaggio_comAC_eq4	0,2285	81,2	71,4	56,0	25,5	86,7	0,98
18	viaggio_comAC-25	0,0152	57,6	55,1	77,0	10,8	74,3	2,04
19	2000rpm_viaggio	0,1465	77,3	70,3	44,3	26,1	87,0	1,12
20	viaggio_comAC	0,2705	82,6	80,1	8,9	53,2	97,3	2,01
21	3000rpm_senior_eq2	0,0577	69,2	70,2	50,2	20,0	83,2	2,37
22	viaggio_semAC-20	0,0377	65,5	55,2	88,6	10,4	73,8	1,15
23	senior_comAC_eq2	0,1160	75,3	76,3	28,3	31,2	89,6	2,22
24	2000rpm_viaggio_eq3	0,1415	77,0	67,0	65,2	20,0	83,2	1,18
25	ralenti_senior+5	0,0567	69,0	59,5	65,2	14,2	78,3	1,60
26	viaggio_comAC-15	0,0481	67,6	65,1	47,8	20,9	83,8	2,01
27	viaggio_semAC_eq2	0,0359	65,1	65,3	49,5	18,3	81,9	2,02
28	viaggio_semAC+5	0,6075	89,7	79,5	11,7	50,7	96,6	1,20
29	senior_comAC-20	0,0344	64,7	60,9	61,3	15,2	79,2	1,48
30	senior_semAC-10	0,1245	75,9	72,4	24,4	30,6	89,3	1,43
31	ralenti_viaggio_eq3	0,0590	69,4	55,1	82,9	10,5	73,9	1,39
32	viaggio_comAC-20	0,0271	62,6	60,1	63,8	15,1	79,1	2,02
33	ralenti_senior	0,0319	64,0	54,5	80,0	10,1	73,3	1,60
34	ralenti_viaggio_eq2	0,0062	49,8	50,0	86,5	6,4	66,7	2,22
35	viaggio_semAC+10	0,7950	92,0	82,4	3,0	60,4	99,2	1,23
36	senior_semAC_eq4	0,2905	83,2	73,0	48,6	28,8	88,5	0,82
37	senior_comAC-10	0,1090	74,7	70,9	28,8	28,8	88,5	1,48
38	viaggio_semAC_eq4	0,3870	85,7	72,6	78,4	24,6	86,2	0,59
39	senior_semAC_eq2	0,1450	77,2	78,2	25,8	33,5	90,7	2,11
40	viaggio_comAC+5	0,4680	87,4	84,9	3,4	71,4	101,6	2,02
41	2000rpm_viaggio-5	0,0824	72,3	65,3	60,4	18,9	82,4	1,11
42	senior_comAC+5	0,5645	89,0	85,2	0,2	70,4	101,4	1,51
43	3000rpm_senior-5	0,0921	73,3	67,8	39,8	24,0	85,9	1,61
44	viaggio_semAC-15	0,0670	70,5	60,2	72,9	14,6	78,7	1,17
45	senior_semAC-5	0,2220	80,9	77,4	9,6	41,7	93,8	1,44
46	senior_comAC-15	0,0612	69,7	65,9	45,0	20,9	83,9	1,48
47	senior_semAC+5	0,6210	89,8	86,5	0,0	73,4	102,0	1,49
48	viaggio_comAC-10	0,0855	72,6	70,1	32,5	28,7	88,4	2,00
49	senior_semAC-25	0,0222	60,9	57,4	73,2	11,5	75,2	1,43
50	senior_comAC-25	0,0194	59,7	55,8	77,5	10,8	74,3	1,48
51	viaggio_semAC-5	0,2120	80,5	70,2	40,6	28,3	88,2	1,18
52	senior_comAC-5	0,1935	79,7	75,8	13,2	39,3	92,9	1,48
53	senior_semAC-15	0,0701	70,9	67,4	40,7	22,3	84,8	1,44
54	ralenti_viaggio+5	0,1095	74,8	64,8	60,2	19,2	82,6	1,26

Tabela 6.2 Caracterização métrica dos sons

Som nº	Frequência central da banda de oitava [Hz]								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	41,5	51,4	57,7	52,6	49,7	42,8	38,5	33,5	22,3
2	25,3	37,6	42,7	52,0	54,3	60,2	71,8	75,5	67,8
3	7,0	24,4	18,3	22,4	34,4	33,9	44,5	48,6	34,8
4	43,3	59,8	55,6	54,3	61,3	55,8	55,5	51,2	35,6
5	62,9	68,0	68,1	71,2	67,8	65,9	69,4	69,0	62,3
6	63,8	78,6	74,3	75,6	79,5	74,2	73,8	69,6	57,3
7	33,8	48,6	44,3	45,6	49,5	44,1	43,8	39,6	27,3
8	66,5	76,4	82,7	77,6	74,7	67,8	63,6	58,5	47,3
9	66,5	76,4	82,7	77,6	74,7	67,8	63,6	58,5	47,3
10	33,3	49,8	45,6	44,3	51,3	45,8	45,4	41,2	25,6
11	41,9	61,8	75,3	66,4	71,9	63,6	64,5	65,3	51,8
12	22,1	30,1	41,5	48,3	50,5	51,0	54,0	51,4	38,9
13	37,9	43,0	43,1	46,1	42,8	40,9	44,4	44,0	37,3
14	56,5	66,4	72,7	67,6	64,7	57,8	53,6	48,5	37,3
15	63,3	79,8	75,6	74,3	81,3	75,8	75,5	71,2	55,6
16	64,0	78,8	74,9	76,9	72,7	60,9	53,8	44,0	26,7
17	68,1	73,3	73,7	78,5	67,3	56,4	54,3	47,2	35,8
18	42,9	48,0	48,1	51,1	47,8	45,9	49,4	49,0	42,3
19	64,4	65,6	71,5	72,5	70,4	63,0	58,5	49,3	38,4
20	67,9	73,0	73,1	76,2	72,8	71,0	74,4	74,0	67,3
21	2,9	27,9	42,8	43,1	52,9	51,3	63,3	67,2	52,3
22	46,5	56,4	62,7	57,6	54,7	47,8	43,6	38,5	27,3
23	24,1	43,0	43,5	51,2	61,3	61,9	71,5	71,7	57,8
24	64,6	65,8	72,0	73,8	64,1	43,5	51,8	51,3	38,8
25	55,1	67,4	54,0	51,3	58,3	52,0	51,9	51,7	39,3
26	52,9	58,0	58,1	61,2	57,8	55,9	59,4	59,0	52,3
27	25,2	41,9	50,5	52,8	55,2	55,9	59,7	60,3	47,8
28	70,8	80,4	86,9	81,6	78,9	72,4	68,0	62,9	52,0
29	43,8	58,6	54,3	55,6	59,5	54,2	53,8	49,6	37,3
30	53,3	69,8	65,6	64,3	71,3	65,8	65,5	61,2	45,6
31	55,5	67,3	62,4	58,2	54,4	31,4	42,9	44,8	35,8
32	47,9	53,0	53,1	56,2	52,8	50,9	54,4	54,0	47,3
33	50,1	62,4	49,0	46,3	53,3	47,0	46,9	46,7	34,3
34	14,2	30,7	30,7	33,1	42,0	38,4	44,9	45,0	35,8
35	73,7	82,4	89,1	83,8	81,7	76,0	71,5	66,4	56,0
36	63,5	80,0	76,1	75,5	73,9	62,8	55,1	45,9	25,4
37	53,8	68,6	64,3	65,6	69,5	64,2	63,8	59,6	47,3
38	66,7	76,6	83,1	79,2	69,6	54,3	44,3	32,8	17,6
39	23,4	43,9	44,4	50,2	63,5	63,4	73,6	73,5	56,2
40	72,6	77,8	77,9	80,9	77,6	75,7	79,1	78,8	72,2
41	59,4	60,6	66,4	67,5	65,4	58,0	53,5	44,3	33,4
42	68,2	82,9	78,6	79,9	83,8	78,6	78,3	74,2	62,4
43	36,9	56,8	70,3	61,4	66,9	58,6	59,5	60,3	46,8
44	51,5	61,4	67,7	62,6	59,7	52,8	48,6	43,5	32,3
45	58,3	74,8	70,6	69,3	76,3	70,8	70,5	66,2	50,6
46	48,8	63,6	59,3	60,6	64,5	59,2	58,8	54,6	42,3
47	67,6	83,6	79,4	78,2	85,2	79,9	79,6	75,5	61,7
48	57,9	63,0	63,1	66,2	62,8	60,9	64,4	64,0	57,3
49	38,3	54,8	50,6	49,3	56,3	50,8	50,4	46,2	30,6
50	38,8	53,6	49,3	50,6	54,5	49,1	48,8	44,6	32,3
51	61,5	71,4	77,7	72,6	69,7	62,8	58,6	53,5	42,3
52	58,8	73,6	69,3	70,6	74,5	69,2	68,8	64,6	52,3
53	48,3	64,8	60,6	59,3	66,3	60,8	60,5	56,2	40,6
54	60,3	72,1	67,0	62,1	66,7	55,3	52,6	48,0	40,4

Tabela 6.3 Nível de pressão sonora [dB(L)] dos sons em bandas de oitava

Os valores métricos aqui apresentados foram obtidos a partir das ferramentas desenvolvidas em Labview, bem como no software de qualidade acústica da marca Brüel & Kjær, já descritas no capítulo anterior.

Nas figuras 6.1 e 6.2 apresentam-se os espectros de frequência para ambos os veículos na situação dinâmica e com o ar condicionado desligado, que correspondem aos sons número oito e quinze, respectivamente. Nestas é visível que no autocarro de turismo as diferenças existentes entre os dois ouvidos do manequim acústico são praticamente nulas. Pelo contrário, no mini-autocarro a pressão sonora no ouvido direito, correspondente ao que está virado para o interior da viatura, apresenta níveis superiores. Esta situação é análoga em todas as gravações efectuadas e a sua explicação advém da diferente separação física existente entre o motor e o habitáculo dos veículos, sendo que no caso dos autocarros de turismo essa separação é nitidamente superior.

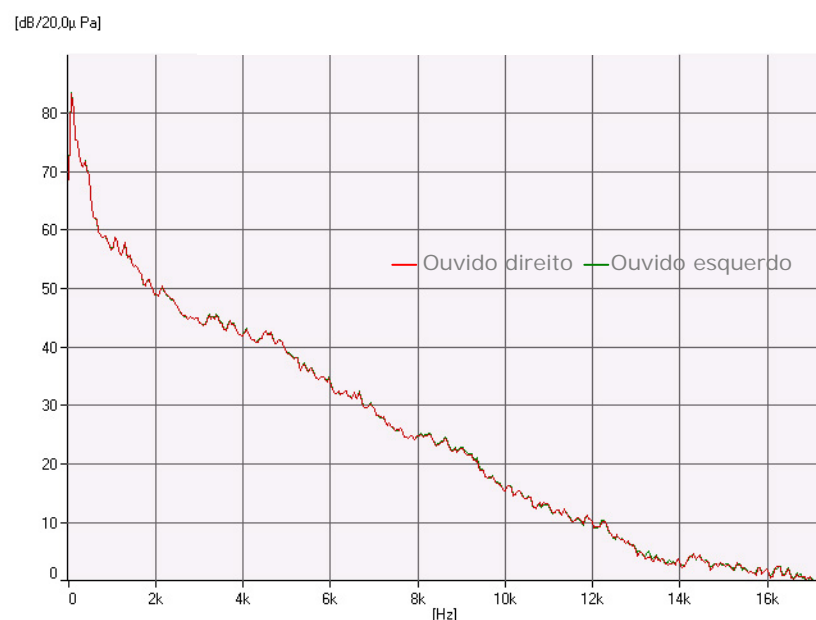


Figura 6.1 Análise em frequência do som número oito (autocarro de turismo)

Na análise em frequência apresentada nestas figuras constata-se, de um modo inequívoco, que as principais frequências se situam abaixo dos 2000 Hz.

Os sons escolhidos para a avaliação consistiram num período de cinco segundos de gravação para as situações anteriormente descritas. Um aspecto importante neste tipo de avaliações é a não existência de sons estranhos nas amostras que pudessem causar uma fonte de possível erro durante as avaliações subjectivas. Para evidenciar o cuidado tido em conta neste aspecto apresentam-se, a título exemplificativo, nas figuras 6.3 e 6.4 os espectrogramas do ouvido direito do manequim relativo às gravações efectuadas no autocarro de turismo para a situação de ar condicionado desligado e ligado,

respectivamente. Nelas, tal como em todos os sons gravados, é visível o seu carácter plano, distinguindo-se claramente as regiões de frequências dominantes. Na análise conjunta destas duas figuras pode observar-se a alteração do conteúdo espectral do som no interior do veículo, devido ao funcionamento do ar condicionado.

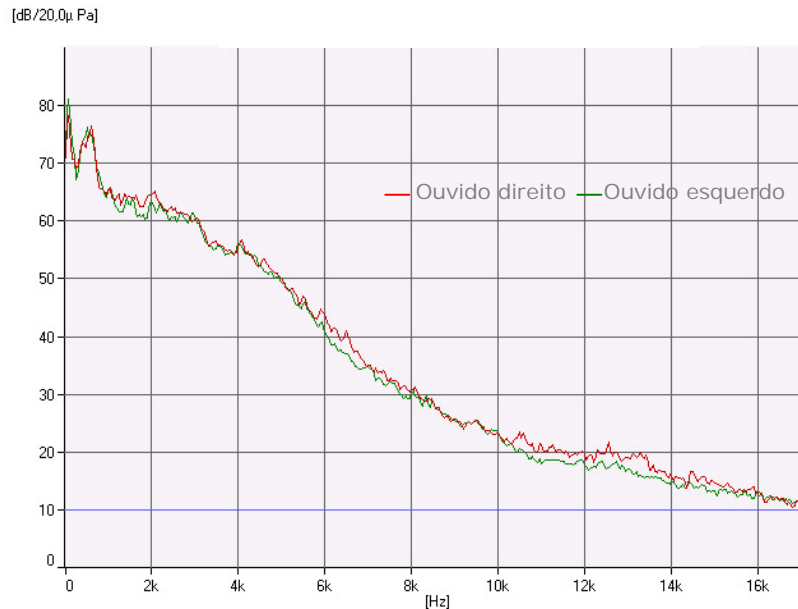


Figura 6.2 Análise em frequência do som número quinze (mini-autocarro)

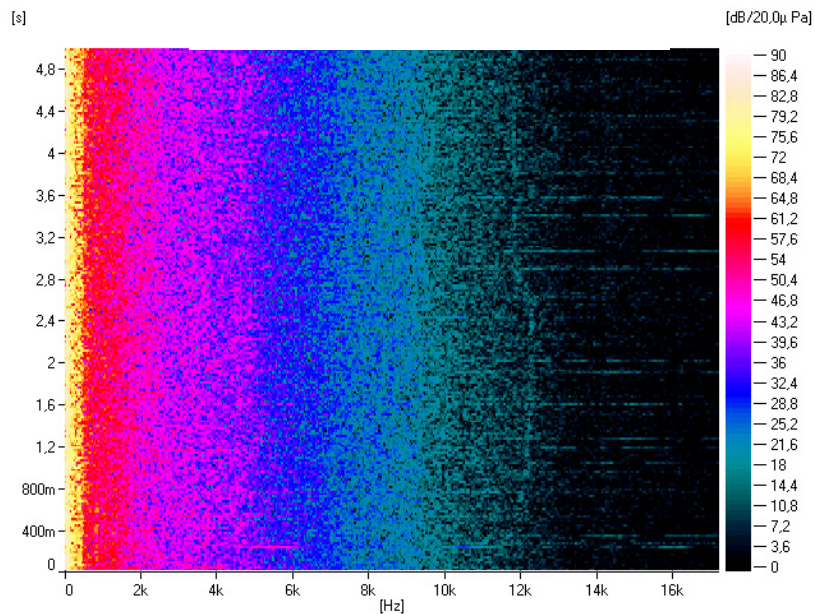


Figura 6.3 Espectrograma do registo sonoro do ouvido direito do som número oito (autocarro de turismo sem AC)

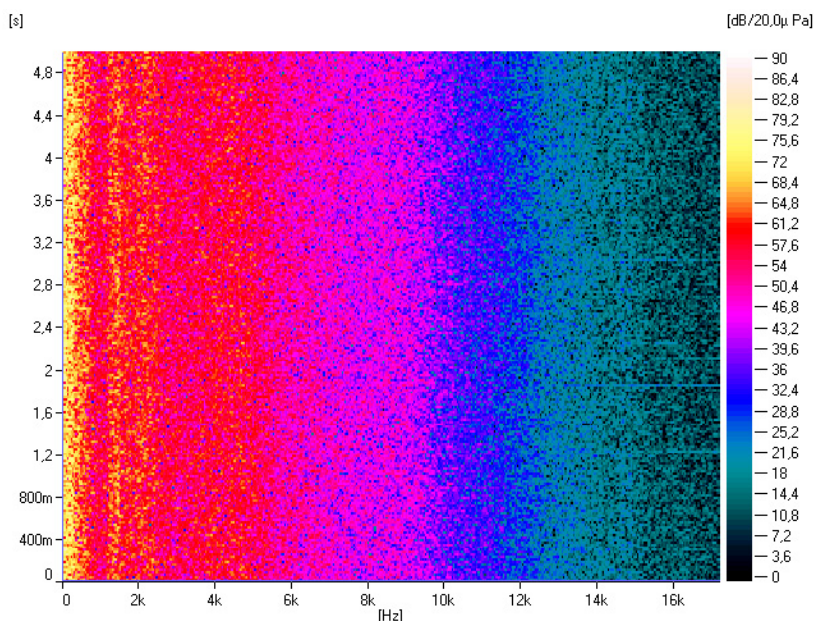


Figura 6.4 Espectrograma do registo sonoro do ouvido direito do som número vinte (autocarro de turismo com AC)

Na tabela 6.4 apresenta-se um resumo descritivo dos parâmetros métricos relativos aos sons seleccionados para serem avaliados pelo painel de avaliadores. Os sons eleitos estão dentro dos intervalos de amplitude que se pretendem analisar, ou seja, desde cerca de 50 dB(A) até 87 dB(A). Quanto à gama de variação do índice de articulação, os sons escolhidos vão desde situações de claro desconforto ($IA = 0\%$) até situações de ausência de desconforto ($IA = 95\%$).

Variável	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Pressão [Pa]	0,1691	0,0062	0,795	0,18
<i>NPS</i> [dB(L)]	73,0	49,8	92,0	11,0
<i>NPS</i> [dB(A)]	67,7	50,0	86,5	10,3
Sonoridade [sones]	27,1	5,8	73,4	17,5
Sonoridade [fones]	84,7	65,4	102,0	9,6
<i>IA</i> [%]	47,4	0,0	95,0	28,4
Agudez [acum]	1,55	0,59	2,82	0,45

Tabela 6.4 Caracterização métrica descritiva dos sons

6.2.1.2. Comparação entre índices métricos

Nesta secção apresentam-se algumas relações estabelecidas entre os índices métricos, eleitos como objecto de análise, para os sons em causa.

Na figura 6.5 representa-se o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A em função da sonoridade. A sua evolução é uma função do tipo potência existindo uma forte correlação entre estes dois índices métricos.

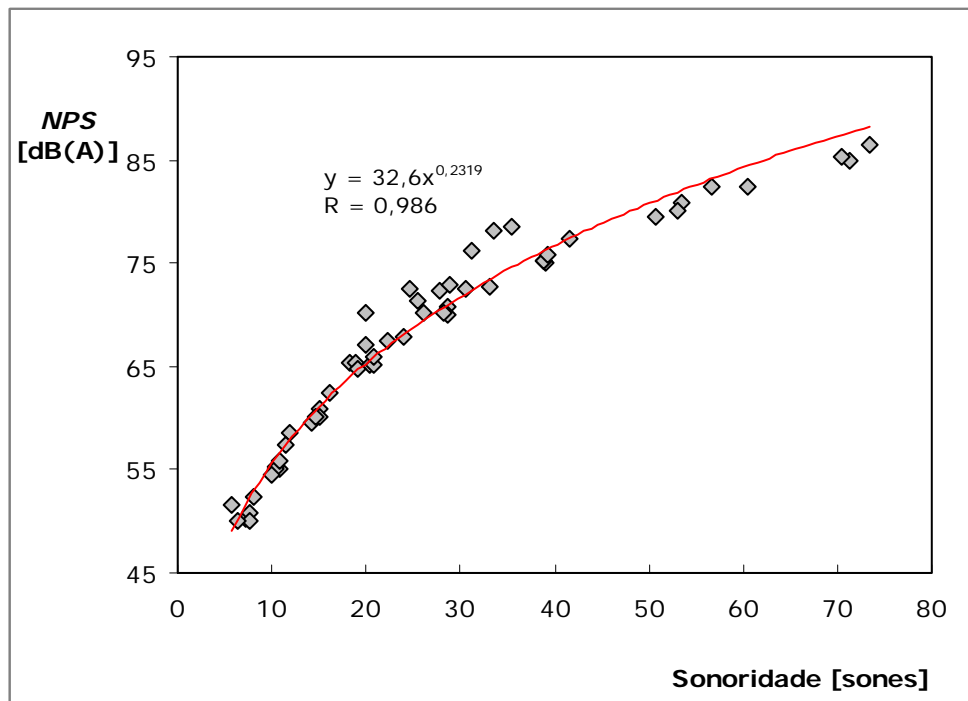


Figura 6.5 Relação obtida entre o NPS [dB(A)] e a sonoridade

Na figura 6.6 apresenta-se o índice de articulação em função do nível de pressão sonora ponderado pela curva A. Tal como seria de esperar, para um aumento do nível de pressão, o IA vai diminuindo de forma linear, apresentando níveis considerados como inaceitáveis em termos de conversação para valores acima de 80 dB(A).

Por último, na figura 6.7 indica-se a representação gráfica entre o IA e a agudez dos sons. Tal como referido por Onusic *et al.* (2003), é evidente que não existe correlação entre ambos, apesar de ambos enfatizarem as médias e as altas frequências dos sons, sendo no entanto as ponderações inerentes a cada um e o seu objectivo métrico bastante diferentes.

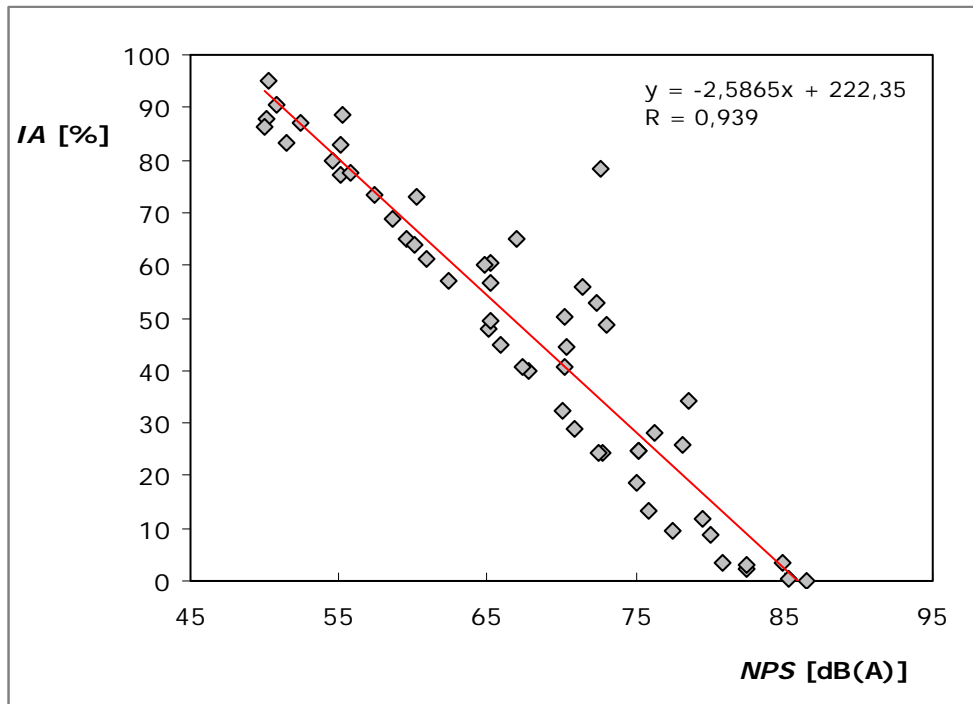


Figura 6.6 Relação obtida entre o IA e o NPS [dB(A)]

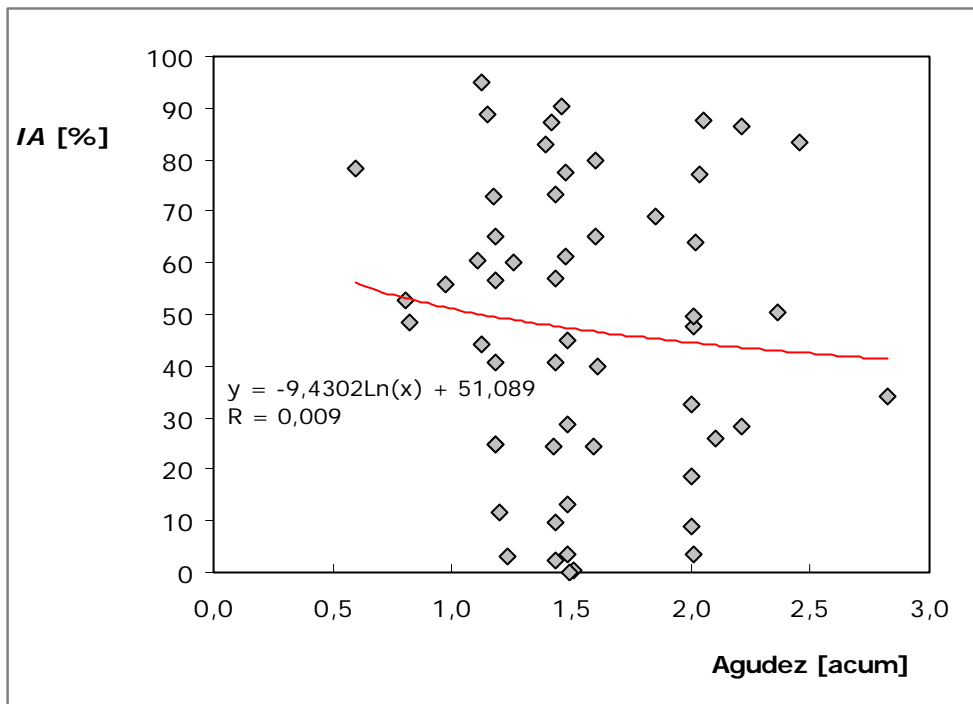


Figura 6.7 Relação obtida entre o IA e a agudez dos sons

6.2.2. Avaliação subjectiva

Na tabela 6.5 encontra-se um resumo da caracterização do painel de avaliadores, composto por um total de quarenta e nove pessoas que expressaram a sua opinião acerca dos sons que lhe foram apresentados através de uns auscultadores, conforme descrito no quinto capítulo.

Nº Passageiros Inquiridos	49
Género	
masculino	39
feminino	10
Idade [anos]	
média	26,0
desvio padrão	7,5
mínimo	16
máximo	52
Altura [cm]	
média	173,4
desvio padrão	8,1
mínimo	158
máximo	190
Peso [kg]	
média	70,7
desvio padrão	10,9
mínimo	50
máximo	92

Tabela 6.5 Caracterização do painel de avaliadores

As avaliações decorreram durante um período de quatro dias com avaliações de grupos constituídos por dois a quatro ocupantes do autocarro. Durante as medições, foram registados os principais caracterizadores ambientais. Na figura 6.8 apresenta-se a evolução da concentração de CO₂ e da temperatura do ar durante a realização das avaliações subjectivas. O valor médio sem ocupação do veículo, medido entre o dia 27 e o dia 28, da concentração de CO₂ foi de aproximadamente 400 ppm, sendo visível na referida imagem o efeito da presença das pessoas no interior do habitáculo, sem nunca terem sido alcançados valores que se pudessem considerar como desconfortáveis. No que diz respeito à temperatura do ar, apenas no dia 28 foram registados valores ligeiramente elevados; não obstante, quando questionadas acerca da opinião relativa ao ambiente térmico, as pessoas não manifestaram condições de desconforto. Uma possível causa poderá ser a inexistência de radiação directa no local onde se realizaram as avaliações parâmetro que, tal como descrito no capítulo quatro, afecta de um modo directo o conforto térmico das pessoas, sendo outras hipóteses: a adaptação do nível do vestuário e a pouca duração da exposição.

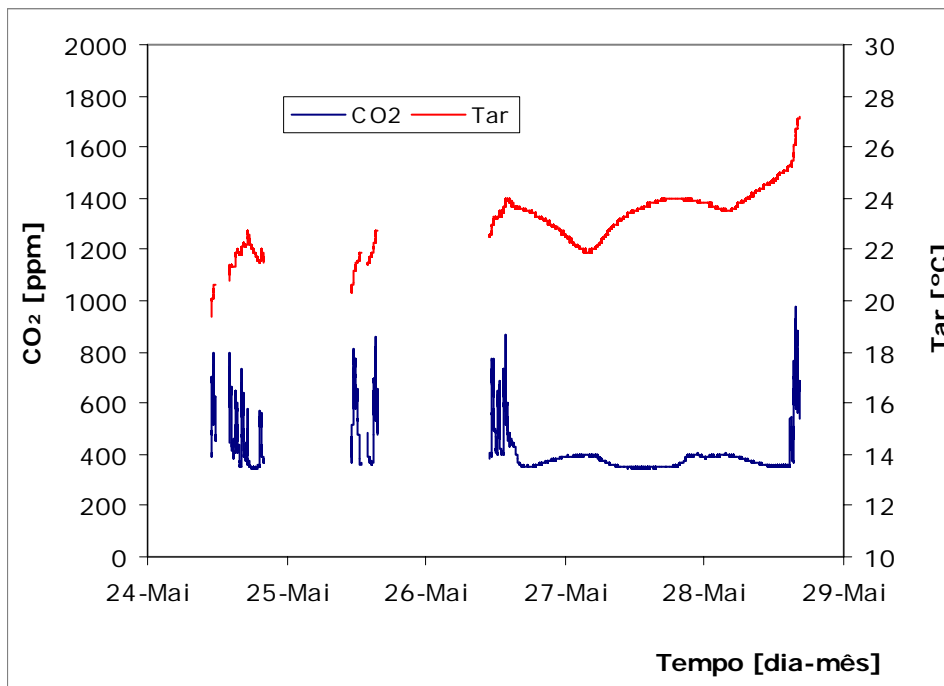


Figura 6.8 Monitorização da concentração de CO₂ e da temperatura do ar durante as avaliações subjectivas

Após a obtenção da resposta subjectiva numa escala de desconforto de zero a cem por cento, aplicou-se o teorema de Chauvenet tendo em vista a eliminação das respostas que apresentassem desvios superiores aos esperados para uma distribuição gaussiana. Na tabela 6.6 indica-se o número de respostas eliminadas na análise de cada um dos sons. Apresentam-se também os valores médios e desvios padrões para cada um dos sons votados pelo painel de avaliadores após a eliminação dos casos sem representatividade estatística. A utilização deste critério permitiu diminuir os valores de dispersão das respostas nalguns sons, sendo a sua utilidade mais evidenciada nos sons 34, 35 e 42 com diminuições dos desvios padrões de 20,4, 20,9% e 27,8% respectivamente.

Na aplicação do critério de Chauvenet, apenas em metade dos sons avaliados existiram dados que foram eliminados, tendo sido, na sua maioria, apenas um dado a ser eliminado existindo alguns sons onde foram eliminados dois dados, e apenas um onde foram eliminados três dados. O baixo número de dados eliminados sugere uma baixa dispersão dos valores obtidos e a utilização de um correcto procedimento de ensaio.

Os níveis energéticos a que as pessoas foram expostas situavam-se entre os 50 e os 87 dB(A), ou seja, um intervalo de amplitude de 37 decibéis. Atendendo ao facto de a sensibilidade humana permitir distinguir sons com diferenças em amplitude de 3 decibéis, para a gama supra indicada, este valor corresponde a um desvio de 8,15%, o que para um factor de expansão de dois origina 16,3%. Analisando os resultados

indicados na tabela 6.6 pode verificar-se que os desvios padrões obtidos são inferiores a este valor, donde se pode concluir a boa qualidade dos dados.

Som n°	Média Inicial	Desvio Padrão inicial	Média Final	Desvio Padrão final	Dados eliminados	Dif. Média	Dif. D.P.	Varição D.P. [%]
1	22,0	9,0	21,5	8,4	1	0,5	0,6	6,8
2	59,6	10,1	59,6	10,1	0	0,0	0,0	0,0
3	19,8	10,5	19,3	9,7	1	0,6	0,7	7,1
4	47,8	11,6	48,5	10,6	1	-0,7	1,1	9,1
5	74,5	10,1	74,5	10,1	0	0,0	0,0	0,0
6	85,7	9,3	86,3	8,5	1	-0,6	0,8	8,9
7	17,1	8,9	16,6	8,1	1	0,6	0,8	9,2
8	71,0	11,0	71,7	10,0	1	-0,7	1,1	9,7
9	69,9	11,9	70,6	10,9	1	-0,7	1,0	8,1
10	17,9	9,1	17,9	9,1	0	0,0	0,0	0,0
11	68,2	12,5	68,2	12,5	0	0,0	0,0	0,0
12	24,4	11,1	24,4	11,1	0	0,0	0,0	0,0
13	14,1	7,8	14,1	7,8	0	0,0	0,0	0,0
14	53,3	12,6	53,2	10,4	2	0,1	2,2	17,8
15	89,2	9,0	89,8	8,3	1	-0,5	0,6	7,1
16	62,7	13,8	61,9	12,8	1	0,8	1,0	7,1
17	53,7	11,7	53,0	10,8	1	0,7	0,9	7,5
18	23,1	10,3	22,5	9,5	1	0,6	0,7	7,2
19	55,5	11,7	56,2	10,7	1	-0,7	1,0	8,2
20	85,9	9,1	86,4	8,4	1	-0,5	0,7	7,9
21	41,8	13,9	41,8	13,9	0	0,0	0,0	0,0
22	21,4	10,7	20,8	9,9	1	0,6	0,7	6,9
23	60,3	12,8	60,3	12,8	0	0,0	0,0	0,0
24	53,9	12,1	53,2	11,2	1	0,7	0,8	6,9
25	33,8	13,7	33,8	13,7	0	0,0	0,0	0,0
26	44,7	15,2	44,7	15,2	0	0,0	0,0	0,0
27	36,7	14,3	36,7	14,3	0	0,0	0,0	0,0
28	86,2	10,9	86,2	10,9	0	0,0	0,0	0,0
29	31,8	13,9	31,8	13,9	0	0,0	0,0	0,0
30	55,7	15,1	55,7	15,1	0	0,0	0,0	0,0
31	21,4	12,2	21,4	12,2	0	0,0	0,0	0,0
32	31,6	14,9	31,6	14,9	0	0,0	0,0	0,0
33	24,6	12,1	24,6	12,1	0	0,0	0,0	0,0
34	12,9	8,4	12,4	6,7	2	0,5	1,7	20,4
35	92,8	7,7	93,8	6,1	2	-1,0	1,6	20,9
36	64,7	13,1	65,4	12,1	1	-0,8	1,0	7,7
37	61,1	13,9	61,8	12,9	1	-0,8	1,0	6,9
38	60,1	14,8	60,1	14,8	0	0,0	0,0	0,0
39	70,3	16,0	70,3	16,0	0	0,0	0,0	0,0
40	92,1	7,8	92,1	7,8	0	0,0	0,0	0,0
41	32,9	13,5	32,9	13,5	0	0,0	0,0	0,0
42	88,2	9,8	90,0	7,1	3	-1,8	2,7	27,8
43	51,0	13,9	51,7	13,0	1	-0,7	0,9	6,4
44	31,3	13,5	31,3	13,5	0	0,0	0,0	0,0
45	62,9	12,4	62,9	12,4	0	0,0	0,0	0,0
46	42,3	13,8	42,3	13,8	0	0,0	0,0	0,0
47	90,3	8,7	91,3	7,4	2	-1,0	1,3	14,5
48	50,5	14,2	49,5	12,8	1	0,9	1,4	10,1
49	21,8	11,5	21,8	11,5	0	0,0	0,0	0,0
50	19,9	11,2	19,9	11,2	0	0,0	0,0	0,0
51	54,7	12,1	54,0	11,1	1	0,7	1,0	8,5
52	68,5	13,5	69,3	12,4	1	-0,8	1,0	7,7
53	46,5	13,2	47,4	12,0	1	-0,8	1,2	9,0
54	40,0	13,6	40,0	13,6	0	0,0	0,0	0,0

Tabela 6.6 Médias e desvios padrões da avaliação subjectiva

A representação, segundo a ordem de apresentação ao painel de avaliadores, dos sons e da sua votação média e respectivo desvio padrão está representada na figura 6.9.

Nesta, pode observar-se que a dispersão das respostas tende a diminuir à medida que o valor médio das votações se aproxima dos limites da escala de desconforto utilizada.

Os sons número oito e nove eram idênticos tendo obtido votações do seu nível de desconforto de 71,0% e 69,9% com desvios padrões de 11,0% e 11,9%, respectivamente. Estes valores têm uma elevada concordância indicando uma boa reprodutibilidade das medições efectuadas.

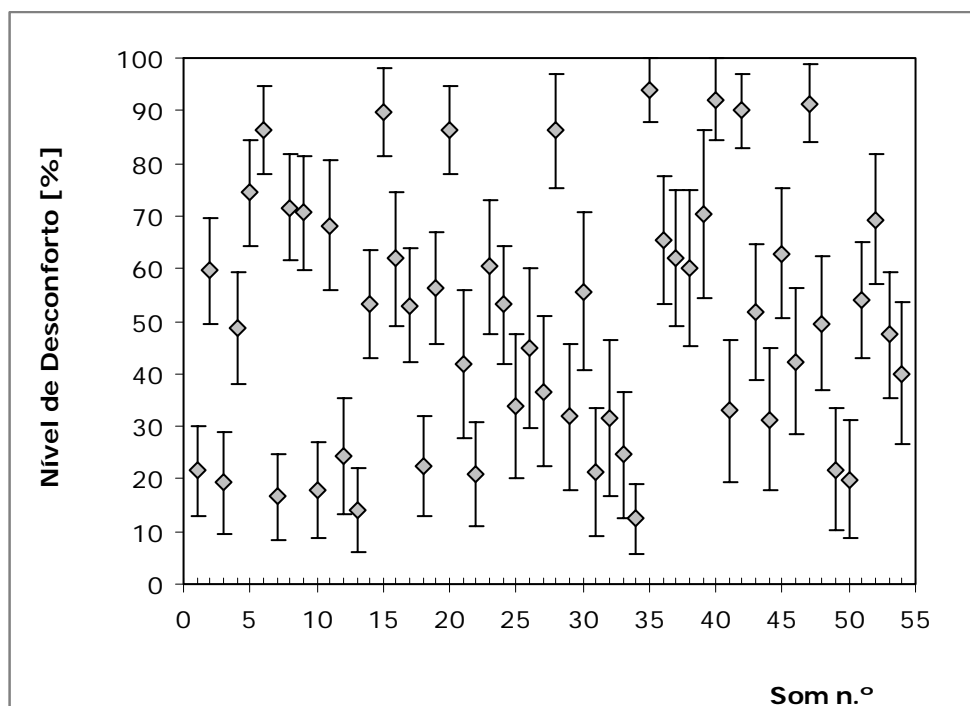


Figura 6.9 Média e desvios padrões manifestado pelo painel de avaliadores

Nas figuras 6.10 e 6.11 estão indicadas as respostas médias do painel de avaliadores relativamente aos sons que reproduziam as gravações do ruído do autocarro de turismo em andamento com o ar condicionado desligado e ligado, respectivamente. Os resultados evidenciam que, para uma diminuição em amplitude do nível de pressão sonora, o nível de desconforto votado tende a diminuir de uma forma linear. Nas votações relativamente aos sons com o veículo em andamento e com o ar condicionado desligado, esta diminuição apresenta uma linearidade inferior, quando comparada com as votações relativas aos sons com o ar condicionado ligado. Analisando a componente em frequência de ambas as situações (ver figura 6.12 e 6.13), constata-se que o ruído emitido pelo ar condicionado aumenta a amplitude das médias e altas frequências, nas zonas de maior sensibilidade do ouvido humano, tornando assim mais sensível a avaliação do painel de avaliadores para esta situação. Situação idêntica sucedeu, relativamente aos sons do mini-autocarro em situação dinâmica.

Na figura 6.10 indicam-se dois sons para a situação do veículo com o ar condicionado desligado de amplitude idêntica, correspondentes a 86 dB(L), que dizem respeito aos sons oito e nove que tal como já foi referido, são idênticos.

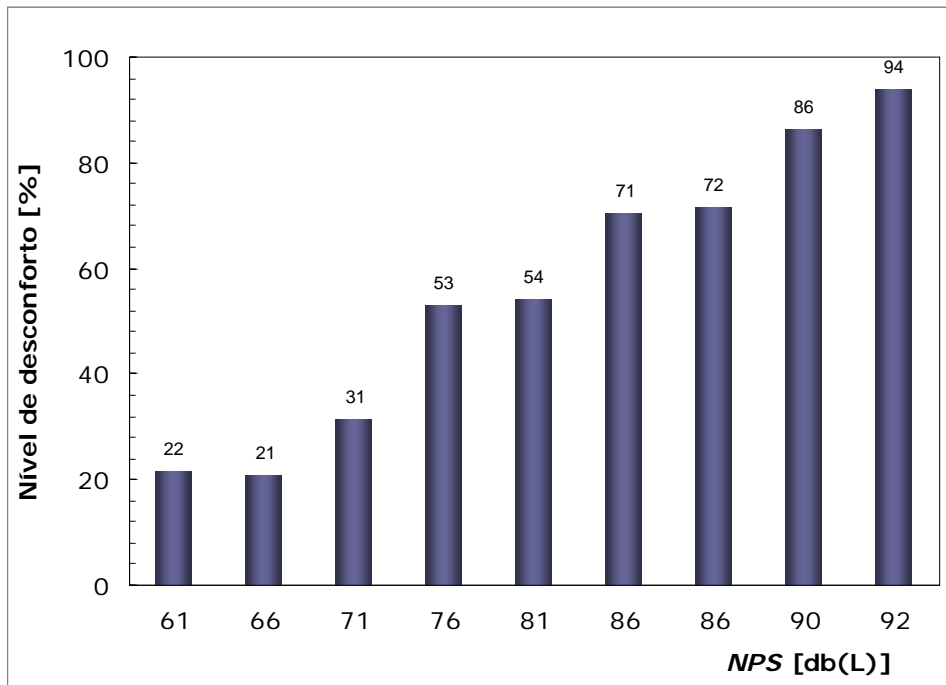


Figura 6.10 Média de avaliação subjectiva (Autocarro de turismo em andamento com o ar condicionado desligado)

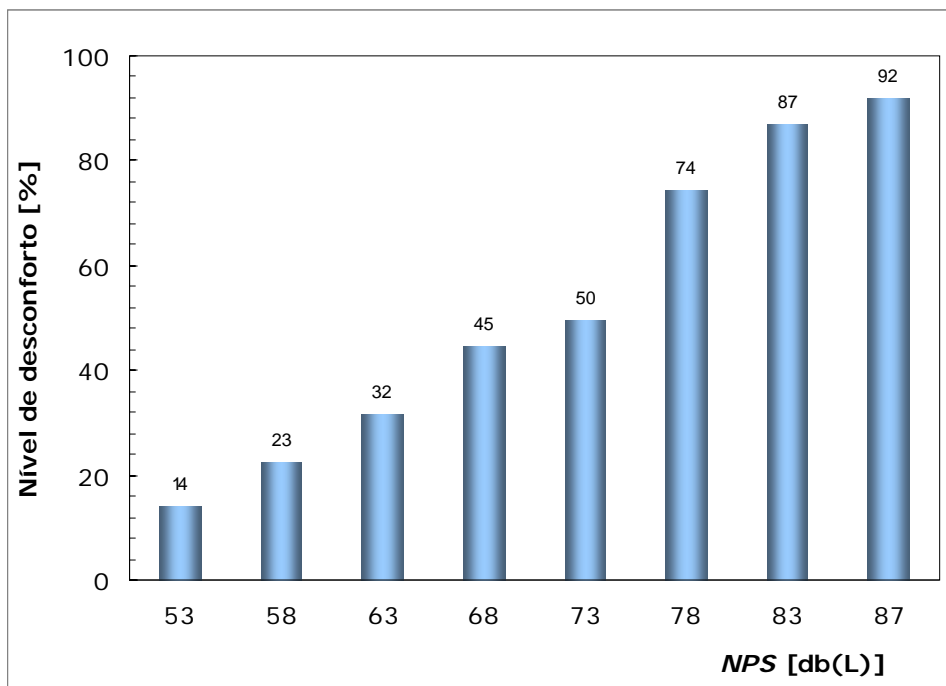


Figura 6.11 Média de avaliação subjectiva (Autocarro de turismo em andamento com o ar condicionado ligado)

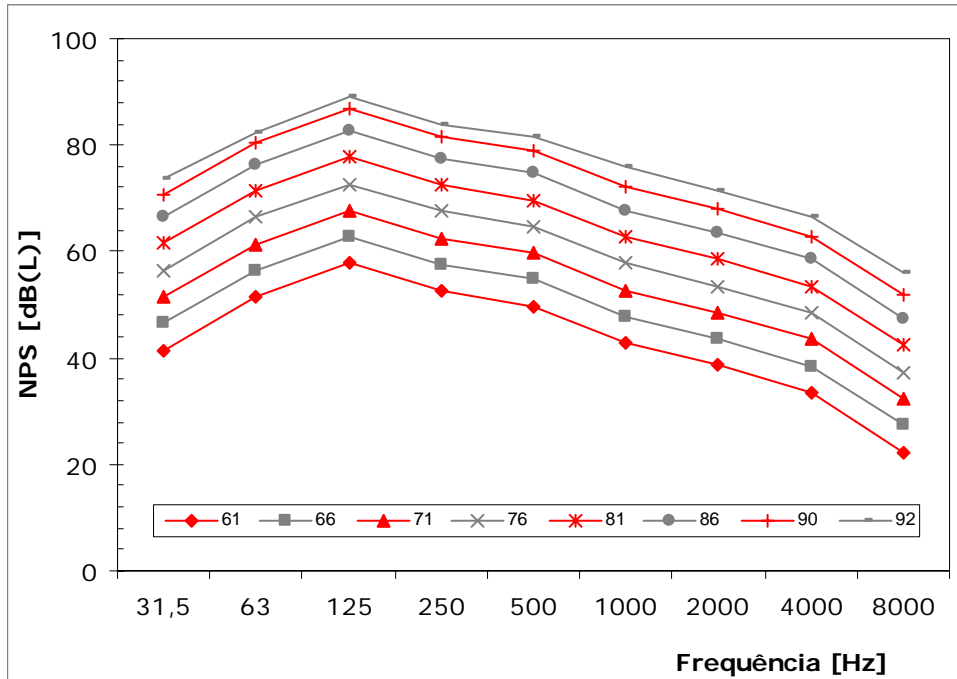


Figura 6.12 Nível de pressão sonora [dB(L)] em bandas de oitava (Autocarro de turismo em andamento com o ar condicionado desligado)

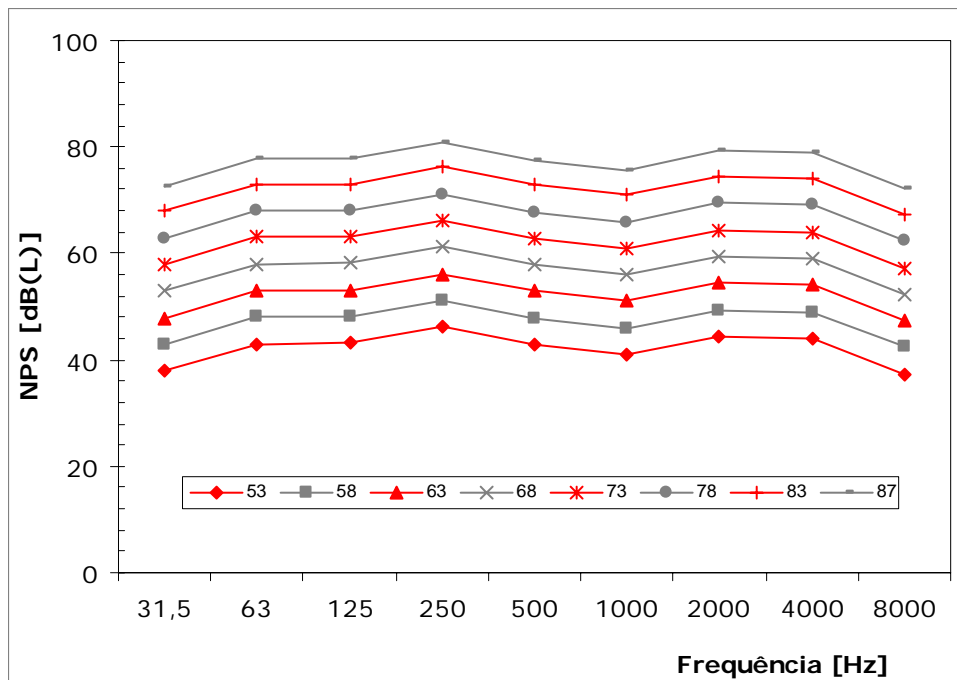


Figura 6.13 Nível de pressão sonora [dB(L)] em bandas de oitava (Autocarro de turismo em andamento com o ar condicionado ligado)

6.2.3. Comparação entre as respostas subjectivas e objectivas

Nesta secção serão apresentadas as principais relações estabelecidas entre os índices métricos escolhidos e a avaliação subjectiva do painel de avaliadores.

Começa-se, por apresentar a relação entre os dados subjectivos e a grandeza mais elementar relacionada com o nível acústico, ou seja, o valor de pressão sonora. Esta relação está graficamente representada na figura 6.14 e a sua evolução é consonante com a expressão de aproximação dos dados obtidos de acordo com a lei de Stevens (eq. 2.2), com um factor de potência igual a 2,1379. A correlação existente entre estas duas grandezas é bastante elevada com um valor numérico igual a 0,939.

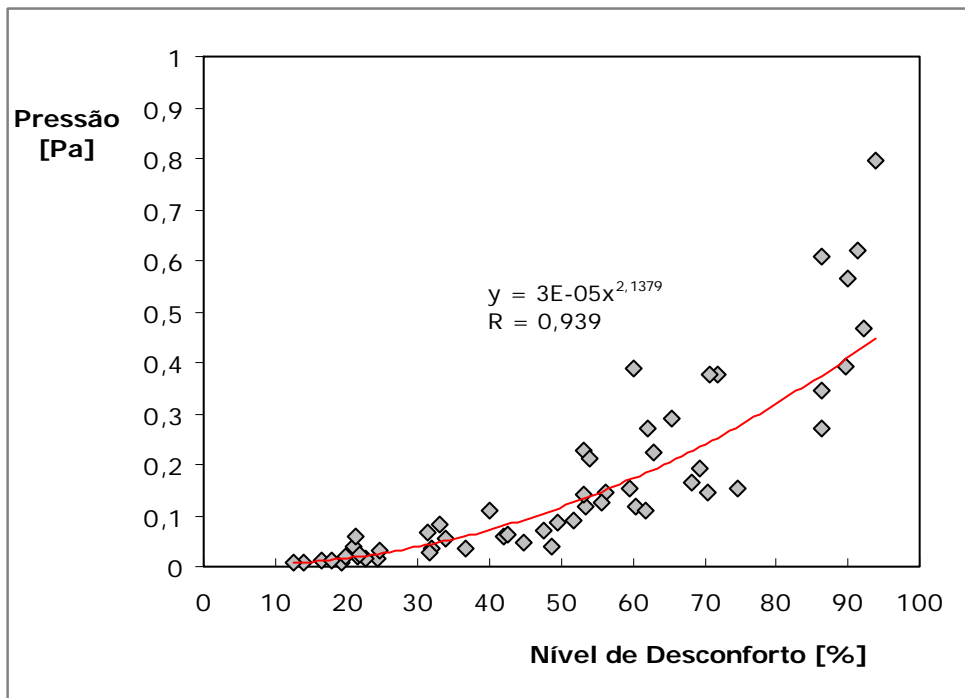


Figura 6.14 Pressão sonora em função do nível de desconforto

Através da logaritmização do valor da pressão acústica relativamente ao limiar de audição humana, obtém-se a linearização da resposta do painel de avaliação. Esta operação está representada na figura 6.15.

Em função da normalização existente e da metodologia desenvolvida durante a avaliação do desconforto global nos autocarros, existe uma relação que merece especial atenção e que respeita à que relaciona os dados subjectivos obtidos com o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A.

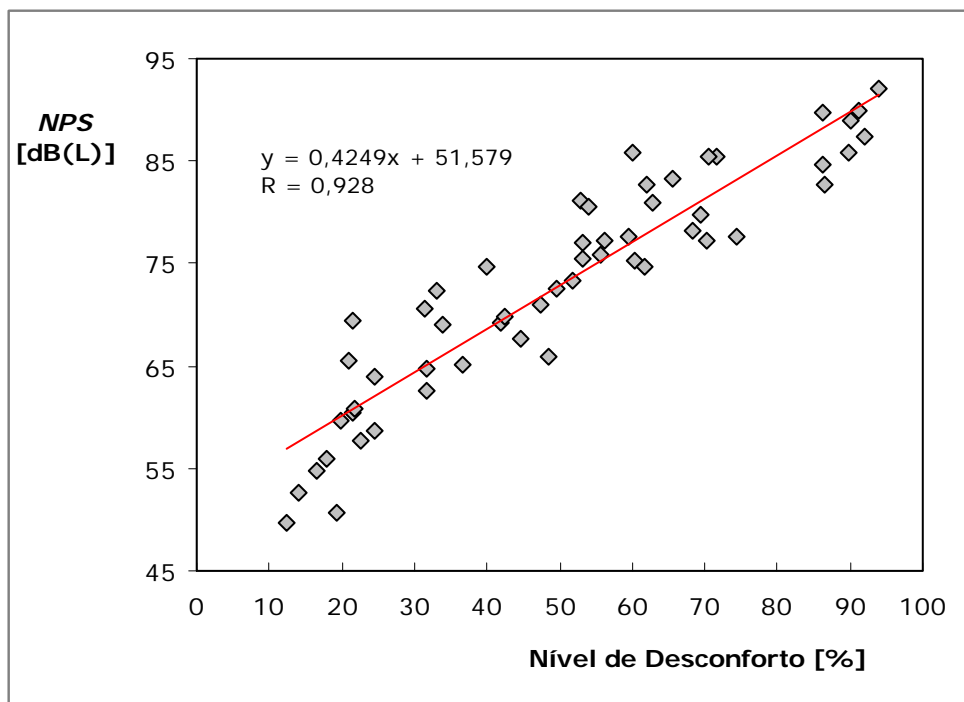


Figura 6.15 Nível de pressão sonora em função do nível de desconforto

Tal como descrito no capítulo cinco, o índice mais utilizado em termos acústicos é o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva de ponderação A. Na figura 6.16 representa-se este índice métrico em função do nível de desconforto obtido nas respostas subjectivas. A sua boa aceitação é resultado da boa correlação existente com os dados subjectivos pois, tal como se pode observar, o coeficiente de correlação de Pearson obtido é de 0,967.

Ao comparar os coeficientes de correlação indicados nas figuras 6.15 e 6.16, pode verificar-se o efeito benéfico da utilização da curva de ponderação A.

Em função da norma portuguesa (NP 1674) e das avaliações efectuadas durante a avaliação do ambiente global nos autocarros, torna-se imperativo analisar a função inversa, isto é, saber qual o nível de desconforto previsível em função do valor do *NPS* [dB(A)] medido no interior de um veículo pesado de transporte de passageiros. A representação desta relação encontra-se na figura 6.17.

Por curiosidade científica, efectuaram-se análises idênticas entre o nível de desconforto indicado pelas pessoas e o nível de pressão sonora ponderado em frequência pelas curvas de ponderação B, C e D, cujas representações gráficas constituem as figuras 6.18, 6.19 e 6.20, respectivamente. De todas as curvas de ponderação utilizadas, a curva A é a que apresenta melhor correlação com os dados subjectivos sendo a curva de ponderação C a que apresenta uma correlação inferior.

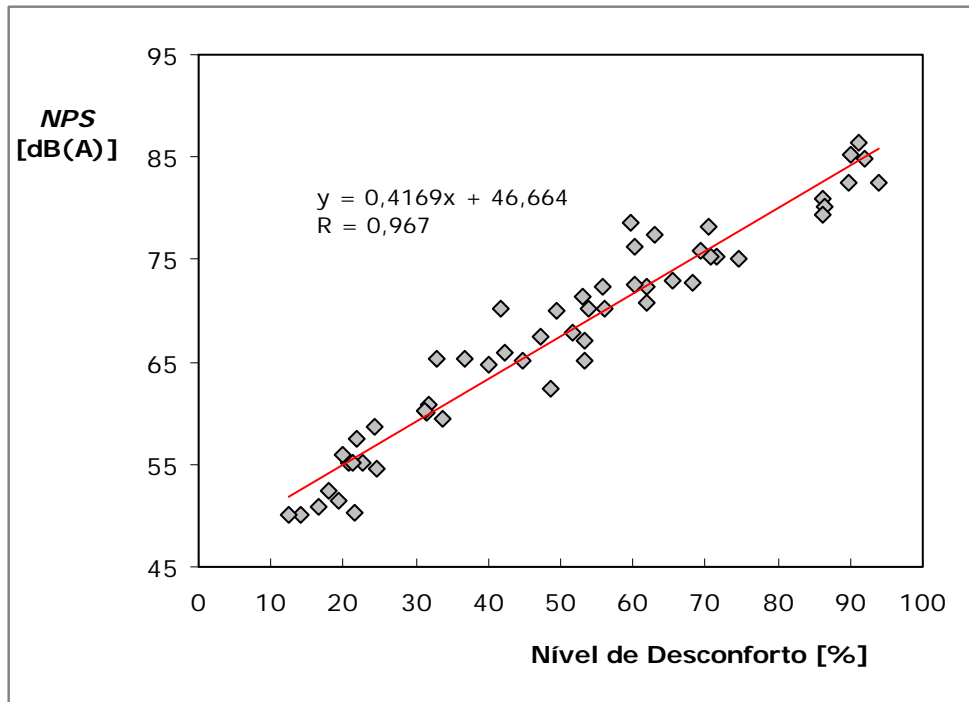


Figura 6.16 NPS [dB(A)] em função do nível de desconforto

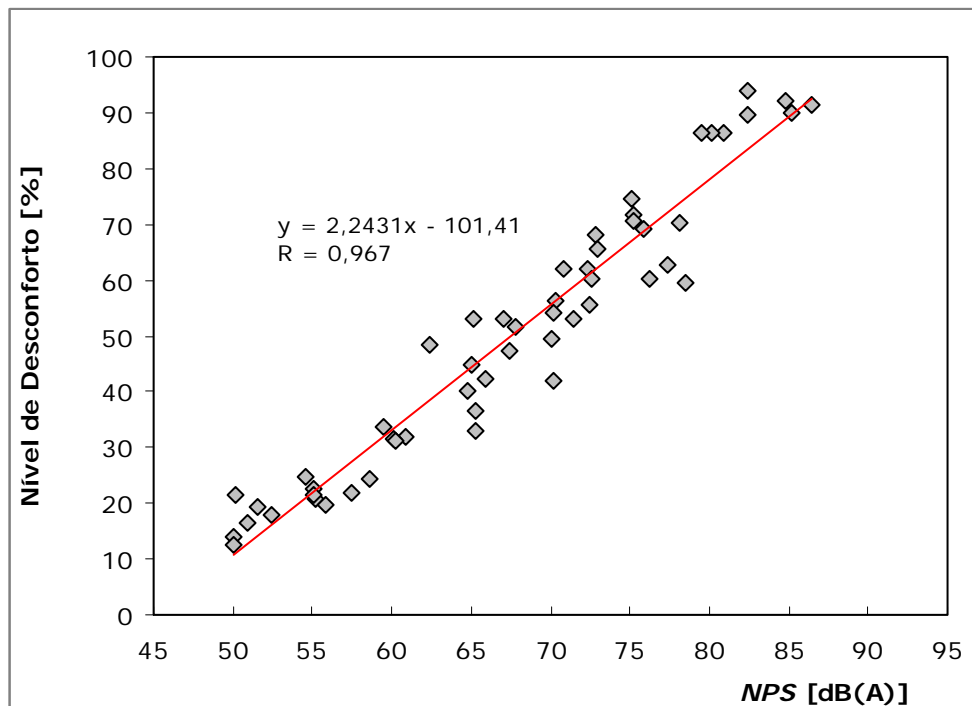


Figura 6.17 Nível de desconforto em função do NPS [dB(A)]

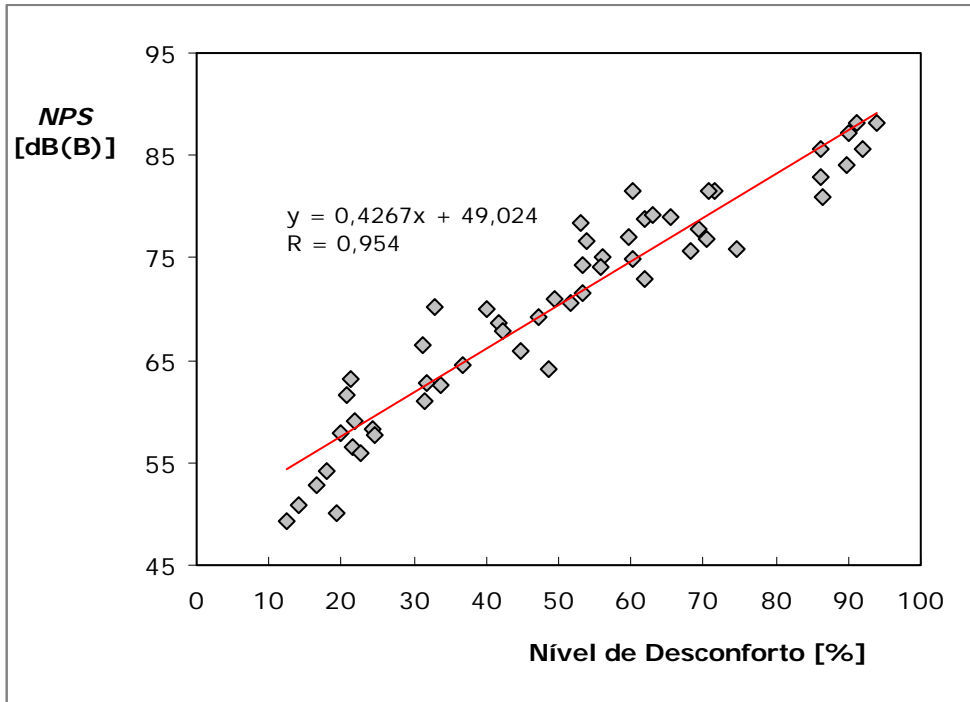


Figura 6.18 NPS [dB(B)] em função do nível de desconforto

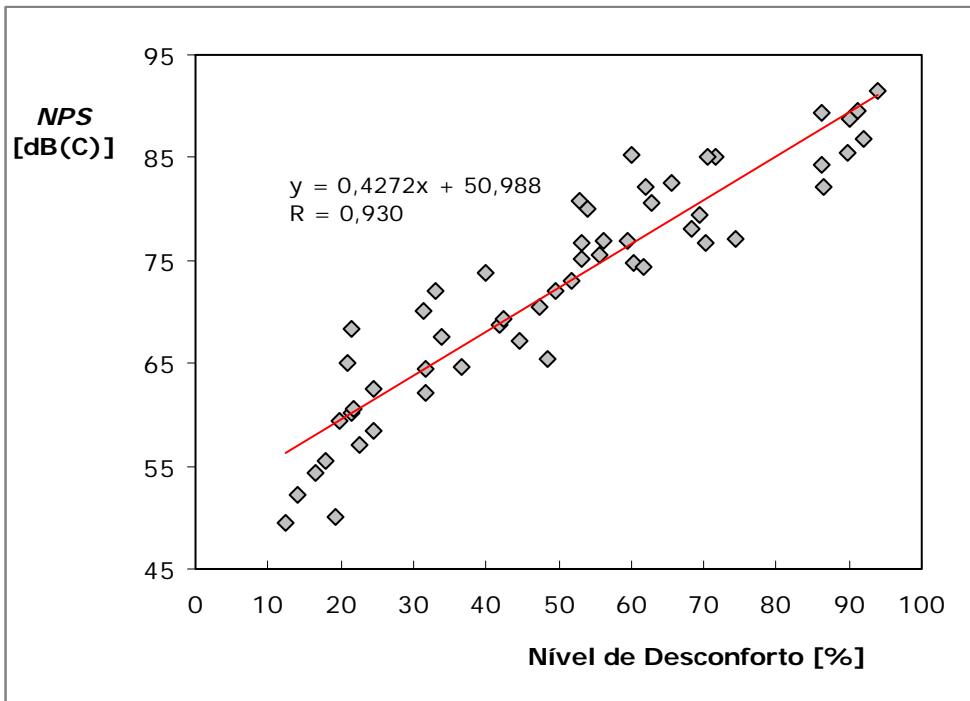


Figura 6.19 NPS [dB(C)] em função do nível de desconforto

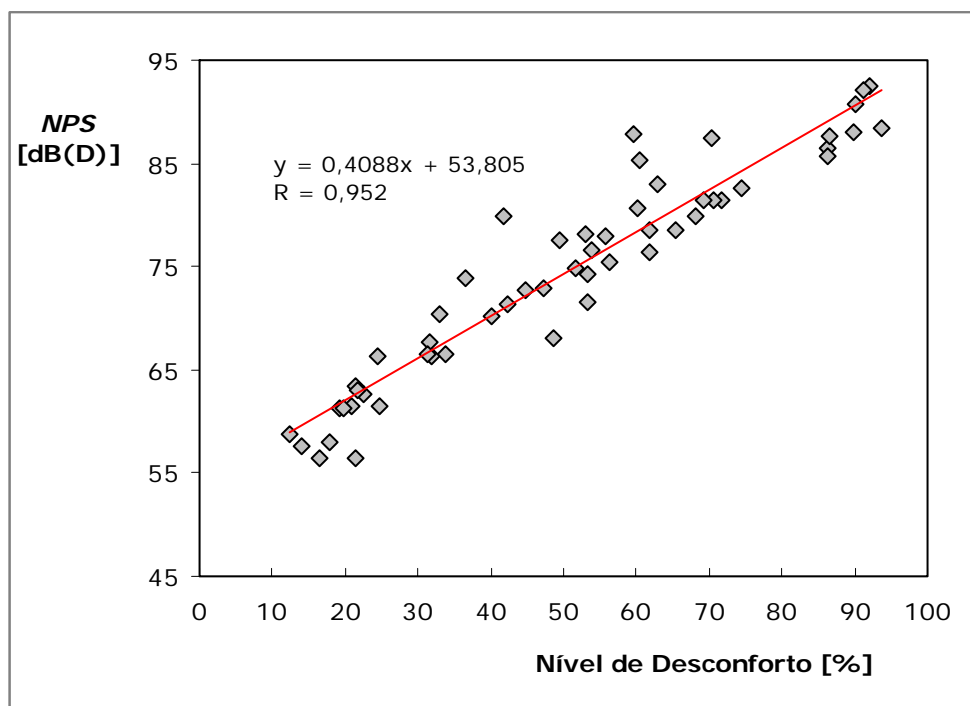


Figura 6.20 NPS [dB(D)] em função do nível de desconforto

A norma NP 1674, tal como indicado na tabela 4.2, distingue três situações como valores limites do nível de pressão sonora ponderado pela curva A, no interior de veículos pesados de passageiros em qualquer um dos pontos de medição efectuados de acordo com a norma ISO 5128. Relativamente à análise realizada, é possível comparar os valores obtidos para a situação de veículo imobilizado e do veículo a outras velocidades, em virtude de terem sido efectuadas avaliações para sons gravados com os veículos imobilizados e a velocidades de 80 km/h.

Na figura 6.21 apresenta-se sob a forma gráfica, a relação existente entre o nível de desconforto manifestado pelas pessoas e as medições efectuadas com os veículos imobilizados. Através da função derivada pode verificar-se que para os 65 dB(A) indicados pela norma portuguesa, e de acordo com os dados obtidos, este valor sugere um nível de desconforto de 42,8%. Utilizando a mesma expressão, e considerando um nível de desconforto de 50%, obtém-se um valor de 69 dB(A).

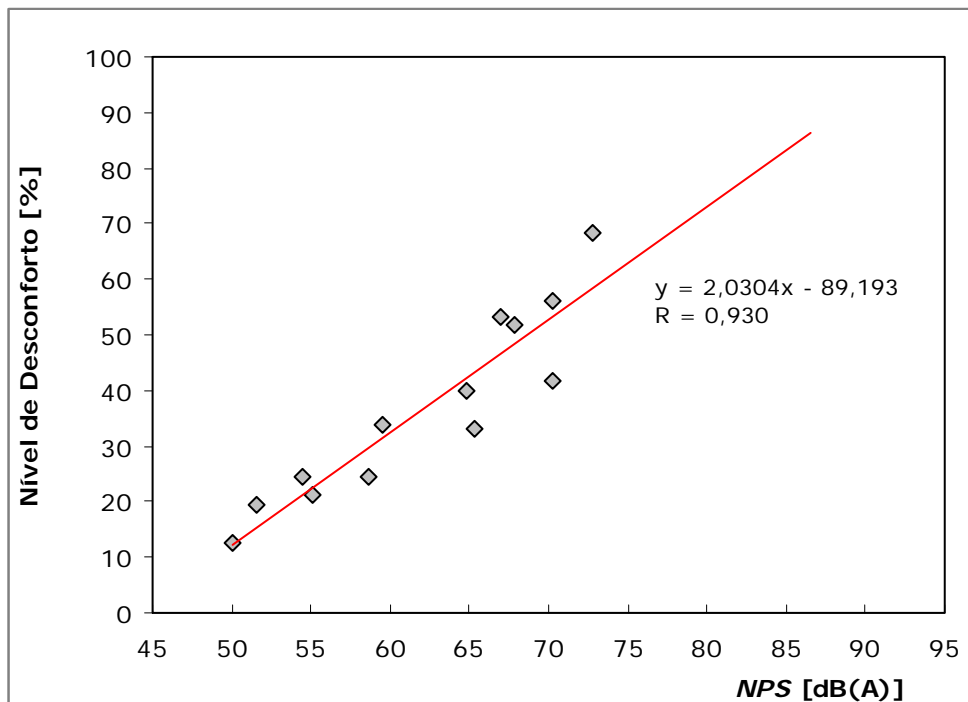


Figura 6.21 NPS [dB(A)] em função do nível de desconforto (veículos imobilizados)

Aplicando o mesmo raciocínio para a situação do veículo em andamento, a norma indica dois valores distintos consoante se considera percurso urbano (80 dB(A)) ou percurso interurbano (75 dB(A)). Na figura 6.22 está representada a função obtida para a situação dinâmica dos veículos. Utilizando esta função para os limites indicados na norma, obtêm-se níveis de desconforto de 78,5% para a utilização urbana e 67,2% para a situação interurbana. Utilizando a mesma expressão, obtêm-se para um nível de desconforto de 50%, um valor de 67 dB(A).

Desta análise pode inferir-se que a norma considera três níveis de desconforto distintos (42,8%, 78,5% e 67,2%), de acordo com a avaliação subjectiva conduzida. Os valores normalizados têm sido objecto de alguma controvérsia porquanto, a norma portuguesa indica apenas como correspondência a norma ISO 5128, sendo que esta não indica nenhum valor limite, tendo sido questionada a base científica que suporta os limites indicados, afigurando especial relevo a grande amplitude indicada nos mesmos, da ordem dos 12 dB(A): 65 dB(A) para a situação de imobilizado e 80 dB(A) para a situação de velocidade superior a 40 km/h em percurso urbano ou 75 dB(A) caso se considere percurso interurbano.

De acordo com os dados obtidos e considerando um nível de desconforto de 50%, estes indicam como valores limites, 69 dB(A) para a situação de imobilizado e 67 dB(A) para a situação dos veículos a 80 km/h. Estes valores são próximos dos utilizados noutros países, como seja a norma italiana CUNA 504-02, que define como limite do

ruído nos veículos pesados de transporte de passageiros um valor de 70 dB(A) no local do motorista, 71 dB(A) no centro do veículo e 71 dB(A) como média entre a zona dianteira, central e traseira do veículo. Esta norma não faz distinção entre a situação do veículo estar imobilizado ou em andamento.

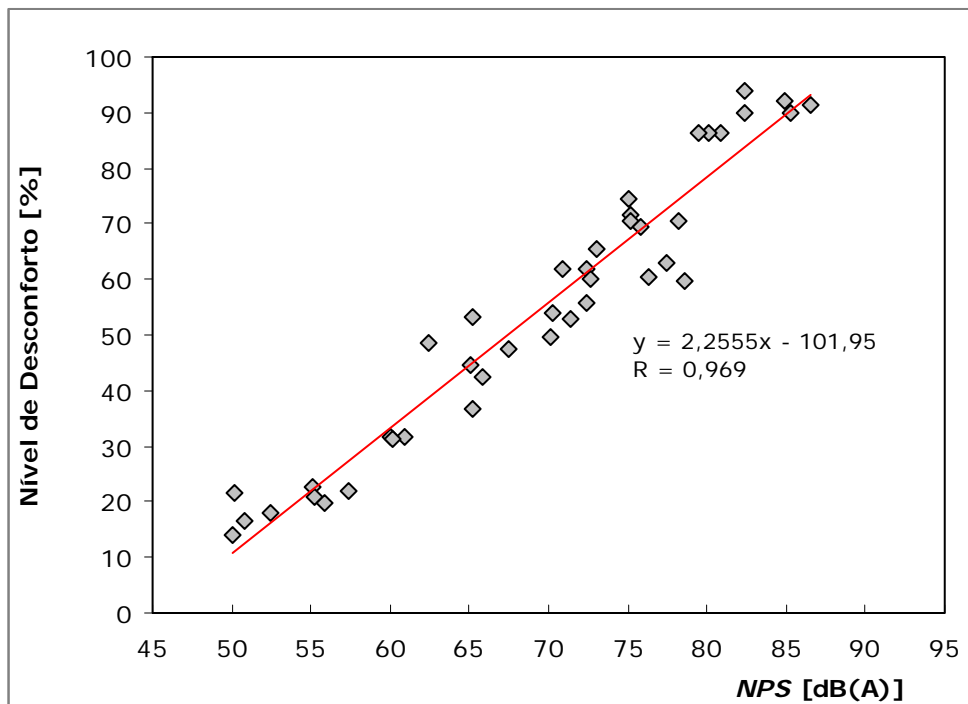


Figura 6.22 NPS [dB(A)] em função do nível de desconforto (veículos a 80 km/h)

Caso se considere um nível de conforto superior, com apenas cerca de 20% de desconforto indicado pelos passageiros, então o nível de pressão sonora seria idêntico para ambas situações, com um valor limite de 54 dB(A).

Um dos índices que tem conhecido mais aceitação na indústria automóvel é o índice de articulação. Na figura 6.23 apresenta-se a sua evolução em função do nível de desconforto manifestado durante a avaliação subjectiva. Tal como seria de esperar, à medida que o índice de articulação diminui, o nível de desconforto indicado vai aumentando. Tal como referido no capítulo quatro aquando da explicação deste índice métrico, considera-se um ambiente acústico inaceitável o que apresenta um *IA* de 5% ao qual, de acordo com os dados subjectivos obtidos, corresponde um nível de desconforto de 88,7%, considerando-se um ambiente aceitável os que apresentam valores de *IA* superiores a 80%, a que corresponde um nível de desconforto de 20,8%, de acordo com os dados obtidos.

Utilizando o valor de 88,7% de nível de desconforto nas expressões anteriormente derivadas por forma a obter os valores correspondentes do nível de pressão sonora

ponderado pela curva A, obtêm-se limites de incomodidade de 88 dB(A) para a situação de imobilizado, e de 85 dB(A) para a situação do veículo a velocidades superiores a 40 km/h. Este critério é manifestamente baixo, apresentando limites de incomodidade muito elevados.

Lida e George (1999) sugerem que valores do índice de articulação superiores a 50% conduzem a níveis de conforto dos passageiros. Utilizando este critério, obtêm-se limites de conforto de 68 dB(A) para a situação de imobilizado, e de 67 dB(A) para a situação do veículo a velocidades superiores a 40 km/h. Estes valores são próximos dos obtidos anteriormente, ao considerar-se um nível de desconforto de 50%.

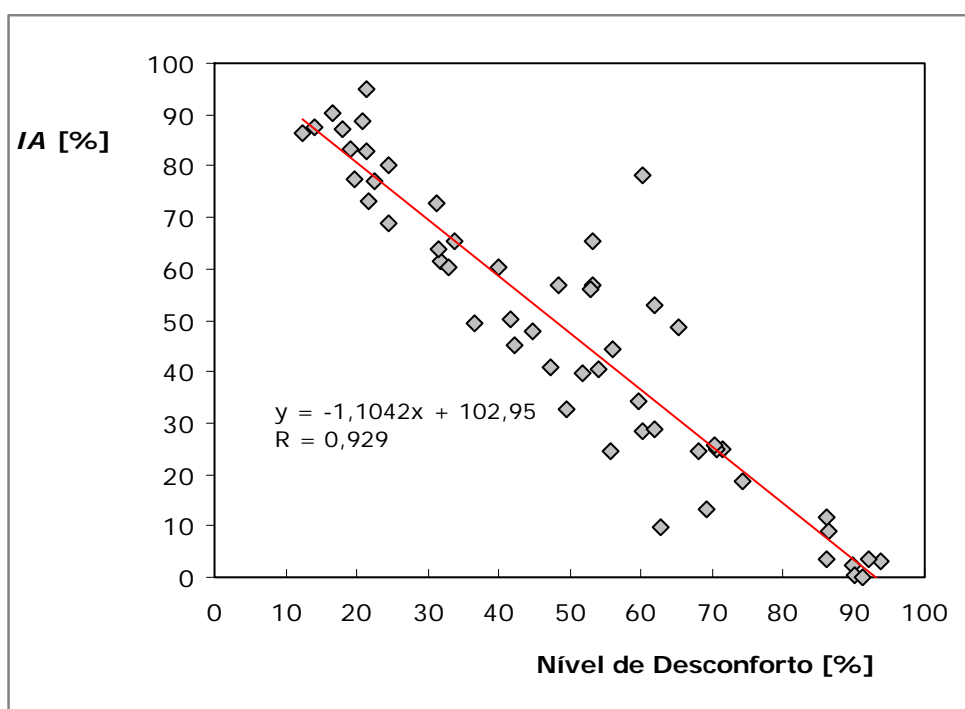


Figura 6.23 Índice de articulação em função do nível de desconforto

A sonoridade é outro índice que tem sido utilizado com frequência em avaliações de qualidade sonora de diversas áreas. Na figura 6.24 este índice métrico representa-se em função do nível de desconforto. Este índice apresenta valores de correlação bastante elevados sendo apenas igualado pelo nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A.

Na figura 6.25 apresenta-se a evolução deste mesmo índice, mas na unidade de fones que, de acordo com a equação (4.27), corresponde a uma variação logarítmica da sonoridade, apresentando uma variação linear relativamente ao nível de desconforto.

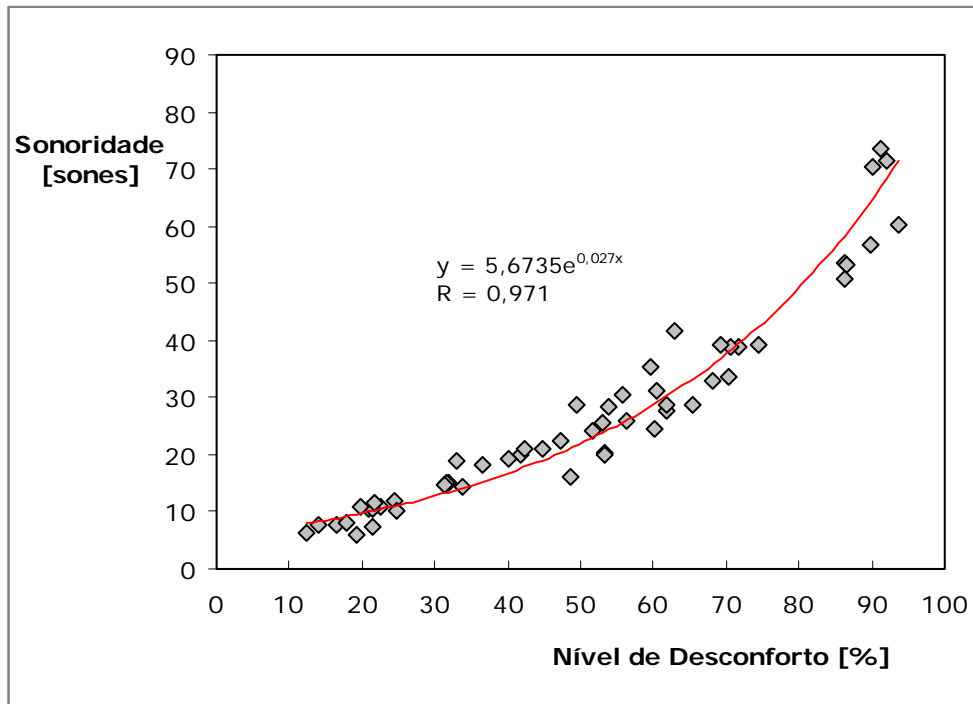


Figura 6.24 Sonoridade [sones] em função do nível de desconforto

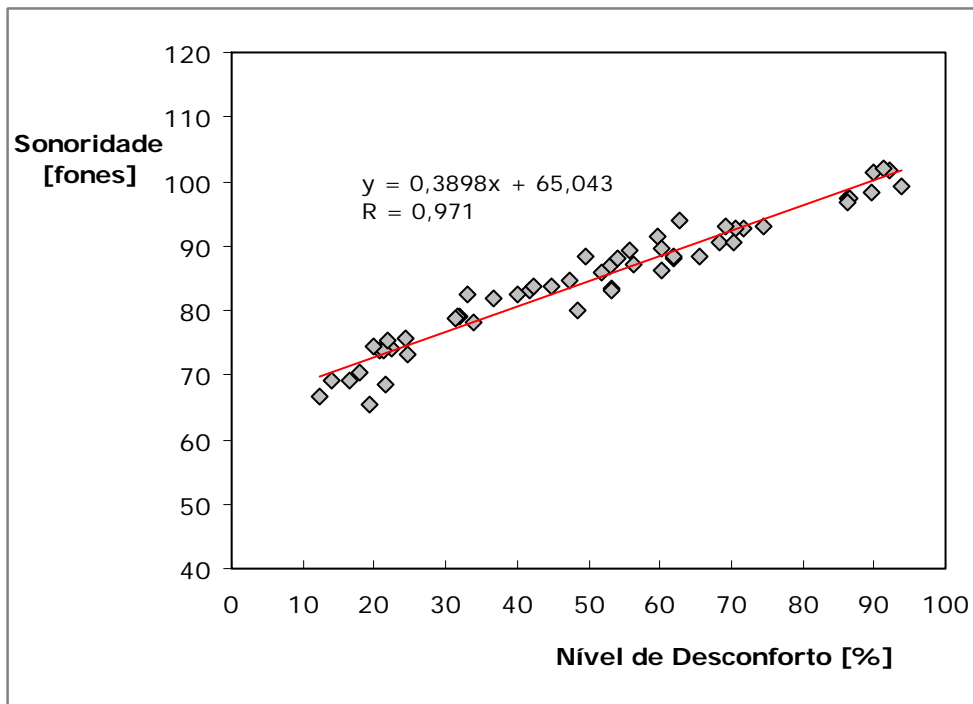


Figura 6.25 Sonoridade [fones] em função do nível de desconforto

Representa-se na figura 6.26 a relação entre outro dos índices utilizados na avaliação da qualidade sonora, a agudez, e as respectivas respostas subjectivas do painel de avaliadores. Como se constata, o coeficiente de correlação é, neste caso, muito baixo. No entanto, este índice pode assumir importância quando utilizado em índices compostos.

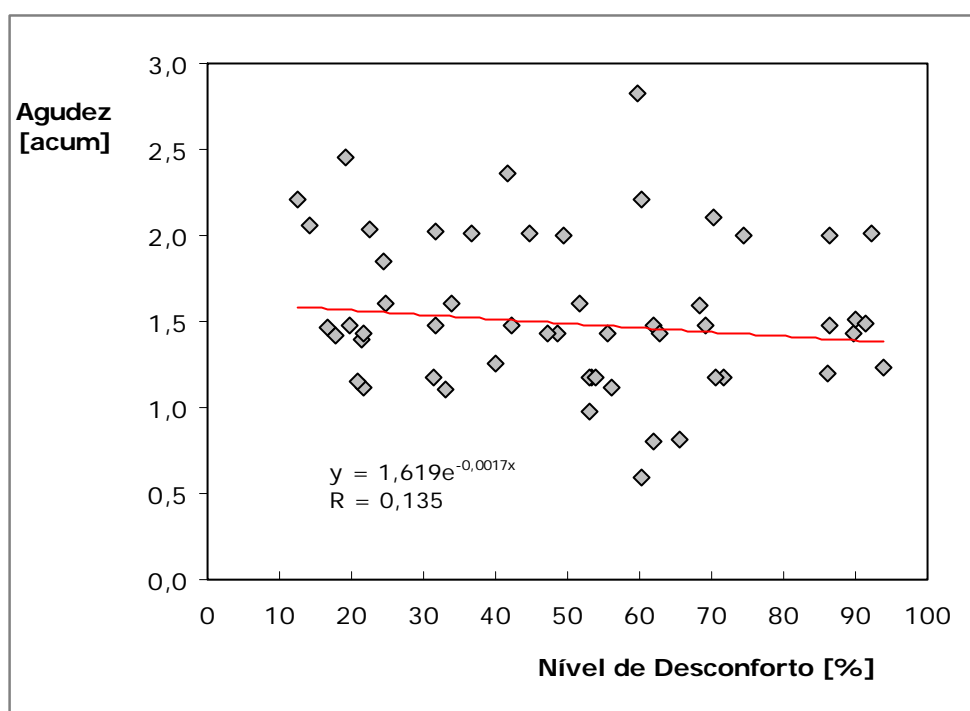


Figura 6.26 Agudez em função do nível de desconforto

6.2.3.1. Regressão linear múltipla

Foi aplicado o método de regressão linear múltipla tendo como variável dependente o nível de desconforto acústico em autocarros (*NDAA*), e como variáveis independentes os quatro índices métricos seleccionados: nível de pressão sonora [dB(A)], índice de articulação [%], sonoridade [sones] e agudez [acum] dos sons. A expressão obtida foi a seguinte:

$$NDAA [\%] = 1,26 NPS - 0,13 IA + 0,40 Sonoridade - 5,10 Agudez - 31,50 \quad (6.1)$$

A expressão 6.1 apresenta uma correlação com os dados obtidos de 0,979, que corresponde a um incremento percentual de 0,8% relativamente à melhor correlação anteriormente mencionada entre os índices de uma forma individual e o nível de desconforto. Este incremento é significativo atendendo ao nível elevado de correlação existente entre os índices isolados e o nível de desconforto.

6.2.3.2. Rede neuronal artificial

Tendo em conta a média dos valores das respostas das pessoas como variável de saída das redes neurais artificiais e definindo como variáveis de entrada das redes o nível de pressão sonora [dB(A)], o índice de articulação [%], a sonoridade [sones] e a agudez [acum] dos sons, utilizou-se o software Statistica Neural Networks para o desenvolvimento de redes neurais de regressão.

Através de uma simples rede neuronal linear, obtiveram-se valores idênticos de correlação aos obtidos pela equação 6.1. A rede obtida está ilustrada com as respectivas ponderações na figura 6.27.

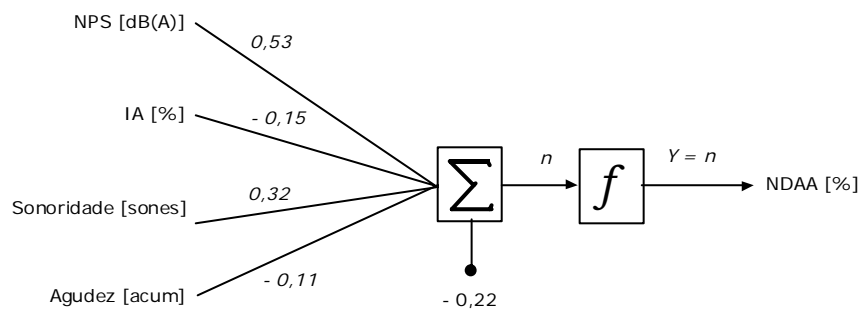


Figura 6.27 Rede neuronal artificial linear com 4 entradas e 1 saída

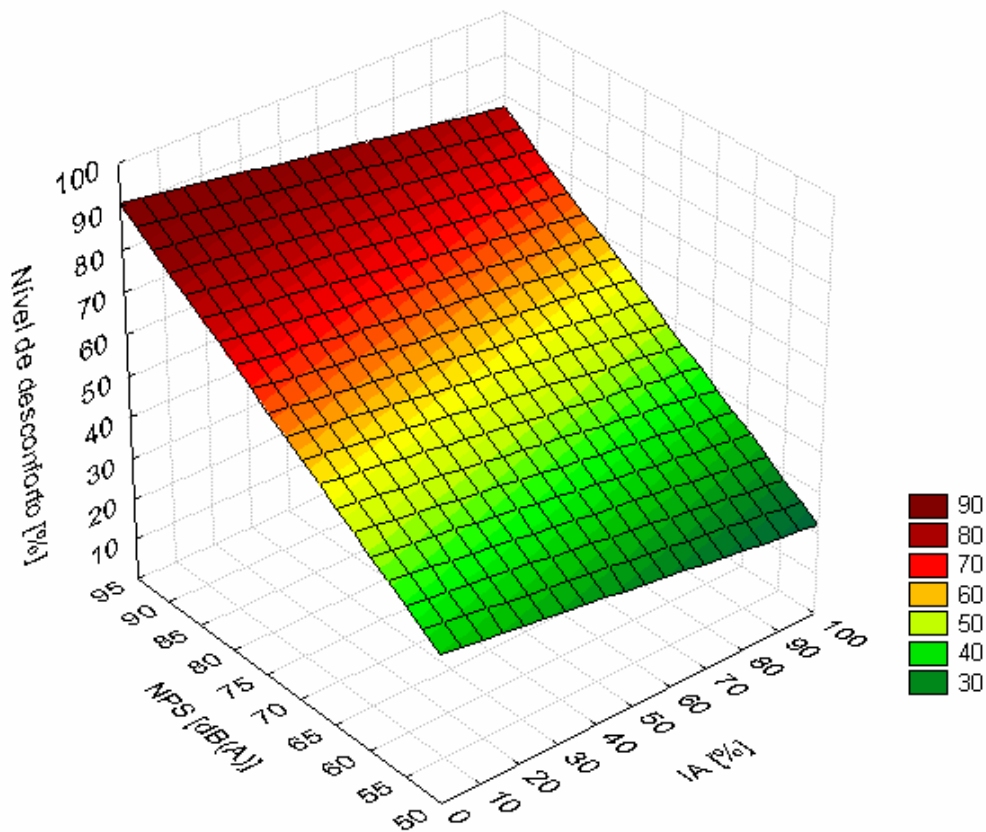


Figura 6.28 Nível de desconforto em função do NPS [dB(A)] e do IA

O valor de ponderação indicado na figura 6.27 relativo ao *NPS* [dB(A)] revela que é este índice métrico que assume uma maior preponderância na resposta da rede neuronal linear, seguido da sonoridade. Nas figuras 6.28 e 6.29, apresenta-se a resposta do nível de desconforto em função destas três variáveis ficando patente o efeito dominante, que o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A, tem na rede neuronal linear.

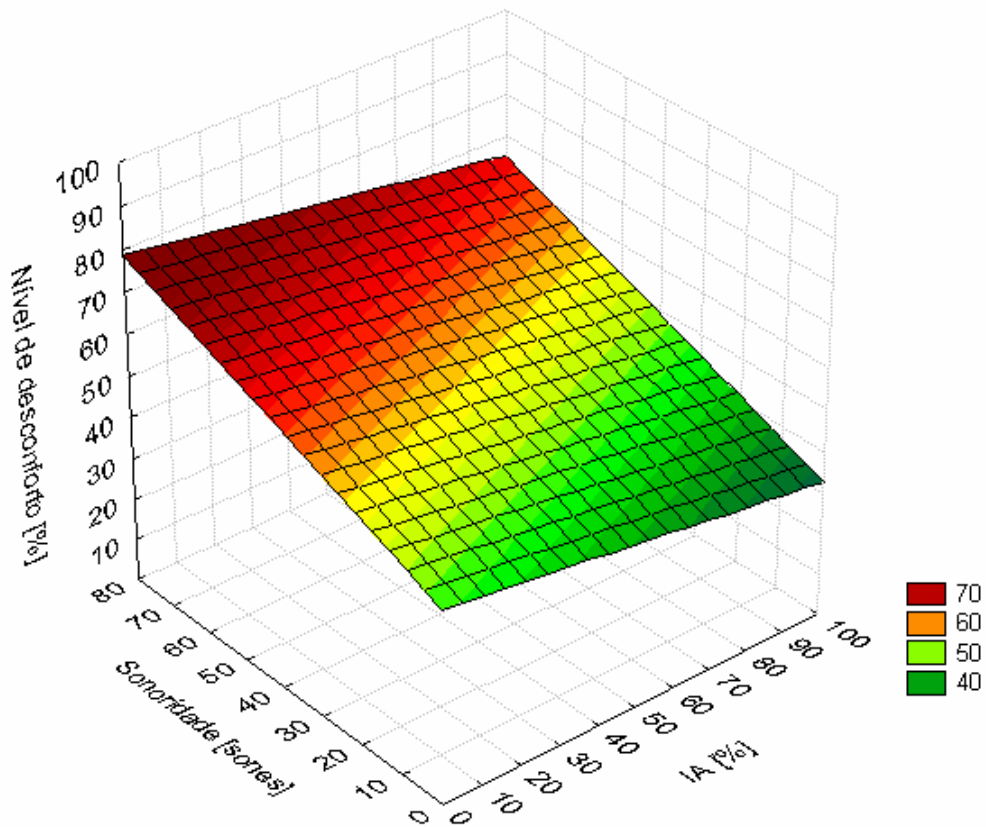


Figura 6.29 Nível de desconforto em função da sonoridade e do IA

6.2.3.3. Comparativo entre tipo de veículos

Nas figuras 6.30, 6.31 e 6.32 apresentam-se os resultados obtidos para três índices métricos relativamente aos dois tipos de veículos. Nelas se constata que existe uma correlação ligeiramente superior nos mini-autocarros relativamente aos autocarros de turismo.

Face à pequena variação existente na análise separada entre os dois tipos de veículos afigura-se que esta não é justificável, optando-se por incluir os dados numa análise conjunta, tal como anteriormente foram apresentados.

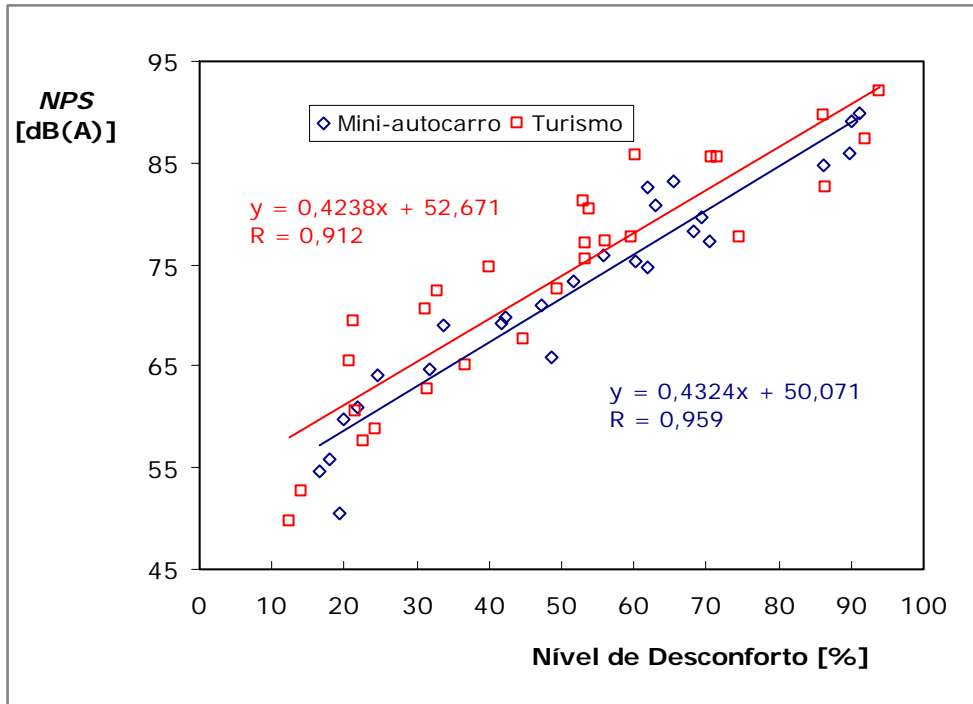


Figura 6.30 NPS [dB(A)] em função do nível de desconforto

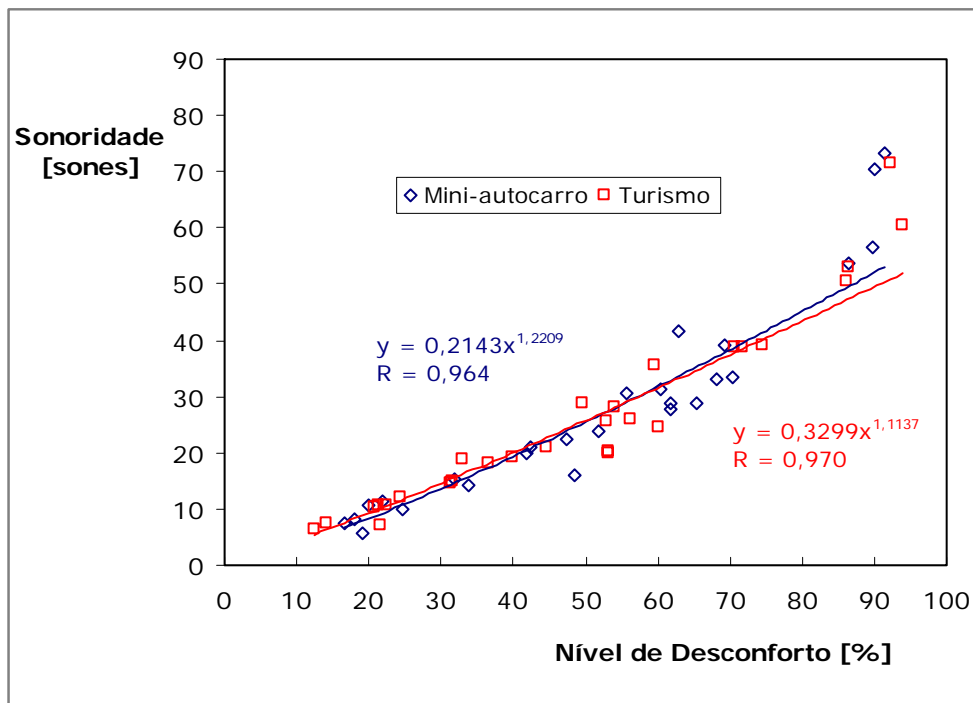


Figura 6.31 Sonoridade [sones] em função do nível de desconforto

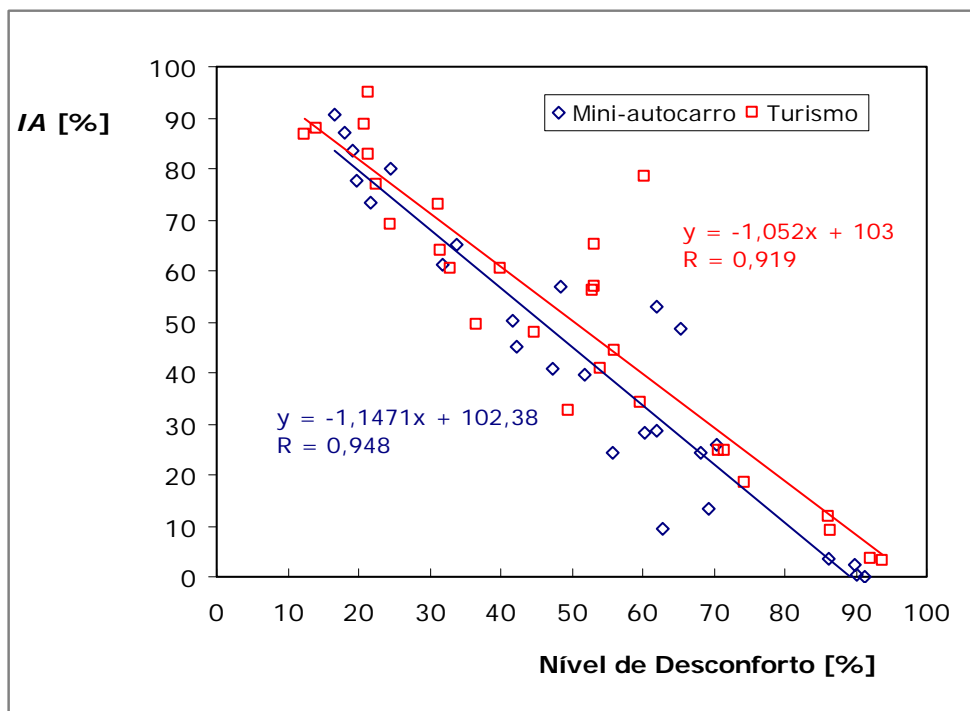


Figura 6.32 Índice de articulação em função do nível de desconforto

6.3. Avaliação do desconforto ambiental

Face à elevada quantidade de dados obtidos, a partir daqui serão apenas apresentados os principais resultados das avaliações efectuadas em trinta e um percursos relativos ao ambiente térmico, vibrações, ruído, qualidade do ar, luminosidade e uma avaliação subjectiva relativa ao nível de desconforto global sentido pelos passageiros. A análise visa o tratamento de medições objectivas relativas às grandezas físicas indicadas bem como das medições subjectivas através da avaliação dos diversos painéis de avaliadores. Para todas as grandezas serão estabelecidas as correlações possíveis entre as grandezas objectivas e subjectivas, bem como a obtenção do nível de desconforto global em função dos diferentes estímulos.

6.3.1. Caracterização dos percursos

Na tabela 6.7 estão indicadas algumas características relativas às viagens realizadas. Para a análise aqui apresentada, validaram-se vinte e uma viagens realizadas em autocarros de turismo e dez efectuadas em mini-autocarros. O número de passageiros oscilou entre um mínimo de oito e um máximo de quarenta e seis.

Os ensaios realizados no ano de 2002 foram efectuados no âmbito do referido projecto Combistress, tendo a metodologia de ensaio sido idêntica à adoptada nas

viagens dos anos posteriores, com a excepção de não se ter incluído na altura, como estímulo de desconforto ambiental, a luminosidade.

Apenas a viagem número dezanove teve uma duração inferior aos dez minutos inicialmente considerados como valor mínimo, no entanto, face à escassa diferença e após a análise dos dados obtidos neste percurso, esta diferença temporal não se revelou fundamental. A duração máxima dos percursos eleitos nesta análise foi de 74 minutos.

Percurso nº	Data [dd/mm/aa]	Tipo de veículo	Nº de passageiros	Duração [h:mm]	Tipo de pavimento
1	20/05/02	Turismo	17	0:44	Bom
2	20/05/02	Turismo	17	0:13	Bom
3	20/05/02	Turismo	17	0:11	Bom
4	02/12/02	Turismo	11	0:24	Bom
5	02/12/02	Turismo	11	0:14	Mau
6	02/12/02	Turismo	11	0:27	Bom
7	10/03/05	Mini-autocarro	11	0:12	Mau
8	10/03/05	Mini-autocarro	11	0:11	Mau
9	21/03/05	Turismo	13	0:18	Bom
10	21/03/05	Turismo	13	0:13	Mau
11	21/03/05	Turismo	13	0:11	Médio
12	20/05/05	Mini-autocarro	8	0:14	Bom
13	20/05/05	Mini-autocarro	8	0:18	Bom
14	25/05/05	Turismo	10	0:20	Bom
15	25/05/05	Turismo	10	0:23	Bom
16	31/05/05	Mini-autocarro	12	0:26	Médio
17	31/05/05	Mini-autocarro	12	0:10	Bom
18	03/06/05	Mini-autocarro	13	0:11	Bom
19	03/06/05	Mini-autocarro	13	0:09	Bom
20	08/06/05	Turismo	14	0:33	Bom
21	08/06/05	Turismo	14	0:38	Bom
22	08/06/05	Turismo	14	0:28	Bom
23	08/06/05	Turismo	14	0:36	Bom
24	13/01/06	Turismo	16	0:18	Bom
25	13/01/06	Turismo	18	1:14	Bom
26	18/01/06	Turismo	46	0:40	Bom
27	18/01/06	Turismo	46	0:54	Bom
28	18/01/06	Turismo	45	0:52	Bom
29	18/01/06	Turismo	44	0:37	Bom
30	28/04/06	Mini-autocarro	14	0:19	Bom
31	28/04/06	Mini-autocarro	14	0:13	Bom

Tabela 6.7 Percursos efectuados

O tipo de pavimento oscilou entre asfalto em bom estado e piso asfaltado em más condições. De referir que nas viagens número 7 e 8 os passageiros foram submetidos a

condições consideradas extremas em termos de vibrações, tal como ambos os resultados, objectivos e subjectivos, o comprovam.

Na figura 6.33 apresentam-se os trajectos utilizados no dia 2 de Dezembro de 2002, constituindo a primeira avaliação, assinalada a vermelho, o trajecto entre Leiria e S. Pedro de Muel, o segundo trajecto entre S. Pedro de Muel e a Marinha Grande pela estrada assinalada a verde e o último percurso, entre a Marinha Grande e Leiria, assinalado a azul. Para todas as viagens, constituiu-se uma documentação padrão para permitir caracterizar todos os percursos donde consta uma representação gráfica do trajecto efectuado.

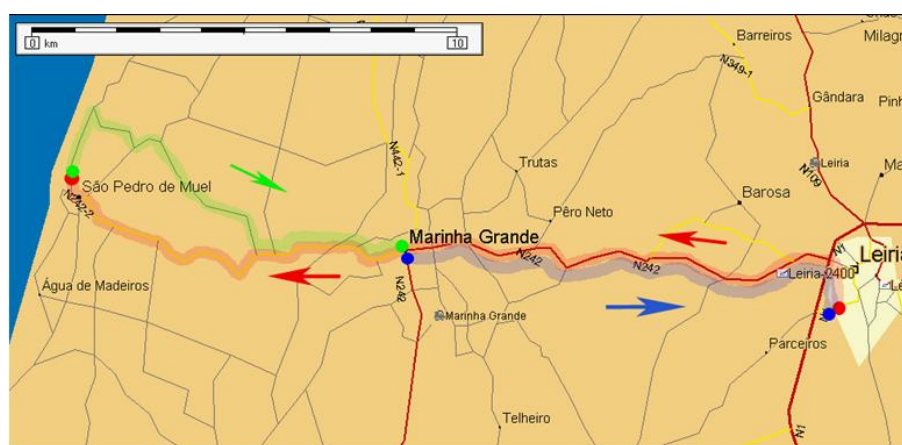


Figura 6.33 Representação do percurso nº 4, 5 e 6

6.3.2. Caracterização dos passageiros

Conforme procedimento descrito no capítulo cinco, foram recolhidas as principais características dos passageiros. A sua caracterização encontra-se resumida na tabela 6.8.

Pode constatar-se que as características dos painéis de avaliadores nalguns percursos são idênticas, porquanto se aproveitou a viagem de ida e de regresso para obter, pelo menos, duas avaliações distintas.

Obtiveram-se um total de 530 avaliações subjectivas, sendo 56,6% expressas por pessoas do género feminino e 43,4% do género masculino. O número máximo de passageiros por percurso foi de 46 pessoas num autocarro de turismo com capacidade para 51 pessoas, enquanto que o valor mínimo, somente com oito passageiros ocorreu num mini-autocarro com capacidade para 25 passageiros. Estão também indicados na mesma tabela os valores do índice de isolamento do vestuário estimados durante as viagens, que foram posteriormente utilizados para a avaliação do *PPD* relativo ao ambiente térmico.

A idade média dos passageiros foi de 23,8 anos, com uma altura média de 170,2 centímetros e 66,9 kg de peso médio. A média de idades dos passageiros em cada percurso oscilou entre um máximo de 33,8 e um mínimo de 20,7 anos.

Percurso nº	Nº de passageiros	Género		Idade [anos]		Altura [cm]		Peso [kg]		I_{cl} [clo]	
		Masc.	Fem.	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	17	4	13	21,6	5,5	166,8	5,9	59,5	9,5	0,5	0,1
2	17	4	13	21,6	5,5	166,8	5,9	59,5	9,5	0,5	0,1
3	17	4	13	21,6	5,5	166,8	5,9	59,5	9,5	0,5	0,1
4	11	10	1	20,7	3,4	175,5	5,3	68,7	12,4	0,8	0,2
5	11	10	1	20,7	3,4	175,5	5,3	68,7	12,4	0,8	0,2
6	11	10	1	20,7	3,4	175,5	5,3	68,7	12,4	0,8	0,2
7	11	9	2	33,8	8,2	171,5	6,4	73,7	12,7	1,0	0,2
8	11	9	2	33,8	8,2	171,5	6,4	73,7	12,7	1,0	0,2
9	13	10	3	25,0	3,0	172,6	9,6	73,5	12,5	1,0	0,2
10	13	10	3	25,0	3,0	172,6	9,6	73,5	12,5	1,0	0,2
11	13	10	3	25,0	3,0	172,6	9,6	73,5	12,5	1,0	0,2
12	8	5	3	21,0	2,3	169,9	12,5	66,1	19,4	0,5	0,2
13	8	5	3	21,0	2,3	169,9	12,5	66,1	19,4	0,5	0,2
14	10	10	0	24,0	1,9	175,7	7,1	75,9	10,7	0,5	0,1
15	10	10	0	24,0	1,9	175,7	7,1	75,9	10,7	0,5	0,1
16	12	11	2	26,8	8,0	175,4	7,1	74,3	12,3	0,4	0,1
17	12	11	2	26,8	8,0	175,4	7,1	74,3	12,3	0,4	0,1
18	13	11	2	26,6	7,9	174,9	8,0	69,8	6,9	0,4	0,1
19	13	11	2	26,6	7,9	174,9	8,0	69,8	6,9	0,4	0,1
20	14	2	12	22,2	2,3	163,2	5,7	61,5	12,7	0,3	0,1
21	14	2	12	22,2	2,3	163,2	5,7	61,5	12,7	0,3	0,1
22	14	2	12	22,2	2,3	163,2	5,7	61,5	12,7	0,3	0,1
23	14	2	12	22,2	2,3	163,2	5,7	61,5	12,7	0,3	0,1
24	16	1	15	21,6	1,8	165,4	6,3	59,9	9,4	1,0	0,1
25	18	3	15	22,8	6,0	166,7	7,3	61,6	10,2	1,0	0,1
26	46	7	39	21,1	4,8	165,0	7,2	58,8	9,8	0,8	0,2
27	46	7	39	21,1	4,8	165,0	7,2	58,8	9,8	0,8	0,2
28	45	7	38	21,0	4,8	165,1	7,2	58,9	9,9	0,8	0,2
29	44	7	37	21,0	4,9	165,2	7,3	59,0	10,0	0,8	0,2
30	14	13	1	26,4	8,7	176,1	7,3	73,2	9,2	0,4	0,1
31	14	13	1	26,4	8,7	176,1	7,3	73,2	9,2	0,4	0,1
Total	530	230	302	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	-	-	-	23,8	4,7	170,2	7,2	66,9	11,5	0,6	0,1
Desvio padrão	-	-	-	3,4	2,4	4,8	1,8	6,4	2,7	0,3	0,1
Máximo	46	13	39	33,8	8,7	176,1	12,5	75,9	19,4	1,0	0,2
Mínimo	8	1	0	20,7	1,8	163,2	5,3	58,8	6,9	0,3	0,1

Tabela 6.8 Caracterização dos passageiros

6.3.3. Ambiente térmico

O ambiente térmico foi avaliado através de um medidor de conforto térmico de um modo objectivo e de uma escala bipolar pelos passageiros que votavam entre a sensação de muito frio e muito quente (ver Anexo B).

No percurso número dois, realizado no âmbito do projecto Combistress, provocou-se uma brusca alteração no ambiente térmico através do sistema de ar condicionado nos últimos dois minutos de viagem, que conduziu a uma avaliação subjectiva com um nível de desconforto bastante elevado (85,1%), não tendo no entanto correspondência nas medições objectivas. Tal facto deveu-se ao tempo de resposta do equipamento de medição utilizado. Assim, optou-se por não considerar esta viagem durante a análise das relações entre os dados objectivos e subjectivos. A ocorrência deste facto veio ajudar ao estabelecimento do procedimento de ensaios desenvolvido, sugerindo que as condições ambientais não devem sofrer alterações bruscas durante os períodos de avaliação, pois isso pode tornar inviável a comparação entre as avaliações subjectivas e objectivas.

Durante os percursos número oito e nove surgiu uma avaria que conduziu a que não houvesse comunicação entre o medidor de conforto térmico e o sistema de aquisição de dados, não tendo sido possível proceder ao registo da temperatura equivalente durante essas viagens.

Na figura 6.34, apresenta-se a evolução da temperatura equivalente, o seu valor médio e a votação média do nível de desconforto, e respectivos desvios padrões, manifestado pelos passageiros durante os percursos número 1, 2 e 3. A discrepância que surge ao nível da temperatura equivalente e da votação média dos passageiros durante o segundo período de avaliação é resultado da referida alteração no sistema de climatização do autocarro.

Em todos os percursos efectuados, para além da temperatura equivalente, também foram registados os valores da temperatura do ar e da humidade relativa. Assim, apresenta-se na figura 6.35 a evolução da humidade relativa respeitante ao percurso número 12 e 13, a bordo de um mini-autocarro, sendo visível o aumento da humidade relativa no interior do veículo fruto da entrada dos passageiros, tal como o seu decréscimo após a abertura dos sistemas de ventilação lateral e no tecto do veículo.

Realizaram-se viagens com temperaturas equivalentes que apresentaram valores médios entre um mínimo de 14,4 °C (percurso nº 24) e um máximo de 35,2 °C (percurso nº 17). A humidade média dos percursos oscilou entre os 29,6% (percurso nº 22) e 73,4% (percurso nº 6). Estas condições apresentam uma gama de amplitude bastante grande, permitindo obter respostas subjectivas para situações de conforto e de

desconforto, sendo este último provocado, quer por ambientes quentes quer por ambientes frios.

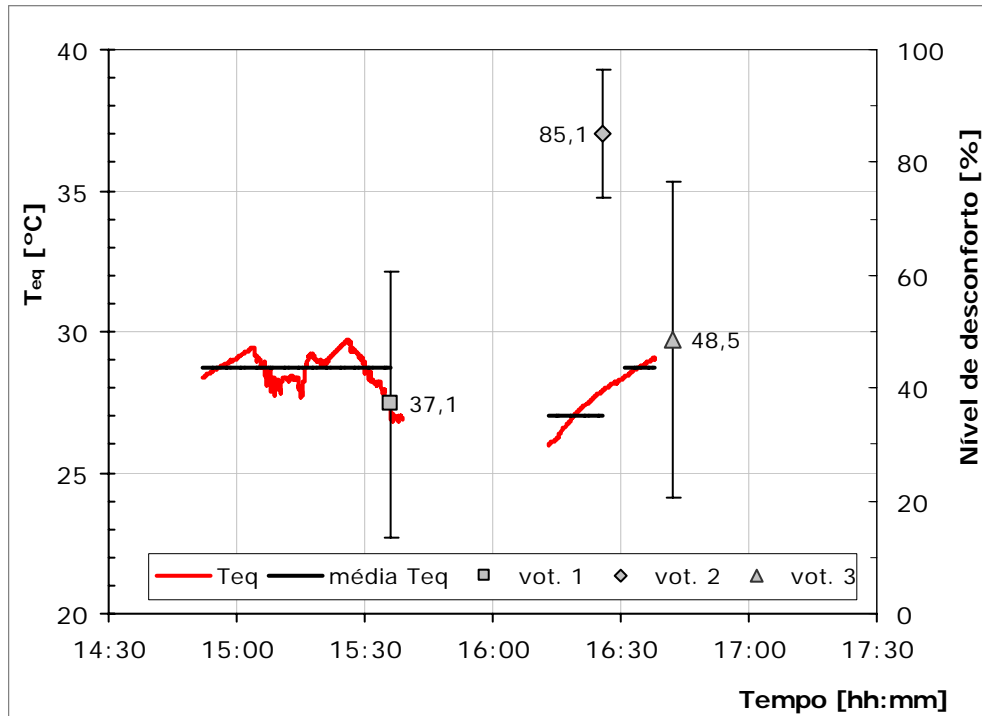


Figura 6.34 Representação da temperatura equivalente e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 1, 2 e 3

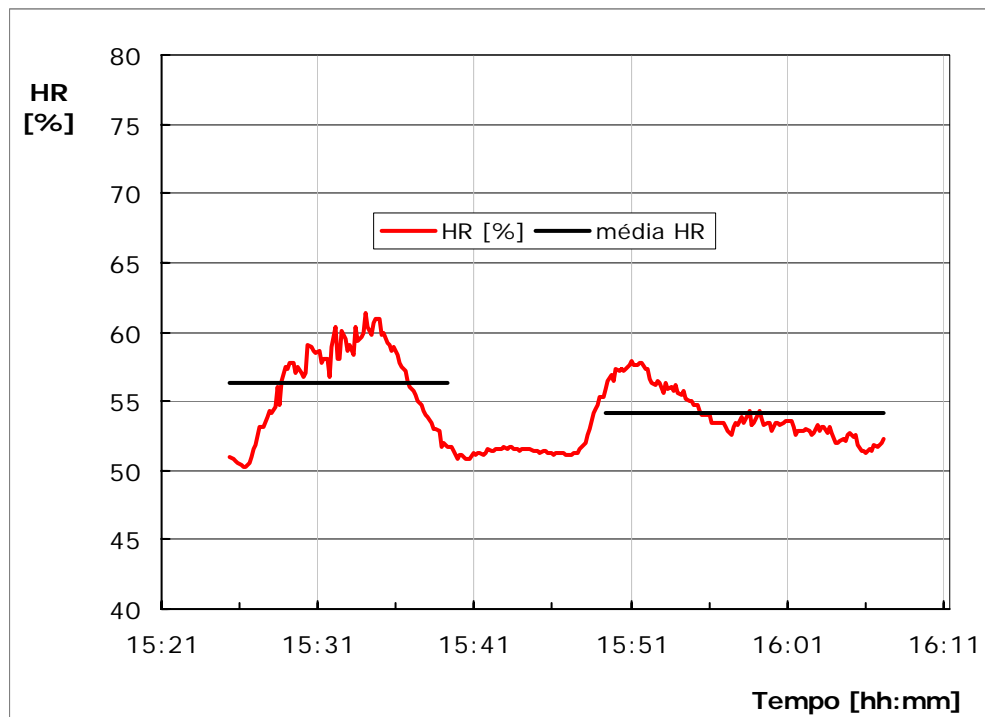


Figura 6.35 Evolução da humidade relativa nos percursos 12 e 13

Na figura 6.34 é visível que a um aumento do nível de desconforto indicado pelos passageiros, corresponde uma diminuição da dispersão das respostas. Nas avaliações efectuadas verificou-se a existência de uma tendência para se obterem menores dispersões nas respostas dos passageiros para níveis de desconforto mais elevados. Esta tendência é visível na figura 6.36, onde se representam as médias do nível de desconforto manifestado, e respectivos desvios padrões, para cada percurso realizado.

Um facto importante a ter em conta é a consideração da média do nível de desconforto numa escala bipolar entre -100 a 100% ou numa escala unipolar de 0 a 100%, de acordo com o índice *PPD*. O valor de *PPD*, apesar de ser vulgarmente apresentado numa escala unipolar também pode ser expresso numa escala bipolar. Para tanto, basta considerar se o valor de *PMV* é negativo ou positivo. Uma vantagem na utilização da escala unipolar é a diminuição da dispersão de dados, pois como se constata na representação da figura 6.37, esta apresenta desvios padrões inferiores à utilização de uma escala bipolar. Um indicador desta dispersão é a média dos desvios padrões obtida, que no caso da escala bipolar foi de 21,8% enquanto que a escala unipolar apresentou um valor médio de 17,4%.

Na tabela 6.9 apresentam-se os valores médios, para cada um dos percursos efectuados, da temperatura equivalente, da humidade relativa, a média da resistência térmica do vestuário, e respectiva avaliação subjectiva nas duas escalas indicadas: unipolar e bipolar. Nesta tabela indicam-se ainda as viagens sobre as quais se actuou no sistema de climatização de modo a serem obtidas condições mais desfavoráveis, sob o ponto de vista térmico. No que diz respeito ao ambiente térmico, os restantes percursos correspondem a viagens em condições normais neste tipo de veículos. Assim, estão indicados com uma seta de cor vermelha os percursos onde se provocaram situações desfavoráveis no sentido de criar ambientes quentes, estando indicados a cor azul os percursos onde se forçaram condições de ambientes frios. As viagens sem condicionamento térmico, designadas de normais, são as que não têm nenhuma indicação na coluna designada de actuação. Assim, os percursos número 2, 13 e 17 correspondem a ambientes quentes forçados, enquanto o percurso número 23 a ambiente frio forçado.

Os valores de humidade relativa obtidos nas viagens em que não houve qualquer tipo de actuação indicam a existência de situações de baixo nível de conforto, com especial incidência nos autocarros de turismo em percursos mais longos com o ar condicionado ligado e nos mini-autocarros em percursos relativamente curtos.

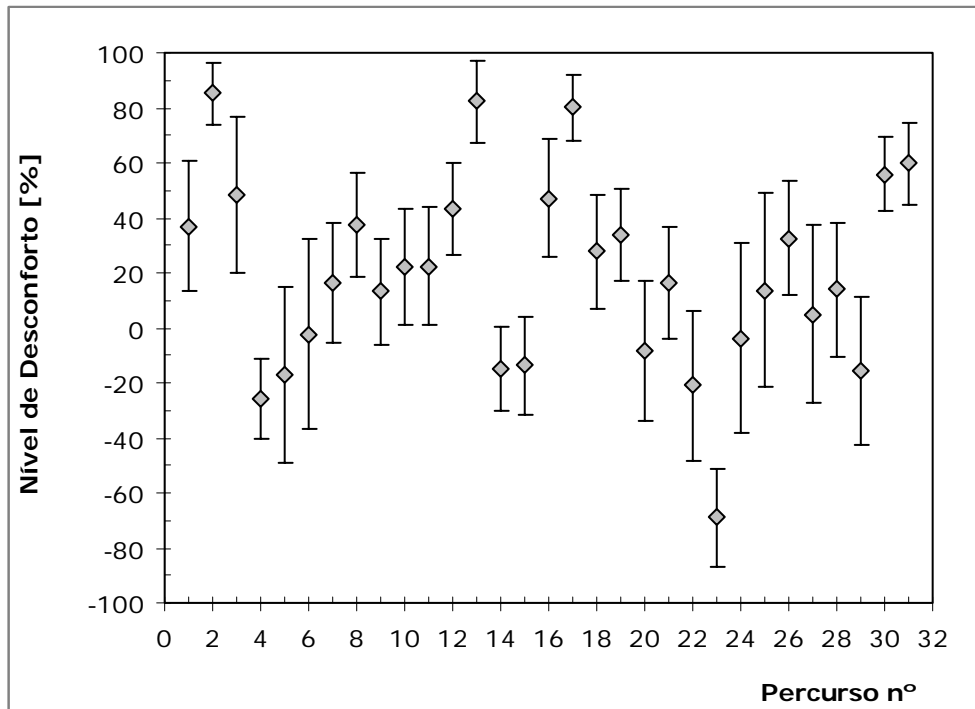


Figura 6.36 Média do nível de desconforto manifestado, e respectivo desvio padrão, relativamente ao ambiente térmico em cada percurso (escala bipolar)

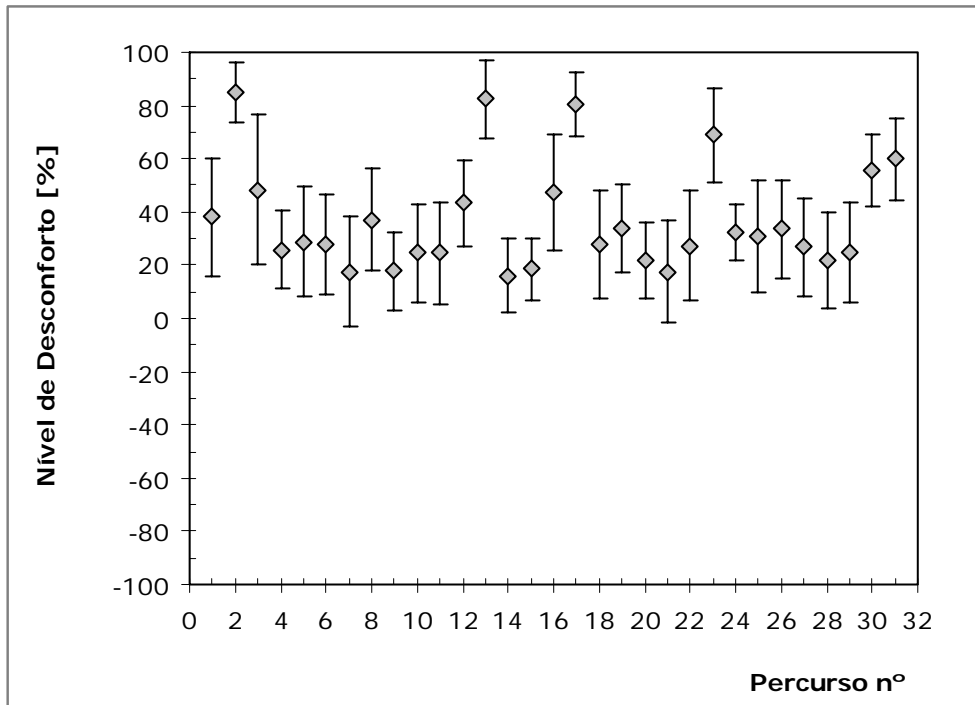


Figura 6.37 Média do nível de desconforto manifestado, e respectivo desvio padrão, relativamente ao ambiente térmico em cada percurso (escala unipolar)





Percurso	T_{eq} [° C]	HR [%]	I_{cl} [clo] (média)	M [met]	Actuação	PMV	PPD unipolar	Nível de desc. [%] (unipolar)	PPD bipolar	Nível de desc. [%] (bipolar)
1	28,7	40,0	0,5	1,1		1,31	40,6	38,0	40,6	37,1
2	27,0	40,3	0,5	1,1		-	-	85,1	-	85,1
3	28,8	38,6	0,5	1,1		1,31	40,9	48,5	40,9	48,5
4	18,0	57,4	0,8	1,1		-1,00	25,9	25,7	-25,9	-25,7
5	17,0	54,3	0,8	1,1		-1,26	38,0	28,9	-38,0	-17,1
6	16,3	73,4	0,8	1,1		-1,34	42,4	27,8	-42,4	-2,4
7	-	47,4	1,0	-		-	-	17,6	-	16,4
8	-	51,4	1,0	-		-	-	37,2	-	37,2
9	22,2	63,9	1,0	1,1		0,31	7,0	17,8	7,0	13,2
10	22,4	64,2	1,0	1,1		0,36	7,7	24,5	7,7	22,2
11	22,7	64,3	1,0	1,1		0,43	8,8	24,5	8,8	22,3
12	29,2	56,3	0,5	1,1		1,58	55,0	43,3	55,0	43,3
13	30,1	54,1	0,5	1,1		1,83	68,5	82,4	68,5	82,4
14	20,5	41,4	0,5	1,1		-1,10	30,7	16,0	-30,7	-15,0
15	21,8	38,0	0,5	1,1		-0,74	16,7	18,5	-16,7	-13,5
16	33,8	44,0	0,4	1,1		2,81	97,9	47,3	97,9	47,3
17	35,2	37,2	0,4	1,1		3,12	99,5	80,3	99,5	80,3
18	29,7	45,8	0,4	1,1		1,60	56,2	27,7	56,2	27,7
19	30,4	46,0	0,4	1,1		1,82	67,8	33,8	67,8	33,8
20	27,1	34,5	0,3	1,1		0,56	11,6	21,7	11,6	-8,4
21	26,2	31,6	0,3	1,1		0,24	6,2	17,6	6,2	16,3
22	23,4	29,6	0,3	1,1		-0,68	14,8	27,2	14,8	-21,1
23	19,7	30,5	0,3	1,1		-1,89	71,4	69,1	-71,4	-69,1
24	14,4	69,1	1,2	1,1		-1,04	27,9	32,2	-27,9	-3,7
25	18,8	51,9	1,0	1,1		-0,50	10,1	30,8	-10,1	13,7
26	19,6	68,0	0,8	1,1		-0,58	12,1	33,8	-12,1	32,5
27	22,3	46,6	0,8	1,1		-0,03	5,0	26,8	-5,0	5,0
28	21,9	64,4	0,8	1,1		-0,01	5,0	21,5	-5,0	14,0
29	21,3	58,5	0,8	1,1		-0,20	5,9	24,8	-5,9	-15,8
30	33,8	34,2	0,4	1,1		2,68	96,5	55,6	96,5	55,6
31	33,7	35,8	0,4	1,1		2,68	96,4	59,8	96,4	59,8

Tabela 6.9 Resumo das avaliações objectivas e subjectivas relativamente ao ambiente térmico

Com base na temperatura equivalente média de cada um dos percursos, e através de um aplicativo em Excel, tal como referenciado no capítulo anterior, procedeu-se à

obtenção dos valores dos índices *PMV* e *PPD*, que também estão apresentados na anterior tabela, para cada viagem, com excepção das já citadas viagens número dois, sete e oito, validando-se assim um total de 28 percursos e 491 respostas dos passageiros para analisar as relações entre as medições objectivas e subjectivas. Ao valor da resistência térmica do vestuário avaliado foram acrescentados 0,2 clo devido à influência do assento. O nível de actividade metabólica representativo e, de acordo com a bibliografia para a situação em análise, ou seja, passageiros de veículos, oscila entre 1,0 e 1,2 met, enquanto que para uma actividade de condução é estimado entre 1,2 e 1,6 met. Em todos os ensaios optou-se pela utilização do valor de 1,1 met como representativo do nível de actividade metabólica dos passageiros.

Uma primeira comparação entre grandezas objectivas e subjectivas pode ser feita baseada na grandeza de conforto térmica medida (T_{eq}), em virtude do valor da resistência térmica do vestuário utilizado durante as medições não apresentar grandes oscilações relativamente ao apurado posteriormente nos questionários. Assim, na figura 6.38 apresenta-se um comparativo entre este índice do ambiente térmico e a resposta subjectiva numa escala bipolar.

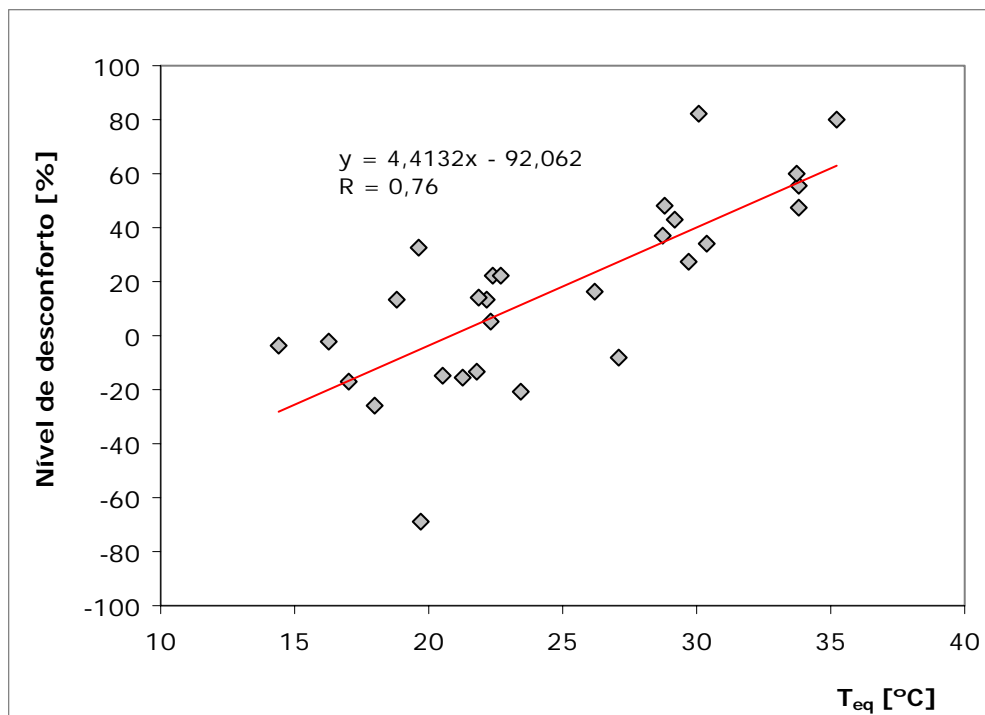


Figura 6.38 Nível de desconforto em função da T_{eq} média de cada percurso

Na figura 6.39, apresenta-se o nível de desconforto em função do índice *PPD*, bem como a respectiva função de aproximação, que consiste num polinómio de segundo grau, obtendo-se níveis de correlação entre ambos de 0,90. Através da função de aproximação

assim obtida, pode concluir-se que a utilização do índice *PPD* sobrestima um nível de desconforto ligeiramente superior ao indicado pelos passageiros, devendo pois ser corrigida por esta expressão. Esta discrepância aumenta à medida que o nível de desconforto aumenta.

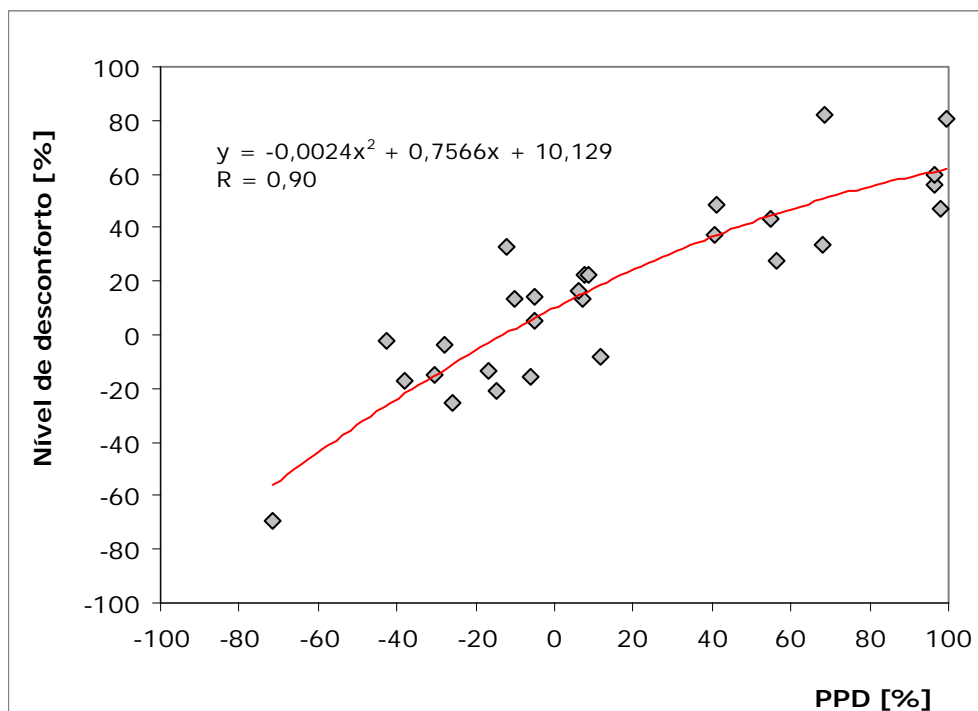


Figura 6.39 Nível de desconforto (escala bipolar) em função do *PPD* de cada percurso

Uma representação semelhante à descrita pode ser feita considerando uma avaliação subjectiva numa escala unipolar em vez da escala bipolar encontrando-se representada sob a forma gráfica na figura 6.40, com a indicação da função matemática que melhor aproxima os dados obtidos. Também aqui se verifica que a avaliação do ambiente térmico através do índice *PPD* de acordo com a metodologia desenvolvida, sobrestima o nível de desconforto médio manifestado pelos passageiros recomendando-se a sua correcção através da função linear obtida.

Os valores de correlação obtidos através da utilização da escala bipolar, na avaliação do nível de desconforto dos passageiros, são superiores aos obtidos utilizando uma escala unipolar. A escala bipolar, como anteriormente foi referido, apresenta a desvantagem de aumentar a dispersão do nível de desconforto médio dos passageiros.

Face aos resultados apresentados, pode concluir-se que a metodologia de avaliação objectiva efectuada apresenta uma boa concordância com a opinião média dos passageiros, recomendando-se a sua utilização na avaliação neste tipo de ambientes.

A metodologia que foi desenvolvida, apesar de ser anterior à da publicação da norma ISO 14505-3 (2006), cumpre os critérios estabelecidos na mesma, podendo relativamente ao conforto térmico dos veículos, ser feita uma análise, baseada nesta norma. Na tabela 6.10 apresenta-se o resultado dessa análise, onde é utilizada a escala bipolar, com a indicação dos critérios estabelecidos na norma que foram descritos na secção 4.2.3.4 desta dissertação.

Em 45,2% das viagens efectuadas, o ambiente foi considerado desconfortável sob o ponto de vista térmico. No entanto, há que ter em conta que em quatro destas viagens houve uma actuação externa para promover esse mesmo desconforto térmico. Face às avaliações obtidas, o habitáculo destes veículos podem ser otimizados relativamente ao ambiente térmico, especialmente os mini-autocarros.

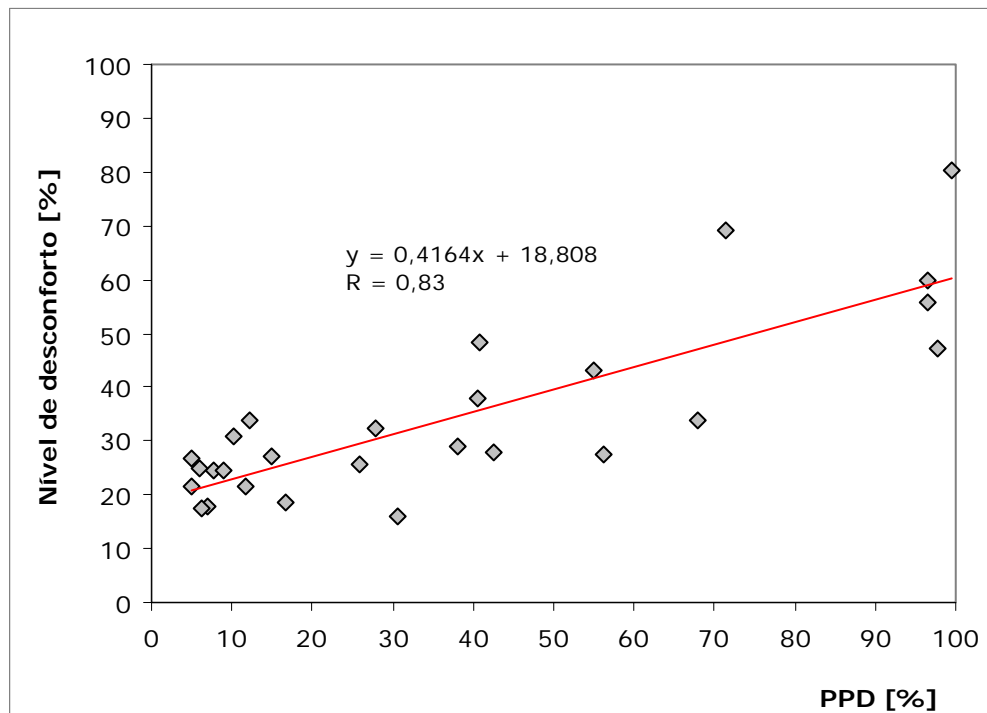


Figura 6.40 Nível de desconforto (escala unipolar) em função do PPD de cada percurso

Percurso n°	N° passageiros	Avaliação média Nível de desc. > 26,1%	37,5% dos passageiros	N° de passageiros com nível de desc. > 76,8%	Avaliação individual	Avaliação global
1	17	Não confortável	6	0	Confortável	Não confortável
2	17	Não confortável	6	13	Não confortável	Não confortável
3	17	Não confortável	6	3	Confortável	Não confortável
4	11	Confortável	4	0	Confortável	Confortável
5	11	Confortável	4	0	Confortável	Confortável
6	11	Confortável	4	0	Confortável	Confortável
7	11	Confortável	4	0	Confortável	Confortável
8	11	Não confortável	4	1	Confortável	Não confortável
9	13	Confortável	5	0	Confortável	Confortável
10	13	Confortável	5	0	Confortável	Confortável
11	13	Confortável	5	0	Confortável	Confortável
12	8	Não confortável	3	0	Confortável	Não confortável
13	8	Não confortável	3	5	Não confortável	Não confortável
14	10	Confortável	4	0	Confortável	Confortável
15	10	Confortável	4	0	Confortável	Confortável
16	12	Não confortável	5	1	Confortável	Não confortável
17	12	Não confortável	5	9	Não confortável	Não confortável
18	13	Não confortável	5	0	Confortável	Não confortável
19	13	Não confortável	5	0	Confortável	Não confortável
20	14	Confortável	5	0	Confortável	Confortável
21	14	Confortável	5	0	Confortável	Confortável
22	14	Confortável	5	0	Confortável	Confortável
23	14	Não confortável	5	6	Não confortável	Não confortável
24	16	Confortável	6	0	Confortável	Confortável
25	18	Confortável	7	0	Confortável	Confortável
26	46	Não confortável	17	0	Confortável	Não confortável
27	46	Confortável	17	0	Confortável	Confortável
28	45	Confortável	17	0	Confortável	Confortável
29	44	Confortável	17	0	Confortável	Confortável
30	14	Não confortável	5	0	Confortável	Não confortável
31	14	Não confortável	5	2	Confortável	Não confortável

Tabela 6.10 Avaliação do desconforto térmico nos percursos realizados de acordo com a norma ISO 14505-3

6.3.4. Vibrações

No caso do estudo das vibrações, utilizou-se como descritor objectivo o valor da vibração total (a_v), definido na equação (4.16). Nas avaliações subjectivas foram utilizados os dados recolhidos nos questionários de votação do painel de avaliadores na escala unipolar contínua, definida desde a sensação de neutralidade até à sensação de muito desconfortável.

Através da aplicação informática desenvolvida para a aquisição e análise das vibrações foi possível representar as evoluções ao longo do tempo, quer das componentes da aceleração segundo os três eixos ortogonais, quer do módulo resultante, a vibração total. Assim, apresenta-se na figura 6.41 a evolução de a_v ao longo do tempo de ensaio nos percursos 4, 5 e 6. Nesta representação gráfica, indica-se também, o nível de desconforto médio indicado pelos passageiros.

Na figura 6.42 apresenta-se um modo alternativo de representar graficamente a evolução da vibração total, o qual consiste na sua adimensionalização através da equação 4.4, tendo como referência a aceleração mínima à qual o corpo humano é sensível. Os valores indicados dizem respeito aos percursos 20 e 21.

O valor mínimo de vibração total instantânea medido ocorreu num autocarro de turismo em funcionamento e imobilizado, tendo sido registado um valor de $0,0039 \text{ ms}^{-2}$, ao qual correspondem 95,9 dB. Por seu lado, o valor máximo registado nos diversos percursos foi de $3,06 \text{ ms}^{-2}$, ao qual correspondem 129,7 dB, tendo sido obtido em condições consideradas extremas relativamente às vibrações induzidas aos passageiros.

Apenas em três percursos realizados não foram recolhidos dados objectivos relativos à vibração devido a anomalias que ocorreram e que se deveram a problemas ao nível da alimentação eléctrica dos equipamentos causados pelas oscilações ocorridas no pavimento dos veículos, local onde estavam colocadas as respectivas baterias de alimentação.

De todas as viagens realizadas obtiveram-se valores de vibração total compreendidos entre um mínimo de $0,29 \text{ ms}^{-2}$ e um máximo de $2,25 \text{ ms}^{-2}$, permitindo assim obter registos de viagens, que de acordo com a norma ISO 2631 (1997), sugerem tanto situações de neutralidade como situações que indiciam extremo desconforto. O valor médio de vibração total medido nos autocarros de turismo foi de $0,44 \text{ ms}^{-2}$, enquanto que nos mini-autocarros foi de $0,91 \text{ ms}^{-2}$.

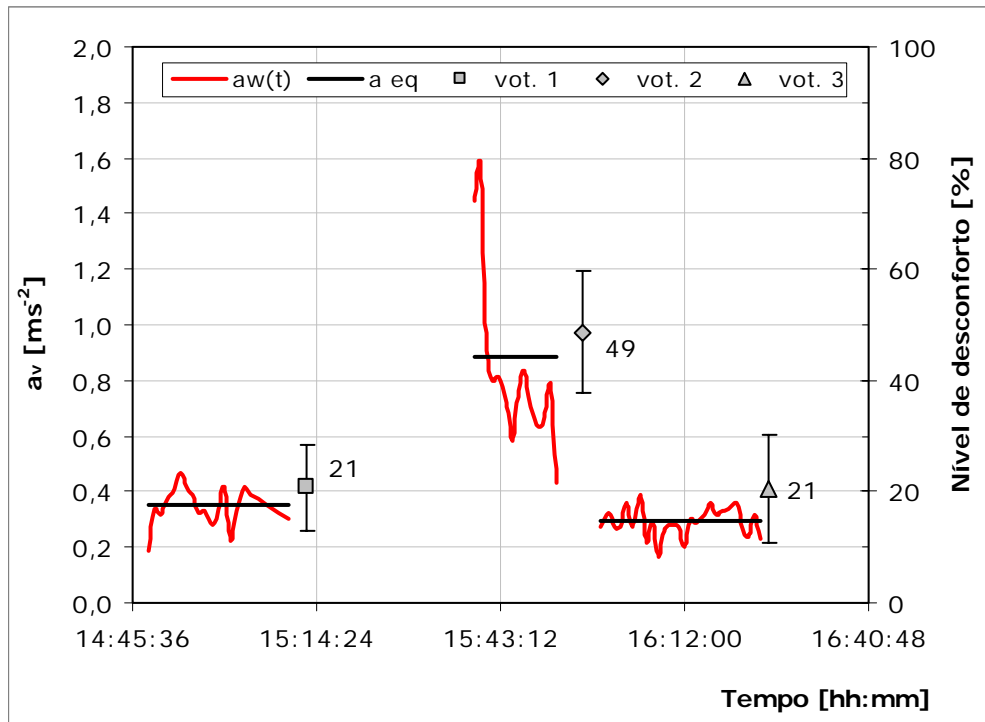


Figura 6.41 Representação da vibração total e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 4, 5 e 6

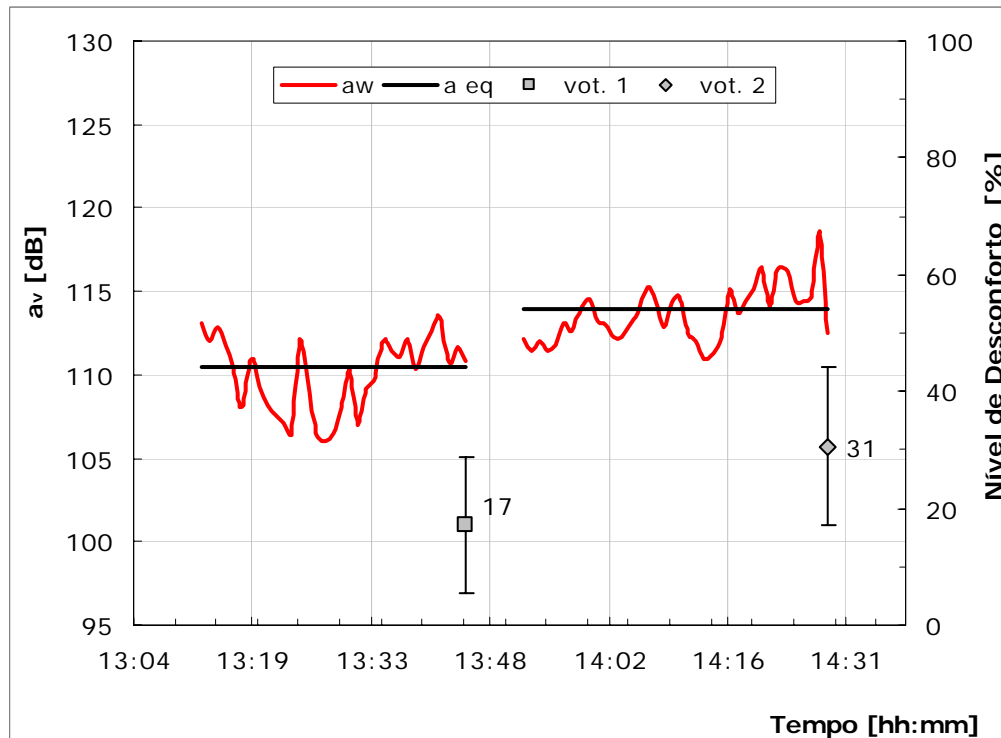


Figura 6.42 Representação da vibração total e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 20 e 21

Os referidos percursos número sete e oito, como já foi mencionado, consistiram nos trajectos com níveis de vibrações mais elevados. Um dado interessante a analisar nestes trajectos é o facto de apesar de o nível de vibração total medido ser superior no percurso número oito, com uma média de $2,25 \text{ ms}^{-2}$, relativamente ao do percurso sete, que apresentou um valor médio de $1,50 \text{ ms}^{-2}$, o nível de desconforto médio manifestado pelos passageiros é mais desfavorável no percurso nº 7 (81%) comparativamente com o percurso nº 8 (77%). Tal facto pode ser justificado através da análise efectuada aos valores do factor de crista das vibrações apresentados nas tabelas 6.11 e 6.12. Nestas, pode verificar-se que os valores mais elevados do factor de crista ocorreram durante o percurso nº 7, sugerindo a existência de um carácter mais impulsivo das vibrações às quais os passageiros estiveram submetidos.

Hora	X	Y	Z
12:52	7,81	9,23	3,86
12:53	7,20	4,13	7,65
12:54	16,07	8,97	6,49
12:55	11,18	4,64	5,70
12:56	3,84	2,16	3,14
12:57	7,95	7,22	5,19
12:58	5,65	7,22	5,06
12:59	4,80	2,39	3,72
13:00	5,07	2,51	3,78
13:01	10,29	4,76	8,74
13:02	11,19	7,52	5,77
13:03	6,67	8,39	5,45
Média	8,14	5,76	5,38

Tabela 6.11 Evolução temporal do factor de crista durante o percurso nº 7

Hora	X	Y	Z
13:12	2,33	2,34	2,19
13:13	11,39	5,36	14,10
13:14	6,98	5,35	5,25
13:15	4,81	2,73	1,68
13:16	3,48	2,54	2,75
13:17	2,97	2,52	2,46
13:18	3,39	3,25	2,61
13:19	5,47	2,96	2,38
13:20	3,41	2,58	3,12
13:21	7,50	6,35	3,20
13:22	7,02	3,11	3,36
Média	5,34	3,55	3,92

Tabela 6.12 Evolução temporal do factor de crista durante o percurso nº 8

Tendo por base o percurso nº 8, que apresentou os níveis mais elevados de vibrações induzidas aos passageiros, é notória a influência que o eixo Z teve no valor da vibração total. Esta conclusão baseia-se nos resultados apresentados nas figuras 6.43 e 6.44, onde estão indicados os espectros, em bandas de terços de oitava, lineares e ponderados para os diversos eixos ortogonais. Comparando os respectivos espectros é visível o efeito da ponderação nos eixos X e Y na gama de frequências (0,5 a 2 Hz) às quais as pessoas são mais sensíveis, bem como no eixo Z entre os 4 e os 10 Hz. As vibrações segundo X e Y nas frequências superiores aos 8 Hz, tal como resulta da figura 6.44, sofrem uma forte atenuação relativamente à sensibilidade do corpo humano, tendo pouca influência no valor final de aceleração segundo estes eixos. No que diz respeito ao eixo Z, e tal como a curva de ponderação de w_k indica, para além da gama de frequências anteriormente indicadas, o valor de aceleração neste eixo é bastante influenciado na gama de frequências entre 0,5 e 16 Hz.

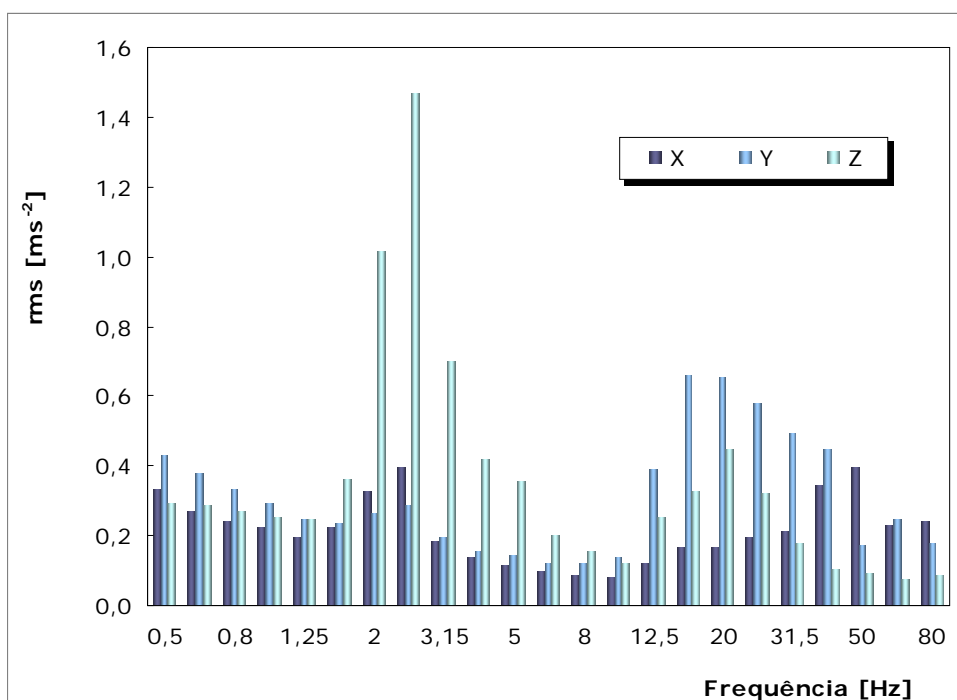


Figura 6.43 Espectro linear das vibrações durante o percurso nº 8

A média das respostas subjectivas, bem como os respectivos desvios padrões estão graficamente representadas na figura 6.45, sendo a média dos desvios padrões de 14,2%. A dispersão das respostas dos passageiros é ligeiramente inferior à que foi obtida para a avaliação do ambiente térmico, considerando uma escala unipolar (17,4%), não se verificando a tendência referida para o ambiente térmico onde, para níveis de desconforto médios mais elevados, esta dispersão tendia a diminuir.

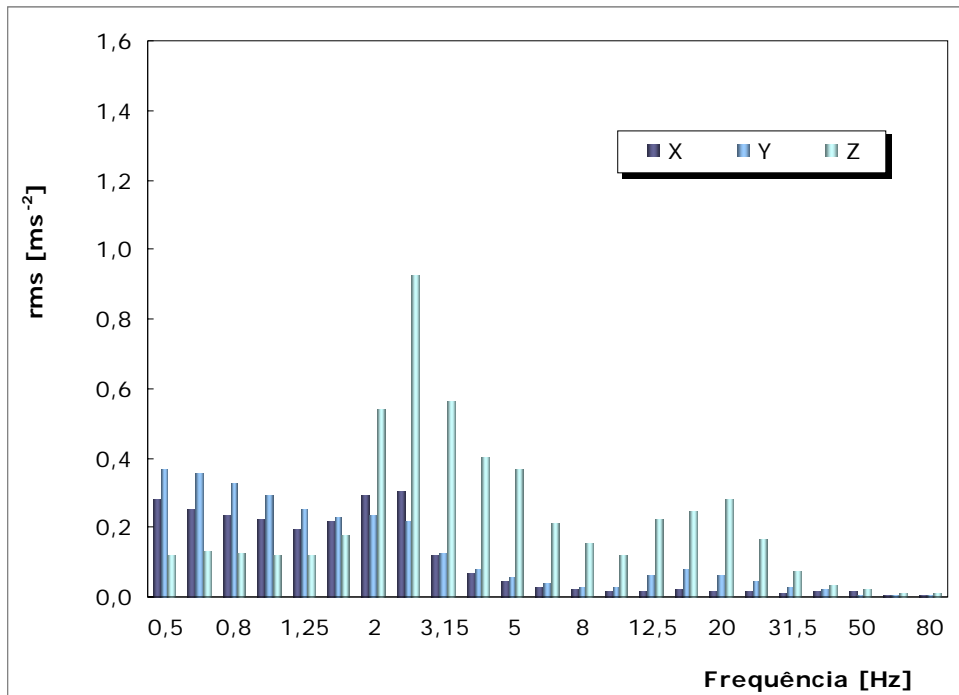


Figura 6.44 Espectro ponderado das vibrações durante o percurso n° 8

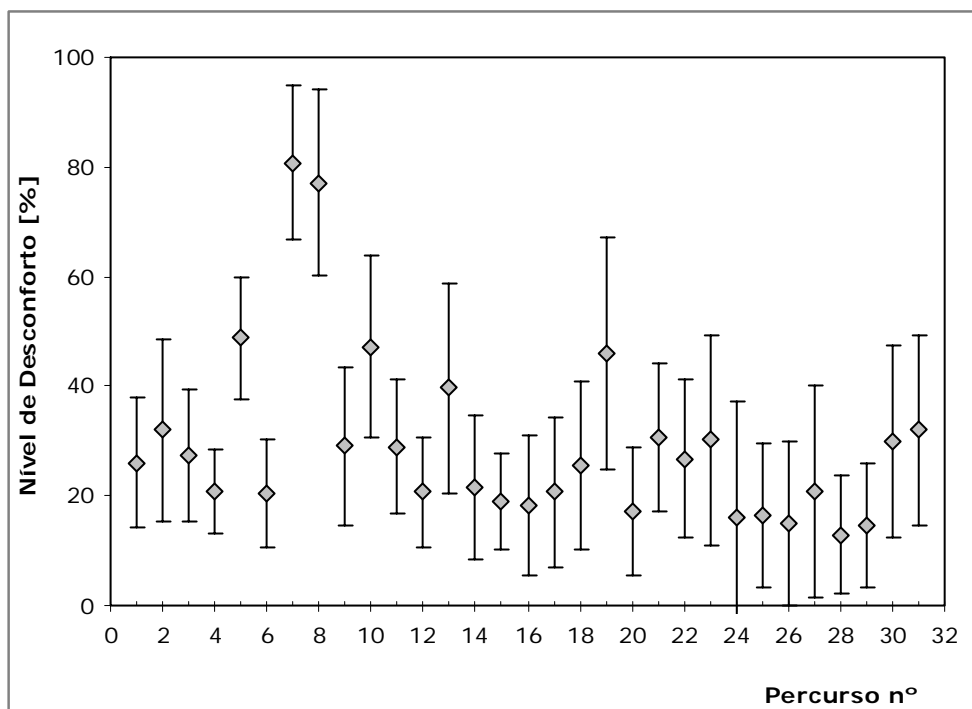


Figura 6.45 Média do nível de desconforto manifestado, e respectivo desvio padrão, relativamente às vibrações em cada percurso

Uma primeira relação entre as medições objectivas e as avaliações subjectivas consiste na comparação entre o valor da vibração total e a média do nível de desconforto

manifestado pelos passageiros (ver figura 6.46). A expressão representada tem uma evolução logarítmica, o que vai de encontro à lei de Fechner.

A metodologia escolhida para efectuar a comparação dos dados objectivos com os dados subjectivos, consistiu na obtenção do coeficiente de correlação entre o nível de desconforto médio indicado pelos passageiros e o valor de aceleração medido através da transposição deste último para uma escala de desconforto entre 0 e 100%, designando-se de *NDVobj* (*Nível de Desconforto Vibracional objectivo*). Assim, converteu-se a escala de desconforto proposta na norma em níveis percentuais de acordo com o indicado na figura 6.47, ou seja, relacionaram-se os valores de vibração total com uma escala de 0 a 100, onde o valor máximo corresponde a $3,0 \text{ ms}^{-2}$, sendo esta dividida de acordo com os valores indicados na tabela 4.1. A selecção do valor correspondente ao nível de 100%, foi baseado no valor mais elevado obtido na totalidade dos ensaios, em virtude de o mesmo ter sido representativo de condições extremas ao nível das vibrações. A representação gráfica desta conversão da escala de desconforto da norma ISO 2631 encontra-se na figura 6.48, com a respectiva função matemática utilizada para a conversão dos valores obtidos em ms^{-2} para valores de *NDVobj*.

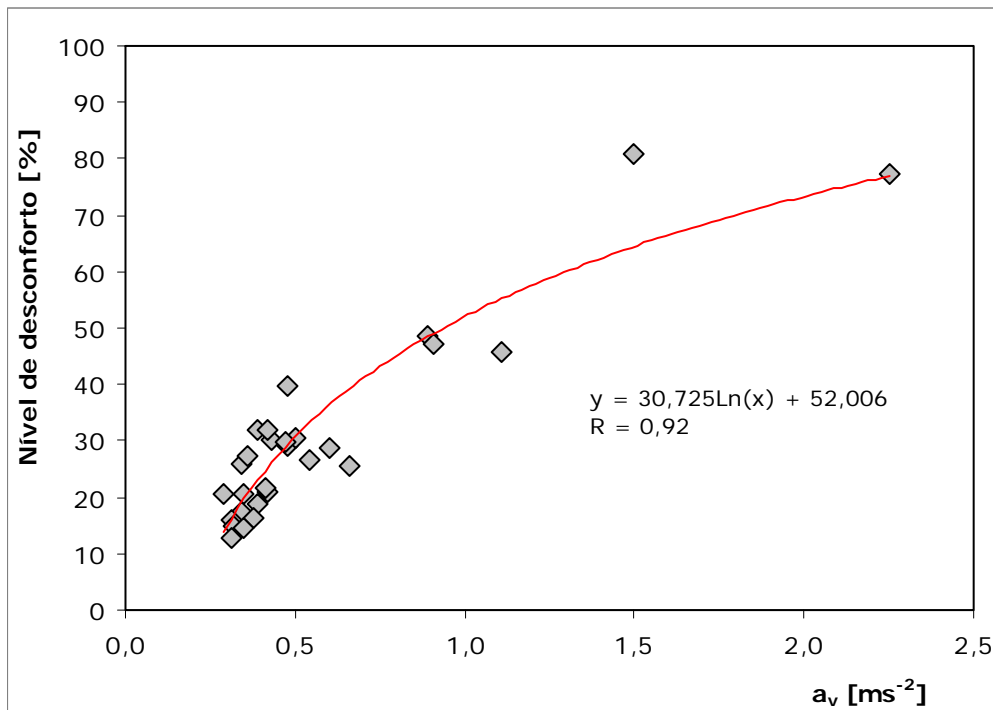


Figura 6.46 Nível de desconforto em função da vibração total média de cada percurso

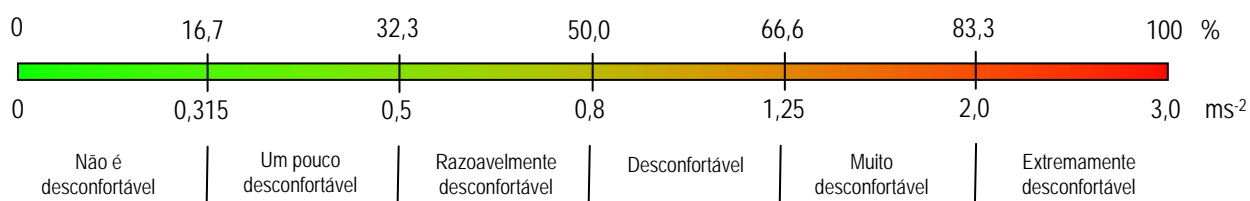


Figura 6.47 Escala de conversão da vibração total de ms^{-2} numa escala contínua entre 0 e 100%

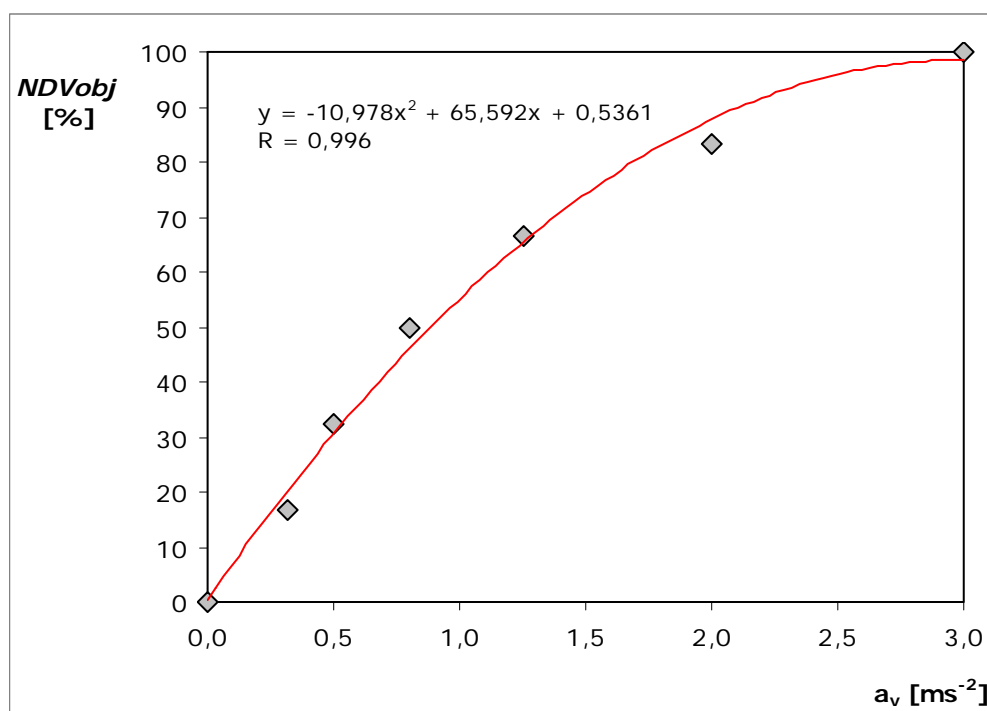


Figura 6.48 Conversão da vibração total de ms^{-2} para uma escala contínua entre 0 e 100%

Na figura 6.49 apresenta-se o resultado da comparação dos valores objectivos medidos, após a sua conversão para *NDVobj*, com a resposta subjectiva do nível de desconforto dos passageiros. Verifica-se que existe uma relação aproximadamente linear entre ambas as grandezas representadas, com o nível de desconforto obtido através da norma a sobrestimar ligeiramente o valor indicado pelos passageiros. É visível a pequena dispersão de resultados entre as medições objectivas e subjectivas, indicando boa concordância entre ambos, como já foi referido.

Analisando as correlações obtidas em função do tipo de veículo, os valores obtidos são bastante próximos, com um valor de 0,89 para os autocarros de turismo e uma correlação ligeiramente superior para os mini-autocarros (0,91).

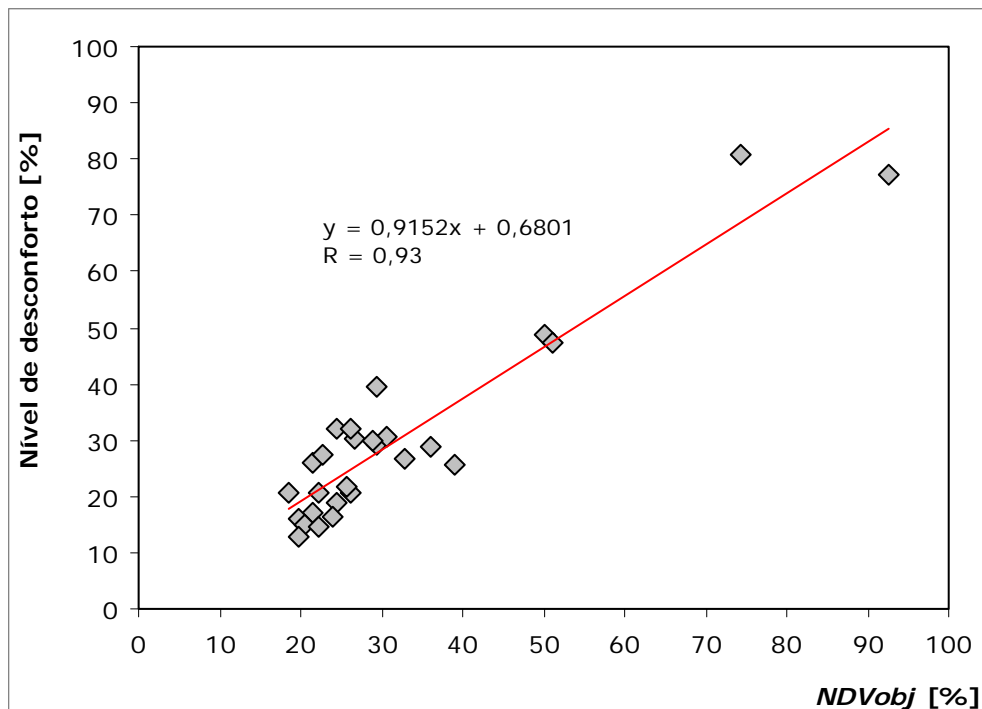


Figura 6.49 Nível de desconforto em função do índice NDV_{obj}

Efectuou-se uma análise relativamente à resposta das pessoas em função das suas posições no autocarro, verificando-se uma ligeira tendência para que os passageiros que estão na parte traseira dos autocarros manifestassem um nível mais elevado de desconforto, relativamente às vibrações. Esta tendência tornou-se mais evidente nos percursos mais severos anteriormente indicados, ou seja, com estímulos de magnitude mais elevada.

Denota-se pelos valores obtidos que, tal como foi indicado na secção 4.3.4, ainda se pode evoluir bastante em relação ao conforto no interior deste tipo de veículos. Os resultados apresentados mostram que muitos dos autocarros ensaiados sugerem situações de algum desconforto relativamente às vibrações induzidas aos passageiros.

Da análise entre as avaliações objectivas, expressa no índice NDV_{obj} , e o nível de desconforto médio dos passageiros, conclui-se que a escala de desconforto sugerida na norma é uma boa referência, para se medir as vibrações, no que diz respeito a este tipo de veículos. Sugere-se a utilização da metodologia de análise utilizada para uma avaliação dos autocarros relativamente ao nível de desconforto médio provocado pelas vibrações, através da utilização do índice NDV_{obj} corrigido pelo valor do declive da recta indicada na figura 6.49.

6.3.5. Ruído

O ruído no interior dos autocarros foi caracterizado através do nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A, sendo obtido como índice característico para cada percurso efectuado, o nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}). A avaliação subjectiva foi recolhida através da resposta ao questionário em escalas semelhantes às já referidas tendo como limites a neutralidade e o muito ruidoso.

As medições objectivas relativas ao nível de ruído efectuadas durante o projecto Combistress não serão consideradas na análise aqui apresentada em virtude de a metodologia de medição bem como os equipamentos terem sido distintos dos adoptados nos outros percursos. No entanto, as avaliações subjectivas são válidas, porquanto as mesmas respeitaram o mesmo procedimento de ensaio.

Dos percursos validados obtiveram-se valores de L_{Aeq} entre um mínimo de 66,0 dB(A) que correspondeu ao percurso número 14 efectuado num autocarro de turismo e o máximo de 81,2 dB(A), correspondente ao percurso 31. O valor máximo aqui indicado foi obtido através da utilização de um sistema descrito no capítulo anterior para incrementar o ruído no interior dos autocarros. Não considerando este valor como representativo de viagens típicas nos veículos utilizados, o valor de L_{Aeq} máximo registado ocorreu no percurso número 29 a bordo de um mini-autocarro com um valor de 77,4 dB(A).

De todas as grandezas físicas consideradas como factor de estímulo de desconforto ambiental, o ruído é aquela que apresenta maiores oscilações no interior dos autocarros, podendo o posicionamento do local de medição ser afectado por campos de distribuição de pressão sonora localizados, tais como seja a conversação entre passageiros ou a proximidade de aberturas existentes no habitáculo, entre outras.

Na figura 6.50 apresenta-se a evolução temporal do nível de pressão sonora e do nível sonoro contínuo equivalente, integrado desde o início do percurso até ao momento representado, para os percursos 30 e 31. Também está indicado nesta figura o nível de desconforto acústico médio manifestado pelos passageiros, bem como o respectivo desvio padrão. O percurso nº 31 apresenta um nível de pressão sonora bastante elevado, fruto da introdução do ruído gerado pelo motor no sistema de som do próprio veículo, com o correspondente aumento da média do nível de desconforto votado pelos passageiros.

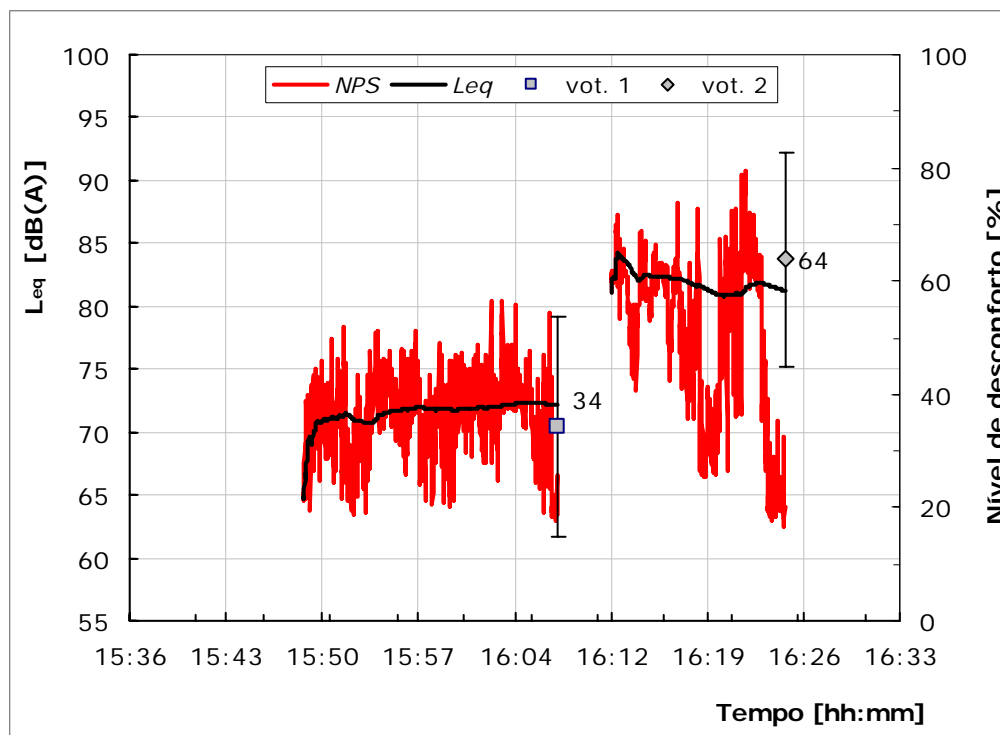


Figura 6.50 Representação do nível de pressão sonora, do nível sonoro contínuo equivalente e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 30 e 31

Considerando todas as avaliações objectivas validadas com excepção do já referido percurso nº 31, e por comparação com os valores limite de ruído no interior de veículos pesados de passageiros indicados na norma NP 1674 aplicado ao tipo de viagens efectuadas, em cerca de 20% dos percursos efectuados o nível sonoro contínuo equivalente medido foi superior a 75 dB(A). Efectuando a mesma comparação com os limites da norma italiana CUNA 504-02, em cerca de 70% dos percursos realizados, o limite foi ultrapassado. Esta constatação vem reforçar a necessidade, já indicada, de que a norma portuguesa deve ser revista.

Os resultados médios obtidos das avaliações objectivas não apresentam diferenças significativas entre ambos os tipos de veículos utilizados. Apesar dos motores que equipam os mini-autocarros terem uma dimensão bastante inferior ao dos autocarros de turismo, eles têm a desvantagem da carroçaria ser feita de modo a que o isolamento acústico do seu habitáculo é consideravelmente inferior ao dos autocarros de turismo.

Na figura 6.51, de um modo análogo ao que tem vindo a ser apresentado para as outras grandezas, representa-se o valor médio de desconforto indicado pelos passageiros, bem como o respectivo desvio padrão, para cada viagem efectuada. A média da dispersão obtida é ligeiramente superior à interiormente indicada para as vibrações, apresentando um valor de 16,3%.

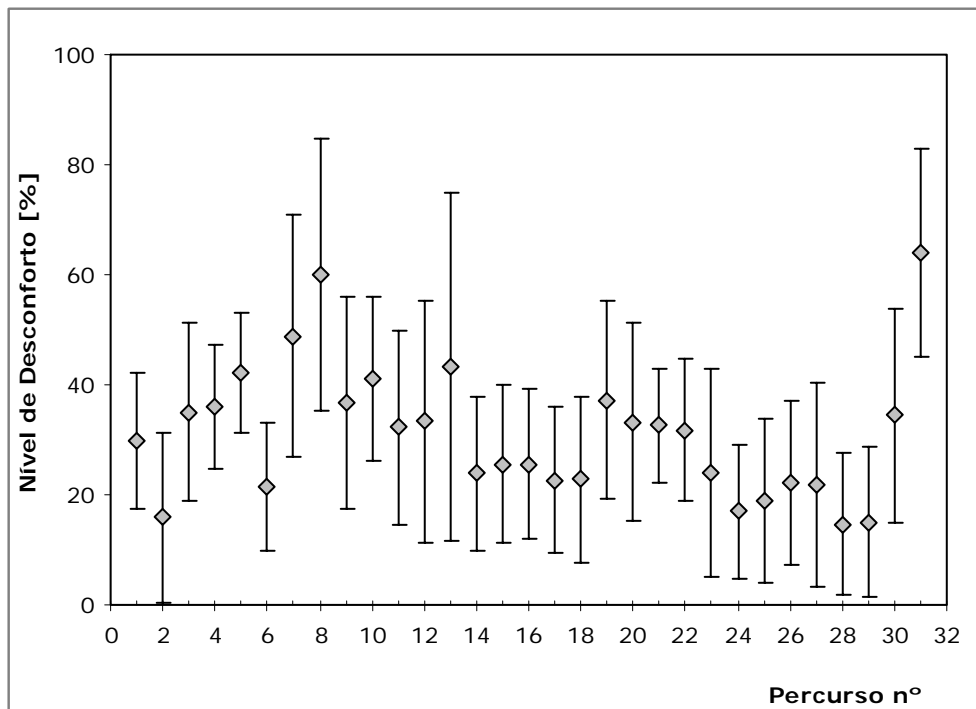


Figura 6.51 Média do nível de desconforto manifestado, e respectivo desvio padrão, relativamente ao ruído em cada percurso

A comparação directa entre os valores de L_{Aeq} obtidos com o nível de desconforto indicado pelos passageiros apresenta-se na figura 6.52. Na comparação entre estas grandezas apenas se validaram os percursos sobre os quais existe uma garantia de que as leituras não sofreram nenhum efeito de campos de pressão sonora localizados.

Face à referida ausência de índices normalizados para relacionar o nível de desconforto acústico no interior de veículos com o nível de pressão sonora, experimentaram-se as abordagens sugeridas por Clausen *et al.* (1993) bem como uma sugestão de Onusic que obteve uma expressão para relacionar o nível de pressão sonora com o índice de articulação no interior de veículos, utilizando este último como índice de desconforto acústico. Qualquer uma destas abordagens apresentou piores resultados face à utilização da relação obtida na secção 6.2.3, relativa ao desenvolvimento de um índice de desconforto para o ruído no interior dos autocarros, considerando apenas o nível de pressão sonora ponderado pela curva A. Apesar da expressão final obtida (equação 6.1), indicar como variáveis independentes o nível de pressão sonora ponderado pela curva A, o índice de articulação, a sonoridade e a agudez dos sons, face à metodologia que vinha sendo seguida neste tipo de ensaios, a única grandeza disponível é o nível de pressão sonora. Na figura 6.53 apresenta-se a relação obtida, para os percursos validados, entre o nível de desconforto acústico manifestado pelos passageiros em função do nível de desconforto obtido a partir do nível de pressão sonora ponderado pela curva A.

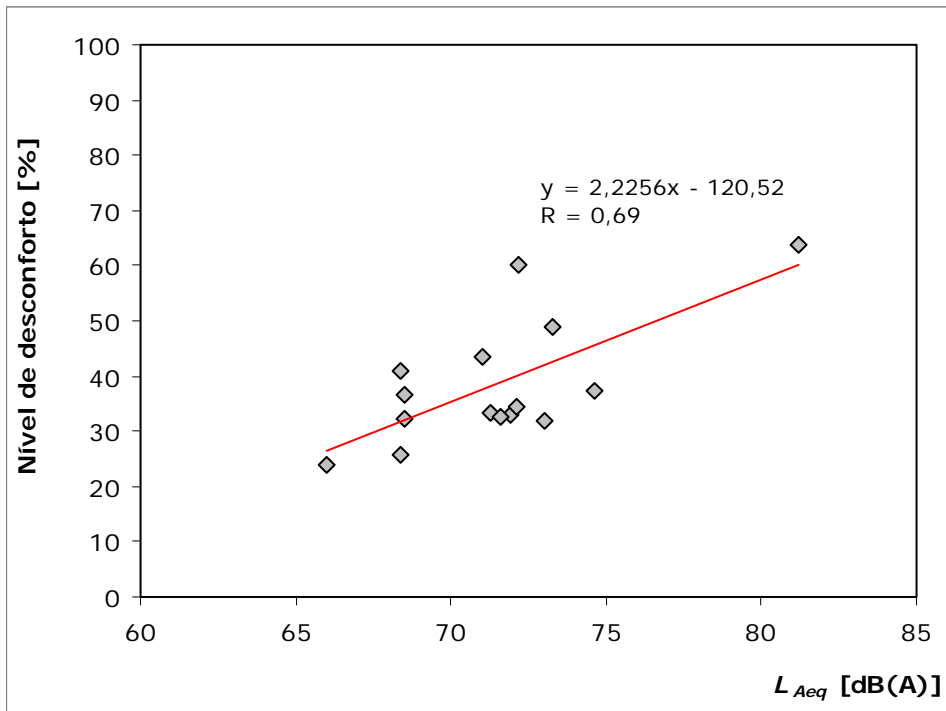


Figura 6.52 Nível de desconforto em função do nível sonoro contínuo equivalente médio de cada percurso

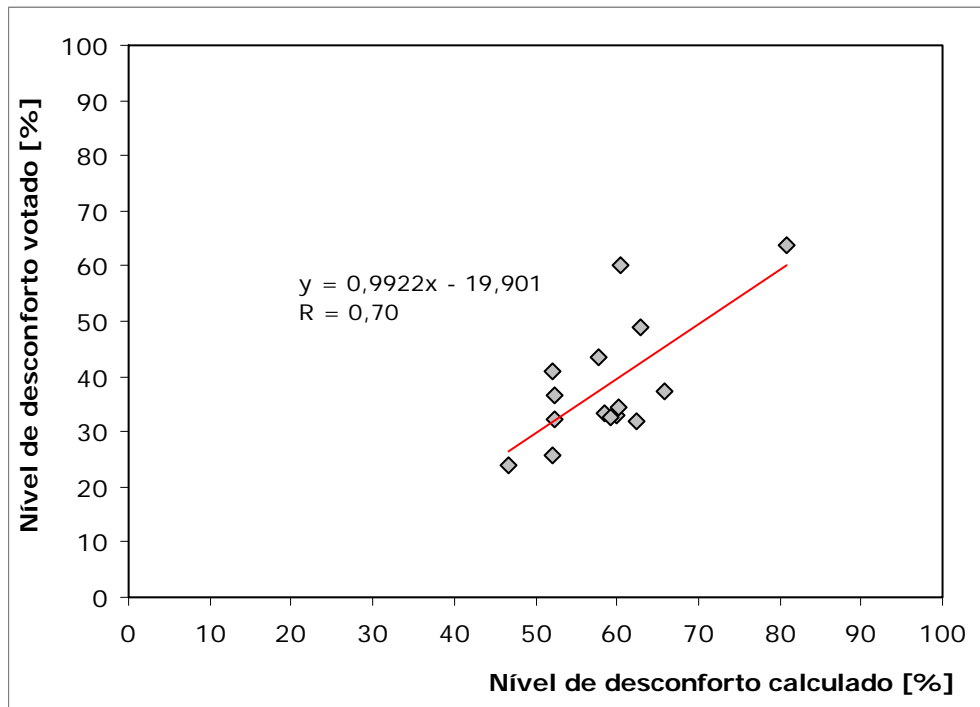


Figura 6.53 Nível de desconforto acústico votado em função do nível de desconforto acústico calculado

A expressão obtida indica uma boa correlação entre ambas as grandezas, verificando-se no entanto a necessidade de realizar percursos com um campo de medição mais vasto, pois existem zonas de medições efectuadas relativamente densas, ao contrário de outras que pecam pela ausência de dados que permitam uma melhor caracterização da relação entre ambas as grandezas.

Da experiência obtida durante a realização deste trabalho, recomenda-se uma particular atenção na garantia das medições serem representativas do valor médio do nível sonoro contínuo equivalente dos veículos nos percursos efectuados pois tal, como já foi referido, esta é a grandeza que apresenta variações mais acentuadas.

6.3.6. Qualidade do ar

Ao eleger como grandeza característica da qualidade do ar no interior dos autocarros, o nível da concentração de CO₂, está a considerar-se que a presença dos passageiros representa a maior fonte de degradação do ar ambiente. A avaliação subjectiva foi feita através de uma escala contínua tendo como extremos a indicação de neutralidade ou de ar muito poluído.

Nas figuras 6.54 e 6.55 apresenta-se a evolução temporal da concentração de dióxido de carbono para os percursos 7, 8, 26 e 27. Também está indicado nesta figura o nível de desconforto médio manifestado pelos passageiros bem como o respectivo desvio padrão. Nestas, verifica-se que são atingidos níveis bastante elevados da concentração de CO₂ quer no mini-autocarro (figura 6.54) quer no autocarro de turismo (figura 6.55). Perante os níveis registados e, de acordo com a escala de Jokl (1998), recomendam-se curtos períodos de exposição das pessoas nestes ambientes. Das duas representações indicadas, a da figura 6.54 sugere maiores preocupações, porquanto os valores são obtidos após cerca de apenas doze minutos de permanência das pessoas no interior do mini-autocarro.

Nos quatro percursos aqui apresentados verifica-se alguma insensibilidade do sistema olfactivo dos passageiros, expresso no nível de desconforto médio, perante um elevado aumento da concentração de dióxido de carbono.

Nos percursos nº 9, 10, 11, 18, 19, 22, 23, 30 e 31 verificou-se uma boa consistência nas avaliações subjectivas relativamente ao nível de concentração de CO₂. A título exemplificativo, representa-se na figura 6.56, a evolução do percurso nº 18 e 19.

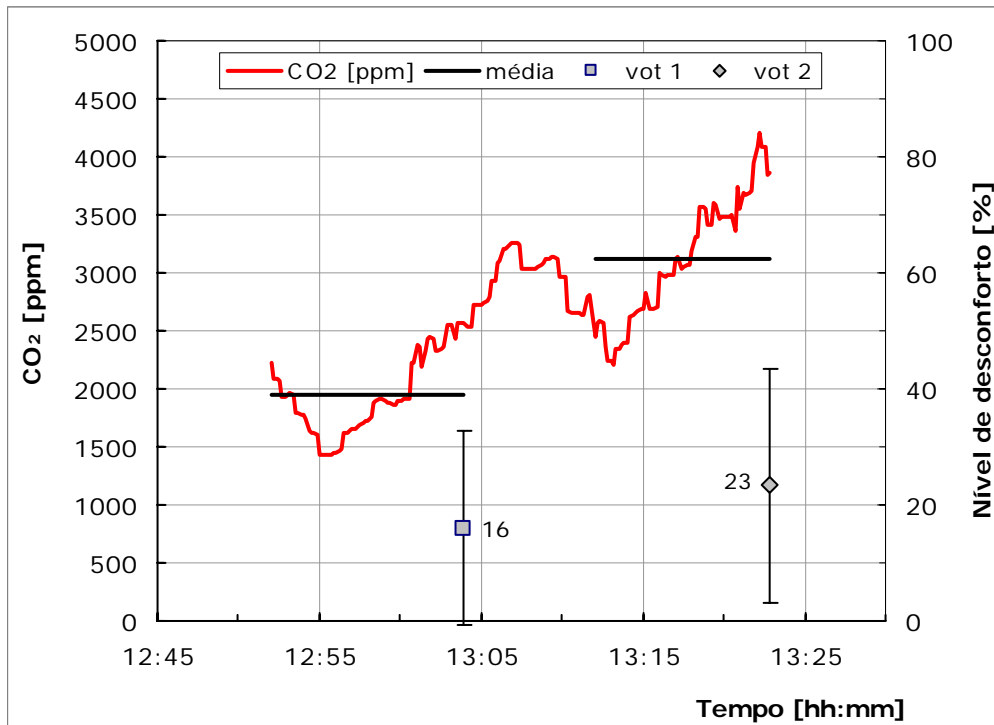


Figura 6.54 Representação da concentração de CO₂ e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 7 e 8

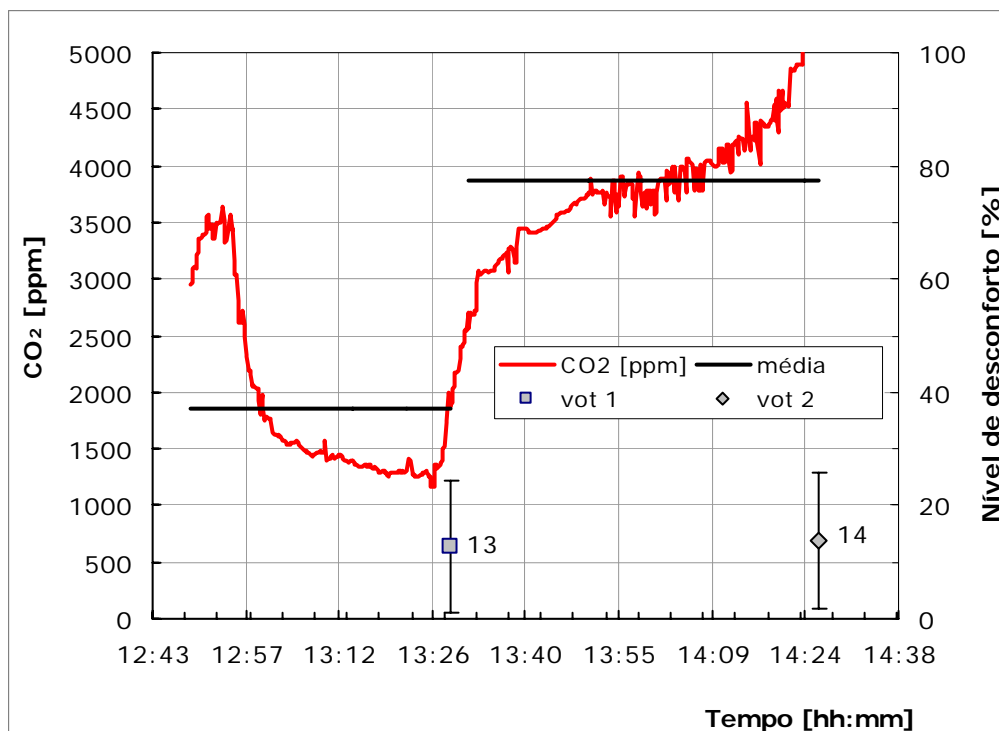


Figura 6.55 Representação da concentração de CO₂ e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 26 e 27

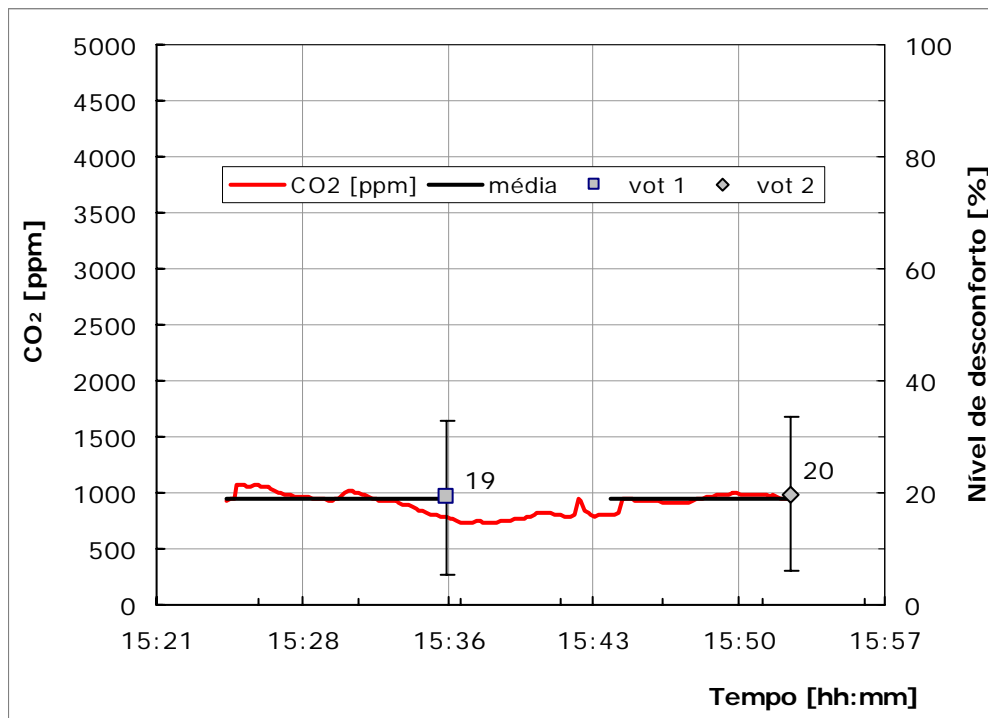


Figura 6.56 Representação da concentração de CO₂ e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 18 e 19

O valor médio, da concentração de CO₂, obtido nos 31 percursos efectuados foi de 1716 ppm, registando-se como valor médio máximo 3874 ppm, correspondente ao percurso n.º 27, e mínimo de 475 ppm, correspondente ao percurso n.º 3.

Os critérios do Departamento de Protecção Ambiental de Hong-Kong indicados no capítulo 4, estabelecem como limite de conforto nos níveis médios horários de concentração de dióxido de carbono no interior dos veículos, o valor de 2500 ppm. Face à duração dos percursos realizados, este critério pode ser comparado de um modo aproximado com os percursos n.º 25, 27 e 28. Nestes, a concentração média foi de 1690, 3874 e 3018 ppm, respectivamente. Apenas o percurso n.º 25 poderia ser considerado, de acordo com este critério, como tendo uma boa qualidade do ar. Existem muitos percursos de curta duração com valores elevados da concentração média do dióxido de carbono e cuja tendência seria no sentido ascendente caso a duração do percurso fosse maior. Esta tendência é bem visível nas figuras 6.54 e 6.55.

Na figura 6.57 apresenta-se a votação média dos passageiros relativamente a cada percurso bem como os respectivos desvios padrões, sendo o valor médio deste último de 14,2% que é igual ao anteriormente obtido na avaliação subjectiva das vibrações.

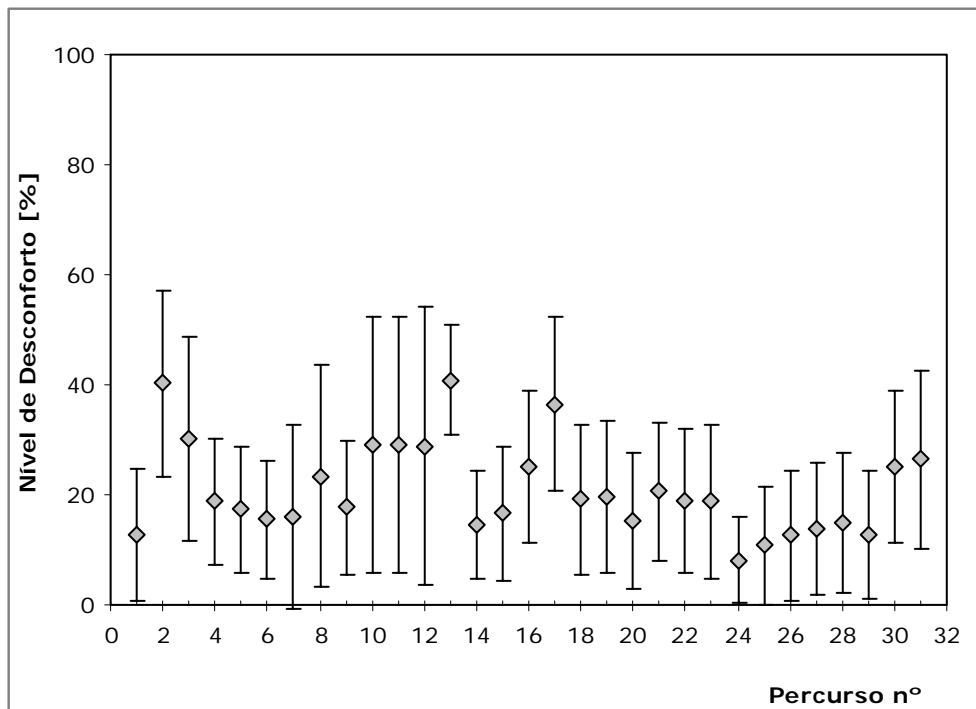


Figura 6.57 Média do nível de desconforto manifestado, e respectivo desvio padrão, relativamente à qualidade do ar em cada percurso

Tal como em todas as grandezas anteriormente analisadas, uma primeira abordagem na relação entre as medições objectivas e subjectivas, consiste na análise comparativa do nível de desconforto médio indicado pelos passageiros com o valor métrico objectivo representativo das grandezas em causa (ver figura 6.58). A avaliação subjectiva está representada por um polinómio de segundo grau, apresentando contudo uma baixa correlação, fruto da elevada dispersão dos dados obtidos.

A figura 6.59 representa a aplicação da lei de Fechner, tal como sugerido por Jokl (1999), obtendo-se o nível de desconforto indicado pelos passageiros em função da concentração de CO₂ expressa em decibéis.

Face aos índices existentes neste domínio, sugere-se a utilização da expressão 4.38 (EUR 14449 EN, 1992), para prever o nível de insatisfeitos em função dos valores de CO₂ medidos. A comparação dos dados obtidos com o nível de desconforto votado pelos passageiros está representada na figura 6.60.

A avaliação objectiva relativa à qualidade do ar no interior dos autocarros revela a existência de valores muito baixos de eficiência de ventilação. Tal facto não constitui uma novidade atendendo ao exposto na secção 4.5.3 do presente texto, o que vem reforçar a ideia transmitida pelo autor acerca da necessidade de actuar sobre este parâmetro ambiental.

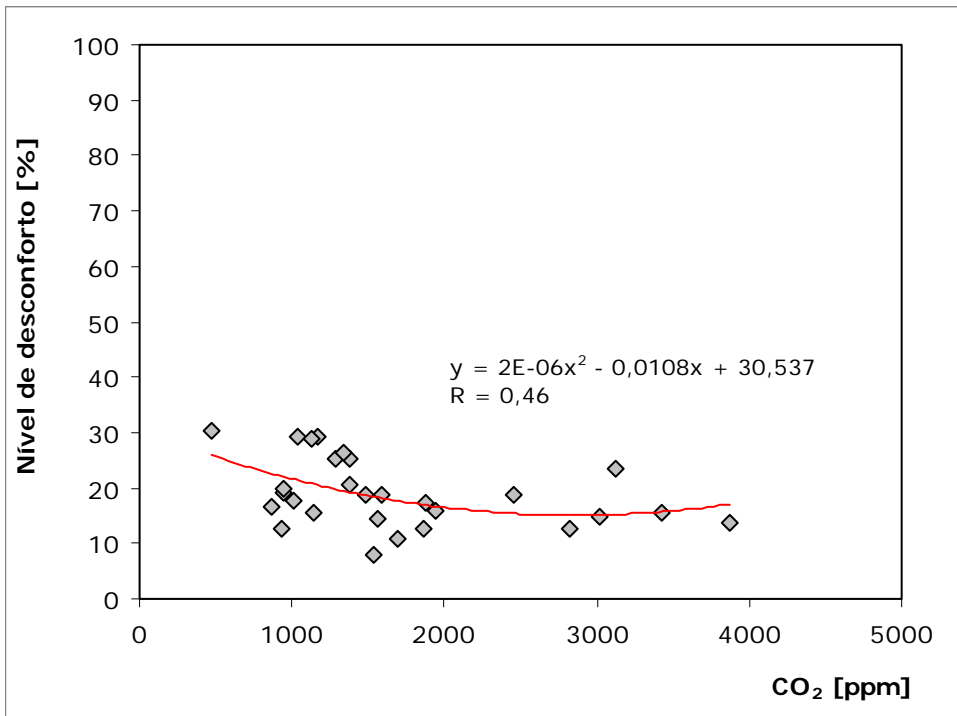


Figura 6.58 Nível de desconforto em função da concentração média de dióxido de carbono de cada percurso

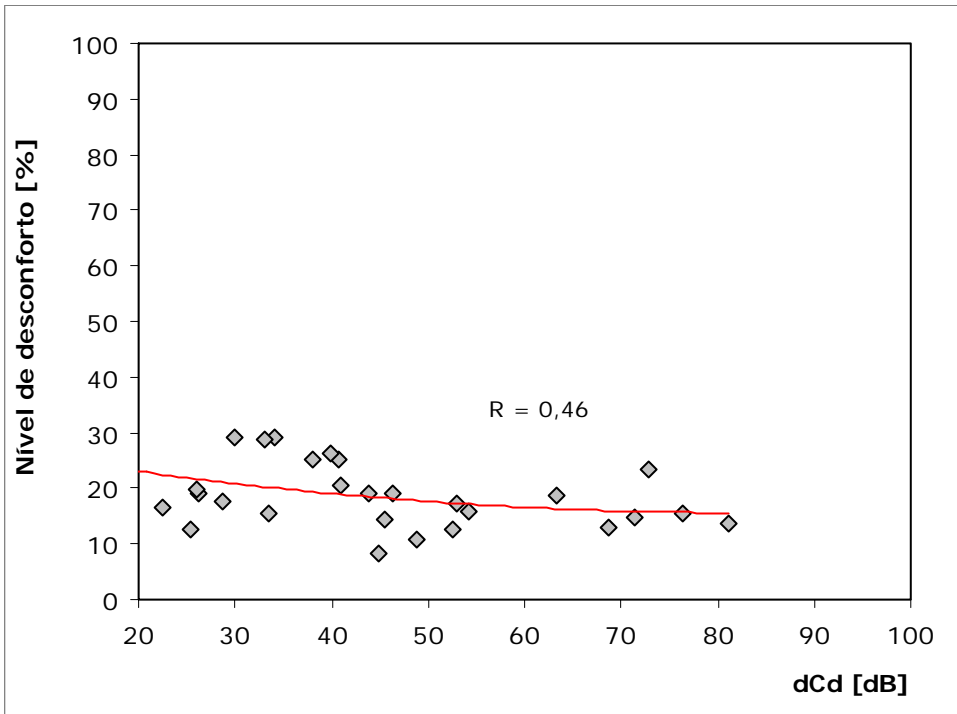


Figura 6.59 Nível de desconforto em função da concentração média de dióxido de carbono, em dB, de cada percurso

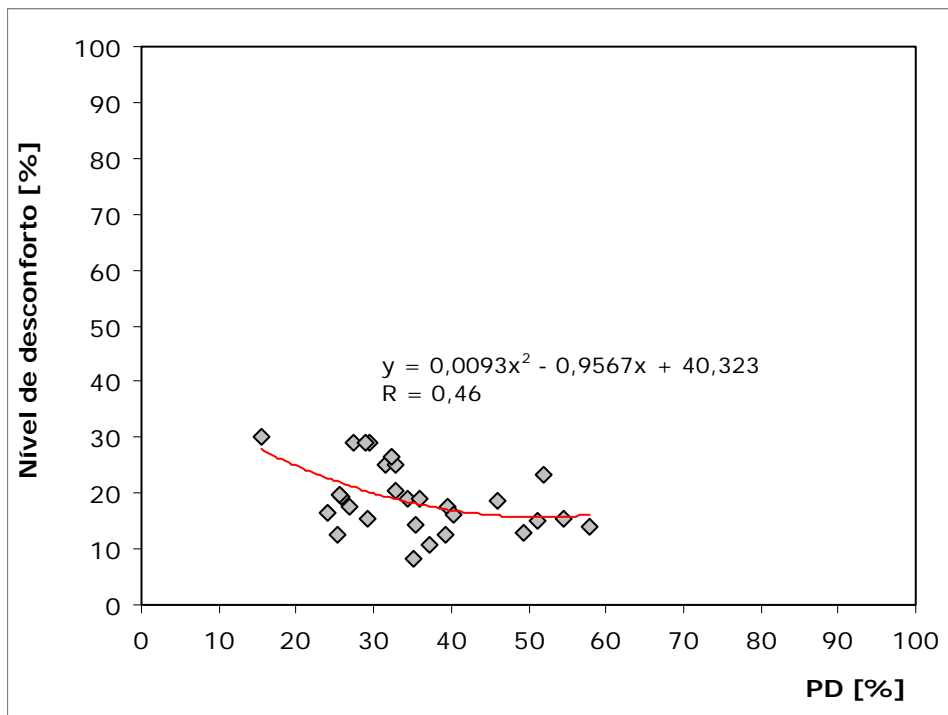


Figura 6.60 Nível de desconforto em função do nível de insatisfeitos (EUR 14449 EN) para cada percurso

6.3.7. Luminosidade

Por fim, a luminosidade constitui o quinto e último estímulo de desconforto ambiental eleito nesta análise, tendo sido caracterizada através da iluminância de um modo objectivo e da votação dos passageiros de um modo subjectivo.

Este parâmetro não é usualmente considerado sob o ponto de vista do nível de conforto dos passageiros, mas sim numa perspectiva da capacidade destes realizarem qualquer tipo de tarefa tal como seja a leitura, a escrita, ou outra.

Os autocarros têm uma grande área envidraçada, logo os valores das medições objectivas são fortemente influenciados pela luz exterior. Devido a este efeito, realizaram-se viagens com dias muito distintos ao nível da radiação solar, tendo inclusive sido realizada ao amanhecer, ao anoitecer e com ausência de radiação solar, ou seja no designado período nocturno. O facto de se exporem os passageiros às mais diversificadas condições ambientais, tal como foi feito relativamente aos outros estímulos, tem por objectivo obter as respostas das pessoas numa vasta gama de amplitudes dos diversos estímulos para se procurar modelar as sua respostas em termos do nível de desconforto.

Nos seis primeiros percursos não existe nenhum tipo de avaliação, porquanto só nas campanhas de medições levadas a cabo nos anos de 2005 e 2006 é que se considerou este estímulo de desconforto.

Na figura 6.61 e 6.62, apresenta-se a evolução temporal da iluminância, medida no plano vertical, o seu valor médio, o nível de desconforto médio indicado pelos passageiros e respectivo desvio padrão, para os percursos nº 9, 10, 11, 20 e 21. A evolução do nível de desconforto é bastante constante atendendo às pequenas oscilações existentes. Todos os percursos aqui representados dizem respeito a dias com céu encoberto. Em dias de céu limpo, com radiação solar directa, os valores obtidos são claramente superiores, havendo necessidade de adaptar a escala das ordenadas na sua representação. Como exemplo de um dia de céu limpo apresentam-se os percursos nº 26 e 27 na figura 6.63.

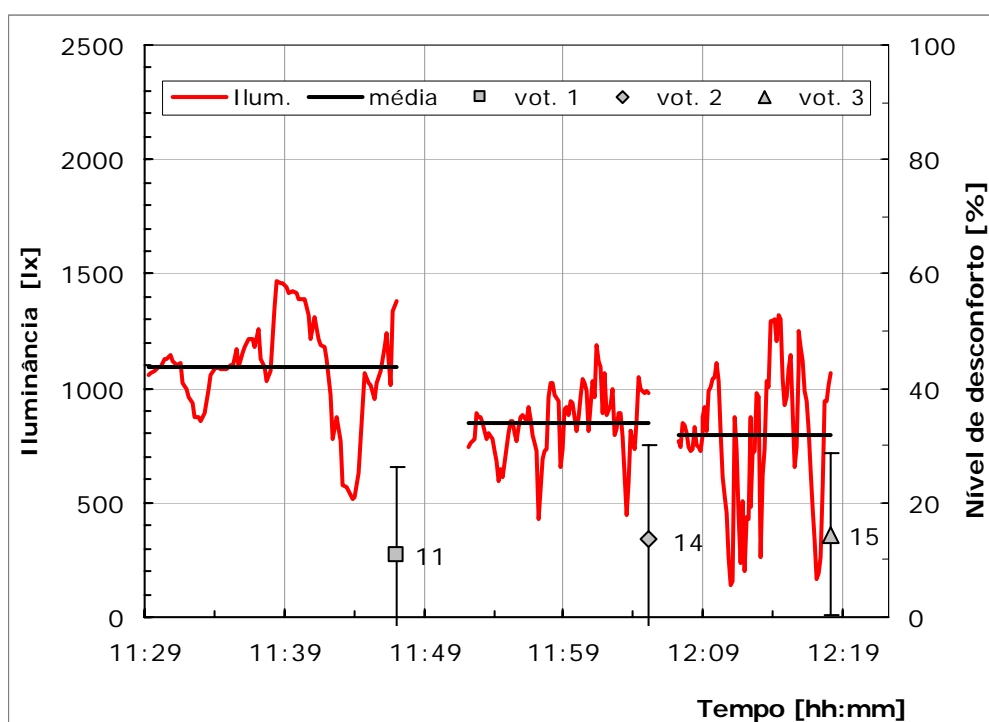


Figura 6.61 Representação da iluminância e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 9, 10 e 11

Efectuaram-se percursos com valores médios de iluminância entre 1 lx, correspondente aos percursos nº 22 e 23, e 2966 lx, correspondente ao percurso nº 16, sendo a média de todos eles de 1020 lx.

Na figura 6.64 estão indicados os valores médios de desconforto manifestado pelos passageiros bem como os respectivos desvios padrões. Comparativamente com os outros estímulos, a luminosidade apresenta uma dispersão inferior com uma média dos desvios padrões de 11,2%. Também é visível nesta representação gráfica, que os níveis de desconforto médio obtidos são claramente inferiores quando comparados com os obtidos nos outros estímulos.

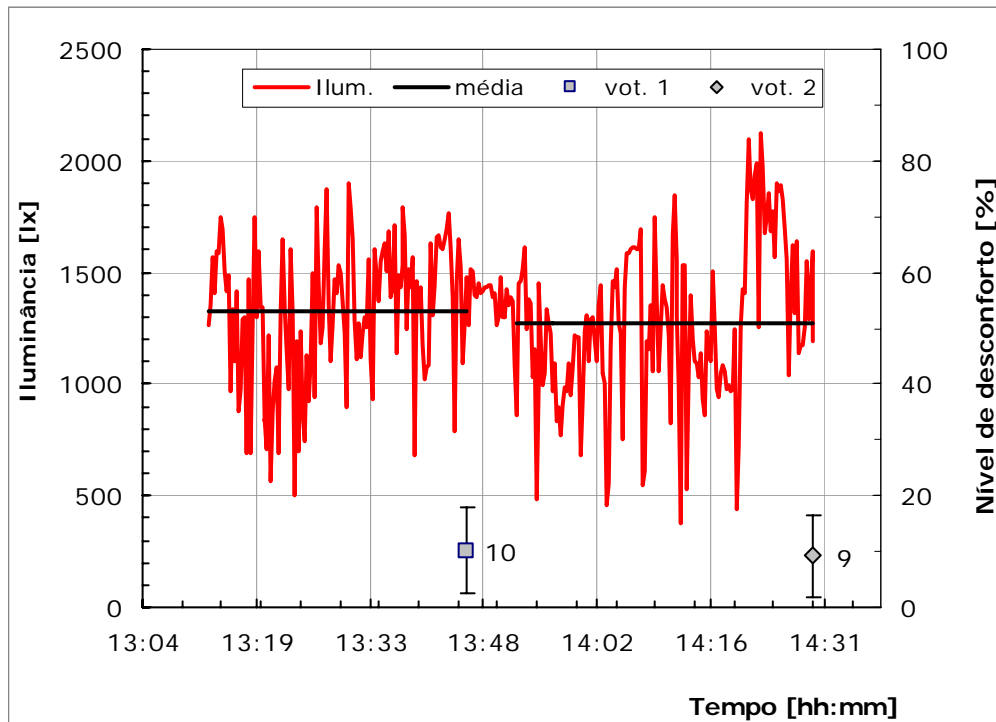


Figura 6.62 Representação da iluminância e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 20 e 21

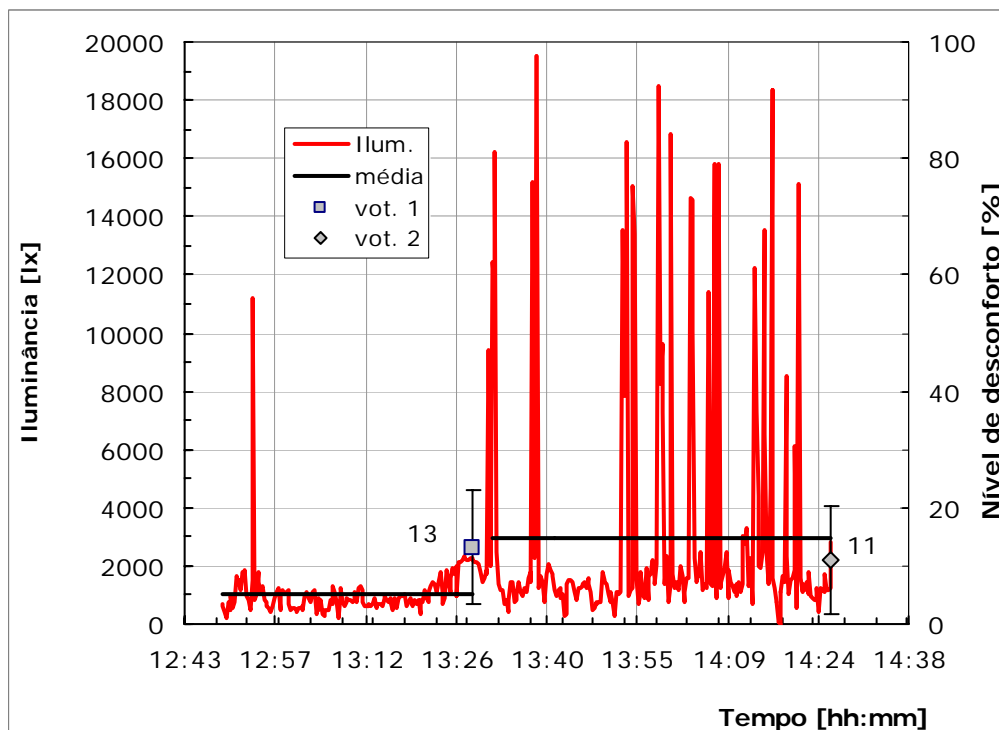


Figura 6.63 Representação da iluminância e do nível de desconforto manifestado pelos passageiros nos percursos 26 e 27

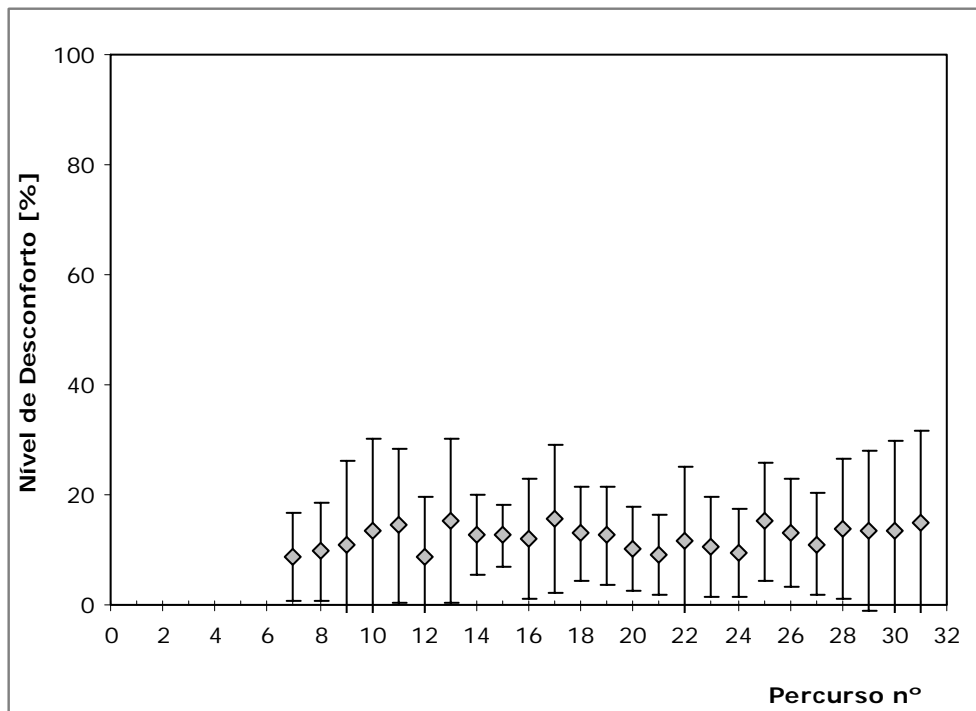


Figura 6.64 Média do nível de desconforto manifestado, e respectivo desvio padrão, relativamente à luminosidade em cada percurso

A relação entre o parâmetro métrico eleito para caracterizar esta grandeza e o nível de desconforto médio representa-se na figura 6.65, onde se verifica uma baixa dispersão na média das respostas subjectivas.

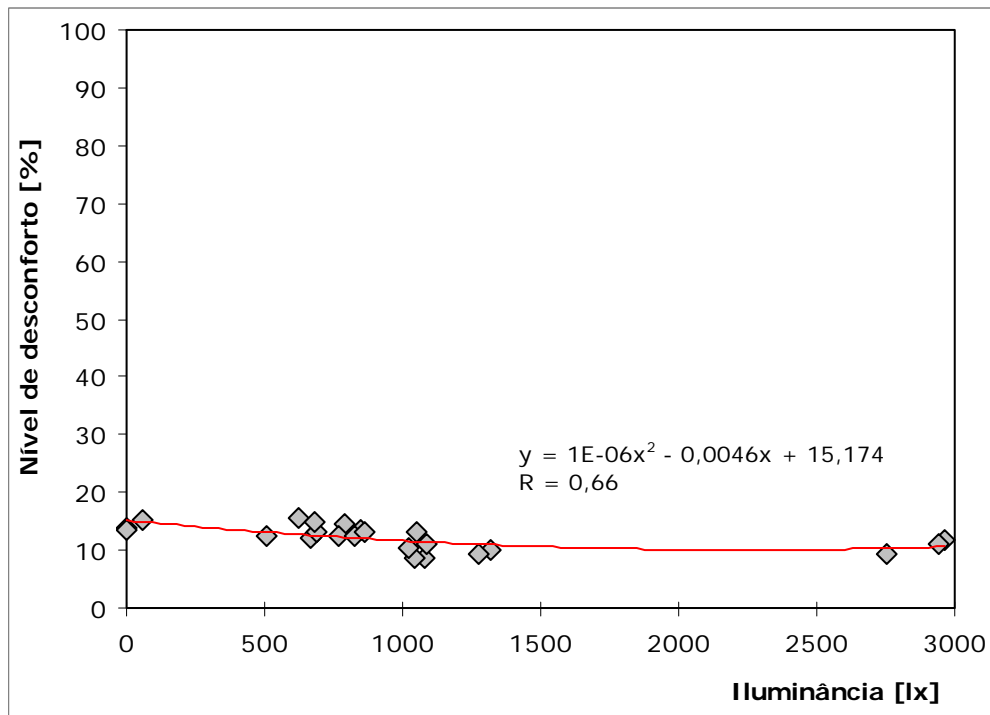


Figura 6.65 Nível de desconforto em função da luminosidade média de cada percurso

Utilizou-se a relação obtida por Fisher (1970), para obter o nível de insatisfeitos, sendo este posteriormente comparado com o nível de desconforto médio votado pelos passageiros (ver figura 6.66). A expressão indicada nesta figura apresenta uma boa correlação entre ambas as grandezas, podendo ser utilizada para estimar o nível de desconforto dos passageiros em viagens típicas de autocarros.

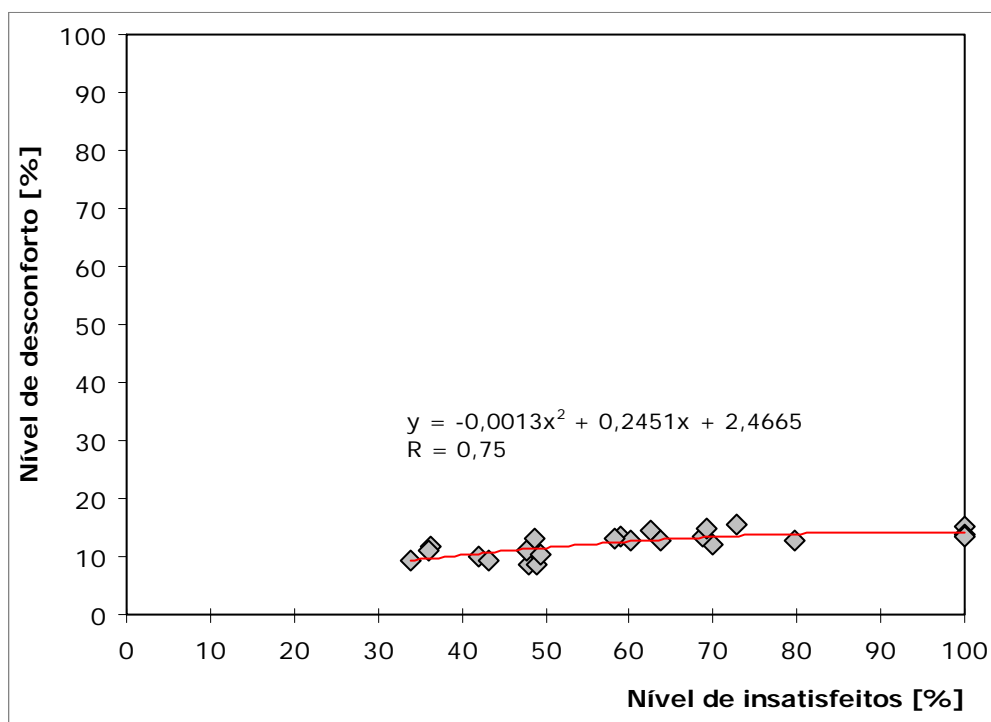


Figura 6.66 Nível de desconforto em função do nível de insatisfeitos para cada percurso

6.3.8. Nível de desconforto global

Após terem sido apresentadas as principais conclusões relativamente à avaliação parcelar de cada um dos estímulos de desconforto ambiental considerados, apresenta-se de uma forma resumida na tabela 6.13 todos os valores obtidos representativos das avaliações médias efectuadas, quer no que diz respeito aos parâmetros métricos seleccionados, quer relativamente à avaliação subjectiva dos passageiros. Nesta tabela, indica-se ainda a média de desconforto dos valores médios dos diferentes estímulos de desconforto, para cada percurso. Os campos sem indicação de resultados dizem respeito à ausência dos mesmos, pelos motivos já anteriormente indicados.

Percurso nº	Avaliação subjectiva [%]							Avaliação objectiva				
	Amb. térmico	Vib.	Ruído	Qual. do ar	Lumin.	Média estímulos	Desconf. global	T_{eq} [°C]	a_v [ms ⁻²]	L_{eq} [dB(A)]	CO ₂ [ppm]	Ilum. [lx]
1	37,1	26,1	29,9	12,6	--	26,4	20,1	28,7	0,34	--	931	--
2	85,1	31,9	15,9	40,2	--	43,3	44,9	27,0	0,39	--	2925	--
3	48,5	27,3	35,1	30,2	--	35,3	30,4	28,8	0,36	--	475	--
4	25,7	20,7	35,9	18,8	--	25,3	19,1	18,0	0,35	--	2451	--
5	17,1	48,7	42,1	17,4	--	31,3	33,7	17,0	0,89	--	1879	--
6	2,4	20,5	21,5	15,5	--	15,0	17,1	16,3	0,29	--	3421	--
7	16,4	80,8	48,9	16,0	8,7	34,2	69,9	--	1,50	73,3	1941	1083
8	37,2	77,2	60,1	23,3	9,8	41,5	68,5	--	2,25	72,2	3121	1074
9	13,2	29,1	36,7	17,7	11,0	21,5	19,2	22,2	0,48	68,5	1009	1089
10	22,2	47,2	41,0	29,2	13,5	30,6	39,4	22,4	0,91	68,4	1162	850
11	22,3	28,9	32,2	29,1	14,5	25,4	26,9	22,7	0,60	68,5	1041	792
12	43,3	20,8	33,4	28,9	8,8	27,0	36,1	29,2	0,42	71,3	1128	1044
13	82,4	39,6	43,4	40,8	15,4	44,3	58,0	30,1	0,48	71,0	1197	659
14	15,0	21,6	23,9	14,5	12,6	17,5	19,7	20,5	0,41	66,0	1557	770
15	13,5	18,9	25,6	16,6	12,6	17,4	18,9	21,8	0,39	68,4	862	829
16	47,3	18,3	25,6	25,1	12,2	25,7	23,4	33,8	--	73,7	1286	666
17	80,3	20,7	22,7	36,5	15,7	35,2	46,8	35,2	--	71,5	1911	622
18	27,7	25,5	22,8	19,2	13,0	21,6	21,9	29,7	0,66	72,1	951	862
19	33,8	45,9	37,2	19,8	12,6	29,8	36,8	30,4	1,11	74,6	944	504
20	8,4	17,2	33,1	15,4	10,1	16,9	16,6	27,1	0,34	71,9	1140	1322
21	16,3	30,6	32,6	20,6	9,2	21,9	20,3	26,2	0,50	71,6	1381	1273
22	21,1	26,7	31,7	18,9	11,6	22,0	19,9	23,4	0,54	73,0	1486	2966
23	69,1	30,1	24,1	18,9	10,4	30,5	41,9	19,7	0,43	72,9	1588	1020
24	3,7	15,9	16,9	8,1	9,3	10,8	14,1	14,4	0,31	72,8	1532	2755
25	13,7	16,4	18,9	10,8	15,2	15,0	13,1	18,8	0,38	77,1	1690	61
26	32,5	15,0	22,1	12,7	13,1	19,1	11,3	19,6	0,32	76,7	1859	1051
27	5,0	20,9	21,8	13,8	11,0	14,5	13,7	22,3	--	76,8	3874	2940
28	14,0	12,9	14,6	14,9	13,8	14,0	11,4	21,9	0,31	75,5	3018	1
29	15,8	14,5	15,1	12,8	13,5	14,3	10,6	21,3	0,35	77,4	2815	1
30	55,6	29,9	34,4	25,1	13,3	31,7	38,4	33,8	0,47	72,1	1372	687
31	59,8	32,0	63,9	26,4	14,8	39,4	54,9	33,7	0,42	81,2	1344	681

Tabela 6.13 Resumo global das avaliações efectuados por percurso

Nas análises seguintes, a avaliação subjectiva do ambiente térmico considerada será feita numa escala unipolar, visto ter-se revelado mais adequada, com o objectivo de procurar relacionar os diversos estímulos de desconforto com o nível de desconforto global.

Na figura 6.67 apresentam-se os valores de desconforto médio global obtido por estímulo considerado, bem como o valor médio da votação relacionada com o nível de

desconforto global. Está ainda representado nesta figura o valor obtido considerando uma média de desconforto, por percurso, entre os diversos estímulos. Na análise que aqui se apresenta não foram incluídos os primeiros seis percursos face à ausência de dados da avaliação subjectiva relativamente à luminosidade, incluindo-se assim um total de 25 percursos realizados.

A luminosidade constitui o estímulo de desconforto que apresenta o valor mais baixo com uma indicação média de 12%, seguido da qualidade do ar com 21%. Os outros três estímulos apresentaram médias de níveis de desconforto idênticos, com valores próximos dos 30%, tal como o nível de desconforto global.

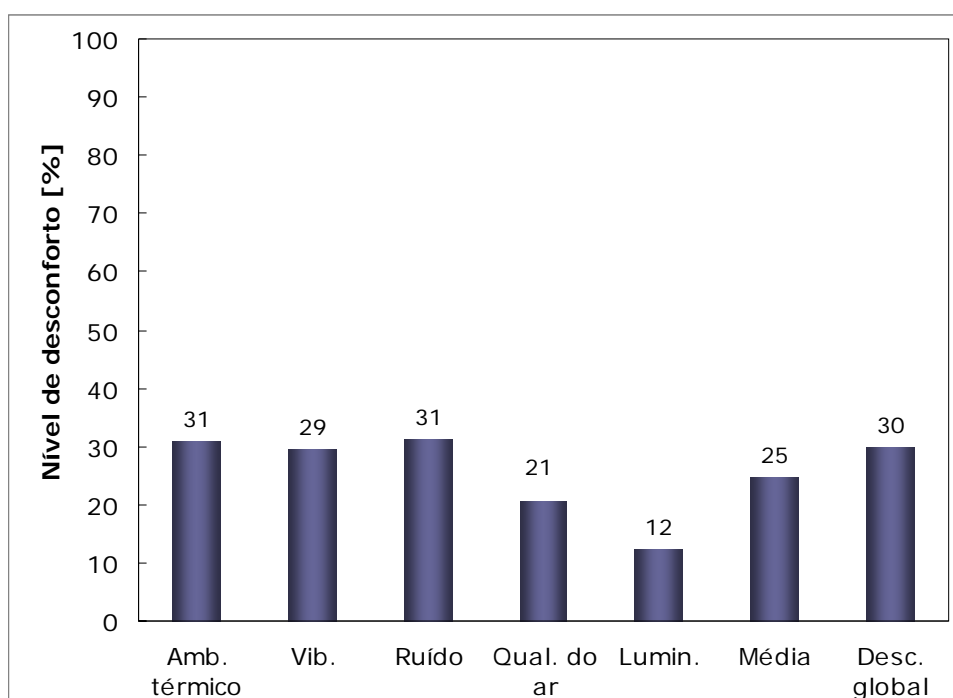


Figura 6.67 Valores médios do nível de desconforto

Uma das questões que Humphreys (2005) questiona, sobre a relação entre estímulos, é a existência ou não de uma correlação entre o nível de desconforto global e o valor médio dos diversos estímulos. Esta análise apresenta-se graficamente na figura 6.68, onde está indicada a relação obtida entre a média dos cinco estímulos considerados e o valor médio de desconforto global votado pelos passageiros em cada percurso. Verifica-se que existe uma elevada correlação entre a média dos estímulos considerados e o nível de desconforto global.

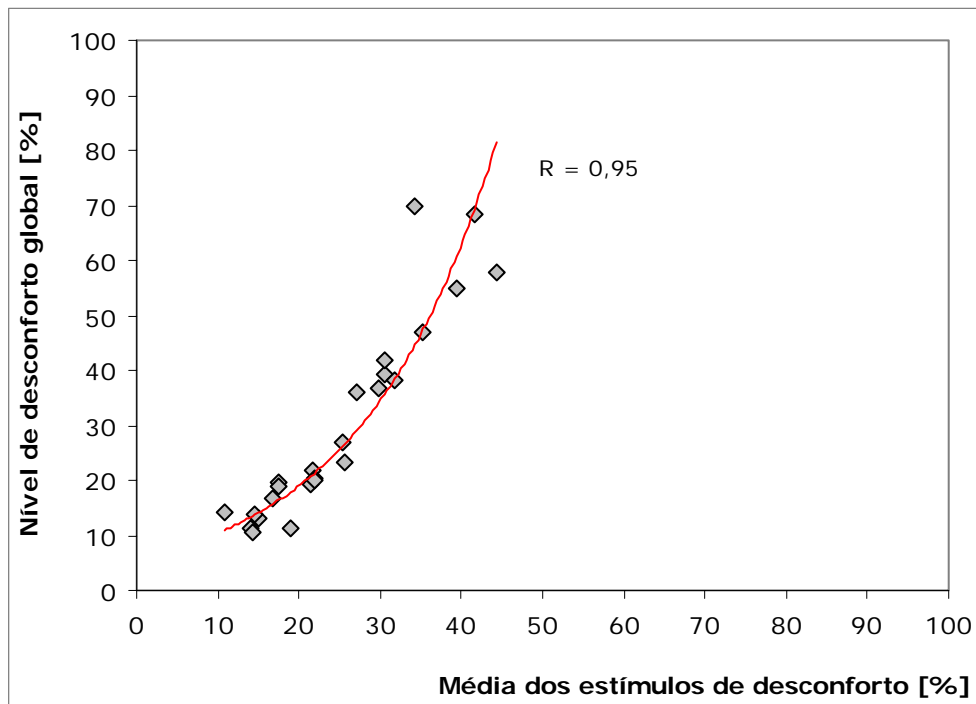


Figura 6.68 Valor médio de desconforto global em função da média dos estímulos de desconforto

Os dados obtidos indicam que uma oscilação num dos estímulos afecta o nível de desconforto global. Como exemplo deste efeito, apresentam-se nas figuras 6.69 e 6.70 os resultados das avaliações subjectivas relativas aos percursos nº 1, 2, 3, 30 e 31. A primeira figura diz respeito à análise dos testes onde não foi avaliada a luminosidade e daí esta não ter qualquer valor indicativo do nível de desconforto. É bem visível o aumento do desconforto térmico dos passageiros que afecta directamente a avaliação do valor de desconforto médio obtido. Existe uma boa relação com os dados objectivos durante toda a avaliação, senão veja-se: como se disse, o valor da temperatura ambiente foi incrementado através do sistema de climatização do autocarro durante os últimos minutos de viagem, o que fica bem reflectido na indicação do desconforto térmico; o valor da vibração total é ligeiramente superior no percurso nº 2; apesar do valor do nível sonoro equivalente não ter sido apresentado, durante o percurso nº 2, os dados obtidos através do manequim acústico assim o indicam, tendo tido correspondência na votação subjectiva; por fim, o valor da concentração do CO₂ foi claramente superior no percurso nº 2. Análise idêntica pode ser feita no que diz respeito aos percursos nº 30 e 31, onde o aumento do nível de desconforto acústico afecta directamente o nível de conforto global.

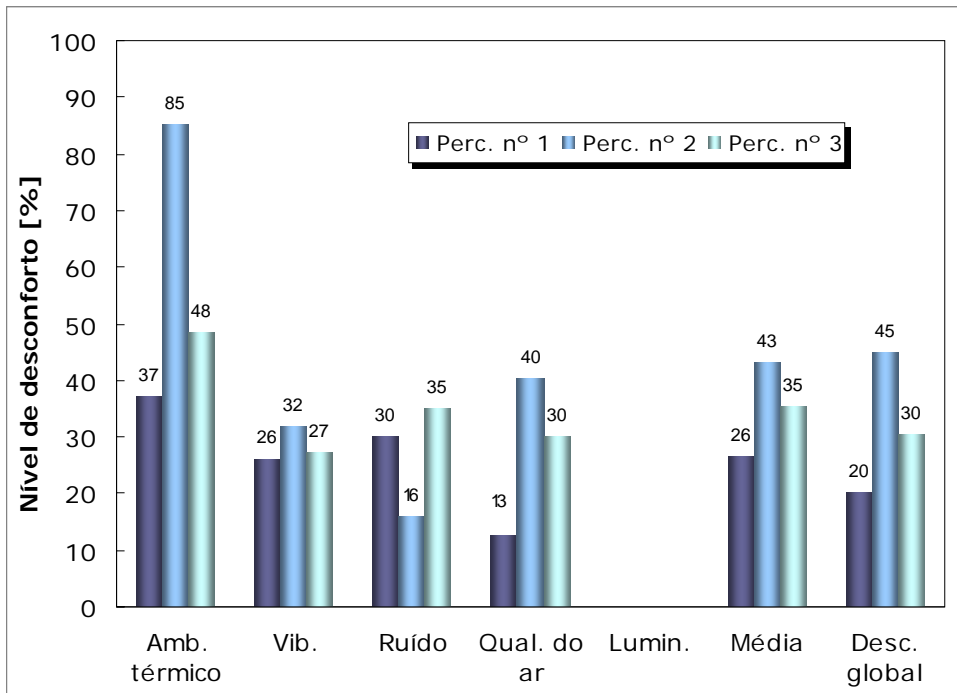


Figura 6.69 Valores médios da avaliação subjectiva relativa aos percursos n.º 1, 2 e 3

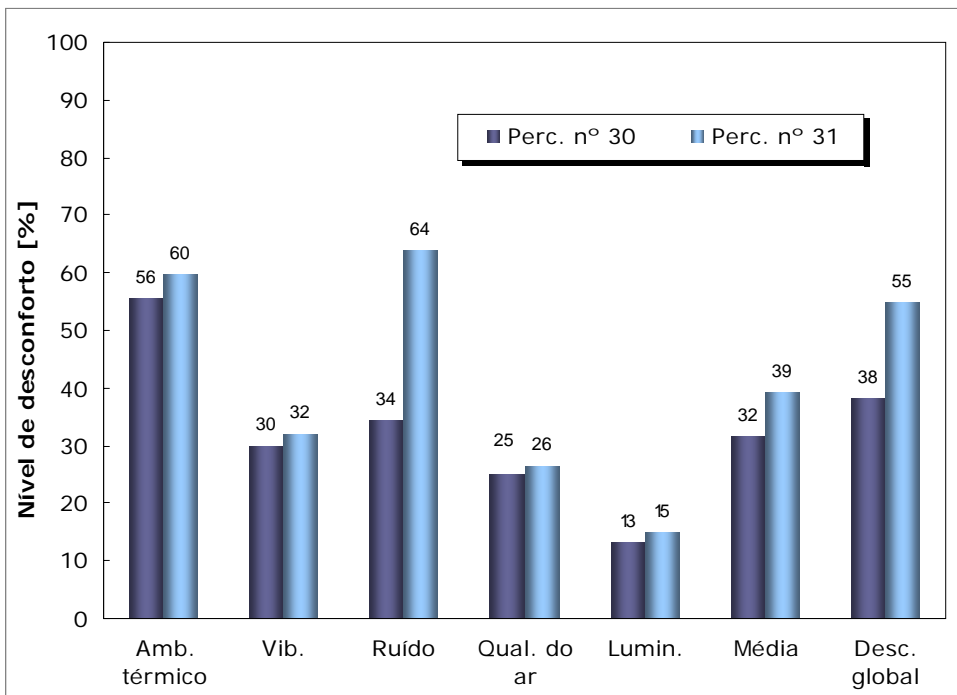


Figura 6.70 Valores médios da avaliação subjectiva relativa aos percursos n.º 30 e 31

Realizaram-se algumas viagens, onde os parâmetros objectivos foram semelhantes, por forma a testar a existência de repetibilidade na resposta dos passageiros. Um exemplo desta situação está representado na figura 6.71, relativo aos percursos n.º 28 e

29, tendo-se concluído, dos diferentes percursos realizados, que existia uma boa repetibilidade nas avaliações efectuadas.

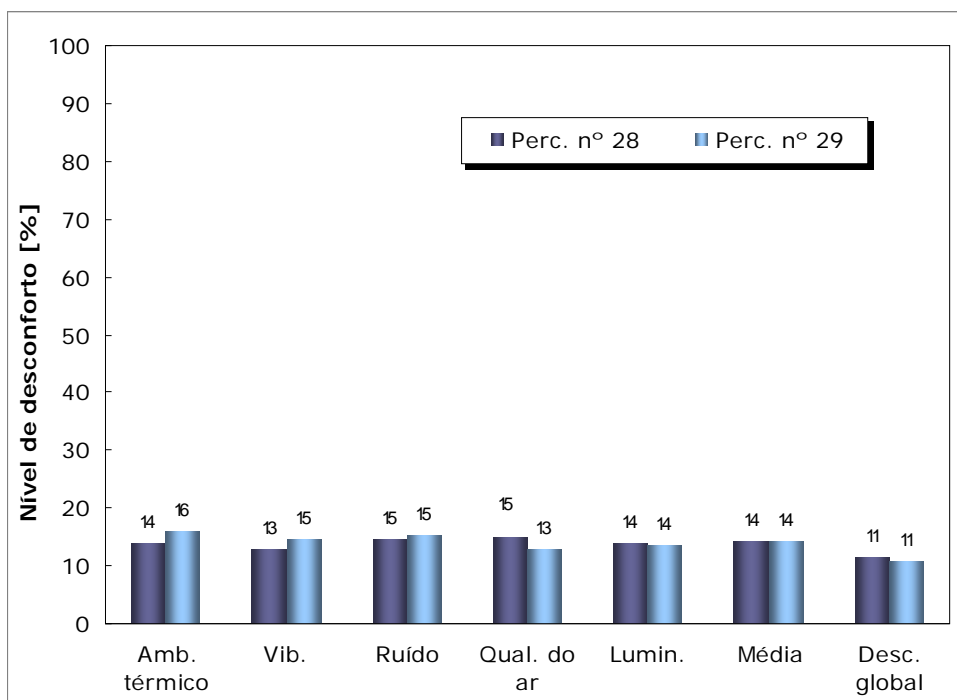


Figura 6.71 Valores médios da avaliação subjectiva relativa aos percursos n.º 28 e 29

Numa análise global sobre as diversas avaliações subjectivas obtidas, pode verificar-se que existe uma ligação entre o nível de desconforto térmico e a qualidade do ar, bem como entre o nível de desconforto acústico com as vibrações. Este facto vem ao encontro dos dados obtidos por diversos investigadores na área da ergonomia ambiental.

6.3.9. Modelação da resposta humana: passageiro virtual

A metodologia para a obtenção de uma previsão acerca da resposta comportamental das pessoas, ou seja a obtenção de um passageiro virtual, baseou-se naturalmente nas avaliações que as mesmas fizeram sobre os estímulos de desconforto a que estiveram expostas. O objectivo final é obter uma modelação da sua resposta que possa ser utilizada de modo a que, através da aquisição de diversos parâmetros físicos, se consiga prever a sensação de desconforto global dos passageiros. Este tipo de ferramenta permite obter uma previsão, nas diversas fases de projecto e desenvolvimento dos autocarros, extremamente importante acerca de como determinadas opções irão afectar o previsível nível de desconforto global dos passageiros.

Validaram-se um total de 446 respostas dos passageiros, em virtude de nos primeiros seis percursos não ter sido considerado o efeito da luminosidade. Na tabela 6.14, apresenta-se um resumo descritivo das respostas das pessoas relativamente às diversas votações que efectuaram sobre o desconforto ambiental no interior dos autocarros. Praticamente em todas as variáveis existem respostas em toda a amplitude da escala utilizada, com excepção da luminosidade, que apresenta o valor de 64% como tendo sido a votação mais desfavorável indicada pelos passageiros.

	Ambiente térmico	Vibrações	Ruído	Qualidade do ar	Luminosidade	Desconforto global
Média	32,7	25,0	27,2	18,1	12,4	23,9
Máxima	100	99	100	87	64	92
Mínima	0	2	2	2	1	2

Tabela 6.14 Resumo descritivo das 446 votações dos passageiros utilizadas na modelação da resposta humana

Para a modelação da resposta dos passageiros utilizaram-se dois métodos distintos: regressão linear múltipla e redes neuronais artificiais.

A regressão linear múltipla efectuada tem como variável dependente o valor de desconforto global em função dos valores de desconforto relativos ao ambiente térmico, às vibrações, ao ruído, à qualidade do ar e à luminosidade. Assim, pode efectuar-se uma análise do tipo:

$$\text{Desconforto Global} = X_0 + X_1 Y_1 + X_2 Y_2 + X_3 Y_3 + X_4 Y_4 + X_5 Y_5 \quad (6.2)$$

onde X_i são os coeficientes de ponderação e Y_i representam os diversos estímulos considerados.

Foi efectuada uma regressão linear múltipla utilizando as 446 respostas subjectivas recolhidas em relação a cada estímulo, obtendo-se os valores das incógnitas da equação 6.2 que estão indicados na tabela 6.15.

Coeficientes de ponderação	
X_0	-7,959
X_1	0,235
X_2	0,471
X_3	0,249
X_4	0,225
X_5	0,123

Tabela 6.15 Coeficientes de ponderação (X_i) obtidos em função das respostas subjectivas para cada estímulo

Substituindo os coeficientes obtidos na equação 6.2, obtém-se a seguinte fórmula para o desconforto global, em função das respostas subjectivas para cada estímulo considerado:

$$\text{Desconforto global} = - 7,959 + 0,235 \text{ Ambiente térmico} + 0,471 \text{ Vibrações} + 0,249 \text{ Ruído} + 0,225 \text{ Qualidade do ar} + 0,123 \text{ Luminosidade}$$

A utilização desta expressão apresenta um elevado coeficiente de correlação de Pearson, em relação às respostas subjectivas indicadas pelos passageiros, cujo valor é de 0,81. Este indicador demonstra um claro incremento na metodologia desenvolvida quando comparado com o obtido pelo autor em 1998, quando se obteve apenas uma correlação de 0,67. Na figura 6.72 representam-se os valores do nível de desconforto obtido a partir da expressão anterior em função do nível de desconforto global indicada por cada passageiro.

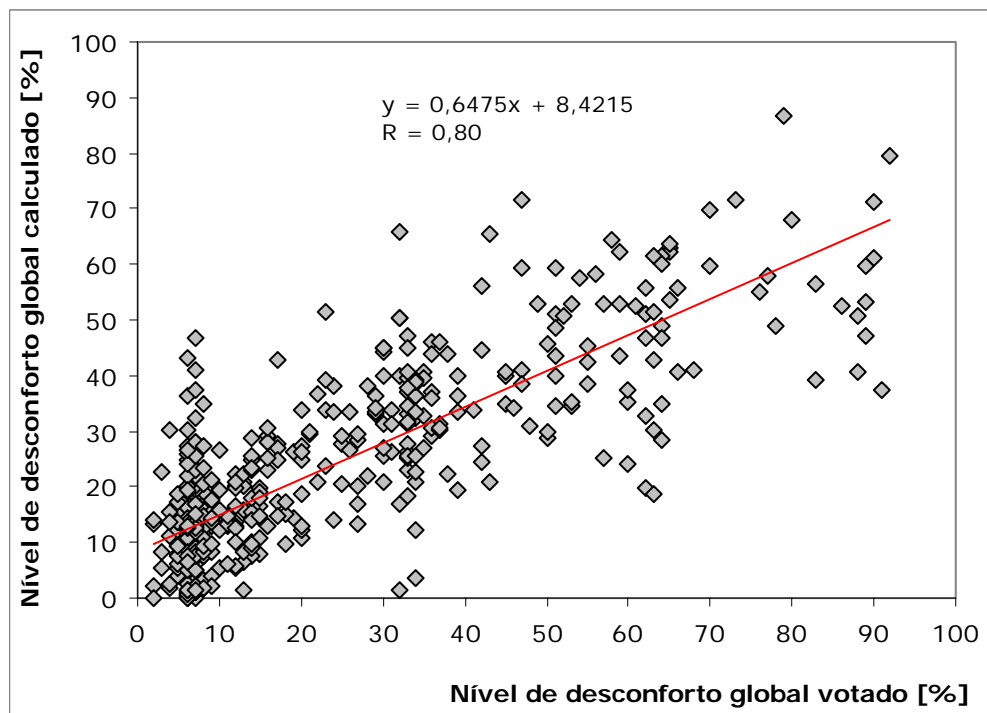


Figura 6.72 Nível de desconforto global obtido através de regressão linear múltipla em função do nível de desconforto votado pelos passageiros

Uma análise alternativa à regressão linear múltipla consistiu na aplicação das redes neuronais artificiais de modo a estabelecer inferências entre o nível de desconforto global e os diferentes estímulos considerados. Tal como indicado no capítulo três, a opção final residiu na utilização do software comercial de redes neuronais da empresa Statsoft, designado de Statistica Neural Networks, versão 7. Foram testados os diferentes tipos de

redes aplicáveis a problemas de regressão de dados, indicados no capítulo três, de modo a procurar a rede mais adequada para modelar a resposta dos passageiros.

A rede seleccionada é uma rede de retropropagação multi-camada, vulgarmente designada MLP, constituída por 4 camadas: a camada de entrada de dados constituída por cinco nodos, representativos das respostas das pessoas para cada um dos estímulos; duas camadas escondidas, sendo a primeira das quais constituída por dez nodos e a segunda, por oito nodos; e, a camada de saída que é composta por um único nodo, correspondente ao nível de desconforto global. Este tipo de rede neuronal designa-se vulgarmente pela sigla MLP 5-10-8-1. A divisão dos 446 dados consistiu em utilizar 80% dos mesmos para treinar a rede, 10% para a testar e os restantes 10% de dados na sua verificação.

O algoritmo de treino utilizado foi o algoritmo de retropropagação que é o método mais utilizado para o treino de redes neuronais com múltiplas camadas do tipo unidireccional. O método de obtenção do erro mínimo utilizado foi o da descida de gradiente do erro, vulgarmente designado por método do gradiente conjugado.

As funções de activação utilizadas foram as seguintes: linear, na camada de entrada; hiperbólica, na segunda e terceira camada; e, novamente linear, na camada de saída. Um esquema da rede neuronal que modela a resposta humana relativamente ao nível de desconforto encontra-se representado na figura 6.73, com os respectivos pesos da rede e termos de polarização indicados nas tabelas 6.16 e 6.17.

Numa análise de sensibilidade efectuada à rede, o parâmetro que revela ter preponderância no nível de desconforto global são as vibrações, seguidas do ambiente térmico, do ruído, da qualidade do ar e por último a luminosidade.

	Nodo 2.1	Nodo 2.2	Nodo 2.3	Nodo 2.4	Nodo 2.5	Nodo 2.6	Nodo 2.7	Nodo 2.8	Nodo 2.9	Nodo 2.10
<i>b</i>	0,808	0,350	0,422	0,335	-0,960	-0,532	-0,527	-0,333	0,337	0,400
Nodo 1.1	-0,144	0,581	0,776	0,213	0,780	-0,615	1,178	-0,451	0,776	0,440
Nodo 1.2	-0,317	-0,193	-0,254	0,775	0,366	-0,797	-1,360	-0,890	0,232	1,046
Nodo 1.3	-0,333	-0,372	0,264	0,176	0,451	-1,254	1,169	-0,523	0,070	-1,177
Nodo 1.4	-0,047	0,662	-1,708	0,538	0,424	-0,110	-0,612	-0,441	-1,164	-0,601
Nodo 1.5	-0,573	0,635	-0,880	0,672	-0,266	0,200	0,471	-0,379	0,755	-0,486

Tabela 6.16 Pesos da rede MLP 5-10-8-1 e respectivos termos de polarização *b* entre a primeira e a segunda camada

	Nodo 3.1	Nodo 3.2	Nodo 3.3	Nodo 3.4	Nodo 3.5	Nodo 3.6	Nodo 3.7	Nodo 3.8	Nodo 4.1
<i>b</i>	-0,032	-1,140	0,118	0,193	0,520	0,746	0,522	0,274	-0,843
Nodo 2.1	-0,549	0,644	0,298	-0,875	-0,581	0,771	-0,463	0,442	--
Nodo 2.2	-1,001	0,514	0,007	0,131	-0,191	-0,024	0,037	-0,220	--
Nodo 2.3	-1,162	-1,210	0,981	-0,398	-1,563	-0,350	0,398	-0,124	--
Nodo 2.4	-0,293	-0,528	-0,022	-0,089	0,293	-0,500	-0,586	-0,691	--
Nodo 2.5	-0,087	0,273	-0,541	-0,092	-0,103	-0,733	-0,470	-0,611	--
Nodo 2.6	0,016	-0,039	-1,144	0,838	-0,111	0,722	-0,140	-0,459	--
Nodo 2.7	0,624	-0,975	-0,854	0,720	0,893	0,244	-0,967	0,107	--
Nodo 2.8	0,686	-0,049	-0,136	-0,214	-0,046	1,004	0,079	-0,151	--
Nodo 2.9	-0,691	-1,201	0,567	0,310	-0,502	0,056	-0,460	-0,786	--
Nodo 2.10	0,500	-0,146	-1,159	0,271	-0,916	-0,200	0,166	0,446	--
Nodo 3.1	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,552
Nodo 3.2	--	--	--	--	--	--	--	--	0,710
Nodo 3.3	--	--	--	--	--	--	--	--	0,875
Nodo 3.4	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,361
Nodo 3.5	--	--	--	--	--	--	--	--	-1,053
Nodo 3.6	--	--	--	--	--	--	--	--	0,232
Nodo 3.7	--	--	--	--	--	--	--	--	-1,021
Nodo 3.8	--	--	--	--	--	--	--	--	-0,673

Tabela 6.17 Pesos da rede MLP 5-10-8-1 e respectivos termos de polarização *b* entre a segunda, terceira e quarta camada

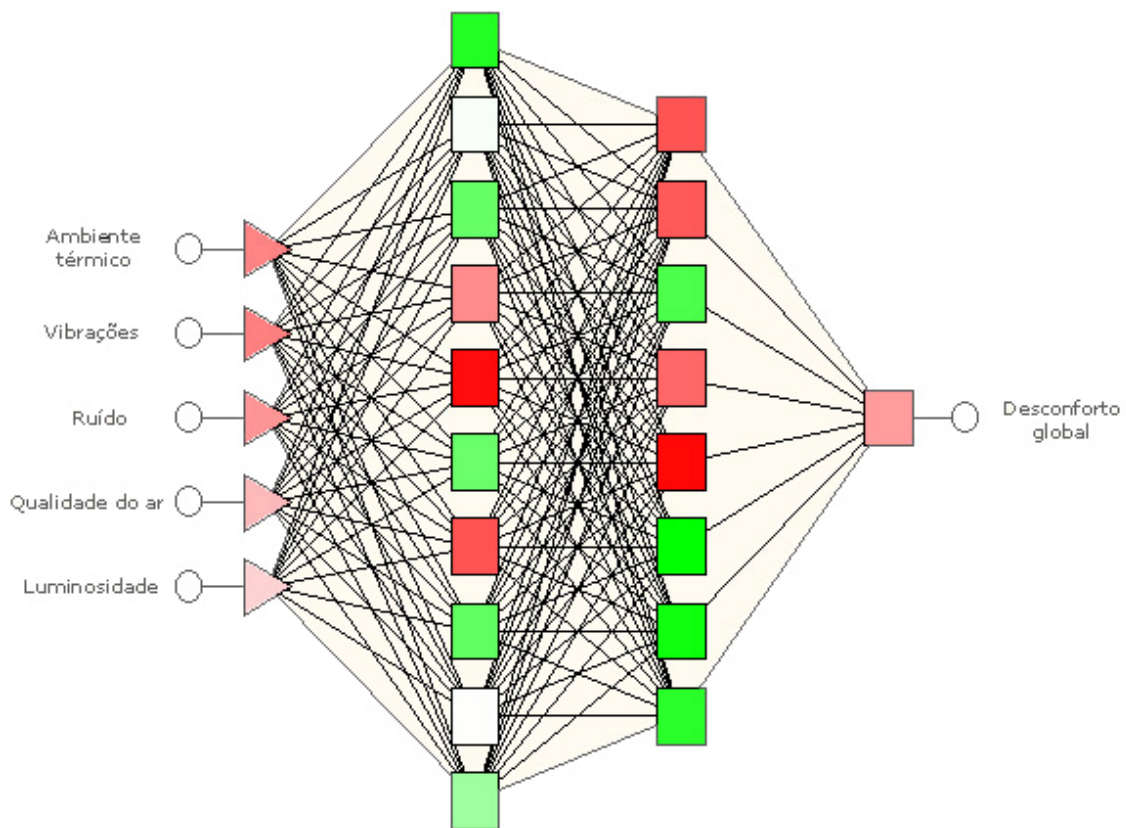


Figura 6.73 Rede neuronal MLP 5-10-8-1

Na figura 6.74 representa-se a evolução do nível de desconforto global da rede MLP obtida em função da variação de cada um dos estímulos. Nesta, é visível o facto de à medida que o nível de desconforto relativo às vibrações e ao ruído aumentam, estes estímulos assumem-se como elementos preponderantes no desconforto global. No entanto esta é uma abordagem simplista sobre a resposta da rede, em virtude de a sua complexidade interna conjugar todos os estímulos de desconforto de um modo interligado e complexo para determinar o nível de desconforto global dos passageiros.

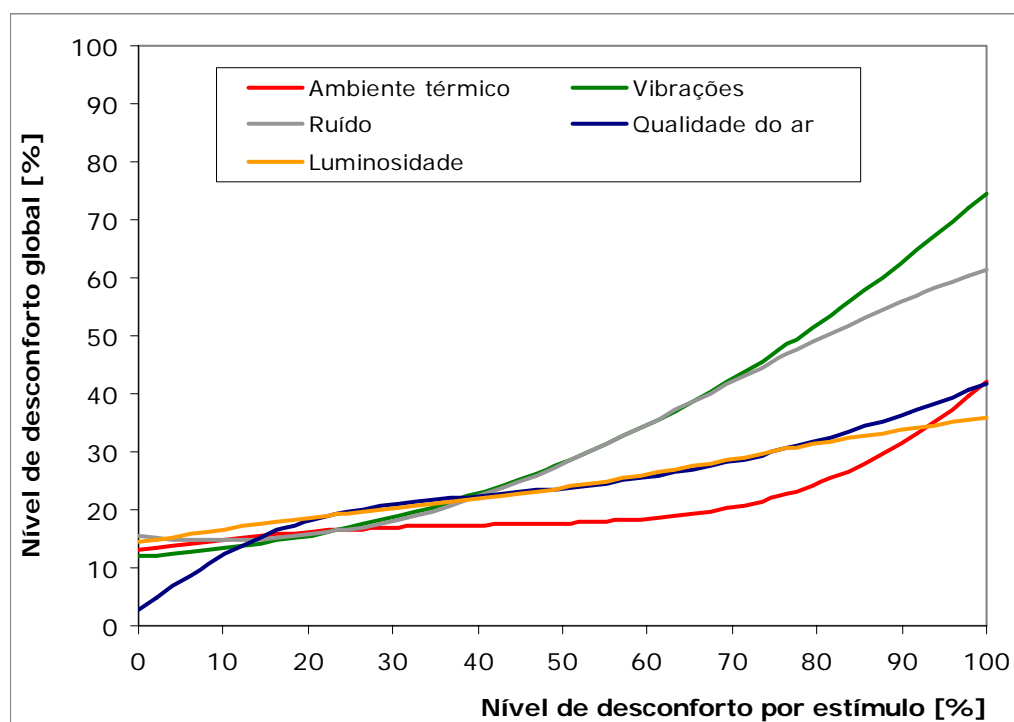


Figura 6.74 Nível de desconforto global calculado pela rede MLP em função do nível de desconforto por estímulo individual

A resposta da rede relativamente à interacção entre os diferentes estímulos apresenta-se nas figura 6.75, 6.76, 6.77 e 6.78. Assim, na figura 6.75 está representada a resposta da rede neuronal em função do nível de desconforto térmico e das vibrações, onde é visível a distribuição complexa da resposta do ser humano.

Analisando todas as relações entre estímulos, verifica-se que o ambiente térmico tem uma influência preponderante na resposta dos passageiros no interior dos autocarros, sendo no entanto mais tolerável em condições extremas do que o ruído ou as vibrações. Em sintonia com trabalhos citados em 4.8, a rede MLP indica uma reduzida influência no nível de desconforto global, quando conjugados o ambiente térmico com o ruído (ver figura 6.76).

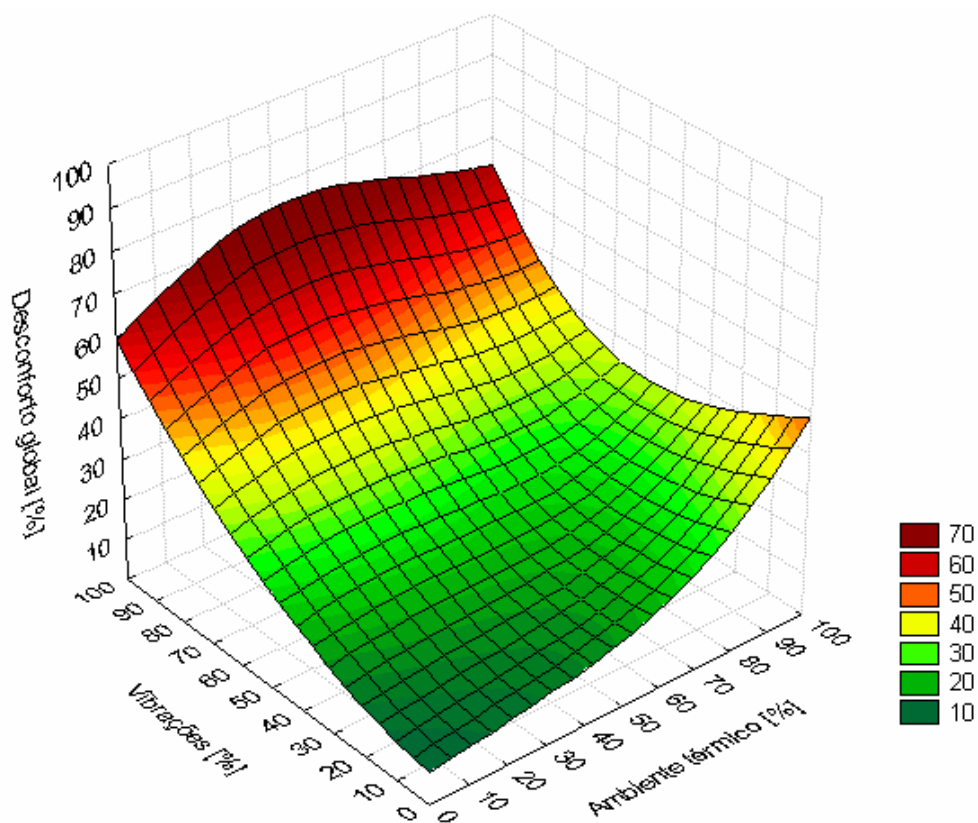


Figura 6.75 Desconforto global em função do ambiente térmico e das vibrações

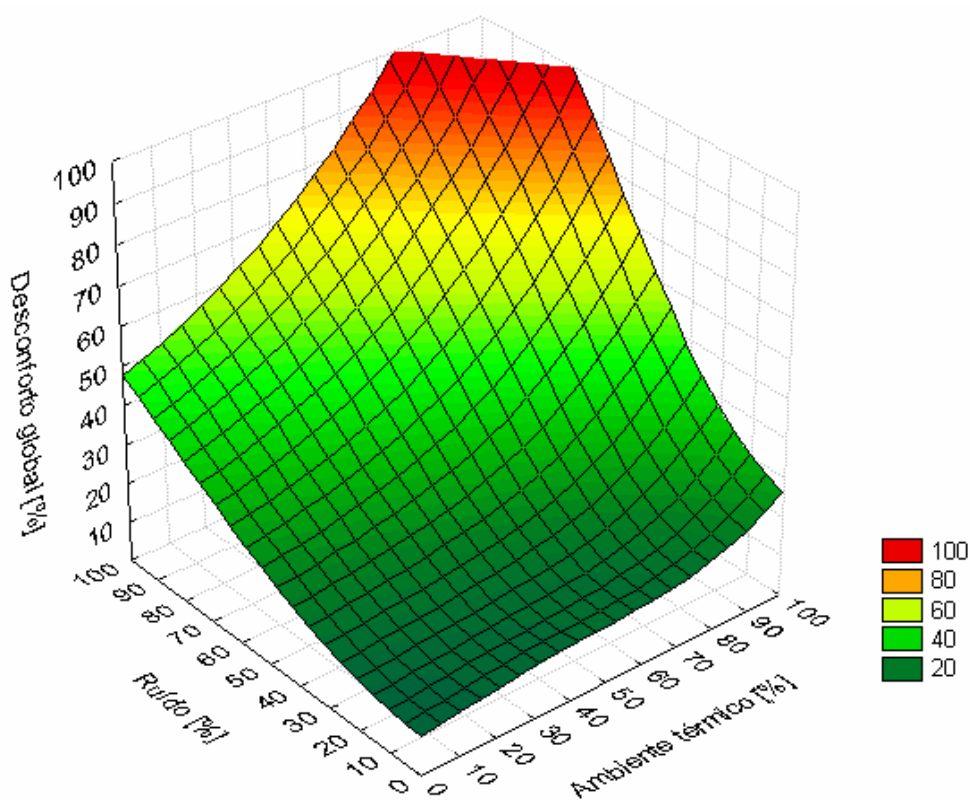


Figura 6.76 Desconforto global em função do ambiente térmico e do ruído

Na representação entre o efeito conjugado das vibrações com o ruído, verifica-se que estes estímulos, para condições individuais, só assumem um papel determinante na avaliação do desconforto global quando apresentam níveis de desconforto consideráveis (ver figura 6.77).

Na figura 6.78, apresenta-se o nível de desconforto global obtido pela rede neuronal em função dos dois parâmetros que obtiveram votações médias inferiores, ou seja, a qualidade do ar e a luminosidade. As redes do tipo MLP apresentam uma boa resposta na extrapolação de dados para além dos dados fornecidos, donde se pode verificar que apesar de estas variáveis terem tido votações máximas de 87% e 64%, respectivamente, caso as condições de desconforto conjugado entre elas aumentassem, o nível de desconforto global também iria ser bastante agravado. Esta situação não ocorreu em diversas conjugações entre estímulos de desconforto, como se pode observar nas diversas representações incluídas no anexo C.

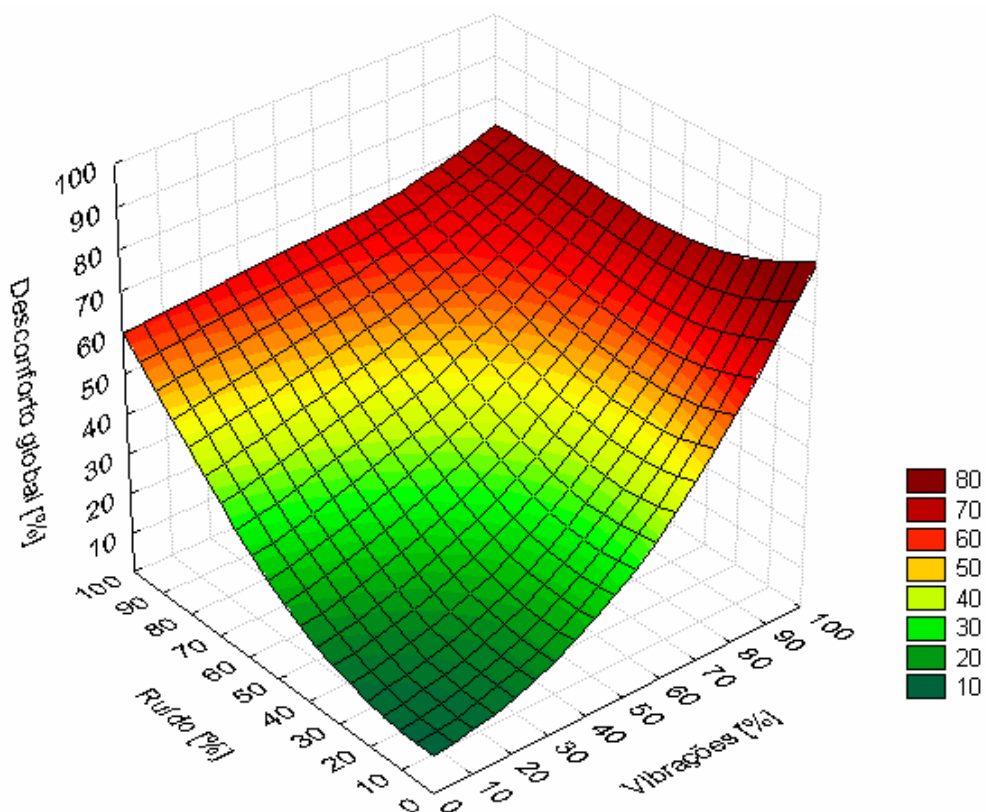


Figura 6.77 Desconforto global em função das vibrações e do ruído

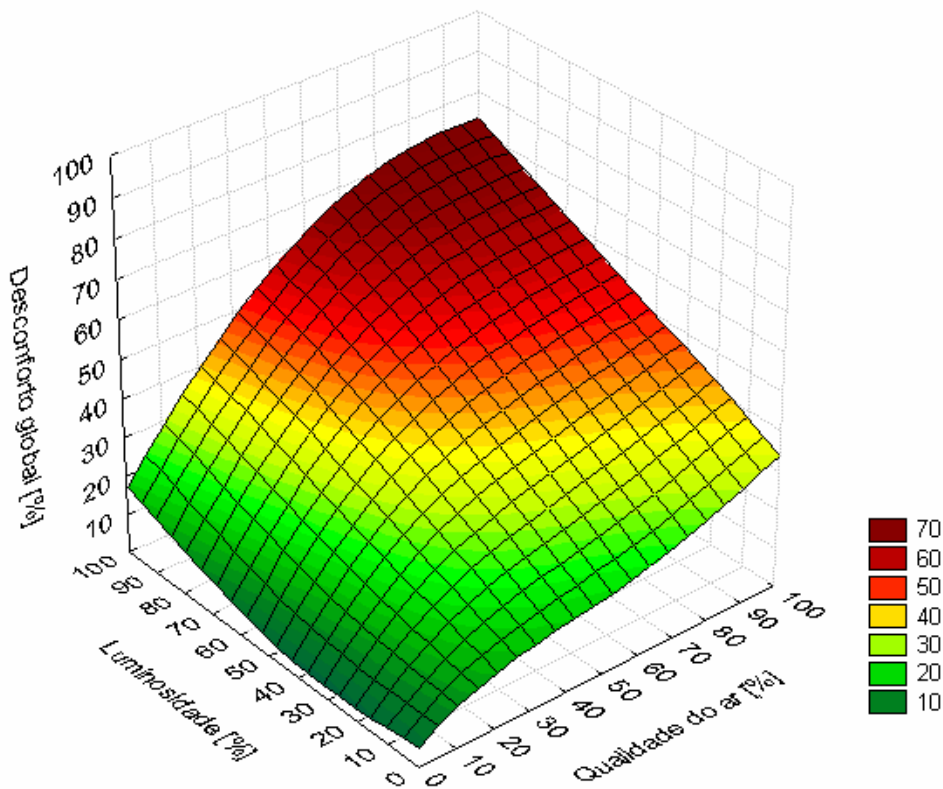


Figura 6.78 Desconforto global em função da qualidade do ar e da luminosidade

Na figura 6.79 representa-se um comparativo entre o nível de desconforto indicado por cada passageiro e o nível de desconforto calculado pela rede neuronal, estando indicado o coeficiente de correlação entre ambas as variáveis que é de 0,88. Este valor é notoriamente superior ao obtido em 1998, onde tinha sido obtida uma correlação de apenas 0,69. Para além da já referida alteração de metodologia de avaliação, também aqui há que salientar o facto do método de rede neuronal aplicado ser completamente distinto do utilizado anteriormente.

Face aos resultados obtidos e tal como referido aquando da introdução às redes neuronais artificiais, as mesmas demonstram uma melhor adaptação à modelação de problemas complexos, tal como o que aqui foi analisado, revelando-se uma forma adequada de modelar a resposta do ser humano relativamente ao nível de desconforto ambiental no interior dos autocarros.

De um modo geral, as metodologias experimentais desenvolvidas na avaliação de cada um dos estímulos de desconforto considerados apresentaram boas correlações entre os índices métricos objectivos seleccionados e as avaliações subjectivas dos passageiros. Apenas a avaliação da qualidade do ar, através da utilização do nível de concentração de dióxido de carbono como parâmetro objectivo, apresentou uma baixa correlação.

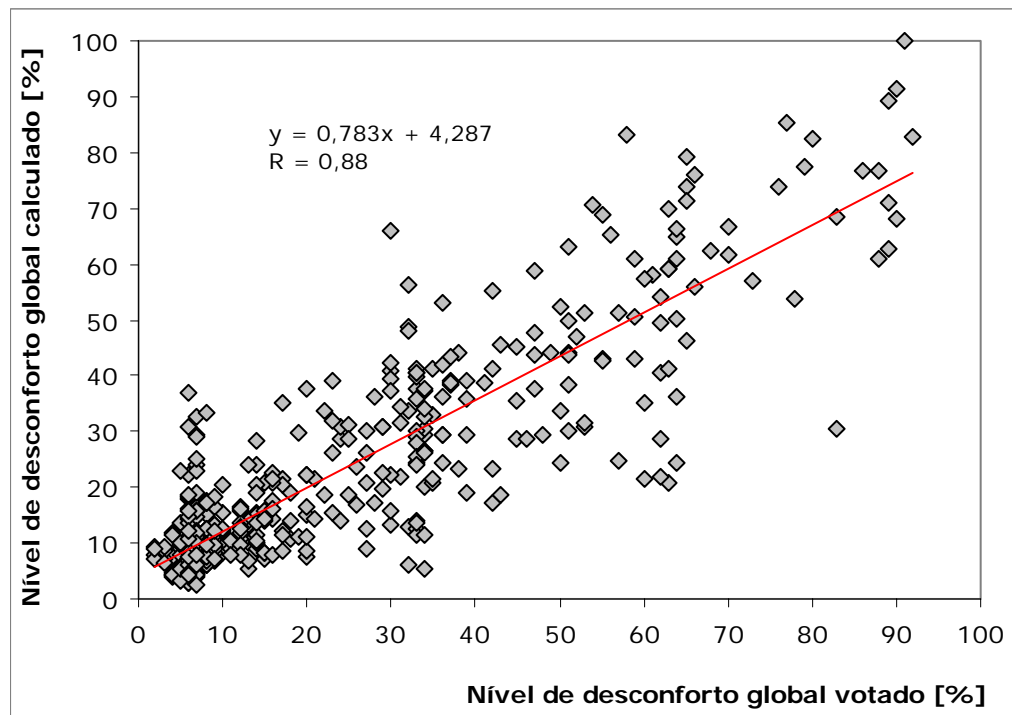


Figura 6.79 Nível de desconforto global obtido através da rede neuronal MLP 5-10-8-1 em função do nível de desconforto votado pelos passageiros

Utilizando os valores dos diversos parâmetros físicos após a sua conversão num nível de desconforto entre 0 e 100%, pode analisar-se o comportamento da rede obtida na previsão do nível de desconforto global baseado em medições objectivas. A representação gráfica dos valores obtidos face aos valores do nível médio de desconforto votado pelos avaliadores encontra-se na figura 6.80. Nesta, é notória a existência de um elevado coeficiente de correlação. Verifica-se que o nível de desconforto global obtido pela rede neuronal é notoriamente superior ao manifestado pelos passageiros.

Uma alternativa à utilização directa dos valores objectivos medidos consiste na sua ponderação em função das relações obtidas por estímulo, passando os mesmos a constituir os dados de entrada da rede neuronal artificial obtida. Na figura 6.81 apresentam-se os resultados desta análise onde existe um coeficiente de correlação de 0,92, sugerindo-se que o valor do nível de desconforto global seja corrigido pela expressão indicado nessa figura.

Face à globalidade dos resultados obtidos, conclui-se que a utilização do modelo de rede neuronal obtido para estimar o nível de desconforto ambiental global no interior dos autocarros conduz a bons resultados. Devem utilizar-se as relações obtidas entre os diversos parâmetros físicos e as escalas de desconforto parciais, assim se obtendo os parâmetros de entrada para a rede quantificar o nível de desconforto medido a partir das diversas grandezas físicas medidas.

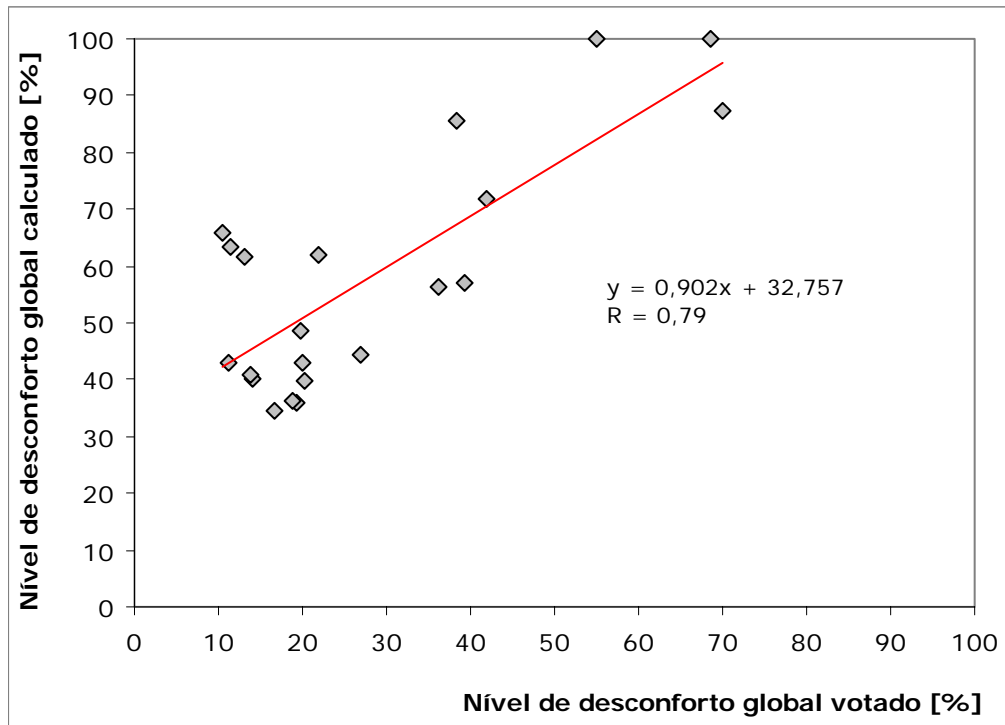


Figura 6.80 Nível de desconforto global calculado (MLP 5-10-8-1, sem ponderação das medições objectivas) em função do nível médio de desconforto votado pelos passageiros

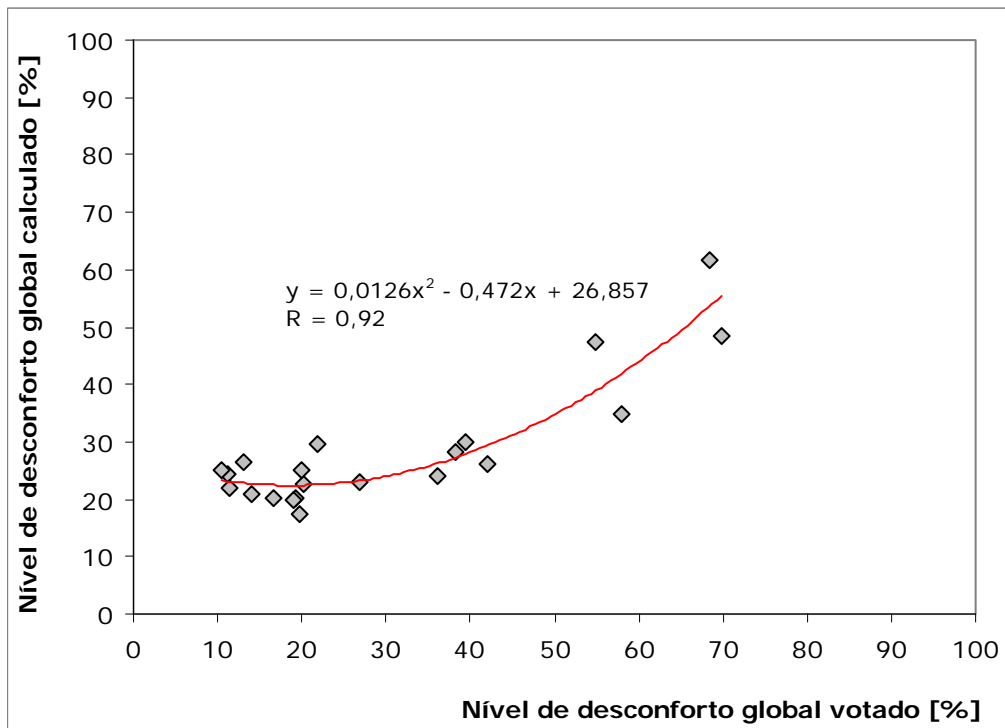


Figura 6.81 Nível de desconforto global calculado (MLP 5-10-8-1, com ponderação das medições objectivas) em função do nível médio de desconforto votado pelos passageiros

Os valores aqui apresentados demonstram uma considerável evolução face aos resultados apresentados pelo autor na sua dissertação de Mestrado (Alcobia, 1998), onde a modelação da resposta humana obteve como coeficiente de correlação mais elevado o valor de 0,38 entre os parâmetros físicos medido e o nível de desconforto global.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

7.1. Principais conclusões

O trabalho aqui reportado representa a continuidade de uma primeira abordagem sobre ergonomia ambiental em veículos apresentada pelo autor na sua dissertação de Mestrado (Alcobia, 1998). À data, uma das recomendações que foram sugeridas apontava para a necessidade de efectuar testes de uma forma mais controlada em relação aos estímulos a que os passageiros eram submetidos, sugerindo também a necessidade de utilizar tempos de exposição dos passageiros às condições ambientais superiores aos utilizados, que naquele trabalho, foram inferiores a dois minutos.

Assim, no âmbito do projecto Combistress, concluído em 2003 e através da elaboração de um projecto de investigação e desenvolvimento em estreita colaboração com um fabricante de autocarros, foi possível desenvolver novas metodologias de ensaios para avaliar o desconforto ambiental no interior dos veículos pesados de transporte de passageiros.

Desenvolveram-se duas metodologias de avaliação distintas estando uma ligada à avaliação psico-acústica do ruído no interior dos autocarros e outra, à avaliação, quer de uma forma objectiva, quer de um modo subjectivo, do desconforto ambiental nos veículos.

No que diz respeito à avaliação psico-acústica, esta constitui a primeira abordagem feita neste domínio no grupo de investigação que o autor integra. Foi desenvolvido um

sistema de gravação e reprodução de sons, por forma a que num ambiente controlado, possa proceder-se à avaliação subjectiva por parte das pessoas relativamente aos mesmos. Uma particularidade deste sistema é não ter aplicação exclusiva para a área dos veículos, podendo vir a ser utilizado na avaliação de produtos comerciais concorrentes, no desenvolvimento de produtos, na avaliação da qualidade sonora de salas de espectáculos e auditórios, etc. A utilização de um manequim de cabeça e tronco é um método de medição mais realista para avaliar a distribuição do campo sonoro, em redor do ser humano, do que propriamente, o recurso a um simples microfone.

Na análise dos inúmeros parâmetros métricos calculados para os sons avaliados, verificaram-se elevadas correlações do nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A com a sonoridade e com o índice de articulação.

Foram analisados diversos métodos subjectivos utilizados na psico-acústica, desenvolvendo-se um questionário de avaliação para obter o nível médio de desconforto acústico no interior dos autocarros.

Uma das principais conclusões obtidas da comparação entre os dados métricos objectivos e a avaliação subjectiva consistiu na modelação do nível de desconforto acústico através de um índice, designado *NDDA* (*Nível de Desconforto Acústico em Autocarros*), em que intervêm: o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A, o índice de articulação, a sonoridade e a agudez dos sons. Este índice foi obtido através de uma regressão linear múltipla e de uma rede neuronal artificial linear. Os dados utilizados na sua obtenção corresponderam à votação efectuada por um painel de avaliadores, constituído por 49 pessoas, relativamente a sons gravados no interior de autocarros.

Ao longo da análise dos diversos dados surgiram duas questões muito pertinentes: a primeira diz respeito à norma NP 1674 que, quer em comparação com os dados obtidos, quer em comparação com normas em vigor noutros países, apresenta valores limites de ruído no interior de veículos de transporte de passageiros pouco compreensíveis, sugerindo-se, por isso, a sua revisão; a segunda é que, face às análises em frequência efectuadas, a optimização destes veículos deve ser centrada nas frequências inferiores a 2800 Hz.

Relativamente à avaliação do desconforto ambiental global no interior dos autocarros, realizaram-se ao todo 31 percursos em autocarros de turismo e mini-autocarros, com a metodologia descrita no capítulo cinco, tendo sido registados valores métricos objectivos relativos a cada um dos estímulos considerados, bem como uma avaliação subjectiva acerca de cada estímulo e ainda sobre o nível de desconforto global. Os parâmetros métricos seleccionados para caracterizar as diferentes grandezas físicas foram os seguintes: a temperatura equivalente, para o ambiente térmico; o valor de

vibração total, para as vibrações; o nível sonoro contínuo equivalente, para o ruído; a concentração de dióxido de carbono, para a qualidade do ar, e a iluminância, para a luminosidade. No total obtiveram-se um total de 530 avaliações subjectivas dos passageiros relativamente ao desconforto ambiental, através de um questionário desenvolvido, onde os passageiros indicavam no final de cada percurso, a sua sensação de desconforto relativamente aos estímulos seleccionados e à avaliação relativa ao nível de desconforto global. Os passageiros não tiveram qualquer treino em relação ao ensaio, tendo a escolha sido feita de uma forma totalmente aleatória.

A avaliação do ambiente térmico baseou-se na utilização de um medidor de conforto térmico que permite obter a temperatura equivalente, tendo sido obtidos a partir desta os índices *PMV* e *PPD*. Estes índices apresentaram uma elevada correlação com as respostas subjectivas dos passageiros, recomendando-se assim a sua utilização como parâmetro métrico utilizado na caracterização do ambiente neste tipo de veículos. Apesar da boa correlação, verificou-se que estes índices, tal como nas avaliações efectuadas em 1998, sobrestimam o nível de desconforto. Assim, obteve-se uma expressão para corrigir este efeito e adaptar as medidas objectivas à sensibilidade expressa nas avaliações subjectivas. De referir ainda que os valores obtidos da temperatura equivalente, da temperatura do ar e da humidade relativa revelam que estes veículos podem evoluir bastante no sentido de incrementar o conforto proporcionado aos passageiros, com especial destaque para os mini-autocarros.

As vibrações representam o estímulo cujo parâmetro métrico objectivo obteve melhor correlação com os dados subjectivos. Neste domínio, desenvolveu-se um sistema de aquisição e processamento de dados de modo a obter o valor da vibração total de acordo com a norma ISO 2631. Foi apresentado um índice, designado por *NDVobj* (*Nível de Desconforto Vibracional objectivo*) que consiste em adaptar a escala de desconforto sugerida na norma para os valores de vibrações existentes nos autocarros. As medições efectuadas confirmaram os resultados publicados por alguns autores, onde os autocarros figuram como sendo o tipo de veículos que apresenta valores mais elevados de vibrações induzidas nos passageiros. Os dados subjectivos indicaram uma ligeira tendência para os níveis de desconforto serem mais elevados na parte traseira dos autocarros. Esta afirmação contudo não é conclusiva, pois, em diversos percursos efectuados, tal não se verificou.

O ruído revelou ser a grandeza que maior dificuldade apresenta na sua aquisição em virtude da sua leitura facilmente ser perturbada por campos de pressão localizados, tais como a simples conversação entre passageiros ou por qualquer abertura existente nos autocarros. Assim, é necessário um elevado controlo na sua medição, por forma a garantir que o valor obtido corresponde ao valor médio a que os passageiros foram

submetidos. Ainda assim, através dos ensaios realizados, obteve-se uma boa correlação do nível sonoro contínuo equivalente com as votações dos passageiros. A expressão obtida na avaliação psico-acústica entre o nível de pressão sonora ponderado em frequência pela curva A e o nível médio de desconforto acústico, revelou ser o método mais adequado para obter a melhor aproximação entre a avaliação objectiva e subjectiva.

A qualidade do ar foi caracterizada a partir do nível da concentração de dióxido de carbono, tendo sido a grandeza que apresentou pior correlação com as avaliações subjectivas dos passageiros. A melhor aproximação foi obtida através da expressão indicada na recomendação europeia EUR 14449 EN. De todos os estímulos considerados, este é, sem dúvida, aquele que apresenta maior dificuldade na sua substituição por processos analíticos baseados em sensores, sendo utilizados normalmente diversos métodos de forma complementar para avaliar a qualidade do ar interior, face à inexistência de um índice que quantifique a qualidade do ar em recintos fechados.

A luminosidade representou um desafio interessante, porquanto não é vulgar a sua quantificação como estímulo de desconforto relativamente aos passageiros de veículos de transporte colectivo de passageiros. Normalmente a sua inclusão está associada a avaliações de desempenho de determinadas tarefas, tais como a condução, ou outras. Os valores obtidos apresentaram uma boa correlação com a expressão obtida por Fisher em 1970.

A realização de viagens reais neste tipo de veículos com a aquisição de diversas grandezas físicas permitiu fazer um diagnóstico dos mesmos relativamente a estas matérias. Através do diagnóstico efectuado e tendo sido identificadas algumas situações que permitem incrementar o conforto dos passageiros, surge uma nova etapa que consiste em introduzir modificações na montagem dos veículos de modo a minimizar estes estímulos de desconforto.

O objectivo final, numa avaliação deste género, consiste em analisar a viabilidade de conjugar o desconforto dos diversos estímulos num único índice que consiga modelar a complexa resposta do cérebro humano. Assim, após uma primeira análise onde se verificou a consistência dos dados obtidos por estímulo, bem como a relação entre o valor médio dos diversos estímulos com o desconforto global, optou-se por utilizar duas técnicas de modelação matemática: regressão linear múltipla e redes neuronais artificiais.

Na análise comparativa feita entre os diversos estímulos verificou-se que o ambiente térmico, as vibrações e o ruído foram os estímulos que apresentaram níveis globais de desconforto mais elevados, enquanto a luminosidade apresentou as médias

mais baixas, por um lado, bem como uma menor dispersão nas votações dos passageiros, por outro.

Relativamente à modelação das respostas dos passageiros, os resultados obtidos demonstraram uma clara vantagem na utilização das redes neuronais artificiais, tendo sido eleita uma rede neuronal artificial de retropropagação (MLP 5-10-8-1), para simular a resposta dos passageiros. Esta rede representa a obtenção do designado passageiro virtual que, face às relações obtidas entre os diversos parâmetros físicos e as escalas de desconforto parciais, permitem utilizar estes últimos como parâmetros de entrada, por forma a que a rede neuronal quantifique o nível médio de desconforto global medido a partir das diversas grandezas físicas medidas.

A modelação assim obtida representa uma excelente ferramenta que pode ser utilizada com distintas finalidades, tais como na fase de desenvolvimento ou de protótipo de autocarros, durante o fabrico dos veículos, na avaliação e comparação dos níveis de desconforto ambiental global num veículo ou simplesmente para efectuar medições comparativas entre veículos.

Fazendo um balanço entre os objectivos iniciais estabelecidos e os alcançados, o resultado é claramente positivo, pois, não só se desenvolveram métodos de medida e metodologias de avaliação com bons resultados finais, como simultaneamente se elaborou o projecto de investigação Autocomfort, onde a ergonomia ambiental em veículos representa a maioria das actividades nele descritas. Este projecto já se encontra aprovado e irá permitir a execução de algumas das tarefas indicadas na secção seguinte.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Após as diversas melhorias registadas na avaliação dos níveis de desconforto ambiental no interior de veículos, serão indicadas de seguida algumas sugestões para trabalhos futuros a realizar nesta área.

Deverá procurar-se aumentar a correlação do índice de desconforto acústico para autocarros obtido com a avaliação em situações de viagens reais. Para tal, recomenda-se a realização de viagens nas quais exista uma elevada atenção na aquisição desta grandeza. Ainda na área da acústica, aproveitando as ferramentas já desenvolvidas, podem analisar-se soluções construtivas em termos de isolamento e condicionamento acústico do habitáculo, devendo essa análise focar-se essencialmente nas frequências inferiores a 2800 Hz.

O sistema desenvolvido para a aquisição e análise das vibrações pode actualmente ser simplificado, tornando-se mais versátil e portátil face ao aparecimento de

acelerómetros tri-axiais cujo sinal eléctrico de saída consiste numa variação de tensão, ao invés dos anteriores que consistiam numa variação de carga. Também o surgimento de placas de aquisição portáteis que incorporam o condicionador de sinal poderá contribuir para a simplificação dos equipamentos. Refira-se que esta alteração não implica nenhuma alteração no software desenvolvido.

A avaliação da qualidade do ar e o modo como esta é interpretada pelo ser humano representa o maior desafio em termos de estímulo de desconforto individual. Nesta fase, aconselha-se uma pesquisa de diferentes abordagens relativamente às que foram utilizadas neste trabalho, tentando obter um parâmetro métrico que melhor se adequa à avaliação feita pelos passageiros, da qualidade do ar no interior dos veículos.

Um equipamento de medida que seria bastante útil para avaliar os diversos estímulos de desconforto ambiental consiste num manequim multi-sensorial, que tornaria possível a medição de todos os parâmetros ambientais no mesmo assento do veículo e diminuiria a variedade de software actualmente utilizado, ao qual estaria, naturalmente associada uma enorme poupança de tempo para efectuar, quer as medições, quer a sua análise posterior. Através das modelações parciais sobre cada uma das grandezas físicas, dos coeficientes da rede neuronal obtida e da expressão indicada na figura 6.80 o manequim pode prever o nível de desconforto parcelar bem como o nível de desconforto global dos passageiros.

Atendendo ao diagnóstico efectuado aos autocarros, é agora possível estabelecer um plano de melhoria relativamente a alguns estímulos de desconforto para tentar minimizar os mesmos. O manequim multi-sensorial constituiria uma ferramenta muito útil nesta optimização porquanto permitiria avaliar rapidamente os resultados das alterações introduzidas.

Uma ideia ambiciosa e que seria provavelmente a mais adequada é a construção de um simulador de um autocarro com capacidade de reproduzir e controlar as diversas grandezas ambientais consideradas como estímulos de desconforto. Através de um simulador destes, seria possível testar em laboratório diferentes soluções de montagem para diversos estímulos, incluindo aspectos ergonómicos antropométricos bem como soluções de design, permitindo a realização de avaliações subjectivas com um elevado controlo sobre os diversos parâmetros.

Outra área a explorar seria a utilização e integração dos modelos computacionais obtidos, quer seja o relacionado com o desconforto acústico quer seja o relacionado com o nível de desconforto global, com outras ferramentas computacionais, de modo a, numa fase de design, conseguir prever-se para determinadas opções construtivas o nível de desconforto médio.

Por último, seria interessante testar o modelo obtido noutro tipo de veículos por forma a verificar a sua adaptabilidade. Na situação deste apresentar um baixo desempenho, poderia ser utilizada uma metodologia idêntica à que foi seguida nos autocarros, para assim obter os dados objectivos e subjectivos necessários à modelação da resposta nos veículos de interesse.

Bibliografia

- Adams, D., Gordon, B.M., Nghi, T. e Salloum, J. (1999). Creating a biofidelic seating surrogate. *SAE technical paper 1999-01-0627*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Aizlewood, M. (2001). Appendix C: Assessment of glare in Veld, M., & Christoffersen, J. Monitoring procedures for the assessment of daylighting performance of buildings. *A report of IEA SHC Task 21/ ECBCS Annex 29*.
- Alcobia, C.J. e Silva, M.C.G. (1999). Comfort evaluation in public transportation buses. *SAE technical paper 1999-01-0894*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Alcobia, C.J.O.P.J. (1998). *Contribuição para o Desenvolvimento de um Índice Global de Conforto para Veículos de Transporte de Passageiros*. Tese de Mestrado em Ciências de Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. 114 pp.
- Amnan, S. e Blommer, M.A. (1999). Psychoacoustic considerations in vehicle ergonomic design. *SAE technical paper 1999-01-1269*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Anderson, J.A., e Rosenfeld, E. (1988). *Neurocomputing: Foundations of research*. MIT Press. Cambridge. ISBN-13: 978-0262510486.
- ANSI-S3.5 (1969). *Methods for the calculation of the Articulation Index*. American National Standard.
- ASHRAE 55 (1992). *Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- ASHRAE 62 (1989). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- Baret, C., Lorea, A., Corsi, M. e Macheda, F. (1992). Analysis of rattling in a car transmission. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of*

- the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 985–999.
- Basheer, I.A. (1998). *Neuromechanistic-based modelling and simulation of constitutive behaviour of fine-grained soils*. Ph.D. Thesis. Kansas State University, Manhattan, USA. 435 pp.
- Baumann, I., Bellmann, M., Buss, S., Freese, N., Groll-Knapp, E., *et al.* (2003). The assessment of load, strain and comfort of flight crew and cabin crew in a cabin simulator – test design. In: *Proceedings of euronoise*. Naples, Italy, 2003, paper ID: 486.
- Bendat, J.S. (1986). *Random data - analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-04000-2.
- Berglund, L. e Cain, W.S. (1989). Perceived air quality and the thermal environment. In: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (eds.). *Proceedings of IAQ'89. San Diego, Atlanta, USA*. pp. 93-99.
- Berta, C. e Braschi, P.L. (1999). New tools and methods in body testing for noise reduction in vehicle passenger compartment. In: Associazione Tecnica dell'Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference of ATA*. Florence, Italy, November 1999. ATA Paper 99A4032.
- Bisping, B., Giehl, S. e Vogt, M. (1997). A standardized scale for the assessment of car interior sound quality. *SAE technical paper 971976*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Bodmann, H.W. (1967). Quality of interior lighting based on luminance. *Transaction of Illuminating Engineering Society*. **32**(1): 22-40.
- Bodmann, H.W. e La Toison, M. (1994). Predicted brightness - luminance phenomena. *Lighting Research and Technology*. **26**: 135-143.
- Botsford, J.H. (1971). A wet globe thermometer for environmental heat measurement. *American Industrial Hygiene Association Journal*. **32**: 1-10.
- Bowman, J.S. e Beckh, J. (1979). Physiologic and performance measurements in simulated airborne combined stress environments. *Aviation Space Environment Medicine*. **50**(6): 604-608.
- Boyce, P.R. (1981). *Human factors in lighting*. Applied Science Publishers, London.
- Boyce, P.R. (2003). *Human factors in lighting. 2^a edition*, Taylor & Francis. New York.
- Brambilla, G., Flindell, I.H. e Rice, C.G. (1992). Noise quality in cars: field evaluation versus laboratory assessment. In: Associazione Tecnica dell'Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 1045-1082.

- Broadbent, D.E. (1971). *Decision and Stress*. Academic Press, London.
- Brown, S.K. (1997). *Indoor air quality*. Australia: State of the Environment Technical Paper Series (Atmosphere), Department of the Environment, Sport and Territories, Canberra. ISBN: 0-642-25279-3.
- Bullough, J.D., Fu, Z. e Derlofske, J.V. (2002). Discomfort and disability glare from halogen and HID headlamp systems. *SAE technical paper 2002-01-0010*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Campos, J., Silva, M.C. e Alcobia, C.J. (2005). Registo e análise de vibrações dos disparos de ensaio para validação das condições de trabalho de desmonte com explosivos. *Relatório técnico elaborado no âmbito do prolongamento da linha vermelha do Metropolitano de Lisboa EP*. Julho de 2005.
- Carine, P., Frédéric, L. e Frédéric, G. (2004). The evolution of air quality technologies for the car cabin: from a component to a smart air quality management system, an example: the photocatalysis module. In: *Proceedings of FISITA 2004 World Automotive Congress*. Barcelona, Spain, 23-27 May 2004. Paper ID: F2004U124.
- Castellini, P.M., Gasparetti, N. e Paone, N. (1996). LDV measurement in a full-scale passenger car-cabin. In: *Proceedings of the 8th International Symposium of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisboa, Portugal, Julho 1996.
- CEN CR 1752 (1998). *Ventilation for buildings – design criteria for the indoor environment*. European Committee for Standardisation. CEN Brussels.
- CEN prEN15251 (2005). *Criteria for the Indoor Environment including thermal, indoor air quality, light and noise*. European Committee for Standardisation. CEN Brussels.
- Cerrato-Jay, G. e Crewe, A. (1999). The use of jury testing techniques in the development of an intelligent SQ system. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference of ATA*. Florence, Italy, November 1999.
- Chaffin, D.B. (2001). *Digital human modeling for vehicle and workplace design*. Society of Automotive Engineers. ISBN: 0-7680-0687-2.
- Chang, J.K. e Kim, J.B. (1993). Investigation of bus duct system for optimum cooling performance. *SAE technical paper 931956*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Chauvel, P., Collins, J.B., Dogniaux, R. e Longmore, J. (1982). Glare from windows: Current views of the problem. *Lighting Research and Technology*, **14**(1): 31-46.
- Chen, Q. e Dalhuijsen, A.J. (1992). A design tool for optimal thermal comfort and air quality in a passenger's car. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 261-271.

- Cheng, P. (1999). Static electricity in automotive interiors. *SAE technical paper 1999-01-0631*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Chow, W.K. (2002). Ventilation of enclosed train compartment in Hong Kong. *Applied Energy*. **71**(3): 161-170.
- CIBSE (1994). *Code for Interior Lighting*. Chartered Institute of Building Services Engineers, London.
- CIBSE Guide A (1993). *Environmental design*. Chartered Institution of Building Services Engineering.
- 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.
- CIE 93 (1992). *Road lighting as an accident countermeasure*. International Commission on Illumination.
- Cisternino, M. (1999). Thermal climate in cabs and measurements problems. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference of ATA*. Florence, Italy, November 1999. Equiv, Seminar II.
- Clausen, G., Carrick, L., Fanger, P.O. e Kim, S.W. (1993). A comparative study of discomfort caused by indoor air pollution, thermal load and noise. *Indoor Air*. **3**: 255-262.
- Cocchi, A. (1992). Thermal comfort and air pollution inside vehicles. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 423-426.
- Conceição, E.Z.E. (1996). *Estudo Aero-Térmico de Habitáculos de Veículos de Transporte de Passageiros*. Tese de Doutoramento em Ciências de Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. 273 pp.
- Conceição, E.Z., Silva, M.C. e Viegas, D.X. (1997). Air quality inside the passenger compartment of a bus. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* **7**(4): 521-534 pp.
- Conceição, E.Z., Silva, M.C. e Viegas, D.X. (1998). Airflow around a passenger seated in bus. *HVAC&R Research*. ASHRAE transactions n° 4156. **3**: 311-323 pp.
- Corbridge, C. (1987). *Vibration in vehicles: its effect on comfort*. Ph.D. Thesis. University of Southampton. 483 pp.
- Coutelier, B., e Dumortier, D. (2004). Luminance calibration of the Nikon Coolpix 990 digital camera. *Proceedings of the International Commission on Illumination (CIE) 2003 Conference*. San Diego, CA. pp. 56-59.

- CUNA 504-02 (2004). *Veicolo stradali adibiti al trasporto di persone - Limiti della rumorosità interna*. Commissione Tecnica di Unificazione nell'Autoveicolo. Italia.
- Dear, R.J. e Brager, G.S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Technical Data Bulletin*. **14**(1): 27-49.
- Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril de 2006. *Diário da República nº 67 – I Série-A*. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Lisboa.
- Della Rolle, C., Fubini, E. Menicali, I. (1992). Improved test methodologies on motor vehicle thermal comfort from the user's standpoint. In: Associazione Tecnica dell'Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 281-287.
- Departamento de Protecção Ambiental (Environmental Protection Department) (2003). *Practice note for managing air quality in air-conditioned public transport facilities: Buses*. Wan Chai. Hong-Kong.
- DIN 45631 (1991). *Procedure for calculating loudness level and loudness*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN 1946-2 (1995). *Ventilation and air conditioning; technical health requirements (VDI ventilation rules)*. Beuth Verlag GmbH.
- Dorey, R.E. e Martin, E.J. (2000). Assessing and analyzing driveability. *Automotive Engineering International*. **108**: 127-30.
- Dumur, E., Barnard, Y. e Boy, G. (2004). Designing for comfort. In: D. de Waard, K.A. Brookhuis e C.M. Weikert (eds.), *Human Factors in design*. Maastricht, the Netherlands, Shaker Publishing. pp. 111-127.
- Einhorn, H.D. (1969). A new method for the assessment of discomfort glare. *Lighting Research and Technology*. **1**(4): 235-247.
- Einhorn, H.D. (1979). Discomfort glare: A formula to bridge differences. *Lighting Research and Technology*. **11**(2): 90-94.
- Einhorn, H.D. (1998). Unified Glare Rating (UGR): Merits and application to multiple sources. *Lighting Research and Technology*. **30**(2): 89-93.
- EN 12193 (1999). *Light and lighting – Lighting of work places, Part 1: Indoor work places*. European Committee for Standardisation. CEN Brussels.
- EN 12464-1 (2002). *Light and lighting – Sports lighting*. European Committee for Standardisation. CEN Brussels.
- EQUIV (1999). *Development of standard test methods for evaluation of thermal climate in vehicles*. EU-project SMT 4 CT95-2017.

- EUR 14449 EN (1992). Indoor Air Quality: its Impact on Man. *Report n° 11, Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings*. European Committee for Standardisation. CEN Brussels.
- Fanger, P.O. (1972). *Thermal comfort*. Danish Technical Press.
- Fanger, P.O. (1988a). The new comfort equation for indoor air quality. *ASHRAE Journal*, October 1989.
- Fanger, P.O. (1988b). The Olf and Decipol: New units established to quantify how air quality is perceived by human beings. *ASHRAE Journal*. October 1988.
- Fanger, P.O., Berg-Munch, B. (1983). Ventilation requirements for the control of body odour. In: *Proceedings of the 2nd International Congress Build Energy Management*. Ames, Iowa, USA.
- Fanger, P.O., Breum, N.O. e Jerking, E. (1977). Can color and noise influence man's thermal comfort?. *Ergonomics*. **20**: 11-18.
- Fechner, G.T. (1860). *Elemente der psychophysik*. Thoemmes Continuum.
- Fekete, J., Sik-Lányi, C. e Shanda, J. (2005). Night-time driving – new light sources in car headlamps – visibility and glare. In: *CIE Midterm Meeting and Congreso Internacional de Iluminación*, León, Spain, 2005.
- Fisekis, K., Davies, M., Kolokotroni, M. e Langford, P. (2003). Prediction of discomfort glare from windows. *Lighting Research and Technology*. **35**(4): 360-371.
- Fish, D.G., Roberts, S.N. e Franco-Jorge, M. (1999). Experimental modelling techniques for understanding road noise. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference of ATA*. Florence, Italy, November 1999. ATA Paper 99A4023.
- Fisher, D. (1970). Optimale beleuchtungs-niveaus in arbeitsräumen. *Lichttechnik* 22.
- Freiberger, R.D. (1995). *Infra-red comfort sensor*. Delco Electronics Corporation. Kokomo Ind., United States Patent Number 5400964.
- Fung, W. (1995). Some investigations into the relationship between car seat cover materials and thermal comfort using human subjects. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 29-31 March 1995. pp. 461-480.
- Gagge, A.P. (1937). A new physiological variable associated with sensible and insensible perspiration. *American Journal of Physiology*. **120**: 277-287.
- Gagge, A.P., Burton, A.C. e Bazzet, H.D. (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. e Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological responses during exercises at various ambient temperatures. *ASHRAE Transactions*. **77**(1): 247-262.
- Galatsis, K., Wlodarski, W., Wells, B. e McDonald, S. (2000). Vehicle cabin air quality for fatigue and suicide prevention. *SAE technical paper 2000-01-0084*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Garth, A.D.N., Rollins, D.K., Zhu, J., e Chen, V.C.P. (1996). Evaluation of model discrimination techniques in artificial neural networks with application to grain drying. In: Dagli, C.H. et al. (eds.). *Proceedings of the Artificial Neural Networks in Engineering (ANNIE'96)*. **6**: 939-950.
- Gebauer, W., Kaiser, B., Tilch, R. e Sponsel, R. (1988). A chassis dynamometer for evaluating vibration, noise and ride comfort in motor vehicles. *The Motor Industry Research Association*, April 1988.
- Genuit, K. e Bray, W.R. (2001). A virtual car: prediction of sound and vibration in an interactive simulation environment. *SAE technical paper 2001-01-1474*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Giuliano, F. e Ugo, A. (1992). Experimental assessment of ride comfort: a statistical approach. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 505-515.
- Grether, W.F., Harris, C.S. e Mohr, G.C. (1971). Effects of combined heat, noise and vibration stress on human performance and physiological function. *Aerospace Medicine*. **42**: 1092-1097.
- Grether, W.F., Harris, C.S. e Ohlbaum, M. (1972). Further study of combined heat, noise and vibration stress. *Aerospace Medicine*. **43**: 641-645.
- Grieve, P.W. (1991). *Measuring Ventilation using Tracer-Gases*. Brüel & Kjær Technical Review, Nærum, Denmark.
- Griffin, M.J. (1990). *Handbook of Human Vibration*. Academic Press, London, ISBN 0-12-303040-4.
- Griffin, M.J. (1995). The ergonomics of vehicle comfort. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 29-31 March 1995. pp. 213-223.
- Griffin, M.J., Parsons, K.C. e Whitham, E.M. (1979). Six axis vehicle vibration and its effects on comfort. *Ergonomics*. **22**(2): 211-225.
- Grivel, F., Herrmann, C., Candas, F. e D'Ambrosio, F.R. (1992). Thermal comfort analysis: subjective data collection, methodology and reference condition. In:

- Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 371-381.
- Gucciardino, A., Giglio, G., Cannone, L. e Federeci, A. (1992). Noise and vibrations in the ergonomic evaluations of the military vehicles. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 525-545.
- Guyton, A.C. e Hall, J.E. (1986). *Fisiologia umana e meccanismos das doenças*. Guanabara Koogan. Rio de Janeiro.
- Hamm, M. e Steinhart, R. (1999). Xenon light and its impact on traffic safety aspects. *Progress in Automotive Lighting Symposium*. Darmstadt. Germany.
- Hancock, P.A. e Pierce, J.O. (1985). Combined effects of heat and noise on human performance: a review. *American Ind. Hygiene Association Journal*. **46**: 555-566.
- Hanson, S.J. (1995). Some comments and variations on Back-propagation. In: Y. Chauvin & D. Rummelhart (eds.). *The Handbook of Back-propagation*. New Jersey. pp. 292-323.
- Harrison, M. (2004). *Vehicle refinement: Controlling noise and vibration in road vehicles*. Society of Automotive Engineers, Inc. ISBN: 978-0-7680-1505-8.
- Hassoun, M.H. (1995). *Fundamentals of artificial neural networks*. MIT Press. Cambridge.
- Haykin, S. (1999). *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall.
- Hebb, D.O. (1963). *The organization of behaviour: a neuropsychological theory*. John Wiley and Sons. New York. ASIN: B0007HPQ32.
- Hecht-Nielsen, R. (1990). *Neurocomputing*. Addison-Wesley. ISBN-13: 978-0201093551.
- Hensel, H. (1952). Physiology der thermoreception. *Ergeb. der Physiology*. **47**: 166-368.
- Holmér, I., Nilsson, H., Bohm, M. e Noren, O. (1995). Thermal aspects of vehicle comfort. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 29-31 March 1995. pp. 391-399.
- Holmér, I., Nilsson, H., Bohm, M., Browen, A. e Norén, O. (1992). Evaluation of thermal environment in automotive vehicles. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 295-301.
- Holmér, L., Nilsson, H., Bohm, M. e Norén, O. (1999). Equivalent temperature in vehicles: conclusions and recommendations for standard. In: Associazione Tecnica

- dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference of ATA*. Florence, Italy, November 1999. Equiv, Seminar II.
- Hopfield, J.J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 79. pp. 2554-2558.
- Hopkinson, R.G. (1950). The multiple criterion technique of subjective appraisal. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*. **2**: 124-135.
- Hopkinson, R.G. (1963). *Architectural Physics: Lighting*. London, UK: Her Majesty's Stationery Office.
- Hopkinson, R.G., e Bradley, R.C. (1960). A study of glare from very large sources. *Illuminating Engineering*. **55**(5): 288-294.
- Hopkinson, R.G., e Collins, J.B. (1970). *The ergonomics of lighting*. London, UK: McDonald & Co.
- Hopkinson, R.G., e Collins, W.M. (1963). An experimental study of the glare from a luminous ceiling. *Transaction of Illuminating Engineering Society*. **28**(4): 142-148.
- Hopkinson, R.G., Petherbridge, P. e Longmore, J. (1966). *Daylighting*. Heinemann. London, UK.
- Horie, G., Sakurai, Y. Narguchi, T. e Matsubara, N. (1985). Synthesized evaluation of noise, lighting and thermal conditions in a room. In: *Proceedings of Noise Control 85*. Krakow, pp. 491-496.
- Hosni, M.H., Guan, Y., Jones, B. e Giolda, T. (2003). Quantitative Measurement of Thermal Comfort under Transient and Non-Uniform Conditions in Vehicles. *SAE technical paper 2003-01-2232*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Houghten, F.C. e Yaglou, C.P. (1923). *Transactions*. ASHVE Research Report N° 673.
- Humphreys, M.A. (2005). Quantifying occupant comfort: are combined indices of the indoor environment practicable? *Building Research & Information*. **33**(4): 317-325.
- IEC 651 (1979). *Sound Level Meters*. International Electrotechnical Commission.
- IESNA (2000). *Lighting Handbook*. 9th edition, Illuminating Engineering Society of North America. New York.
- Inagaki, H., Taguchi, T., Yasuda, E. e Iizuka, Y. (2000). Evaluation of riding comfort: from the viewpoint of interaction of human seat for static, dynamic long time driving. *SAE technical paper 2000-01-0643*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Inkarojrit, V. (2005). *Balancing Comfort: Occupants' Control of Window Blinds in Private Offices*. Ph.D. Thesis. University of California, Berkeley. 261 pp.
- International Commission on Illumination (CIE) (1983). *Discomfort Glare in the Interior Working Environment*, Publication CIE No. 55 (TC-3.4). Paris: Commission Internationale de l'Eclairage.

- Irato, G. e Ruspa, G. (1992) Influence of the experimental setting on the evaluation of subjective noise quality. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 1033–44.
- ISO 14505-3 (2006). *Ergonomics of the thermal environment: Evaluation of thermal environments in vehicles - Part 3: Evaluation of thermal comfort using human subjects*. International Standard Organization. Genève. Switzerland.
- ISO 15742. *Ergonomics of the Physical Environment combined effects of thermal environment, air pollution, acoustics and illumination*. Current work programme - ISO TC 159 SC5. International Organization for Standardization. Genève, Switzerland.
- ISO 2631 (1985). *Mechanical vibration and shock- Evaluation of human exposure to whole-body vibration*. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland.
- ISO 2631 (1997). *Mechanical vibration and shock- Evaluation of human exposure to whole-body vibration*. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland.
- ISO 5128 (1980). *Acoustics – Measurement of noise inside motor vehicles*. International Organization for Standardization. Genève, Switzerland.
- ISO 532 (1975). *Acoustics – Methods for calculating loudness level*. International Organization for Standardization. Genève, Switzerland.
- ISO 5349 (2001). *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration*. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland.
- ISO 7726 (1985). *Thermal environment - Instruments and methods for measuring physical quantities*. International Organization for Standardization. Genève, Switzerland.
- ISO 10326-1 (1992). *Mechanical vibration – Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration – Part 1: Basic requirements*. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland.
- ISO 7730 (2005). *Moderate thermal environments: Determination of the PMV and PPD indices and the specifications of the conditions for thermal comfort*. International Standard Organization. Genève. Switzerland.
- ISO/TR 3352 (1974). *Acoustics – Assessment of noise with respect to its effect on the intelligibility of speech*. International Organization for Standardization. Genève, Switzerland.

- Iwata, T. e Tokura, M. (1998). Examination of the limitations of predicted glare sensation vote (PGSV) as a glare index for a large source. *Lighting Research and Technology*. **30**(2): 81-88.
- Iwata, T., Kimura, K., Shukuya, M. e Takano, K. (1990). Discomfort caused by wide-source glare. *Energy and Buildings*. **15**: 391-398.
- Jain, A.K. e Mao, J. (1996). Artificial neural networks: a tutorial. *IEEE Computer*, March 1996. pp. 31-44.
- Janckzewski, J. (1999). IAQ on passenger planes—a look at the issues and debate. *ASHRAE Journal*. **41**: 18-22.
- Jokl, M.V. (1998). New units for indoor air quality: decicarbdióx and decitvoc. *International Journal of Biometeorology*. **42**: 93-111.
- Kim, I.K., Jin, B.S., Lee, J.H., Lee, C., Ji, Y.G. e Yun, M.H. (2006). Development of structural methods of ride comfort for high speed rail passengers using a quantification method. In: *Proceedings of the 16th World Congress on Ergonomics (IEA)*. Maastricht, The Netherlands, 10-14 July 2006.
- Kim, T. e Park, S. (2001). Dynamic ride quality investigation and DB of ride values for seven passengers and RV cars. *SAE technical paper 2001-01-0384*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Kiraly, A. (1987). Effect of noise and vibration control in coaches. *International Journal of Vehicle Design*. **8**(5): 411-417.
- Klemp, K., Herwig H., Kiel, R. e Wickern, G. (1991). LDA measurements in a model of a passenger car-cabin. *Dantec Information*. **10**: 2-4.
- Kohri, I., Kataoka, T. e Fusada, Y. (1995). Evaluation method of thermal comfort in a vehicle by SET* using thermal manikin and theoretical thermoregulation model in man. *ImechE*. pp. 357-363.
- Komoriya, T. (1992). Estimation method of passengers thermal comfortability. *Using Thermoregulation Model Automotive Engineering*. **46**(9): 48-53.
- Kozawa, Y., Sugimoto, G. e Suzuki, Y. (1986). A new ride comfort meter. *SAE technical paper 860430*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Kryter, K.D. (1962). Methods for the calculation and use of the Articulation Index. *Journal of Acoustic Soc. American*. **34**(11): 1689-1697.
- Lang, E., Banhidi, L. e Antalovits, M. (1994). A complex psycho - physiological method to access environmental effects on objective and subjective parameters of humans in simulated work of setting. In: *Proceedings of the 3rd International Conference Healthy Buildings'94*. Budapest, pp.799-803.
- Leatherwood, J.D. (1979). Human discomfort response to noise combined with vertical vibration. *NASA Report TP-1374*.

- Leatherwood, J.D. e Barker, L.M. (1984). An user-oriented and computerized model for estimating vehicle ride quality. *NASA Report TP-2299*.
- Leost, O., Williams e R., Ronnan, D. (1999). Audio simulation of an in-car entertainment systems. *SAE technical paper 1999-01-1786*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Lida, N. e George, A.R. (1999). Measurement and evaluation of aerodynamic noise. *SAE technical paper 1999-01-1124*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- LMS News (2000). Towards sound quality engineering of the virtual car-from a computer game to an engineering tool. *LMS Magazine*: **15**(1): 14–17.
- Luckiesh, M. (1949). *Light, vision and seeing: A simplified presentation of their relationship and their importance in human efficiency and welfare*. D. Van Nostrand. New York.
- Mackie, R.R., O'Hallon, J.F., e McCauley, M. (1974). A study of heat, noise and vibration in relation to driver performance and physiological status. *Final report HFR 1735 to D.O.T. Bureau of Motor Carrier Safety and NHTSA*. Santa Barbara. Human Factors Research Inc., October 1974.
- Madsen T.L., Soerich, E. e Popiolek, Z. (1992). Measurement of draught sensation by a new skin element. *Thermal Insulation Laboratory Report*. Technical University of Denmark.
- 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. (1976) Description of thermal manikin for measuring the thermal insulation values of clothing. *Thermal Insulation Laboratory Report n° 48*. Technical University of Denmark. 16 pp.
- Madsen, T.L. e 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*. Kraków, Poland, June 1994. pp. 337-345.
- Madsen, T.L., Olesen, B. e Reid, K. (1986). New methods for evaluation of the thermal environment in automotive vehicles. *Thermal Insulation Laboratory Report n° 235*. Technical University of Denmark.
- Madsen, T.L., Olesen, B.W. e Kristensen, N.K. (1984). Comparison between operative and equivalent temperature under typical indoor conditions. *ASHRAE Transactions*. **90**(1): 1077-1090.
- Mairiaux, P. e Malchaire, J. (1990). *Le travail en ambiance chaude*. Masson. Paris.
- Marsden, A.M. (1970). Brightness-luminance relationships in an interior. *Lighting Research and Technology*. **2**: 10-16.

- Martinho, N.A.G. (2002). *Avaliação do Conforto Térmico no Habitáculo de um Veículo Automóvel*. Tese de Mestrado em Ciências de Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. 202 pp.
- Masters, T. (1994). *Practical neural network recipes in C++*. Morgan Kaufmann. ISBN-13: 978-0124790407.
- Matsunaga, K., Sudo, F. Tanabe, S. e Madsen, T.L. (1993). Evaluation and measurement of thermal comfort in the vehicles with a new thermal manikin. In: *Proceedings of the Seventh International Pacific Conference and Exposition on Automotive Engineering*. Phoenix, Arizona, November 15-19.
- McCulloch, W. e Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*. **5**: 115-133.
- Meier Jr., R.C., Otto, N.C., Pielemeier, W.J. e Jeyabalan, V. (1997). A new tool for the vibration engineer. *SAE technical paper 971979*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Melikov, A.K. (1988). Quantifying Draught Risk. *Brüel & Kjær Technical Review n°2*. Nærum. Denmark.
- Mellberg, J.M. e Loczi, J. (2003). Ergonomics of the new Thomas Saf-T-Liner C2 school bus. In: *Proceedings of the 2003 SAE International Truck and Bus Meeting and Exhibition Fort Worth*. Texas, USA, 10-12 November 2003.
- Meyer, M., Lemaitre, M. e Burgun, F. (1995). Air quality and odors evaluation for passengers compartment. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 29-31 March 1995. pp. 453-461.
- Mingrino, F. (1995). A process and system for controlling environmental conditions. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 29-31 March 1995. pp. 431-442.
- Minsky, M. e Pappert, S. (1969). *Perceptrons*. MIT Press. Cambridge. MA.
- Miwa, T. e Yonekawa, Y. (1973). Measurement and evaluation of environmental vibrations, part 2: interaction of sound and vibration. *Industrial health*. **11**: 177-184.
- Mola, S., Presti, G., Arduzzo, R., Zussino, A., Malvicino, C. e Caviasso, G. (2004). Measuring customer perceived thermal comfort in car cabin compartment: index of perceived thermal comfort. In: *Proceedings of FISITA 2004 World Automotive Congress*. Barcelona, Spain, 23-27 May 2004. Paper ID: F2004U025.
- Monacelli, G., Sessa, F., Stasi, L., Pretto, P. Gamberini, L. (2005). Cognitive and psychophysical methods for virtual vehicles prototyping and ergonomics. In:

- Proceedings of the 9th International conference Florence ATA 2005 Vehicle architectures: evolution towards improved safety, low-weight, ergonomics and flexibility.* Florence, Italy, 11-13 May 2005.
- Mukherjee, A.K., Bhattacharya, S.K., Ahmed, S., Roy, S.K., Roychowdhury, A. e Sen, S. (2003). Exposure of drivers and conductors to noise, heat, dust and volatile organic compounds in the state transport special buses of Kolkata city. *Transportation Research - Part D*. **8**: 11–19.
- Navvab, M. e Altland, G. (1997). Application of CIE glare index for daylighting evaluation. *Journal of the Illuminating Engineering Society*. pp. 115-128.
- Nelson, M. e Illingworth, W.T. (1991). *A Practical guide to neural nets*. Addison-Wesley.
- Nilsson, H., Holmér, I. e Holmberg, S. (1999). Comparison between indoor environment measured with thermal manikin and computational fluid dynamics calculation. In: *Proceedings of Indoor Air 99: The 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Edinburgh, UK. pp. 90-95.
- Nilsson, H., Holmér, I., Holmberg, S. e Sandberg, M. (2000). Thermal climate assessment in office environment - CFD calculations and thermal manikin measurements. In: *Proceedings of the 7th International Conference on air distribution in rooms (ROOMVENT 2000)*. Reading, UK. pp. 90-95.
- Nilsson, H.O. (2004). *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*. Ph.D. Thesis. Department of Technology and Built Environment, University of Gävle, Sweden. 202 pp.
- Nishi, Y. (1981). Measurement of thermal balance of man. *Bioengineering thermal Physiology and Comfort*. Cena K. and Clark, J. A. (eds.). 29-39. Elsevier. Nova Iorque.
- Norin, F. e Wyon, D.P. (1992). Driver vigilance – the effect of compartment temperature. *SAE technical paper 920168*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- NP 1674 (1997). *Caracterização do ruído no interior dos automóveis pesados de passageiros*. Instituto Português da Qualidade, Ministério da Indústria e Energia. Lisboa.
- NP 405-1 (1994). *Norma Portuguesa para referências bibliográficas: Documentos impressos*. Instituto Português da Qualidade, Ministério da Indústria e Energia. Lisboa.
- Olesen, B. (1987). Evaluation of the thermal environment in vehicles. *Brüel & Kjær Technical Review*. Nærum, Denmark.
- Olesen, B. (1992). Evaluation of thermal comfort in vehicles during transient and steady state conditions. In: *Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). Proceedings*

- of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 359-369.
- Olesen, B. (1997). International development of standards for ventilation of buildings *ASHRAE Journal*. **39**: 31–39.
- Onusic, H., Baptista, E.L. e Marcelo, M.H. (2003). Noise inside motor vehicles: Acoustic parameters correlation. Em: *Actas do 12^o Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade*. São Paulo, Brasil, 18-20 Novembro 2003. SAE technical paper 2003-01-3532E. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Osterhaus, W.K.E. (1998). Brightness as a reliable and simple indicator for discomfort glare from large area glare sources. In: *Proceedings of The First CIE Symposium on Lighting Quality*. Vienna, Austria. pp. 113-124.
- Osterhaus, W.K.E. e Bailey, I.L. (1992). Large area glare sources and their effect on visual discomfort and visual performance at computer workstations. In: *Proceedings of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Houston, Texas. pp. 1825-1829.
- Otto, N., Amman, S., Eaton, C. e Lake, S. (1999). Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds. *SAE technical paper 1999-01-1822*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Pachiaudi, G., Alauzet, A. e Blanchet, V. (1992). Subjective evaluation of thermal comfort in light automotive vehicles in warm and cold seasons. In: *Associazione Tecnica dell'Automobile (ATA) (eds.)*. *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 313-323.
- Palazzetti, M., Mingrino, F. e Salotti, G. (1993). Detector device for evaluating the thermal comfort conditions in an environment, for example, in the interior of a motor vehicle. *Fiat Auto*. Turin, Italy.
- Paumier, C., Petitjean, P. e Hassan, M.B. (2001). Air diffusion systems in car cabin for passenger thermal comfort improvement. In: *Proceedings of the 7th International Conference - ATA 2001*. Florence, Italy.
- Pham, D.T. (1994). Neural networks in engineering. In: Rzevski, G. *et al.* (eds.), *Applications of Artificial Intelligence in Engineering IX, AIENG/ 94*. Proceedings of the 9th International Conference. Computational Mechanics Publications, Southampton. pp. 3–36.
- Philippe, G. (1995). One Methodology to Evaluate Automotive Seat Comfort. In: *Associazione Tecnica dell'Automobile (ATA) (eds.)*. ATA Paper 95A1029.
- Pierce, W.M., Janckzewski, J., Roethlisberger, B. e Janckzewski, M.G. (1999). Air quality on commercial aircraft. *ASHRAE Journal*. **41**: 26–34.

- Quehl, J. (2001). *Comfort studies on aircraft interior sound and vibration*. Ph.D. Thesis. Carl Von Ossietzky. Universität Oldenburg. Deutschland. 195 pp.
- Ring, J.W. e Dear, R. (1991). Temperature transients: A model for heat diffusion through the skin, thermoreceptor response and thermal sensation. *Indoor Air*. **1**(4): 448-456.
- Rohles, F.H. e Wallis, S.B. (1979). Comfort Criteria for Air Conditioned Automotive Vehicles. In: *Proceedings of the SAE 1979 Congress and Exposition*. Cobo Hall, Detroit, February 26-March 2.
- Rosenblatt, R. (1962). *Principles of neurodynamics: Perceptrons and the theory of brain mechanisms*. Spartan Books. ASIN: B0006AXUII.
- Rosendahl, J. e Olesen, B.W. (2006). Comparison of temperature measurement methods for evaluation of the thermal environment in vehicles. *International Journal of Vehicle Design*. **42**(1/2): 22-34.
- Roulet, C.A. (1991). Use of tracer gases to assess indoor air quality. In: *ASHRAE Symposium on Indoor Air Quality and Energy Consumption*. Montreal, Sept. 1991.
- Rumelhart, D.E., Durbin, R., Golden, R., e Chauvin, Y. (1996). Backpropagation: the basic theory. Em: P. Smolensky, MC. Mozer e D.E. Rumelhart (eds.). *Mathematical Perspectives on Neural Networks*. Lawrence Erlbaum. New Jersey. pp. 533–566.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G. e Williams, R.J. (1986). Learning internal representations by error propagation. *Nature*. **323**: 533-536.
- Ruspa, G., Fiorito, A. e Irato, G. (1995). New perspectives in the study of noise quality in vehicles. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 29-31 March 1995. ATA Paper 95A1005.
- Sá, J.P.M. (2001). *Pattern recognition: Concepts, methods and applications*. Springer-Verlag. ISBN: 3-540-42297-8.
- SAE J2234 (1993). Equivalent temperature. *Surface vehicle information Report*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- SAE SP-1539 (2000). *Human Factors in 2000*. ISBN: 0-7680-0589-2.
- Sandberg, M. (1993). *Ventilation effectiveness and purging flow rate-a Review*. Heating and Ventilation Laboratory. National Swedish Institute for Building Research.
- Sandberg, M. e Sjoberg, M. (1983). The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms. *Building and Environment*. **18**: 181–97.
- Sandover, J. (1970). Interactions between noise and vibration effects. *UK Informal Group Meeting on Human Response to Vibration*. University of Technology, Loughborough.
- Sateri, J. (1992). A breathing manikin for measuring local ventilation effectiveness. In: *Proceedings of ROOMVENT 92: Air Distribution in Rooms*. Aalborg, Denmark, September, pp. 167–79.

- Schalkoff, R.J. (1997). *Artificial neural networks*. McGraw-Hill. ISBN-10: 007057118X.
- Schwab, R. e Mayer, E. (1989). Grundlagenuntersuchung zum Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die thermische Behaglichkeit in Kraftfahrzeugen - Grundlagen *FAT-Schriftenreihe N° 81*.
- Schwab, R., Conrad, W. e Mayer, E. (1999). *Correlation between objective and subjective measurements of thermal comfort*. EQUIV Report No 4, Holtzkirchen, Germany, Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- Scoeggel, P. e Ramschak, E. (1999). Vehicle driveability quality and driving pleasure real time measurement for road and bench testing. In: Associazione Tecnica dell'Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference of ATA*. Florence, Italy, November 1999. ATA Paper 99A4100.
- Sejnowski, T. e Rosenberg, C. (1987). Parallel networks that learn to pronounce English text. *Complex Systems*. **1**: 145-168.
- Seong-Kook, S., Moon, J., Yang, J. e Lee, J. (1998). Development of an automatic climate control (ACC) algorithm and the roof mounted system for busses. In: *Proceedings of the International Truck and Bus Meeting and Exposition*. Indianapolis, Indiana, November 16-18 1998. *SAE technical paper 982777*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Silva, M.C.G. (1993). *Aerodinâmica de Veículos - Optimização da forma exterior e estudo do escoamento no interior do habitáculo, de um modelo de autocarro*. Tese de Doutoramento em Ciências de Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. 202 pp.
- Silva, M.C.G. (2002). Measurements of comfort in vehicles. *Measurement Science Technology*. **13**: R41-R60.
- Specht, D.F. (1991). A general regression neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks*. **2**: 568-576.
- Stevens, S.S. (1975). *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural, and social prospects*. Wiley. New York.
- Stevens, S.S. (1986). *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural, and social prospects*. New Brunswick, NJ. Transaction publishers (reprint of New York: John Wiley & Sons Inc, 1975). ISBN-10: 0471824372.
- Sudo, F., Matsunaga, K., Tanabe, S. e Madsen, T.L. (1993). Evaluation and measurement of thermal comfort in the vehicles with a new thermal manikin. *SAE technical paper 931958*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Sun, X., Wang, Q. e Zhu, D. (1997). Function approximation and prediction: a comparative study with neural networks and regression models. In: *Proceedings of*

- Artificial Neural Networks in Engineering*. University of Missouri, USA, 9-12 November 1997. pp. 70–84.
- Tanabe, S. (2002). Numerical comfort simulator for evaluating thermal environment. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Environmental Ergonomics*. Fukuoka, Japan. pp. 435-438.
- Tanabe, S., Matsunaga, K. e Sudou, F. (1990). A method for evaluating thermal comfort in vehicle interiors. *Japan SAE Journal*. **44**: number 11.
- Tiller, D.K. e Veitch, J.A. (1995). Perceived room brightness: Pilot study on the effect of luminance distribution. *Lighting Research and Technology*. **27**(2): 93-101.
- Vernon, H.M. (1932). The measurement of radiant heat in relation to human comfort. *Journal of Industrial Hygiene*. **14**: 95-111.
- Verver, M.M. e Van Hoof, J. (2002). Determination of human-seat-interaction in vertical vibrations in MADYMO. In: *Proceedings of the International Truck and Bus Meeting and Exhibition*. Detroit, Michigan, USA, 18-20 November 2002. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Vipiana C. (1992). The problems of truck compartment. In: Associazione Tecnica dell'Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Vehicle Comfort (Ergonomic, Vibrational, Noise, and Thermal Aspects)*. Bologna, Italy, 14-16 October 1992. pp. 25-35.
- Viteles, M.S. e Smith, K.R. (1946). An experimental investigation of the effect of change in atmospheric conditions and noise upon performance. *Heating, Piping and Air Conditioning*. **18**: 107-112.
- Wargocki, P., Wyon, D.P., Sundell J., Clausen, G. e Fanger, P.O. (2000). The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality; sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity. *Indoor Air*. **10**: 222–36.
- Weisch, G., Stucklschwaiger, W. e Mendonça, A. (1997). The creation of a car interior noise quality index for the evaluation of rattle phenomena. *SAE technical paper 972018*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Werbos, P.J. (1974). *Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioural sciences*. Ph.D. Thesis. Harvard University.
- White, H. (1989). Learning in artificial neural networks: a statistical perspective. *Neural Computation*. **1**: 425–464.
- White, H. (1990). Connectionist nonparametric regression: multilayer feedforward networks can learn arbitrary mappings. *Neural Networks*. **3**: 535–550.
- Widrow, B. e Hoff, M. (1960). Adaptive switching circuits. In: *Proceedings of the 1960 IRE WESCON Convention Record*. New York, USA. pp: 96-104.

- Wilson, B.K. e Clapper, M.L. (1999) A sound simulation technique used for the prediction of passenger compartment noise. *SAE technical paper 1999-01-1809*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Wood, J.J. e Leatherwood, J.D. (1985). A new ride quality meter. *SAE technical paper 850981*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Wyon, D.P., Larsson, S., Forsgren, B. e Lundgren, I. (1989). Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin. In: *Proceedings of the Subzero Engineering Conditions*. Rovaniemi, Finland, January 9-11 1989. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Wyon, D.P., Tennstedt, C., Lundgren, I. e Larsson, S. (1985). A new method for the detailed assessment of human heat balance in vehicles-Volvo's thermal manikin, Voltman. *SAE technical paper 850042*. Society of Automotive Engineers, Inc.
- Wythoff, B.J. (1993). Backpropagation neural networks: a tutorial. *Chemometr. Intell. Lab. System.* **18**: 115–155.
- Yamasaki, K., Nomoto, S., Yukota, Y. e Murai, T. (1998). The effects of temperature, light and sound on perceived work environment. *ASHRAE Transactions* 4167.
- Yontz, R.R. (2003). An Overview of Indoor Air Quality. Master Thesis. Department of Mechanical Engineering. Mississippi State University. 64 pp.
- Zemsch, S. (1999). Evaluation of the precision of numerical analysis of vehicle front screen de-icing through a comparison with experimental data. In: Associazione Tecnica dell' Automobile (ATA) (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference of ATA*. Florence, Italy, November 1999. ATA paper 99A4078.
- Zhang, T. e Chen, Q. (2005). Comparison of different ventilation systems for commercial aircraft cabin. In: *Proceedings of Indoor Air 2005*. Beijing, China. pp. 3205-3210.
- Zupan, J. e Gasteiger, J. (1993). *Neural networks for chemists: an introduction*. VCH Publisher. ISBN: 1560817917.
- Zwicker, E. (1960). A means for calculating Loudness. *Acustica.* **10**: 304-308.
- Zwicker, E. (1982). *Psychoakustik*. Springer-Verlag.
- Zwicker, E. e Fastl, H. (1990). *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer-Verlag.

Anexos

Nas páginas seguintes são apresentados os seguintes anexos:

Anexo A - Questionário utilizado na análise da qualidade acústica


Anexo B - Questionário utilizado na análise de desconforto ambiental

Anexo C - Representações gráficas do nível de desconforto global obtido pela rede neuronal artificial em função da conjugação dos diversos estímulos de desconforto

Anexo **A**

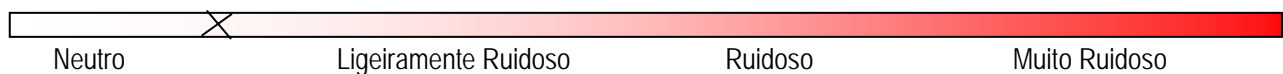
QUESTIONÁRIO (Qualidade acústica)

Nível de Ruído em Veículos

Neste teste pretende-se que avalie diversos ruídos de acordo com a escala de desconforto apresentada. Para isso, serão reproduzidos os diferentes ruídos, com uma duração de 5 segundos e com um intervalo de 5 segundos entre cada um, para que possa assinalar (colocando uma cruz sobre a escala ) a posição que melhor representa a sua **sensação de desconforto**.

Exemplo:

Ruído A



Data Ano Mês Dia

Hora: :

Dados Pessoais

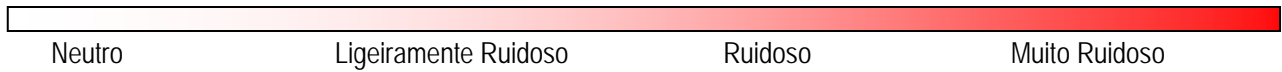
Idade:

Altura:

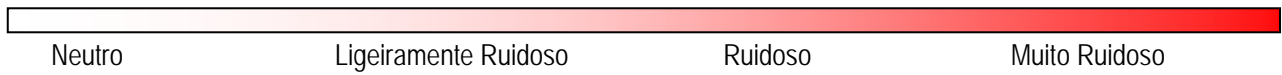
Peso:

Sexo:

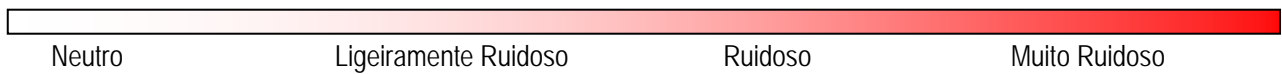
Ruído 1



Ruído 2

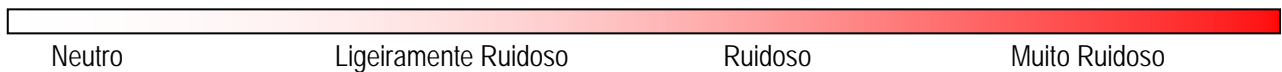


Ruído 3

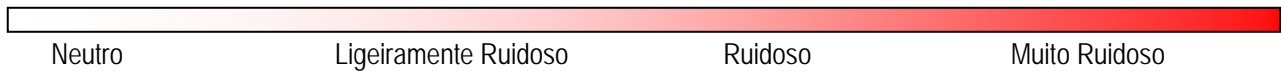


• • •

Ruído 52



Ruído 53



Ruído 54



Anexo **B**

QUESTIONÁRIO

(Desconforto ambiental)

Conforto em Veículos

1 - Pretende-se saber como se sentiu **durante a viagem realizada**, em termos de conforto térmico, nível de vibrações, nível de ruído, qualidade do ar, luminosidade e conforto global.

2 - Data Ano Mês Dia

3 - Dados Pessoais

3.1 - Idade 3.2 - Altura 3.3 - Peso 3.4 - Sexo

4 - Vestuário

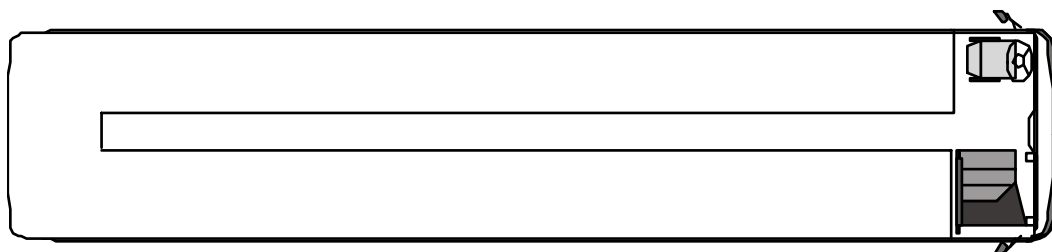
T-Shirt Camisa Camisola Casaco

Calças Calções Saia Vestido

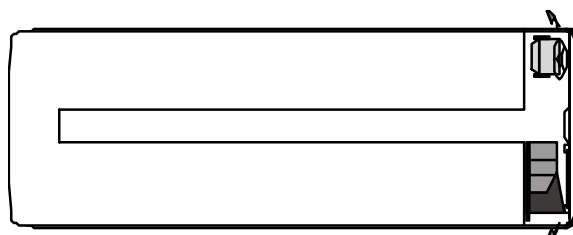
Fato

5 - Localização aproximada do seu assento no autocarro

Turismo/urbano




Mini-autocarro

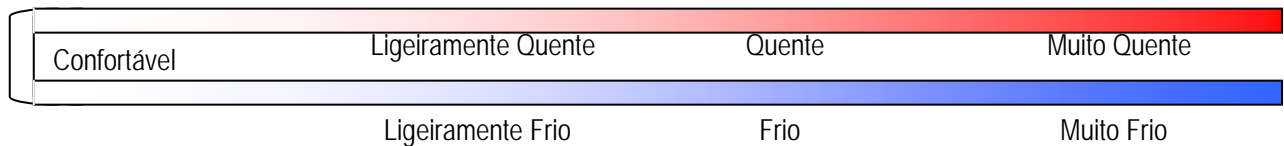


Conforto em Veículos

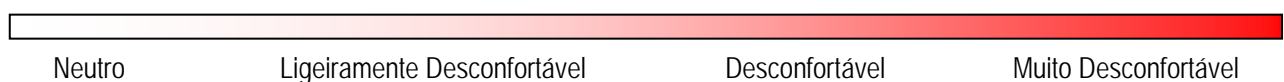
6 – Hora: :

7 – Por favor, assinale nas escalas seguintes (colocando uma cruz sobre a escala ) a posição que melhor representa a sua *sensação de desconforto* durante a viagem realizada:

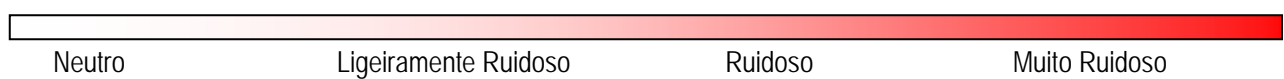
Ambiente Térmico



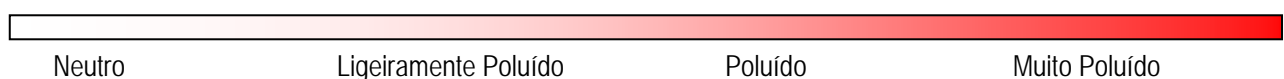
Nível de Vibrações



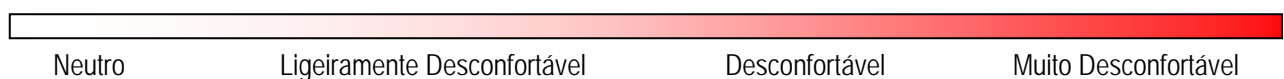
Nível de Ruído



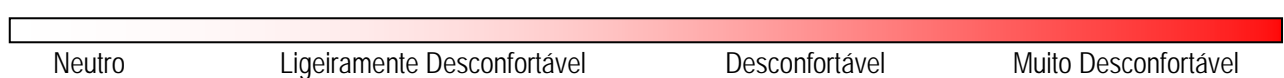
Qualidade do Ar



Luminosidade



Desconforto Global



Anexo **C**

REDE NEURONAL ARTIFICIAL (Resultados)

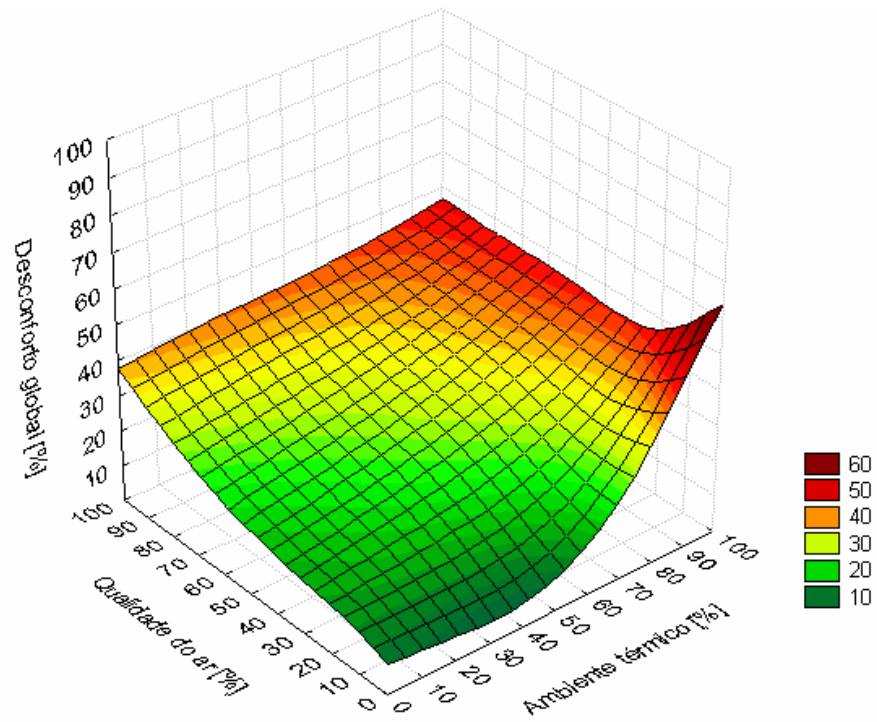


Figura C1 Desconforto global em função do ambiente térmico e da qualidade do ar

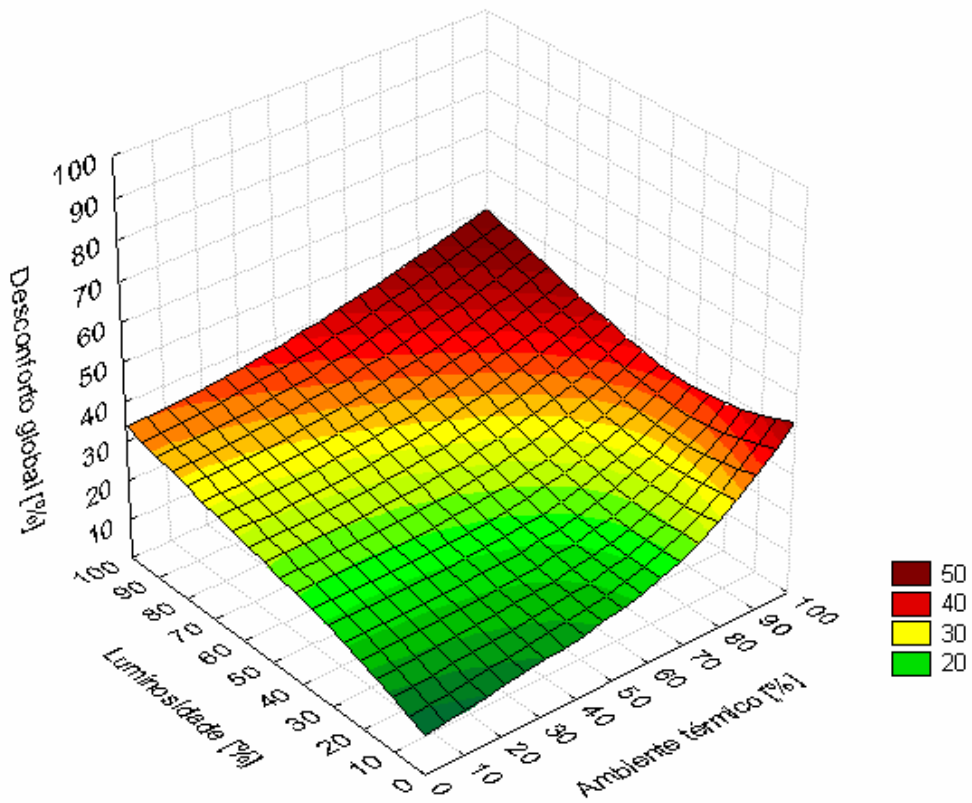


Figura C2 Desconforto global em função do ambiente térmico e da luminosidade

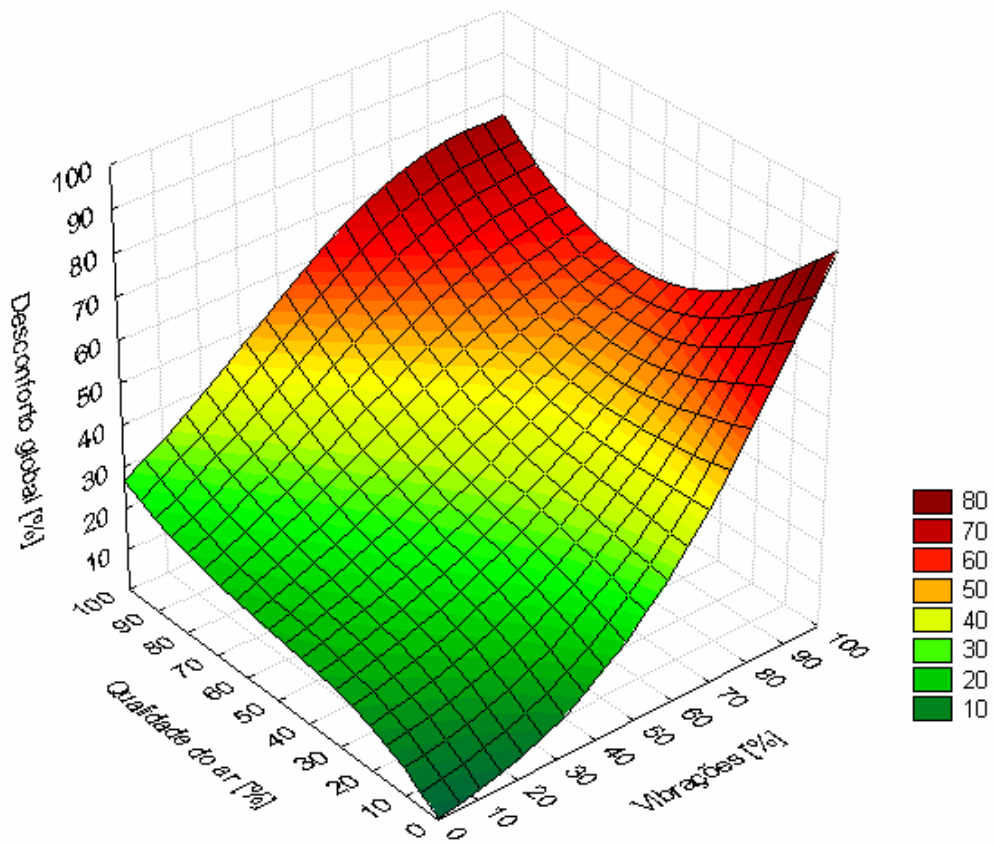


Figura C3 Desconforto global em função das vibrações e da qualidade do ar

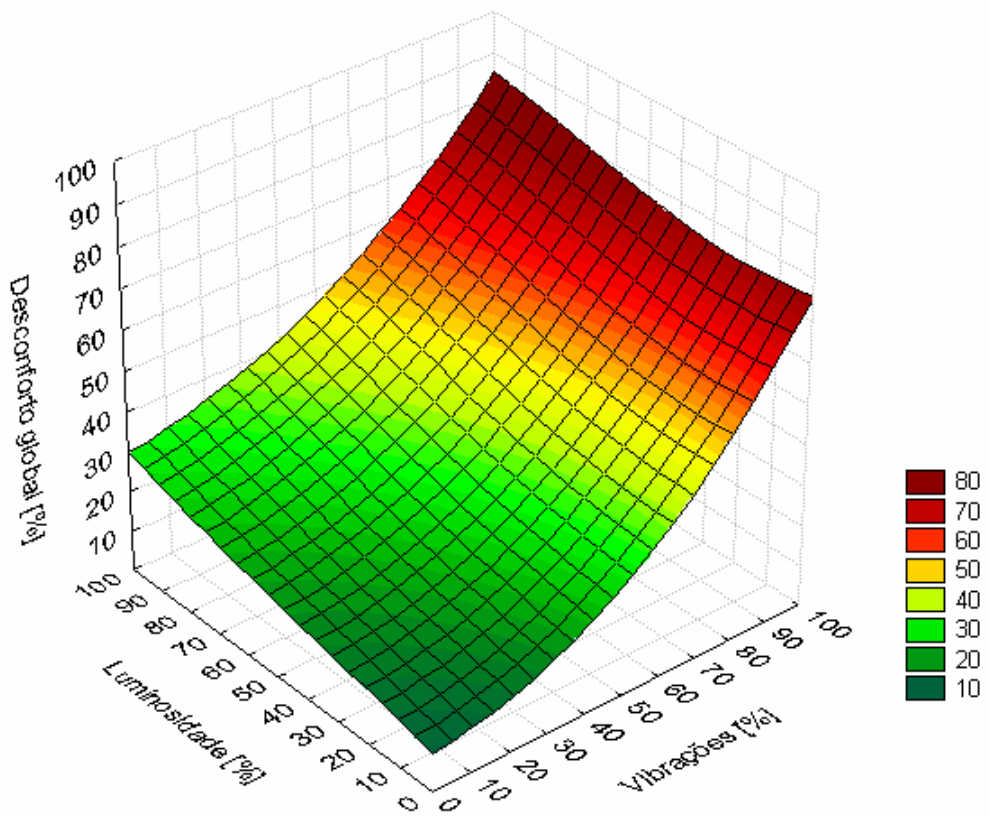


Figura C4 Desconforto global em função das vibrações e da luminosidade

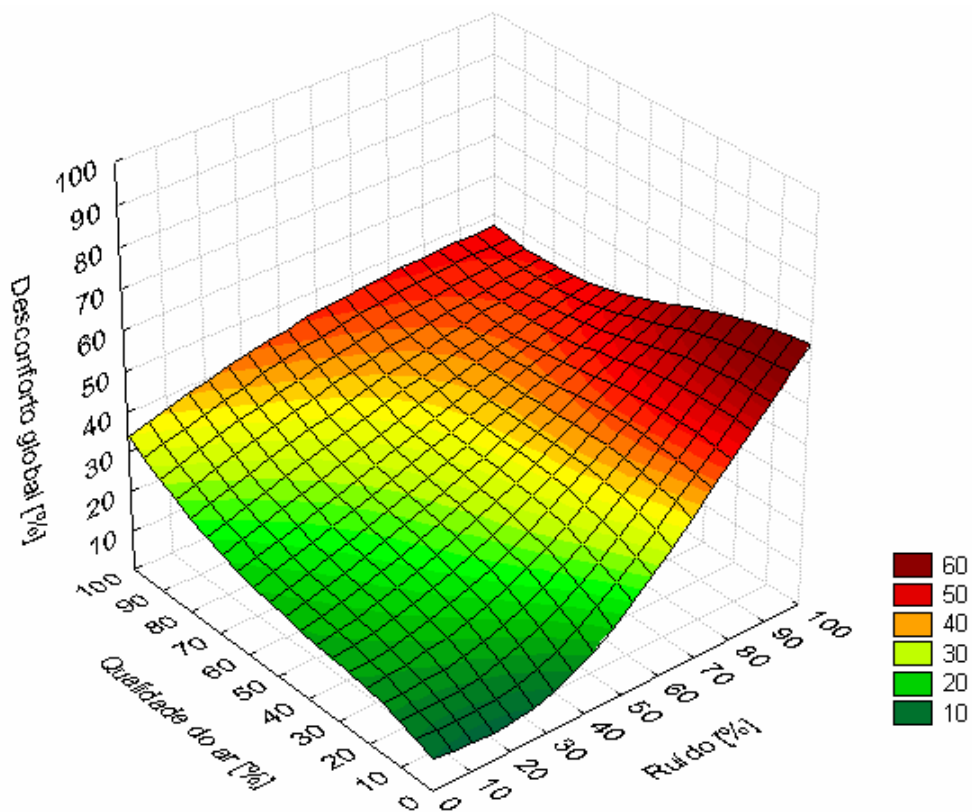


Figura C5 Desconforto global em função do ruído e da qualidade do ar

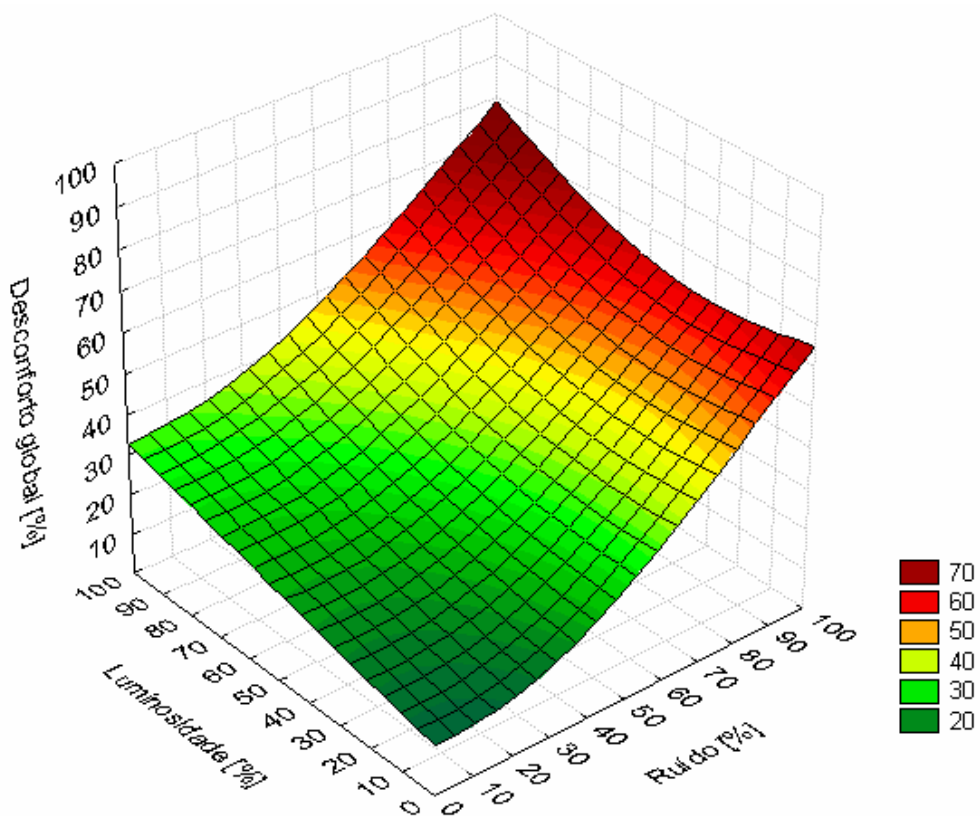


Figura C6 Desconforto global em função do ruído e da luminosidade