

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Júlio Alexandre de Matheucci e Silva Teixeira

**Análise de parâmetros de conforto vibroacústico para
aeronaves comerciais**

Florianópolis

2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Júlio Alexandre de Matheucci e Silva Teixeira

**ANÁLISE DE PARÂMETROS DE CONFORTO VIBROACÚSTICO
PARA AERONAVES COMERCIAIS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica .

Orientador:

Prof. Dr. Eng. Roberto Jordan

Florianópolis

2016

Teixeira, Júlio Alexandre de Matheucci e Silva

Análise de parâmetros de conforto vibroacústico para aeronaves comerciais / Júlio Alexandre de Matheucci e Silva Teixeira; orientador, Roberto Jordan. - Florianópolis, SC, 2016. 331 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Vibrações e Acústica. 3. Conforto . 4. Psicoacústica e psicofísica. 5. Ensaios subjetivos. I. Jordan, Roberto II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Júlio Alexandre de Matheucci e Silva Teixeira

**ANÁLISE DE PARÂMETROS DE CONFORTO VIBROACÚSTICO
PARA AERONAVES COMERCIAIS**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 09 de maio de 2016.

Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Roberto Jordan, Dr. Eng.
Orientador

Maria Lúcia Machado Duarte (UFMG), Ph. D.

William D'Andrea Fonseca (UFSC), Dr. Eng.

Roberto Moraes Cruz (UFSC), Dr. Eng.

Erasmus Felipe Vergara Miranda (UFSC), Dr. Eng.

Andrey Ricardo da Silva (UFSC), Ph. D.

A meus pais, meu irmão e meus avós.

Agradecimentos

Inicialmente, aos meus pais, Júlio e Rossana, pela vida, pelo amor, pela educação, pelo companheirismo e pelos exemplos de vida. Por me ensinarem a nunca desistir e correr atrás do que quero, sem para isso precisar passar os outros para trás.

Ao meu irmão, Guilherme, aos meus avós, Walmor e Miranda, João Pedro e Maria Zeli, e a todos os meus tios e tias, primos e primas e familiares próximos, também pelo amor, carinho, amizade, ensinamentos e exemplos de vida.

À Monique, pelo amor, dedicação e companheirismo, pelos ensinamentos, pelo apoio nas horas difíceis e por tudo o que passamos juntos nos últimos 13 anos... e à sua família, pela receptividade e carinho com que sempre fui tratado.

Aos meus amigos que fiz ao longo de toda a vida, especialmente àqueles que continuam fazendo parte dela. Sem amizades, a vida perde muito do sentido. Aqui não há necessidade de mencionar nomes, já que quem se encaixa neste agradecimento sabe que está aqui.

Ao meu orientador, Roberto Jordan, pelo exemplo de honestidade, pela motivação, ajuda, ensinamentos e grande apoio neste projeto difícil. Boa sorte agora na aposentadoria!

A todos os meus professores, não só pelo que foi aprendido com cada um em relação aos temas ensinados especificamente, mas também pelos exemplos que recebi durante toda a vida.

Ao professor Samir e à Raquel, por me convidarem para participar deste projeto em seu início, que deu origem ao mestrado, e a todos os companheiros de laboratório que tornaram o ambiente de trabalho um local agradável para passar a maior parte dos últimos anos em que foi feita esta Tese, com menção honrosa a William, Giovanni, Daniel, Jean, Anyssa, Eduarda, Danúbia, Caio, Mateus, Renato, Gregório, João Paulo, Marina, Thiago, Fábio, Júlio Hermes, Diego, Fernando “Chango”, Roberto Carlos, Olavo, Zargos, Zinho, Caetano, Leopoldo, Hudson “Campanha”, Juan Martín, Camilo, entre tantos outros que também fizeram parte desta jornada.

A todos os muitos participantes anônimos dos ensaios, por doarem uma parte de seu tempo para colaborar com a pesquisa, especialmente àqueles que criaram uma rede de convites e trouxeram mais pessoas para participar. Além disso, agradeço inclusive ao prof. Maurício Sedrez dos Reis, pelas dicas em estatística.

Ao prof. William Fonseca, pela ajuda na formatação do trabalho, e também aos membros da banca, pelas dicas valiosas que auxiliaram a complementar e a valorizar ainda mais o trabalho.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, que possui o maior conceito da CAPES no momento, por me aceitar em seus quadros, ao seu coordenador, Armando, pela paciência com as prorrogações e as dicas estatísticas, e às secretárias, especialmente a Goreti e a Marieta, que tanto me ajudaram em diversos momentos de dificuldade burocrática. Ao CNPq, pela bolsa ao longo destes 4 anos.

A Deus, tenha a forma que tenha, pela espiritualidade que gerou força extra e esperança quando tudo parecia ruir.

*“Omne ignotum
pro magnifico.”*

*Sherlock Holmes,
parafreseando Públio Cornélio Tácito,
político e historiador romano.*

Resumo

O uso de aeronaves para o transporte tem crescido nas últimas décadas, e as empresas têm se preocupado cada vez mais não só na segurança mas no conforto dos passageiros. Dentre os fatores que mais são relatados como desconfortáveis estão o ruído e a vibração. Porém, especialmente em estudos feitos em usuários falantes de língua portuguesa, ambos são normalmente estudados separadamente, com pouca informação em como os dois influenciam em conjunto na sensação de bem-estar. Assim, este estudo tem como objetivo principal desenvolver, com o uso de ferramentas estatísticas, um modelo de conforto vibroacústico para usuários de aeronaves comerciais. Foi feito um estudo prévio da influência desses estímulos no corpo humano, bem como os parâmetros e métodos utilizados para avaliá-los. Em seguida, fez-se um levantamento do histórico de pesquisas no Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina relacionados ao tema, bem como verificação do estado da arte em pesquisas no Brasil e no mundo. Para determinação do modelo final, foram realizados 4 ensaios, todos em um simulador vibroacústico de aeronaves único no Brasil: um preliminar, no qual foram feitas observações pertinentes para os ensaios seguintes; outro acerca do tempo de ambientação, importante para a verificação do período necessário para a adaptação dos sentidos quanto aos estímulos utilizados; o seguinte relacionado à amplificação e atenuação dos sinais, para quantificar a influência dessa variação de magnitude tanto do ruído quanto da vibração separadamente; e, por último, o ensaio para determinação do modelo de conforto geral, analisando-o também em função do ruído e da vibração separadamente. Em todos os ensaios foi verificada a influência de fatores pessoais, como idade, sexo, experiência com viagens e, no final, também foram acrescentados itens como peso, altura e outros dados ambientais, como temperatura e umidade do ar. O modelo final relacionou tanto esses dados quanto os parâmetros psicofísicos dos sinais com a resposta subjetiva dos usuários. Por fim, percebeu-se que a magnitude tanto do ruído quanto da vibração são os parâmetros que mais influenciam na avaliação de conforto, porém outros parâmetros, como frequência, não podem ser descartados.

Palavras-chave: ensaios subjetivos, diferencial semântico, escala de resposta, regressão múltipla, redes neurais.

Abstract

The use of aircraft as a transport has grown in recent decades, and companies have been increasingly concerned not only with security but with the comfort of passengers. Both noise and vibration are among the factors that are frequently reported as uncomfortable. However, both are usually studied separately, especially in studies with portuguese language speakers, with little information on how the two together influence the well-being feeling. This study aims to develop, through statistical tools, a vibroacoustic comfort model for commercial aircraft passengers. A preliminary study was made about the influence of these stimuli in the human body, as well as about the parameters and methods used to evaluate them. Then there is also a survey about a research history in Laboratory of Acoustics and Vibration of the Federal University of Santa Catarina related to this theme, as well as verification of state of the art in Brazil and worldwide. Four trials were performed to determine the final model: a preliminary one, in which relevant comments were made to develop the following tests; another about ambience time, important for the verification of the period necessary for the human senses adaptation regarding the stimuli used; The third test was related to the signals amplification and attenuation, to quantify the influence of this magnitude variation on both noise and vibration separately; the last one was the test to determining the comfort model, also analyzing it in terms of noise and vibration separately. In all tests, the influence of personal factors such as age, sex and travel experience was analyzed and later some items such as weight, height and other environmental data such as temperature and humidity were also added. The final model related both these data and psychophysical parameters of signals with the subjective response from users. Finally, it was noted that the magnitude of both noise as vibration are the parameters that most influence the evaluation of comfort, but other parameters such as frequency can not be discarded.

Keywords: Subjective tests, semantic differential, response scale, multiple regression, neural networks.

Riassunto

L'uso di aerei per il trasporto è cresciuto negli ultimi decenni, e le aziende sono sempre più preoccupate non solo in sicurezza, ma nel comfort dei passeggeri. Tra i fattori che vengono segnalati come disagio sono rumore e vibrazioni. Tuttavia, entrambi sono di solito studiate separatamente, soprattutto in studi di utenti che parlano la lingua portoghese, con poche informazioni su come i due insieme influenzano la sensazione di benessere. Questo studio mira a sviluppare, con l'uso di strumenti statistici, un modello di comfort vibroacustici per gli utenti di aeromobili commerciali. Uno studio preliminare è stato fatto dell'influenza di tali stimoli nel corpo umano così come i parametri ed i metodi utilizzati per la loro valutazione. Poi c'è un sondaggio della cronologia delle ricerche legate al tema sulle Laboratorio di Vibrazioni e Acustica dell'Università Federale di Santa Catarina e anche lo stato dell'arte nel campo della ricerca in Brasile e in tutto il mondo. Per determinare il modello finale sono stati eseguiti quattro test, tutti in un simulatore vibroacustici di aerei unico in Brasile: un preliminare, in cui sono state effettuate osservazioni relative ai test seguenti; un'altra sul tempo di adattamento, importante per controllare il tempo necessario per adattare i sensi a causa di quegli stimoli utilizzati; quello seguente riguarda l'amplificazione e l'attenuazione dei segnali per quantificare l'influenza di variazione di ampiezza di rumori e di vibrazioni in maniera indipendente; e, infine, il test per la determinazione del modello di conforto, analizzando anche secondo il rumore e la vibrazione separatamente. In tutte i test è stata verificata l'influenza di fattori personali quali età, sesso, esperienza di viaggio, e alla fine sono stati aggiunti anche elementi quali peso, altezza e altri dati ambientali come temperatura e umidità. Il modello finale ha collegato tutti questi dati con i parametri psicofisici dei segnali e anche con la risposta soggettiva da parte degli utenti. Infine, è stato osservato che l'ampiezza sia del rumore come di vibrazioni sono i parametri che influenzano maggiormente la valutazione del conforto, ma anche altri parametri come la frequenza non possono essere scartati.

Parole chiave: test soggettivi, differenziale semantico, scala di risposta, regressione multipla, reti neurali.

Sumário

Lista de Figuras	23
Lista de Tabelas	33
Nomenclatura	37
1 Introdução	45
1.1 Motivação e descrição do problema	46
1.2 Objetivos e contribuições	47
1.3 Organização do documento	48
2 Fundamentação teórica	51
2.1 Vibrações e ruído	51
2.2 Fisiologia humana	53
2.3 Psicofísica e psicoacústica	55
2.3.1 Curvas de percepção	58
2.3.2 Limiares diferenciais.....	59
2.3.3 Parâmetros psicofísicos.....	60
2.3.3.1 Audibilidade	62
2.3.3.2 Agudeza	63
2.3.3.3 Flutuações lentas	63
2.3.3.4 Tonalidade	64
2.3.3.5 Acelerações ponderadas	65
2.3.3.6 Frequências centrais de vibração	67
2.4 Métodos de avaliação	68
2.5 Métodos estatísticos	69
2.5.1 Regressão múltipla por mínimos quadrados	69

2.5.2	Redes neurais artificiais	71
3	Revisão bibliográfica	75
3.1	Histórico de pesquisas relacionadas no LVA	75
3.2	Percepção humana a ruídos e vibrações.....	81
4	Configurações dos ensaios	97
4.1	Simulador vibroacústico	101
4.2	Limiar de percepção vibracional	105
4.3	Ensaio preliminar para estudo da caracterização dos estímulos	107
4.3.1	Metodologia	108
4.3.2	Resultados.....	113
4.3.2.1	Influência do gênero.....	126
4.3.2.2	Influência da idade	126
4.3.2.3	Influência do número de viagens recentes ...	127
4.3.3	Comentários gerais	128
5	Tempo de ambientação	129
5.1	Metodologia	131
5.2	Resultados	135
5.2.1	Influência do número de viagens recentes	141
5.2.2	Relação das respostas do ensaio com a opinião acerca do incômodo vibroacústico em voos.....	141
5.3	Comentários gerais	142
6	Variação de amplitude de ruído e vibração	143
6.1	Metodologia	143
6.2	Resultados	145
6.2.1	Influência do gênero.....	152
6.2.2	Influência da idade	153
6.2.3	Influência do número de viagens recentes	153
6.3	Comentários gerais	154
7	Determinação do modelo de conforto	155

7.0.1 Metodologia	155
7.1 Resultados	160
7.1.1 Comparação entre os estímulos	161
7.1.2 Influência do gênero	165
7.1.3 Influência da idade	165
7.1.4 Influência de trabalhar-se com acústica e/ou vi- brações	167
7.1.5 Influência do número de viagens recentes	167
7.1.6 Influência da altura	168
7.1.7 Influência do peso	169
7.1.8 Influência do IMC	170
7.1.9 Influência da ordem de apresentação dos estímulos	171
7.1.10 Influência das condições ambientais	173
7.2 Modelo de conforto vibroacústico	175
7.2.1 Audibilidade	176
7.2.2 Agudeza	180
7.2.3 Flutuações lentas	183
7.2.4 Tonalidade	187
7.2.5 Acelerações ponderadas	191
7.2.6 Frequências centrais de vibração	196
7.2.7 Modelos com propriedades sonoras	200
7.2.8 Modelos com propriedades de vibração	204
7.2.9 Modelos globais	208
7.3 Comparação de modelos	218
7.4 Comentários gerais	219
8 Conclusões e considerações finais	223
Referências bibliográficas	231
Apêndices	249
A Resultados extras do ensaio preliminar de conforto	251
B Resultados extras para modelo de conforto	261

B.1	Análises de Componentes Principais	261
B.2	Regressões lineares extras	265
B.3	Modelos finais de redes neurais artificiais	271
Anexos		277
A	Parecer do comitê de ética	279
B	Termo de consentimento livre e esclarecido	287
C	Manual técnico	
	Tela 8"	
	Navilock 8"TFT Touchscreen	289
D	Manual técnico	
	Termo-higrômetro	
	Incoterm 7666.02.0.00	293
E	Manual técnico	
	Isoladores helicoidais	
	Vibranihil AME-5-XX	297
F	Manual técnico	
	Excitador	
	ButtKicker Concert	299
G	Manual técnico	
	Amplificador de Potência	
	ButtKicker BKA 1000-N	303
H	Manual técnico	
	Amplificador de Potência	
	Mark Audio 2.0 e 3.0	305

I	Manual técnico	
	Conversor A/D D/A	
	RME ADI-8 DS	309
J	Manual técnico	
	Acelerômetro	
	Brüel & Kjær 4321	313
K	Manual técnico	
	Amplificador de carga	
	PCB 422E12	317
L	Manual técnico	
	Condicionador de sinais	
	PCB 482A16	319
M	Manual técnico	
	Equalizador	
	HEAD acoustics PEQ V	321
N	Manual técnico	
	Fone de ouvido	
	Bose QuietComfort 15	325
O	Manual técnico	
	Manequim	
	HEAD acoustics HMS III	327

Lista de Figuras

2.1	Estruturas da orelha humana. Adaptado de la Cour (1903).	53
2.2	Área da audição humana. Adaptado de Everest e Pohlmann (2009).	58
2.3	Frequência de modulação e amplitude de mascaramento. Adaptado de Zwicker e Fastl (1998).	64
2.4	Diagrama de funcionamento de um neurônio.	72
2.5	Diagrama de rede neural com várias entradas e 3 camadas de neurônios.	73
3.1	Simulador de ruído de aeronaves localizado no LVA da UFSC para os ensaios de qualidade sonora de Bittencourt (2008) e Paul (2009)	79
3.2	Estrutura usada na UFMG para ensaios de vibrações em Misael (2001).	87
3.3	Estrutura usada na UFRGS para ensaios de vibrações de ônibus urbanos em Balbinot (2001).	88
3.4	Posicionamento dos acelerômetros para medição de transmissibilidade piso-poltrona em Iturrieta(2009).	90
3.5	Simuladores utilizados no programa IDEA-PACI	92
4.1	Imagem de um jurado realizando o ensaio, com vista para a tela sensível ao toque.	98
4.2	Tela de apresentação dos estímulos nos ensaios	100
4.3	Vista externa do simulador utilizado nos ensaios.	102
4.4	Posicionamento dos 3 excitadores sob a poltrona.	102

4.5	Posicionamento do acelerômetro em relação ao apoio esquerdo da poltrona.	103
4.6	Imagem de um jurado realizando o ensaio, com vista traseira para visualização dos fones, da poltrona e dos excitadores de vibração.	104
4.7	Tela da aplicação do DS no ensaio preliminar.	112
4.8	Tela da aplicação da ER no ensaio preliminar.	113
4.9	Distribuição de idade dos participantes do ensaio preliminar.	114
4.10	Número de viagens nos 12 meses anteriores ao ensaio preliminar por avaliador.	115
4.11	Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 1 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.	116
4.12	Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 2 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.	117
4.13	Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 3 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.	118
4.14	Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 4 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.	119
4.15	Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 5 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.	120
4.16	Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 6 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.	121
5.1	Aceleração resultante dos sinais de vibração medidos para o ensaio de ambientação, em função da frequência.	133
5.2	Nível de Pressão Sonora dos sinais de ruído utilizados no ensaio de ambientação, em função da frequência...	133

5.3	Tela inicial de avaliação dos itens no ensaio do tempo de ambientação.	134
5.4	Número de viagens nos 12 meses anteriores ao ensaio de ambientação por avaliador. Em azul claro, pessoas com menos de 3 viagens e, em amarelo, pessoas com mais de 3 viagens.	135
5.5	Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Fron” em relação ao Conforto, no teste de ambientação.	136
5.6	Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Meio” em relação ao Conforto, no teste de ambientação.	136
5.7	Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Tras” em relação ao Conforto, no teste de ambientação.	137
5.8	Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Fron” em relação à Intensidade, no teste de ambientação.	137
5.9	Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Meio” em relação à Intensidade, no teste de ambientação.	138
5.10	Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Tras” em relação à Intensidade, no teste de ambientação.	138
6.1	Distribuição de idade dos participantes do ensaio de variação de amplitude.	145
6.2	Número de viagens nos 12 meses anteriores ao ensaio de variação de amplitude por avaliador.	146
6.3	Mediana das respostas de conforto em função das variações de ruído e vibração, relativos ao estímulo “Fron”.	146
6.4	Mediana das respostas de conforto em função das variações de ruído e vibração, relativos ao estímulo “Meio”.	147

6.5	Mediana das respostas de conforto em função das variações de ruído e vibração, relativos ao estímulo “Tras”.....	147
6.6	Diagrama de caixas proveniente dos resultados relativos ao estímulo “Fron”, no teste de variação de amplitude.	150
6.7	Diagrama de caixas proveniente dos resultados relativos ao estímulo “Meio”, no teste de variação de amplitude.	150
6.8	Diagrama de caixas proveniente dos resultados relativos ao estímulo “Tras”, no teste de variação de amplitude.	151
7.1	Tela para o treinamento do DS no ensaio final.	157
7.2	Tela para avaliação geral de conforto no ensaio final..	158
7.3	Tela das avaliações de conforto em relação ao ruído e às vibrações, no ensaio final.....	158
7.4	Divisão das respostas dos participantes quando questionados sobre o que os incomodava em situação de voo.	160
7.5	Histogramas dos resultados de conforto dos 8 estímulos no ensaio final.....	162
7.6	Dendrograma entre os estímulos e os itens de avaliação do ensaio final.	163
7.7	Diagrama de caixas para avaliação de conforto geral no ensaio final.	164
7.8	Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função da idade, para o ensaio final.	166
7.9	Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função do número de viagens recentes, para o ensaio final.	168
7.10	Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função da altura dos voluntários, para o ensaio final.....	169

7.11	Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função do peso dos voluntários, para o ensaio final.....	170
7.12	Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função do IMC dos voluntários, para o ensaio final.....	171
7.13	Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função do tempo de avaliação do mesmo por cada usuário, para o ensaio final.	173
7.14	Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função da temperatura inicial interna da cabine, para o ensaio final.	174
7.15	Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função da umidade relativa do ar, para o ensaio final.....	174
7.16	Regressão cúbica do modelo de audibilidade para o item Conforto no ensaio final.	177
7.17	Influência da audibilidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.	179
7.18	Influência da diferença de audibilidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.....	179
7.19	Regressão cúbica do modelo de agudeza para o item Conforto no ensaio final.	180
7.20	Influência da agudeza para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.	182
7.21	Influência da diferença de agudeza para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.	183
7.22	Regressão cúbica do modelo de flutuações lentas para o item Conforto no ensaio final.	184
7.23	Influência das flutuações lentas para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final. ...	186
7.24	Influência da diferença de flutuações para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.	187

7.25	Regressão cúbica do modelo de tonalidade para o item Conforto no ensaio final.	188
7.26	Influência da tonalidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.	190
7.27	Influência da diferença de tonalidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.	190
7.28	Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada frontal para o item Conforto no ensaio final.	192
7.29	Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada lateral para o item Conforto no ensaio final.	192
7.30	Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada vertical para o item Conforto no ensaio final.	193
7.31	Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada resultante para o item Conforto no ensaio final.	194
7.32	Influência da aceleração ponderada resultante para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.	195
7.33	Regressão cúbica do modelo de Frequência central na direção frontal para o item Conforto no ensaio final.	197
7.34	Regressão cúbica do modelo de Frequência central na direção lateral para o item Conforto no ensaio final.	198
7.35	Regressão cúbica do modelo de Frequência central na direção vertical para o item Conforto no ensaio final.	199
7.36	Influência da audibilidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de parâmetros combinados de ruído no ensaio final.	202
7.37	Influência da agudeza para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de parâmetros combinados de ruído no ensaio final.	202
7.38	Influência das flutuações lentas para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de parâmetros combinados de ruído no ensaio final.	203

7.39	Influência da tonalidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de parâmetros combinados de ruído no ensaio final.....	203
7.40	Influência da aceleração frontal A_x para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de acelerações combinadas no ensaio final.	206
7.41	Influência da aceleração lateral A_y para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de acelerações combinadas no ensaio final.	206
7.42	Influência da aceleração vertical A_z para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de acelerações combinadas no ensaio final.	207
7.43	Influência da aceleração resultante A para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de acelerações combinadas no ensaio final.	207
7.44	Influência da audibilidade para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.	209
7.45	Influência do A_v para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.....	209
7.46	Influência da agudeza para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.	210
7.47	Influência da diferença de agudeza para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.....	210
7.48	Influência das flutuações lentas para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.	211
7.49	Influência da audibilidade para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.....	212
7.50	Influência da agudeza para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.....	213
7.51	Influência da aceleração ponderada resultante para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais. .	213

7.52	Influência da idade do voluntário para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.....	214
7.53	Influência do número recente de viagens para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.	214
7.54	Influência da altura do voluntário para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.....	215
7.55	Influência do peso do voluntário para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.....	215
7.56	Influência da temperatura inicial da cabine para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais. .	216
7.57	Influência da umidade do ar da cabine para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.	216
A.1	Diagramas de caixa resultantes das respostas para o par “forte/fraco” utilizando DS no ensaio preliminar.	252
A.2	Diagramas de caixa resultantes das respostas para o item “intensidade” utilizando ER no ensaio preliminar.	253
A.3	Diagramas de caixa resultantes das respostas para o par “constante/inconstante” utilizando DS no ensaio preliminar.	254
A.4	Diagramas de caixa resultantes das respostas para o item “constância” utilizando ER no ensaio preliminar.	255
A.5	Diagramas de caixa resultantes das respostas para o par “suportável/insuportável” utilizando DS no ensaio preliminar.	256
A.6	Diagramas de caixa resultantes das respostas para o item “suportabilidade” utilizando ER no ensaio preliminar.	257
A.7	Diagramas de caixa resultantes das respostas para o par “perturbador/não-perturbador” utilizando DS no ensaio preliminar.	258
A.8	Diagramas de caixa resultantes das respostas para o item “perturbação” utilizando ER no ensaio preliminar.	259

A.9	Medianas das avaliações de todos os itens utilizando ER no ensaio preliminar, separadas por grupo.	260
B.1	ACP da avaliação de conforto dos estímulos do ensaio final, cruzamento dos Fatores 1 e 2.....	261
B.2	ACP da avaliação de conforto dos estímulos do ensaio final, cruzamento entre o Fator 1 e os Fatores 3 e 4.	262
B.3	ACP da avaliação de ruído dos estímulos do ensaio final.	263
B.4	ACP da avaliação de ruído dos estímulos do ensaio final.	263
B.5	Diagrama de caixas para avaliação do conforto relativo apenas ruído no ensaio final.	264
B.6	Diagrama de caixas para avaliação do conforto relativo apenas à vibração, no ensaio final.	264
B.7	Regressão cúbica do modelo de audibilidade para o item Ruído no ensaio final.....	265
B.8	Regressão cúbica do modelo de agudeza para o item Ruído no ensaio final.....	266
B.9	Regressão cúbica do modelo de flutuações lentas para o item Ruído no ensaio final.	266
B.10	Regressão cúbica do modelo de tonalidade para o item Ruído no ensaio final.....	267
B.11	Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada frontal para o item Vibrações no ensaio final.	267
B.12	Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada lateral para o item Vibrações no ensaio final.	268
B.13	Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada vertical para o item Vibrações no ensaio final.	268
B.14	Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada resultante para o item Vibrações no ensaio final.	269
B.15	Regressão cúbica do modelo de frequência central na direção frontal para o item Vibrações no ensaio final. .	269

B.16	Regressão cúbica do modelo de frequência central na direção lateral para o item Vibrações no ensaio final...	270
B.17	Regressão cúbica do modelo de frequência central na direção vertical para o item Vibrações no ensaio final.	270
B.18	Influência da Audibilidade para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.	271
B.19	Influência da Agudeza para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.	272
B.20	Influência da Aceleração ponderada resultante para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.	272
B.21	Influência da idade do voluntário para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.	273
B.22	Influência do número de viagens recentes para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais....	273
B.23	Influência da altura do voluntário para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.	274
B.24	Influência do peso do voluntário para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.	274
B.25	Influência da temperatura inicial da cabine para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.	275
B.26	Influência da umidade do ar da cabine para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais....	275

Lista de Tabelas

2.1	Termos proposto em português e seus equivalentes utilizados em outras linguagens dos parâmetros psicoacústicos utilizados nesta Tese.	60
2.2	Valores de ponderação (W) por banda de $1/3$ de oitava segundo a norma ISO 2631-1 (1997), de acordo com as condições estabelecidas nos ensaios.	66
2.3	Fatores de escala (k) por direção segundo a norma ISO 2631-1 (1997), de acordo com as condições estabelecidas nos ensaios.	67
3.1	Faixas de desconforto de vibração em função da aceleração, de acordo com as normas BS 6841 (1987) e ISO 2631-1 (1997).	86
3.2	Histórico de trabalhos envolvendo exposição a ruído e vibração combinados, conforme Ljungberg(2008).	91
4.1	Valores dos limiares de vibração (em dB, com ponderações da norma ISO 2631-1) encontrados neste estudo para diferentes sinais.	105
4.2	Valores de mediana dos limiares de vibração (em dB) encontrados neste estudo por faixa etária.	106
4.3	Combinações de ruído e vibração utilizadas no ensaio preliminar.	109
4.4	Tempo de familiarização para cada grupo de estímulos do ensaio preliminar.	111

4.5	Tempo de avaliação (em segundos) médio de cada item na ER para o ensaio preliminar.	125
5.1	Combinações de ruído e vibração utilizadas no ensaio de ambientação.	132
5.2	Valores de p encontrados no Teste F de variâncias para o ensaio de ambientação, quando comparados resultados obtidos em diferentes dias. Em negrito, valores menores ou iguais a 0,05.	140
5.3	Tempo de avaliação médio (em segundos) dos estímulos por adjetivo em cada dia no ensaio de ambientação.	140
6.1	Combinações utilizadas no ensaio de variação de amplitude de ruído e vibração.	144
6.2	Classificações no ensaio de variação de amplitude.	148
6.3	Diferença entre as medianas das avaliações dos estímulos com variação de magnitude e dos estímulos-base.	151
7.1	Média das avaliações de conforto para os 3 itens.	161
7.2	Tempo médio de avaliação dos estímulos (em segundos) em função da ordem que apareceram no ensaio. .	172
7.3	Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para audibilidade.	177
7.4	Dados das redes neurais desenvolvidas para audibilidade (N) e diferença de audibilidade (ΔN).	178
7.5	Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para agudeza.	181
7.6	Dados das redes neurais desenvolvidas para agudeza (S) e diferença de agudeza (ΔS).	182
7.7	Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para flutuações lentas.	185
7.8	Dados das redes neurais desenvolvidas para flutuações lentas (F) e diferença de flutuações (ΔF).	185
7.9	Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para tonalidade.	189

7.10	Dados das redes neurais desenvolvidas para tonalidade (T) e diferença de tonalidade (ΔT).	189
7.11	Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para acelerações ponderadas.	195
7.12	Dados das redes neurais desenvolvidas para aceleração ponderada resultante (A).	196
7.13	Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para Frequências centrais.	199
7.14	Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para os parâmetros sonoros.	200
7.15	Dados das redes neurais desenvolvidas para combinação de parâmetros psicoacústicos.	201
7.16	Dados das redes neurais desenvolvidas para combinação de acelerações ponderadas.	205
7.17	Dados das redes neurais desenvolvidas para o modelo global de parâmetros psicofísicos.	208
7.18	Dados das redes neurais desenvolvidas para o modelo final de conforto vibroacústico.	217
7.19	Dados gerais de todas as regressões desenvolvidas a partir do ensaio final.	218
A.1	Itens cujos resultados serão mostrados nas páginas a seguir, referentes ao ensaio preliminar de conforto.	251
B.1	Sensibilidade dos parâmetros das redes neurais desenvolvidas para o modelo final de conforto vibroacústico.	276

Nomenclatura

Símbolos Gerais

a	Aceleração, [m/s ²], Eq. (2.6), pág. 57.
A, A_x, A_y, A_z	Aceleração ponderada resultante ou em uma determinada direção, quando especificada, [m/s ²], Eq. (2.19), pág. 66.
a_0	Aceleração de referência, [m/s ²], Eq. (2.6), pág. 57.
a_i	Aceleração eficaz na direção a ser calculada relativa à i -ésima banda de 1/3 de oitava, [m/s ²], Eq. (2.19), pág. 66.
b	Termo de predisposição para redes neurais, Eq. (2.29), pág. 72.
c	Coeficiente de calibração unitário, Eq. (2.13), pág. 64.
C_G	Modelo de conforto vibroacústico, pág. 175.
C_R	Modelo de conforto em relação ao ruído, pág. 175.
C_V	Modelo de conforto em relação à vibração, pág. 175.
DISC	Modelo de desconforto de Dempsey, Eq. (3.1), pág. 91.
d_i	Resíduo padronizado da i -ésima observação da regressão, Eq. (2.29), pág. 71.

E	Magnitude do estímulo inicial avaliado, Eq. (2.1), pág. 56.
E_0	Limiar do estímulo E , Eq. (2.3), pág. 56.
e_i	Erro da regressão (ou “resíduo”) para a i -ésima observação, Eq. (2.24), pág. 70.
F	Flutuações lentas, [vacil], Eq. (2.12), pág. 64.
f	Frequência, [Hz], Eq. (2.8), pág. 61.
f_{mod}	frequência de modulação, [Hz], Eq. (2.12), pág. 64.
f_i	Frequência do i -ésimo componente tonal, Eq. (2.17), pág. 65.
g	Função de transferência para redes neurais, Eq. (2.29), pág. 72.
h	Valor escalar para redes neurais, Eq. (2.29), pág. 72.
I_{LS}	Excitação sonora no limiar do silêncio, [W/m^2], Eq. (2.10), pág. 62.
I_0	Excitação sonora na banda crítica que está sendo analisada, [W/m^2], Eq. (2.10), pág. 62.
I_0	Excitação sonora na intensidade de referência, [W/m^2], Eq. (2.10), pág. 62.
J	Número de parâmetros de entrada para redes neurais, Eq. (2.29), pág. 72.
k	Valor constante, Eq. (2.1), pág. 56.
k_x, k_y, k_z	fator de escala na direção especificada, Eq. (2.20), pág. 67.
L_D	Nível de exposição sonora, [dB], Eq. (3.2), pág. 91.

m	Valor constante que determina a variação da sensação, Eq. (2.4), pág. 56.
N	Audibilidade, [sone], Eq. (2.9), pág. 62.
n	Quantificação inteira de alguma grandeza, podendo ser o número de bandas de $1/3$ de oitava consideradas ou o número de observações em uma regressão, Eq. (2.19), pág. 66.
N'	Audibilidade específica, [sone/Bark], Eq. (2.9), pág. 62.
N_{Gr}	Audibilidade do tom, [sone], Eq. (2.14), pág. 65.
o	Escalar de entrada para redes neurais, Eq. (2.29), pág. 72.
P	Pressão sonora, [Pa], Eq. (2.5), pág. 57.
p	Probabilidade de, em uma amostra, se obter uma estatística igual ou maior que a observada, Eq. (5.0), pág. 139.
P_0	Pressão sonora de referência, [Pa], Eq. (2.5), pág. 57.
q	Valor de entrada da função de transferência para redes neurais, Eq. (2.29), pág. 72.
R^2	Coefficiente de determinação da regressão, Eq. (2.26), pág. 70.
S	Agudeza, [acum], Eq. (2.11), pág. 63.
T	Tonalidade, [tu], Eq. (2.13), pág. 64.
U	Expoente no modelo de desconforto de Dempsey, Eq. (3.1), pág. 91.
v	Escalar de saída para redes neurais, Eq. (2.29), pág. 72.

w_{Gr}	Ponderação relacionada com a razão de ruído, Eq. (2.13), pág. 64.
w_T	Ponderação relacionada aos componentes tonais, Eq. (2.13), pág. 64.
w_1	Ponderação relacionada com a largura de banda crítica, Eq. (2.16), pág. 65.
w_2	Ponderação relacionada com a frequência do tom, Eq. (2.17), pág. 65.
w_3	Ponderação relacionada com a proeminência do tom, Eq. (2.18), pág. 65.
W_i	Fator de ponderação relativo à i -ésima banda de $1/3$ de oitava de aceleração, $[m/s^2]$, Eq. (2.19), pág. 66.
x	Direção frontal de vibração, Eq. (2.19), pág. 67.
X	Regressor estatístico, Eq. (2.22), pág. 69.
y	Direção lateral de vibração, Eq. (2.19), pág. 67.
\bar{Y}	Valor médio de todas as medições na regressão, Eq. (2.26), pág. 70.
\hat{Y}	Resposta estimada da regressão por mínimos quadrados, Eq. (2.23), pág. 70.
Y	Variável de resposta, Eq. (2.22), pág. 69.
Z	Número de camadas para redes neurais, Eq. (2.29), pág. 72.
z	Banda crítica, [Bark], Eq. (2.8), pág. 61.
z	Direção vertical de vibração, Eq. (2.19), pág. 67.

Al	Altura, [cm], Eq. (7.22), pág. 212.
Id	Idade, [anos], Eq. (7.22), pág. 212.
Pe	Peso, [kg], Eq. (7.22), pág. 212.
Ti	Temperatura inicial durante o ensaio, [°C], Eq. (7.22), pág. 212.
Um	Umidade relativa do ar, [%], Eq. (7.22), pág. 212.
Vi	Número de viagens nos últimos 12 meses, Eq. (7.22), pág. 212.

Símbolos Gregos

α	Nível de confiança estatística, Eq. (7.0), pág. 159.
β_i	Coeficientes de regressão múltipla, Eq. (2.22), pág. 69.
$\hat{\beta}_i$	Estimadores de mínimos quadrados, Eq. (2.23), pág. 70.
ΔE	Limiar da diferença para um estímulo, Eq. (2.1), pág. 56.
ΔF	Diferença absoluta de flutuações lentas entre as orelhas, [vacil], pág. 184.
ΔL_{mod}	Amplitude de mascaramento, [dB], Eq. (2.12), pág. 64.
ΔL_i	Proeminência do i -ésimo componente tonal, Eq. (2.18), pág. 65.
ΔN	Diferença absoluta de audibilidade entre as orelhas, [sone], pág. 177.
ΔS	Diferença absoluta de agudeza entre as orelhas, [acum], pág. 181.

ΔSe	Diferença causada na sensação humana, Eq. (2.2), pág. 56.
ΔT	Diferença absoluta de tonalidade entre as orelhas, [tu], pág. 188.
Δz_i	Largura de banda crítica do i -ésimo componente tonal, Eq. (2.16), pág. 65.
ϵ	Erro aleatório, Eq. (2.22), pág. 69.
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	Movimento de rotação em torno do eixo especificado, pág. 85.
Θ_i	i -ésimo parâmetro de entrada para redes neurais, Eq. (2.30), pág. 74.
ρ	Número de parâmetros da regressão, Eq. (2.28), pág. 71.
$\hat{\sigma}^2$	Variância estimada da regressão, Eq. (2.25), pág. 70.
ϕ	Magnitude física, Eq. (2.4), pág. 56.
Φ_x, Φ_y, Φ_z	Frequência central de vibração na direção especificada, [Hz], Eq. (2.20), pág. 67.
ψ	Magnitude psicológica, Eq. (2.4), pág. 56.

Operadores Matemáticos e Convenções _____

\arctan	Arco tangente, Eq. (2.8), pág. 61.
\ln	Logaritmo natural, Eq. (2.3), pág. 56.
\log_{10}	Logaritmo na base 10, Eq. (2.5), pág. 57.

Acônimos e Abreviaturas _____

ACP	Análise de componentes principais, pág. 261.
CO	Camada oculta em redes neurais artificiais, pág. 73.
DISC	Modelo de desconforto de Dempsey, Eq. (3.1), pág. 91.
DS	Diferencial Semântico, pág. 68.
ER	Escala de Resposta, pág. 68.
FACE	<i>Friendly Aircraft Cabin Environment</i> , ou “Ambiente de cabine de aeronave amigável”, pág. 82.
HEACE	<i>Health Effects in Aircraft Cabin Environment</i> ou “Efeitos na saúde em ambiente de cabine de aeronave”, pág. 82.
IdEA-PaCI	<i>Identification of an Aircraft Passenger Comfort Index</i> , ou “Identificação de um índice de conforto para passageiros de avião”, pág. 82.
IMC	Índice de massa corporal, pág. 161.
LVA	Laboratório de Vibrações e Acústica, pág. 45.
NAV	Nível de Aceleração de Vibração, [dB], pág. 57.
NPS	Nível de Pressão Sonora, [dB], pág. 57.
PMC	<i>Perceptron</i> multicamadas, pág. 160.
SEAT	Do inglês <i>Seat Effective Amplitude Transmissibility</i> , é a razão entre as acelerações ponderadas medidas na interface entre o usuário e o assento e no piso, pág. 89.
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, pág. 155.
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais, pág. 87.

UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pág. 88.

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina, pág. 45.

1 Introdução

Existem muitos estudos que visam analisar o conforto acústico ou vibratório de pessoas, mas poucos consideram tais estímulos combinados. Restringe-se mais ainda essa quantidade quando se aplica a uma situação específica como, por exemplo, as condições encontradas em uma aeronave.

Pretende-se, com esta pesquisa, dar continuidade a diversos projetos já desenvolvidos no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) relativos à área, além de aproveitar-se de uma estrutura única no Brasil para simulação vibroacústica de aeronaves.

Os estímulos haviam sido previamente gravados em condição de cruzeiro de diferentes aeronaves, sendo os vibratórios com um acelerômetro triaxial posicionado no piso e os acústicos com a utilização de um sistema de gravação biauricular. As gravações foram feitas pela equipe da empresa que patrocinou o início do projeto.

Havia sido projetado e construído em 2006 um simulador de ruído de aeronaves, baseado em uma seção de uma cabine real, porém com poltronas de ônibus. Esse simulador foi adaptado pelo próprio autor desta Tese para realizar também a simulação vibracional das condições de voo, o que permitiu realizar também trabalhos nessa área de conforto de aeronaves considerando a vibração como parâmetro [1]. Porém, como se pode ver na Seção 3.1, os trabalhos anteriores a este tinham como objeto de estudos apenas o ruído ou a vibração, e utilizando, se fosse o caso, o outro estímulo apenas para ambientação.

Portanto, havia dados relativos a pesquisas que envolveram separadamente estímulos acústicos e vibratórios. Com a combinação de ambos, agora utilizados simultaneamente, deseja-se acrescentar mais conclusões àquelas obtidas nos trabalhos prévios.

A justificativa para a realização de uma avaliação criteriosa com resultados bem definidos é que as análises e observações feitas auxiliam o desenvolvedor do produto para aprimorá-lo ainda na sua fase de concepção.

O próprio conceito de conforto é relativo e deve-se tomar cuidado ao associar com pesquisas em outras línguas, por mais que haja uma tradução clara com cognatas¹. Na sua Tese (escrita em inglês, mas em um programa de pós-graduação de uma universidade alemã), Quehl [2] reforça que mesmo duas línguas de origem germânica como o inglês e o alemão já possuem definições diferentes para o que se entende em português como “conforto”.

A caracterização e o entendimento da palavra em qualquer linguagem pode ser limitada, não só pela existência de outras palavras com significados similares no respectivo idioma, mas também pelo uso cotidiano das mesmas. Soma-se a isso tanto os aspectos culturais locais quanto as expectativas individuais relativos ao que se está sendo avaliado e tem-se então uma variável única a qual este trabalho tem a ambição de prever.

1.1 Motivação e descrição do problema

Com o crescimento nas últimas décadas do uso de aeronaves para o transporte, um grande diferencial para as companhias é justamente o conforto dos passageiros, que têm se tornado cada vez mais exigentes. Muitos estudos já foram feitos relativos a diversos parâmetros e sua influência no bem-estar, mas para se ter um desenvolvimento mais efetivo, devem ser estudadas também as interações entre os fatores para mensurar essa sensação de conforto.

¹Em inglês: *comfort*; em espanhol: *confort*; em italiano: *conforto*; em francês: *confort*; em alemão: *Komfort etc.*

Uma das grandes motivações é preencher uma lacuna em linhas de pesquisa relativas à ruído e vibrações combinadas focadas em conforto de aeronaves, que é o passo seguinte nas análises já feitas considerando esses fatores separadamente. Quando fala-se de trabalhos em língua portuguesa, as referências tornam-se ainda mais limitadas.

Também deseja-se verificar a escolha do juri para a realização de ensaios, analisando aspectos demográficos, auxiliando assim para a continuidade desta pesquisa.

Aproveitar-se-ia também de uma estrutura de simulação de aeronaves que o próprio autor colaborou no desenvolvimento em seu mestrado e é propícia para estudos aprofundados na área. O simulador, inclusive, vem sendo utilizado para outros fins, como reprodução das condições vibroacústicas de ônibus para pesquisas relativas ao uso de fones de ouvido por jovens e adolescentes.

1.2 Objetivos e contribuições

O principal objetivo do trabalho é desenvolver, com o uso de ferramentas estatísticas, um modelo de conforto vibroacústico para usuários de aeronaves comerciais.

Para que isso seja possível, foram levantados os seguintes passos a serem seguidos:

1. levantar um histórico das linhas de pesquisa no LVA para dar-se continuidade ao que foi feito;
2. verificar o estado da arte em relação a conforto vibroacústico de aeronaves;
3. realizar um ensaio preliminar para melhor conhecimento em relação aos parâmetros necessários para desenvolver o modelo;
4. verificar o tempo necessário para melhor ambientação dos sentidos.
5. avaliar o impacto da alteração de magnitude tanto de vibração quanto do ruído na sensação de conforto;

6. analisar, a partir do resultado de todos os ensaios, a influência de parâmetros psicoacústicos e biométricos na opinião subjetiva de conforto das pessoas, além de avaliar a influência que cada um dos estímulos, seja acústico ou vibratório, pode ter nesta opinião;
7. planejar e desenvolver um ensaio final e, a partir de métodos estatísticos, utilizar os resultados para a criação do modelo de conforto vibroacústico.

1.3 Organização do documento

Após esta Introdução, no Capítulo 2 ver-se-ão alguns fundamentos básicos para o entendimento do problema e de sua resolução, abordando-se tanto conceitos de ruído e vibrações aplicados à percepção humana, quanto à própria fisiologia em relação a esses estímulos. Em seguida, são abordados brevemente os métodos de avaliação utilizados no ensaio. Além disso, o capítulo finaliza-se com uma conceituação dos métodos estatísticos envolvidos no desenvolvimento do modelo.

O Capítulo 3 trata do estado da arte em relação ao estudo de conforto vibroacústico. A primeira parte faz um histórico interno do laboratório, mostrando os trabalhos de pós-graduação e graduação envolvidos no tema, enquanto que a segunda parte trata de pesquisas ao redor do mundo que trataram de conforto em relação ao ruído, às vibrações, aos dois em conjunto e ao desenvolvimento de modelos.

O Capítulo 4 descreve a preparação para os ensaios feitos para chegar-se aos resultados finais desta Tese. Começa-se descrevendo o simulador, para em seguida tratar de um teste feito para cálculo de limiar de percepção. Por fim, vem o desenvolvimento de um ensaio preliminar para verificação das variáveis e necessidades existentes para a criação de um modelo de conforto vibroacústico, o que resultou nos três capítulos subsequentes.

O Capítulo 5 relata um estudo acerca do tempo de ambientação dos sentidos necessário para a realização de um ensaio de conforto, enquanto que o Capítulo 6 mostra a influência da alteração de amplitude tanto do ruído quanto da vibração nas avaliações subjetivas.

Com base nos resultados alcançados até então, desenvolveu-se, como relatado no Capítulo 7, um modelo de conforto, a partir da realização de um ensaio e de análises estatísticas dos dados obtidos.

Vale ressaltar que cada ensaio específico referente aos capítulos de 4 a 7 tem sua descrição de metodologia, apresentação de resultados e comentários finais.

O Capítulo 8 fecha o conteúdo principal da Tese, com conclusões, comentários gerais sobre os resultados e sugestões para continuidade do trabalho.

Ainda tem-se, como complemento após as referências bibliográficas, o Apêndice A mostrando dados extras do ensaio preliminar, o Apêndice B também trazendo resultados adicionais do ensaio final.

Por fim, tem-se no Anexo A a aprovação do Comitê de Ética e no Anexo B o termo de consentimento livre e esclarecido. Os Anexos de C a O referem-se aos dados técnicos dos manuais dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento desta Tese.

2 Fundamentação teórica

Neste capítulo tem-se uma apresentação breve de alguns conceitos fundamentais em relação aos temas abordados. Antes de iniciar quaisquer estudos relacionados a respostas subjetivas devido a estímulos vibroacústicos, aconselha-se ao pesquisador que tenha conhecimento fundamentado acerca de vibrações, acústica, da fisiologia do corpo humano em relação a essas sensações e, finalmente, de psicofísica, para que se faça uma ligação da fisiologia com as avaliações subjetivas às excitações estudadas.

Por fim, serão apresentados tanto os sistemas de avaliação usados nos ensaios quanto os fundamentos para os métodos estatísticos e matemáticos utilizados para o modelamento de conforto em relação aos parâmetros objetivos propostos.

2.1 Vibrações e ruído

Uma vibração pode ser definida como uma oscilação mecânica em torno de um ponto de equilíbrio (ou referencial) que transfere energia, mas não matéria. Quando aplicada à percepção humana de corpo inteiro, normalmente considera-se a faixa de frequência de 1 a 100 Hz [3].

O conceito de som é amplo e pode variar dependendo da fonte em que se pesquisa. Como fenômeno físico, pode ser caracterizado como a propagação de vibrações longitudinais em um meio elástico (que possui massa e elasticidade), formando uma sequência de compressões e rarefações. Essa propagação, no ar, ocorre a uma velocidade de cerca de 340 m/s, considerando-se uma temperatura de 20°C e uma pressão atmosférica de 1 atm [4].

Em termos psicoacústicos, pode-se também restringir este conceito, como fez Bistafa [5], aplicando-o à percepção dessas oscilações pelo sistema auditivo. Gerges [6] definiu o som restringindo-o à sua percepção por um ser humano típico, conceituando-o como uma variação da pressão atmosférica compreendida nas faixas de frequências e amplitudes que a orelha humana percebe. Tem-se como limiar padrão para a frequência de 1 kHz a pressão acústica de 20 μPa , mas a percepção varia conforme a frequência do estímulo.

O conceito de ruído tem uma maior variação de acordo com a área a qual se está estudando. Bistafa [5], em seu livro que trata de controle de ruído, define-o como um “som indesejável”, alertando para ter-se cuidado com a subjetividade acerca da palavra “indesejável”. Gerges [6] ainda acrescenta a palavra “desagradável” a este conceito. Em entrevistas informais, perguntando-se acerca de ruído, ouviu-se descritores relativos ao som como “inarticulado”, “sem harmonia”, “desconfortável” *etc.*

Todavia, Bistafa [5] salienta que um ruído pode ser utilizado para efeitos positivos, como no combate a outro mais perturbador, utilizando a técnica de mascaramento. Além disso, reduzir ao mínimo possível o ruído de fundo também pode causar sensações de total privação, além de que, após o sistema auditivo se adaptar a essa condição, acaba tornando-se mais sensível, começando a perceber sons como os da corrente sanguínea, das batidas do coração e do sistema digestivo.

A sensação relativa ao ruído depende de alguns fatores, como:

- magnitude;
- duração;
- sensibilidade auditiva de cada pessoa;
- necessidade de concentração (ex.: estudar);
- o contexto (ex.: o som de uma festa pode ao mesmo tempo agradar aos participantes e incomodar a vizinhança).

Alguns efeitos extra auditivos (involuntários) que podem ocorrer devido à exposição ao ruído são: dilatação da pupila; aumento da produção de hormônios da tireoide; aumento nos batimentos cardíacos; aumento da produção de adrenalina e corticotrofina; contração do estômago e do abdômen; contração dos vasos sanguíneos; *etc.* [7].

2.2 Fisiologia humana

A orelha, em sua totalidade, é uma estrutura que compreende os sistemas auditivo e vestibular. O primeiro está relacionado com o sentido da audição, enquanto que o segundo passa informações ao sistema nervoso acerca da movimentação e posição da cabeça, sendo então relativo ao equilíbrio do corpo [4, 8].

Fuller *et al.* [9] divide o sistema auditivo em quatro partes principais: orelha externa; orelha média; orelha interna; via neural, que podem ser vistas na Figura 2.1.

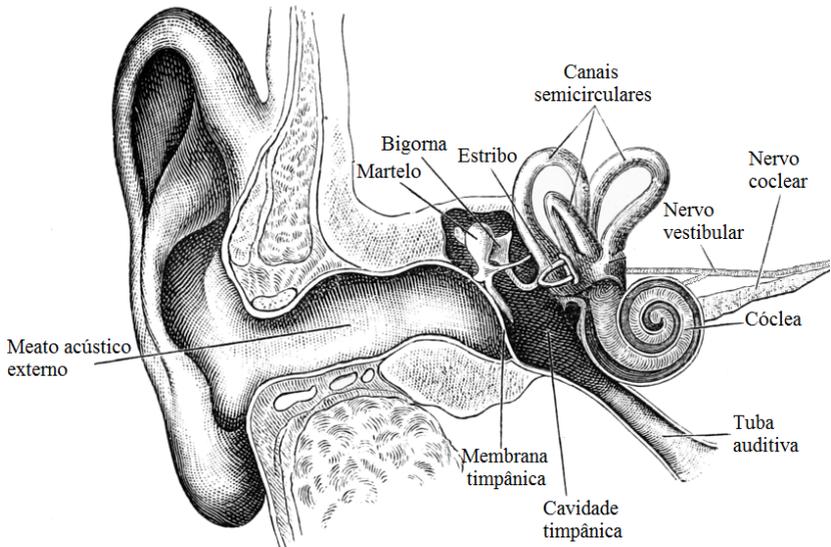


Figura 2.1.: Estruturas da orelha humana. Adaptado de la Cour [10].

Na orelha externa encontram-se o pavilhão auricular, o meato acústico externo e a membrana timpânica. Possui, como função principal, amplificar as ondas sonoras do meio externo até o tímpano.

Na orelha média se situam a cavidade timpânica, a cadeia de ossículos (martelo, bigorna e estribo) e a tuba auditiva¹. Sua estrutura permite a transformação de impedância do som vindo do ar externo aos líquidos labirínticos de maneira altamente eficiente.

A orelha interna é composta pelo labirinto ósseo (cóclea, vestíbulo e canais semicirculares) e pelo labirinto membranoso (ou membranáceo, formado por sacos e dutos abrigados pelo labirinto ósseo). Em relação ao sistema auditivo, é nesta parte que ocorre a transdução das vibrações mecânicas para um sinal elétrico. Porém, é na orelha interna que se localiza o sistema vestibular, responsável por, devido a acelerações lineares e angulares, perceber a movimentação da cabeça, ajustando o corpo para manter o equilíbrio.

Por fim, as fibras neurais (nervos coclear e vestibular) transmitem a informação processada pelos sistemas acima descritos para o córtex auditivo, centro nervoso responsável pela percepção. Devido às propriedades físicas desse sistema, a faixa de frequência de percepção auditiva de um ser humano é de aproximadamente 20 Hz a 20 kHz [5, 9].

Considerando-se a percepção da vibração, não existe um único órgão, mas uma combinação dos sinais dos sistemas visual, auditivo, vestibular e somático [3].

O sistema visual, além da própria ressonância do globo ocular que ocorre em frequências entre 30 e 80 Hz, também tem a capacidade de perceber o movimento dos objetos pela mudança de posição na retina, principalmente em baixa frequência e para grandes deslocamentos [11].

O sistema auditivo percebe não só o som produzido pela vibração das estruturas pelo ar, mas também a vibração conduzida pelos ossos do crânio [12].

¹Antigamente chamada de "Trompa de Eustáquio", em homenagem a Bartolomeo Eustachi (1500 ou 1514 - 1574), médico italiano, descobridor dessa conexão entre a orelha média e a boca.

No entanto, o sistema vestibular, localizado na orelha interna e composto pelos canais semicirculares e pelo vestíbulo, tem seu funcionamento baseado na inércia da endolinfa² que preenche os canais, sendo sensível às acelerações lineares e rotacionais [3].

Por fim, o sistema nervoso somático “sente” as vibrações de diferentes formas: por meio de proprioceptores posicionados nos músculos, tendões e articulações, que fornecem a informação de forças e movimento; devido a terminações nervosas na derme, capazes de identificar vibrações de frequências relativamente mais altas (100 a 500 Hz), além de sensores na derme e na epiderme, que respondem a diferentes faixas de frequências, variando de 5 até 400 Hz; e por meio de receptores no abdômen, que dão a sensação de vibração nos órgãos internos [3, 13].

2.3 Psicofísica e psicoacústica

A psicofísica é um ramo da psicologia que estuda as relações matemáticas entre estímulos físicos mensuráveis e as sensações subjetivas referentes a eles, além dos mecanismos fisiológicos que envolvem essa transformação do estímulo em sensação. A primeira relação conhecida nesta área é a **Lei de Weber³-Fechner⁴**, que relaciona proporcionalmente a sensação de percepção a um estímulo com o logaritmo da intensidade [14].

Para equacionar qualquer tipo de sensação, existem dois parâmetros importantes de serem conhecidos: o limiar absoluto, que é o mínimo que se pode perceber do estímulo; e o limiar da diferença, que é a menor variação perceptível daquele estímulo.

Weber determinou que a razão entre estes dois valores é uma constante para qualquer sentido, criando inicialmente o limiar entre dois pontos, que é a menor distância em que se pode diferenciar dois pontos de apenas um [15]. Extrapolando para outras formas de percepção, tem-se a relação:

²Líquido presente no labirinto membranoso. Também conhecida como “fluido de Scarpa”, em homenagem ao anatomista italiano Antonio Scarpa (1752-1832).

³Em homenagem a Ernst Heinrich Weber (1795-1878), médico alemão.

⁴Em homenagem a Gustav Theodor Fechner (1801-1887), filósofo e físico alemão.

$$\frac{\Delta E}{E} = k, \quad (2.1)$$

sendo E a magnitude do estímulo inicial avaliado, ΔE o limiar da diferença para esse estímulo e k um valor constante (“Constante de Weber”), variando para cada tipo de sensação.

Fechner adaptou a Equação (2.1) para prever a diferença causada na sensação humana (ΔSe) devido à variação em um estímulo citada acima:

$$\Delta Se = k \cdot \frac{\Delta E}{E}. \quad (2.2)$$

Diferenciando a Equação (2.2) e trabalhando matematicamente, chega-se a uma relação entre a sensação (Se) e o estímulo (E):

$$Se = k \cdot \ln \left(\frac{E}{E_0} \right), \quad (2.3)$$

com E_0 representando o limiar do estímulo E .

Stevens [16] propôs uma estimativa para relacionar a magnitude psicológica (ψ) com a magnitude física (ϕ):

$$\psi = k \cdot \phi^m, \quad (2.4)$$

que ficou conhecida como **Lei de Stevens**⁵. Neste caso, k e m são constantes, sendo que a primeira depende das unidades utilizadas, e a segunda determina a variação da sensação. Os valores dessas constantes variam de estudo para estudo, não devendo ser comparados devido à grande variação resultante dos fatores considerados e métodos de ensaio utilizados [17].

Em relação ao desenvolvimento dos estudos supracitados, quando aplicada à sensação auditiva, essa área da psicofísica é chamada especificamente de psicoacústica. Contudo, para a sensação das vibrações não há uma denominação própria, já que não foi encontrada em nenhuma fonte o termo “psicovibração”. Estudos mais recentes envolvendo esses temas podem ser vistos na Seção 3.2.

⁵Em homenagem a Stanley Smith Stevens (1906-1973), psicólogo estadunidense.

Apesar de a pressão sonora ter como unidade principal o pascal (Pa)⁶ e a aceleração o m/s^2 , para adequarem-se à percepção humana, que é em escala logarítmica, costumam-se utilizar as equações:

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad (2.5)$$

e

$$\text{NAV} = 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_0} \right). \quad (2.6)$$

Ambas usam a escala decibel (dB), que é um submúltiplo do bel (B)⁷, sendo que $1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$. Na Equação (2.5), NPS é chamado Nível de Pressão Sonora, relativo a uma pressão eficaz P e adotando um valor de referência de $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$ ⁸, enquanto que, na Equação (2.6), NAV se refere ao Nível de Aceleração de Vibração relativo à aceleração a eficaz resultante - ou em alguma direção específica, que pode ser x (frontal), y (lateral) ou z (vertical), se informada no índice -, para uma aceleração de referência de $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$ [12]⁹.

Nas equações (2.5) e (2.6) utilizam-se, respectivamente, os valores eficazes de pressão sonora e aceleração. O valor eficaz de uma grandeza corresponde à sua raiz média quadrática¹⁰, ou seja, à raiz quadrada da média aritmética da soma dos quadrados de todos os n pontos medidos. Por exemplo, para a aceleração a , tem-se:

$$a = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2}{n}}. \quad (2.7)$$

⁶Em homenagem a Blaise Pascal (1623-1662), matemático, físico, filósofo e teólogo francês.

⁷Em homenagem a Alexander Graham Bell (1847-1922), engenheiro, inventor e cientista escocês.

⁸Utilizado para propagação no ar. Corresponde aproximadamente ao limiar da audição humana em 1000 Hz [6].

⁹Ao contrário do NPS, não existe um motivo fisiológico para o uso desta referência. O valor de 10^{-6} m/s^2 é o mais aceito atualmente [18], mas anteriormente o mais difundido era de $a_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$.

¹⁰Ou *r.m.s.*, do inglês *root mean square*.

2.3.1 Curvas de percepção

Como já foi mencionado, a percepção do som varia com a frequência do sinal. Na Figura 2.2, têm-se as curvas padronizadas para delimitar os limites da audição para os seres humanos. Em destaque na curva inferior (A), que remete ao mínimo NPS audível, o ponto de referência utilizado para o 0 dB, em 1000 Hz.

Esses limiares alteram-se com o passar do tempo, aumentando, pelo envelhecimento natural das células (presbiacusia), independente do gênero, sendo que para frequências abaixo de 1000 Hz ocorre uma perda entre 5 e 10 dB a cada 20 anos e, para frequências mais altas (cerca de 8000 Hz), a perda pode chegar a 40 dB nesse mesmo período, principalmente em homens.

A curva superior (B) representa o limiar da dor, que é quando a magnitude do som é forte o suficiente para tornar-se tanto fisicamente quanto psicologicamente intolerável.

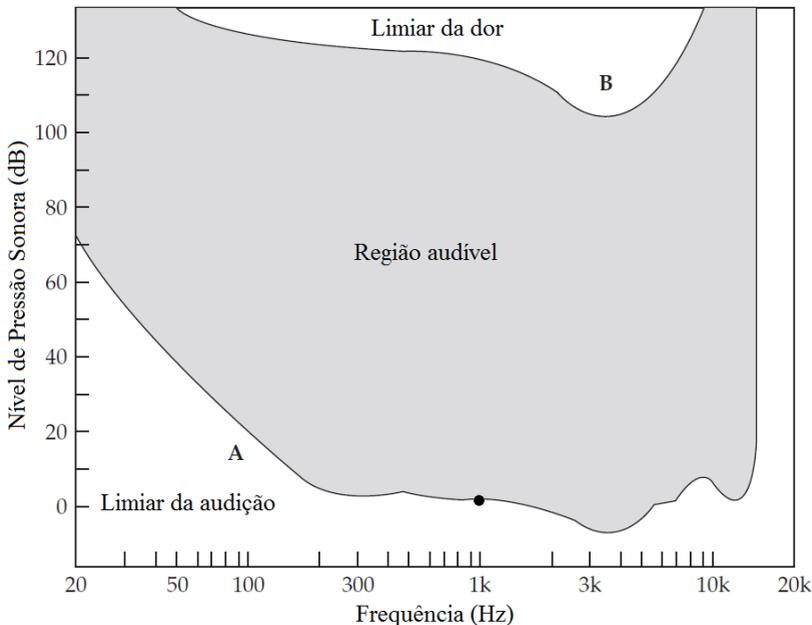


Figura 2.2.: Área da audição humana. Adaptado de Everest e Pohlmann [19].

A percepção da vibração varia não só com a frequência, mas também com a direção e, assim como ocorre com os outros sentidos, a sensibilidade à vibração também é diminuída com a idade [20]. Bartlett *et al.* [21] estimaram um aumento linear do limiar de deslocamento para vibrações verticais até os 65 anos, quando a perda na percepção começa a ficar muito abrupta. Em ambos os artigos, porém, não foram registradas diferenças significativas entre sujeitos na faixa de 20 a 30 anos.

2.3.2 Limiares diferenciais

O limiar diferencial perceptível do som, que é a mínima variação do nível de pressão sonora que se é capaz de sentir, de acordo com Bistafa [5], é de aproximadamente 1 dB (daí a preferência em utilizar decibel ao invés de bel) para valores baixos de NPS (cerca de 30 a 40 dB). Para valores de NPS maiores, esse diferencial varia de $1/3$ a $1/2$ dB. Em relação à frequência, considerando-se tons puros, o limiar diferencial perceptível é de aproximadamente 2 a 3 Hz para frequências abaixo de 500 Hz. Acima deste valor, costuma-se aproximar este limiar para um valor relativo de 0,5%.

Para vibração de corpo inteiro, Bellmann *et al.* [22] encontraram um valor de 1,5 dB de limiar diferencial para tons puros verticais entre 5 e 50 Hz, com pouca variação em função da frequência. Schaefer [23] fez um teste para estímulos de voo e verificou que mais de 50% das pessoas perceberam a diferença de 1 dB. Para atingir mais de 90% de uma amostra, o autor verificou que é necessário uma diferença de ao menos 3 dB no nível de vibração.

Ao analisar o limiar diferencial perceptível de frequência de vibração, Bellmann *et al.* [22] verificaram um acréscimo linear do mesmo com a frequência, chegando a um valor relativo de aproximadamente 15% na faixa de 5 a 40 Hz. O nível de aceleração utilizado foi de 96 dB, com vibrações verticais. Merchel *et al.* [24], também para oscilações verticais, verificaram uma variação no limiar diferencial de 35%, para uma referência de 20 Hz, até quase 80%, para uma referência de 90 Hz.

2.3.3 Parâmetros psicofísicos

As sensações humanas para estímulos vibroacústicos dependem de uma série de fatores, que dependem essencialmente da amplitude, da frequência e das variações no tempo com que esse estímulo atinge cada pessoa.

Muitos desses parâmetros são conhecidos por seus nomes estrangeiros, principalmente em inglês, apesar de boa parte ser originária do alemão [25]. Todavia, como a proposta deste trabalho é fazer uma avaliação de usuários que falam o português (brasileiro), optou-se por usar ao longo do documento o verbete lusófono que mais se adequasse a cada parâmetro, sendo que os termos propostos podem ser vistos na Tabela 2.1.

Cada um dos modelos escolhidos para a avaliação sonora possui influência maior de variáveis distintas: audibilidade (magnitude), agudeza (frequência), flutuações lentas (modulações em baixa frequência) e tonalidade (concentração de tons). Para cada parâmetro, por ter sido calculado a partir de gravações em voo com a utilização de um sistema biauricular, tem, como valores utilizados para análises, não só o máximo entre as medições utilizadas sobre os dois canais como também a diferença absoluta entre as mesmas. Paul [25] utilizou, além dos citados, também a média entre os canais, mas neste trabalho julgou-se que a média não tem significado físico relevante e não foi avaliada.

Tabela 2.1.: Termos proposto em português e seus equivalentes utilizados em outras linguagens dos parâmetros psicoacústicos utilizados nesta Tese.

Português	Inglês	Alemão	Francês	Italiano
audibilidade	loudness	Lautheit	sonie	volume
agudeza	sharpness	Schärfe	acuité	nitidezza
flutuações lentas	fluctuation strength	Schwankungsstärke	force de fluctuation	fluttuazione
tonalidade	tonality	Tonheit	tonalité	tonalità

Um parâmetro que é muito utilizado em outros trabalhos relativos à psicoacústica são as flutuações rápidas que, quando traduzidas para um modelo em português, são normalmente chamadas de “asperidade” ou “rugosidade”¹¹, mas Paul [25] salienta que, no “português brasileiro”, não se associam essas palavras ao som da mesma maneira que das outras línguas e, mesmo de uma língua para a outra cujo termo já é consagrado, o entendimento pode gerar divergências, daí a não utilização desse parâmetro nesta Tese.

Para os cálculos desses modelos, deve-se também introduzir o conceito de “banda crítica” (z), que é uma escala auxiliar para classificar sons graves e agudos, e varia em função da frequência (f , dada em Hz) da seguinte forma:

$$z = 13 \arctan \left(\frac{0,76 f}{1000} \right) + 3,5 \arctan \left(\frac{f}{7500} \right)^2, \quad (2.8)$$

e tem por unidade o *Bark*¹² [14]. Essa escala engloba as 24 bandas críticas da audição humana, sendo definida para cada variação de valor da escala corresponder a uma mesma variação de percepção.

Em relação à vibração, utilizam-se os valores mais relativos à magnitude ponderada, calculados a partir da norma ISO 2631-1 [26]¹³ para postura sentada. Deve-se tomar cuidado para considerar não só a aceleração resultante como a vibração nas três direções ortogonais separadamente, já que cada uma pode resultar em um efeito diverso no corpo humano.

Todavia, Maeda [27] salienta que muitas publicações criticam os cálculos utilizados na norma, e que se carece de parâmetros para cálculo da sensação de vibrações.

¹¹Do alemão *Rauigkeit*, também conhecido pelo termo em inglês *roughness*, e adotado para as línguas latinas como *rugosité* (francês) e *rugosità* (italiano).

¹²Em homenagem a Heinrich Georg Barkhausen (1881-1956), físico e eletrotécnico alemão.

¹³ISO 2631-1: *Mechanical vibrations and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part I: General requirements.*

2.3.3.1 Audibilidade

A audibilidade (N) está relacionada com a percepção do volume sonoro em função da frequência. Stevens [16] propôs uma formulação para esta variação na sensação auditiva, utilizando como som de referência para o valor unitário um tom puro de 1000 Hz a 40 dB de NPS. Assim, foi criada uma unidade, chamada *sone*¹⁴, que dobra de valor a cada acréscimo de 10 dB no NPS, e é calculada em função da Escala Bark (z) da seguinte maneira, segundo Zwicker e Fastl [14]:

$$N = \int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz . \quad (2.9)$$

Na Equação (2.9), O termo N' é chamado de “audibilidade específica”, tem unidade [sone/Bark] e pode ser equacionado como:

$$N' = 0,08 \left(\frac{I_{LS}}{I_0} \right)^{0,23} \left[\left(0,5 + 0,5 \frac{I}{I_{LS}} \right)^{0,23} - 1 \right] , \quad (2.10)$$

no qual os termos I_{LS} , I_0 e I correspondem, respectivamente, às excitações (em termos de intensidades) sonoras no limiar do silêncio (Curva A na Figura 2.2), na intensidade de referência (10^{-12} W/m^2) e na banda crítica que está sendo analisada.

O modelo de Zwicker, por ser mais consolidado e, de acordo com Paul [25], o melhor modelo de quantificação da audibilidade implementado nos programas computacionais, foi utilizado como uma das referências nesta tese. Porém, foram citados outros modelos de audibilidade desenvolvidos, com resultados bem diferentes, como os de Stevens-Mark, ou o do próprio Zwicker para sinal variando no tempo, ou o de Moore para sons não estacionários, ou ainda o de Boulet para sons impulsivos, entre outros.

¹⁴Stevens propôs o nome *phone* em um congresso da Sociedade de Acústica da América, em dezembro de 1935, mas não obteve sucesso por poder causar confusão com a palavra *phon*, que em alemão é equivalente ao decibel. Logo, o nome *sone* foi proposto e aceito sem objeções [16].

2.3.3.2 Agudeza

A agudeza (S) é uma métrica que considera mais a distribuição do espectro de frequências sonora, e tem por unidade o *acum*¹⁵. Contudo, essa grandeza depende não só da densidade do espectro¹⁶, mas também da sua audibilidade. O valor unitário representa a sensação de agudeza para um som com uma banda crítica centrada em 1 kHz, com menos de 160 Hz de largura e 60 dB de NPS.

Existem alguns modelos para agudeza, sendo o primeiro é sugerido por von Bismarck [28], cujo resultado depende dos valores de audibilidade (N). Posteriormente, Aures [29] ajustou alguns parâmetros até chegar à relação:

$$S = 0,55935 \cdot \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' e^{0,171z} dz}{1000 \ln \left(\frac{N+20}{20} \right)} . \quad (2.11)$$

2.3.3.3 Flutuações lentas

As flutuações lentas (F) estão relacionadas com as modulações da intensidade do som em baixa frequência. Tem como unidade o *vacil*¹⁷, que é definido como um tom de 1 kHz, com NPS de 60 dB, com 100% de modulação em amplitude¹⁸ na frequência de 4 Hz. Essa frequência de modulação está relacionada com a taxa normal da fala, que é de aproximadamente 4 sílabas por segundo.

Zwicker e Fastl [14] sugerem, para este modelo de variável, a seguinte formulação:

$$F = 0,008 \cdot \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} \Delta L_{\text{mod}} dz}{(f_{\text{mod}}/4) + (4/f_{\text{mod}})} , \quad (2.12)$$

¹⁵Palavra que vem do latim e significa “agudo”.

¹⁶A densidade espectral é uma função de uma frequência variável associada a um processo estocástico.

¹⁷Do latim *vacillare*, que pode ser traduzido para o português como “oscilar” ou “tremular”.

¹⁸Nesta forma de modulação, a amplitude de um tom puro (portador) varia em função do sinal de interesse (modulador), com a frequência e a fase do sinal portador sendo mantidas constantes.

que depende da frequência de modulação (f_{mod}) e da amplitude de mascaramento (ΔL_{mod}), que podem ser vistos na Figura 2.3.

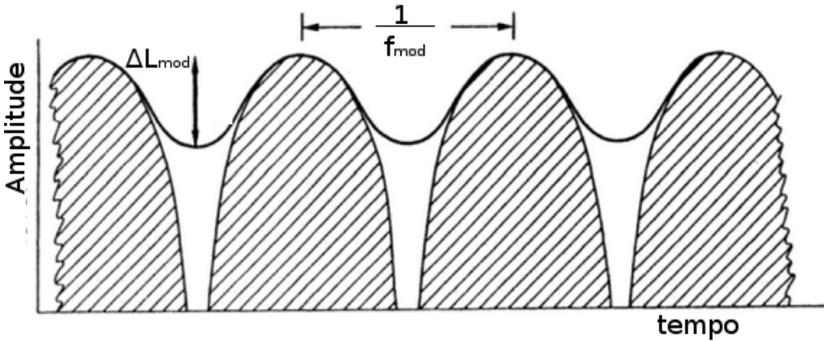


Figura 2.3.: Frequência de modulação e amplitude de mascaramento. Adaptado de Zwicker e Fastl [14].

2.3.3.4 Tonalidade

A tonalidade (T) quantifica a percepção de tons em um sinal de espectro complexo. Existem algumas maneiras de calcular essa tonalidade, como por exemplo o nível de proeminência ou a razão tom-ruído, mas, dada a natureza do modelo psicoacústico, optou-se por usar o modelo desenvolvido por Aures [29], que tomou como base os estudos feitos por Terhardt *et al.* [30] e seus trabalhos acerca da percepção da altura do som.

A equação, que tem como unidade o tu ¹⁹, é dada por:

$$T = c \cdot w_T^{0,29} w_{Gr}^{0,79}, \quad (2.13)$$

com c representando um coeficiente de calibração para tornar unitário o valor relativo a um tom puro de 1 kHz com um nível de 60 dB. A ponderação w_{Gr} , que está relacionada com a razão de ruído (o subíndice vem do alemão *Geräuschanteils*), depende da audibilidade total (N) e é calculada por:

$$w_{Gr} = 1 - \frac{N_{Gr}}{N}, \quad (2.14)$$

¹⁹Do inglês *tonality unity*, ou “unidade de tonalidade”.

sendo que N_{Gr} é a audibilidade do tom. Por outro lado, a ponderação w_T , que está relacionada aos n componentes tonais (o subíndice vem do alemão *tonalen Komponentem*), depende de outros fatores, podendo ser vista como:

$$w_T = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_1 w_2 w_3)_i^2} . \quad (2.15)$$

Na Equação (2.15), tem-se as seguintes ponderações para cada i -ésimo componente tonal, representando, respectivamente, os efeitos de largura de banda crítica (Δz_i), de frequência (f_i) e de proeminência:

$$w_1 = \left(\frac{0,13}{\Delta z_i + 0,13} \right)^{\frac{1}{0,29}} ; \quad (2.16)$$

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,2 \left(\frac{f_i}{700} + \frac{700}{f_i} \right)^2}} ; \quad (2.17)$$

$$w_3 = 1 - e^{-\frac{\Delta L_i}{15}} . \quad (2.18)$$

Nessa última equação, o componente ΔL_i representa o nível de proeminência do componente tonal (em dB), e sua formulação foi desenvolvida por Terhardt *et al.* [30].

2.3.3.5 Acelerações ponderadas

Os termos de aceleração ponderada estão relacionados com a magnitude de vibração, com as considerações obtidas a partir da norma ISO 2631-1 [26].

A norma especifica ponderações considerando postura, direções, tipo de vibração e localização da medição, tanto para percepção quanto para saúde e para conforto. No presente estudo, considera-se como condição de ensaio uma pessoa sentada, com vibrações triaxi-

ais lineares de corpo inteiro, com medição nos pés e estudo focado no conforto.

A norma também sugere a divisão em bandas de $1/3$ de oitava, com ponderação para cada banda. O fator multiplicador para cada banda analisada pode ser visto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2.: Valores de ponderação (W) por banda de $1/3$ de oitava segundo a norma ISO 2631-1 (1997), de acordo com as condições estabelecidas nos ensaios.

Frequência central (Hz)	Fator mult.	Frequência central (Hz)	Fator mult.	Frequência central (Hz)	Fator mult.
1	0,482	8	1,036	63	0,186
1,25	0,484	10	0,988	80	0,132
1,6	0,494	12,5	0,902	100	0,0887
2	0,531	16	0,768	125	0,0540
2,5	0,631	20	0,636	160	0,0285
3,15	0,804	25	0,513	200	0,0152
4	0,967	31,5	0,405	250	0,0079
5	1,039	40	0,314	315	0,00398
6,3	1,054	50	0,246	400	0,00195

Esses fatores (W) são utilizados para o cálculo da aceleração ponderada em cada direção²⁰, para as 27 bandas, da seguinte forma:

$$A_{x \text{ ou } y \text{ ou } z} = \sqrt{\sum_{i=1}^{27} W_i^2 (a_i)_{x \text{ ou } y \text{ ou } z}^2}, \quad (2.19)$$

no qual W_i é o fator de ponderação para a i -ésima banda e a_i é a aceleração eficaz (ou média quadrática) na direção a ser calculada (x , y ou z) relativa a essa banda.

Dependendo da direção da vibração considerada e de seu efeito, deve-se utilizar um peso diferente. A norma recomenda, para situação escolhida, ponderar por eixo com os valores indicados na Tabela 2.3.

²⁰Chamadas de a_w na norma ISO 2631-1.

Tabela 2.3.: Fatores de escala (k) por direção segundo a norma ISO 2631-1 (1997), de acordo com as condições estabelecidas nos ensaios.

Direção	x	y	z
Fator multiplicativo	0,25	0,25	0,4

Esses fatores (k) são utilizados para o cálculo da aceleração ponderada resultante (A)²¹, da seguinte maneira:

$$A = \sqrt{k_x^2 A_x^2 + k_y^2 A_y^2 + k_z^2 A_z^2}. \quad (2.20)$$

2.3.3.6 Freqüências centrais de vibração

Com o intuito de considerar o equivalente à variação de frequências, propõe-se nesta Tese usar um conceito de centroide ponderado no espectro de banda larga, criando-se aqui os modelos de “frequência central de vibração por direção” (Φ_x ou y ou z).

Para o cálculo em cada direção, utilizam-se seus valores respectivos de aceleração ponderada por banda (oriundos da Tabela 2.2 para os cálculos de A_x ou y ou z) transformados em dB (Equação (2.6)), porém com valor de referência de 0,001 m/s², relativo a aproximadamente 1/10 do limiar de percepção de vibração. Esse valor foi escolhido pouco abaixo do limiar para não descartar níveis advindos pessoas com maior sensibilidade em algumas frequências. Os níveis negativos foram posteriormente zerados, por estarem abaixo de qualquer percepção e não influenciarem no resultado final.

As 27 bandas da Tabela 2.2 foram numeradas de 0 a 26, e aplicou-se então o conceito de centroide no gráfico do espectro para cada banda, calculando-se assim a frequência central equivalente em cada direção:

²¹Chamada de a_v na norma ISO 2631-1.

$$\log_{1,25} (\Phi_{x \text{ ou } y \text{ ou } z}) = \frac{\sum_{i=0}^{26} i \cdot 20 \log_{10} \left(\frac{A_i (x \text{ ou } y \text{ ou } z)}{0,001} \right)}{\sum_{i=0}^{26} 20 \log_{10} \left(\frac{A_i (x \text{ ou } y \text{ ou } z)}{0,001} \right)}. \quad (2.21)$$

Na Equação (2.21), deve-se ressaltar de que, em cada uma das i -ésimas iterações, caso o valor de $\log_{10} \left(\frac{A_i (x \text{ ou } y \text{ ou } z)}{0,001} \right)$ fosse menor do que zero, era considerado nulo.

2.4 Métodos de avaliação

As técnicas aplicadas nos ensaios desta tese foram essencialmente o Diferencial Semântico (DS) e a Escala de Resposta (ER).

O DS, criado por Osgood *et al.* [31], faz uso de escalas bipolares compostas por adjetivos antinômicos, e encontra-se embasado num referencial teórico que discute questões pertinentes à formação do significado e às atitudes do indivíduo em relação ao objeto, possibilitando o registro, quantificação e comparação das propriedades inerentes a um ou mais conceitos [32].

Estudando-se as atitudes, pode-se prever o comportamento a partir delas [33]. Essas atitudes podem ser observadas em três níveis: afetivo, por meio de declarações verbais de cunho afetivo; cognitivo, devido a declarações verbais de crenças; e comportamental, resultante de declarações verbais relativas a ações [34]. Aplicando-se ao campo vibroacústico, com essa técnica tem-se o objetivo de medir aspectos conotativos do significado, ou seja, as qualidades de eventos vibroacústicos e as percepções do ouvinte frente às características do som e da vibração [2].

A ER, de acordo com Rohrmann [35], faz uso de uma escala similar a uma régua onde o avaliador atribui um valor equivalente à sua sensação subjetiva referente ao questionamento feito. Apesar de não existir uma padroinação definida das escalas, possui a vantagem, segundo Otto *et al.* [36], de ser um método simples, cujas pessoas estão habituadas ao processo, e de fornecer dados quantitativos relativos à diferença entre os estímulos avaliados.

2.5 Métodos estatísticos

Aqui nesta seção serão apresentados os conceitos matemáticos envolvidos nos métodos estatísticos de análise utilizados no Capítulo 4. A base estatística para o desenvolvimento da tese foi consultada principalmente na publicação de Montgomery e Runger [37].

A revisão publicada está relacionada aos métodos efetivamente utilizados, porém existem outras opções que foram estudadas e, neste caso, descartadas como lógica *Fuzzy*, modelo Rasch, análise conjunta, teoria fundamentada nos dados, algoritmos genéticos, modelo Bradley-Terry-Luce (BTL) e análise de agrupamento.

2.5.1 Regressão múltipla por mínimos quadrados

A regressão múltipla por mínimos quadrados é um método que relaciona variáveis a partir de uma função genérica, normalmente polinomial, que em geral não passa por todos os pontos, gerando assim um erro associado a cada um deles. Boa parte dos modelos de predição de conforto usam o método de regressão linear para estimar os pesos multiplicativos de seus parâmetros, como por exemplo a norma ISO 2631-1 [26].

Em uma regressão linear simples tem-se como componentes um regressor (X), que é uma variável independente, e uma variável de resposta (Y), dependente de X , cuja relação pode ser descrita por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon, \quad (2.22)$$

com ϵ sendo um erro aleatório de média zero e variância (σ^2) desconhecida.

Ao estimar os valores de β , chega-se a uma equação linear (regressão). Gauss²², visando melhorar o ajuste dessa reta, propôs estimar esses parâmetros de maneira que se minimizassem as distâncias verticais entre os pontos observados (X_i, Y_i) e a linha traçada. Essa técnica chama-se “método dos mínimos quadrados” e tem como equação da linha de regressão estimada \hat{Y} :

²²Johann Carl Friedrich Gauß (1777-1855), cientista alemão.

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X, \quad (2.23)$$

em que os valores de $\hat{\beta}_i$ são chamados de “estimadores de mínimos quadrados”, o. A cada observação (X_i, Y_i) , quando a mesma tem seus valores substituídos na equação, é associado um erro

$$e_i = \hat{Y}_i - Y_i, \quad (2.24)$$

que deve ser somado às parcelas da direita para satisfazer a igualdade. Esse erro é chamado de “resíduo”.

O resíduos, mais especificamente a soma do quadrado de todos eles, são usados no cálculo da variância estimada ($\hat{\sigma}^2$) para as n observações:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - 2}. \quad (2.25)$$

Para o cálculo da adequação de um modelo costuma-se usar uma medida chamada coeficiente de determinação (R^2), dado por:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (2.26)$$

em que \bar{Y} é o valor médio de todas as medições Y_i .

Montgomery e Runger [37] ressaltam que esse coeficiente deve ser analisado com cautela, já que, ao adicionar variáveis (inclusive termos polinomiais de maior grau) ao modelo, sempre haverá um aumento no seu valor, devendo-se fazer uma análise dos erros para verificar se o novo modelo é realmente melhor que o anterior.

Ao adicionar diferentes variáveis na equação e termos de graus maiores, tem-se o modelo de regressão polinomial múltipla, que pode ser, por exemplo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \beta_3 X_1 X_2 + \beta_4 X_3^3 + \epsilon. \quad (2.27)$$

Nesse caso, têm-se três variáveis (X_1 , X_2 e X_3), havendo interação entre elas, e o termo de maior grau sendo cúbico.

No caso de regressão múltipla, há uma medida que penaliza o analista por adicionar termos que não levam a um melhor ajuste do modelo, definida por:

$$R^2_{\text{ajustado}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \frac{n-1}{n-\rho}, \quad (2.28)$$

com ρ sendo o número de parâmetros.

Outra verificação de adequação do modelo pode ser feita com análise de resíduos, considerando cada valor de e_i ou então calculando os resíduos padronizados (d_i):

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}}. \quad (2.29)$$

2.5.2 Redes neurais artificiais

O método de redes neurais foi desenvolvido com base em ligações que funcionam de forma semelhante ao cérebro humano, resolvendo problemas complexos em que um tratamento analítico seria inviável ou até impossível.

Utiliza-se de sistemas matemáticos e computacionais estruturados por nós simples, chamados neurônios, que são interligados por uma rede de nós (rede neuronal), baseados no funcionamento das estruturas cerebrais.

Esse método encontra aplicações não só na área aeroespacial, mas também na automotiva, em bancos, sistemas de defesa, eletrônicos, entretenimento, finanças, indústria, seguros, manufatura, saúde, óleo e gás, robótica, comunicação pessoal, telecomunicações, trans-

porte *etc.*

O neurônio é uma célula nervosa delimitada por uma fina membrana, e foi identificado e descrito detalhadamente por Cajal [38]. Do corpo celular, nos quais ocorrem os processos metabólicos do neurônio, partem as ramificações responsáveis pela transmissão da informação: os dendritos e o axônio. Os primeiros conectam-se a outros neurônios, enquanto que o segundo faz a ligação com outras células do sistema nervoso [39].

Essa transmissão de informação é feita por manifestações elétricas dos neurônios [40] a partir de muitas entradas (dendritos) e apenas uma saída (axônio). Ao todo, o cérebro humano tem cerca de 86 bilhões desse tipo de células interconectadas.

No modelo artificial matemático, este número dificilmente passa de algumas dezenas. Com esse método, o neurônio pode ser caracterizado como o esquema visto na Figura 2.4a. Nele, tem-se a entrada escalar o , que é multiplicada por um valor escalar h , com este produto q sendo transmitido para a função de transferência g , resultando um escalar de saída v [39].

Adicionando um termo de predisposição (b ou *bias*), que é somado ao produto wo para formar n , tem-se como resultado o esquema da Figura 2.4b.

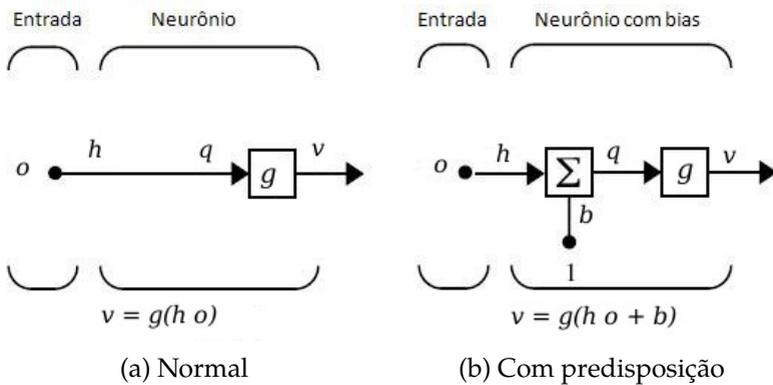


Figura 2.4.: Diagrama de funcionamento de um neurônio.

A função de transferência pode ser de diversos tipos, desde binário, linear, ou até alguma função mais complexa, retornando valores entre 0 e 1.

O esquema mostrado acima é mais simples, mas os neurônios normalmente possuem J parâmetros de entrada e podem ser dispostos em Z camadas [39], chegando-se ao resultado mostrado na Figura 2.5, na qual tem-se um exemplo de rede neural com 3 camadas.

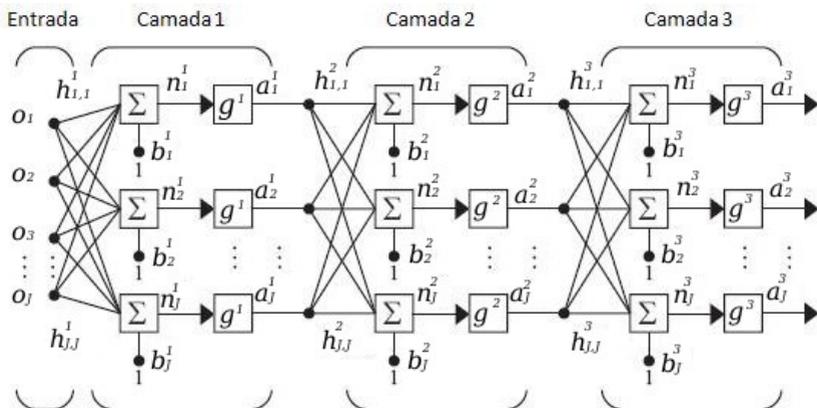


Figura 2.5.: Diagrama de rede neural com várias entradas e 3 camadas de neurônios.

Cada camada tem uma função distinta na rede neural. O vetor de entradas o é comumente chamado de camada de entrada, enquanto que a última é normalmente chamada de camada de saída, e as intermediárias de camadas ocultas (CO).

Um tipo de rede desenvolvido com essa topologia mostrada na Figura 2.5 é chamado de *perceptron*, e foi desenvolvido por Rosenblatt²³. A proposta era resolver os problemas utilizando funções simples, como as booleanas [40].

Em sistemas nervosos complexos, o aprendizado pode ser simplificado a um processo local, no qual a intensidade das conexões varia em função das alterações feitas localmente [41]. A Equação (2.30) reproduz essa observação como uma atualização de parâmetros:

²³Frank Rosenblatt (1928-1971), psicólogo estadunidense.

$$\Theta_i^{\text{novo}} = \Theta_i^{\text{velho}} - e_i, \quad (2.30)$$

no qual Θ_i se refere ao i -ésimo parâmetro e e_i ao respectivo erro de saída.

Uma das dificuldades para o desenvolvimento desta ferramenta é a escolha do algoritmo para realizar o treinamento relativo a esse “aprendizado”. Esta decisão depende do número de dados, da complexidade do problema e do objetivo da rede neural, seja como uma função de aproximação ou reconhecimento de padrões, por exemplo. Existem diversos algoritmos desenvolvidos para o treinamento.

Por vezes, um erro muito pequeno no treino acarreta um erro grande quando levado à rede. Isso ocorre porque a rede não foi capaz de generalizar os exemplos memorizados no treinamento. Para resolver esse problema, deve-se usar uma rede grande o suficiente para que haja uma boa aproximação, já que esse aumento incrementa a complexidade das funções a serem determinadas pela rede. Mesmo assim, tem-se a dificuldade do pesquisador em saber previamente o tamanho da rede que se deve utilizar para a sua aplicação específica.

3 Revisão bibliográfica

Neste capítulo pretende-se, de maneira geral, revisar pesquisas recentes de certa forma relacionadas ao que está sendo abordado nesta Tese, e que acarretaram em alguma influência para o desenvolvimento metodológico.

Inicia-se com um histórico de pesquisas realizadas no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da UFSC, aproveitando o que já foi estudado para lhe dar continuidade. Tomando em conta essencialmente trabalhos de mestrado, doutorado e de graduação, deu-se aqui uma visão apenas superficial de cada trabalho, ficando alguns outros detalhes a serem citados em capítulos mais específicos na Tese.

Em seguida, tem-se outras publicações feitas ao redor do mundo, para não só unir o “o que se estuda” ao “onde se estuda”, apresentando o estado da arte, como também inserindo alguns elementos históricos de pesquisas que foram consideradas essenciais para o desenvolvimento do presente trabalho.

3.1 Histórico de pesquisas relacionadas no LVA

Nesta seção estão resumidos alguns trabalhos de mestrado e doutorado (e alguns de graduação, quando relativos à atual proposta) feitos no LVA e relacionados, de certa forma, a modelos psicoacústicos e psicofísicos. São abordados, de forma pormenorizada, alguns detalhes cujos conceitos tiveram alguma importância para o desenvolvimento deste trabalho de Tese.

O primeiro trabalho de pós-graduação no LVA em que foram feitas pesquisas com modelos psicoacústicos foi o de Nunes (2002) [42], orientado pelo prof. Arcanjo Lenzi. Foi feito um estudo dos parâme-

tros psicoacústicos a serem utilizados (nesse caso, *loudness*, *sharpness*, *fluctuation strenght*, *roughness*, *tone-to-noise ratio* e *proeminence ratio*, com o autor preferindo manter os nomes em inglês - ver Seção 2.3.3) juntamente com a Curva de ponderação acústica A. Foram feitos testes então para, com auxílio de painéis de membrana e placa perfurada, ajustar o tempo de reverberação da sala de ensaios para este ficar similar ao de uma cozinha típica, já que o foco do estudo era a avaliação de ruído de compressores herméticos. A gravação dos sinais originais para reprodução digital foi feita de forma binauricular com utilização de um manequim apropriado. Na avaliação, foram usados os métodos de Comparação Pareada e Diferencial Semântico (par “agradável/desagradável”), com duração dos sinais de no máximo 10 segundos (com redução para 5 quando os ruídos eram muito diferentes) para não causar cansaço no avaliador. O autor ainda recomendou não convocar jurados que trabalhem na área de acústica e/ou vibrações pois esses podem fazer uma análise crítica mais apurada, não refletindo a maior parte do público consumidor. O fato de o produto a ser avaliado ter sido apresentado causou diferenças na avaliação das pessoas em relação ao ruído quando o mesmo não foi apresentado, mostrando que o aspecto visual é um fator importante a ser considerado. Um questionário tentando correlacionar as métricas com a opinião dos jurados também foi aplicado, mas apenas o *loudness* obteve alguma correlação. Comparando-se resultados de apresentação direta do ruído da fonte com os de sua reprodução digital com fones, o segundo caso chegou em resultados mais satisfatórios, pela facilidade de reprodução dos sinais e pela estabilidade do sistema. Uma observação interessante é que, avaliando 4 sinais com o mesmo nível em dB(A), cada um obteve um resultado distinto, salientando tanto as limitações da utilização da curva de ponderação quanto a necessidade de aplicação de outros parâmetros psicoacústicos.

Em continuidade ao trabalho anterior, Pellegrini (2005) [43], igualmente sob orientação do prof. Arcanjo, também focou seu estudo na qualidade sonora aplicada a compressores herméticos. Em relação às métricas psicoacústicas, foram utilizadas as mesmas citadas no parágrafo anterior (o autor também optou por manter os nomes em

inglês), exceto o *tone-to-noise ratio*. Para avaliação, o autor reforça a necessidade de utilizar um júri consumidor ou potencial consumidor, devendo ser considerado sua familiaridade com o produto, e aspectos como idade, sexo e poder econômico. O fato de o jurado ter experiência nesse tipo de ensaio também é relevante, pois o mesmo pode perceber alguns detalhes dos sons que normalmente passariam despercebidos por alguém inexperiente. Porém, existe o problema de que peritos no assunto valorizam aspectos que não têm importância ao usuário consumidor. Os testes, utilizando comparação pareada, duravam em média 32 minutos, tempo que os participantes consideraram cansativo. O maior diferencial desse estudo em relação ao anterior foi no que concerne ao processamento de dados, sendo que esse utilizou, além da análise de júri, o método de redes neurais artificiais, ferramenta que, como concluiu o autor, apresentou bons resultados para substituir um conjunto de jurados para avaliação de qualidade sonora.

Leite (2006) [44], orientado pelo prof. Samir N. Y. Gerges, fez seu estudo de métodos psicoacústicos aplicados ao sistema de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar de automóveis. A revisão, além de qualidade sonora, métodos de avaliação e das métricas psicoacústicas (nesse caso, intensidade de flutuação, aspereza, *loudness*¹, agudeza, tonalidade, índice de articulação e índice de inteligibilidade da fala), também tratou da fisiologia e mecanismos da audição humana. A gravação foi feita com um sistema biauricular, porém os dados utilizados foram a média entre as medições nas orelhas esquerda e direita. A primeira avaliação subjetiva, utilizando o método de comparação pareada, visou a eliminação de alguns sons considerados pelos jurados como muito parecidos entre si. Antes de cada uma das avaliações, todos os sons a serem utilizados eram apresentados aos jurados, não só para familiarização mas também para que fosse notada a grande variedade existente. Ao longo dos testes, foi verificado que os avaliadores iam mudando os seus critérios, visto que, em relação a um par que já havia sido avaliado em algum momento, o

¹O autor faz um texto explicando algumas tentativas próprias de tradução de *loudness* para o português, como “volume”, “sonoridade” e “ruidosidade”, mas não considerou nenhum desses resultados satisfatório.

ouvinte por vezes avaliou de maneira oposta à sua própria resposta anterior. Nas análises estatísticas, fez-se uso da prova de Friedman para determinar se existem diferenças significativas na pontuação dos pares, além de comparações gráficas e regressão linear múltipla. Foi feito então um segundo teste, no qual os sons foram avaliados pelo método do Diferencial Semântico, com os pares sendo escolhidos a partir de um teste prévio de semântica com voluntários. Através de regressão linear, foram quantificadas principalmente as relações de cada par com cada métrica psicoacústica em análise.

Portela (2008) [45], sob orientação do prof. Arcanjo, caracterizou fontes sonoras e aplicou os conceitos na auralização de ambientes. Gravações de voz e de violão e suas respectivas auralizações foram avaliadas por voluntários através do método da Escala de Resposta, tanto por meio de questionário em papel quanto pela utilização de uma interface de computador. Os dados foram analisados de forma ordinal (levando-se em conta apenas a ordem em que os sons aparecem em relação à semelhança com a referência) e intervalar (que consideram as distâncias exatas entre os sons marcados na linha).

O desempenho de alguns métodos de avaliação aplicados ao conforto acústico de aeronaves foi o objeto de estudo da Tese de Bitencourt (2008) [46], também orientada pelo prof. Samir. Os parâmetros psicoacústicos avaliados foram *loudness*, agudeza (*sharpness*), intensidade de flutuação (*fluctuation strength*), *roughness* e tonalidade (*tonality*). Os métodos, foco principal do estudo, foram o Diferencial Semântico (DS), o Ordenamento (Or), a Escala de Resposta (ER), a Comparação Pareada (CP) e a Estimativa de Magnitude (EM). Os sons a serem avaliados foram gravados em um voo real em condição de cruzeiro, utilizando para isso um manequim capaz de fazer gravações biauriculares. Para os ensaios, esses estímulos foram editados e equalizados, sendo então reproduzidos, via fones de ouvido, para os jurados em um simulador (Figura 3.1). A sensação de vibração, feita apenas para ambientalização, foi feita utilizando um *subwoofer* posicionado embaixo da poltrona. Os descritores foram coletados de diversas maneiras como, por exemplo, via correio eletrônico, via questionário estruturado no simulador, na literatura, entre outros. A aplicação e

condução dos ensaios foi feita a partir de um programa desenvolvido pela própria equipe de pesquisa, e a interação com o avaliador foi feita com a utilização de uma tela sensível ao tato. Por fim, os dados psicoacústicos foram então correlacionados com as respostas subjetivas de cada método.



Figura 3.1.: Simulador de ruído de aeronaves localizado no LVA da UFSC para os ensaios de qualidade sonora [25, 46].

Paul (2009) [25] também foi orientado pelo prof. Samir e desenvolveu sua pesquisa em paralelo com a citada no parágrafo anterior. Seu foco foi tanto no desenvolvimento do DS para avaliações subjetivas de aeronaves comerciais quanto na aplicação de modelos matemáticos de conforto e preferência acústicos. Para isso, fez um levantamento de descritores em português brasileiro para ruídos no interior das aeronaves, desenvolveu interfaces gráficas para a realização de avaliações subjetivas, aprofundando seu estudo nos modelos de intensidade de flutuação e *roughness*, além de realizar a modelagem probabilística dos dados.

O primeiro estudo referente a avaliações subjetivas de vibrações no LVA foi feito por Schaefer (2011) [23], sob orientação do prof. Samir, após a adaptação do simulador para reprodução desse tipo de estímulo feita por Teixeira (2010) [1]. Nesse caso, foram inicialmente verificados os parâmetros que influenciam no conforto, como magnitude, frequência e tempo de exposição, além de métodos estatísticos

para análise dos resultados, como regressão linear e redes neurais, utilizando ao longo de toda a pesquisa apenas sinais gravados em uma aeronave em situação de cruzeiro. O primeiro ensaio foi referente à influência do ruído na percepção de vibrações, no qual se verificou que a presença de som ambiente aumenta o limiar de percepção de vibração. Ainda em relação à percepção, foram feitos ensaios de limiar da diferença² e de limiar absoluto de percepção. Em seguida, foram feitos os ensaios para o modelo de conforto, utilizando Diferencial Semântico e Escala de Resposta para avaliar 10 estímulos vibratórios diferentes, todos com o mesmo ruído de fundo (também de aeronave) sendo reproduzido em um fone de ouvido. As características a serem avaliadas³ foram coletadas via e-mail e os parâmetros da vibração considerados foram as acelerações eficazes das 54 bandas de $\frac{1}{3}$ de oitava entre 0,1 Hz e 20 kHz para os 3 eixos de coordenadas. Por fim, os resultados foram analisados utilizando redes neurais e fez-se um modelo de regressão linear.

Após o trabalho anterior, a continuidade do estudo se deu com trabalhos de final de curso de Engenharia Mecânica, como o de Barboza (2012) [48], que comparou estatisticamente parâmetros de vibração como aceleração eficaz e de pico, ambas nas três direções, com as respostas subjetivas de voluntários utilizando DR e ES, para sinais medidos em diferentes regiões (traseira, meio e frente) da mesma aeronave. Os parâmetros usados foram os mesmos dos citados no trabalho anterior, porém com o acréscimo do par “perturbador/não perturbador” para DS e da característica “a perturbação” para ER, analisando a distribuição de cada um com diagrama de caixas. As diferenças nas avaliações de estímulos medidos em posições distintas da mesma aeronave motivou a usar esses sinais nos ensaios descritos a partir do Capítulo 5.

²Chamado pelo autor de “diferença de limiar”, assim como fez Murta *et al.* [47], que chama de “diferença no limiar do observável” (DLO). Porém, aqui prefere-se usar o termo “limiar da diferença de percepção”, já que é o mínimo percebido em relação à alteração de uma propriedade.

³Para DS, os pares “forte/fraco”, “confortável/desconfortável”, “suportável/in-suportável” e “constante/inconstante”, enquanto que, para ER, “a intensidade”, “o conforto”, “a suportabilidade” e “a constância”.

A pesquisa mais recente relacionada ao projeto de conforto de aeronaves no LVA foi outro trabalho final de graduação em Engenharia Mecânica, feito por Siviero (2014) [49]. Neste caso, foi abordada a variação de magnitude de vibração e ruído e sua influência nas respostas subjetivas das pessoas em relação ao conforto. Foi utilizado o método da ER para avaliar 3 estímulos vibroacústicos medidos em diferentes regiões da mesma aeronave (os mesmos do trabalho anterior) com suas respectivas variações de amplitude de ruído (amplificação e atenuação de 3 dB) e vibração (amplificação e atenuação de 3, 6 ou 9 dB, dependendo do sinal). Os resultados foram analisados utilizando-se diagramas de caixa, verificando-se também a influência da idade e do sexo dos voluntários. Mais detalhes acerca desse ensaio podem ser vistos no Capítulo 6.

Werner (2015) [50], sob orientação do prof. Júlio Cordioli, fez o trabalho de pesquisa mais recente no LVA utilizando conceitos de psicoacústica, porém com um foco completamente distinto dos citados anteriormente. O objetivo de seu trabalho estava relacionado com a caracterização objetiva do som de pratos de percussão. Os modelos psicoacústicos utilizados foram os de Audibilidade (*Loudness*), de Agudeza (*Sharpness*) e de Tonalidade. Devido às características particulares do timbre, o método de avaliação foi o escalonamento multidimensional, e a análise de dados e o modelamento final foram feitos utilizando regressão linear.

3.2 Percepção humana a ruídos e vibrações

Há muito tempo se estudam os diversos efeitos de estímulos oscilatórios sobre o corpo humano. Apesar de alguns conceitos de percepção e conforto aqui apresentados poderem ser aplicados a outras áreas, este trabalho é relativo ao conforto vibroacústico de passageiros de aeronaves. Por outro lado, alguns conceitos e referências são utilizados advindos de estudos em outros veículos e até situações distintas, quando é verificável sua aplicação e/ou comparação com o presente estudo.

Recentemente, em relação ao tema do presente estudo, foram

desenvolvidos alguns projetos de pesquisa na União Europeia para determinar um índice de conforto para passageiros de aeronave, como o IdEA-PaCI ⁴, o HEACE ⁵ e o FACE ⁶; mais detalhes acerca de cada um dos projetos serão abordados ao longo desta revisão a partir da releitura de alguns artigos relativos aos mesmos. Apesar da metodologia ser aplicável em outros lugares, Bitencourt [46] fez a ressalva de que os resultados obtidos nesses projetos são representativos apenas aos usuários de aeronaves europeus.

Weinstein [51] evidenciou que estudos em laboratório diferem muito dos resultados da “vida real”, devido às diferenças de expectativas, estado de espírito, distrações, entre outros fatores, de cada indivíduo. Zhang *et al.* [52], a partir de um questionário para identificar sentimentos no local de trabalho associados ao conforto e ao desconforto, encontraram a maior quantidade de respostas associadas, respectivamente, aos descritores “relaxamento” e “dor”.

Gelfand [53] sugeriu que, em quaisquer que sejam as avaliações, deve-se tomar cuidado com o tempo de exposição, já que qualquer sistema sensorial do corpo humano altera sua percepção ao longo do tempo. Pasquali [54] reforçou que um tempo excessivo de ambientação, inclusive, pode causar cansaço no avaliador. Nunes [42] ressaltou também que os jurados são suscetíveis a qualquer estímulo externo, como posição da cadeira, temperatura ambiente, horário (antes do almoço com fome ou depois com sentimento de relaxamento), pressa, nervosismo *etc.*

Em adição, o aspecto visual também é importante em uma avaliação. Hashimoto e Hatano [55] verificaram que a avaliação da qualidade sonora de um veículo sofreu alterações após apresentarem a imagem do veículo a ser avaliado, e o fato de ter-se um cenário próximo ao real tornou as avaliações mais positivas.

Não se deve esquecer da interação entre outras atividades e a

⁴*Identification of an Aircraft Passenger Comfort Index* ou “Identificação de um índice de conforto para passageiros de avião”.

⁵*Health Effects in Aircraft Cabin Environment* ou “Efeitos na saúde em ambiente de cabine de aeronave”.

⁶*Friendly Aircraft Cabin Environment* ou “Ambiente amigável de cabine de aeronave”.

expectativa de realizá-las durante o voo, que é um limitador para o estudo em laboratório. Essas interações e a influência em um modelo de conforto são exaustivamente estudadas por Gregghi [56].

Em relação aos estímulos sonoros, devem-se diferenciar os conceitos de som e ruído: este é apenas um tipo indesejável de som, enquanto que aquele refere-se a qualquer variação na pressão atmosférica dentro da faixa de frequência e de amplitude perceptíveis ao ouvido humano [6]. Mesmo em um ambiente isolado e considerado silencioso, o ser humano não está livre de ruído, pois passa a ouvir os sons produzidos pelo próprio corpo, como o batimento do coração, o fluxo de sangue pelos vasos, respiração, digestão, entre outros [53].

Alguns sintomas na saúde que a exposição ao ruído pode causar são: alteração temporária e até permanente (devido à exposição por muito tempo a níveis muito altos) do limiar auditivo, *tinnitus* (zumbido), dilatação das pupilas, contração dos vasos sanguíneos, do estômago e do abdômen, aumento dos batimentos cardíacos, da produção de hormônios da tireoide, de adrenalina e corticotrofina e estresse [57]. Também pode acarretar em sensação de isolamento, dificuldade de comunicação e perda de sono. Neste último caso, pode causar cansaço, mudança na disposição, queda de atenção e de rendimento, prejudicando as atividades ao longo do dia e aumentando o risco de acidentes. Ruídos excessivos também podem mascarar avisos sonoros de segurança.

Por mais que os efeitos do ruído no corpo humano já tenham sido exaustivamente estudados, Szalma e Hancock [58] reforçaram que, devido à sua presença em diversos ambientes, tanto de trabalho quanto residenciais, resultando em um significativo fator de estresse, e levando-se sempre em consideração o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias, esse é um tema que deve continuar sendo alvo de pesquisas.

Smith [59] ressaltou que, apesar de alguns estudos prévios ao seu sugerirem que a presença de ruído no ambiente pode melhorar a concentração, como resultado de seus estudos foi verificado que a atenção em atividades é vulnerável aos efeitos do ruído. Entretanto, Belojević *et al.* [60] verificaram que a presença de ruído não causa influência significativa na memória de curto prazo e na vigilância,

apesar de dificultar a realização de tarefas mentais mais complexas.

Os efeitos da exposição cumulativa ao ruído ainda podem ser sentidos no dia seguinte e, dependendo do caso, pode afetar as atividades de uma semana de trabalho inteira [61].

Key e Payne Jr. [62] não encontraram qualquer diferença entre homens e mulheres quanto a avaliações de incômodo. Os ruídos de alta frequência avaliados foram considerados mais incomodativos que os de baixa frequência.

Em relação à presença de tons, Hastings e Davies [63] avaliaram o modelo de tonalidade Aures (ou Aures-Terhardt), apresentado na Subseção 2.3.3.4, verificando que o modelo tem boa exatidão, porém quando se muda a largura de banda perde-se um pouco a confiabilidade em relação às respostas subjetivas.

Levando-se em consideração os efeitos das vibrações no corpo, a quantidade de estudos acerca do assunto é menor se comparada à dos provenientes do ruído. Além disso, ainda existe uma grande variação de enfoques, desde os efeitos fisiológicos em outros seres, como ratos [64], até o desconforto em outros meios de transporte, como veículos agrícolas [65] e até bicicletas [66].

Alguns dos efeitos de vibrações sobre o corpo humano vão desde falta de concentração, perda de equilíbrio, dores pelo corpo e visão turva temporária até danos permanentes em alguns órgãos do corpo [67]. Pessoas que trabalham com máquinas vibrantes costumam relatar estresse, cansaço, irritação e problemas circulatórios, como a Síndrome de Raynaud (ou “dedo branco”) [68].

A sensibilidade à vibração não depende somente da sua intensidade, mas também da frequência, direção e duração da exposição. Além disso, a postura também tem muita influência em como a vibração é transmitida ao longo do corpo [69]. Deve-se salientar de que a opinião sobre conforto é estritamente pessoal, e possui muita variabilidade entre indivíduos. Considerando-se vibrações de corpo inteiro, a maior sensibilidade às oscilações verticais encontra-se na faixa de 4 a 8 Hz, enquanto que, para vibrações horizontais, as pessoas são mais sensíveis na faixa de 2 a 4 Hz, independente do nível de aceleração [70]. Assim, a intensidade da vibração deve ser analisada também

por bandas de $1/3$ de oitava [71].

Ljungberg e Nelly [72] verificaram que há uma perda na concentração e até na memória quando as pessoas são sujeitas a vibrações, tanto na ausência quanto na presença de ruído. Devem-se considerar nas análises não só a vibração no piso, mas também no assento e nas costas.

Bartlett *et al.* [21] não observaram diferenças consideráveis entre os gêneros. Contudo, o limiar de deslocamento de vibração nos pés aumentou linearmente com o aumento da altura dos sujeitos testados, aproximadamente 24 μm para cada 10 cm de altura.

O trabalho de Duarte e Pereira [73] avaliou a influência da visão em relação à percepção de vibrações, utilizando nos ensaios as mesmas pessoas com os olhos descobertos e, em um momento diferente, tendo-os cobertos. Entretanto, não foram verificadas influências significativas entre os grupos, apesar do grupo com os olhos cobertos ter demonstrado, em menor grau, uma maior sensibilidade, o que pode ser resultado tanto da maior concentração quanto por já ter um prévio conhecimento do ensaio.

Outros fatores que não podem ser desconsiderados devido às diferenças de postura entre sujeitos (devido também ao apoio das costas e à altura dos pés) são a não-linearidade do sistema de excitação e a vibração em direções não desejadas para a avaliação devido ao acoplamento entre os eixos [74]. Também recomenda-se considerar os efeitos das vibrações rotacionais (θ_x , θ_y e θ_z)⁷, quando se tiver um sistema de múltiplas entradas, para corrigir algumas baixas coerências quando se considera apenas a vibração translacional [75].

Paddan e Griffin [76] compararam as normas de avaliação de vibração britânica e internacional, aplicando-as à vibração em 100 veículos distintos. Foram avaliados o uso de diferentes ponderações considerando as variações de posição e direção da medição. Cada medição teve duração de 60 s e foi usada uma resolução de 0,195 Hz. Foi observado, por fim, que os valores obtidos utilizando os procedimentos definidos na norma ISO 2631-1 1997) [26] subestimam alguns riscos relativos à exposição de corpo inteiro à vibração, quando com-

⁷Em português, os termos para esses movimentos variam conforme a publicação. Alguns exemplos encontrados: θ_x pode ser rolagem, balanço ou volta; θ_y pode ser cabeceio, passo ou arfagem; θ_z pode ser guinada ou desvio.

parados com as avaliações calculadas pela BS 6841 (1987) [77].

As normas citadas acima possuem certa complexidade na sua composição de ponderação, mas são consideradas simplistas quando usadas para predição de desconforto por desconsiderar os mecanismos de percepção da vibração e as formas de transmissão pelo corpo. Na Tabela 3.1 tem-se uma tradução livre da “escala de desconforto de vibração” prevista por essas normas.

Tabela 3.1.: Faixas de desconforto de vibração em função da aceleração, de acordo com as normas BS 6841 (1987) e ISO 2631-1 (1997).

Aceleração eficaz	Escala de desconforto de vibração
$> 2 \text{ m/s}^2$	Extremamente desconfortável
$1,25 \text{ a } 2,5 \text{ m/s}^2$	Muito desconfortável
$0,8 \text{ a } 1,6 \text{ m/s}^2$	Desconfortável
$0,5 \text{ a } 1,0 \text{ m/s}^2$	Razoavelmente desconfortável
$0,315 \text{ a } 0,63 \text{ m/s}^2$	Um pouco desconfortável
$< 0,315 \text{ m/s}^2$	Não desconfortável

Apesar da maioria dos trabalhos focar em vibrações de tons puros, aquelas com várias faixas de frequência atuantes são as encontradas na maior parte dos casos. Existem várias maneiras para avaliar estas vibrações complexas. Griffin [12] sugeriu o método do pior componente, em que deve-se considerar apenas o componente tonal (ou a banda de oitava ou de $1/3$ de oitava) mais severo, mas ressalta que esse método é difícil de aplicar para sinais de banda muito larga. Há também a possibilidade de usar um valor único de aceleração ou então ponderar as bandas de frequência.

Existem muitos estudos em relação ao limiar de percepção humana à vibração. Tem-se como valor de referência a aceleração eficaz de $0,01 \text{ m/s}^2$, para faixas de frequências menores que 63 Hz [78]. Sabe-se que esse limiar possui grande influência da frequência, da postura e da direção do estímulo [22]. Schaefer *et al.* [79], ao fazerem testes utilizando sinais advindos de medições em aeronaves no simulador do LVA desenvolvido por Teixeira [1], verificaram que a presença de ruído tem grande influência no limiar de vibração.

Em testes com assentos de automóveis, Mansfield e Griffin [80] encontraram valores de mediana de limiar diferencial entre 0,025 e 0,093 m/s^2 de aceleração eficaz, com os valores sendo maiores quanto maior for a magnitude do estímulo.

Também com testes simulando condições de aeronaves, Bellmann e Remmers [81] propuseram a utilização de curvas de ponderação relativas à excitação para ensaios de conforto, devido à sensibilidade humana da percepção de vibrações em relação à frequência. Salientaram também que somente uma análise espectral não contém dados o suficiente para estimar o (des)conforto, sendo necessário também levar em consideração o tempo de exposição ao estímulo.

Misael [82], em seu trabalho, utilizou um piso vibrante composto por uma placa metálica e 4 molas helicoidais (Figura 3.2), desenvolvido pelo grupo de pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) para fazer ensaios objetivos e subjetivos.

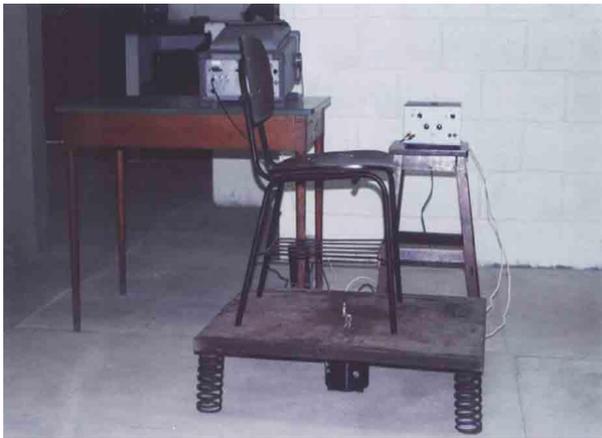


Figura 3.2.: Estrutura usada na UFMG para ensaios de vibrações [82].

Trabalhando apenas com excitações verticais de tom puro (16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63 e 80 Hz), fez experimentos para determinar não só o limiar de percepção como também associando esse limite ao conforto humano (utilizando os descritores “confortável”, “aceitável”, “desconfortável” e “inaceitável”). Por não considerar as curvas de ponderação, os resultados de aceleração foram superiores àqueles

encontrados na ISO 2631-1 [26] para percepção, e a baixa transmissibilidade nas frequências de 40 e 63 Hz influenciou na resposta. Mesmo assim, segundo o autor, o objetivo de propor uma metodologia experimental para determinar o limiar de percepção de vibrações foi adequada, porém para os experimentos de conforto são necessários alguns ajustes, já que o tempo de exposição não foi considerado.

Balbinot [83], em sua pesquisa acerca da saúde e do conforto de motoristas de ônibus em relação à vibração, utilizou uma poltrona real desse tipo de veículo, acoplada a um piso vibrante, apoiado por uma mola helicoidal central (Figura 3.3), montada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O estudo da vibração de corpo inteiro ocorreu na direção vertical, mas também foram medidas a vibração na direção mão-braço, e os parâmetros de comparação dos resultados foram as normas ISO 2631 (1974 e 1997) e ISO 5349 (1986).



Figura 3.3.: Estrutura usada na UFRGS para ensaios de vibrações de ônibus urbanos [83].

Em continuidade ao trabalho citado no parágrafo anterior, agora focando na transmissibilidade do assento de ônibus urbanos, Balbinot e Tamagna [84] chegaram à conclusão de que, considerando a faixa de frequência de ressonância da coluna vertebral e o tipo de assento normalmente utilizado, uma exposição à vibração de 4 horas (relativas às condições típicas encontradas no transporte urbano) pode ser

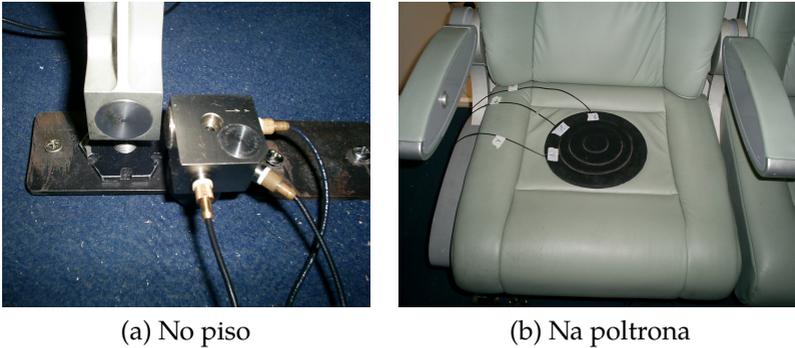
danosa à região das costas. Em relação às ressonâncias, Qassem *et al.* [85] modelaram o corpo humano como um sistema mecânico vibratório discreto. Foram levadas em conta tanto oscilações verticais quanto horizontais, e a pessoa com postura sentada. Todas as ressonâncias estimadas, considerando um ser humano de 100 kg, estiveram na faixa de 0,63 a 3,30 Hz.

A eficiência do isolamento vibratório em assentos de veículos foi estudada por Paddan e Griffin [86]. Essa característica foi expressa pelo valor SEAT⁸, ponderando as frequências tanto de acordo com a norma BS 6841 (1987) quanto com a ISO 2631-1 (1997). Chegou-se à conclusão de que a maior parte dos veículos poderia ter menos vibração transmitida ao passageiro se o assento fosse trocado por algum com melhores características dinâmicas.

Jang e Griffin [87] verificaram o quanto a interação entre a frequência de vibração e a fase relativa entre a vibração no assento e no pé influenciam no conforto de uma pessoa sentada. Para analisar a influência da fase, foram posicionados dois vibradores na posição vertical, um sobre o piso e outro sobre o assento, sendo então em cada um gerados tons puros de excitação (2,5; 3,15; 4; 5 e 6,3 Hz), níveis de aceleração eficaz variando de 0,25 a 1,6 m/s² e diferenças de fase de 0° e 180° entre ambos. Quando houve excitação com fase oposta foi relatado maior desconforto, principalmente para as frequências e amplitudes mais baixas.

No simulador do LVA, Iturrieta [88] analisou a transmissibilidade da vibração do piso às poltronas, posicionando um acelerômetro ao lado do pé da mesma (Fig. 3.4 (a)) e outro em uma almofada de borracha (Fig. 3.4 (b)) sobre a qual sentou um voluntário (foram chamados voluntários de 63 a 90 kg). Foram usadas poltronas de padrão aeronáutico tanto de classe econômica quanto de classe executiva. Para este último caso, que é o mesmo assento usado nos testes desta Tese, a vibração medida no assento chega a ser de 0 a 20 dB menor que no piso para a faixa de 40 a 200 Hz, mas de 0 a até 40 dB maior na faixa de 0 a 40 Hz.

⁸Do inglês *Seat Effective Amplitude Transmissibility*, é a razão entre as acelerações ponderadas medidas na interface entre o usuário e o assento e no piso.



(a) No piso

(b) Na poltrona

Figura 3.4.: Posicionamento dos acelerômetros para medição de transmissibilidade piso-poltrona [88].

Ljungberg (2008) [89] fez uma revisão acerca dos efeitos combinados de vibração e ruído no corpo humano. A autora comentou sobre os resultados de diversas publicações que trataram dos efeitos fisiológicos separadamente do ruído e depois da vibração de corpo inteiro para, por fim, apresentar os trabalhos que combinaram a exposição aos dois estímulos, como se pode ver na Tabela 3.2, e discutir seus resultados juntamente com outros apresentados.

Dois anos depois, Ljungberg e Parmentier [98] rerepresentaram essa revisão, porém complementando com um foco mais direcionado a trabalhos futuros. As normas atuais, que consideram os efeitos de ruído e vibração separadamente, foram criticadas por não apresentarem uma verossimilhança com a realidade, onde, em especial no transporte, o que existe são os dois tipos de estímulo ocorrendo simultaneamente e interagindo para a reação psicológica de cada indivíduo. Assim, foram sugeridos mais estudos com vibração e ruídos reais e simultâneos e suas influências nas tarefas mentais, realizando também avaliações subjetivas.

Howarth e Griffin [95] propuseram uma equivalência subjetiva entre níveis de vibração e ruído, desenvolvendo algumas equações que relacionam o nível de exposição sonora com a dose de vibração, que considera também o tempo e que cada sujeito é exposto a esse tipo de estímulo.

Tabela 3.2.: Histórico de trabalhos envolvendo exposição a ruído e vibração combinados, conforme Ljungberg [89].

Publicação	Características dos estímulos	
	Ruído	Vibração
Grether <i>et al.</i> (1971) [90]	100-105 dB(A)	5 Hz, 0,3 g pico
Grether <i>et al.</i> (1972) [91]	100-105 dB(A)	5 Hz, 0,3 g pico
Sommer & Harris (1973) [92]	100-110 dB(A)	6 Hz, 0,1 m/s ² z
Harris & Schoenberger (1980) [93]	65 e 100 dB(A)	16 Hz, 0,36 m/s ²
Seidel <i>et al.</i> (1988) [94]	92 dB(A)	4 Hz, 1 m/s ² z
Howarth & Griffin (1990) [95]	59-84 dB(A)	0,020-0,125 m/s ²
Ljungberg, Neely & Lündstrom (2004) [96]	77-86 dB(A)	16 Hz, 1-2,5 m/s ²
Ljungberg & Neely (2007) [97]	78 dB(A)	2-4 Hz, 1,1 m/s ²

Dempsey *et al.* [99] já haviam estimado uma “magnitude de desconforto” considerando vibração e ruído, e fizeram a análise desses componentes considerando-os independentes. Particularmente, em relação à vibração e sem a presença de ruído, o desconforto foi praticamente linearmente proporcional à aceleração eficaz. Para o ruído, verificou-se que essa proporção cresce em proporção logarítmica com o nível de pressão sonora. Combinando todos os ensaios, chegaram ao modelo de desconforto (DISC):

$$\text{DISC} = 0,337 + 3,2733a + 10^U, \quad (3.1)$$

no qual

$$U = -4,2726a - 3,16 + (0,0378 + 0,0403a)L_D, \quad (3.2)$$

a é a aceleração eficaz (em m/s²) e L_D é o nível de pressão sonora com Curva de ponderação “D”⁹ (em dB).

⁹Usada geralmente em medições aeroportuárias.

Sorrentino [100] apresentou o projeto IdEA-PaCI, financiado pela Brite-EuRam¹⁰. O objetivo do projeto era, em relação aos estímulos vibroacústicos, conseguir simular um passageiro virtual, ou seja, determinar a relação entre os estímulos externos e as impressões humanas. Para isso, foram feitos testes em três simuladores distintos: duas seções de aeronave (Fig. 3.5 (a) e Fig. 3.5 (b)) e uma maquete de helicóptero (Fig. 3.5 (c)), além de um modelo real de helicóptero (Fig. 3.5 (d)).



(a) Alenia ATR42, em Pogliano d'Arco, Itália



(b) Dornier Acoustic Test Cell, em Friedrichshafen, Alemanha



(c) Simulador Agusta A109



(d) Modelo real do A109 utilizado nos ensaios

Figura 3.5.: Simuladores utilizados no programa IDEA-PACI [100].

¹⁰Programa europeu para dar continuidade a dois projetos anteriores: O Brite surgiu em 1985 para desenvolver aplicações de novas tecnologias e materiais na indústria tradicional, enquanto que o EuRam, de 1986, visava desenvolver novos materiais [101].

A preparação dos parâmetros de investigação, o processamento de dados, as análises estatísticas e o desenvolvimento de modelos vibroacústicos de conforto por redes neurais artificiais foram feitos com apoio de diferentes instituições e empresas da União Europeia, como a Universidade de Oldenburg (Alemanha), ITAP¹¹ (Alemanha), ONERA¹² (França), Universidade de Patras (Grécia), NLR¹³ (Holanda), Dornier (Alemanha), Agusta (Itália) e Alenia (Itália).

Bellmann *et al.* [102], dentro do contexto do projeto HEACE, realizaram medições das condições internas (vibroacústicas, de climatização e de qualidade do ar, entre outras) de 12 aeronaves em voo, e em diversas partes destas. Os parâmetros psicoacústicos propostos para avaliação foram:

- nível de pressão sonora (em dB);
- nível de pressão sonora ponderado pela Curva A (em dB(A));
- nível de pressão sonora ponderado pela Curva B (em dB(B));
- rugosidade (ou *roughness*, em asper);
- agudeza (ou *sharpness*, em acum);
- nível de ruído (em dB, com base na norma alemã DIN 45645 1/2);
- nível de interferência na fala (em dB).

Os parâmetros psicofísicos da vibração foram os seguintes:

- aceleração eficaz (em m/s^2);
- aceleração ponderada total nos três eixos seguindo norma ISO 2631-1 (1997) (em m/s^2);

¹¹*Institut für technische und angewandte Physik GmbH*, ou Instituto de física técnica e aplicada.

¹²*Office National d'Etudes et de Recherches Aéropatiales*, ou Centro Nacional de Estudos e Pesquisas Aeroespaciais.

¹³*Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium*, ou Laboratório Aeroespacial Nacional.

- aceleração ponderada em cada eixo (x , y e z) pelos fatores w_k e w_d da norma ISO 2631-1 (1997) (em m/s^2);
- aceleração ponderada em cada eixo (x , y e z) considerando o nível de excitação (em m/s^2);

Nos quatro casos acima, os valores de aceleração também foram convertidos para dB, utilizando-se como referência o valor de $10^{-6} m/s^2$. Todos estes fatores seriam vetores de entrada para a determinação de um índice de conforto utilizando redes neurais artificiais.

No mesmo projeto, Trimmel *et al.* [103] avaliaram o impacto causado pelas condições ambientais na saúde humana. Observaram que o conforto está diretamente ligado à satisfação que as pessoas têm com o ambiente, e não com os serviços e as motivações. Estes últimos acabam por afetar mais as atividades fisiológicas, que também são afetadas pelas condições ambientais da aeronave, não só as vibroacústicas, mas também de temperatura e umidade do ar. Mellert *et al.* [104] acrescentam que o nível de ruído tem uma grande influência em vários sintomas e índices de saúde, especialmente com o acréscimo do nível e do tempo de exposição.

O trabalho de Manninen [105] acrescentou outras variáveis além de ruído e vibração, como temperatura e tipo de atividade. Em relação aos dois primeiros, os resultados vão ao encontro do que foi verificado em outros estudos, de que a vibração (5 Hz, a 2,12 e 2,44 m/s^2) e o ruído (85, 90 e 95 dB(A)) combinados são considerados mais desconfortáveis do que quando avaliados isoladamente. As atividades tornam-se mais estressantes a temperaturas mais elevadas (30 e 35 °C), com vibração estocástica (de 2,8 a 11,2 Hz) e ruído.

Apesar de esta Tese focar apenas nos passageiros das aeronaves, deve-se ressaltar que também há pesquisas relativas ao risco acerca da exposição aos níveis de ruído e vibrações a que as pessoas que trabalham nesse tipo de veículo estão expostas constantemente, como mostra Casu [106]. A exposição contínua a esses estímulos leva a um elevado número de queixas, resultado, entre outros fatores, da deficiência de orientação em relação à implementação de programas de prevenção das doenças causadas, conclui Fernandes e Morata [107] em seu estudo.

Alguns trabalhos foram feitos utilizando redes neurais para modelar conforto vibroacústico de aeronaves. D'Ischia *et al.* [108] a usou para determinar um índice de desconforto, utilizando como entrada os níveis de pressão sonora e de vibração. Para ambos os parâmetros, não foram utilizados seus valores globais, mas sim aqueles de banda de $1/3$ de oitava. Com 5 neurônios na camada oculta, foram utilizados 391 vetores de entrada/saída para treinamento e 65 vetores para verificação da rede neural, chegando a um índice de correlação R^2 de 0,84.

Sorrentino e Concilio [109] também fizeram uso de redes neurais para conforto de aeronaves, mas para modelamento psicoacústico. Os parâmetros utilizados, nesse caso, foram: audibilidade, agudeza, flutuações lentas, tonalidade e flutuações rápidas. Foram utilizados dados de 23 aeronaves em diferentes condições de voo, e os resultados cruzados com questionários aplicados em cerca de 450 pessoas não especialistas em acústica. Foram testadas duas redes neurais distintas, ambas com apenas uma camada oculta: a primeira dispôs de 560 unidades de entrada, 10 neurônios na camada oculta e uma unidade de saída, enquanto que a segunda tinha 8 unidades de entrada, 2 neurônios na camada oculta e um parâmetro de saída. Para encontrar a melhor configuração da camada oculta em relação à quantidade de neurônios, foi feito um processo iterativo, e para o treinamento da rede foi utilizado o algoritmo de *back-propagation*.

Considerando-se os métodos de avaliação aplicados à qualidade sonora, Andrade *et al.* [110] verificaram o formato de ensaio, a quantidade de itens e o formato da escala do Diferencial Semântico, objetivando construir uma medida psicométrica das propriedades acústicas no interior das aeronaves.

Por fim, Quehl [2] comentou, na conclusão de sua Tese, quanto às limitações dos resultados obtidos (cuja simulação de vibrações foi feita apenas lateralmente, por exemplo), e que deve-se ter um ambiente que faça o avaliador sentir-se o mais próximo possível das condições reais, com todas as condições ambientais (como temperatura, ventilação, assento e arranjo espacial), sugerindo inclusive o uso de tecnologias de realidade virtual.

4 Configurações dos ensaios

Neste capítulo, tem-se a descrição dos ensaios que levaram à confecção do modelo final de conforto vibroacústico. Inicialmente descreve-se a parte em comum de todos os ensaios realizados e, em seguida, tem-se uma descrição resumida do funcionamento do simulador (Seção 4.1).

Também tem-se uma descrição de resultados relativos aos limites de percepção de vibração (Seção 4.2), que é um acréscimo de informações e releitura de dados em relação aos feitos em trabalhos anteriores realizados pelo mesmo grupo de pesquisa, como os de Schaefer *et al.* [79] e Schaefer [23].

O primeiro ensaio específico para esta Tese (Seção 4.3) foi um grande teste preliminar com diversas variáveis, até para analisar os fatores que poderiam influenciar no modelo final, as pendências e necessidades que eventualmente surgiram e que não são muito bem relatadas na literatura.

A partir das observações obtidas, percebeu-se que havia necessidade de estudar dois itens, que demandaram ensaios extras: o tempo de ambientação (Capítulo 5) e a influência da variação de amplitude de ruído e vibração no conforto (Capítulo 6), o que forneceu a base para o desenvolvimento do modelo de conforto vibroacústico descrito no Capítulo 7.

Para todos os ensaios descritos nesta Tese, quando pertinente, foram feitas análises também do questionário e da influência de dados demográficos nas respostas dos jurados.

Em relação aos estímulos, todos os sinais foram coletados em voo real, em diferentes aeronaves e posições no seu interior. As coletas foram feitas pela empresa patrocinadora do projeto inicial, sendo que,

para o ruído, foram feitas gravações biauriculares com um manequim, enquanto que as vibrações foram mensuradas com um acelerômetro triaxial fixado no piso, pouco à frente do apoio esquerdo das poltronas.

Durante todos os ensaios, a interação com o usuário era feita com a utilização de uma tela sensível ao toque de 8 polegadas (veja Figura 4.1 e Anexo C), o que permitia ao mesmo conduzir o próprio ensaio sem interferência externa do experimentador durante todo o período de permanência no simulador. Todos os programas envolvidos foram desenvolvidos em LabVIEW, sendo inicialmente adaptados a partir de um modelo desenvolvido e já utilizado em ensaios similares no LVA [25, 46]. Outras vantagens desse procedimento, além de evitar o uso excessivo de papel, é eliminar tempo e eventuais erros humanos na tabulação de dados e padronizar todos os ensaios.



Figura 4.1.: Imagem de um jurado realizando o ensaio, com vista para a tela sensível ao toque.

A execução de cada ensaio compreendeu, inicialmente, um vídeo explicativo específico, com duração variável para cada um. Ao longo dessa apresentação, para efeitos de adaptação dos sentidos, simultaneamente eram reproduzidos estímulos vibroacústicos de aeronaves (que não viriam a ser avaliados), com exceção dos primeiros

20 segundos para vibração, nos quais foi gerado um sinal de varredura de 10 a 200 Hz que, pela semelhança com a aceleração de uma aeronave, visava proporcionar ao voluntário uma sensação de início de seu movimento.

Quehl [2] aponta para o fato de que, no planejamento do ensaio, deve-se levar em conta as diferenças entre reações afetivas (por exemplo: “Eu me sinto confortável”) e avaliações afetivas (por exemplo: “esse estímulo é confortável”).

Após o vídeo, o usuário preenchia seus dados demográficos, os quais compreendiam as seguintes informações:

- Idade;
- Sexo;
- Peso;
- Altura;
- “Trabalha com acústica ou vibrações?”;
- “Já viajou de avião?”;
- “Quantas vezes viajou de avião nos últimos 12 meses?”;
- “Ao viajar de avião, você se sente mais perturbado pelo ruído ou pela vibração?”.

As informações “Peso”, “Altura” e “Trabalha com acústica ou vibrações?” foram adicionadas exclusivamente para o ensaio final, para o qual também eram anotadas as temperaturas externa e interna (esta última final e inicial), além da umidade relativa do ar, medidos utilizando-se um termo-higrômetro da marca Incoterm, modelo 7666.02.0.00 (veja Anexo D).

Durante o preenchimento do questionário, não ocorria reprodução dos estímulos devido à diferença de tempo de preenchimento do mesmo entre as pessoas, o que inviabilizaria uma análise padronizada do tempo de ambientação, já que este diferiria para cada participante. Outro revés seria o de que a combinação vibração/ruído poderia

influenciar na leitura, na concentração e, por conseguinte, no preenchimento do questionário [94, 104].

Apesar de, em geral, os estímulos sonoros terem magnitudes diferentes, Jones [111] levanta o fato de que tanto a memória recente quanto a capacidade de leitura não são influenciadas pela amplitude do ruído, o que poderia induzir uma diferença de interpretação entre os estímulos durante a avaliação. De qualquer forma, pelo fato de os textos serem curtos, esperou-se que não sofressem influência de interpretação tanto pelo ruído quanto pela vibração.

Em seguida era feita a familiarização com as combinações de estímulos acústicos e vibratórios, apresentando-as com igual duração e em sequência. Para minimizar a ansiedade relativa à espera do final dessa etapa, foi colocada no programa uma barra progressiva de tempo não numerada (veja Figura 4.2).

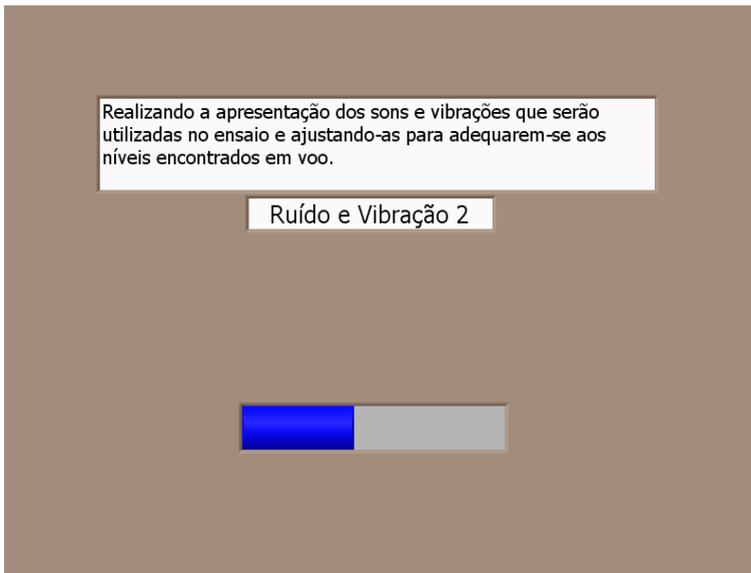


Figura 4.2.: Tela de apresentação dos estímulos nos ensaios (neste caso específico, o ensaio de ambientação do Capítulo 5).

Essa familiarização, além de ter a função de apresentar todos os estímulos que seriam utilizados no ensaio, permitindo ao jurado

ter uma noção prévia antes de avaliá-los, ainda servia para adaptação dos sentidos às condições de voo, proporcionando as sensações mais próximas de um voo de cruzeiro típico [46].

Para adequação das vibrações reproduzidas àquelas medidas em voo, simultaneamente à apresentação dos sinais também era aplicado um sistema de controle (descrito na Seção 4.1).

Independente do método de avaliação, a ordem dos estímulos para cada voluntário era aleatorizada, minimizando assim uma padronização das respostas influenciadas pela ordem de avaliação, já que o estímulo anterior sempre causa influência na avaliação do seguinte [25].

Os métodos utilizados, dependendo do ensaio, foram o Diferencial Semântico e/ou a Escala de Resposta, já explicados na Seção 2.4. Os dados resultantes do primeiro refletem uma opinião absoluta dos jurados frente ao que se está avaliando [31], ao contrário do segundo, no qual os avaliadores tendem a comparar os estímulos entre si.

4.1 Simulador vibroacústico

O simulador utilizado (Figura 4.3) foi projetado e construído para o projeto de qualidade sonora da cabine [25, 46], e posteriormente adaptado para reprodução e adequação vibracional das propriedades de voo e usado para o projeto de conforto vibroacústico [23, 48, 49]. Nesta seção será feito um resumo das características e propriedades, mas toda a descrição detalhada desde o projeto do sistema físico até a versão final do sistema de controle pode ser consultada em Teixeira [1].

Trata-se de uma seção da cabine de uma aeronave da empresa parceira do projeto original. O piso vibrante, feito de compensado naval, possui 1,70 m de comprimento, 1,22 m de largura e 0,02 m de espessura, e está suspenso sobre 12 molas helicoidais de rigidezes distintas (veja Anexo E), com o objetivo de proporcionar menor quantidade de vibrações angulares e menor desacoplamento dos eixos de vibração. A poltrona, de classe executiva de uma aeronave real, está posicionada sobre o centro de massa do sistema global, também para minimizar o acoplamento de vibração entre os eixos.



Figura 4.3.: Vista externa do simulador utilizado nos ensaios.

O sistema de excitação é composto por 3 vibradores eletrodinâmicos ButtKicker Concert (veja Figura 4.4 e Anexo F), fixados no piso e direcionados cada um em um eixo ortogonal distinto, por 2 amplificadores de potência: ButtKicker BKA 1000-N (veja Anexo G) e Mark Audio MK 3.0 (veja Anexo H), por um conversor digital-analógico RME ADI-8 DS (veja Anexo I) e pelos cabos que os unem, além do computador com o programa criado para gerar os sinais.



Figura 4.4.: Posicionamento dos 3 excitadores sob a poltrona.

Do sistema de medição fazem parte um acelerômetro de carga triaxial B&K 4321 (veja Figura 4.5 e Anexo J), 3 pré-amplificadores PCB 422E12 (veja Anexo K), um condicionador de sinal PCB 482A16 (veja Anexo L), o conversor analógico-digital RME ADI-8 DS (veja Anexo I) e os cabos que os unem, além do computador para processamento da resposta.



Figura 4.5.: Posicionamento do acelerômetro em relação ao apoio esquerdo da poltrona.

Como demonstrou Teixeira [1], em relação ao comportamento vibratório, o simulador possui boa repetibilidade, baixa variação das respostas em relação ao peso posto sobre ele (pessoas sentadas na poltrona) e, após amplificação ou atenuação dos sinais, possui variação próxima à linear na faixa acima de 20 Hz. Todavia, pela assimetria, ainda há um acoplamento forte entre os eixos de excitação. Com o intuito de tornar as vibrações mais próximas das medidas em voos reais, no mesmo trabalho foi desenvolvido um sistema digital de controle, composto pelos subsistemas de geração, de aquisição e de correção dos sinais. Assim, utilizando matrizes de transferência cruzadas, compensou-se o acoplamento para conseguir resposta desejável nos três eixos de vibração na faixa de frequências de 5 a 400 Hz.

Para realizar a reprodução do ruído, utilizou-se o equalizador HEAD acoustics PEQ V (veja Anexo M), associado ao fone Bose Quiet-Comfort 15 (veja Figura 4.1 e Anexo N), cujo sistema de cancelamento ativo permitiu minimizar a percepção da radiação sonora do piso vibrante. A equalização dos fones, como sugerido por Paul [25], já havia sido feita para o trabalho de Schaefer [23].

Na Figura 4.6 tem-se uma imagem de um jurado enquanto realizava um ensaio. Pode-se ver não só o fone de ouvido, mas também, no canto inferior esquerdo da imagem, os três excitadores posicionados sob a poltrona.



Figura 4.6.: Imagem de um jurado realizando o ensaio, com vista traseira para visualização dos fones, da poltrona e dos excitadores de vibração.

4.2 Limiar de percepção vibracional

Schaefer [23] relatou um estudo de limiar de percepção de vibrações para 3 sinais-base de voo e um senoidal, aos quais foram realizadas variações apenas nas magnitudes para determinação do mínimo perceptível. Os dados referentes aos resultados foram retrabalhados para adequarem-se aos objetivos do atual estudo.

A Tabela 4.1 mostra os valores estatísticos referentes às 31 pessoas que participaram do ensaio, para cada um dos sinais avaliados, denominados Fron, Meio, Tras e Seno. Os três primeiros são relativos a gravações feitas em frente a poltronas das regiões frontal, central e traseira de uma aeronave, respectivamente, equanto que o último é um tom puro (130,81 Hz, ou seja, um dó mais grave), que foi escolhido acima do habitual para testar os valores de ponderação sugeridos pela norma ISO 2631-1 [26]. Desejava-se comparar com a faixa de valores de aceleração ponderada resultante A^1 da norma citada, que é de 0,010 a 0,015 m/s^2 (ou seja, de 80 a 84 dB^2).

Tabela 4.1.: Valores dos limiares de vibração (em dB^2 , com ponderações da norma ISO 2631-1 [26]) encontrados neste estudo para diferentes sinais.

Sinal	Fron	Meio	Tras	Seno
Média	81	80	82	81
Máximo	99	104	100	104
Mediana	80	78	79	80
Mínimo	74	74	71	73

É possível verificar que os valores médios de todos os sinais encontram-se dentro da faixa sugerida, mas poderiam estar sendo influenciados por alguns valores muito altos obtidos (pessoas com sensibilidade muito baixa). A mediana está um pouco abaixo, mostrando que, no geral, as pessoas testadas são levemente mais sensíveis do que se prevê na norma.

¹Chamada de a_v na norma ISO 2631-1.

²Valor de referência: $10^{-6} m/s^2$.

Considerando-se também que cada sinal tem características diferentes em função da frequência, e que os limiares verificados foram relativamente próximos entre si, tornam-se nesse caso válidos os valores de ponderação da norma ISO 2631-1 [26] para percepção.

Outra verificação importante em relação ao limiar é a variação com a idade. Ao dividir os dados em dois grupos (o primeiro de 18 a 24 anos e o segundo com 25 anos ou mais), tem-se na Tabela 4.2 os valores de mediana de cada grupo e os valores de p após aplicar o Teste T para verificar se há diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

Tabela 4.2.: Valores de mediana dos limiares de vibração (em dB) encontrados neste estudo por faixa etária.

Sinal	Fron	Meio	Tras	Seno
18 a 24 anos	81	79	79	80
25 anos ou mais	77	77	80	79
Valor de p	0,27	0,17	0,97	0,21

Não ocorreram diferenças significativas em função da idade para nenhum dos estímulos, ao menos na faixa estudada. Nem os dois voluntários com idade mais avançada (acima dos 40 anos) apresentaram um limiar muito distinto dos demais.

Os resultados desse estudo prévio levam a crer que, ao menos em relação ao limiar, não há diferença considerável na percepção vibracional em função da idade. A preocupação neste caso seria em relação à amostra esperada nos ensaios subsequentes, a maioria composta por estudantes universitários, e que resultasse em uma diferença de avaliação em relação a uma amostra composta por um público habitual de viajantes de aeronaves, que espera-se que tenha média de idade mais alta.

Todavia, para validar esse resultado seria importante realizar mais ensaios com pessoas de idade mais avançada (acima dos 40 anos).

4.3 Ensaio preliminar para estudo da caracterização dos estímulos

Com o objetivo de conhecer melhor os parâmetros a serem estudados e as inúmeras variáveis que podem estar envolvidas no processo de avaliação vibroacústica, foi realizado um ensaio prévio para realização de estudos gerais acerca da análise subjetiva de pessoas aos estímulos de aeronaves. As conclusões desse estudo serviram de base para a montagem dos ensaios subsequentes (capítulos 5, 6 e 7).

O projeto contendo esta avaliação foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética de Pesquisa com Seres Humanos da Pró-reitoria de Pesquisa e Extensão da UFSC por meio do certificado n° 232 de 2009, garantindo assim que os procedimentos do projeto estão de acordo com os princípios éticos estabelecidos pela Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (CONEP). Sendo assim, todos os participantes leram e assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

Nesse ensaio, como sugerido por Bitencourt [46], optou-se inicialmente por utilizar como base de resultados o método do DS, já que desejava-se obter dados de respostas absolutas dos jurados. Mesmo assim, pela proposta do teste ser preliminar, optou-se por realizar o ensaio também com a ER para efeitos comparativos.

Bitencourt [46] e Paul [25] realizaram um estudo semântico referente aos itens em português para avaliação do ruído e vibração no projeto de qualidade sonora de aeronaves, chegando-se no final a 5 pares de adjetivos para DS (equivalentes a um substantivo para ER, colocado entre parênteses):

- confortável/desconfortável (Conforto);
- forte/fraco (Intensidade);
- suportável/insuportável (Suportabilidade);
- constante/inconstante (Constância); e
- perturbador/não-perturbador (Perturbação).

Mesmo com o objetivo do estudo sendo o modelamento do conforto, optou-se por manter os outros itens de avaliação para parâmetros de comparação e coerência na avaliação subjetiva dos voluntários.

4.3.1 Metodologia

Foram selecionados estímulos sonoros gravados em 4 diferentes aeronaves, duas executivas e duas comerciais, sendo que destas últimas foram utilizados sinais gravados nas partes frontal, média e traseira. Em contrapartida, os sinais de vibração utilizados foram gravados em apenas uma posição de uma aeronave comercial. Por fim, alguns sinais também foram amplificados em 3 dB e outros atenuados em 3 dB, tanto para ruído quanto para vibração, o que totalizou ao final 30 combinações de estímulos.

Esses valores de 3 dB para atenuação e amplificação foram escolhidos para que, segundo Schaefer [23], que fez um ensaio de limiar diferencial vibracional, mais de 90% das pessoas conseguissem perceber essa variação.

Sendo inviável avaliar todos os estímulos em apenas um ensaio, os mesmos foram distribuídos de maneira aleatória em 6 grupos, como se pode ver na Tabela 4.3. Assim, com o objetivo de evitar a fadiga dos voluntários, cada um deles deveria vir em ao menos 6 dias diferentes para completar o teste. Os valores informados nessa Tabela referem-se, para cada estímulo, ao NPS de maior magnitude entre as duas orelhas (em dB, com referência de 20 μPa) e à aceleração eficaz resultante (em m/s^2) em relação aos 3 eixos ortogonais medidos.

Para efeitos de organização, cada estímulo foi identificado por um código, cujos dois primeiros caracteres identificam a aeronave ("C1" e "C2" as comerciais e "E1" e "E2" as executivas). Para as comerciais, há um terceiro caractere identificando a localização da poltrona ("A" = Atrás; "F" = Frente; e "M" = Meio). Em seguida, um sinal identifica se o sinal de ruído foi amplificado ("+"), atenuado ("-") ou mantido como o original ("0"). Por fim, os dois últimos caracteres referem-se à amplificação ("V+"), atenuação ("V-") ou manutenção ("V0") da vibração original.

Tabela 4.3.: Combinações de ruído e vibração utilizadas no ensaio preliminar.

Grupo	Código do sinal	NPS (dB)	Aceleração eficaz (m/s²)
Grupo 1	C2M-V-	69	0,11
	C1M0V+	76	0,68
	C2M-V+	69	0,67
	C2M+V+	77	0,66
	E20V+	72	0,67
Grupo 2	C2A-V-	68	0,25
	C2M0V0	73	0,44
	C2A-V+	68	0,68
	E10V+	86	0,73
	C2M0V-	73	0,28
Grupo 3	C2F-V+	63	0,61
	C2A+V-	78	0,25
	C2F+V+	73	0,65
	C2M+V-	77	0,26
	C1A0V-	74	0,26
Grupo 4	C2A0V0	73	0,37
	C2A+V+	78	0,56
	C2M0V+	73	0,60
	C1F0V+	75	0,62
	C1M0V-	76	0,24
Grupo 5	C2F0V+	68	0,63
	C2A0V-	73	0,26
	C2F0V-	68	0,24
	E20V-	72	0,25
	C2F+V-	73	0,25
Grupo 6	C2F-V-	63	0,30
	C1A0V+	74	0,71
	C1F0V-	75	0,31
	C2F0V0	68	0,48
	E10V-	86	0,31

Para garantir que o som original mantivesse suas características na reprodução, o sinal de cada ruído foi reproduzido pelo fone Bose QuietComfort 15 (o mesmo usado nos ensaios, veja Anexo N) e gravado no simulador utilizando-se uma cabeça artificial da HEAD acoustics HMS III (veja Anexo O), a qual possui um microfone posicionado dentro de cada canal auricular da mesma. A gravação também foi feita com o fone utilizado nos ensaios, e com reproduções das vibrações simultaneamente para cada combinação de sinais. Para o pós-processamento foram utilizados os *softwares* MATLAB e Artemis, sendo então aplicados filtros para que o sinal reproduzido fosse próximo do sinal original.

Para a vibração, foi utilizado o sistema descrito na Seção 4.1, com a aplicação do sistema de controle durante a fase de apresentação dos sinais. Para efeitos de medição, os sinais foram gravados enquanto o usuário realizava a avaliação do DS, durante 27 segundos. Se a avaliação fosse mais rápida que o tempo necessário, aparecia um aviso na tela para que o voluntário não se movesse e esperasse alguns instantes até que a gravação finalizasse.

Em relação à seleção de júri (sujeitos de teste), foi feita uma ampla divulgação no meio universitário da UFSC a partir de *e-mail* e cartazes, incentivando as pessoas não só a virem como também a trazerem conhecidos. Os únicos critérios de inclusão eram que o participante tivesse mais de 18 anos e viajado pelo menos uma vez de avião.

Assim, a amostra de estudo é caracterizada na sua maioria por estudantes de graduação e pós-graduação, apesar de o objetivo inicial do projeto não considerar apenas esse tipo de população. O fato de esta pesquisa acontecer dentro de uma universidade, no meio acadêmico, tornou mais fácil o acesso a essa população.

A primeira etapa do ensaio (como já descrita no início deste capítulo), com o jurado já dentro do simulador, consistia na apresentação do vídeo explicativo, de 2 minutos e 15 segundos de duração, contendo ruído e vibrações de ambientação simultâneos. Em seguida, era apresentado o questionário demográfico (sem utilização de estímulos) e, logo após, a apresentação dos sinais a serem avaliados naquela sessão.

Seguindo a função de adaptação dos sentidos para os estímulos vibroacústicos, havia a etapa de familiarização, para não só apresentar os estímulos como também adaptar os sentidos do ouvinte. Sentindo necessidade de estudar melhor o tempo de adaptação, optou-se por, em cada sessão de avaliação, utilizar um tempo diferente, como se pode ver na Tabela 4.4.

Tabela 4.4.: Tempo de familiarização para cada grupo de estímulos do ensaio preliminar.

Grupo	Tempo de familiarização
Grupo 1	2 minutos
Grupo 2	3 minutos
Grupo 3	4 minutos
Grupo 4	5 minutos
Grupo 5	6 minutos
Grupo 6	7 minutos

Durante a familiarização, o ruído de voo gerado pelo fone permanecia inalterado, porém a vibração era ajustada em tempo real para ficar o mais próxima possível da desejada, conforme relatado na Seção 4.1. Após a familiarização, iniciava-se a avaliação propriamente dita do grupo referente ao dia de avaliação, tanto com DS quanto com ER, sendo que a ordem de aplicação das técnicas era aleatória. Em ambas as técnicas ocorria um treinamento de sua utilização, para transmitir maior segurança ao voluntário e, por consequência, acabar familiarizando-o ainda mais com alguns estímulos.

Com o DS (Figura 4.7), um estímulo era gerado em ordem aleatória, e o usuário o avaliava em uma escala de 7 pontos (como sugerido por Osgood *et al.* [31] e utilizado por Bitencourt [46], Paul [25] e Schaefer [23]) contida entre um par de adjetivos, cuja ordem de apresentação era também aleatória. Após avaliar todos os 5 pares, ia-se ao próximo estímulo, até finalizar todos do grupo. Para efeitos de equacionamento da resposta, associou-se posteriormente um número a cada ponto da escala. Por exemplo, para o par “confortável/desconfortável”, o valor “1” equivale ao ponto mais próximo da palavra “confortável”,

enquanto que o valor “7” equivale ao ponto mais próximo da palavra “desconfortável”.



Figura 4.7.: Tela da aplicação do DS no ensaio preliminar.

Na ER (Figura 4.8), a dinâmica era um pouco diferente: primeiro aparecia um dos 5 itens aleatoriamente, e o usuário ia escolhendo a ordem que desejava sentir cada estímulo, clicando no seu referido botão, e então avaliando-os alternadamente posicionando a seta na escala (numerada nos extremos de 0 a 10) como julgava mais coerente com sua sensação, podendo repetir quantas vezes quisesse cada um deles até que se sentisse seguro da avaliação final. Ao confirmar a resposta (num botão que só era habilitado depois de o usuário ter clicado ao menos uma vez em cada estímulo), ia-se ao próximo item de avaliação, repetindo-se esse procedimento até que o voluntário tivesse avaliado todos os itens. Para equacionamento das respostas, converteu-se o ponto marcado na escala para um número real, arredondado com uma casa após a vírgula.

Avalie o ruído e a vibração conforme:

a suportabilidade

Item	0	10
Ruído e Vibração A	0	10
Ruído e Vibração B	0	10
Ruído e Vibração C	0	10
Ruído e Vibração D	0	10
Ruído e Vibração E	0	10

Confirma resposta

Figura 4.8.: Tela da aplicação da ER no ensaio preliminar.

Depois de avaliar todos os 5 itens para todos os estímulos do grupo, por meio das duas técnicas, o ensaio era finalizado, sendo marcada então uma nova sessão de ensaios para o grupo seguinte, até que fossem finalizados os 6 grupos mostrados na Tabela 4.3.

A apresentação da análise dos resultados aqui nesta tese, por ser mais um ensaio preliminar, ficou restrita a uma análise mais descritiva em relação aos fatores que podem ser úteis para o desenvolvimento de um modelo mais exato.

4.3.2 Resultados

Participaram de todas as sessões 38 pessoas, dentre as quais 58% do sexo masculino e 42% do sexo feminino, com idade média de 24,2 anos, em uma faixa compreendida de 18 a 37 anos. A distribuição etária pode ser vista na Figura 4.9, com separação por cores relativas às duas faixas de análise: de 18 a 24 (53% das pessoas) e acima de 24 anos (47% das pessoas).

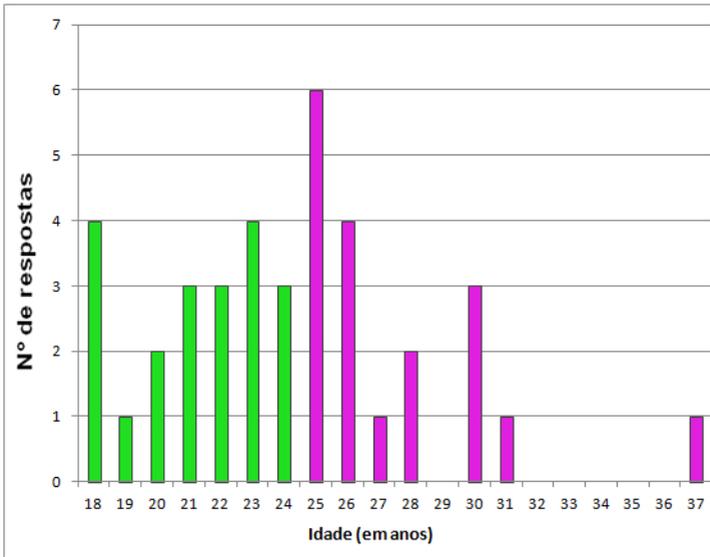


Figura 4.9.: Distribuição de idade dos participantes do ensaio preliminar.

A média de viagens nos últimos 12 meses relatada foi de 3,42, para um mínimo de 0 e um máximo de 20 viagens. A distribuição da quantidade de viagens por participante pode ser vista na Figura 4.10, na qual a separação por cores equivale a dois grupos distintos para análise: os que viajaram no máximo 2 vezes nos últimos 12 meses (55% das pessoas) e os que possuem mais de duas viagens neste período (45% das pessoas). Cabe lembrar que o critério de inclusão era ter alguma experiência de voo ao longo da vida, o que explica a existência de pessoas com zero viagens nos 12 meses anteriores ao ensaio.

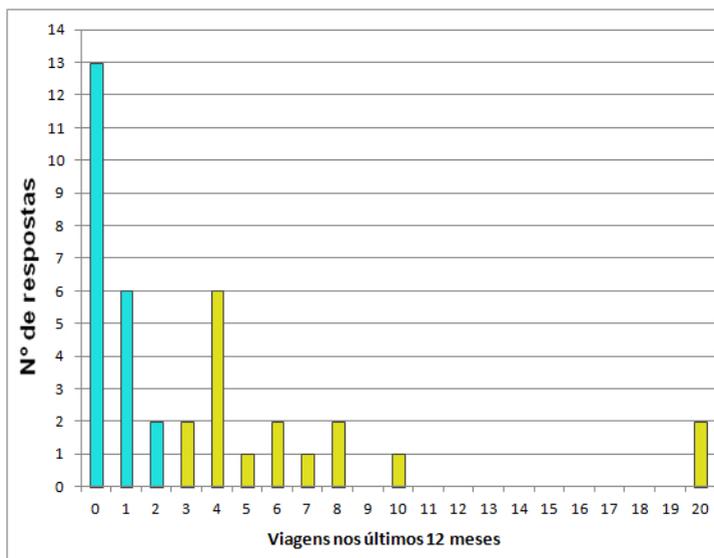
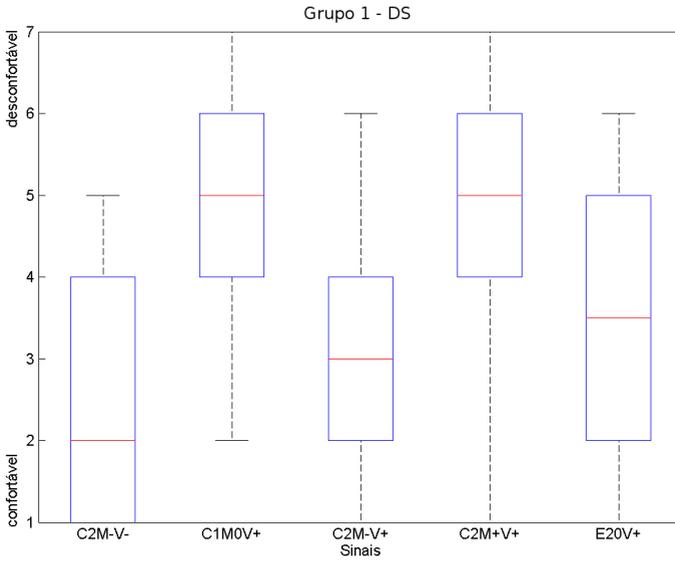


Figura 4.10.: Número de viagens nos 12 meses anteriores ao ensaio preliminar por avaliador.

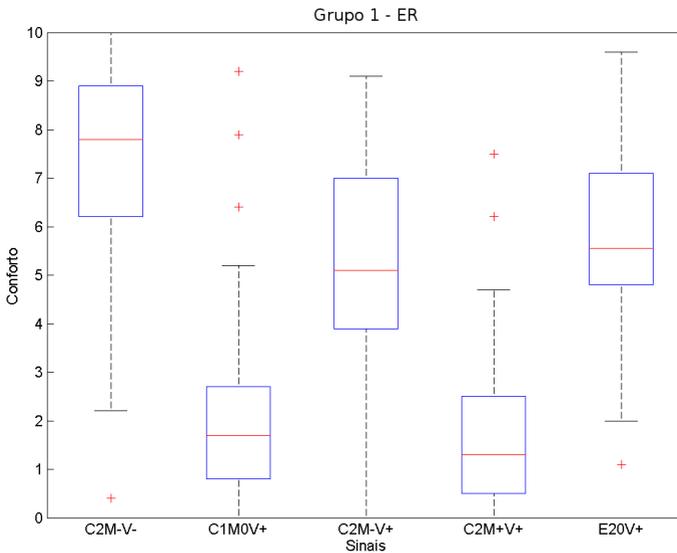
Finalizando a verificação do questionário, quanto à pergunta “Ao viajar de avião, você se sente perturbado pelo ruído e pela vibração?”, 50% das pessoas afirmaram que “Sim”, 16% responderam que “Não” e outros 34% assinalaram “Às vezes”.

Em relação às respostas dos questionários, serão comparados inicialmente os resultados entre os dois métodos. Logo, nas Figuras de 4.11 a 4.16 têm-se os diagramas de caixa para as 6 sessões de ensaio, considerando-se as respostas relativas apenas à sensação de conforto (ou seja, ao par “confortável/desconfortável” no DS e o item “Conforto” na ER).

O que se pode perceber, em uma análise visual inicial, é que, para cada grupo, comparando-se DS e ER, os gráficos parecem invertidos, resultado do posicionamento do adjetivo “confortável” do lado esquerdo no DS, resultando em um número menor quanto mais confortável o voluntário avaliava o estímulo. Tomando-se isso em consideração, analisando-se a mediana de todos os sinais, percebe-se coerência entre os métodos na avaliação em todos os grupos.

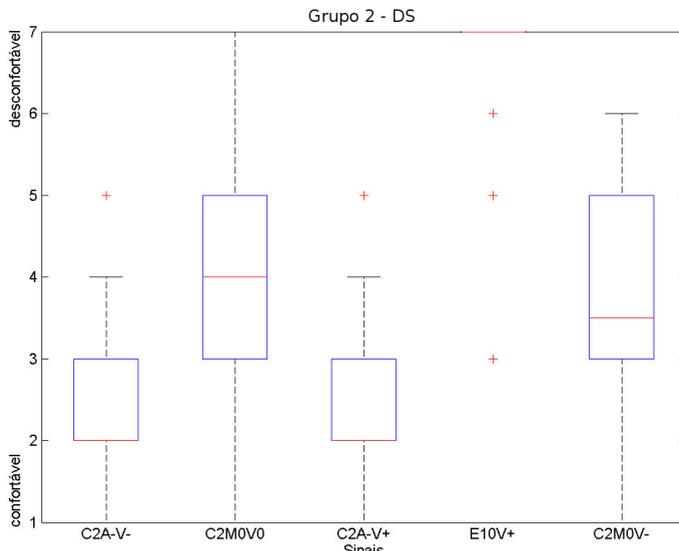


(a) Diferencial Semântico.

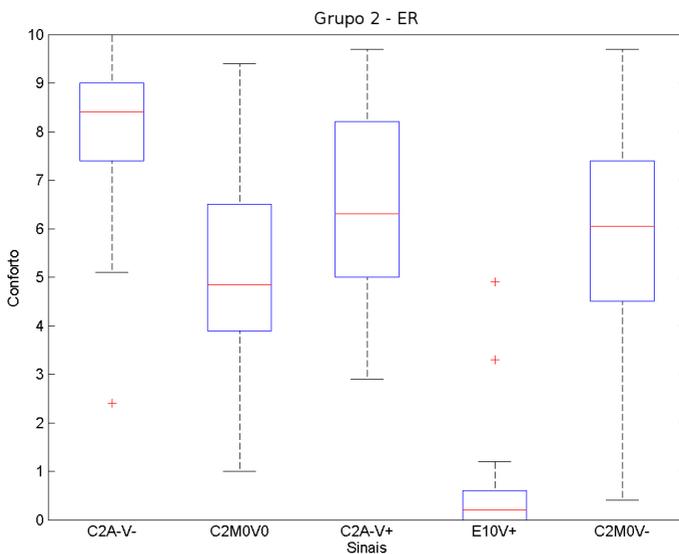


(b) Escala de Resposta.

Figura 4.11.: Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 1 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.

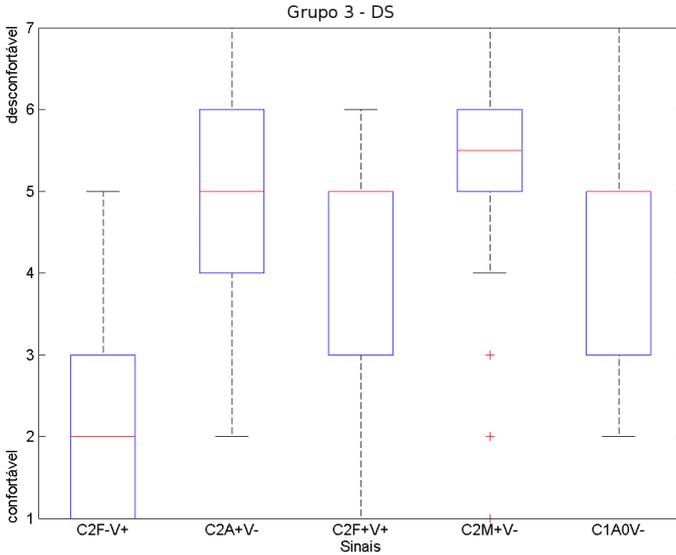


(a) Diferencial Semântico.

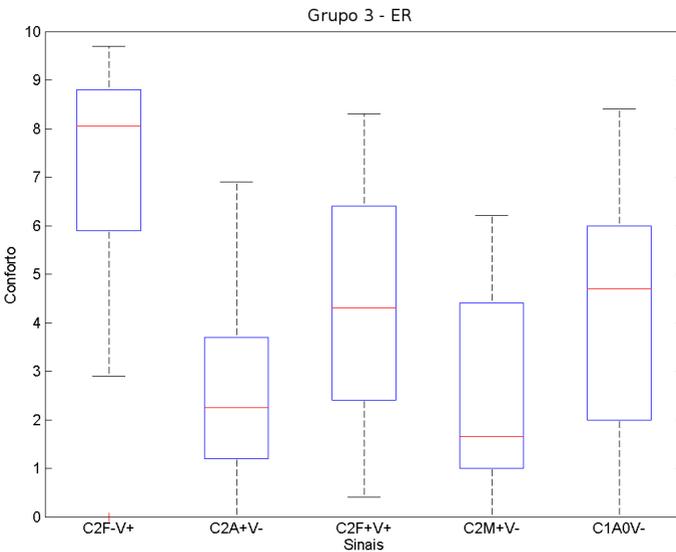


(b) Escala de Resposta.

Figura 4.12.: Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 2 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.

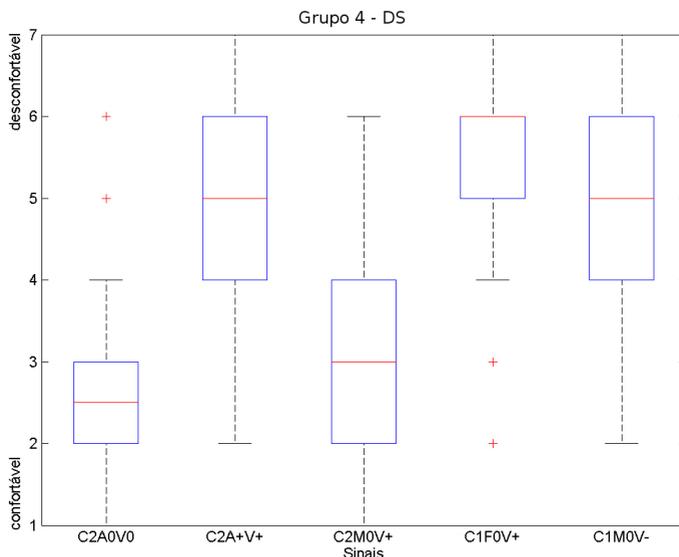


(a) Diferencial Semântico.

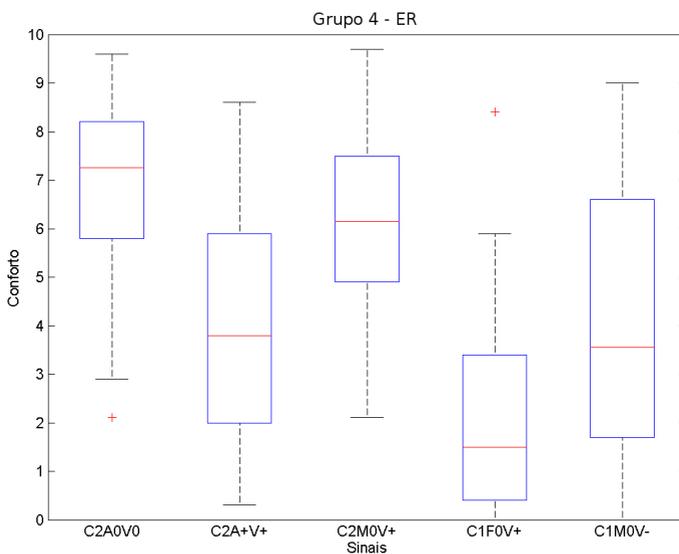


(b) Escala de Resposta.

Figura 4.13.: Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 3 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.

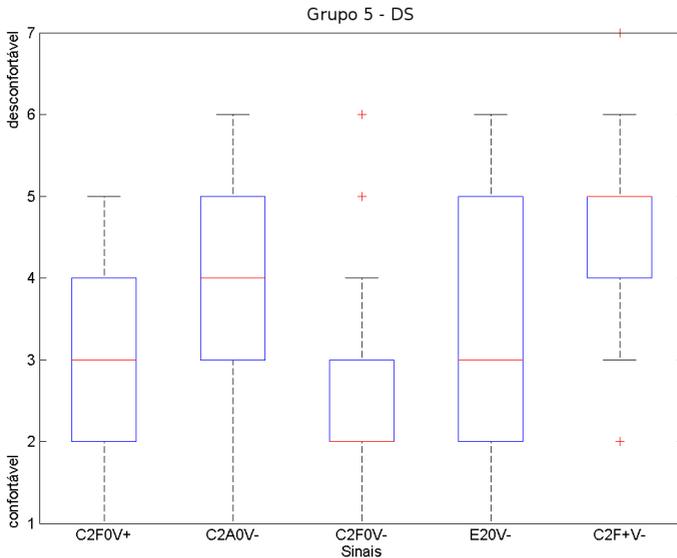


(a) Diferencial Semântico.

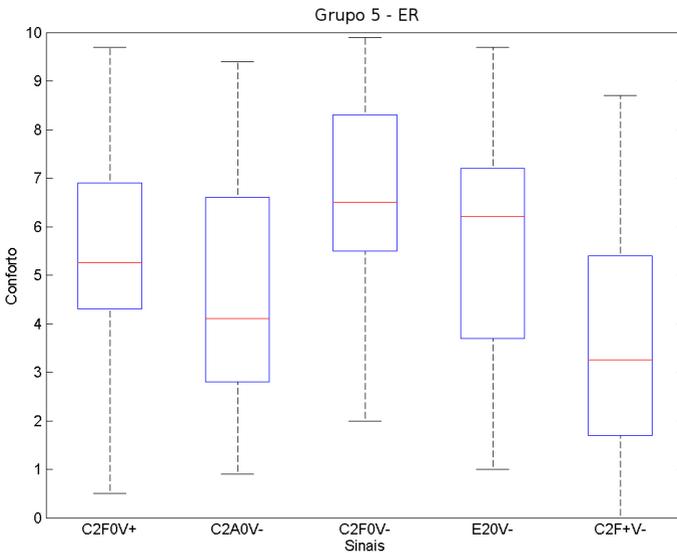


(b) Escala de Resposta.

Figura 4.14.: Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 4 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.

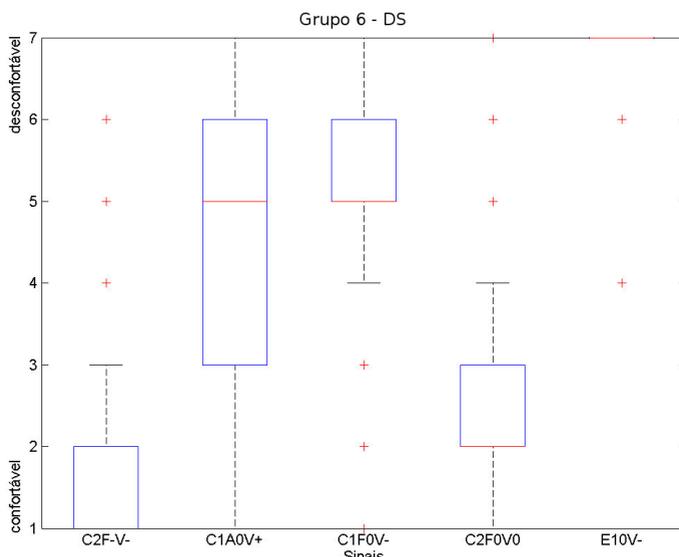


(a) Diferencial Semântico.

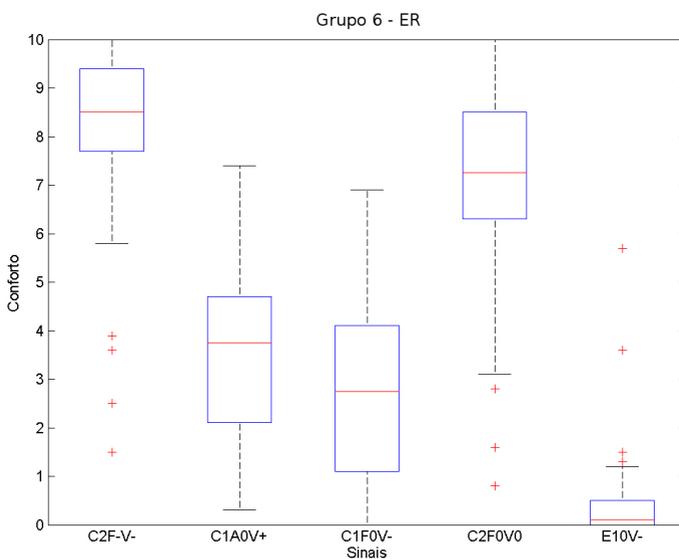


(b) Escala de Resposta.

Figura 4.15.: Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 5 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.



(a) Diferencial Semântico.



(b) Escala de Resposta.

Figura 4.16.: Diagramas de caixa resultantes das respostas do Grupo 6 do ensaio preliminar, relativas à sensação de conforto.

Uma análise mais específica mostra que, para o Grupo 1, no qual pode-se tomar a princípio como referência o sinal “C2M-V+”: o mesmo é avaliado como menos confortável que o sinal “C2M-V-”, que difere principalmente pela magnitude da vibração. O mesmo sinal pode ser comparado com o “C2M+V+”, este avaliado como menos confortável, com ambos diferindo-se basicamente pela magnitude do ruído. Isso mostra a influência direta da amplitude tanto da vibração quanto do ruído nas avaliações desse grupo. Quando comparado com sinais de outras aeronaves, como o “E20V+”, suas avaliações foram consideradas próximas, mesmo com 3 dB de NPS de diferença entre eles, mostrando que deve haver mais fatores que influenciam na avaliação de conforto além da magnitude. Por fim, o “C1M0V+” obteve avaliação muito próxima do sinal “C2M+V+”, 1 dB de NPS maior. Ambos foram os sinais considerados mais desconfortáveis, e são os que possuem o maior NPS do grupo.

Para o Grupo 2, percebe-se nitidamente uma avaliação do estímulo “E10V+” (de maior amplitude dentro do grupo tanto na vibração quanto no ruído) como muito desconfortável, próximo do final da escala. Essa tendência acabou por tornar a avaliação dos outros estímulos mais próximos do final oposto da escala, tendendo ao confortável. Os outros sinais podem ser comparados inicialmente em pares em relação à vibração. O “C2M0V0” tendeu a ser avaliado em ambos os métodos como menos confortável que o “C2M0V-”, que só se difere do anterior por ter vibração mais atenuada. O mesmo ocorre entre os sinais “C2A-V-” e “C2A-V+” que, apesar de no DS possuírem resultado de avaliação idênticos, na ER o primeiro (de menor magnitude de vibração) é considerado bem mais confortável. Comparando agora os ruídos, os dois sinais da parte traseira da aeronave C2 foram considerados mais confortáveis que os dois da parte central, de maior NPS.

Em relação ao Grupo 3 destaca-se o estímulo “C2F-V+”, avaliado com boa margem como mais confortável que os outros quatro. Tendo um NPS de 10 dB abaixo do sinal “C2F+V+”, o segundo com maior NPS, este era um resultado esperado, mesmo com a vibração amplificada. Em relação aos outros 4 sinais, no DS a mediana de to-

dos ficou próxima. Porém, na ER, os sinais “C2F+V+” e “C2A0V-” possuem uma tendência maior a serem avaliados como mais confortáveis. Ambos possuem NPS mais baixo que os outros dois sinais, e o segundo compensa um NPS um pouco maior com a vibração mais atenuada que o primeiro. Por fim, o estímulo “C2M+V-” foi avaliado como o pior de todos, com uma pequena margem de diferença para o “C2A+V-”, mesmo com este último tendo NPS de 1 dB maior que o anterior e níveis de vibração próximos.

Considerando-se agora o Grupo 4, nota-se a tendência de avaliar o estímulo “C2A0V0” como mais confortável e o “C1F0V+” como o mais desconfortável (ou menos confortável). O primeiro possui NPS praticamente igual ao “C2M0V+” (o segundo melhor avaliado), porém com vibração mais atenuada. O segundo possui a vibração mais forte, mas não o ruído, que fica ainda 3 dB de NPS abaixo do “C2A+V+”. Este último acabou por ser avaliado de maneira similar ao “C1M0V-”, que possui tanto a vibração mais atenuada quanto o ruído, o qual tem NPS 2 dB menor.

O Grupo 5 é, dentre todos, o que teve maior amplitude de utilização dos valores da escala da ER pelos jurados para avaliação de todos os estímulos. Nesse grupo, no qual 4 sinais tiveram sua vibração atenuada, também tem-se a menor diferença entre o menor e o maior valor de NPS do grupo, 5 dB. O estímulo melhor avaliado para os dois métodos foi o “C2F0V-”, que possui a menor amplitude de todos tanto na vibração quanto no ruído. Em seguida, na avaliação de conforto, vêm os estímulos “E20V-” e “C2F0V+”, que diferem entre si pela magnitude da vibração (um a tem atenuada e o outro amplificada) e do ruído (o da aeronave executiva tem NPS 4 dB maior) e, mesmo assim, foram avaliados com notas próximas. Os dois sinais que tiveram menores notas no conforto são os com maior NPS, mesmo com a vibração atenuada.

Por fim, no Grupo 6, houve novamente a avaliação do sinal da aeronave E1, cujo ruído possui a maior magnitude dentre todas. Mesmo com a vibração atenuada, a mesma foi considerada a mais desconfortável (ou menos confortável), com avaliações tendendo ao extremo da escala. O estímulo avaliado como o mais confortável dentro do

grupo foi o “C2F-V-”, que possui tanto ruído quanto vibração atenuados, seguido pelo “C2F0V0”, relativo à mesma posição da mesma aeronave, porém sem atenuação de ruído e vibração. Os outros dois estímulos do grupo, “C1A0V+” e “C1F0V-”, obtiveram resultados próximos, mesmo com a grande diferença na amplitude da vibração entre ambos.

Uma análise dos outros itens, cujos diagramas podem ser vistos no Apêndice A, mostra uma coerência entre os métodos de avaliação, os quais atingiram resultados similares tanto para DS quanto para ER, com diferenças numéricas (proporcionais) um pouco maiores no Grupo 1. Em relação aos itens de avaliação, nota-se, nesse caso, pouca relação da constância com o conforto. Porém, deve-se considerar que todas as gravações foram feitas em voo de cruzeiro, em um período curto, não havendo oscilações, o que inclusive ocasionou em pouca variação nas notas relativas a esse quesito.

Em relação aos outros itens avaliados, é possível verificar que, em relação ao conforto e em todos os 6 grupos, as avaliações tenderam a ser invertidas em relação à intensidade e à perturbação, e similares à suportabilidade. Por exemplo, para Escala de Resposta, cujos valores podem variar de 0 a 10, um sinal avaliado com nota 2 para o conforto, tende a ser avaliado em torno de 2 para a suportabilidade e de 8 para a perturbação e a intensidade.

Levando-se em conta o tempo de ambientação (Tabela 4.5), foi observado que, para a ER, a avaliação de constância foi a que exigiu maior tempo de avaliação média em todos os dias de ensaio, com os outros itens demorando tempos similares entre si. Outra observação em relação ao tempo total é que o mesmo diminuiu com o passar dos ensaios, resultado que já era esperado tanto pela familiarização das pessoas com o método de avaliação quanto devido ao maior tempo de ambientação, tornando os estímulos um pouco mais conhecidos dos avaliadores. Um fator que pode também ter causado essa diminuição do tempo é o cansaço proporcionado pela ambientação, principalmente nos últimos grupos, fazendo com que os avaliadores quisessem terminar logo o ensaio.

Tabela 4.5.: Tempo de avaliação (em segundos) médio de cada item na ER para o ensaio preliminar.

	Const.	Intens.	Pert.	Suport.	Conf.	Total
Grupo 1	89	67	72	68	66	362
Grupo 2	65	57	56	55	53	285
Grupo 3	61	49	55	53	53	272
Grupo 4	57	49	47	51	44	249
Grupo 5	53	51	46	45	48	243
Grupo 6	45	39	37	38	37	196

Percebeu-se também que separar uma grande quantidade de sinais em grupos diferentes pode gerar uma maior dificuldade de análise comparatória geral, já que estímulos avaliados como muito confortáveis e, principalmente, os mais desconfortáveis, tendem a causar uma avaliação distinta nos sinais restantes do mesmo grupo.

Já foi citado que a magnitude da vibração e do ruído tem grande influência na resposta, mas que outros fatores podem influenciar. Porém, relacionando apenas a magnitude, chegaram-se a resultados que fogem à conclusão normal, para sinais de diferentes grupos. Alguns exemplos na ER:

- Estímulo “C2M0V+” (Grupo 4) avaliado como mais confortável que o “C2M-V+” (Grupo 1);
- Estímulo “C2A+V+” (Grupo 4) avaliado como mais confortável que o “C2A+V-” (Grupo 3);
- Estímulo “C2A0V0” (Grupo 4) avaliado como mais confortável que o “C2A0V-” (Grupo 5), nesse caso mais de 3 pontos acima na mediana;
- Estímulo “C2A+V+” (Grupo 4) avaliado como mais confortável que o “C2A+V-” (Grupo 3);
- Estímulo “C2F+V+” (Grupo 3) avaliado como mais confortável que o “C2F+V-” (Grupo 5);

- Estímulo “C2F0V0” (Grupo 6) avaliado como mais confortável que o “C2F0V-” (Grupo 5);
- Estímulo “C2M0V+” (Grupo 4) avaliado como mais confortável que o “C2M0V-” e o “C2M0V0” (ambos Grupo 2);
- Estímulo “E20V+” (Grupo 2) avaliado como mais confortável que o “E20V-” (Grupo 6).

4.3.2.1 Influência do gênero

Analisando em relação ao gênero, foi percebido inicialmente que as mulheres tendem a avaliar com notas mais altas a constância, o que ocorreu em 22 dos 30 sinais para a ER. Todos os 8 restantes foram sinais com menor nível de ruído. Mesma lógica pode ser aplicada ao DS, porém com mais ocorrências de “empate” na mediana, o que pode ter ocorrido devido ao pequeno número de pontos discretos.

Considerando-se os outros itens, notou-se uma tendência das mulheres também votarem com maior nota de suportabilidade e conforto, principalmente para os estímulos da aeronave C2, onde isso ocorreu, por exemplo, para 15 dos 20 sinais na ER. As avaliações da intensidade e perturbação foram mais próximas entre gêneros, porém percebeu-se que houve uma tendência dos homens em votar com maior nota que as mulheres para esses dois itens para os estímulos em que os mesmos haviam avaliado com menor nota que elas para suportabilidade e conforto.

O tempo de ensaio praticamente não diferiu entre os gêneros para nenhum ensaio nem qualquer um dos itens, tanto para DS quanto para ER.

4.3.2.2 Influência da idade

Em relação à idade, apesar da faixa etária reduzida (os mais jovens foram considerados de 18 a 24 anos, e os mais velhos acima de 24 anos, como se pode ver na Figura 4.9), foi possível realizar algumas análises comparativas entre os dois grupos com resultados

relevantes: o grupo mais jovem percebe, com grande margem de diferença tanto para DS quanto para ER, a maioria dos sinais como menos constantes, mais intensos, mais perturbadores, menos suportáveis e menos confortáveis, revelando um maior rigor na população jovem no que se refere à avaliação de conforto dos estímulos já que, tanto a perturbação quanto a intensidade, avaliados com maior nota, são características consideradas mais “negativas”.

Analisando as diferenças no tempo de ensaio, o grupo de maior idade demorou em média 24 segundos mais tempo para responder a ER para cada ensaio, e 7 segundos para o DS.

4.3.2.3 Influência do número de viagens recentes

Em relação ao número de viagens, os jurados foram divididos também em 2 grupos, como se pode ver na Figura 4.10: o primeiro com as pessoas com 2 ou menos viagens nos últimos 12 meses, e o segundo daquelas com 3 ou mais. Esses números foram escolhidos para tentar deixar os dois grupos com a quantidade mais próxima de pessoas entre si (21 no primeiro caso e 17 no segundo) para comparação.

Levando-se em conta os métodos de avaliação, apesar de, tanto para ER quanto para DS, os jurados com menor quantidade de viagens terem avaliado a maior parte dos sinais como mais confortável e mais suportável em relação àqueles que viajam mais, os resultados diferiram entre os métodos para constância, suportabilidade e intensidade.

Em relação ao tempo de ensaio, as pessoas que viajam mais demoraram cerca de 34 segundos em média a menos que as que viajam menos para o método da ER, com a diferença maior (51 s) ocorrendo no primeiro ensaio, que possui menor tempo de ambientação, e a menor no último ensaio (16 s), que possui maior ambientação. No DS, também aqueles que viajam mais tiveram menor tempo de avaliação, em média 7 segundos a menos por ensaio.

4.3.3 Comentários gerais

Com a análise dos itens do questionário, chegou-se à conclusão de que, para a escolha de júri, deve-se levar em conta alguns aspectos demográficos, como idade e experiência em viagens recentes, que podem influenciar nos resultados finais. Uma análise estatística mais exata pode ser necessária, já que foram feitas apenas verificações superficiais em relação aos fatores para análise de algumas tendências que auxiliassem na programação do vindouro ensaio para determinação do modelo de conforto (Capítulo 7).

Não foi encontrada qualquer relação entre o tempo de ambientação e as respostas dos usuários. Porém, foram feitos muitos relatos verbais dos voluntários, após realizarem o respectivo ensaio, de que o tempo de 7 minutos de apresentação dos sinais era muito cansativo, havendo também algumas reclamações similares para os tempos de 5 e 6 minutos. Por conseguinte, devido também à pequena quantidade de publicações sobre o assunto, houve a necessidade de fazer um ensaio específico para determinar o tempo de ambientação ideal para ensaios subjetivos vibroacústicos, relatados no Capítulo 5.

Outro fator em que foi verificada a necessidade de um estudo mais aprofundado é o da influência da magnitude da amplificação ou atenuação do ruído e/ou da vibração na avaliação de conforto. Nesse ensaio, quando houve alteração em qualquer um dos casos, o valor foi de 3 dB, baseado em um valor mínimo que a maioria das pessoas pudesse perceber. Portanto, aliando-se à dificuldade de encontrar publicações específicas desse assunto, foi programado outro ensaio para definir a influência que a magnitude da variação do ruído e da vibração pode causar nos resultados de conforto, o qual está relatado no Capítulo 6.

O fato de utilizar sinais de aeronaves com características diferentes pode vir a ser um complicador na hora de calcular um modelo de conforto, já que um estímulo avaliado como muito desconfortável (ou muito confortável) pode levar os jurados a avaliarem os outros estímulos mais próximos do extremo oposto da escala. Assim, nos ensaios seguintes, optou-se por utilizar sempre sinais relativos a medições da mesma aeronave, mesmo que em posições distintas.

5 Tempo de ambientação

Muitos fatores podem afetar as avaliações subjetivas de estímulos vibroacústicos, e podem estar relacionados com o grau de exigência, ansiedade, motivação, classe social, sexo, aspectos emocionais do indivíduo, entre outros. Como já mencionado anteriormente, os sentidos humanos tendem a adaptar-se às condições do ambiente [53]. Porém, para o sistema auditivo, a adaptação tende a ser mais eficaz em relação a avaliações subjetivas quando comparada aos outros sentidos [112]. O autor, fazendo ensaios com tons puros, verificou que a sensibilidade em relação ao estímulo sonoro diminui ao longo do tempo, até se estabilizar após alguns minutos. Hood [113] introduz o conceito de fadiga auditiva, que é a alteração temporária do limiar de percepção após uma longa exposição sonora, diferenciando-a da adaptação auditiva.

Acreditando que a perda de sensibilidade possa influenciar nas respostas subjetivas, foi planejado um ensaio prévio no qual as pessoas avaliaram três estímulos vibroacústicos, por meio da Escala de Resposta (ER), com tempos diferentes de ambientação, e em momentos diferentes. Partindo dessa premissa, um dos objetivos deste estudo é verificar, inicialmente, se existe diferença significativa na avaliação dos estímulos com os três tempos de ambientação e verificar quanto tempo é necessário para que a ambientalização vibroacústica seja suficiente, fazendo com que as respostas dos jurados sejam condizentes com a opinião que seria dada sobre o mesmos estímulos em voo. Porém, como recomenda Pasquali [54], esse tempo não deve ser demorado o bastante para que ocorram problemas na avaliação, como, por exemplo, o cansaço.

Assim, com a avaliação descrita na seção anterior, o projeto contendo esse ensaio foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética de Pesquisa com Seres Humanos da Pró-reitoria de Pesquisa e Extensão da UFSC por meio do certificado n° 232 de 2009, com todos os voluntários tendo assinado o TCLE.

Os resultados de tempo de adaptação variam bastante entre as pesquisas, ainda mais pela diferença de procedimentos adotados. Isso também é evidenciado pelo fato de a norma ISO 2631-1 [26], que trata de vibrações no corpo humano, não estabelecer uma avaliação clara de conforto em função do tempo.

Carterette [114] estudou a adaptação¹ de *loudness* utilizando ruído térmico², tons puros e sinais de diferentes larguras de banda de frequência, para níveis distintos de pressão sonora. Os resultados mostraram que, para o ruído térmico de 100 a 5000 Hz, a adaptação foi crescente com o acréscimo do NPS (Nível de Pressão Sonora), que compreendeu 5 níveis entre 40 e 105 dB. Comparando-se tons puros e bandas largas nos NPS de 50, 70 e 90 dB, o tom centrado em 1500 Hz proporcionou uma adaptação muito maior do que qualquer largura de banda centrada na mesma frequência, para qualquer intensidade testada. Para o menor NPS, a adaptação foi completa com menos de 1 minuto em todas as bandas, menor que para os outros NPS. Para 90 dB, ficou claro que, quanto maior a largura de banda, maior o tempo para a máxima adaptação.

Hellmann *et al.* [117] estabeleceram um tempo máximo de 6 minutos para o ensaio, sendo que os 3 primeiros foram designados para ambientação. Todavia, verificou-se que a percepção sonora continuou a diminuir até o final do ensaio. Utilizando 6 níveis de frequências tonais entre 1,25 e 16 kHz, observou-se que as frequências mais altas proporcionam uma maior adaptação.

¹Para se calcular a adaptação de *loudness*, um som é enviado por fone a uma das orelhas. Após um tempo pré-determinado, o som é acionado na outra orelha, e pede-se ao usuário para ajustar o volume desta orelha de controle até que sinta que ambas tenham a mesma audibilidade [115].

²Sinal de ruído para o qual a densidade espectral de potência é aproximadamente constante ao longo do espectro de frequências. É gerado no interior de um condutor elétrico pela agitação térmica de cargas [116].

Hashimoto [118] submeteu as pessoas avaliadas durante uma hora a 4 níveis de vibração, concomitantes a um ruído de 73 dB(A). As avaliações em relação à potência, à desagradabilidade, à desejabilidade e à sensação de estrondo eram feitas a cada 4 minutos. A potência não sofre variações ao longo do tempo e é influenciada pelo nível de vibração. Em relação à desagradabilidade, a vibração de maior magnitude foi considerada mais desagradável, mas os valores foram diminuindo ao longo dos 16 primeiros minutos. Nos outros dois quesitos (desejabilidade e sensação de estrondo), não foi constatada nenhuma influência do tempo de exposição nas respostas.

Bitencourt [46], em sua tese, utilizou 5 minutos como tempo de ambientação sonora, sendo inclusos nesse período um vídeo com as instruções do ensaio e a apresentação dos sinais a serem avaliados. A autora relatou que, associando a ambientação às instruções, evita-se a fadiga do participante da pesquisa.

Norwich [119], utilizando uma orelha para adaptação e outra para controle, fez uma formulação matemática para a adaptação de *loudness*, tendo como base as leis de Stevens e Fechner, mas com aproximações no equacionamento para ajustes. Os valores calculados matematicamente foram próximos dos obtidos experimentalmente.

Barboza [48], ao analisar a resposta de usuários em relação à sua avaliação vibroacústica de três regiões de uma aeronave, reproduzindo as condições em um simulador, utilizou 3 tempos de ambientação diferentes, com ensaios feitos em dias distintos: 5 minutos para o sinal da parte traseira, 3 para a do meio e 7 para a dianteira. Nesse caso, não foram observadas diferenças na distribuição das respostas relativas ao tempo de ambientação.

5.1 Metodologia

Em relação aos sinais utilizados, foram definidas 3 combinações relativas à vibração e ruído, todas gravadas na mesma aeronave, mas em localizações diferentes, mas relacionadas entre si (ou seja, o ruído gravado na poltrona da parte da frente da aeronave era combinado com a vibração gravada na mesma poltrona, o mesmo ocorrendo com

sinais das partes central e traseira). A única variação em cada sinal foi a amplificação ou atenuação dos mesmos em 3 dB. Essas variações foram determinadas para diferenciar mais a percepção dos sinais entre si, além de já antecipar uma possível análise em relação à percepção de magnitude. A Tabela 5.1 mostra as combinações utilizadas no ensaio, assim como as variações em relação ao sinal original.

Tabela 5.1.: Combinações de ruído e vibração utilizadas no ensaio de ambientação.

Código do sinal	Variação de ruído	Variação de vibração
Fron	- 3 dB	+ 3 dB
Meio	0 dB	0 dB
Tras	+ 3 dB	- 3 dB

As curvas de amplitude em função da frequência dos sinais de vibração e do ruído podem ser vistas nas figuras 5.1 e 5.2, respectivamente. Nos sinais de vibração, tem-se a aceleração eficaz resultante considerando-se os três eixos, com medições feitas à frente do pé esquerdo da poltrona, enquanto que, para o ruído, tem-se o valor mais alto entre as orelhas medido com a cabeça artificial HEADacoustics HMS III.

Cada usuário realizou 3 ensaios em dias diferentes, sendo que a única diferença metodológica entre cada dia era o tempo de familiarização dos sinais: 2 minutos para o primeiro dia, 4 para o segundo e 6 para o terceiro. Esses tempos foram escolhidos a partir dos resultados observados no ensaio anterior (Seção 4.3). No início de cada ensaio, como mencionado no início deste capítulo, havia um vídeo explicativo dos procedimentos do ensaio, com duração de 1 minuto e 23 segundos, que servia também como ambientação dos sentidos, seguido do questionário com dados demográficos (sem reprodução de estímulos) e apresentação dos sinais.

Para adequação das vibrações reproduzidas àquelas medidas em voo, simultaneamente à apresentação dos sinais também era aplicado o sistema de controle descrito na Seção 4.1.

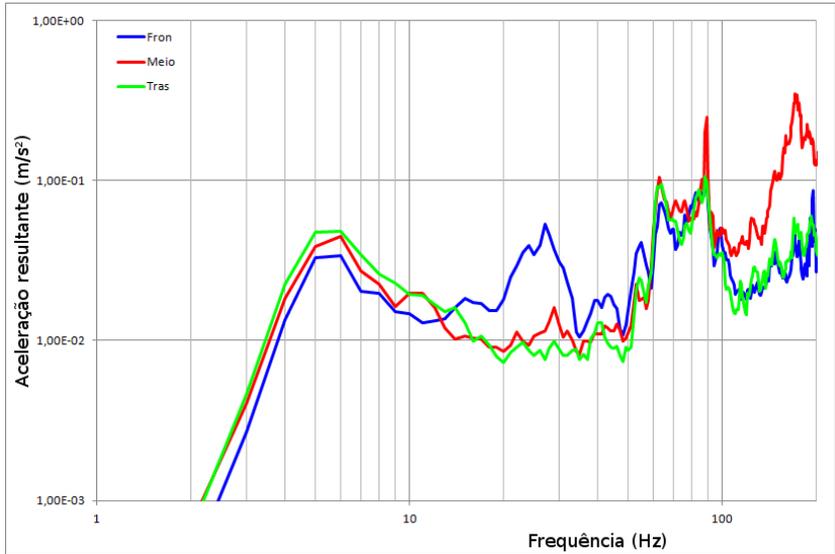


Figura 5.1.: Aceleração resultante dos sinais de vibração medidos para o ensaio de ambientação, em função da frequência.

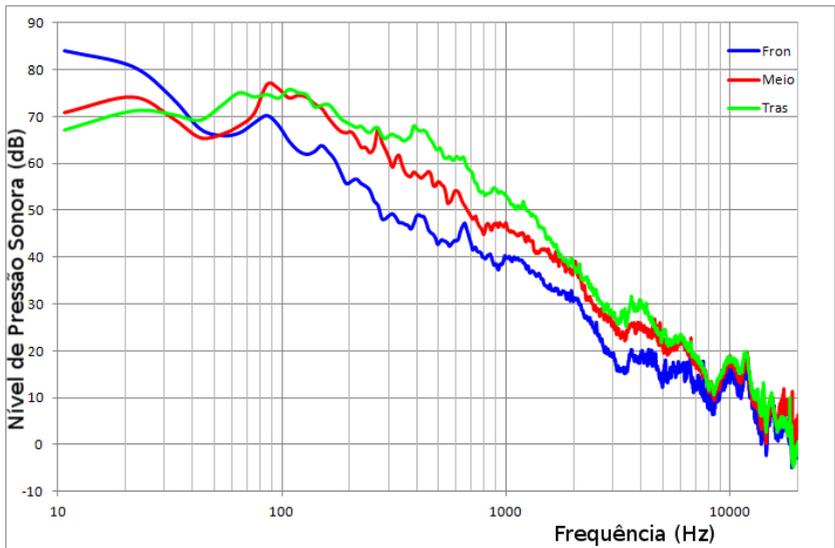


Figura 5.2.: Nível de Pressão Sonora dos sinais de ruído utilizados no ensaio de ambientação, em função da frequência.

O método de avaliação utilizado foi a Escala de Resposta (ER), por permitir uma maior facilidade na comparação entre os estímulos e devido aos resultados serem números reais, tornando mais prática a realização de análises estatísticas. Esse método proporciona uma maior interatividade de avaliação, além de transmitir mais segurança ao avaliador em relação à sua resposta, principalmente nos primeiros sinais. Foram avaliados dois itens, escolhidos após análise de ensaios prévios: **Conforto** e **Intensidade** (este último para complementação).

Os dois itens eram avaliados em ordem aleatória determinada pelo programa. Essa mesma aleatorização ocorria com o ordenamento dos estímulos na tela de interface com o avaliador. Uma imagem de tela de avaliação pode ser vista na Figura 5.3, na qual à esquerda são mostrados os três botões referentes aos estímulos. Ao clicar em cada um, os respectivos sistemas iniciavam a reprodução sonora e vibracional do estímulo escolhido.

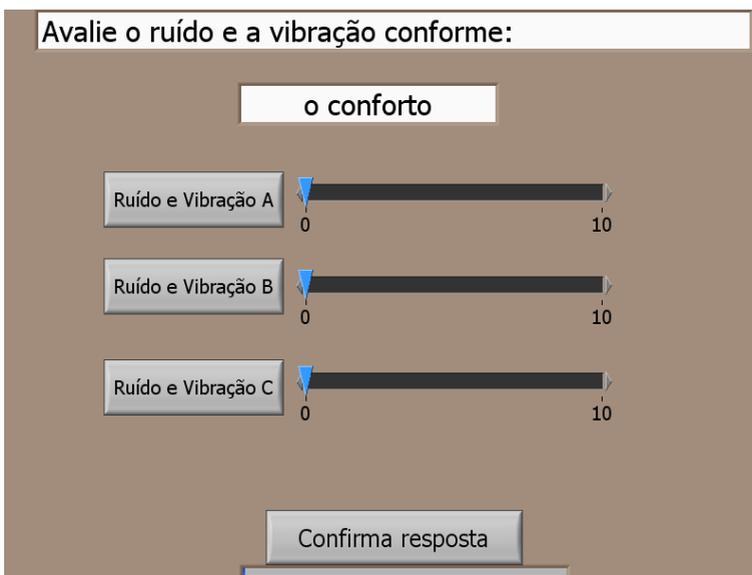


Figura 5.3.: Tela inicial de avaliação dos itens (neste caso, o “Conforto”) no ensaio do tempo de ambientação.

À direita dos botões estão as escalas sobre as quais o voluntário colocava a sua avaliação (com valores 0 e 10 colocados nos extremos

para referência), deslizando a seta. O botão de “Confirma resposta” só aparecia após os três botões terem sido clicados ao menos uma vez.

Para análise de resultados, foram utilizados testes estatísticos para verificação das diferenças tanto em relação ao tempo de ambientação em si quanto do mesmo em relação aos dados do questionário.

5.2 Resultados

Participaram do ensaio 16 pessoas, todas do sexo masculino, com idades compreendidas entre 21 e 30 anos. Apesar de 19% delas não terem viajado de avião nos 12 meses anteriores (Figura 5.4), todas já tinham experiência de voo. Quando questionados se sentiam-se incomodados em relação às vibrações e ruído, 56% dos jurados afirmaram que “Sim”, enquanto que 19% responderam “Não” e os outros 25% assinalaram “Às vezes.

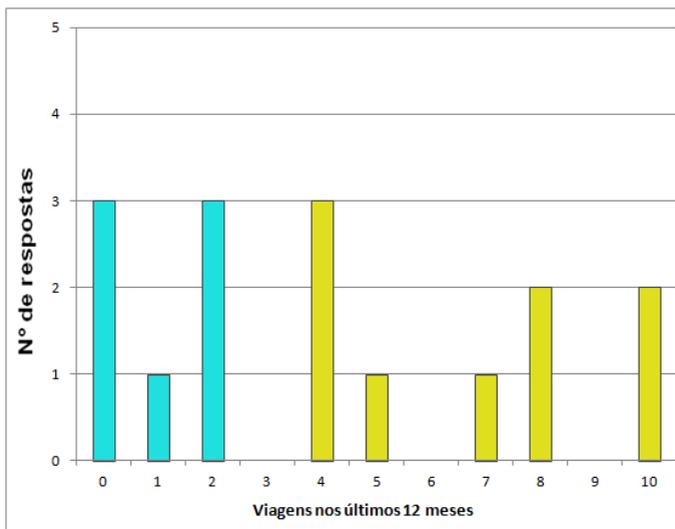


Figura 5.4.: Número de viagens nos 12 meses anteriores ao ensaio de ambientação por avaliador. Em azul claro, pessoas com menos de 3 viagens e, em amarelo, pessoas com mais de 3 viagens.

Nas Figuras de 5.5 a 5.7 têm-se os diagramas de caixa das avaliações relativas ao item Conforto, assim como as Figuras de 5.8 a 5.10 são relativas à avaliação de Intensidade.

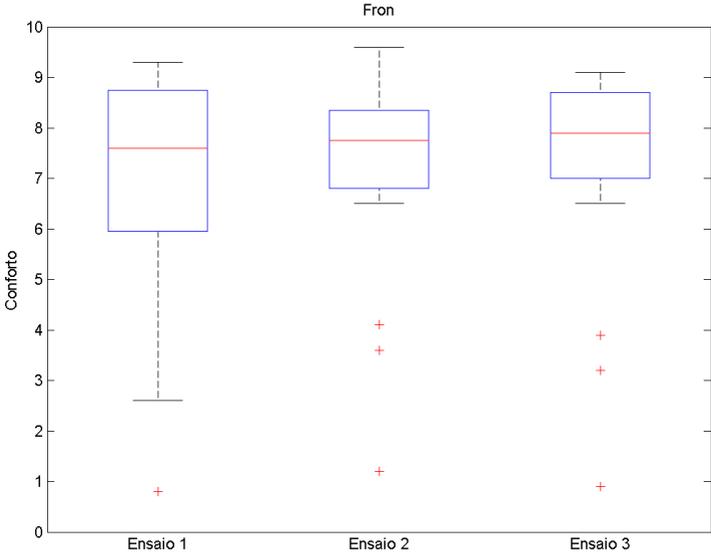


Figura 5.5.: Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Fron” em relação ao Conforto, no teste de ambientação.

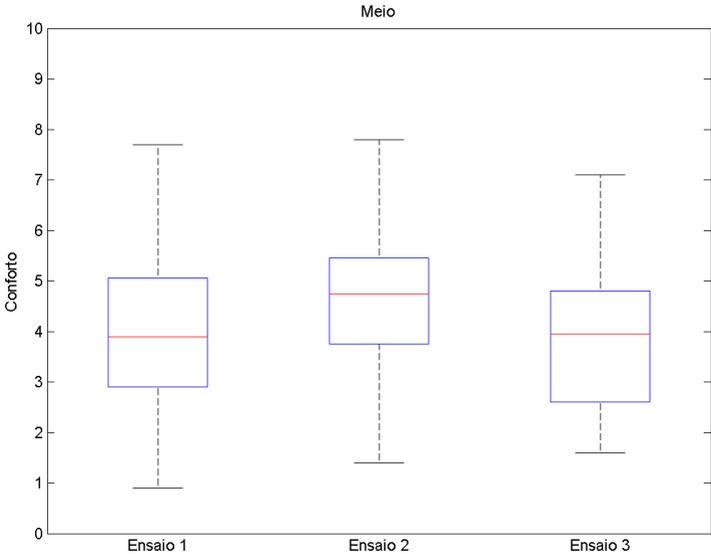


Figura 5.6.: Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Meio” em relação ao Conforto, no teste de ambientação.

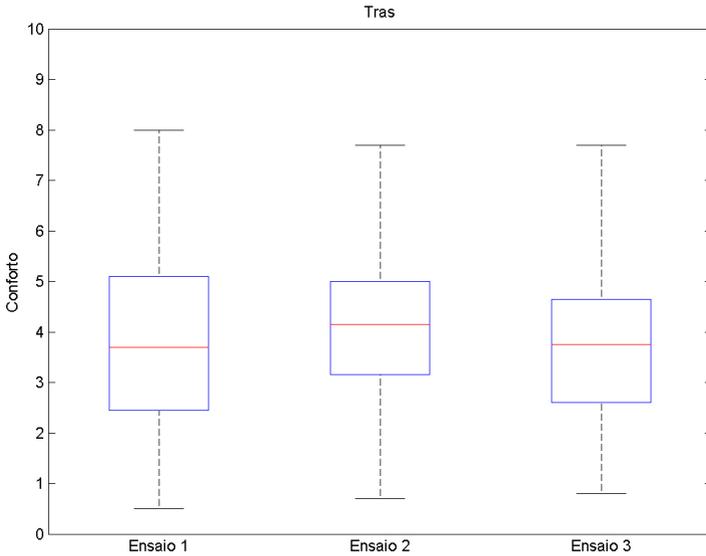


Figura 5.7.: Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Tras” em relação ao Conforto, no teste de ambientação.

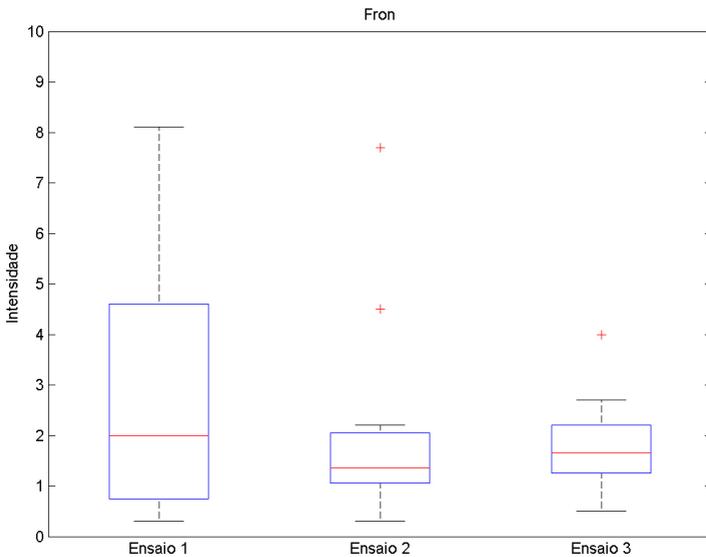


Figura 5.8.: Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Fron” em relação à Intensidade, no teste de ambientação.

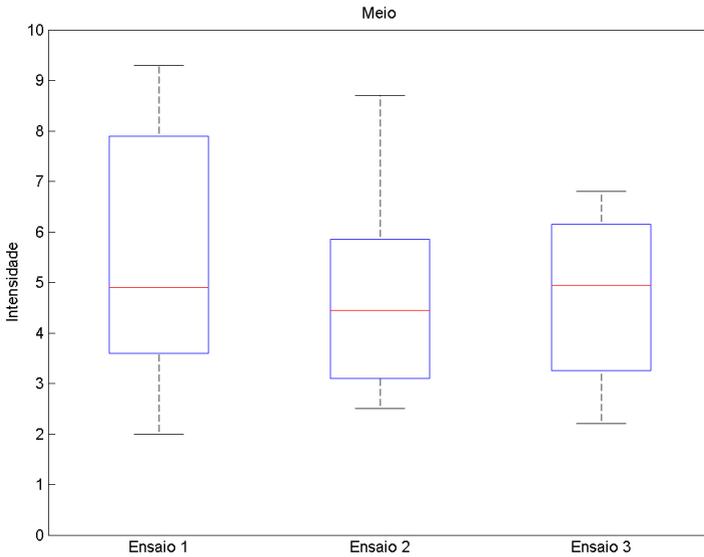


Figura 5.9.: Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Meio” em relação à Intensidade, no teste de ambientação.

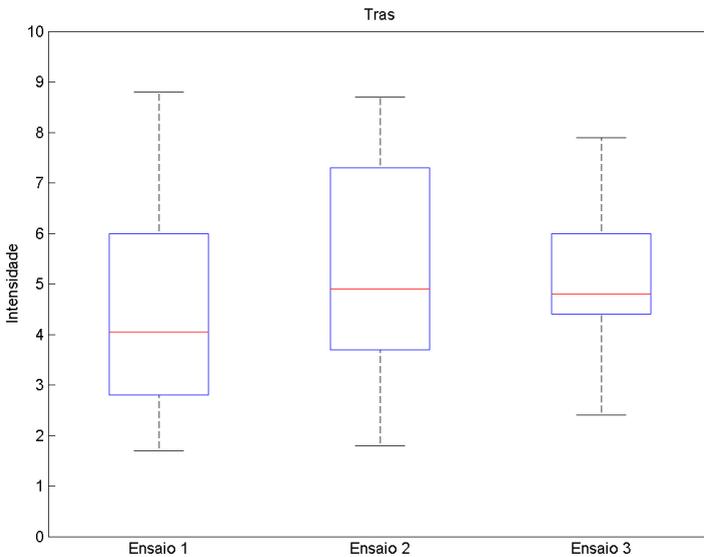


Figura 5.10.: Diagrama de caixas relativo à avaliação do sinal “Tras” em relação à Intensidade, no teste de ambientação.

Em uma análise visual inicial das figuras mostradas acima, percebe-se que as medianas, em cada caso, não variam em função do tempo de ambientação, sendo muito próximas se comparadas entre os dias de ensaio. Em contrapartida, é possível notar que, na maioria dos gráficos, a dispersão das respostas do Ensaio 1 é maior do que a dos ensaios seguintes. Essa dispersão é mais evidente nas duas avaliações do sinal “Fron” (Figuras 5.5 e 5.8), que possui amplificação na vibração e atenuação no ruído.

Em contrapartida, essa diferença de dispersão não é percebida nas avaliações do sinal “Tras” (Figuras 5.7 e 5.10), que possui atenuação na vibração e amplificação no ruído. Já no sinal “Meio”, a dispersão diminui do Ensaio 1 em relação aos outros apenas na avaliação de Intensidade (Figura 5.9).

Foi feita então uma análise estatística aplicando o teste de Mann-Whitney, comparando as respostas entre os ensaios (em pares) para cada um dos adjetivos e sinais. Não foi encontrada relevância estatística na diferença entre as médias dos ensaios, sendo 0,26 o menor valor de p^3 calculado (entre os ensaios 1 e 2 para o Conforto do sinal “Meio”). Seriam desejados valores menores do que 0,05, ou seja, com relevância estatística de 95%.

Aplicando da mesma forma o Teste F de variâncias, tem-se os valores de p mostrados na Tabela 5.2. Percebe-se, nesse caso, que os valores relativos à avaliação de amplitude são mais baixos, principalmente quando comparados os ensaios 1 e 3. Os valores altos para Conforto denotam que não pode-se comprovar com relevância estatística que há diferença entre as avaliações de dias diferentes para este quesito.

³Probabilidade de, em uma amostra, se obter uma estatística igual ou maior que a observada.

Tabela 5.2.: Valores de p encontrados no Teste F de variâncias para o ensaio de ambientação, quando comparados resultados obtidos em diferentes dias. Em negrito, valores menores ou iguais a 0,05.

Adjetivo	Código do sinal	Ensaio 1 e 2	Ensaio 1 e 3	Ensaio 2 e 3
Intensidade	Fron	0,15	0,00	0,00
	Meio	0,27	0,08	0,50
	Tras	0,81	0,05	0,08
Conforto	Fron	0,71	0,88	0,83
	Meio	0,99	0,88	0,87
	Tras	0,88	0,83	0,71

O tempo de avaliação de cada adjetivo nos ensaios pode ser visto na Tabela 5.3. Nota-se que o tempo de avaliação foi diminuindo ao longo dos ensaios. Todavia, isso pode ser atribuído não só à maior adaptação do avaliador aos estímulos, mas também à familiarização do mesmo com o sistema de avaliação. De qualquer forma, houve uma diminuição no tempo total de 17,3% do Ensaio 1 para o 2 e de 8,5% do Ensaio 2 para o 3.

É de se destacar que houve uma queda brusca no tempo de avaliação do Conforto entre os Ensaios 1 e 2, o que pode significar uma maior segurança do avaliador nesse quesito (que é mais subjetivo do que o de Intensidade) com um tempo de ambientação um pouco mais elevado.

Tabela 5.3.: Tempo de avaliação médio (em segundos) dos estímulos por adjetivo em cada dia no ensaio de ambientação.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Intensidade	56,6	56,0	47,5
Conforto	66,4	45,7	45,5
Total	123,0	101,7	93,0

5.2.1 Influência do número de viagens recentes

Para analisar-se a influência do número de viagens, os usuários foram separados em dois grupos (como se pode ver na divisão de cores na Figura 5.4): o primeiro com menos de 3 viagens e o segundo com 3 ou mais viagens nos últimos 12 meses. Verificou-se que, para todos os ensaios, a avaliação média em relação à Intensidade foi maior entre as pessoas com maior número de viagens. Entretanto, só se obteve relevância estatística maior que 95% para o Teste de Mann-Whitney para o sinal “Meio” nos ensaios 1 e 2 e para o sinal “Fron” no Ensaio 1. Mesmo assim, verifica-se uma tendência de as pessoas com mais carga de viagens recentes avaliarem os estímulos como mais intensos.

O mesmo não ocorreu em relação ao Conforto. O sinal “Fron” foi avaliado pelas pessoas com menor número de viagens, em média, como menos confortável nos 3 ensaios, em comparação àquelas com maior número de viagens. O inverso ocorreu com o sinal “Tras”, que foi avaliado pelo primeiro grupo como mais confortável em relação ao segundo grupo, nos 3 ensaios.

Em relação à diferença entre os dias de ensaio, o grupo com maior número de viagens possui maior diferença na média, ficando mais evidente quando compara-se o Ensaio 1 com os demais. Quando é feita uma análise de variância, o primeiro grupo que possui maior diferença na variância de um dia para outro, porém essa análise só tem relevância quando considera-se a avaliação de Intensidade.

5.2.2 Relação das respostas do ensaio com a opinião acerca do incômodo vibroacústico em voos

Assim como na seção anterior, os jurados foram separados em dois grupos para análise comparativa: o primeiro aos 56% que selecionaram “Sim” ao responder no questionário à pergunta: “Ao viajar de avião, você se sente perturbado pelo ruído e pela vibração?”, e o segundo englobando os 19% que responderam “Às vezes” e aos 25% que responderam “Não”. O fato de unir as duas últimas respostas deve ao baixo número de pessoas que responderam a cada uma.

Considerando-se o sinal “Fron”, não foi observada nenhuma relação entre os grupos e a avaliação de Conforto e Intensidade. Entretanto, para os outros sinais, verificou-se a tendência dos jurados do primeiro grupo a avaliarem os estímulos com maior nota para a Intensidade e menor para o Conforto, com relevância maior para o sinal “Meio”.

Quanto ao tempo de ambientação, a única observação com relevância estatística maior que 95% é que as respostas das pessoas do segundo grupo variaram menos no Ensaio 3 do que nos dois primeiros ensaios.

5.3 Comentários gerais

A partir da verificação da maior variação das respostas do primeiro ensaio, que contém 3 minutos e 23 segundos de ambientação (2 minutos de familiarização dos estímulos e o restante do vídeo explicativo), recomenda-se um mínimo de 5 minutos para ambientação vibroacústica, principalmente quando se avaliam sinais com níveis de vibração mais fortes.

Deve-se estar atento também às diferenças nas avaliações entre pessoas que viajaram poucas vezes nos últimos 12 meses e as que têm uma carga de viagens maior, para que não haja distorção nos resultados finais.

Os resultados mostraram que a avaliação de Intensidade torna-se mais homogênea entre os grupos quanto maior o tempo de ambientação, porém o contrário acontece com o Conforto, o que pode ir de encontro ao relato de algumas pessoas após a realização do terceiro ensaio, que acharam os mais de 7 minutos de ambientação muito cansativos.

A avaliação do questionário mostra que há coerência das avaliações com a resposta prévia das pessoas respondendo se sentem-se incomodadas quanto ao ruído e vibração, já que as que responderam “sim” a essa indagação acabaram tendendo a avaliar os estímulos como menos confortáveis (e mais intensos).

6 Variação de amplitude de ruído e vibração

Como mencionado na análise final dos resultados na Seção 4.3, foi percebido que havia uma necessidade de caracterizar a influência das alterações das magnitudes de ruído e vibração na avaliação de conforto, já que foram feitas apenas alterações de 3 dB em alguns estímulos.

O ensaio foi aprovado pelo Comitê de Ética da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), sob o número 881.054, como se pode ver no Anexo A. Todos os participantes, antes de iniciar o teste, assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (ver Anexo B).

Quehl [2] fez um ensaio similar, porém em sua tese todos os sinais de ruído foram alterados (amplificados e atenuados) em 3 dB e os de vibração em 4 dB, tendo sido utilizado o DS para a avaliação de dois diferentes estímulos-base de aeronaves. Quanto ao conforto, a autora encontrou forte relação entre ruído e vibração, porém as variações de amplitude do ruído tiveram pouca influência em uma avaliação posterior de percepção de vibração.

6.1 Metodologia

Os estímulos-base utilizados foram os mesmos do Capítulo 5, ou seja, 3 combinações relativas à vibração e ruído, todas gravadas na mesma aeronave, mas em localizações diferentes e relacionadas entre si quanto à posição da aeronave. Contudo, foram realizadas variações nos sinais de ruído ou vibração. A Tabela 6.1 mostra as combinações utilizadas no ensaio especificando as variações em relação aos sinais

originais.

Tabela 6.1.: Combinações utilizadas no ensaio de variação de amplitude de ruído e vibração.

Código do sinal	Variação de ruído	Variação de vibração
Fron	0 dB	0 dB
FronR-	- 3 dB	0 dB
FronR+	+ 3 dB	0 dB
FronV+	0 dB	+ 3 dB
FronV-	0 dB	- 3 dB
Meio	0 dB	0 dB
MeioR-	- 3 dB	0 dB
MeioR+	+ 3 dB	0 dB
MeioV+	0 dB	+ 6 dB
MeioV-	0 dB	- 6 dB
Tras	0 dB	0 dB
TrasR-	- 3 dB	0 dB
TrasR+	+ 3 dB	0 dB
TrasV+	0 dB	+ 9 dB
TrasV-	0 dB	- 9 dB

Para a realização dos ensaios, os estímulos foram separados em 3 grupos, cada um contendo o estímulo-base e suas 4 variações. Como o objetivo era essencialmente a comparação, o método de avaliação foi a ER, na qual os jurados avaliavam os 3 grupos em sequência, porém a ordem destes foi aleatória entre os candidatos.

Para análise de resultados, foram utilizados testes estatísticos e ordenamentos para verificação das possíveis influências que a variação de amplitude pode ocasionar no conforto. Assim como nos ensaios anteriores, foram avaliadas também as variações devido às respostas do questionário.

Siviero [49] já havia relatado os resultados de parte desse ensaio (com uma amostragem menor), porém comparando os resultados absolutos de cada um dos três sinais e suas respectivas variações. Foi

verificado pelo autor que, para cada grupo, os estímulos com ruído atenuado foram avaliados como os mais confortáveis; que os estímulos de vibração e de ruído amplificado são os mais desconfortáveis; e que a vibração de menor amplitude tem pouca influência na avaliação do conforto.

6.2 Resultados

Participaram deste ensaio 62 pessoas, sendo 69% do sexo masculino e 31% do sexo feminino. As idades variaram de 18 a 40 anos, as quais foram divididas em dois grupos para análise de resultado, como se pode ver na divisão de cores na Figura 6.1: os mais jovens (de 18 a 24 anos, no qual encontram-se 48% dos participantes) e os mais velhos (de 25 a 40 anos, englobando 52% dos participantes).

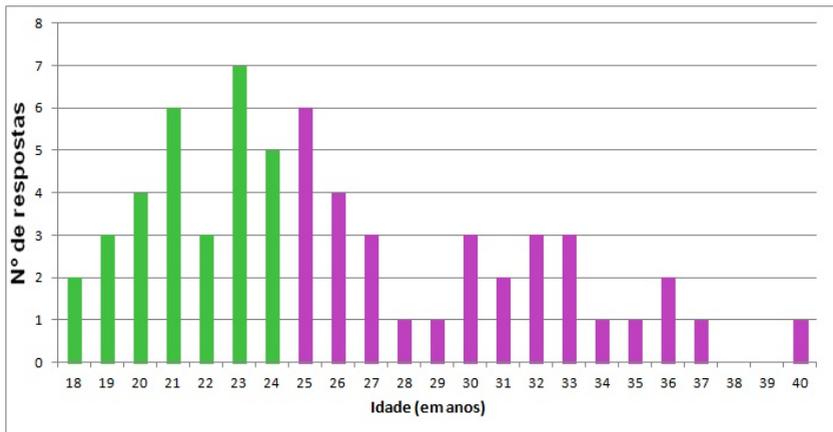


Figura 6.1.: Distribuição de idade dos participantes do ensaio de variação de amplitude.

Outro dado analisado foi o número de viagens nos 12 meses anteriores ao ensaio, que também permitiu uma divisão em dois grupos (com cores distintas na Figura 6.2): os que menos viajaram (com 3 viagens ou menos, o que envolve 45% dos participantes) e os que mais viajaram (com 4 viagens ou mais, o que engloba 55% dos participantes).

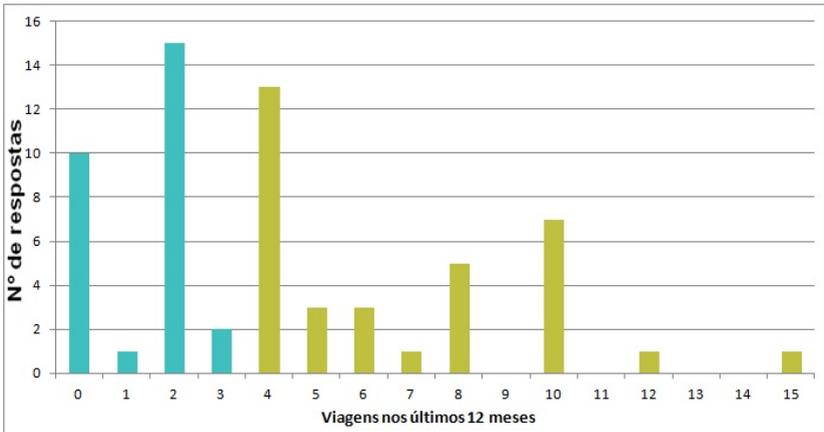


Figura 6.2.: Número de viagens nos 12 meses anteriores ao ensaio de variação de amplitude por avaliador.

Fez-se então uma análise inicial das respostas dos jurados para verificar a influência que as mesmas sofrem pelas variações de cada sinal. Os resultados para os estímulos “Fron”, “Meio” e “Tras” podem ser vistos nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.5, respectivamente.

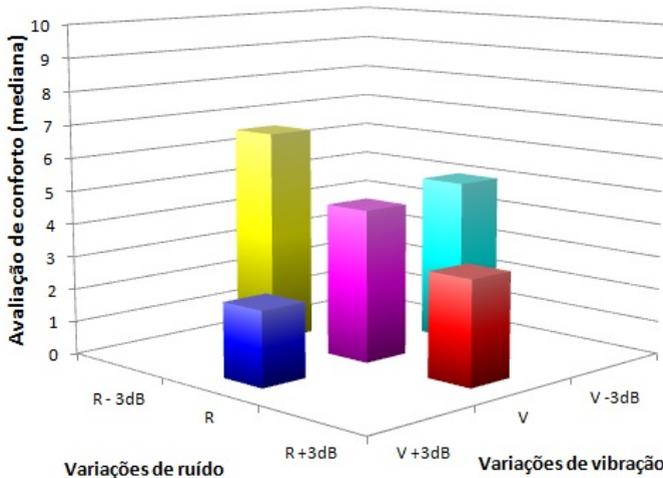


Figura 6.3.: Mediana das respostas de conforto em função das variações de ruído e vibração, relativos ao estímulo “Fron”.

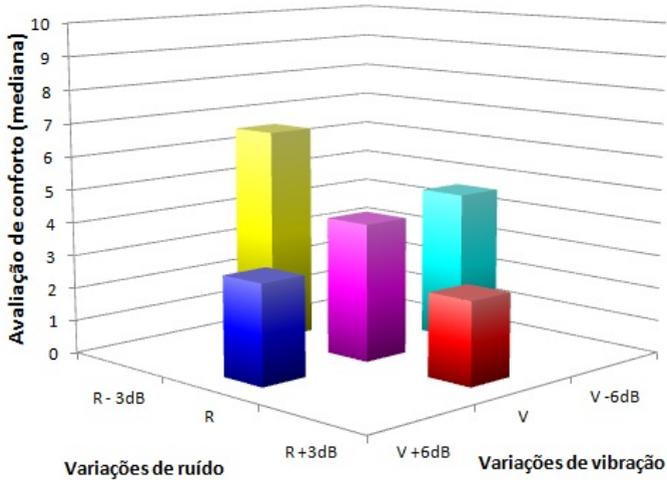


Figura 6.4.: Mediana das respostas de conforto em função das variações de ruído e vibração, relativos ao estímulo “Meio”.

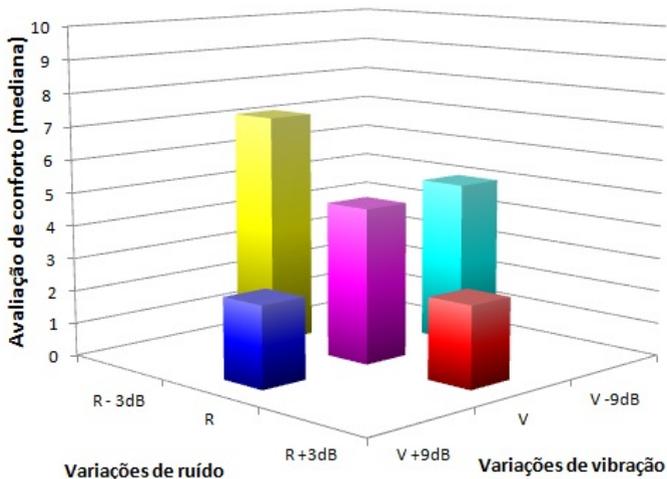


Figura 6.5.: Mediana das respostas de conforto em função das variações de ruído e vibração, relativos ao estímulo “Tras”.

Nota-se que, nos três casos, o estímulo com ruído atenuado teve uma avaliação destacada como o mais confortável, seguido pelo de vibração atenuada e pelo sinal original. Como já era esperado, os dois sinais amplificados foram considerados os mais desconfortáveis.

Verifica-se uma tendência próxima da linear quando se trata da variação de ruído, o que não ocorre na variação da vibração, onde a diferença das avaliações do sinal amplificado para o sinal-base é maior que a deste para o atenuado.

Em seguida, dada a natureza do método de Escala de Resposta, na qual o usuário faz uma comparação entre os estímulos podendo alternar entre os mesmos, fez-se uma análise classificatória das respostas dos jurados. Apenas ordenou-se a preferência (em relação ao conforto) de cada estímulo dentro de cada grupo, independente da diferença no valor da escala. Os resultados estão na Tabela 6.2.

Tabela 6.2.: Classificações no ensaio de variação de amplitude.

	Código do sinal	Porcentagem de classificações em				
		1º	2º	3º	4º	5º
Grupo 1	Fron	2%	39%	50%	8%	2%
	FronV-	27%	35%	21%	11%	5%
	FronV+	6%	8%	13%	40%	32%
	FronR+	5%	5%	5%	34%	52%
	FronR-	61%	16%	13%	5%	5%
Grupo 2	Meio	6%	27%	48%	16%	2%
	MeioV-	13%	44%	26%	13%	5%
	MeioV+	8%	18%	8%	32%	34%
	MeioR+	2%	11%	8%	31%	48%
	MeioR-	76%	10%	3%	6%	5%
Grupo 3	Tras	6%	26%	58%	10%	0%
	TrasV-	13%	48%	23%	15%	2%
	TrasV+	6%	6%	6%	35%	45%
	TrasR+	3%	8%	8%	39%	42%
	TrasR-	76%	8%	5%	5%	6%

A partir desses dados é possível verificar uma maior preferência pelo estímulo com menor ruído, seguido pelo de menor vibração e pelo estímulo de referência (condição de voo). Os estímulos criados a partir de vibração e/ou ruído amplificado dividem boa parte das opiniões, mas tendem a ficar nas últimas duas posições.

Um fato a se destacar é que houve uma quantidade de votos considerável para os sinais amplificados nas duas primeiras posições (cerca de 15%), assim como dos sinais atenuados nas duas últimas (cerca de 14%), para os três ensaios. Isso mostra que existe uma boa parcela de pessoas que sentem-se mais confortáveis com estímulos mais intensos e desconfortáveis com estímulos vibroacústicos mais enfraquecidos.

Assim como nos ensaios anteriores, foram utilizados diagramas de caixa para fazer a análise dos resultados. Porém, neste caso, como o objetivo é verificar a influência da variação da magnitude de vibração ou ruído, optou-se por fazer as análises relativas às avaliações do sinal base (para cada pessoa calculou-se essa diferença), cujos resultados podem ser vistos nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8 para os estímulos “Fron”, “Meio” e “Tras”, respectivamente.

Devido a essa análise de diferença em relação ao sinal base, tem-se uma característica destes diagramas distintas dos citados nos ensaios anteriores (Seção 4.3 e Capítulo 5): a baixa dispersão, o que, aliado com a amostragem maior, facilita conclusões estatisticamente mais exatas.

Uma avaliação inicial dos diagramas leva a confirmar os resultados mencionados acima, de que os estímulos de ruído atenuado são considerados os mais confortáveis, seguidos pelo de vibração atenuada, ambos acima do estímulo base. Os sinais de vibração e ruído amplificados são os mais desconfortáveis.

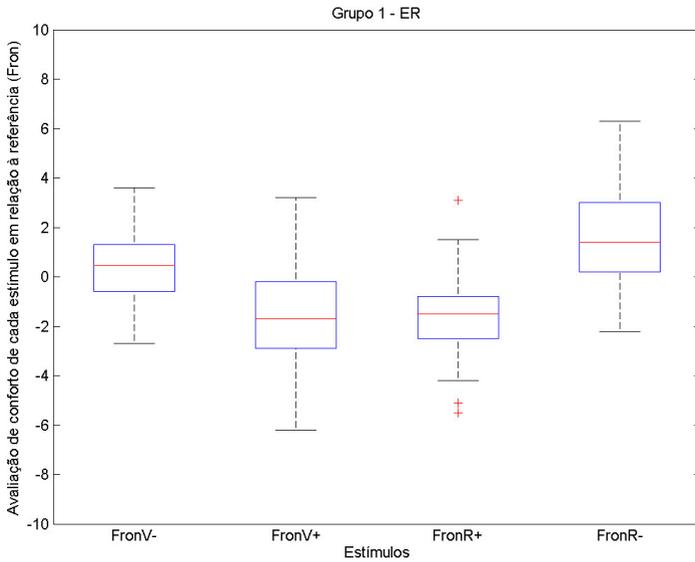


Figura 6.6.: Diagrama de caixas proveniente dos resultados relativos ao estímulo “Fron”, no teste de variação de amplitude.

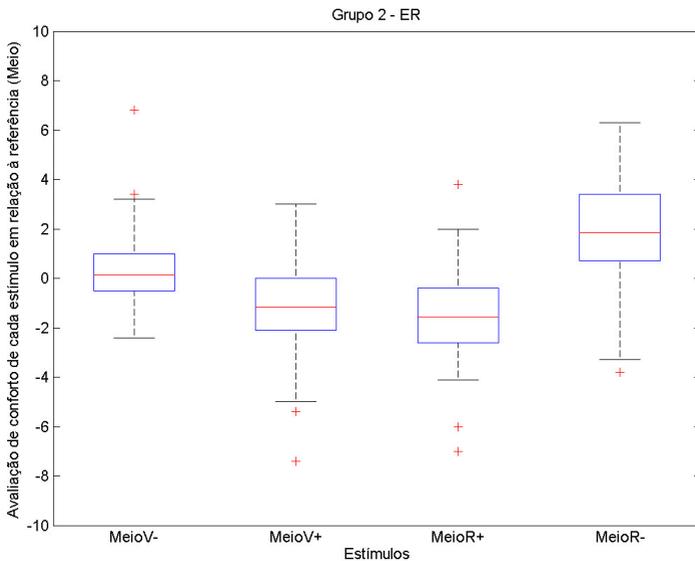


Figura 6.7.: Diagrama de caixas proveniente dos resultados relativos ao estímulo “Meio”, no teste de variação de amplitude.

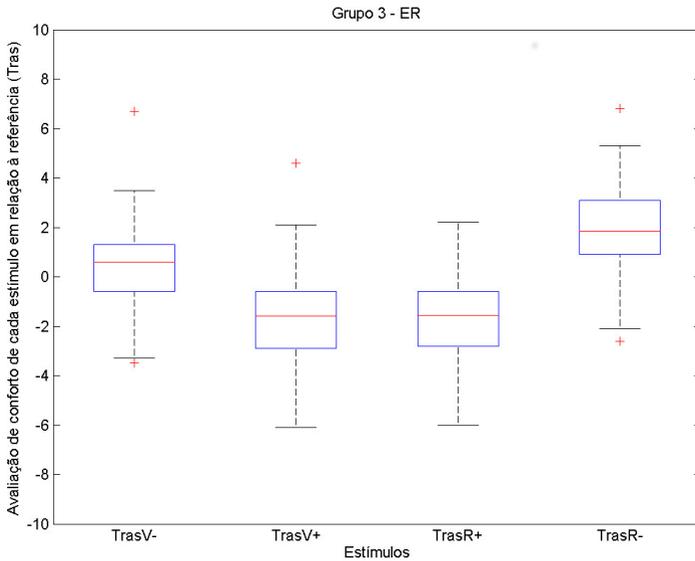


Figura 6.8.: Diagrama de caixas proveniente dos resultados relativos ao estímulo “Tras”, no teste de variação de amplitude.

Na Tabela 6.3, têm-se as medianas discriminadas para comparação entre os grupos e entre as variações do mesmo grupo.

Tabela 6.3.: Diferença entre as medianas das avaliações dos estímulos com variação de magnitude e dos estímulos-base.

Estímulo-base	Diferença de nota em relação ao estímulo-base			
	V-	V+	R+	R-
Fron (Grupo 1)	0,45	-1,70	-1,50	1,40
Meio (Grupo 2)	0,15	-1,15	-1,55	1,85
Tras (Grupo 3)	0,60	-1,60	-1,55	1,85

Foram feitos também testes estatísticos para comprovar essas diferenças: A partir do Teste T de Student para as médias, verificou-se que, para todos os ensaios, pode-se confirmar que o estímulo de ruído atenuado é o mais confortável ($p < 0,001$ em todos os casos). O estímulo de vibração atenuada também pode ser considerado mais confortável que o sinal base (valores de p igual a 0,04, 0,08 e 0,03 para

os grupos 1, 2 e 3, respectivamente). Já a diferença entre as avaliações dos dois estímulos onde houve amplificação não tem relevância estatística (menor valor de p foi de 0,38).

Não foram encontradas muitas diferenças significativas entre os grupos ($p < 0,05$), com exceção do estímulo com vibração amplificada, o qual foi avaliado como menos desconfortável em relação ao sinal base no Grupo 2 (diferença de mediana de -1,15) do que nos outros 2 grupos. Já era esperado que, pela menor amplificação, o mesmo fosse relativamente avaliado como mais confortável que o Grupo 3 (diferença de -1,60), mas o fato de sua amplificação em 6 dB ter causado menor diferença na avaliação do que o sinal amplificado em 3 dB do Grupo 1 (diferença de -1,70) foi um fato inesperado.

Tomando em consideração os sinais de vibração atenuada, apesar da mediana do sinal atenuado do Grupo 2 novamente estar mais próxima da do sinal-base, não se pode afirmar que há relevância estatística na diferença de avaliação para os outros grupos.

Por fim, como era de se esperar, a variação do ruído não resultou em diferenças significativas entre os grupos, já que todos foram amplificados ou atenuados em 3 dB.

6.2.1 Influência do gênero

Considerando primeiramente os sinais-base de cada grupo, os homens tenderam a avaliar os estímulos como mais confortáveis em relação às mulheres (valores de p iguais a 0,11; 0,01 e 0,02 para os grupos 1, 2 e 3, respectivamente), o que vai de encontro ao que se observou no ensaio preliminar (Subseção 4.3.2.1).

Não se verificou relevância estatística entre as respostas de homens e mulheres para as diferenças em relação ao sinal-base em nenhum dos ensaios, com o menor valor de p sendo 0,08 para o sinal “Tras” com vibração atenuada, no qual as mulheres tiveram a média um pouco menor que os homens. Em comum com os três grupos, apenas o fato de que as mulheres acharam mais confortável do que os homens a redução do ruído ($p = 0,06$ se considerar a avaliação dos três grupos juntos).

Assim, apesar de se ter verificado uma diferença na resposta absoluta entre homens e mulheres, a atenuação e amplificação em qualquer nível não resultou em uma influência significativa na resposta quando compararam-se os gêneros.

6.2.2 Influência da idade

Como citado mais acima, os voluntários foram divididos em dois grupos (Figura 6.1): os mais jovens (48% das pessoas, de 18 a 24 anos) e os mais velhos (52% das pessoas, de 25 a 40 anos). No ensaio preliminar (Subseção 4.3.2.2) já havia sido verificado, apesar da faixa etária não ser tão ampla, que os mais velhos tendem a avaliar os estímulos vibroacústicos como mais confortáveis.

Inicialmente, comparando-se os sinais-base, verificou-se que as pessoas mais velhas os avaliaram como mais confortáveis, porém com pequena margem de diferença (valores de p iguais a 0,32; 0,42 e 0,63 para os grupos 1, 2 e 3, respectivamente).

As ocorrências comuns nos três grupos foram de que os mais velhos avaliaram tanto a vibração atenuada quanto o ruído amplificado como mais confortáveis em relação aos mais jovens, porém também com baixa relevância estatística (menor valor de p foi de 0,9, para o sinal de vibração atenuada no Grupo 2). O primeiro caso significaria uma maior influência da atenuação da vibração para os mais velhos, enquanto que o segundo seria resultado de uma maior influência da amplificação do ruído nas respostas dos mais jovens.

Considerando-se os dados dos três grupos juntos, é possível afirmar (para um p de 0,02) que os mais jovens tendem a ser mais influenciados pela amplificação do ruído, já que os avaliaram como menos confortáveis. Em contrapartida, tanto quando levam-se em conta os dados individualmente nos grupos quanto gerais, a maior parte das avaliações foi muito próxima para as duas faixas etárias.

6.2.3 Influência do número de viagens recentes

Neste caso, os voluntários também foram divididos em dois grupos (Figura 6.2): os que menos viajaram (45% pessoas com 3 viagens ou menos) e os que mais viajaram (55% pessoas com 4 viagens ou mais). Uma comparação similar já havia sido feita no ensaio preliminar

(Subseção 4.3.2.3), no qual verificou-se que as pessoas com menor número de viagens acabaram por avaliar os sinais em média como mais confortáveis do que fizeram aquelas com maior experiência recente de voo.

No presente ensaio, observou-se a mesma tendência relatada acima, ocorrendo nos 3 grupos, porém com pouca relevância estatística (valores de p iguais a 0,76; 0,21 e 0,70 para os grupos 1, 2 e 3, respectivamente).

Analisando os resultados em comum nos 3 grupos, percebeu-se que a variação da magnitude da vibração causou maior impacto nas avaliações de conforto das pessoas que viajam menos, já que tenderam a avaliar, em comparação àqueles que mais viajam, como mais confortáveis os sinais com vibração atenuada, e como menos confortáveis os sinais com vibração amplificada.

6.3 Comentários gerais

Com esse ensaio, verificou-se que um acréscimo na amplitude do ruído ou da vibração causa um aumento no desconforto para a maioria das pessoas, como já era esperado, mas está longe de ser unânime. Outro fato notado é de que há uma relação próxima à linear entre conforto e magnitude de ruído, o que não ocorre quando se trata de vibração. Com isso, reforça-se a ideia de um maior tempo de ambientação para a adaptação dos sentidos em relação à audibilidade e à vibração do piso, visando a adoção de outros fatores psicoacústicos, como os descritos na Seção 2.3.3, quando deseja-se confeccionar um modelo de conforto para aeronaves.

Ainda em comparação com os ensaios anteriores (Seção 4.3 e Capítulo 5), algumas avaliações de conforto diferiram bastante daquelas obtidas para os mesmos estímulos, o que indica que as pessoas avaliam mais comparativamente do que absolutamente, principalmente em um método mais interativo como a Escala de Resposta.

Por fim, apesar da amostragem ser maior do que nos dois ensaios anteriores, foram verificadas poucas diferenças quando se dividiu os grupos em categorias (gênero, idade e número de viagens).

7 Determinação do modelo de conforto vibroacústico

A partir da experiência e dos conhecimentos adquiridos nos ensaios anteriores, foi planejado o ensaio final de conforto vibroacústico. Os critérios de inclusão foram a pessoa ter como língua materna o português brasileiro e ter mais de 18 anos.

Já prevendo-se dois ensaios finais, este, juntamente com o descrito no Capítulo 6, também foi aprovado pelo Comitê de Ética da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) sob o número 881.054, como se pode ver no Anexo A.

Objetivando fazer o modelo baseado em estímulos que são os mais próximos possíveis de situações reais de voo, todas as 8 combinações (ruído + vibração) de sinais escolhidos são equivalentes cada uma a um posto de uma aeronave, sem alterações de amplificação ou atenuação.

7.0.1 Metodologia

A estrutura dos ensaios anteriores foi mantida, com a sequência TCLE-vídeo-familiarização-treinamento-avaliação (ver mais detalhes no início deste capítulo).

Após apresentação verbal breve do projeto ao voluntário, o mesmo recebia o TCLE (ver Anexo B) e assinava. Enquanto isso, eram anotadas as temperaturas externa e interna da cabine e a umidade relativa do ar. Em seguida, o voluntário era encaminhado ao simulador para o início do teste.

O vídeo explicativo apresentado no início do ensaio acabou por ser ainda mais didático, baseado na experiência ao verificar erros que

alguns usuários acabaram por cometer nos ensaios anteriores. Por conseguinte, sua duração acabou por ter 3 minutos e 11 segundos.

Informações extras foram adicionadas ao questionário, visando buscar mais fatores que poderiam influenciar na avaliação de conforto. Assim, dados como altura e peso (aproximados e informados pelo participante) foram acrescentados. Como esperava-se que boa parte da amostra fosse proveniente do Laboratório de Vibrações e Acústica, e essa experiência pudesse causar distorções no resultado final, uma pergunta identificadora dessas pessoas foi inclusa também.

A familiarização teve 2 minutos de duração, ou seja, foram 15 segundos para cada um dos 8 estímulos, totalizando 5 minutos e 11 segundos de ambientação dos sentidos.

Devido à grande influência dos sinais das aeronaves executivas na avaliação dos outros estímulos, foram utilizados apenas dados de duas aeronaves comerciais, chamadas aqui de “C1” e “C2”. Da primeira, foram utilizadas as posições de poltrona à janela na região da frente (F), do meio (M) e atrás (T). Da segunda aeronave, foram tomadas as posições nas regiões da frente (F), intermediária (I), média (M) e atrás (T), todas à janela, e uma na posição média ao corredor (C).

O método de avaliação escolhido, neste caso, foi o DS. Sua escolha foi feita para evitar comparações diretas entre os estímulos, incentivando o participante a avaliar sua sensação absoluta no momento. Todavia, como já foi frisado, sabe-se que, devido à memória recente dos sentidos, acaba ocorrendo uma inevitável comparação com os estímulos anteriores.

Na aplicação do DS, era inicialmente feito um treinamento para o uso do método, no qual cada voluntário respondia sobre o seu estado de espírito no momento, com os pares “calmo/nervoso” e “cansado/disposto”, como pode-se ver na Figura 7.1. Apesar de serem dados que pudessem se tornar interessantes, como foi previamente avisado que era um treinamento e várias pessoas acabaram por tentar voltar atrás depois de já confirmar, optou-se por não se utilizar essas respostas.

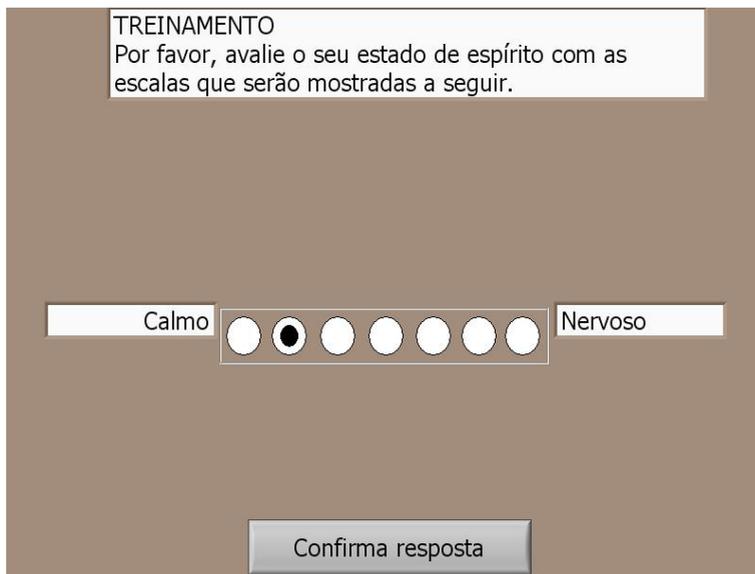


Figura 7.1.: Tela para o treinamento do DS no ensaio final.

Em seguida, aparecia novamente uma tela com instruções de cada botão e, ao clicar em “Iniciar”, o jurado começava a avaliação propriamente dita. Para cada um dos estímulos, era solicitado inicialmente para que fosse feita uma avaliação da sua sensação geral de conforto (Figura 7.2), a partir do par “desconfortável/confortável”, em uma escala de 7 pontos equidistantes.

Durante a apresentação do vídeo, o participante havia sido instruído para, nessa primeira avaliação acerca da sensação geral de conforto, levar em conta todos os fatores possíveis que o levariam a considerar uma situação como “confortável” ou “desconfortável”.

A barra de progresso sob o botão “Confirma resposta” (figuras 7.2 e 7.3) indica o andamento do ensaio, minimizando assim a ansiedade do avaliador por não saber o número de itens restantes a serem avaliados [25].

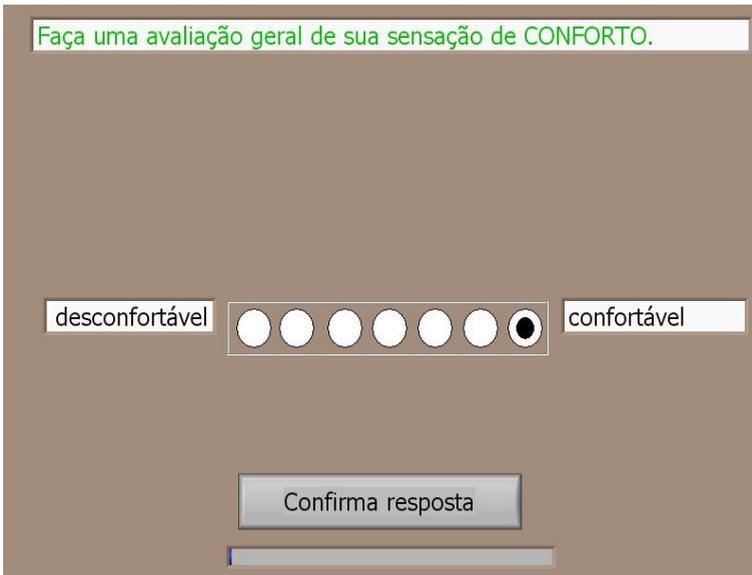
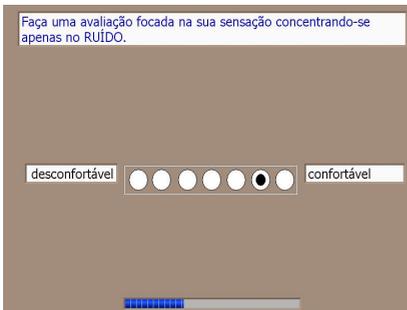
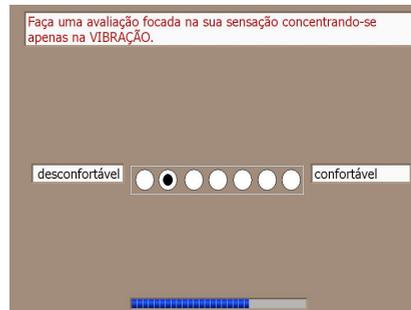


Figura 7.2.: Tela para avaliação geral de conforto no ensaio final.

Logo após essa avaliação geral, era feita outra de conforto, mas com foco apenas no ruído (Figura 7.3 (a)) e, por último, a avaliação de conforto focando-se somente nas vibrações (Figura 7.3 (b)).



(a) Ruído.



(b) Vibração.

Figura 7.3.: Tela das avaliações de conforto em relação ao ruído e às vibrações, no ensaio final.

O jurado então recebia um aviso para passar ao próximo estímulo, cuja troca durava cerca de 1 segundo. As três avaliações eram repetidas, até que todos os 8 estímulos fossem avaliados. Ao final, uma tela de agradecimento indicava que o ensaio havia sido finalizado.

O pesquisador então entrava no simulador, conduzia o voluntário à saída do mesmo e, após anotar a temperatura interna final, informalmente realizava perguntas sobre o ensaio (na maior parte das vezes um “o que achou?” já era o suficiente para a pessoa comentar se o que influenciava mais era ruído ou vibração, o que achava de cada um dos dois, da dinâmica do ensaio *etc.*).

Em relação aos resultados, as análises estatísticas mais complexas foram feitas com o auxílio do programa STATISTICA (versão 7.0.61.0, desenvolvido pela StatSoft, mas que desde março de 2014 está sob controle da companhia Dell Software). Para tabulação de dados e análises mais básicas também foram utilizados os programas LibreOffice, Microsoft Excel, Mathworks MATLAB e GNU Octave.

Assim como feito nos ensaios anteriores, os usuários foram divididos em diferentes grupos para verificação da influência que diversos fatores não só demográficos (idade, sexo *etc.*) como ambientais (temperatura e umidade) podem causar nas respostas.

Para verificar se há diferença significativa entre os grupos criados, foram feitas análises de normalidade e aplicado o Teste T de Student, sempre usando um valor de nível de confiança estatística $\alpha = 0,95$.

Os modelos de conforto foram feitos utilizando tanto usando regressão múltipla pelo método dos mínimos quadrados (ver Subseção 2.5.1) quanto com o auxílio de redes neurais artificiais (ver Subseção 2.5.2). Foram modelados cada parâmetro individualmente, para em seguida apresentar modelos combinados. No primeiro caso, fez-se uso de regressão cúbica, enquanto que para mais propriedades simultâneas foi feito um ajuste quadrático, já que modelos lineares foram testados previamente com resultados insatisfatórios.

Para averiguar a tendência, aplicou-se, na maioria dos casos, um algoritmo de redes neurais artificiais. Nele, aceitaram-se tanto os modelos lineares quanto os *perceptron* multicamadas (PMC). Na

maioria dos casos, aceitaram-se os 10 modelos com menor erro, com exceção do modelo final, no qual foram aceitos os 15 melhores casos.

Inicialmente, os resultados foram transformados em uma escala com valores inteiros de 1 a 7 e feitos todos os modelos. Todavia, como havia muita dispersão nas respostas para cada estímulo, fez-se uma transformação linear, passando os valores para uma escala de -1,5 a 1,5, com intervalo de 0,5 ponto.

7.1 Resultados

Participaram do ensaio 132 pessoas, com idade média de 25,7 anos, as quais 54,5% do sexo masculino e 45,5% do sexo feminino. Do total, 37,1% declararam trabalhar com Vibrações e/ou Acústica, e o número de viagens médio informado foi de 3,7 nos últimos 12 meses (apesar de 31 pessoas não terem viajado nesse período). Quando questionados quanto ao que mais os incomoda em situação de voo, 44,7% responderam o ruído, 15,9% a vibração, 22,7% ambos e 16,7% nenhum deles (Figura 7.4).

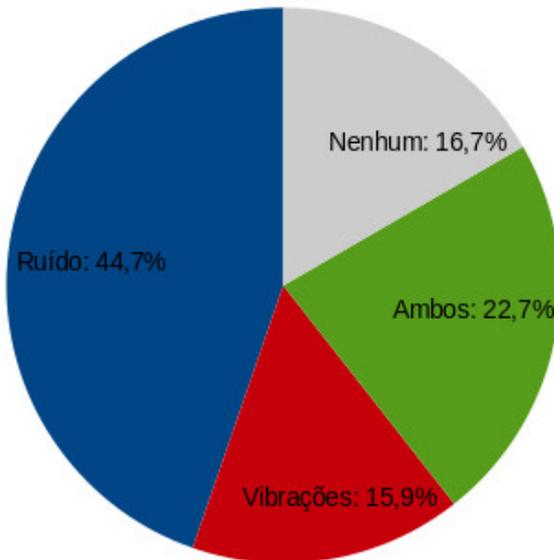


Figura 7.4.: Divisão das respostas dos participantes quando questionados sobre o que os incomodava em situação de voo.

A altura média foi de 172,2 cm (variando de 150 a 196 cm) e o peso médio foi de 69,9 kg (variando de 43 a 100 kg). Calculando o IMC¹, obteve-se um valor médio de 23,4 kg/m² (variando de 16,8 a 32,7 kg/m²).

A temperatura média externa à cabine era de 26,1°C, e a temperatura interna inicial interna era em média de 26,0°C, e esse valor ao final dos ensaios era em média de 0,3°C maior. Já a umidade relativa do ar média foi de 69,2 %.

7.1.1 Comparação entre os estímulos

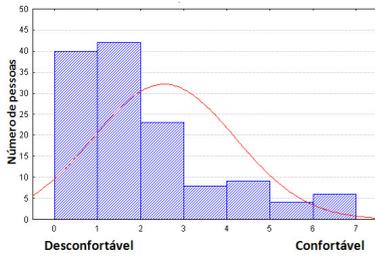
Os resultados da média das avaliações dos 132 voluntários, para cada um dos estímulos e considerando-se os 3 itens, podem ser vistos na Tabela 7.1. Como já mencionado, os dois primeiros caracteres do código ("C1" e "C2") referem-se à aeronave e a letra final faz referência ao local dentro do avião em que se foi feita a colata do estímulo.

Tabela 7.1.: Média das avaliações de conforto para os 3 itens.

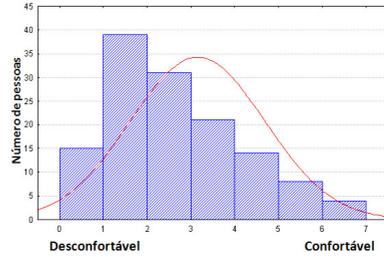
Estímulo	Conforto geral	Ruído	Vibração
C1F	-0,73	-1,13	1,21
C1M	-0,42	-0,89	1,08
C1T	-0,23	-0,64	0,95
C2C	0,00	-0,16	0,00
C2I	-0,31	-0,30	-0,10
C2F	0,38	0,28	0,48
C2M	-0,31	-0,36	-0,13
C2T	-0,36	-0,17	-0,16

Em relação à distribuição, como se pode ver na Figura 7.5, na maioria dos casos as respostas se concentram mais em torno de um valor central, diminuindo a quantidade quando se afastam deste. A curva vermelha representa uma referência de distribuição normal.

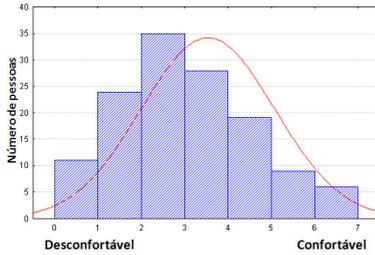
¹Índice de massa corporal, calculado dividindo-se o peso (em kg) pelo quadrado da altura (em m).



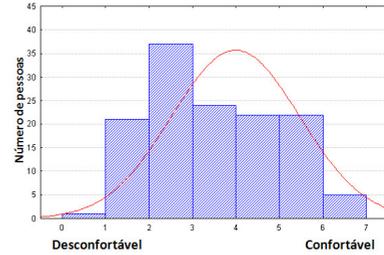
(a) C1F.



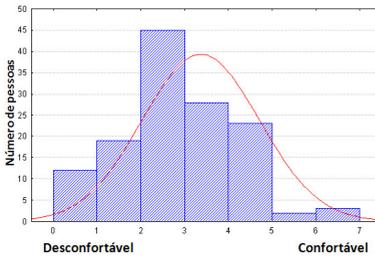
(b) C1M.



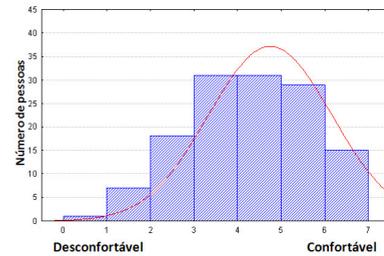
(c) C1T.



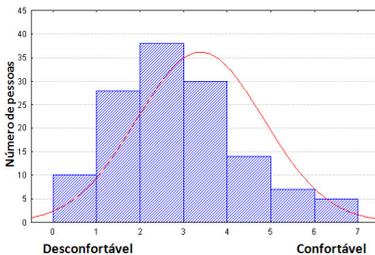
(d) C2C.



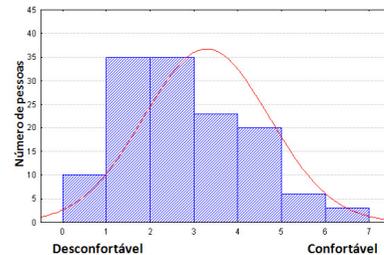
(e) C2I.



(f) C2F.



(g) C2M.



(h) C2T.

Figura 7.5.: Histogramas dos resultados de conforto dos 8 estímulos no ensaio final.

Para verificar a normalidade, foram feitos os testes Kolmogorov-Smirnov e de Lilliefors, e foi comprovado esse tipo de distribuição para as respostas de todos os sinais.

Adicionando as respostas de conforto de ruído e vibrações, fez-se um agrupamento em árvore para verificar a proximidade das avaliações entre os estímulos, como se pode ver na Figura 7.6.

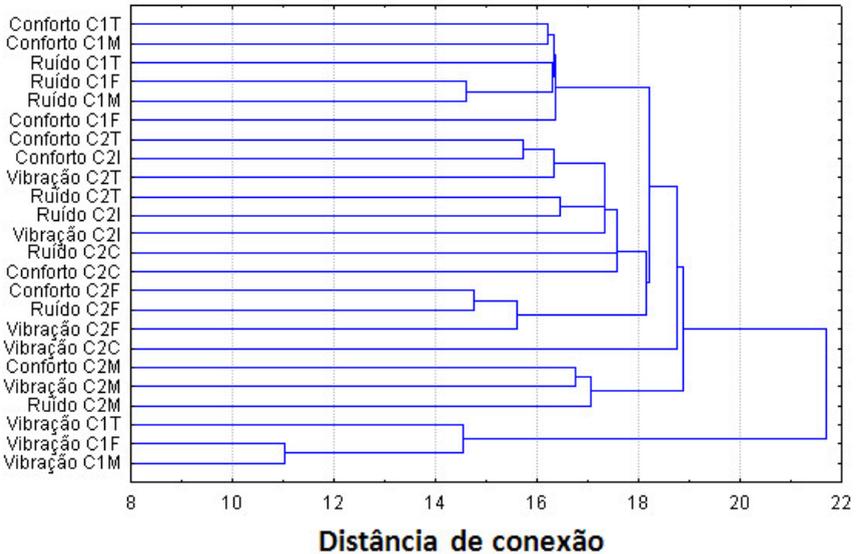


Figura 7.6.: Dendrograma entre os estímulos e os itens de avaliação do ensaio final.

Um dendrograma² agrupa os sinais por características similares, considerando não só as suas avaliações mas também as suas propriedades. Verificam-se as separações por grupos da direita para a esquerda na figura.

Nesse caso, separam-se inicialmente as 3 últimas avaliações mais distintas, que são as de vibração da aeronave C1, cujas avaliações foram as mais próximas do item confortável (ver Figura B.6). Ainda, as 6 primeiras avaliações superiores listadas também se remetem a essa aeronave, porém relativas ao conforto geral e ao ruído.

²Do grego: δέντρο = árvore; γράμμα = desenho.

Para a aeronave C2, misturam-se no diagrama as avaliações de conforto, vibração e ruído, mas verifica-se uma semelhança entre os estímulos C2I e C2T, e também entre C2C e C2F. O estímulo C2M é o que obteve pontuação mais diferenciada nessa aeronave, tanto que as suas três avaliações resultam na segunda separação de grupos no dendrograma.

Através de uma Análise de Componentes Principais, verificou-se que a primeira separação entre as respostas é realmente relativa a diferentes aeronaves. Os resultados dessa análise podem ser vistos no Apêndice B.

Para comparar os resultados, fez-se diagrama de caixas com as medianas e os quartis. Podem-se ver os resultados de conforto na Figura 7.7.

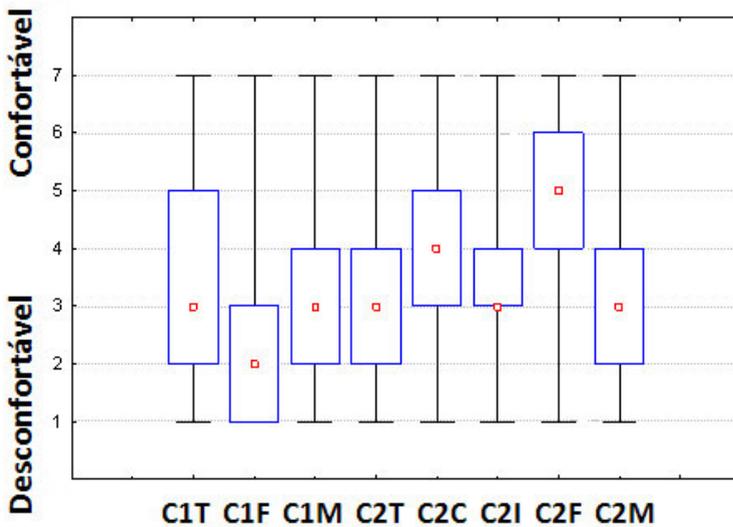


Figura 7.7.: Diagrama de caixas para avaliação de conforto geral no ensaio final.

Nota-se o uso de todos os pontos da escala em todos os casos, e espaço dos quartis centrais similar, com exceção do C1T (mais espaçado) e do C2I (mais concentrado). O sinal C2F foi considerado o mais confortável, enquanto que o C1F foi o mais desconfortável.

Outra observação feita é de que a mediana de 6 entre os 8 estímulos está mais próxima do desconfortável, enquanto que apenas o C2F foi avaliado como mais confortável.

O mesmos diagramas para ruído e vibração podem ser vistos no Apêndice B. O foco nos estímulos sonoros levou a pontuações um pouco mais baixas em média que o conforto na maioria dos casos, e os resultados com foco nos vibratórios foram mais similares àqueles de conforto para a aeronave C2, porém na C1 foram muito próximos do nível mais confortável.

7.1.2 Influência do gênero

Para o conforto geral não foram observadas diferenças relevantes em nenhum dos sinais. Vale lembrar que os resultados já haviam divergido entre as seções 4.3.2.1 e 6.2.1.

Em relação ao ruído também não foram observadas diferenças relevantes, porém as mulheres tenderam a avaliar como mais confortáveis 7 dos 8 estímulos.

A vibração foi em média melhor avaliada pelos homens nos 3 estímulos da aeronave C1 (de menor aceleração), com relevância para o sinal C1F ($p = 0,02$), e pelas mulheres nos 5 estímulos da aeronave C2 (de maior aceleração), com relevância para os sinais C2M ($p = 0,01$) e C2C ($p = 0,04$).

Considerando todos os estímulos juntos em relação à própria média, não é possível denotar diferenças relevantes de preferências entre homens e mulheres para conforto geral e de ruído. Entretanto, para vibração, a média de avaliação dos homens foi mais baixa (tendendo mais ao desconfortável) que das mulheres ($p = 0,04$).

Outra diferença é no tempo de ensaio, no qual os homens em média demoram 3 segundos a mais que as mulheres, concentrando para cada estímulos esta diferença na primeira avaliação (de conforto geral).

7.1.3 Influência da idade

No ensaio preliminar já havia sido feita uma análise da influência da idade (Subseção 4.3.2.2). Aqui, dividiu-se também em dois grupos: os mais jovens com idade menor ou igual a 24 anos (56,8%

dos participantes) e os mais velhos com idade superior a 24 anos (43,2% das pessoas).

Ao contrário do que ocorreu naquele caso, neste ensaio os mais jovens avaliaram a maioria dos estímulos como mais confortáveis, em média, fato que ocorreu em 6 dos 8 casos, porém com grande relevância apenas para o estímulo C2M ($p = 0,03$).

Focando-se apenas no ruído, ocorreu o oposto: os mais velhos avaliaram 7 dos 8 sinais como mais confortáveis. Para a vibração, novamente os mais jovens consideraram mais confortáveis 7 dos 8 sinais. Vale ressaltar que, mesmo assim, as diferenças foram pequenas na maioria dos casos.

Por fim, quando se calculou a pontuação de todos os estímulos em relação à sua média, só houve diferença relevante para a avaliação do ruído, na qual os jovens consideraram em geral os estímulos mais desconfortáveis ($p = 0,02$). Essa tendência pode ser vista na Figura 7.8, na qual têm-se os ajustes lineares dos 3 itens avaliados, considerando-se todas as respostas para todos os estímulos.

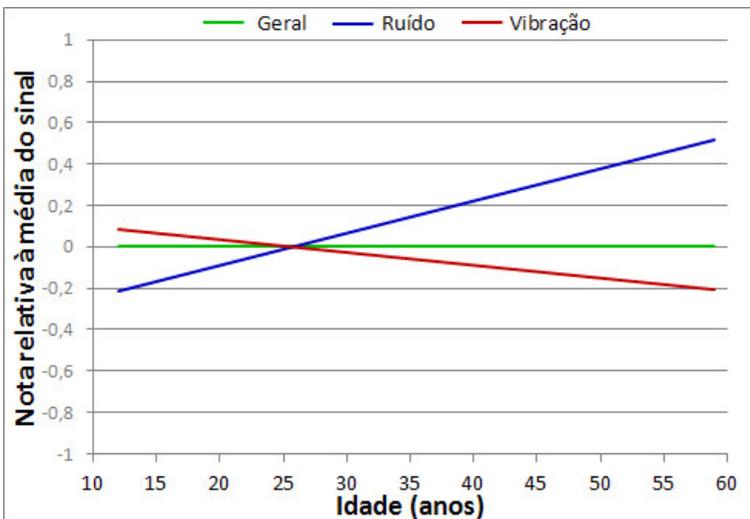


Figura 7.8.: Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função da idade, para o ensaio final.

7.1.4 Influência de trabalhar-se com acústica e/ou vibrações

Em relação ao conforto geral, em todos os casos as pessoas que trabalham com acústica e/ou vibrações avaliaram como menos confortáveis, em média, obtendo-se relevância estatística ($p < 0,05$) em todos os sinais da aeronave C2.

Para o conforto em relação ao ruído, novamente em todos os estímulos aqueles que trabalham na área avaliaram com notas mais próximas do desconfortável. Em relação à vibração, esse fato ocorreu em 7 dos 8 casos, com relevância ($p < 0,05$) novamente em todos os sinais da aeronave C2.

Quando se calculou em relação à média de cada estímulo, para as três avaliações aqueles que trabalham na área colocaram uma média mais baixa ($p = 0,02$ para ruído e $p < 0,0001$ para as outras duas).

7.1.5 Influência do número de viagens recentes

Assim como já havia sido observado nas seções 4.3.2.3 e 6.2.3, as pessoas que viajam menos (48,5% dos participantes, com 0 a 2 viagens nos 12 meses anteriores ao ensaio) costumam considerar a situação geral de conforto melhor do que as que viajam mais (51,5% das pessoas, com 3 ou mais viagens nesse período). Isso ocorreu para todos os estímulos, apesar de obter-se relevância ($p = 0,03$) apenas para o sinal C2M.

Focando-se tanto no ruído quanto na vibração, as pessoas que viajam menos avaliaram como mais confortáveis 6 dos 8 estímulos, em cada caso. Porém, não obteve-se relevância para nenhum deles.

Considerando todos os estímulos em relação à sua média de pontuação, confirma-se que só se obteve diferença relevante em relação ao conforto geral, com aqueles que viajam mais fazendo uma avaliação mais próxima de desconfortável ($p < 0,01$). Fazendo-se um ajuste linear para os 3 itens e a resposta de todos os estímulos, verifica-se essa tendência, como se pode ver na Figura 7.9.

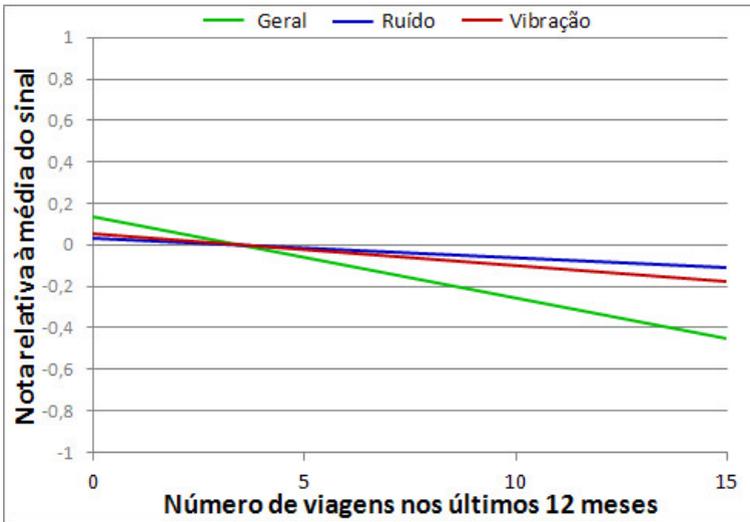


Figura 7.9.: Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função do número de viagens recentes, para o ensaio final.

7.1.6 Influência da altura

Em relação à altura, os grupos foram divididos em relação à média: os 46,2% mais baixos com 1,72 m ou menos e os 53,8% mais altos com 1,73 m ou mais. Apesar das diferenças pequenas, em 6 dos 8 estímulos as pessoas mais altas os avaliaram como mais confortáveis.

Considerando-se o conforto em relação ao ruído, os mais baixos avaliaram como mais confortáveis os 3 sinais da aeronave C1, e os mais altos fizeram o mesmo com os 5 sinais da aeronave C2. Já considerando-se apenas a vibração, ocorreu exatamente o oposto, com maior relevância para o sinal C1F ($p = 0,04$).

Levando-se em conta todos os estímulos em relação à sua média, não se obteve diferença relevante ($p < 0,05$) em função da altura para nenhuma das três avaliações. Um dado a se destacar é que as pessoas mais altas demoram em média 3 segundos a mais para realizar o ensaio. Ainda sim, fazendo-se um ajuste linear com todos os sinais (Figura 7.10), houve uma proporcionalidade direta em relação ao conforto geral e inversa quando relativa ao conforto pela vibração.

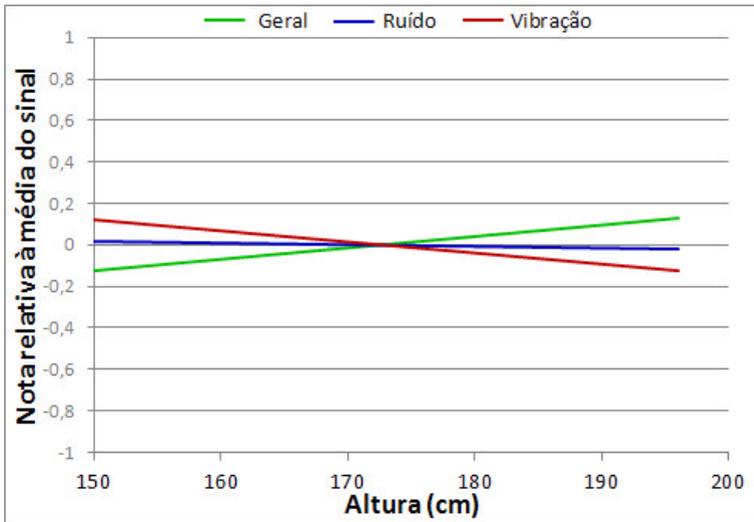


Figura 7.10.: Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função da altura dos voluntários, para o ensaio final.

7.1.7 Influência do peso

Assim como foi feito com a altura, dividiu-se os grupos em relação à média de peso: os 50,8% menos pesados declararam possuir menos de 70 kg, enquanto que os 49,2% mais pesados tinham 70 kg ou mais. Para o conforto geral, 6 dos 8 estímulos foram considerados mais confortáveis pelas pessoas menos pesadas, com relevância maior para o sinal C2M ($p = 0,01$).

Levando-se em conta a avaliação apenas do ruído, o mesmo resultado se repetiu para 7 dos 8 estímulos, com maior relevância para o sinal C1F ($p = 0,04$). Com o foco na vibração, novamente os menos pesados avaliaram como mais confortáveis 6 dos 8 estímulos, com relevância para os sinais C2M ($p = 0,02$), C2I ($p = 0,04$) e C2C ($p = 0,05$).

Com o cálculo da diferença de cada avaliação em relação à média do estímulos, notou-se que em todos os 3 itens o grupo com maior massa teve uma avaliação média mais próxima do desconfortável, porém com relevância para o ruído ($p = 0,04$) e para a vibração ($p < 0,01$).

Ainda sim, a única reta que teve uma maior inclinação (apesar de decrescente) quando fez-se um ajuste linear foi a relativa à percepção do ruído, como se pode ver na Figura 7.11.

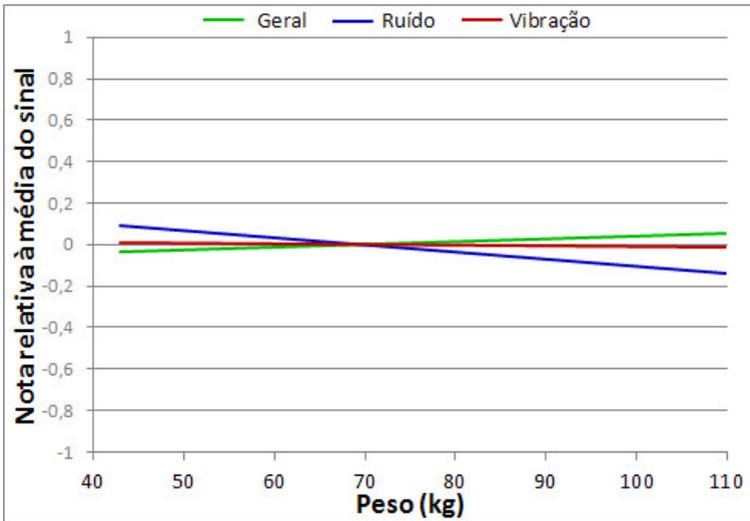


Figura 7.11.: Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função do peso dos voluntários, para o ensaio final.

7.1.8 Influência do IMC

O último dado demográfico a ser comparado foi o índice de massa corporal, no qual também foi utilizado o valor médio ($23,4 \text{ kg/m}^2$) como referência para divisão de grupos: 53,8% pessoas com valor abaixo da média e 46,2% com valor acima. Para o conforto geral, esse dado só teve relevância para o estímulo C2T, o qual foi considerado mais confortável ($p = 0,01$) por aqueles com maior IMC.

A avaliação de ruído também foi muito próxima para a maioria dos sinais. Contudo, quando o foco foi na vibração, em todos os estímulos as pessoas com maior IMC os consideraram mais confortáveis, com maior relevância também para o C2T ($p = 0,01$).

Por fim, calculando a diferença entre cada avaliação individual e a média do estímulo, não percebeu-se diferença relevante para o conforto geral e para o ruído, mas sim para a vibração: aqueles com

maior IMC tendem a avaliar os estímulos vibratórios como mais confortáveis ($p = 0,01$). Essa tendência pode ser vista fazendo um ajuste linear, como mostrado na Figura 7.12. Nela, também percebe-se uma proporcionalidade inversa quanto ao ruído, mas sem influência no conforto geral.

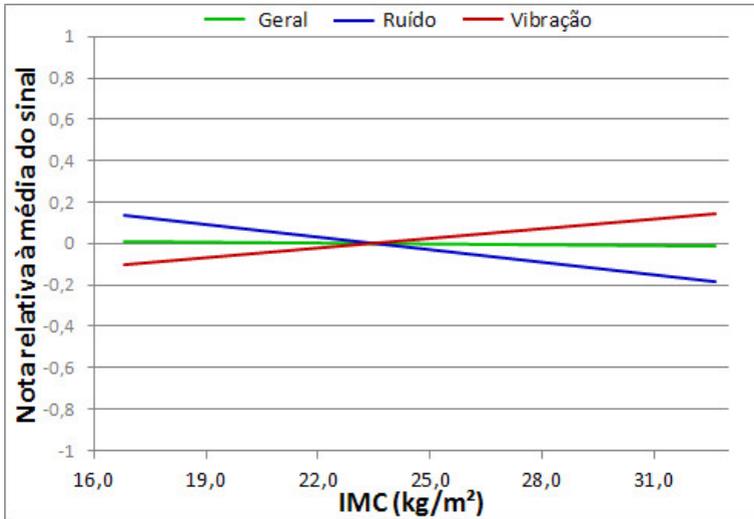


Figura 7.12.: Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função do IMC dos voluntários, para o ensaio final.

7.1.9 Influência da ordem de apresentação dos estímulos

Como já mencionado, a ordem de avaliação dos estímulos era aleatória e sorteada novamente pelo programa para cada voluntário. Cada estímulo então teve sua média avaliada quando era um dos 4 primeiros e quando era um dos 4 últimos, para comparar a diferença.

Em relação ao conforto geral, 6 dos 8 estímulos foram melhor avaliados quando foram sorteados para a primeira metade do ensaio, com maior relevância para o C2T ($p < 0,01$) e C1M ($p = 0,04$).

Para o foco no ruído, os 3 estímulos da aeronave C1 foram melhor avaliados quando estavam na primeira metade do ensaio, com maior relevância para o C1F ($p = 0,01$). Já os estímulos da C2, com ruído menos intenso, em geral foram melhor avaliados quando apresentados depois.

A avaliação de vibração levou a um resultado inverso em relação às aeronaves, porém similar se levada em conta a magnitude do item avaliado: os estímulos da aeronave C2, de maior aceleração, foram considerados mais confortáveis quando avaliados na primeira metade, o contrário ocorrendo com os gravados na C1. As maiores relevâncias foram calculadas para o C2M e o C2T (ambos com $p < 0,01$).

Considerando-se cada avaliação individual dos estímulos em relação à sua média, para os 3 itens, aqueles sinais que estavam na primeira metade do ensaio foram pontuados como mais confortáveis, especialmente para conforto geral ($p < 0,01$) e vibração ($p = 0,02$).

Um dado que pode ser relevante é o tempo de ensaio médio, como se pode ver na Tabela 7.2. O tempo total considera também a demora para iniciar e fechar o estímulo em cada caso.

Tabela 7.2.: Tempo médio de avaliação dos estímulos (em segundos) em função da ordem que apareceram no ensaio.

Ordem	Conforto geral	Ruído	Vibração	Total
1º	18,7	13,0	12,2	50,4
2º	13,7	10,4	9,8	38,8
3º	13,3	9,6	9,2	36,2
4º	12,2	9,0	9,0	34,1
5º	12,6	8,9	8,8	34,3
6º	10,9	8,4	8,3	31,3
7º	11,6	8,6	8,2	32,0
8º	11,3	8,7	9,0	32,7

Fazendo-se um ajuste linear com todas as respostas de todos os estímulos em relação à sua média em função do tempo de avaliação do mesmo (Figura 7.13), reforça-se a afirmação acima, com as curvas de conforto geral e de ruído praticamente superpostas e diretamente proporcionais quanto ao tempo.

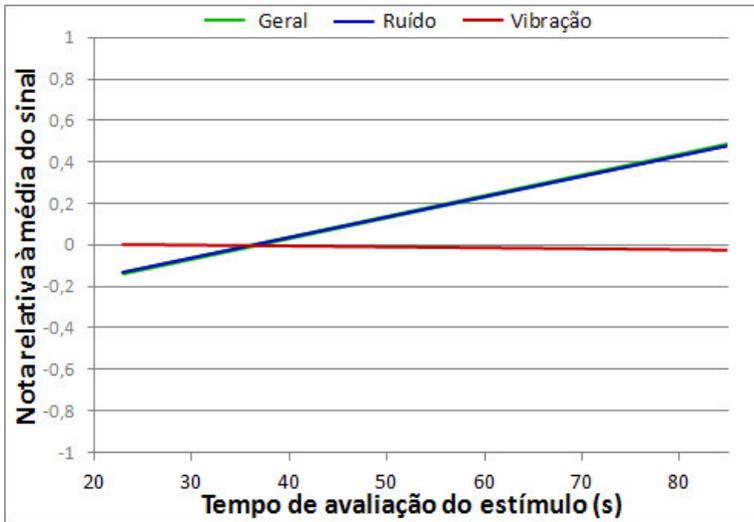


Figura 7.13.: Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função do tempo de avaliação do mesmo por cada usuário, para o ensaio final.

7.1.10 Influência das condições ambientais

Em relação às condições ambientais, analisou-se a tendência linear de respostas em relação à média de cada estímulo. Na Figura 7.14 tem-se a tendência em função da temperatura, enquanto que na Figura 7.15 é mostrada a relação com a umidade relativa do ar.

Vale ressaltar que ocorreu um problema no sistema de condicionamento de ar pouco antes de começarem os ensaios, que foram então feitos nas condições ambientes normais. Enquanto a temperatura interna da cabine em uma aeronave típica da empresa que iniciou o projeto varia de 18°C a 23°C, neste ensaio esteve na faixa de 22,5°C a 28,3°C.

A umidade do ar em aeronaves tende a ser a mesma ambiente no início, porém vai diminuindo gradativamente até o pouso. Nesse ensaio, a umidade relativa do ar medida variou de 58% a 78%.

Nota-se que, nos dois casos, ocorreu uma proporcionalidade direta não só para conforto geral, mas também para ruído e vibração.

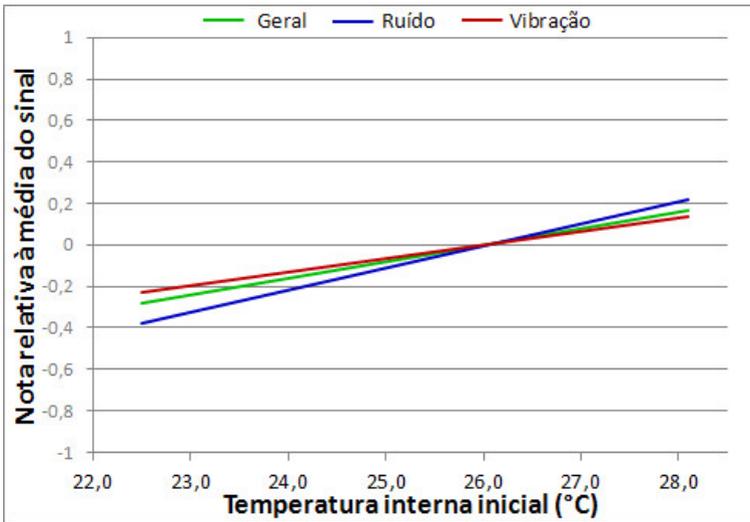


Figura 7.14.: Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função da temperatura inicial interna da cabine, para o ensaio final.

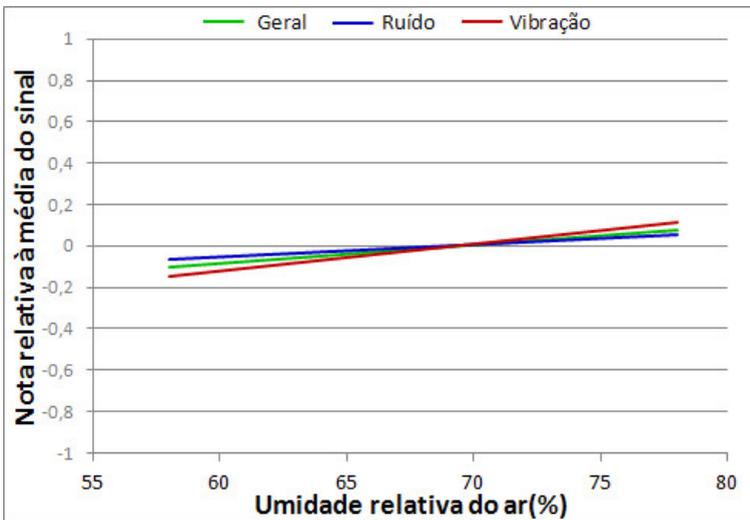


Figura 7.15.: Tendência das respostas em relação à média do estímulo, em função da umidade relativa do ar, para o ensaio final.

7.2 Modelo de conforto vibroacústico

Inicialmente, foram feitos modelos de cada propriedade individualmente, para testar o ajuste de cada uma com as variáveis dependentes: Conforto geral (C_G); Conforto devido ao ruído (C_R); e Conforto devido à vibração (C_V). Lembrando que, para os modelos de estímulos desenvolvidos a partir do DS, os valores reais dessas variáveis foram adaptados para uma escala de -1,5 a 1,5, com intervalo de 0,5 ponto entre cada valor.

A escolha inicial foi testar modelos de regressão lineares (ver Subseção 2.5.1), mas foram obtidos resultados insatisfatórios. Assim, optou-se por fazer um ajuste cúbico em todas as propriedades, adaptando a Equação (2.27) para:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3, \quad (7.1)$$

na qual Y é a variável dependente, os valores de β são os coeficientes da regressão e os valores de X são relativos à propriedade estudada, que são os parâmetros físicos apresentados previamente na Subseção 2.3.3.

Todavia, nesta Tese, ao combinar mais de um parâmetro, em geral fez-se uso da regressão quadrática,

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \beta_3 X_2 + \beta_4 X_2^2 + \dots, \quad (7.2)$$

no qual os valores de X_i referem-se à i -ésima propriedade. Todos os modelos foram feitos a partir das avaliações de todos os usuários, apesar de, nos gráficos de regressão exibidos, estarem aparecendo apenas a média de cada sinal para referência.

No caso dos parâmetros psicoacústicos, o valor utilizado no modelamento é aquele com maior valor entre as duas orelhas, para cada um dos estímulos. Nesses casos, também foi considerada uma regressão quadrática com a adição da diferença percentual entre as duas orelhas, tomando-se como referência o maior valor.

Os modelos de redes neurais foram desenvolvidos utilizando o programa STATISTICA, e seus gráficos por parâmetros contêm muitas linhas propositalmente, já que o objetivo não é avaliar cada modelo

individualmente, mas sim a tendência de um conjunto de modelos para um mesmo parâmetro.

Em todos os resultados de redes neurais também foram informados em forma de tabela:

- o tipo de modelo, seja ele Linear ou *perceptron* multicamadas (PMC);
- o desempenho da rede, ou seja, sua capacidade de aprendizado;
- o erro relativo do teste (equivalente à soma do quadrados dos erros, variando de 0 a 1);
- a quantidade de neurônios presentes em cada uma das camadas ocultas (CO);
- a sensibilidade de cada um dos fatores no resultado do modelo final, ou seja, a soma dos quadrados dos resíduos quando se faz um modelo reduzido sem o fator analisado.

7.2.1 Audibilidade

A audibilidade (N), já foi explicada na Subseção 2.3.3.1, e está relacionada com a percepção de magnitude do som. No modelo de regressão cúbica, chegou-se à equação:

$$C_G = 9,4376 - 0,5837N + 0,0121N^2 - 0,000087N^3, \quad (7.3)$$

com o termo N dado em sone.

Com a Equação (7.3), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.16, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

Pelas médias, a tendência parece ser próxima da linear, decrescente, mostrando que, com o acréscimo da audibilidade, há um aumento no desconforto.

Considerando também a diferença percentual de audibilidade entre as duas orelhas (ΔN), chega-se à equação quadrática:

$$C_G = -0,9164 - 0,1115N + 0,00085N^2 + 69,669\Delta N - 306,78\Delta N^2. \quad (7.4)$$

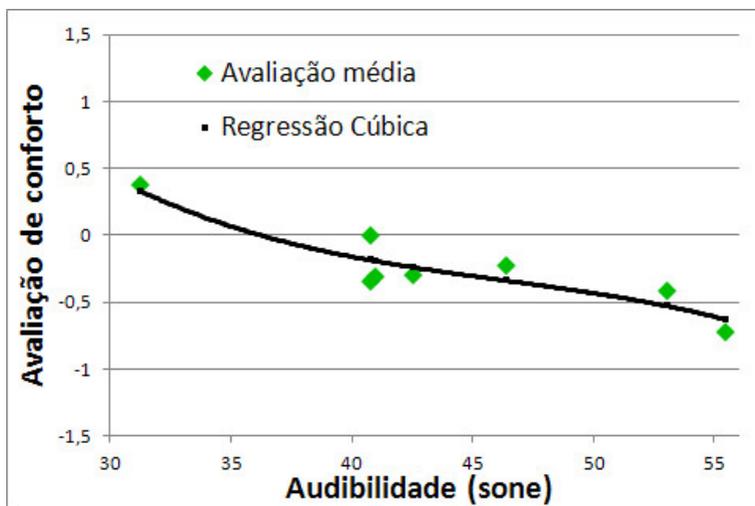


Figura 7.16.: Regressão cúbica do modelo de audibilidade para o item Conforto no ensaio final.

Na Tabela 7.3 vê-se, para cada estímulo, os dados de audibilidade, a avaliação média de conforto geral e os valores resultantes das Equações (7.3) e (7.4).

Tabela 7.3.: Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para audibilidade.

Estímulo	Audib. (sone)	Dif. entre orelhas	Conforto médio	Regr. cúbica	Regr. quadr.
C2F	31,3	9,9%	0,38	0,33	0,32
C2T	40,8	10,3%	-0,36	-0,19	-0,13
C2C	40,8	11,3%	0,00	-0,19	-0,09
C2I	41,0	8,5%	-0,31	-0,19	-0,34
C2M	42,6	10,1%	-0,31	-0,24	-0,21
C1T	46,4	9,9%	-0,23	-0,34	-0,37
C1M	53,1	9,8%	-0,42	-0,53	-0,56
C1F	55,5	9,7%	-0,73	-0,63	-0,61
Erro médio absoluto em relação ao Conforto:				0,11	0,11

A consideração em relação à diferença de audibilidade não causou tanto impacto no resultado final, como se esperava.

Fizeram-se então modelos de redes neurais artificiais considerando os dois parâmetros juntos: audibilidade e diferença de audibilidade. Dentre os mais de 100 gerados, foram escolhidos aqueles com menor erro. As propriedades de cada um dos modelos estão na Tabela 7.4.

Tabela 7.4.: Dados das redes neurais desenvolvidas para audibilidade (N) e diferença de audibilidade (ΔN).

Mod.	Tipo	Desemp. da rede	Erro do teste	Neurônios		Sensibilidade	
				CO 1	CO 2	N	ΔN
1	Linear	0,934	0,239	0	0	1,055	1,002
2	Linear	0,933	0,239	0	0	1,059	
3	PMC	0,944	0,242	1	0	1,070	
4	PMC	0,937	0,240	2	0	1,066	
5	PMC	0,942	0,241	3	0	1,068	
6	PMC	0,939	0,241	9	6	1,070	
7	PMC	0,943	0,242	5	5	1,070	
8	PMC	0,931	0,238	9	7	1,067	
9	PMC	0,941	0,241	6	4	1,072	
10	PMC	0,940	0,241	4	0	1,073	

Os erros dos testes foram altos (variando de 0,238 a 0,242), apesar do bom desempenho da rede (sempre acima de 0,933), o que já mostra a dificuldade para o desenvolvimento de modelos de conforto.

Em relação apenas à audibilidade (Figura 7.17), pode-se notar que todos os 10 modelos obtiveram tendência similar e, mesmo com alguma curvatura, acaba sendo muito próxima à linear, com o conforto decrescendo em relação à audibilidade, o que inclusive corrobora com os modelos desenvolvidos pelas regressões cúbica e quadrática.

Considerando a diferença de audibilidade (Figura 7.18), apenas o Modelo 1 a levou em consideração, sendo o conforto linearmente crescente em relação ao aumento do parâmetro.

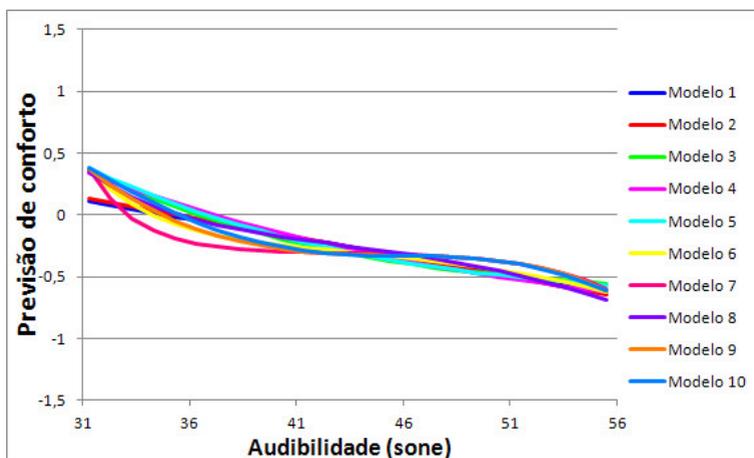


Figura 7.17.: Influência da audibilidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.

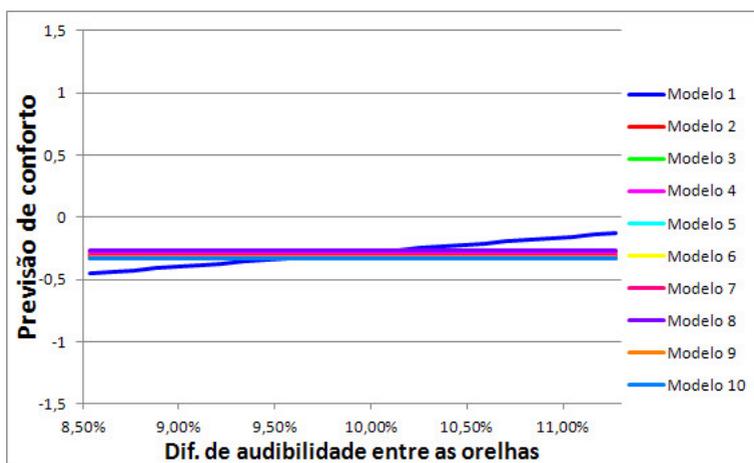


Figura 7.18.: Influência da diferença de audibilidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.

Verifica-se então a influência forte da audibilidade no conforto, em detrimento da diferença da mesma entre orelhas, que não obteve resultados relevantes.

7.2.2 Agudeza

A agudeza (S) já foi explicada na Subseção 2.3.3.2, e está relacionada com a percepção de frequência do som. No modelo de regressão cúbica, chegou-se à equação:

$$C_G = -22,5108 + 6,0175S + 15,7690S^2 - 6,7859S^3, \quad (7.5)$$

com o termo S sendo dado em acum.

Com a Equação (7.5), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.19, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

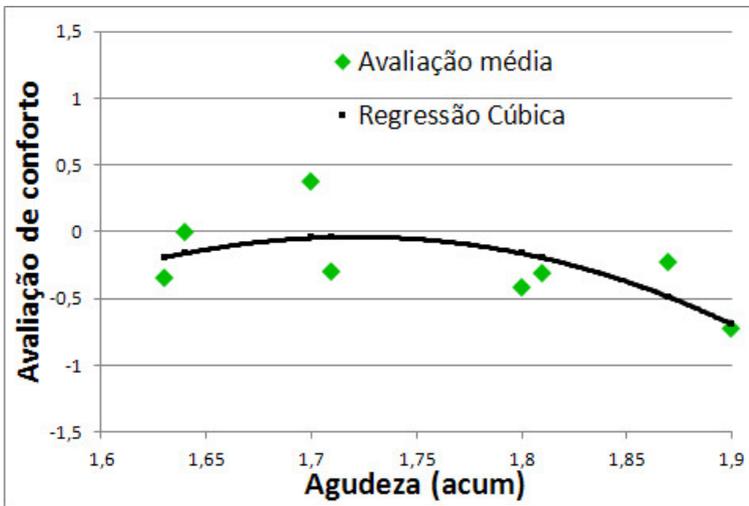


Figura 7.19.: Regressão cúbica do modelo de agudeza para o item Conforto no ensaio final.

Mesmo sendo uma regressão cúbica, a curva ficou mais próxima de uma parábola, ou seja, o termo de S^3 acabou por não ter tanta influência na região destacada. Ao final, vê-se uma tendência decrescente do conforto com o aumento da agudeza.

Considerando também a diferença percentual de agudeza entre as duas orelhas (ΔS), chega-se à equação quadrática:

$$C_G = -69,0715 + 78,7971S - 22,6733S^2 + 1,8803\Delta S + 162,428\Delta S^2. \quad (7.6)$$

Na Tabela 7.5 vê-se, para cada estímulo, os dados de agudeza, a avaliação média de conforto geral e os valores resultantes das Equações (7.5) e (7.6).

Tabela 7.5.: Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para agudeza.

Estímulo	Agud. (acum)	Dif. entre orelhas	Conforto médio	Regr. cúbica	Regr. quadr.
C2T	1,63	4,9%	-0,36	-0,19	-0,39
C2C	1,64	5,5%	0,00	-0,16	-0,23
C2F	1,70	7,1%	0,38	-0,05	0,30
C2M	1,71	5,8%	-0,31	-0,04	0,04
C1M	1,80	3,9%	-0,42	-0,16	-0,38
C2I	1,81	5,5%	-0,31	-0,20	-0,13
C1T	1,87	5,3%	-0,23	-0,49	-0,44
C1F	1,90	4,7%	-0,73	-0,70	-0,75
Erro médio absoluto em relação ao Conforto:				0,21	0,14

Se na audibilidade o uso da diferença entre as orelhas não minimizou os erros, na agudeza os erros diminuíram bastante. Além disso, os termos relativos à variação na diferença causaram um maior impacto no resultado final do ajuste do que o próprio termo absoluto do parâmetro.

Optou-se aqui também por fazer modelos de redes neurais artificiais considerando os dois parâmetros: agudeza e diferença de agudeza, cujos dados podem ser vistos na Tabela 7.6. Nota-se que os erros do teste, variando de 0,226 a 0,237, foram menores que todos os modelos de redes neurais para audibilidade, apesar do desempenho ter ficado em média um pouco abaixo.

Tabela 7.6.: Dados das redes neurais desenvolvidas para agudeza (S) e diferença de agudeza (ΔS).

Mod.	Tipo	Desemp. da rede	Erro do teste	Neurônios		Sensibilidade	
				CO 1	CO 2	S	ΔS
1	Linear	0,929	0,232	0	0		1,049
2	Linear	0,949	0,237	0	0	1,008	1,031
3	PMC	0,915	0,229	2	0		1,059
4	PMC	0,917	0,229	8	4		1,059
5	PMC	0,902	0,226	9	6		1,077
6	PMC	0,920	0,230	9	2	1,060	1,064
7	PMC	0,918	0,230	9	3	1,065	1,080
8	PMC	0,915	0,229	9	4	1,078	1,085
9	PMC	0,918	0,230	9	5	1,051	1,087
10	PMC	0,915	0,229	9	7	1,048	1,087

Em relação à agudeza (Figura 7.20), pode-se notar que esse parâmetro teve influência somente em alguns casos (Modelo 2, e modelos 6 a 10), com tendência decrescente em todos.

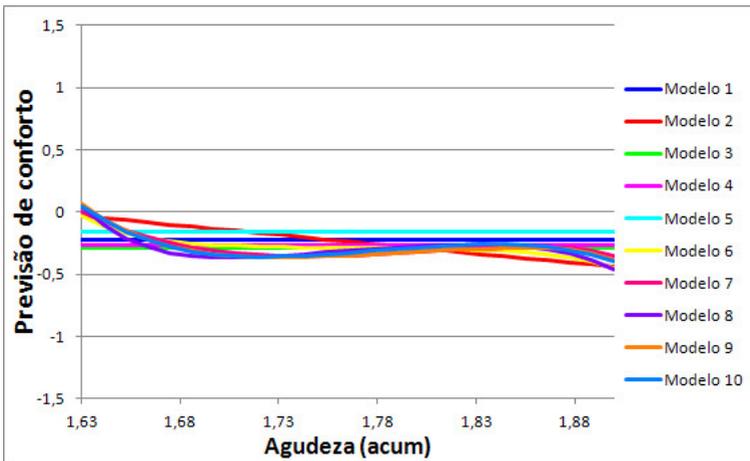


Figura 7.20.: Influência da agudeza para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.

Levando-se em conta a diferença de agudeza (Figura 7.21), a variação entre os modelos foi muito maior, e com influência em todos os casos. Todavia, na maioria dos modelos (mesmo com o comportamento anômalo do Modelo 5), é possível notar que houve um aumento do conforto com a diferença de agudeza entre as orelhas.

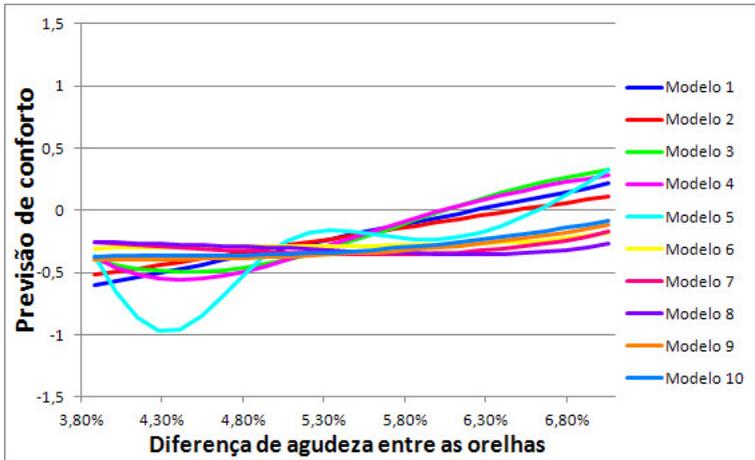


Figura 7.21.: Influência da diferença de agudeza para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.

Assim, percebeu-se que o parâmetro de diferença de agudeza possui mais relevância que a própria agudeza em si, quando analisados em conjunto.

7.2.3 Flutuações lentas

As flutuações lentas (F) já foram explicadas na Subseção 2.3.3.3, e estão relacionadas com a percepção de modulação do som. No modelo de regressão cúbica, chegou-se à equação:

$$C_G = 38,599 - 4996F + 159655F^2 + 8219F^3, \quad (7.7)$$

com o termo F sendo dado em vacil.

Com a Equação (7.7), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.22, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

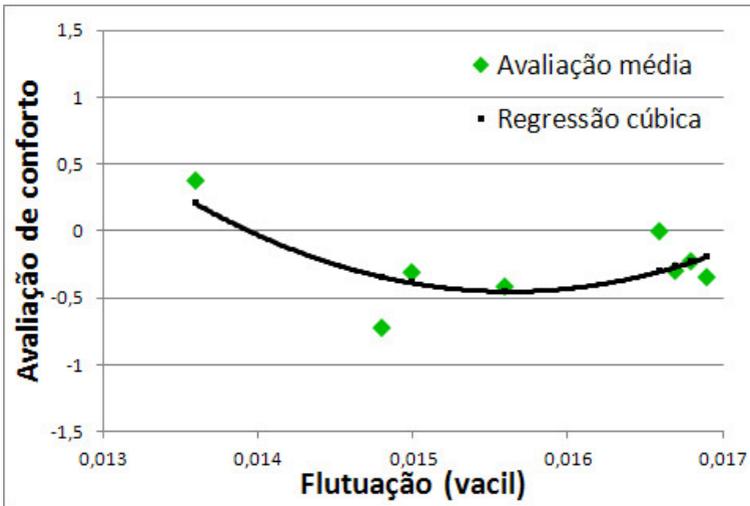


Figura 7.22.: Regressão cúbica do modelo de flutuações lentas para o item Conforto no ensaio final.

Da mesma forma que ocorreu na agudeza, a curva ficou mais próxima de uma parábola, ou seja, o termo de F^3 acabou por não ter tanta influência na região destacada. Entretanto, nesse caso a concavidade ficou voltada para cima, mostrando uma tendência decrescente do conforto no início e crescente ao final, relativo ao acréscimo das flutuações.

Considerando também a diferença percentual das flutuações entre as duas orelhas (ΔF), chega-se à equação quadrática:

$$C_G = 31,122 - 4225,4F + 132805F^2 + 40,3621\Delta F - 187,15\Delta F^2. \quad (7.8)$$

Na Tabela 7.7 vê-se, para cada estímulo, os dados de flutuações lentas, a avaliação média de conforto geral e os valores resultantes das Equações (7.7) e (7.8).

O acréscimo do termo da diferença de flutuações não só minimizou os erros como causou uma boa influência no resultado final da previsão de conforto, sendo dentro da equação equiparável ao próprio termo absoluto de flutuações.

Tabela 7.7.: Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para flutuações lentas.

Estímulo	Flut. (vacil)	Dif. entre orelhas	Conforto médio	Regr. cúbica	Regr. quadr.
C2F	0,0136	8,1%	0,38	0,20	0,26
C1F	0,0148	5,4%	-0,73	-0,34	-0,69
C2I	0,0150	10,0%	-0,31	-0,39	-0,21
C1M	0,0156	10,3%	-0,42	-0,45	-0,30
C2C	0,0166	11,4%	0,00	-0,30	-0,26
C2M	0,0167	12,6%	-0,31	-0,27	-0,29
C1T	0,0168	8,3%	-0,23	-0,23	-0,32
C2T	0,0169	10,7%	-0,36	-0,20	-0,18
Erro médio absoluto em relação ao Conforto:				0,15	0,11

Fez-se então um modelo de redes neurais considerando os dois fatores, flutuações lentas e sua diferença entre as orelhas, cujos dados podem ser vistos na Tabela 7.8. Apesar do alto desempenho de rede, os erros foram maiores que os modelos anteriores.

Tabela 7.8.: Dados das redes neurais desenvolvidas para flutuações lentas (F) e diferença de flutuações (ΔF).

Mod.	Tipo	Desemp. da rede	Erro do teste	Neurônios		Sensibilidade	
				CO 1	CO 2	F	ΔF
1	Linear	0,991	0,274	0	0	1,006	
2	Linear	0,979	0,270	0	0	1,028	1,021
3	PMC	0,950	0,262	1	0	1,053	
4	PMC	0,941	0,261	2	0	1,074	
5	PMC	0,946	0,262	5	0	1,082	
6	PMC	0,938	0,259	5	5		1,119
7	PMC	0,939	0,260	9	3	1,098	1,021
8	PMC	0,935	0,258	9	2		1,117
9	PMC	0,937	0,259	9	3	1,079	1,016
10	PMC	0,936	0,259	9	4	1,080	1,016

Para o parâmetro absoluto (Figura 7.23), pode-se notar que, em boa parte dos casos, a tendência é parabólica e, assim como nas regressões, tendo a concavidade voltada para cima, com exceção dos modelos mais baixos (1 e 2), cuja tendência foi linear decrescente, e dos modelos 6 e 8, para os quais não houve influência desse parâmetro na avaliação de conforto geral.

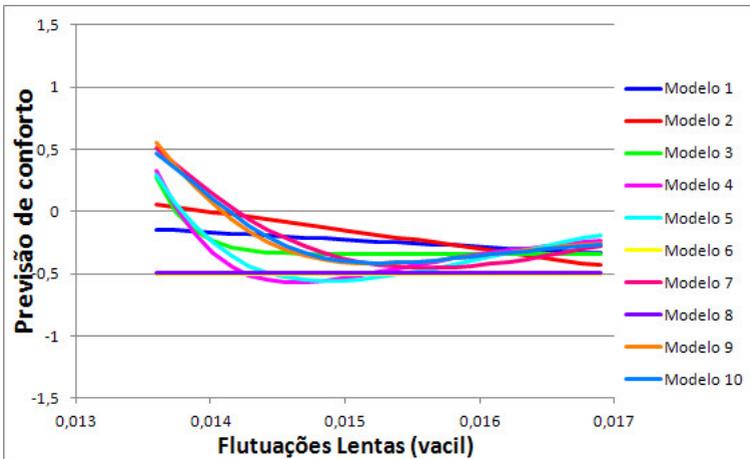


Figura 7.23.: Influência das flutuações lentas para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.

Levando-se em conta a diferença entre as orelhas (Figura 7.24), em 2 modelos (6 e 8) houve uma dificuldade muito grande de adequação devido à distribuição, com os valores ultrapassando o máximo da escala para diferenças em torno de 7%. Esses modelos são os únicos que não tiveram influência alguma do termo absoluto de flutuações lentas, enquanto que os outros as consideraram linearmente e diretamente proporcionais ao conforto.

Pelos modelos desenvolvidos, pode-se verificar que, quando analisadas em conjunto, tanto a flutuação quanto a sua diferença entre as orelhas têm potencial para exercer impacto relevante na avaliação de conforto.

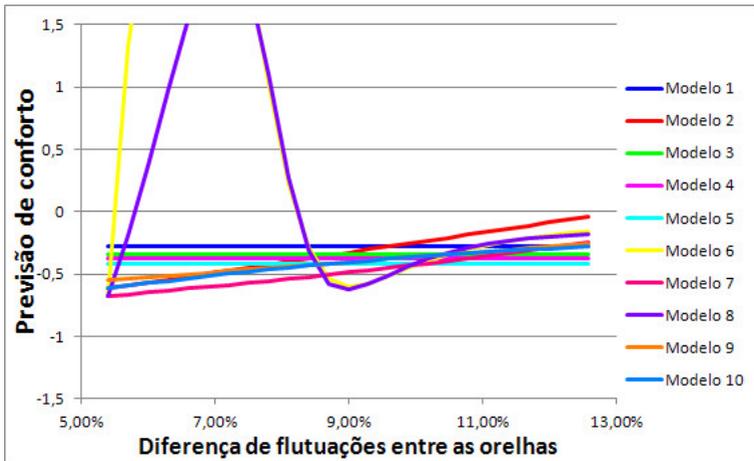


Figura 7.24.: Influência da diferença de flutuações para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.

7.2.4 Tonalidade

A tonalidade (T) já foi explicada na Subseção 2.3.3.4, e está relacionada com a percepção de tons puros em um som. No modelo de regressão cúbica, chegou-se à equação:

$$C_G = -2,0550 + 117,326T - 2109,0T^2 + 9335T^3, \quad (7.9)$$

com o termo T sendo dado em tu.

Com a Equação (7.9), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.25, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

A concentração de muitos termos no início e um valor de tonalidade discrepante isolado levaram a uma equação com resultados distorcidos e fora da área de avaliação para valores entre 0,08 e 0,14 tu. A tendência natural nesse caso seria excluir o ponto de maior tonalidade e refazer o modelo, porém a sua validade ainda seria questionável devido aos baixos valores de tonalidade envolvidos e concentrados.

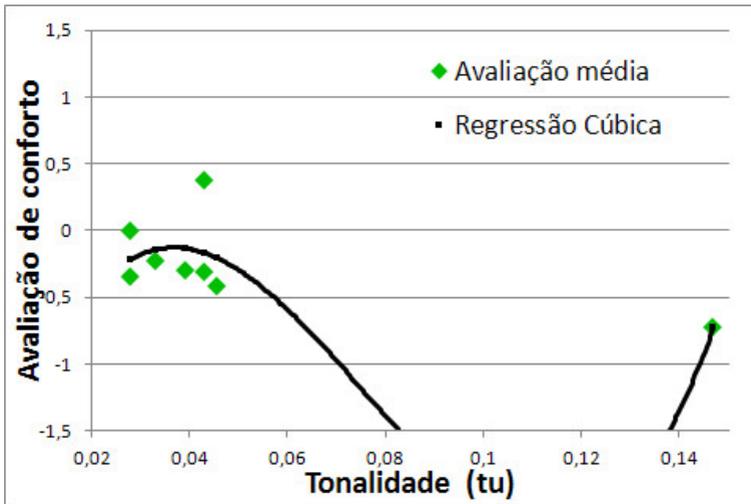


Figura 7.25.: Regressão cúbica do modelo de tonalidade para o item Conforto no ensaio final.

Assim, foi mantido o gráfico apresentado porque nele nota-se que, mesmo sem poder realizar-se um ajuste desejável da curva em função da tonalidade, o único estímulo que a possui de maneira mais proeminente é justamente aquele considerado o mais desconfortável.

Considerando também a diferença percentual da tonalidade entre as duas orelhas (ΔT), chega-se à equação quadrática:

$$C_G = -0,3699 + 1,1456T - 31,4799T^2 + 2,0619\Delta T - 3,6272\Delta T^2 . \quad (7.10)$$

Na Tabela 7.9 vê-se, para cada estímulo, os dados de tonalidade, a avaliação média de conforto geral e os valores resultantes das Equações (7.9) e (7.10).

Nesse parâmetro, o acréscimo do termo de diferença não diminuiu consideravelmente os erros, e na própria equação também não houve um impacto muito grande no resultado final em relação ao termo absoluto.

Tabela 7.9.: Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para tonalidade.

Estímulo	Tonal. (tu)	Dif. entre orelhas	Conforto médio	Regr. cúbica	Regr. quadr.
C2C	0,0281	6,8%	0,00	-0,22	-0,24
C2T	0,0281	14,9%	-0,36	-0,22	-0,14
C1T	0,0331	9,1%	-0,23	-0,14	-0,21
C2M	0,0393	9,4%	-0,31	-0,13	-0,21
C2F	0,0433	17,6%	0,38	-0,17	-0,13
C2I	0,0433	21,0%	-0,31	-0,17	-0,11
C1M	0,0459	8,7%	-0,42	-0,21	-0,23
C1F	0,1470	8,8%	-0,73	-0,73	-0,73
Erro médio absoluto em relação ao Conforto:				0,19	0,18

Aplicou-se à tonalidade e à sua diferença entre as orelhas também o método das redes neurais, cujos dados podem ser vistos na Tabela 7.10. Nota-se que cada um dos parâmetros não foi considerado em apenas dois modelos.

Tabela 7.10.: Dados das redes neurais desenvolvidas para tonalidade (T) e diferença de tonalidade (ΔT).

Mod.	Tipo	Desemp. da rede	Erro do teste	Neurônios		Sensibilidade	
				CO 1	CO 2	T	ΔT
1	Linear	0,973	0,264	0	0	1,026	
2	PMC	0,972	0,264	1	0	1,026	
3	Linear	0,971	0,263	0	0	1,023	1,003
4	PMC	0,945	0,256	4	0		1,209
5	PMC	0,950	0,259	6	5		1,140
6	PMC	0,932	0,252	3	0	1,306	1,147
7	PMC	0,937	0,253	9	6	1,396	1,572
8	PMC	0,940	0,254	9	3	1,129	1,089
9	PMC	0,937	0,254	8	0	1,264	1,157
10	PMC	0,936	0,253	9	7	1,136	1,067

No primeiro (Figura 7.26), houve uma grande dispersão entre os modelos, sem que seja possível estabelecer uma tendência definida.

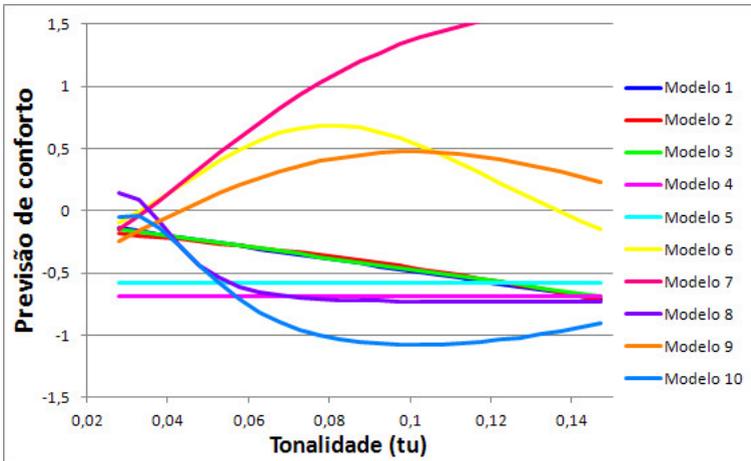


Figura 7.26.: Influência da tonalidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.

Verificando a diferença de tonalidade (Figura 7.27), também houve uma disparidade entre modelos, porém a maioria com valores finais mais altos que os iniciais.

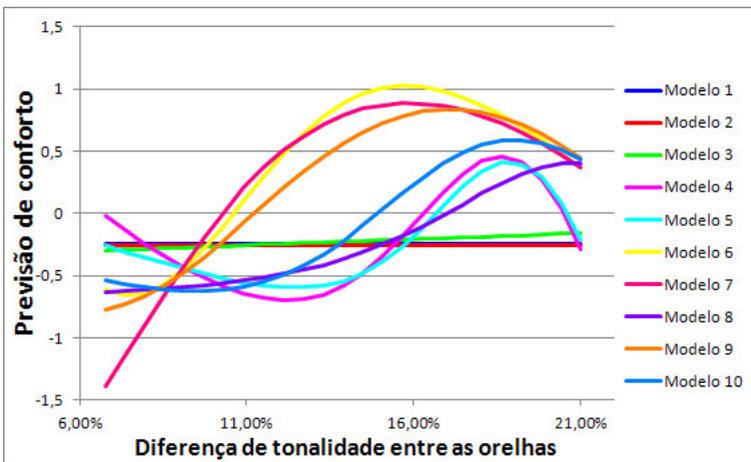


Figura 7.27.: Influência da diferença de tonalidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.

A grande discrepância entre os modelos mostrou a dificuldade de caracterizar essa propriedade. Isso se deve principalmente porque apenas em um caso tem-se um valor de tonalidade mais proeminente, com os outros permanecendo próximos e de baixo valor.

De qualquer forma, por mais que, devido às propriedades dos sons coletados impedirem a confecção de um modelo de tonalidade, o fato de o som mais tonal ser justamente aquele considerado mais desconfortável sugere que essa propriedade pode sim influenciar no conforto.

7.2.5 Acelerações ponderadas

Os conceitos de aceleração ponderada em relação aos eixos frontal (A_x), lateral (A_y) e vertical (A_z), além da resultante (A), foram apresentados na Subseção 2.3.3.5.

Aqui serão abordados e estudados apenas os modelos para cada uma das direções de maneira independente, além do modelo relativo à aceleração ponderada resultante.

No modelo de regressão cúbica, chegou-se à equação para a direção frontal:

$$C_G = -0,0185 - 0,3526A_x + 0,0069A_x^2 - 0,000034A_x^3, \quad (7.11)$$

com o termo A_x sendo dado em dB (com referência de 10^{-6} m/s²).

Com a Equação (7.11), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.28, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

Percebe-se um ajuste parabólico quase linear, porém com os valores bastante dispersos em relação à linha de regressão.

Para a direção lateral, a equação cúbica ficou na forma:

$$C_G = -0,0226 - 0,6253A_y + 0,0135A_y^2 - 0,000072A_y^3, \quad (7.12)$$

com o termo A_y sendo dado em dB (com referência de 10^{-6} m/s²).

Com a Equação (7.12), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.29, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

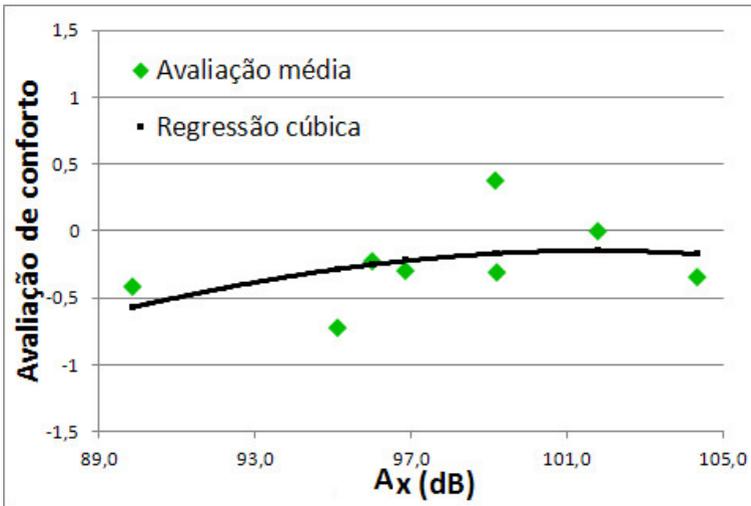


Figura 7.28.: Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada frontal para o item Conforto no ensaio final.

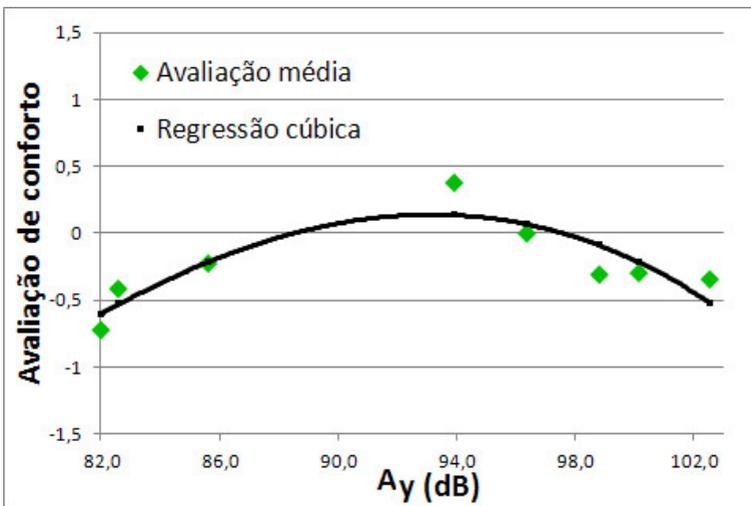


Figura 7.29.: Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada lateral para o item Conforto no ensaio final.

Nesse caso, a tendência foi também parábólica, mas com os dados mais próximos da curva simulada em relação ao que havia ocorrido com o eixo frontal.

Para a direção vertical, a equação cúbica ficou na forma:

$$C_G = -0,0302 - 0,8003A_z + 0,0166A_z^2 - 0,000086A_z^3, \quad (7.13)$$

com o termo A_z sendo dado em dB (com referência de 10^{-6} m/s²).

Com a Equação (7.13), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.30, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

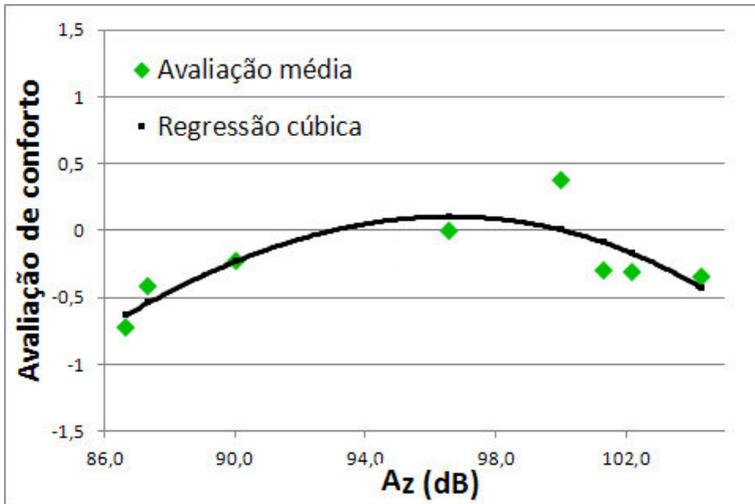


Figura 7.30.: Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada vertical para o item Conforto no ensaio final.

Assim como ocorreu com o eixo lateral, houve um ajuste parabólico e erros minimizados.

Por fim, tem-se o ajuste com a aceleração resultante ponderada, cuja equação cúbica ficou na forma:

$$C_G = -0,0269 - 0,6453A + 0,0140A^2 - 0,000076A^3, \quad (7.14)$$

com o termo A sendo dado em dB (com referência de 10^{-6} m/s²).

Com a Equação (7.14), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.31, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

Como era esperado pelos resultados por eixo, o ajuste relativo à aceleração resultante também chegou a uma forma parabólica, com tendência decrescente no final.

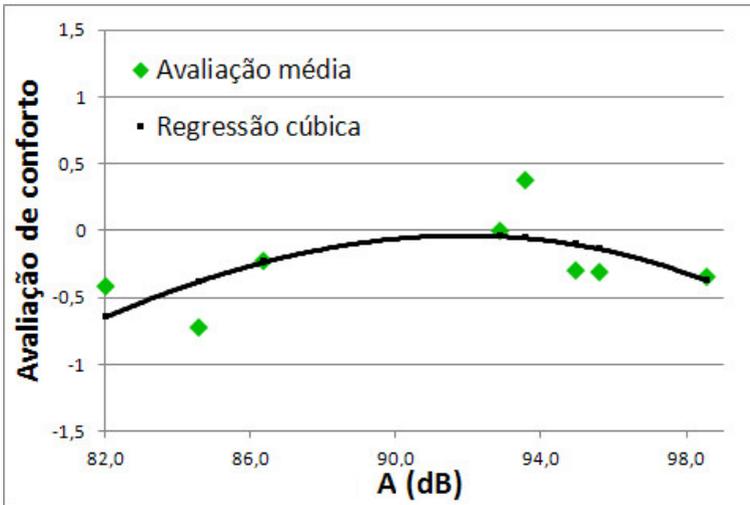


Figura 7.31.: Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada resultante para o item Conforto no ensaio final.

Na Tabela 7.11 vê-se, para cada estímulo, os dados de aceleração ponderada nos três eixos e resultante, o conforto médio e os valores resultantes das Equações (7.11), (7.12), (7.13) e (7.14).

As melhores adequações individuais ocorreram nas direções y e z . Como foram 2 eixos com resultado favorável, optou-se por dar continuidade nas análises utilizando apenas a resultante, apesar do seu erro ter sido um pouco maior, já que, como se trata de vibração e pelo acoplamento, a aceleração em cada um dos eixos pode ter formato e propriedades similares e gerar uma compensação enganosa no modelo final.

A tendência parabólica das curvas com concavidade para baixo indica que, para valores mais altos de aceleração, um acréscimo da mesma pode começar a influenciar na percepção de conforto geral, tornando a avaliação do estímulo mais próxima do “desconfortável”.

Tabela 7.11.: Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para acelerações ponderadas.

Est.	A_x (dB)	A_y (dB)	A_z (dB)	A (dB)	Conf. méd.	Reg. x	Reg. y	Reg. z	Reg. tot.
C1M	90	83	87	82	-0,42	-0,57	-0,53	-0,54	-0,64
C1F	95	82	87	85	-0,73	-0,29	-0,61	-0,63	-0,38
C1T	96	86	90	86	-0,23	-0,25	-0,21	-0,23	-0,24
C2C	102	96	97	93	0,00	-0,15	0,07	0,10	-0,05
C2F	99	94	100	94	0,38	-0,17	0,13	0,00	-0,06
C2M	97	100	101	95	-0,31	-0,22	-0,22	-0,09	-0,11
C2I	99	99	102	96	-0,31	-0,17	-0,09	-0,17	-0,14
C2T	104	103	104	99	-0,36	-0,17	-0,52	-0,43	-0,38
Erro médio absoluto relativo ao Conforto:						0,21	0,13	0,14	0,18

Nesse caso, por verificar que houve boa adequação, optou-se por fazer um modelo de redes neurais considerando apenas o parâmetro A , como se pode ver na Figura 7.32.

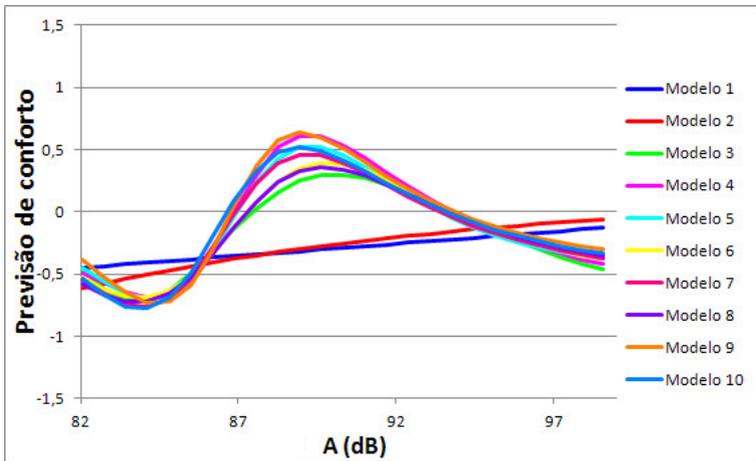


Figura 7.32.: Influência da aceleração ponderada resultante para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais no ensaio final.

Os dados dessa rede neural de aceleração ponderada resultante podem ser vistos na Tabela 7.12.

Tabela 7.12.: Dados das redes neurais desenvolvidas para aceleração ponderada resultante (A).

Mod.	Tipo	Desemp. da rede	Erro do teste	Neurônios		Sensibilidade A
				CO 1	CO 2	
1	Linear	0,997	0,274	0	0	1,012
2	PMC	0,999	0,275	1	0	1,013
3	PMC	0,939	0,258	2	0	1,274
4	PMC	0,939	0,258	4	2	1,434
5	PMC	0,941	0,259	6	4	1,370
6	PMC	0,943	0,259	8	8	1,328
7	PMC	0,945	0,260	8	3	1,321
8	PMC	0,947	0,260	8	5	1,293
9	PMC	0,942	0,259	8	3	1,405
10	PMC	0,949	0,261	8	4	1,334

Com exceção dos 2 primeiros modelos, com resposta linear crescente, todos os outros chegaram a uma mesma tendência verificada na regressão cúbica: a de que a partir de aproximadamente 89 dB a vibração começa a influenciar na avaliação, causando um maior desconforto para a maioria dos avaliadores.

Quando o foco é somente na vibração, como se pode ver no Apêndice B, percebeu-se, pelas figuras B.11, B.12, B.13 e B.14, que há uma proporção linear em relação a todos os parâmetros de aceleração, mostrando um aumento do desconforto relativo à vibração com o acréscimo da magnitude.

7.2.6 Frequências centrais de vibração

Os conceitos de frequência central em relação aos eixos frontal (Φ_x), lateral (Φ_y) e vertical (Φ_z) foram apresentados na Subseção 2.3.3.6.

No modelo de regressão cúbica, chegou-se à equação para a direção frontal (com o termo Φ_x sendo dado em Hz):

$$C_G = -14,3807 + 1,6847\Phi_x - 0,0650\Phi_x^2 + 0,00081\Phi_x^3. \quad (7.15)$$

Com a Equação (7.15), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.33, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

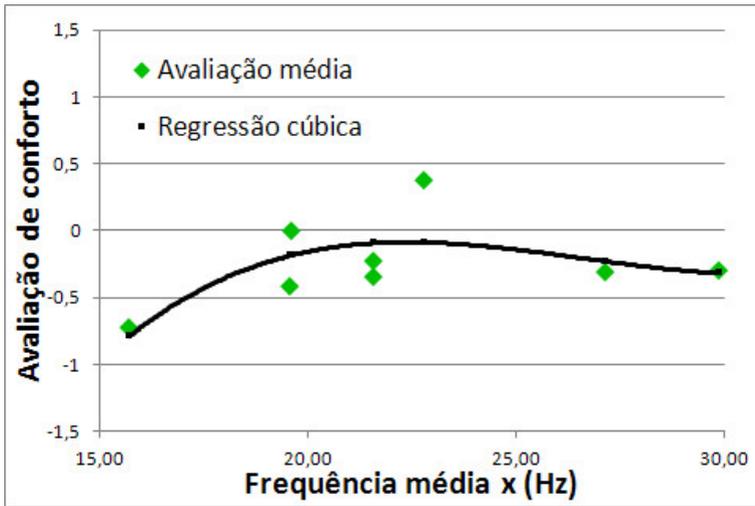


Figura 7.33.: Regressão cúbica do modelo de Frequência central na direção frontal para o item Conforto no ensaio final.

Percebe-se uma relação estabilizada desse parâmetro no que diz respeito ao conforto, mas com bastante dispersão dos pontos em relação à curva de regressão. O valor mais baixo inicial pode indicar uma tendência de que frequências mais baixas causam mais desconforto.

Já a regressão, para o eixo lateral, fica da forma (com o termo Φ_y sendo dado em Hz):

$$C_G = -13,1991 + 1,3569\Phi_y - 0,0453\Phi_y^2 + 0,00049\Phi_y^3. \quad (7.16)$$

Com a Equação (7.16), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.34, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

A cúbica é menos suave que na direção frontal, com o valor mais baixo ainda sendo o mais desconfortável, e os mais altos não apresentando relação direta clara com o conforto.

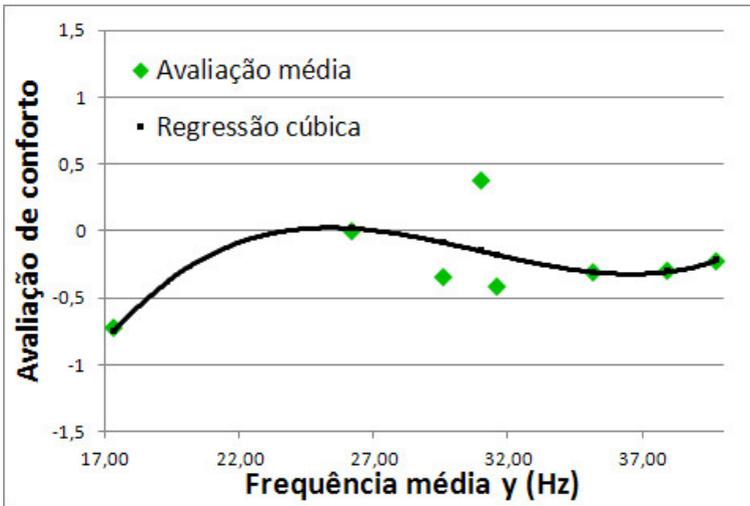


Figura 7.34.: Regressão cúbica do modelo de Frequência central na direção lateral para o item Conforto no ensaio final.

Por fim, a regressão, para o eixo vertical, fica da forma:

$$C_G = -0,0286 - 0,2589\Phi_z + 0,0169\Phi_z^2 - 0,00027\Phi_z^3, \quad (7.17)$$

com o termo Φ_z sendo dado em Hz.

Com a Equação (7.17), chega-se ao resultado mostrado na Figura 7.35, na qual tem-se nos pontos de referência a avaliação média de cada estímulo resultante do ensaio.

Nesse caso, os valores de Φ_z concentraram-se mais entre 33 e 38 Hz, porém um valor mais baixo isolado (estímulo C1F) acabou por tornar a curva com tendência mais parabólica. Esse estímulo foi considerado o mais desconfortável de todos, o que reforçaria a ideia de que frequências mais baixas podem ser mais desconfortáveis.

Porém, como já foi especificado na Seção 7.2.4, outros fatores, como a tonalidade, podem ter sido mais decisivos para esse resultado específico. O modelo poderia ter sido refeito sem a presença da avaliação mais desconfortável. Entretanto, pela diferença máxima entre os valores restantes ser pequena (menos de 4 Hz), o resultado não seria aplicável.

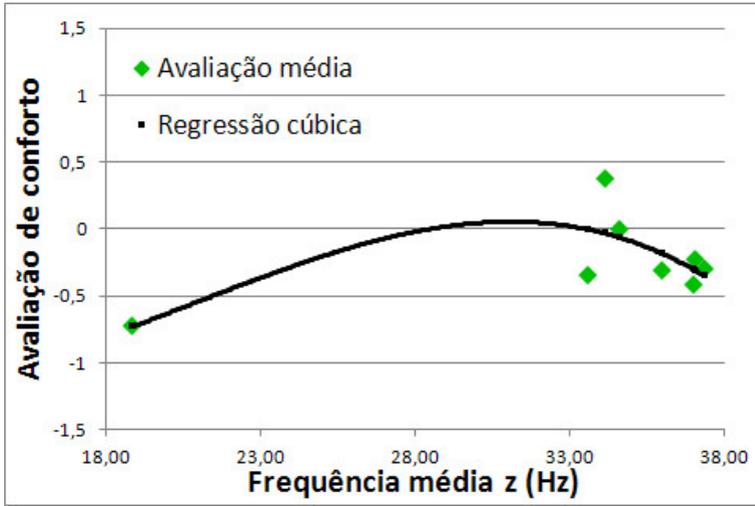


Figura 7.35.: Regressão cúbica do modelo de Frequência central na direção vertical para o item Conforto no ensaio final.

Na Tabela 7.13 vê-se, para cada estímulo, os dados de Frequência central nos três eixos, o conforto médio e os valores resultantes das Equações (7.15), (7.16) e (7.17).

Tabela 7.13.: Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para Frequências centrais.

Estímulo	Φ_x (Hz)	Φ_y (Hz)	Φ_z (Hz)	Conf. méd.	Reg. x	Reg. y	Reg. z
C1F	15,71	17,36	18,88	-0,57	0,06	0,02	0,00
C1M	19,58	31,65	37,04	-0,28	0,24	0,24	0,12
C2T	21,59	29,65	33,62	0,00	0,26	0,27	0,35
C2I	27,19	35,22	36,02	-0,15	0,08	0,01	0,13
C2M	29,92	37,99	37,41	-0,44	0,01	0,00	0,05
C1T	21,59	39,80	37,08	-0,31	0,14	0,01	0,08
C2C	19,62	26,20	34,66	-0,29	0,18	0,02	0,06
C2F	22,82	31,06	34,20	0,05	0,46	0,53	0,41
Erro médio absoluto em relação ao Conforto:					0,18	0,14	0,15

A tendência esperada, e a princípio verificada em relação ao conforto, de que frequências mais baixas são mais desconfortáveis, não se confirmou quando se voltou a análise somente à vibração (ver Apêndice B, figuras B.15, B.16 e B.17). Assim, para os dados mostrados nesta Tese, não se verificou influência direta da variação de frequência de vibração na avaliação de conforto geral.

7.2.7 Modelos com propriedades sonoras

Optou-se, aqui, por fazer inicialmente um modelo de regressão quadrática apenas com os parâmetros absolutos: audibilidade (N), agudeza (S), flutuações lentas (F) e tonalidade (T). Chegou-se, assim, à equação:

$$C_G = 9,6882 - 0,2563N + 0,0026N^2 + 0,5736S + \dots \quad (7.18) \\ \dots + 0,0152S^2 - 537,8F + 16784F^2 - 19,439T + 76,72T^2 .$$

Na Tabela 7.14 vê-se, para cada estímulo, os dados dos parâmetros sonoros, o conforto médio e os valores resultantes da Equação (7.18).

Tabela 7.14.: Dados dos estímulos e resultados das regressões desenvolvidas para os parâmetros sonoros.

Estímulo	Audib. (sone)	Agud. (acum)	Flut. (vacil)	Tonal. (tu)	Conf. méd.	Reg.
C1F	55,5	1,64	0,0166	0,0281	-0,73	-0,73
C1M	53,1	1,70	0,0136	0,0433	-0,42	-0,42
C1T	46,4	1,81	0,0150	0,0433	-0,23	-0,24
C2C	40,8	1,71	0,0167	0,0393	0,00	-0,17
C2I	41,0	1,63	0,0169	0,0281	-0,31	-0,27
C2F	31,3	1,80	0,0156	0,0459	0,38	0,37
C2M	42,6	1,90	0,0148	0,1470	-0,31	-0,35
C2T	40,8	1,87	0,0168	0,0331	-0,36	-0,17
Erro médio absoluto em relação ao Conforto:						0,06

Esse modelo obteve um melhor ajuste do que os individualizados, com os componentes que causaram maior variação na regressão sendo a audibilidade e a agudeza.

Para a avaliação de conforto focada apenas do ruído, a equação de ajuste foi a seguinte:

$$C_R = 4,0019 - 0,0352N - 0,00011N^2 - 0,9435S + \dots \\ \dots + 0,0336S^2 - 60,186F + 315,63F^2 - 6,8561T + 31,273T^2 . \quad (7.19)$$

Esse ajuste levou ao resultado com os valores de cada sinal sendo exatamente igual à média de avaliação de ruído para cada um dos sinais para duas casas decimais. Nesse caso, os termos de audibilidade tiveram maior impacto do que os outros parâmetros.

O modelo de redes neurais foi aplicado também com os quatro parâmetros combinados, cujos dados estão na Tabela 7.15 e os gráficos nas figuras 7.36, 7.37, e 7.38 7.39, para audibilidade, agudeza, flutuações lentas e tonalidade, respectivamente.

Tabela 7.15.: Dados das redes neurais desenvolvidas para combinação de parâmetros psicoacústicos.

Mod.	Tipo	Desemp. da rede	Erro teste	Neur. CO 1-2	Sensibilidade			
					N	S	F	T
1	Linear	0,946	0,264	0 - 0	1,03	1,00	1,01	1,02
2	Linear	0,945	0,264	0 - 0	1,02		1,02	1,02
3	Linear	0,941	0,263	0 - 0	1,06			
4	Linear	0,941	0,263	0 - 0	1,06		1,00	
5	PMC	0,934	0,261	2 - 0		1,05	1,05	
6	PMC	0,933	0,261	5 - 0	1,05			1,01
7	PMC	0,928	0,259	7 - 0		1,06	1,06	
8	PMC	0,931	0,260	3 - 0	1,04	1,01	1,02	
9	PMC	0,930	0,260	12 - 2	1,06	1,01	1,01	
10	PMC	0,929	0,259	12 - 4	1,03	1,01	1,04	1,02

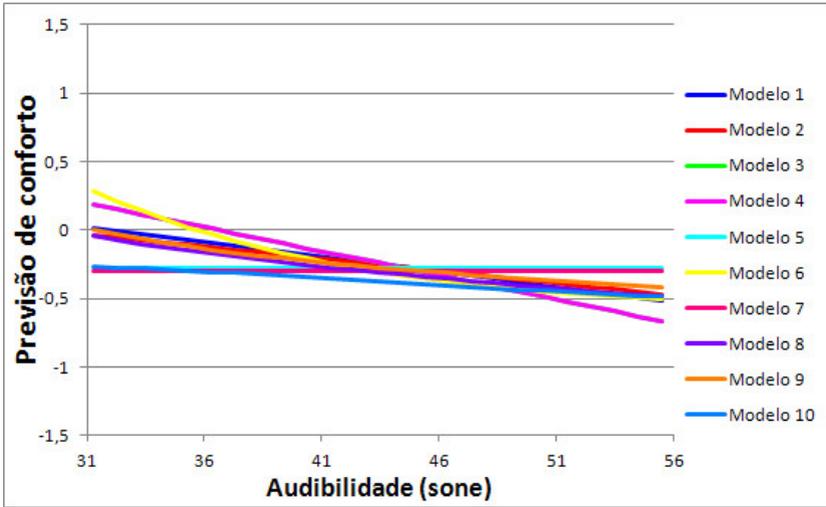


Figura 7.36.: Influência da audibilidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de parâmetros combinados de ruído no ensaio final.

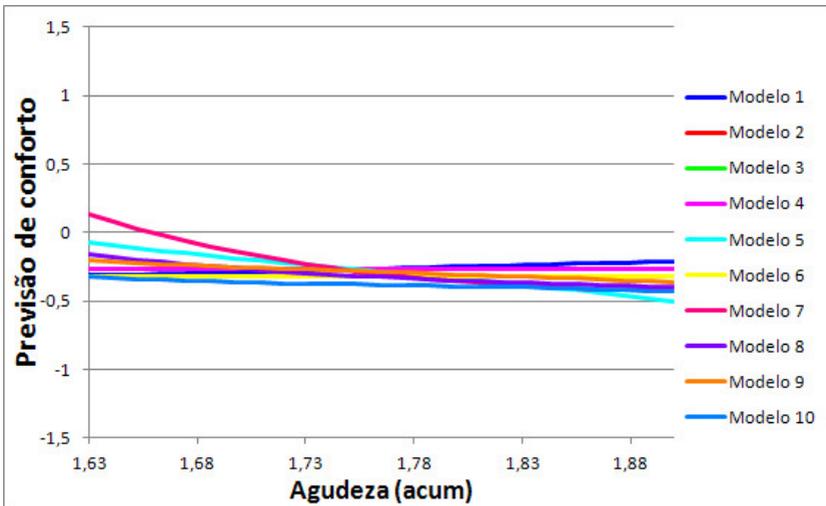


Figura 7.37.: Influência da agudeza para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de parâmetros combinados de ruído no ensaio final.

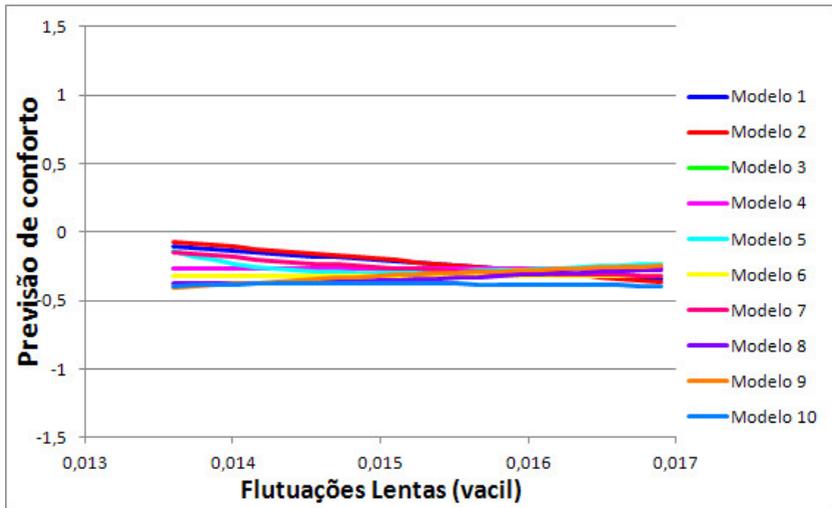


Figura 7.38.: Influência das flutuações lentas para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de parâmetros combinados de ruído no ensaio final.

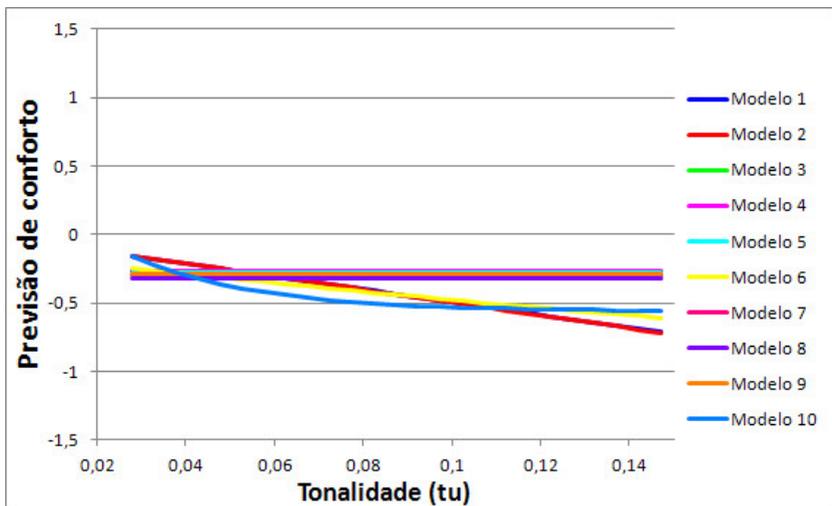


Figura 7.39.: Influência da tonalidade para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de parâmetros combinados de ruído no ensaio final.

Como se esperava, a audibilidade tem o maior peso na maioria dos modelos. Os outros três parâmetros alternam-se em importância, dependendo do modelo, apesar de a tonalidade só se fazer presente em 4 deles.

7.2.8 Modelos com propriedades de vibração

Foram utilizados, inicialmente, todos os termos relativos à vibração, com as acelerações ponderadas A_x , A_y , A_z e A , além das frequências centrais Φ_x , Φ_y e Φ_z . Obteve-se, assim, a equação de regressão quadrática:

$$\begin{aligned}
 C_G = & -0,000062 - 0,0036A_x - 0,0084A_x^2 - 0,0030A_y + \dots \\
 & \dots - 0,0047A_y^2 - 0,0033A_z - 0,0111A_z^2 - 0,0029A + \dots \\
 & \dots + 0,0267A^2 - 0,00090\Phi_x - 0,0092\Phi_x^2 - 0,00095\Phi_y + \dots \\
 & \dots - 0,0024\Phi_y^2 - 0,00037\Phi_z + 0,0082\Phi_z^2.
 \end{aligned} \tag{7.20}$$

Os termos que mais causaram variação no conforto foram os relativos à aceleração resultante A . Em seguida, os termos para A_z e logo das direções horizontais. Por fim, os termos de frequência causaram menor impacto no conforto. Por ter bastante termos, ao utilizar os valores de cada sinal, chegou-se a uma avaliação igual (com duas casas decimais) à média de conforto dos usuários.

Para prever a sensação de conforto relativa apenas à vibração, chegou-se à equação:

$$\begin{aligned}
 C_V = & 0,0010 + 0,0366A_x - 0,0036A_x^2 + 0,0328A_y + \dots \\
 & \dots - 0,0017A_y^2 + 0,0358A_z - 0,0038A_z^2 + 0,0338A + \dots \\
 & \dots + 0,00872A^2 + 0,0038\Phi_x - 0,0059\Phi_x^2 + 0,0073\Phi_y + \dots \\
 & \dots + 0,00024\Phi_y^2 + 0,0074\Phi_z + 0,0013\Phi_z^2.
 \end{aligned} \tag{7.21}$$

Novamente, a grande influência foi da aceleração resultante, seguida das ponderadas por direção e, com menor impacto, os termos de frequência.

Nesse caso, também foi feito um modelo de redes neurais, cujos dados podem ser vistos na Tabela 7.16, considerando todos os parâmetros de aceleração combinados. Os gráficos de cada um desses fatores podem ser vistos nas figuras 7.40 a 7.43.

As frequências centrais foram incluídas também no equacionamento, mas não apareceram em nenhum dos modelos com menores erros gerados pelo programa.

Nota-se aqui a dificuldade de concordância para os modelos, que divergem muito entre si. Isto se deve aos parâmetros possuírem valores muito próximos, inclusive pelo fato de o próprio A ser uma combinação dos outros três (A_x , A_y e A_z).

Assim, foi verificado que, para um modelo final, deve-se considerar apenas um fator de aceleração ponderada. Pelas análises e até pela natureza do parâmetro, de ser uma combinação dos outros, e de todos de certa forma terem a sua influência, acredita-se que a aceleração resultante é o mais propício a ser usado em um modelo global.

Tabela 7.16.: Dados das redes neurais desenvolvidas para combinação de acelerações ponderadas.

Mod.	Tipo	Desemp. da rede	Erro teste	Neur. CO 1-2	Sensibilidade			
					A_x	A_y	A_z	A
1	Linear	0,998	0,267	0 - 0				1,01
2	Linear	0,996	0,266	0 - 0			1,15	1,09
3	Linear	0,981	0,262	0 - 0	1,18		2,17	2,50
4	Linear	0,980	0,262	0 - 0	1,17	1,00	2,17	2,42
5	PMC	0,971	0,260	5 - 0		1,20		
6	PMC	0,969	0,259	4 - 6		1,26		
7	PMC	0,962	0,257	2 - 0		1,20	1,18	
8	PMC	0,968	0,259	5 - 0	1,18		1,52	
9	PMC	0,965	0,258	2 - 0	1,04	1,20	1,41	
10	PMC	0,966	0,258	6 - 0	1,05	1,20	1,56	1,04

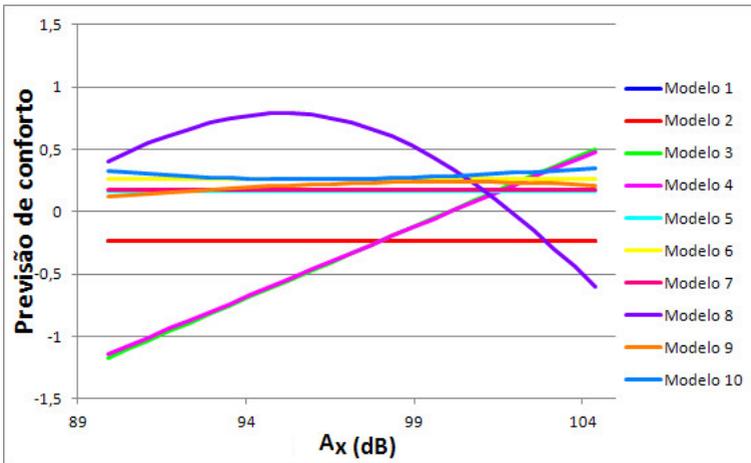


Figura 7.40.: Influência da aceleração frontal A_x para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de acelerações combinadas no ensaio final.

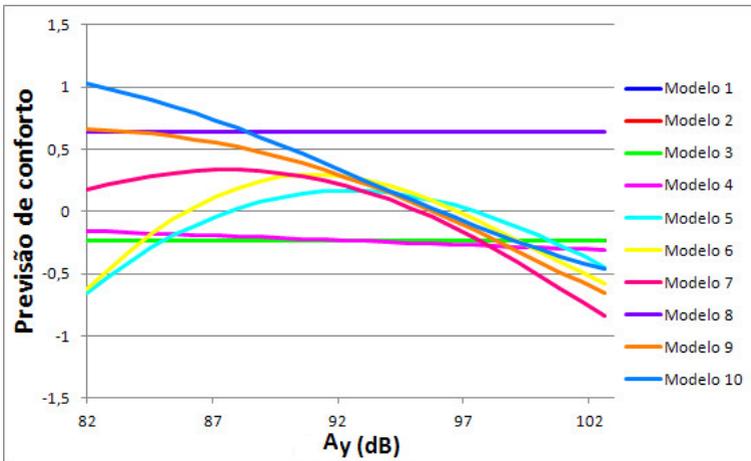


Figura 7.41.: Influência da aceleração lateral A_y para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de acelerações combinadas no ensaio final.

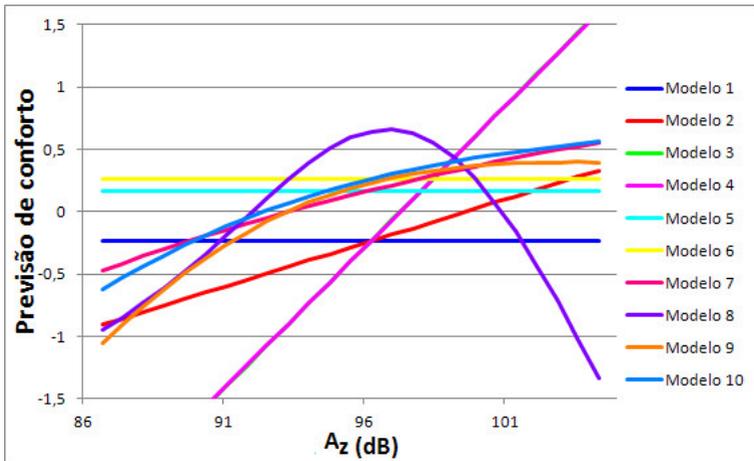


Figura 7.42.: Influência da aceleração vertical A_z para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de acelerações combinadas no ensaio final.

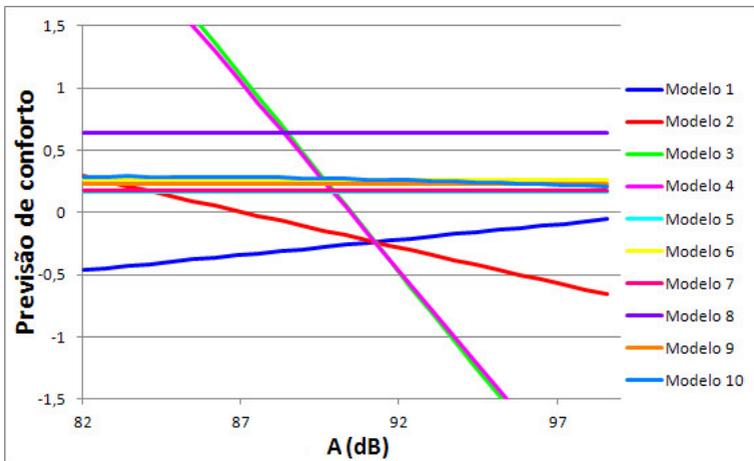


Figura 7.43.: Influência da aceleração resultante A para o Conforto com modelos de redes neurais artificiais de acelerações combinadas no ensaio final.

7.2.9 Modelos globais

A partir da análise de todos os modelos anteriores, decidiu-se pela eliminação da maioria dos parâmetros, restando somente audibilidade, agudeza, diferença de agudeza, flutuações lentas e aceleração ponderada resultante.

Fez-se então uma sequência de 15 modelos de redes neurais considerando apenas esses parâmetros (Tabela 7.17). Percebe-se claramente que os parâmetros mais influentes são a audibilidade (Figura 7.44) e a aceleração ponderada resultante (Figura 7.45).

Em seguida, na ordem de importância, tem-se a agudeza (apesar do comportamento anômalo no Modelo 13, como mostra a Figura 7.46), em detrimento da diferença de agudeza (Figura 7.47), que antes parecia causar maior impacto. Por fim, as flutuações (Figura 7.48) têm pouca participação, com exceção do Modelo 12, no qual elas predominam.

Tabela 7.17.: Dados das redes neurais desenvolvidas para o modelo global de parâmetros psicofísicos.

M.	Tipo	Des. rede	Erro teste	Neur. CO 1-2	N	Sensibilidade			
						A	S	ΔS	F
1	Lin.	0,922	0,243	0 - 0	1,06				
2	PMC	0,951	0,251	4 - 0		1,14			
3	Lin.	0,913	0,242	0 - 0	1,11	1,05	1,01		
4	PMC	0,944	0,249	25 - 0		1,12			
5	Lin.	0,909	0,240	0 - 0	1,17	1,05			
6	Lin.	0,906	0,240	0 - 0	1,14	1,06	1,01	1,00	
7	Lin.	0,906	0,240	0 - 0	1,16	1,06	1,00		
8	PMC	0,932	0,246	50 - 21		1,37			
9	PMC	0,924	0,244	50 - 24	1,19	1,45	1,01		
10	PMC	0,907	0,239	50 - 12	1,14	1,04	1,01		
11	PMC	0,909	0,240	12 - 0	1,15	1,02		1,00	1,01
12	PMC	0,911	0,241	50 - 26		1,02	1,11	1,02	1,16
13	PMC	0,914	0,242	50 - 30			1,43		
14	PMC	0,905	0,239	29 - 20	1,19	1,10			
15	PMC	0,907	0,239	50 - 16	1,00	1,07	1,06	1,03	1,01

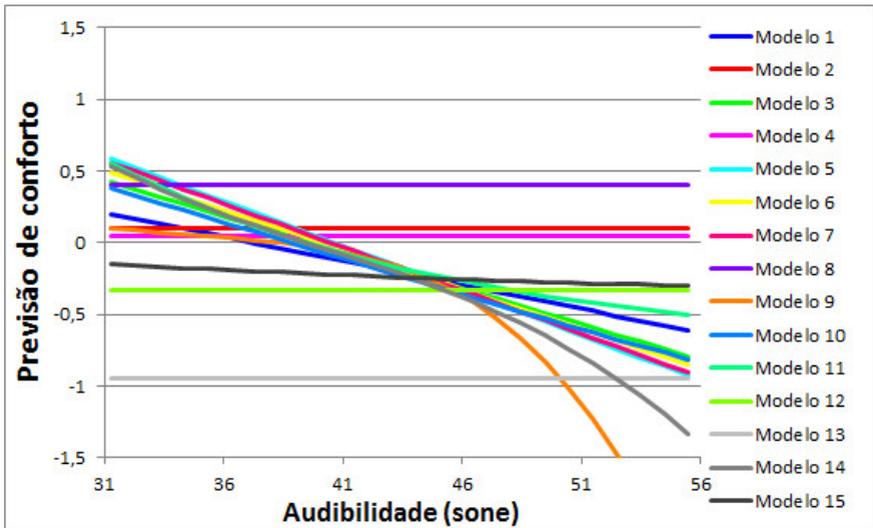


Figura 7.44.: Influência da audibilidade para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.

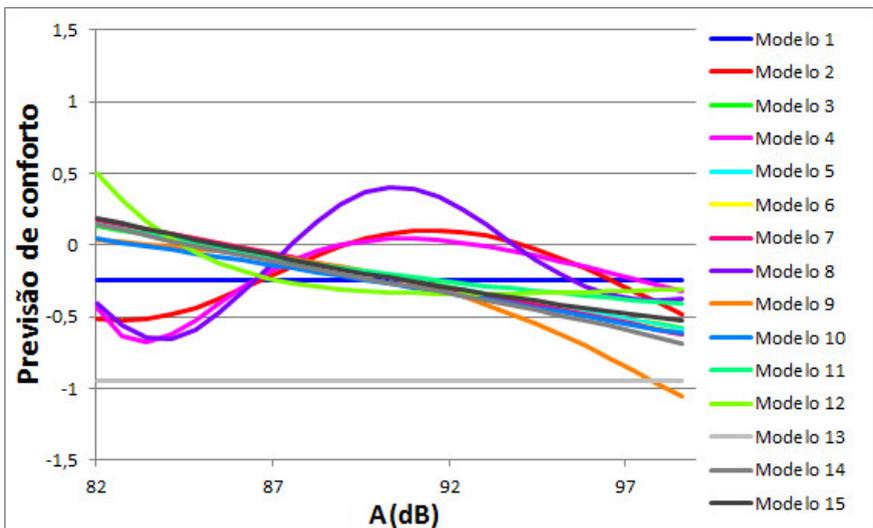


Figura 7.45.: Influência do Av para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.

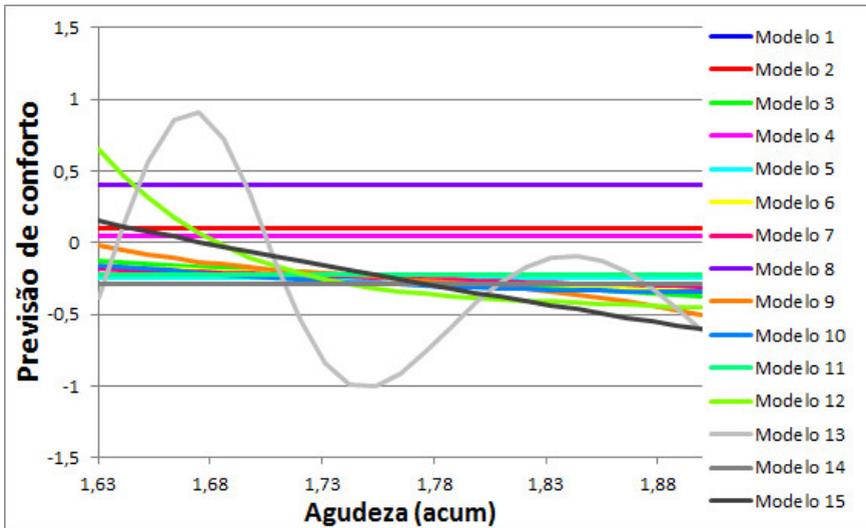


Figura 7.46.: Influência da agudeza para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.

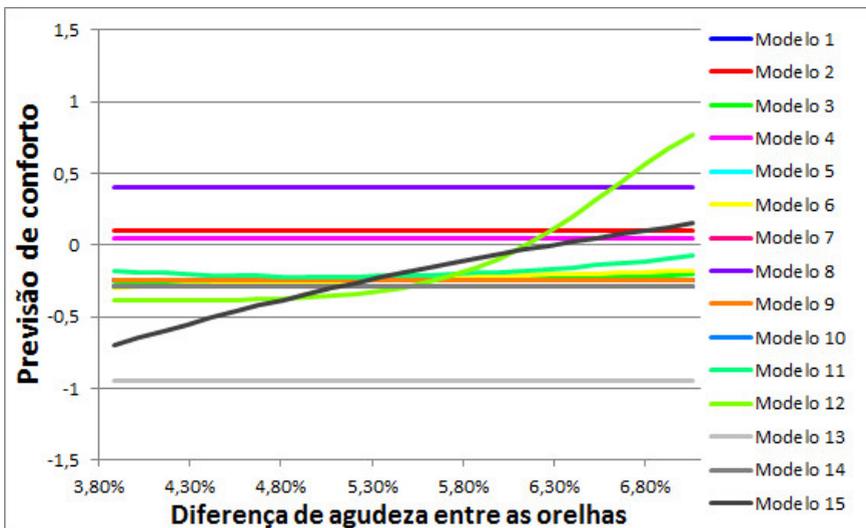


Figura 7.47.: Influência da diferença de agudeza para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.

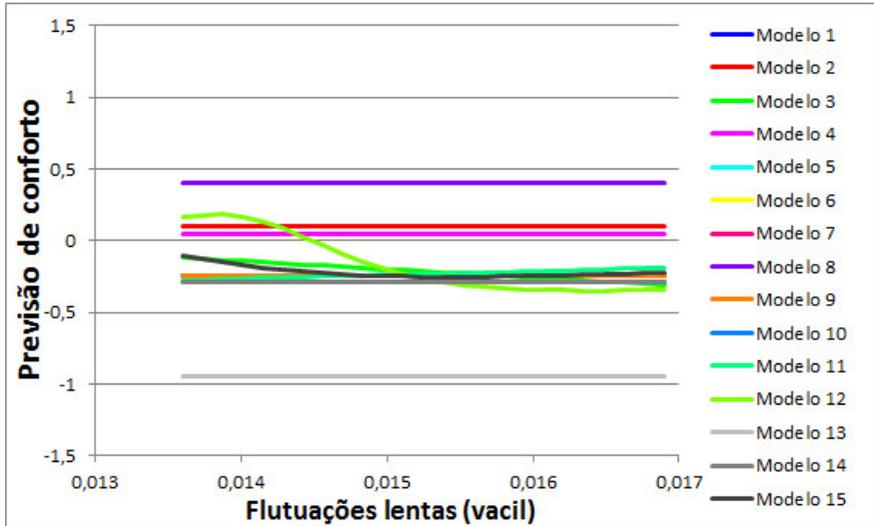


Figura 7.48.: Influência das flutuações lentas para o Conforto com modelos globais de redes neurais artificiais no ensaio final.

De qualquer forma, esses modelos não são definitivos, pois ainda contêm erros grandes pela baixa variedade dos sinais e pela influência de fatores pessoais e externos, como os dados demográficos e ambientais. Foi feito um pré-modelo com todos (e apenas) esses parâmetros utilizando redes neurais e regressão múltipla, e todos eles de certa forma obtiveram uma influência relevante no modelo, não se conseguindo eliminar nenhum previamente.

Assim, optou-se por fazer um modelo final utilizando regressão múltipla com maior fator sendo quadrático, e outro com redes neurais artificiais. No primeiro caso, chegou-se a:

$$\begin{aligned}
 C_G = & -2,5091 + 0,1852A - 0,0013A^2 - 0,0297N + \dots \\
 & \dots - 0,00030N^2 - 2,1365S + 0,3703S^2 - 0,0438Id + \dots \\
 & \dots + 0,00064Id^2 - 0,0466Vi + 0,0022Vi^2 - 0,2486A1 + \dots \quad (7.22) \\
 & \dots + 0,00072A1^2 + 0,0548Pe - 0,00036Pe^2 + 2,3267Ti + \dots \\
 & \dots - 0,0438Ti^2 - 0,3077Um + 0,0023Um^2,
 \end{aligned}$$

com as seguintes variáveis adicionadas:

- Id = idade (em anos);
- Vi = número de viagens nos últimos 12 meses;
- Al = altura (em cm);
- Pe = peso (em kg);
- Ti = temperatura inicial durante o ensaio (em °C);
- Um = umidade relativa do ar (em %).

Foram selecionados os 15 modelos de redes neurais com menores erros dentre mais de 100 estimados pelo *software* STATISTICA, e em seguida feita uma combinação dos resultados desses com o próprio programa. A variação de cada um dos parâmetros é mostrada nas figuras 7.49 a 7.57, enquanto que algumas propriedades das redes podem ser vistas na Tabela 7.18.

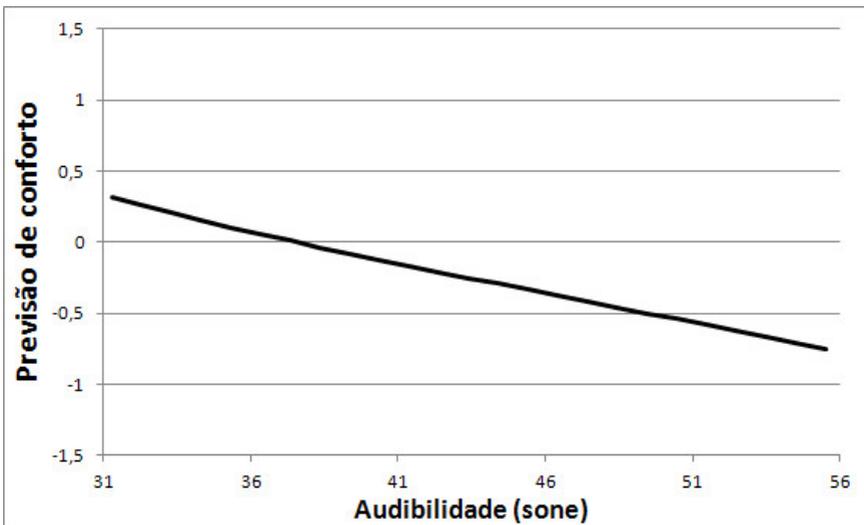


Figura 7.49.: Influência da audibilidade para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.

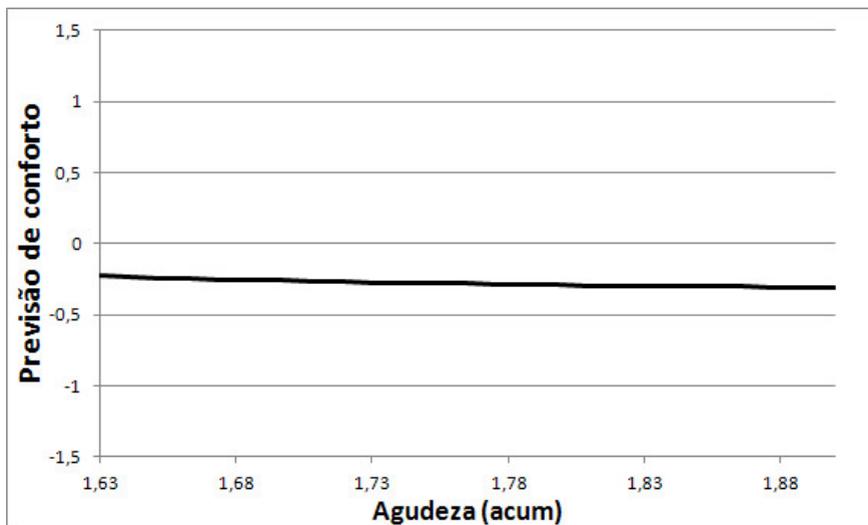


Figura 7.50.: Influência da agudeza para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.

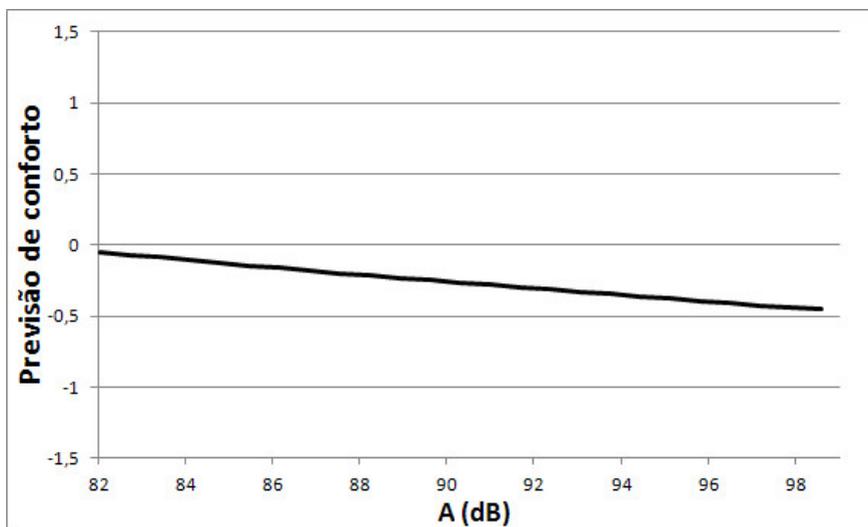


Figura 7.51.: Influência da aceleração ponderada resultante para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.

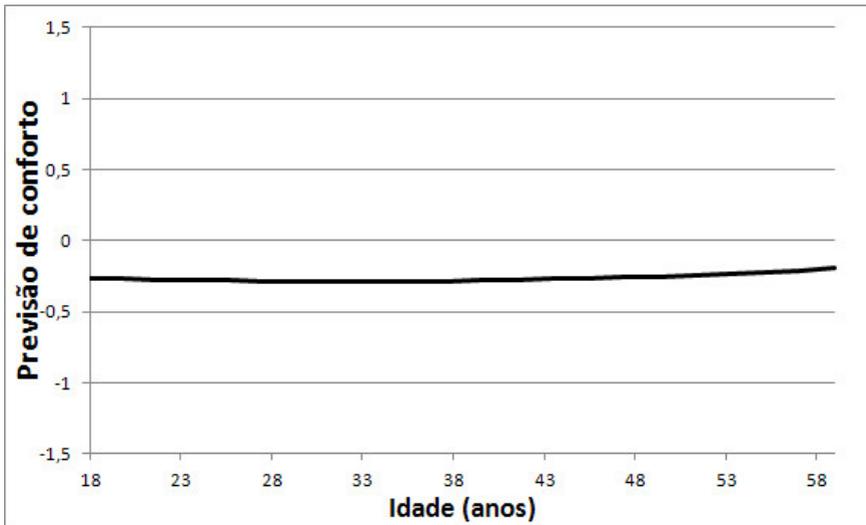


Figura 7.52.: Influência da idade do voluntário para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.

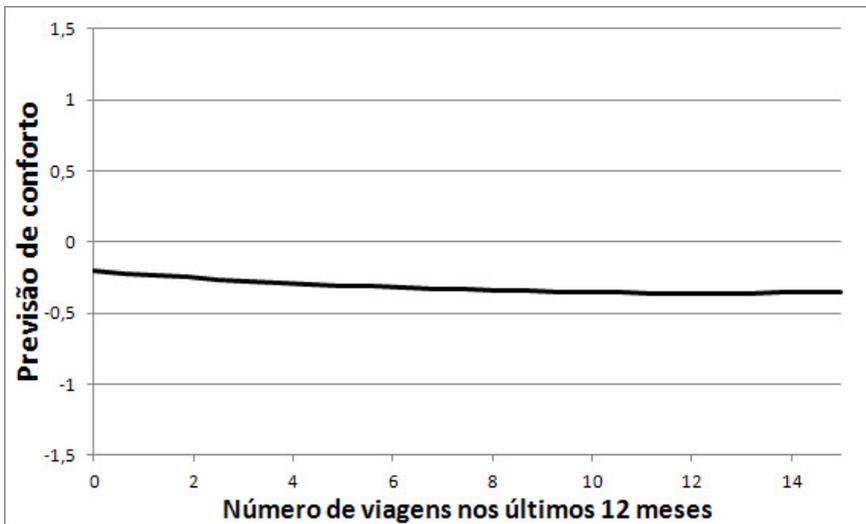


Figura 7.53.: Influência do número recente de viagens para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.

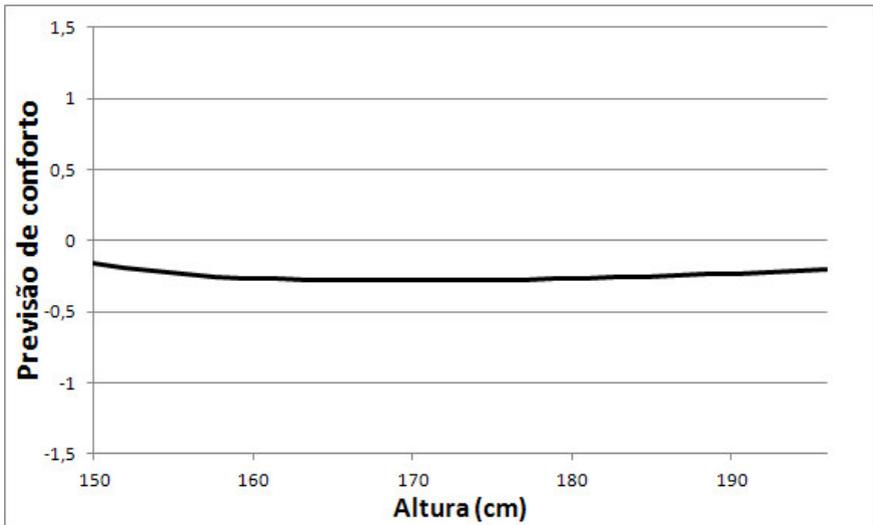


Figura 7.54.: Influência da altura do voluntário para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.

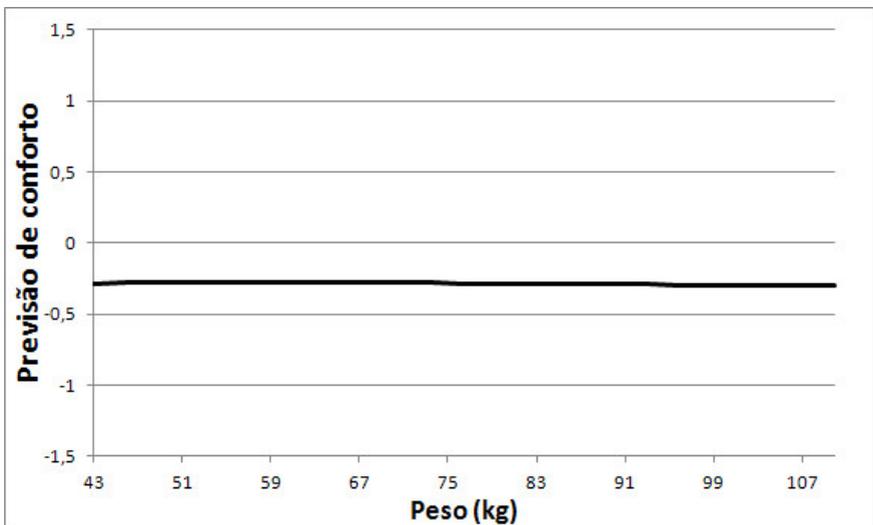


Figura 7.55.: Influência do peso do voluntário para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.

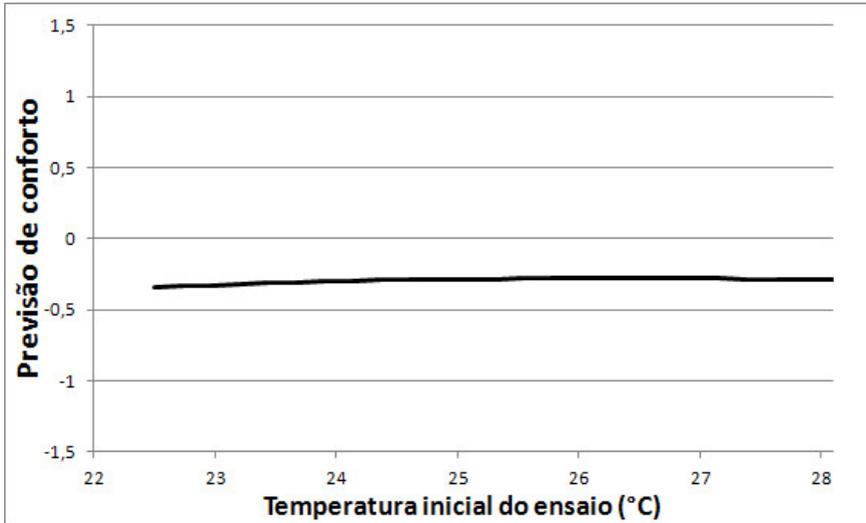


Figura 7.56.: Influência da temperatura inicial da cabine para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.

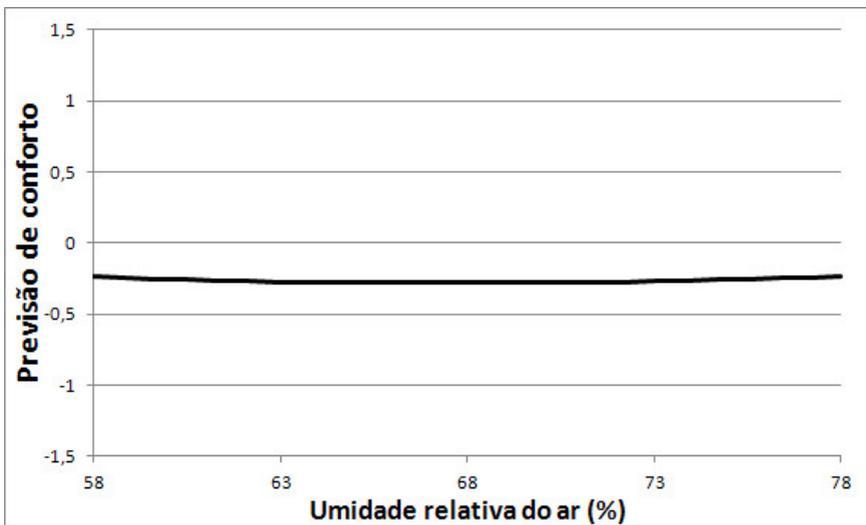


Figura 7.57.: Influência da umidade do ar da cabine para o Conforto no modelo final de redes neurais artificiais.

Tabela 7.18.: Dados das redes neurais desenvolvidas para o modelo final de conforto vibroacústico.

Mod.	Tipo	Desemp. rede	Erro teste	Neurônios		Parâmetros
				CO 1	CO 2	
1	Linear	0,949	0,242	0	0	1
2	PMC	0,947	0,241	28	21	1
3	PMC	0,926	0,236	26	25	2
4	Linear	0,930	0,237	0	0	2
5	Linear	0,928	0,237	0	0	3
6	Linear	0,924	0,236	0	0	8
7	Linear	0,921	0,235	0	0	7
8	PMC	0,929	0,237	30	27	3
9	Linear	0,922	0,235	0	0	6
10	Linear	0,925	0,236	0	0	5
11	PMC	0,953	0,243	21	0	5
12	PMC	0,957	0,244	22	0	5
13	PMC	0,962	0,246	50	25	5
14	PMC	0,932	0,238	31	0	7
15	PMC	0,969	0,247	20	0	9
T	Combinação	0,938	0,239	15	0	9

Os fatores que mais impactaram no modelo foram a audibilidade (Figura 7.49) e a aceleração ponderada resultante (Figura 7.51). Apesar de a audibilidade influenciar mais na maioria dos modelos, no combinado foi a aceleração resultante que teve maior importância.

Com menor relevância, ocorreu uma influência muito próxima de todos os outros fatores, sendo os de menor peso a temperatura interna da cabine e a umidade do ar.

Os modelos combinados para chegar no resultado final mostrado acima podem ser vistos no Apêndice B, figuras B.18 a B.26 (variações de cada parâmetro em cada um dos modelos) e Tabela B.1 (dados de sensibilidades).

7.3 Comparação de modelos

Seguem, na Tabela 7.19, comparações dos resultados obtidos por todos os modelos supracitados. Os valores de e_i (resíduos), $\hat{\sigma}^2$ (variância estimada) e R^2_{ajustado} (coeficiente de determinação ajustado) são calculados, respectivamente, pelas Equações (2.24), (2.25) e (2.28). Para o primeiro fator, foi considerada a média absoluta dos resíduos.

Tabela 7.19.: Dados gerais de todas as regressões desenvolvidas a partir do ensaio final.

Modelo	Equação	$\sum_{i=1}^n \frac{ e_i }{n}$	$\hat{\sigma}^2$	R^2_{ajustado}
Audibilidade (N)	7.3	0,61	0,560	0,19
N e ΔN	7.4	0,61	0,561	0,20
Agudeza (S)	7.5	0,63	0,602	0,15
S e ΔS	7.6	0,62	0,579	0,22
Flutuações lentas (F)	7.7	0,63	0,583	0,14
F e ΔF	7.8	0,62	0,564	0,14
Tonalidade (T)	7.9	0,64	0,604	0,14
T e ΔT	7.10	0,64	0,602	0,14
Acel. pond. frontal (A_x)	7.11	0,65	0,620	0,11
Acel. pond. lateral (A_y)	7.12	0,61	0,568	0,19
Acel. pond. vertical (A_z)	7.13	0,62	0,577	0,18
Acel. pond. resultante (A)	7.14	0,64	0,600	0,14
Frequência central x (Φ_x)	7.15	0,63	0,596	0,16
Frequência central y (Φ_y)	7.16	0,64	0,597	0,15
Frequência central z (Φ_z)	7.17	0,63	0,588	0,16
Propriedades sonoras	7.18	0,61	0,554	0,13
Propriedades vibracionais	7.20	0,60	0,546	0,22
Final	7.22	0,59	0,522	0,20

Não foram colocados os valores de resíduos padronizados (Equação (2.29)) pela baixa variedade nos resultados, já que todos os valores estiveram entre 0,81 e 0,83.

7.4 Comentários gerais

Em relação à metodologia, após os ensaios, como já mencionado, era normalmente perguntado de maneira informal ao jurado o que ele havia achado do teste, e se tinha algum comentário extra a fazer. Alguns relatavam que não gostavam principalmente do ruído e outros da vibração, ou ainda que não se importavam muito com um ou outro. Porém, alguns relatavam que se sentiam bem com a presença de vibração. Quanto a esta, o que mais pareceu causar incômodo era quando o sinal de vibração “dava uns soquinhos”, como se fosse uma modulação lenta.

Um voluntário relatou que o impacto do início de cada estímulo também o incomodava, sugerindo que cada um deveria ter um aumento gradativo leve no seu início (*fade-in*). Essa sugestão não foi aplicada justamente porque foi um dos últimos voluntários, e haveria a necessidade de reconvocar todos os anteriores para refazer.

Quanto à condução do ensaio, não houve qualquer relato de dificuldade, ratificando a didática do vídeo e dos textos ao longo do teste.

A análise dos dados do questionário mostrou que o **sexo da pessoa** não tem muita influência na avaliação do conforto nem do ruído, mas pode influenciar na percepção da vibração, na qual notou-se uma distinção clara entre os gêneros em função da sua magnitude. A **idade**, dentro da faixa etária avaliada, também não causou uma influência significativa no resultado do ensaio.

O fato de **trabalhar-se com acústica e/ou vibrações** torna as pessoas mais críticas quanto a esses itens, o que influenciou diretamente no resultado dos ensaios, já que esse grupo acabou por considerar em geral os estímulos mais desconfortáveis, especialmente aqueles com maior nível de vibração.

O **número de viagens recentes** teve pouca influência, porém notou-se um senso um pouco mais crítico daqueles que viajam mais, os quais consideraram a situação geral um pouco mais desconfortável. Porém, quando focou-se no ruído ou na vibração, não houve diferenças relevantes.

Agora em relação aos dados físicos, a **altura** dos jurados foi a que teve menor relevância nos resultados. Todavia, o **peso** dos mesmos causou um impacto direto na percepção, especialmente para a vibração. Aqueles com maior peso geralmente consideram os estímulos mais desconfortáveis.

O **índice de massa corporal** também afetou mais os resultados de vibração. Porém, curiosamente, as pessoas com maior IMC tenderam a avaliar os estímulos como mais confortáveis, essencialmente em função da sua percepção de vibração. Duarte *et al.* [120] já haviam mostrado que esse parâmetro tem mais influência na vibração do que outros como idade, sexo e visão.

O **tempo de avaliação** dos primeiros estímulos é muito maior do que os últimos estímulos, o que influencia no tempo de adaptação a cada um deles durante o próprio ensaio e, por consequência, na sua percepção. Uma maior demora nos primeiros pode ser por conta da adaptação ao programa e sistema de avaliação. A partir do 6^o, já começa a haver um leve aumento no tempo, resultante talvez do cansaço (apesar do tempo de ensaio total não ter sido considerado longo).

De qualquer forma, houve uma tendência de, quanto maior o tempo levado para avaliar um estímulo, mais próximo do “confortável” ele era avaliado. O mesmo ocorreu para a avaliação de ruído, porém não se repetiu quando se focava apenas na vibração, cuja pontuação não sofreu alterações significativas pelo tempo de avaliação. Isso pode ser resultado de uma maior ambientação de audibilidade quanto ao ruído, deixando o sistema auditivo mais acostumado com o som recebido.

A análise de **temperatura** e **umidade relativa do ar** também contrariou as expectativas, já que esperava-se haver uma proporcionalidade inversa em relação ao conforto. Todavia, o que ocorreu foi uma tendência de que, quanto maior a temperatura interna da cabine, maior a nota de conforto, o mesmo acontecendo com a umidade.

Quanto aos modelos individuais, a **audibilidade** tem uma tendência quase linear proporcional ao desconforto. O fator de diferença de audibilidade entre as orelhas não se mostrou relevante, mostrando

que a sensação de magnitude sonora se deve principalmente ao maior nível entre os lados.

O conforto em relação à **agudeza** mostrou uma disposição parabólica na regressão, com o máximo valor para os estímulos com ruído de média frequência. A diferença desse parâmetro entre as orelhas teve boa relevância, mais influente inclusive que a própria agudeza quando colocados no mesmo modelo. A tendência, nesse caso, foi de melhora do conforto quanto mais distintos em frequência forem os sinais entre os lados do sistema auditivo.

A tendência da avaliação de conforto em função das **flutuações lentas** também foi parabólica na regressão, porém com concavidade voltada para cima. Esperava-se uma relação linear inversamente proporcional, tal e qual ocorreu com a audibilidade. Não se pode nem atribuir o resultado ao valor isolado mais baixo, que ocasionou o aumento do conforto em relação aos valores de menor flutuação, já que há uma concentração de sinais com alto valor desse parâmetro e valor mais confortável que não impediriam essa tendência. A diferença de flutuação entre as orelhas teve uma influência razoável, menor do que a do parâmetro absoluto, porém não se conseguiu identificar uma tendência clara em relação a esse fator, a não ser que acima de 9% de diferença parece haver um aumento no conforto.

Já quando se fala de **tonalidade**, devido às características dos estímulos sonoros do ensaio aqui relatado, com valores muito próximos e apenas um destoando com maior componente tonal, não se pôde fazer uma consideração relevante de tendência relativa tanto a esse parâmetro quanto à sua diferença entre as orelhas. Contudo, deve-se ressaltar que o único estímulo com componente tonal foi avaliado como o mais desconfortável entre todos.

Agora considerando os fatores de **acelerações ponderadas**, a maioria deles acarretou uma tendência parabólica linear do conforto em relação a cada uma delas quando analisadas individualmente. Esse resultado pode ser fruto da menor influência no desconforto para valores mais baixos de aceleração, sendo que as vibrações mais fracas têm pouca importância na avaliação geral. Em contrapartida, as amplitudes mais altas de vibração levaram a uma avaliação mais próxima do desconfortável.

O parâmetro de **frequências centrais de vibração** não se mostrou relevante neste estudo, necessitando ser melhor trabalhado se for para verificar alguma influência da frequência vibratória na avaliação de conforto.

Quando deseja-se combinar os fatores, verificou-se que a audibilidade tem mais relevância no modelo de conforto com parâmetros de ruído, com os outros três fatores tendo influência próxima entre si na avaliação dos jurados. Todavia, a agudeza pode causar mais impacto em seus valores mais baixos, enquanto que não há uma tendência clara para flutuações lentas e tonalidade.

Combinando os fatores de vibração, foram obtidos resultados variados, até pelas acelerações terem de certa forma relação entre si (por mais que a resultante possa ter uma inclinação distinta). Assim, optou-se por usar apenas um parâmetro, que é o de aleleração resultante, que de certa forma é uma combinação dos fatores em cada direção. Mesmo assim, as vibrações nas direções vertical e frontal acabam por causar uma forte influência no conforto para amplitudes mais altas.

Para se chegar no modelo final, houve a necessidade de incluir fatores pessoais, biométricos e ambientais, na tentativa de minimizar os erros. Ainda assim, as maiores influências no resultado final foram os parâmetros relacionados às magnitudes tanto de ruído (audibilidade) quanto de vibração (aceleração ponderada resultante). Os outros fatores tiveram pouca contribuição para o modelo final, porém auxiliaram no ajuste das curvas para minimizar os erros.

Verificando-se a tabela final, observa-se que os valores de R^2 são baixos, mostrando a dificuldade de ajustar as curvas pela grande variabilidade das respostas. Em compensação, os erros dos valores médios de conforto para cada um dos estímulos em relação à curva de regressão, mostrados nas tabelas e até nos gráficos deste Capítulo, ainda é baixo. Com o modelo final, ainda conseguiu-se baixar o valor médio dos resíduos e, por consequência, o desvio padrão.

8 Conclusões e considerações finais

Após muitos estudos feitos no Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC relativos a ruídos e vibrações separados, percebe-se que seria uma tendência natural estudá-los concomitantemente, dada a capacidade de equipamentos e técnica em geral que o LVA dispõe. Sabe-se que um simulador capaz de transmitir inclusive a sensação visual torna os resultados mais fidedignos, fato que foi confirmado em declarações verbais feitas pelos voluntários que participaram dos ensaios.

Ao estudar a **fisiologia humana** nota-se que realmente não se pode separar essas sensações, já que a vibração, dentre muitos sensores, é percebida também por estruturas do aparelho auditivo, mais especificamente na orelha interna. Existem estudos pelo mundo que tratam da percepção humana aos dois fenômenos, mas não se verificou nada muito conclusivo, especialmente na língua portuguesa.

Enfatiza-se esse aspecto da linguagem porque, apesar da sensação de bem estar ser universal, a interpretação do que pode ser a palavra conforto é distinta em cada idioma.

Foram realizados **quatro ensaios** com foco no estudo vibroacústico para chegar ao modelo final. Nesta Tese, os três primeiros essencialmente tiveram seus resultados principais apresentados e suas conclusões serviram para elaborar o modelo final, porém é possível se aprofundar bastante em cada um deles individualmente, o que pode gerar uma série de publicações.

Toda a dinâmica dos ensaios, desde a instrumentação utilizada e a construção de todo o programa computacional, o que inclui a apresentação do vídeo com maior didática possível e com um sinal vibratório no início para simular uma decolagem, passando pelo ques-

tionário, a apresentação dos estímulos, o treinamento de cada método e da avaliação em si, até o agradecimento final, foi cautelosamente estudada e aprimorada com o passar do tempo.

Detalhes foram melhorados, desde os mais visíveis, como a inserção de barras de tempo na apresentação, alteração e inclusão de informações no questionário, até outros mais imperceptíveis, como mudar o gênero das perguntas quando a pessoa assinala "feminino" ou "masculino", ou colocar algumas travas para melhorar a dinâmica do ensaio e evitar que os voluntários passem para as próximas perguntas sem ter respondido a anterior.

Apesar de todo o trabalho para **desenvolver o programa**, ao final vale a pena fazê-lo, já que a interface gráfica torna a avaliação mais agradável ao participante, além de proporcionar uma automatização impossível de se fazer caso fosse tudo feito com papel, especialmente com a dinâmica feita na Escala de Resposta, quando o jurado podia alternar os estímulos que estava recebendo na ordem que mais lhe apetecia.

Uma verificação rápida em relação à idade dos participantes foi feita previamente ao ensaio preliminar, focando-se no **limiar da vibração**, tendo surgido da preocupação em se usar pessoas mais jovens no ensaio, que são as mais disponíveis em um ambiente universitário. Ao menos na faixa estudada não foi verificada uma diferença significativa, o que tornou um pouco mais tranquila a continuidade da pesquisa usando essa amostra.

Em relação ao ensaio preliminar, verificou-se a **dificuldade para comparar estímulos diversos avaliados em dias diferentes**. A própria distribuição dos mesmos pode acabar por influenciar os resultados, já que, por exemplo, quando um deles é avaliado como muito desconfortável, por comparação, os outros acabam por serem considerados mais confortáveis do que o habitual. A solução para isso seria usar um estímulo referência em todos os dias. Todavia, ainda não eliminar-se-iam outros fatores incontroláveis e que variam em cada ocasião, como o estado de espírito, o humor e o cansaço das pessoas, além também dos fatores climáticos externos ao ensaio já que, mesmo que o ambiente interno seja controlado, a sensação inicial é comparativa.

Fazer ensaios em dias diferentes também pode resultar em outro fator complicador, que é a disponibilidade das pessoas para se deslocar em mais de uma oportunidade ao laboratório. Se alguma não comparecesse em algum dos dias, já seria descartada e os dados inutilizados. Apesar de muitas terem demonstrado interesse pela pesquisa, há uma dificuldade em agendar e tomar tempo das pessoas em mais de uma ocasião. Ainda deve-se acrescentar que, nos dias subsequentes, a pessoa já está mais habituada com a metodologia do ensaio, mudando sua motivação com o mesmo devido à prática, já que nos primeiros acaba por ser mais insegura e demorar mais em sua avaliação, mudando inclusive a sua ambientação dos sentidos quanto à percepção de amplitude.

Outra conclusão importante do primeiro ensaio foi que, mesmo com dinâmica completamente distinta, os **resultados de ER e de DS** foram muito próximos entre si, o que de certa forma pela comparação de um com o outro mostra a eficácia de ambos os métodos.

O ensaio relativo ao **tempo de ambientação** mostrou, principalmente, que deve-se ter cerca de 5 minutos de ambientação dos sentidos, somando-se para isso os tempos do vídeo e da apresentação dos estímulos. Um tempo muito curto não adapta o corpo o suficiente, causando maior variabilidade nas respostas e grande influência da magnitude tanto do ruído quanto da vibração, e um tempo maior pode causar cansaço e até ansiedade devido à espera, já que a apresentação dos estímulos é algo monótono. A inserção da barra de tempo acabou por minimizar um pouco por desviar a atenção, porém depois de certo tempo também deixou de fazer tanto efeito, como relatado pelos próprios voluntários.

Para prolongar ainda mais o tempo de ambientação para adaptação sem tornar o ensaio necessariamente cansativo, sugere-se uma atividade extra em paralelo, que pode ser apenas a apresentação de vídeos, de preferência relativos a aeronaves pra manter a imersão no tema, até exercícios que envolvam o participante, para distraí-los. Contudo, deve-se tomar cuidado para não exagerar nesse prolongamento, já que se pode afastar as pessoas devido ao tempo excessivo total do ensaio.

O ensaio relativo à **alteração de magnitude** mostrou que, na média, existe uma tendência linear e inversamente proporcional de avaliação do conforto em relação à variação de magnitude do ruído, tomando-se como referência estímulos típicos de voo. Em relação à vibração, os níveis mais atenuados não causaram tanto impacto na avaliação, porém a amplificação aumentou o desconforto.

Entretanto, percebeu-se que há ainda uma quantidade considerável de pessoas que acaba se sentindo confortável com o aumento da amplitude tanto do ruído quanto da vibração, e desconfortáveis quando os mesmos são atenuados. O desconforto em relação à atenuação, segundo relatos de alguns dos próprios participantes, se deve ao medo de que “alguma coisa pode não estar funcionando direito”. Assim, estima-se que, com o passar do tempo e a adaptação dos sentidos, estes sinais mais atenuados permaneçam ainda um pouco desconfortáveis pela ansiedade causada, enquanto que o desconforto causado pelos amplificadores fique atenuado pelo próprio costume dos órgãos perceptores.

Lembrando-se que, pelo método de avaliação utilizado nesse ensaio, que pela interatividade permitia uma grande alternância entre a reprodução dos sinais, os usuários não tinham tempo suficiente para se adaptar entre os estímulos, avaliando assim principalmente o impacto direto entre a variação de magnitude.

No ensaio final, confeccionado para o **desenvolvimento do modelo de conforto**, optou-se por fazer uma dinâmica mais ágil para que pudessem ser avaliados mais sinais. Entretanto, só havia 8 combinações completas (ruído + vibração) disponíveis de aeronaves comerciais, e a utilização de outros sinais muito distintos poderia prejudicar a avaliação final, como havia sido observado no ensaio preliminar. Mesmo assim, ainda notou-se que a ordem de avaliação causa diferença na percepção, que pode ser oriunda da adaptação dos sentidos, da prática com a metodologia ao longo do ensaio e, talvez, da ansiedade por terminar logo o teste, em alguns casos no final.

O uso de aeronaves distintas acabou por separar os resultados em dois grupos, mostrando que há uma diferença entre aeronaves muito maior do que internamente dentro de cada uma delas, mesmo em posições distantes. A avaliação de conforto segue um pouco mais

a tendência da pontuação de ruído do que da vibração, mas isso não ocorreu em todos os casos.

Considerando-se as propriedades psicoacústicas, a **audibilidade** teve uma relação inversamente proporcional ao conforto. Pode-se minimizar um pouco mais esse efeito permitindo uma adaptação maior ao próprio estímulo em si, não permitindo ao avaliador definir sua pontuação nos primeiros segundos. A diferença de audibilidade entre as orelhas não teve grande influência, demonstrando que as pessoas avaliam essencialmente pelo lado que está mais intenso.

A **agudeza** teve menor peso que a audibilidade, mas ainda assim a percepção de frequência sonora influenciou no conforto. Nesse caso, a maior diferença entre as orelhas teve um impacto positivo em relação à sensação de conforto. Uma possível explicação para isso pode ser a de que um som estereofônico proporciona uma maior sensação espacial e de localização de fontes sonoras do que o monoauricular.

Levando-se em conta as **flutuações lentas** e a **tonalidade**, não se pode fazer uma afirmação mais contundente em relação aos sinais utilizados, que possuem valores baixos e pouca variação em ambas as propriedades.

Os **parâmetros “psicovibratórios”** (propõe-se nesta Tese a consolidação desse termo para a caracterização dos parâmetros psicofísicos relacionados à vibração), tem-se na literatura principalmente aqueles em relação à magnitude do estímulo. Os eixos vertical e lateral de vibração são os que mais influenciam no conforto, praticamente tanto quanto a resultante se analisados separadamente. Os valores baixos não tiveram muito peso nas avaliações, porém os mais altos causaram uma relação direta com o desconforto. O parâmetro proposto de frequência de vibração não gerou uma variação clara na avaliação de conforto.

Em relação aos **fatores demográficos**, considerando-se todos os ensaios, inicialmente pode-se perceber que a maioria dos participantes respondeu afirmativamente quando questionados se, durante o voo, se incomodavam com o ruído e/ou vibração, validando a importância do estudo.

Verificou-se que o **sexo do voluntário** tem pouca influência no conforto geral e no ruído, mas pode até levar a uma diferença de percepção na vibração.

A **idade dos participantes** teve pouco impacto em qualquer um dos estudos. Este resultado foi considerado bem positivo em relação à amostragem escolhida, já que a mesma foi composta basicamente de pessoas que vivem no ambiente universitário. Ademais, os participantes com idade mais avançada também tiveram opinião similar em relação ao conforto.

Um dos fatores que causaram mais influência foi a **experiência recente em viagens**. Os participantes com maior número de viagens costumaram considerar os estímulos um pouco mais desconfortáveis do que aqueles com poucos voos nos 12 meses que antecederam o ensaio. Isso mostra um maior senso crítico daqueles mais experientes, que esperam mais conforto de um voo do que aqueles que viajam mais ocasionalmente.

O fato de se **trabalhar com acústica ou vibrações** causa uma influência muito grande nos resultados, com as pessoas que são da área sendo mais críticas tanto quanto ao ruído quanto à vibração. Isso é um resultado importante porque a maioria dos estudos são feitos em laboratório e, para aumentar a amostra e também por facilidade de deslocamento, normalmente chamam-se as pessoas mais próximas para participar.

Os dados biométricos mostraram que o **peso** tem maior influência que a **altura**, e pessoas com maior **índice de massa corporal** normalmente consideram os estímulos mais confortáveis, especialmente em relação à vibração. Duarte *et al.* [120] já havia enfatizado quanto a isso de que a camada adiposa pode absorver parte das vibrações.

Infelizmente, por problemas no sistema de climatização que ocorreram previamente aos testes, os fatores ambientais não foram controlados, sendo assim as condições de ensaio foram as ambientais dos meses de novembro e dezembro de 2015 em Florianópolis, durante os quais choveu muito.

Tanto a **temperatura** quanto a **umidade** ficaram um pouco acima das condições de voo, e curiosamente quando esses fatores

eram mais altos os estímulos foram considerados mais confortáveis. Uma explicação para isso pode ser de que, com as condições mais “desagradáveis”, as pessoas acabam por avaliar mais velozmente, não se ambientando tanto ao estímulo. Outra possibilidade é de que outros fatores desconfortáveis acabavam por desconcentrar um eventual foco no ruído e na vibração, tornando-os de certa forma menos desconfortáveis ao avaliador.

Em todos os ensaios houve uma variação muito grande de respostas para o mesmo estímulo, com as pessoas utilizando toda a escala, o que acabou por causar uma grande dificuldade para o ajuste do modelo e minimização dos resíduos. O fato de usar pontos discretos no ensaio final também acarretou maiores erros.

Os **modelos de redes neurais** utilizados serviram como uma boa base de comparação por resultarem em múltiplas opções, verificando-se a tendência das curvas e, em alguns casos, a dificuldade em se gerar um modelo único para a combinação de parâmetros escolhida.

O **modelo final**, apesar de ter ainda um ajuste de coeficiente de regressão baixo, em relação aos valores médios de conforto para cada estímulo ainda teve uma boa exatidão. Em compensação, o coeficiente de determinação ainda está aquém do que se esperava. Por exemplo, os valores conseguidos nos modelos finais propostos por Paul [25] para qualidade sonora de aeronaves ficaram entre 0,53 e 0,77. Entretanto, nesse caso foram utilizados sons gravados em aeronaves e algumas modificações dos mesmos, sem suas respectivas vibrações.

Para dar continuidade direta ao trabalho em busca de melhoria dos resultados, são sugeridos os seguintes temas:

- fazer um estudo mais aprofundado dos parâmetros psicofísicos, desenvolvendo modelos principalmente quanto a vibrações, abordando inclusive sensações vibratórias equivalentes à agudeza, às flutuações e até à tonalidade;
- realizar ensaios similares ao teste final descrito nesta Tese, porém com maior quantidade de estímulos, incluindo neles maior variabilidade de propriedades, essencialmente quanto às varia-

ções de agudeza, flutuações e tonalidade. Devem-se controlar também os fatores ambientais, como temperatura e umidade, além de outros não mencionados neste trabalho como iluminação e ergonomia;

- mensurar a vibração também no assento e fazer as análises com base nos dados medidos. Assim, é possível também calcular a diferença de fase entre piso e assento e sua influência na avaliação de conforto;
- ainda considerando a realização de ensaios, acrescentar alguns segundos antes de permitir a avaliação de cada estímulo, para minimizar os efeitos dos parâmetros relativos à magnitude tanto de vibração quanto de ruído;
- a partir de uma análise estatística mais minuciosa em relação aos dados coletados ao longo desta Tese, com análises multivariadas, ampliar as conclusões para cada um dos temas abordados;
- comparar os resultados com os obtidos em outras línguas;
- fazer o modelo excluindo os resultados obtidos a partir de pessoas que trabalham com acústica e/ou vibrações;
- fazer a caracterização vibroacústica do ambiente do simulador, mensurando a influência do ruído externo no mesmo e a radiação acústica devido à vibração do piso.

Referências bibliográficas

- [1] Teixeira, J. A. M. S. *Desenvolvimento de sistema de reprodução vibracional para ensaios de conforto de aviões a jato*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2010.
(Citado nas páginas 45, 79, 86, 101 e 103)
- [2] Quehl, J. *Comfort studies on aircraft interior sound and vibration*. Tese de doutorado, Departamento de Filosofia, Psicologia e Desportos, Universidade de Oldenburg, Oldenburg, Alemanha, 2001.
(Citado nas páginas 46, 68, 95, 99 e 143)
- [3] Mansfield, N. J. *Human response to vibration*. Londres, Inglaterra: CRC Press, 2004.
(Citado nas páginas 51, 54 e 55)
- [4] Munhoz, M. S. L.; Caovilla, H. H.; Silva, M. L. G. e Ganância, M. M. *Audiologia clínica*. 1ª edição. São Paulo, SP: Atheneu, 2004.
(Citado nas páginas 51 e 53)
- [5] Bistafa, S. R. *Acústica aplicada ao controle de ruído*. 1ª edição. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2006.
(Citado nas páginas 52, 54 e 59)
- [6] Gerges, S. N. Y. *Ruído: Fundamentos e controle*. 2ª edição. Florianópolis, Santa Catarina: NR Editora, 2000.
(Citado nas páginas 52, 57 e 83)

- [7] Santos, J. C. P. *Higiene do trabalho - Agentes físicos - Ruído*. Santa Maria, RS: UFSM, 1998.
(Citado na página 53)
- [8] Correa, E. M. *Embriologia e Histologia Fonoaudiológica*. 1ª edição. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan, 2002.
(Citado na página 53)
- [9] Fuller, D. R.; Pimentel, J. T. e Peregoy, B. M. *Anatomia e fisiologia aplicadas à fonoaudiologia*. 1ª edição. Barueri, SP: Manole, 2014.
(Citado nas páginas 53 e 54)
- [10] Cour, P. *Tidens naturlære*. 2ª edição. Copenhagen, Dinamarca: Gyldendalske Boghandels Forlag, 1903.
(Citado na página 53)
- [11] Stott, J. R. R.; Viveash, J. R. e King, S. K. Identifying parameters of nonlinear structural dynamic systems using linear time-periodic approximations. Em *Proceedings...*, Farnborough, Inglaterra, set. 1993. U.K. Informal Group on Human Response to Vibration, Army Personnel Research Establishment.
(Citado na página 54)
- [12] Griffin, M. J. *Handbook of Human Vibration*. Amsterdã, Holanda: Elsevier, 1996.
(Citado nas páginas 54, 57 e 86)
- [13] Bellmann, M. A. *Perception of Whole-Body Vibrations: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles*. Tese de doutorado, Departamento de Filosofia, Psicologia e Desportos, Universität Oldenburg, Oldenburg, Alemanha, 2002.
(Citado na página 55)
- [14] Zwicker, E. e Fastl, H. *Psychoacoustics - Facts and Models*. 2ª edição. Verlag, Berlim e Heidelberg, Alemanha: Springer, 1998.
(Citado nas páginas 55, 61, 62, 63 e 64)

- [15] Hergenhahn, B. R. e Henley, T. B. *An Introduction to the History of Psychology*. 7ª edição. Belmont, Estados Unidos: Cengage Learning, 2013.
(Citado na página 55)
- [16] Stevens, S. S. A scale for the measurement of the psychological magnitude: loudness. *Psychological Review*, 43(5):405–416, set. 1936.
(Citado nas páginas 56 e 62)
- [17] Stevens, S. S.; Marks, L. E. e Stevens, G. *Psychophysics: Introduction to Its Perceptual, Neural, and Social Prospects*. 2ª edição. Nova York, Estados Unidos: Transaction Publishers, 1986.
(Citado na página 56)
- [18] ISO 1683 - Preferred reference values for acoustical and vibratory levels, International Organization for Standardization. Genebra, Suíça, 2015.
(Citado na página 57)
- [19] Everest, F. A. e Pohlmann, K. C. *Master Handbook of Acoustics*. 5ª edição. Nova York, Chicago, San Francisco, Lisboa, Londres, Madri, Cidade do México, Milão, Nova Déli, San Juan, Seul, Singapura, Sidney, Tóquio: McGraw-Hill, 2009.
(Citado na página 58)
- [20] Inami, K.; Chiba, K. e Toyama, Y. Determination of reference intervals for vibratory perception thresholds of the lower extremities in normal subjects. *Journal of Orthopaedic Science*, 10(3): 291–297, jun. 2005.
(Citado na página 59)
- [21] Bartlett, G.; Stewart, J. D.; Tamblyn, R. e Abrahamovicz, M. Normal distributions of thermal and vibration sensory thresholds. *Muscle nerve*, 21(3):367–374, mar. 1998.
(Citado nas páginas 59 e 85)

- [22] Bellmann, M. A.; Mellert, V.; Remmers, H. e Weber, R. Influence of frequency and magnitude on the perception of vertical whole-body vibration. Em *Proceedings...*, page 2, Atenas, Grécia, 2004. Congres Français d'Acoustique, CFA/DAGA'04, Societe Française d'Acoustique.
(Citado nas páginas 59 e 86)
- [23] Schaefer, R. L. *Estudo da resposta subjetiva a vibrações em aeronaves*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2011.
(Citado nas páginas 59, 79, 97, 101, 104, 105, 108 e 111)
- [24] Merchel, S.; Altinsoy, M. E. e Stamm, M. Just-Noticeable Frequency Differences for Whole-Body Vibrations. Em *Proceedings...*, Osaka, Japão, Set. 2011. Internoise.
(Citado na página 59)
- [25] Paul, S. *Avaliação e modelagem de qualidade sonora em aeronaves comerciais*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2009.
(Citado nas páginas 60, 61, 62, 79, 98, 101, 104, 107, 111, 157 e 229)
- [26] ISO 2631-1 - Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements, International Organization for Standardization. Genebra, Suíça, 1997.
(Citado nas páginas 61, 65, 69, 85, 88, 105, 106 e 130)
- [27] Maeda, S. Necessary research for standardization of subjective scaling of whole-body vibration. *Industrial Health*, 43(3):390–401, jul. 2005.
(Citado na página 61)
- [28] Bismarck, G. Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds. *Acustica*, 30(3):159–172, mar. 1974.
(Citado na página 63)

- [29] Aures, W. Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale. *Acustica*, 59(2):130–141, dez. 1985.
(Citado nas páginas 63 e 64)
- [30] Terhardt, E.; Stoll, G. e Seewann, M. Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 71(3):679–688, mar. 1982.
(Citado nas páginas 64 e 65)
- [31] Osgood, C. E.; Suci, G. J. e Tannenbaum, P. H. *The measurement of meaning*. Urbana, Estados Unidos: University of Illinois Press, 1967.
(Citado nas páginas 68, 101 e 111)
- [32] Heise, D. R. *The Semantic Differential and Attitude Research*, chapter 14, pages 235–253. Rand McNally, Chicago, Estados Unidos, 1970.
(Citado na página 68)
- [33] Leyens, J. P. e Yzerbyt, V. *Psicologia Social*. Lisboa, Portugal: Edições 70, 1999.
(Citado na página 68)
- [34] Cerclé, A. e Somat, A. *Manual de Psicologia Social*. Lisboa, Portugal: Instituto Piaget, 1999.
(Citado na página 68)
- [35] Rohrmann, B. Verbal qualifiers for rating scales: Sociolinguistic considerations and psychometric data. Em *Project Report*, Melbourne, Austrália, Jan. 2007. University of Melbourne.
(Citado na página 68)
- [36] Otto, N.; Amman, S.; Eaton, C. e Lake, S. Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds. *Sound and Vibration*, 35(4): 24–47, abr. 2001.
(Citado na página 68)
- [37] Montgomery, D. C. e Runger, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 5ª edição. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012.
(Citado nas páginas 69 e 70)

- [38] Cajal, S. R. *Die Retine der Wirbelthiere*. 1ª edição. Wiesbaden, Alemanha: J.F. Bergman, 1894.
(Citado na página 72)
- [39] Haykin, S. *Redes Neurais ? Princípios e Prática*. 2ª edição. Porto Alegre, RS: Bookman, 2001.
(Citado nas páginas 72 e 73)
- [40] Kovács, Z. L. *Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações*. São Paulo, SP: Editora Livraria da Física, 2006.
(Citado nas páginas 72 e 73)
- [41] Hebb, D. O. *The Organization of Behavior*. Nova York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1949.
(Citado na página 73)
- [42] Nunes, R. A. S. *Avaliação do ruído de compressores herméticos e de sistemas de refrigeração através da qualidade sonora*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2002.
(Citado nas páginas 75 e 82)
- [43] Pellegrini, C. *Avaliação da qualidade sonora de compressores herméticos utilizando redes neurais artificiais*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2005.
(Citado na página 76)
- [44] Leite, R. P. *Estudo do ruído do sistema de ventilação automobilística*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.
(Citado na página 77)

- [45] Portela, M. S. *Caracterização de fontes sonoras e aplicação na auralização de ambientes*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2008.
(Citado na página 78)
- [46] Bitencourt, R. F. *Desempenho de métodos de avaliação do conforto acústico no interior de aeronaves*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2008.
(Citado nas páginas 78, 79, 82, 98, 101, 107, 111 e 131)
- [47] Murta, B. H.; Souza, J. J. L. e Paul, S. Interface para determinação da diferença no limiar do observável. Em *Proceedings...*, pages 80–84, São Paulo, SP, maio 2013. 11^o Congresso de Engenharia de Áudio, Audio Engineering Society - Seção Brasil.
(Citado na página 80)
- [48] Barboza, C. F. G. Avaliação vibroacústica subjetiva em diferentes regiões de uma aeronave. Trabalho de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
(Citado nas páginas 80, 101 e 131)
- [49] Siviero, M. L. Estudo sobre a variação de intensidade de sinais vibroacústicos e os reflexos na avaliação de conforto. Trabalho de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
(Citado nas páginas 81, 101 e 144)
- [50] Werner, K. *Caracterização de aspectos do timbre de pratos de percussão através de análises psicoacústicas*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2015.
(Citado na página 81)

- [51] Weinstein, N. D. Individual differences in reactions to noise: A longitudinal study in a college dormitory. *Journal of Applied Psychology*, 63(4):458–466, ago. 1978.
(Citado na página 82)
- [52] Zhang, L.; Helander, M. G. e Drury, C. G. Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 38(3):377–389, ago. 1996.
(Citado na página 82)
- [53] Gelfand, S. A. *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics*. 5ª edição. Londres, Inglaterra: Informa Healthcare, 2009.
(Citado nas páginas 82, 83 e 129)
- [54] Pasquali, L. *Psicometria: teoria e aplicações*. Brasília, DF: Editora da UnB, 1997.
(Citado nas páginas 82 e 129)
- [55] Hashimoto, T. e Hatano, S. Effect of Factors other than Sound to the Perception of Sound Quality. Em *Proceedings...*, Roma, Itália, Set. 2001. 17th International Congress on Acoustics (ICA).
(Citado na página 82)
- [56] Gregghi, M. F. *Conforto e desconforto de passageiros em cabines de aeronaves*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 2012.
(Citado na página 83)
- [57] Schneider, E.; Paoli, P. e Brun, E. *Noise in figures*. Bruxelas, Bélgica: European Agency for Safety and Health at Work, 2005.
(Citado na página 83)
- [58] Szalma, J. L. e Hancock, P. A. Noise effects on human performance: a meta-analytic synthesis. *Psychological bulletin*, 137(4): 682–707, jul. 2011.
(Citado na página 83)

- [59] Smith, A. P. Noise and aspects of attention. *British Journal of Psychology*, 82(3):313–324, Ago. 1991.
(Citado na página 83)
- [60] Belojević, G.; Öhrström, E. e Rylander, R. Effects of noise on mental performance with regard to subjective noise sensitivity. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 64(4):293–301, nov. 1992.
(Citado na página 83)
- [61] Kjellberg, A.; Muhr, P. e Sköldström, B. Fatigue after work in noise - an epidemiological survey study and three quasi-experimental field studies. *Noise and Health*, 1(1):47–55, jan. 1998.
(Citado na página 84)
- [62] Key, K. F. e Payne Jr., M. C. Effects of noise frequency on performance and annoyance for women and men. *Perceptual and motor skills*, 52(2):435–441, abr. 1981.
(Citado na página 84)
- [63] Hastings, A. e Davies, P. An examination of Aures's model of tonality. Em *Proceedings...*, Dearborn, Estados Unidos, ago. 2002. Sound Quality Symposium.
(Citado na página 84)
- [64] Norton, J. N.; Kinard, W. L. e Reynolds, R. P. Comparative Vibration Levels Perceived Among Species in a Laboratory Animal Facility. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science*, 50(5):653–659, set. 2011.
(Citado na página 84)
- [65] Deprez, K.; Moshou, D.; Anthonis, J.; Baerdemaeker, J. D. e Ramon, H. Improvement of vibrational comfort on agricultural vehicles by passive and semi-active cabin suspensions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49(3):431–440, dez. 2005.
(Citado na página 84)

- [66] Nordstrom, K. I. *Discomfort Transmission: A Method for Measuring the Ride Comfort of Full-Suspension Mountain Bicycles*. Dissertação de mestrado, Department of Mechanical Engineering, University of Victoria, Colúmbia Britânica, Canadá, 2000.
(Citado na página 84)
- [67] Goldman, D. E. e Gierke, H. E. *The effects of shock and vibration on man: a report*. Number 60-3, Bethesda, Estados Unidos: Naval Medical Research Institute, 1960.
(Citado na página 84)
- [68] Donati, P. Evaluation of occupational exposures to hand-transmitted vibration: frequency weighting and exposure duration (a preliminary survey). Em *Proceedings...*, Vandœuvre, França, 2001. EC Biomed II concerted action, Vibration injury network.
(Citado na página 84)
- [69] Griffin, M. J. Perception of vibration in transport. Em *Proceedings...*, number 511, Nápoles, Itália, 2003. 5th European Conference on Noise Control - Euronoise.
(Citado na página 84)
- [70] Kjellberg, A. Psychological aspects of occupational vibration. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 16:39–43, 1990.
(Citado na página 84)
- [71] Jönsson, P. e Johansson, O. Prediction of vehicle discomfort from transient vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 282 (3-5):1043–1064, abr. 2005.
(Citado na página 85)
- [72] Ljungberg, J. K. e Nelly, G. Cognitive after-effects of vibration and noise exposure and the role of subjective noise sensitivity. *Journal of Occupational Health*, 49(2):111–116, mar. 2007.
(Citado na página 85)

- [73] Duarte, M. L. M. e Pereira, M. B. Vision influence on whole-body human vibration comfort levels. *Shock and Vibration*, 13: 367-377, 2006.
(Citado na página 85)
- [74] Nawayseh, N. e Griffin, M. J. Non-linear dual-axis biodynamic response to fore-and-aft whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 282(3-5):831 – 862, abr. 2005.
(Citado na página 85)
- [75] Qiu, Y. e Griffin, M. J. Transmission of roll, pitch and yaw vibration to the backrest of a seat supported on a non-rigid car floor. *Journal of Sound and Vibration*, 288(4-5):1197–1222, dez. 2005.
(Citado na página 85)
- [76] Paddan, G. S. e Griffin, M. J. Evaluation of whole-body vibration in vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, 253(1):195–213, maio 2002.
(Citado na página 85)
- [77] BS 6841 - Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. British Standards Institution, Londres, Inglaterra, 1987.
(Citado na página 86)
- [78] Parsons, K. C. e Griffin, M. J. Whole-body vibration perception thresholds. *Journal of Sound and Vibration*, 121(2):237–258, mar. 1988.
(Citado na página 86)
- [79] Schaefer, R. L.; Bitencourt, R. F.; Teixeira, J. A. M. S.; Gerges, S. N. Y. e Iturrieta, C. N. Aircraft vibration perception in a laboratory situation. Em *Proceedings...*, Gramado, Rio Grande do Sul, 2009. 20th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM.
(Citado nas páginas 86 e 97)

- [80] Mansfield, N. J. e Griffin, M. J. Difference thresholds for automobile seat vibration. *Applied Ergonomics*, 31(3):255–261, jun. 2000.
(Citado na página 87)
- [81] Bellmann, M. A. e Remmers, H. Evaluation of vibration perception in passenger vehicles and aircrafts. Em *Proceedings...*, number 489, Nápoles, Itália, 2003. 5th European Conference on Noise Control - Euronoise.
(Citado na página 87)
- [82] Misael, M. R. *Conforto humano aos níveis de vibração*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2001.
(Citado na página 87)
- [83] Balbinot, A. *Caracterização dos níveis de vibração em motoristas de ônibus*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2001.
(Citado na página 88)
- [84] Balbinot, A. e Tamagna, A. Avaliação da transmissibilidade de vibração em bancos. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, 18(1):31–38, jan.-abr. 2002.
(Citado na página 88)
- [85] Qassem, W.; Othman, M. O. e Abdul-Majeed, S. The effects of vertical and horizontal vibrations on the human body. *Medical Engineering & Physics*, 16(2):151–161, 1994.
(Citado na página 89)
- [86] Paddan, G. S. e Griffin, M. J. Effect of seating on exposures to whole-body vibrations in vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, 253(1):215–241, maio 2002.
(Citado na página 89)

- [87] Jang, H.-K. e Griffin, M. J. Effect of phase, frequency, magnitude and posture on discomfort associated with differential vertical vibration at the seat and feet. *Journal of Sound and Vibration*, 229 (2):273–286, jan. 2000.
(Citado na página 89)
- [88] Iturrieta, C. N. Confort vibroacústico en dos tipos de asiento en aeronaves. Trabalho de Curso, Escuela de Ingeniería Civil Acústica, Universidad Austral de Chile, 2009.
(Citado nas páginas 89 e 90)
- [89] Ljungberg, J. K. Combined exposures of noise and whole-body vibration and the effects on psychological responses, a review. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 27(4): 267–279, 2008.
(Citado nas páginas 90 e 91)
- [90] Grether, W. F.; Harris, C. S.; Mohr, G. C.; C. W. Nixon, C. W.; Ohlbaum, M.; Sommer, H. C.; Thaler, V. H. e Veghte, J. H. Effects of combined heat, noise and vibration stress on human performance and physiological functions. *Aerospace Medicine*, 42(10):1092–1097, out. 1971.
(Citado na página 91)
- [91] Grether, W. F.; Harris, C. S.; Ohlbaum, M.; Sampson, P. A. e Guignard, J. C. Further study of combined heat, noise and vibration stress. *Aerospace Medicine*, 43(6):641–645, jun. 1972.
(Citado na página 91)
- [92] Sommer, H. C.; Harris, C. S.; Ohlbaum, M.; Sampson, P. A. e Guignard, J. C. Combined effects of noise and vibration on human tracking performance and response time. *Aerospace Medicine*, 44(3):276–281, mar. 1973.
(Citado na página 91)
- [93] Harris, S. C. e Shoenberger, R. W. Combined effects of broadband noise and complex waveform vibration on cognitive performance. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 51(1): 1–5, jan. 1980.
(Citado na página 91)

- [94] Seidel, H.; Harazin, B.; Pavlas, K.; Sroka, C.; Richter, J.; Blüthner, R.; Erdmann, U.; Grzesik, J.; Hinz, B. e Rothe, R. Isolated and combined effects of prolonged exposures to noise and whole-body vibration on hearing, vision and strain. *Archives of Complex Environmental Studies*, 61(1):95–106, out. 1988.
(Citado nas páginas 91 e 100)
- [95] Howarth, H. V. C. e Griffin, M. J. Subjective response to combined noise and vibration: Summation and interaction effects. *Journal of Sound and Vibration*, 143(3):443–454, dez. 1990.
(Citado nas páginas 90 e 91)
- [96] Ljungberg, J. K.; Nelly, G. e Lundström, R. Cognitive performance and subjective experience during combined exposures to whole-body vibration and noise. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 77(3):217–221, abr. 2004.
(Citado na página 91)
- [97] Ljungberg, J. K. e Nelly, G. Stress, subjective experience and cognitive performance during exposure to noise and vibration. *Journal of Environmental Psychology*, 27(1):44–54, mar. 2007.
(Citado na página 91)
- [98] Ljungberg, J. K. e Parmentier, F. B. R. Psychological effects of combined noise and whole-body vibration: a review and avenues for future research. *Institution of Mechanical Engineers. Proceedings. Part D: Journal of Automobile Engineering*, 224(D10): 1289–1302, set. 2010.
(Citado na página 90)
- [99] Dempsey, T. K.; Leatherwood, J. D. e Clevenson, S. A. Development of noise and vibration ride comfort criteria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(1):124–132, jan. 1979.
(Citado na página 91)
- [100] Sorrentino, A. Identification of a vibro-acoustic Comfort Index for aircraft: the IDEA PACI project. Em *Proceedings...*, number 538-IP, Nápoles, Itália, 2003. 5th European Conference on Noise Control - Euronoise.
(Citado na página 92)

- [101] Comissão Europeia: Diretoria Geral. Ciência, pesquisa e tecnologia. *BRITE-EURAM, un impatto misurabile: sintesi dello studio di valutazione del 1993 del programma «Tecnologie industriali e dei materiali»*. Bruxelas, Bélgica: Commissione Europea, 1994.
(Citado na página 92)
- [102] Bellmann, M. A.; Röder, A. e Remmers, H. Environmental Conditions for Cockpit and Cabin Crew Members during Lon-Haul Flights . Em *Proceedings...*, pages 414–421, Atenas, Grécia, 2005. International conference on experiments/process/system modelling/simulation/optimization, IC-EpsMsO, Patras university Press.
(Citado na página 93)
- [103] Trimmel, M.; Groll-Knapp, E.; Goger, C.; Mellert, V.; Baumann, I.; Freese, N.; Weber, R.; Bellmann, M. A. e Remmers, H. Impact of environmental conditions on comfort, motivation, task load, physiological activity, health and performance in flight attendants. Em *Proceedings...*, Kitakyushu, Japão, 2005. UOEH: Comfort in the Workplace.
(Citado na página 94)
- [104] Mellert, V.; Baumann, I.; Freese, N. e Weber, R. Impact of sound and vibration on health, travel comfort and performance of flight attendants and pilots. *Aerospace Science and Technology*, 12 (1):18–25, jan. 2008.
(Citado nas páginas 94 e 100)
- [105] Manninen, O. Further studies on changes in subjective stressfulness under various combinations of noise, vibration, temperature and work tasks. *Archives of Complex Environmental Studies*, 2(2):31–39, jan. 1990.
(Citado na página 94)
- [106] Casu, A. Rumore e vibrazioni degli aerei: la valutazione a bordo. *Tecnologie & Soluzioni per l'ambiente e il lavoro sicuro*, 2013(1):28–35, mar. 2013.
(Citado na página 94)

- [107] Fernandes, M. e Morata, T. C. Estudo dos efeitos auditivos e extra-auditivos da exposição ocupacional a ruído e vibração. *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, 68(5):705–713, 2002.
(Citado na página 94)
- [108] D’Ischia, M.; Paonessa, A. e Brindisi, A. Noise Annoyance in Civil Aircraft Cabins: Analysis of an ANN-Based Evaluation Model. Em *Proceedings...*, Lille, França, 2007. 1st Forum on effective solutions for managing occupational noise risks, Noise at Work 2007.
(Citado na página 95)
- [109] Sorrentino, A. e Concilio, A. Model of a generic aircraft passenger using artificial neural networks. Em *Proceedings...*, Garmisch-Partenkirchen, Alemanha, 2000. 7th International Congress on Sound and Vibration.
(Citado na página 95)
- [110] Andrade, A. L. D.; Cruz, R. M.; Paul, S. e Bitencourt, R. F. Construção de escalas de diferencial semântico: medida de avaliação de sons no interior de aeronaves. *Avaliação Psicológica*, 8(2):197–208, ago. 2009.
(Citado na página 95)
- [111] Jones, D. M. Recent advances in the study of human performance in noise. *Environment International*, 16(4-6):447–458, dez. 1990.
(Citado na página 100)
- [112] Moore, B. C. J. *An Introduction to the psychology of hearing*. 2ª edição. Londres, Inglaterra: London Academic Press, 1982.
(Citado na página 129)
- [113] Hood, J. D. Studies in auditory fatigue and adaptation. *Acta Oto-Laryngologica*, 52(2):1–57, 1950.
(Citado na página 129)
- [114] Carterette, E. C. Loudness Adaptation for Bands of Noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(5):865–871, 1956.
(Citado na página 130)

- [115] D'Alessandro, L. M. e Norwich, K. H. Loudness adaptation measured by the simultaneous dichotic loudness balance technique differs between genders. *Hearing Research*, 247(2):122–127, jan. 2009.
(Citado na página 130)
- [116] Nyqvist, H. T. Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors. *Physical Review*, 32:110–113, jul. 1928.
(Citado na página 130)
- [117] Hellmann, R. P.; Miśkiewicz, A. e Scharf, B. Loudness adaptation and excitation patterns: effects of frequency and level. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(4):2176–2185, abr. 1997.
(Citado na página 130)
- [118] Hashimoto, T. Temporal Variation of Sound Quality under long-Term Exposure of Car Interior Noise and Seat-Floor Vibration. Em *Proceedings...*, Sevilha, Espanha, 2002. Forum Acusticum.
(Citado na página 131)
- [119] Norwich, K. H. A mathematical exploration of the mystery of loudness adaptation. *Bulletin of Mathematical Biology*, 72(2): 298–313, out. 2009.
(Citado na página 131)
- [120] Duarte, M. L. M.; Pereira, M. B.; Misael, M. R. e Freitas Filho, L. E. A. F. F. A. Comparing Gender Influence against Age, Corporal Mass Index and Vision on Comfort Levels to Whole-body Human Vibration. Em *Proceedings...*, Rio de Janeiro, RJ, 2005. 7th International Congress and Exposition of Noise Control Engineering (INTERNOISE).
(Citado nas páginas 220 e 228)

Apêndices

A Resultados extras do ensaio preliminar de conforto

Aqui serão apresentados os resultados complementares do ensaio relatado na Seção 4.3. Serão mostrados os diagramas referentes aos 6 grupos, para cada item e cada método, excetuando-se o par “confortável/desconfortável” (para DS) e o item “conforto” (para ER), já mostrados e analisados na respectiva seção. Assim, serão mostrados nas Figuras de A.1 a A.8 os diagramas de caixas referentes aos itens mostrados na Tabela A.1.

Tabela A.1.: Itens cujos resultados serão mostrados nas páginas a seguir, referentes ao ensaio preliminar de conforto.

Figura	Par DS	Figura	Item ER
A.1	forte fraco	A.2	intensidade
A.3	constante inconstante	A.4	constância
A.5	suportável insuportável	A.6	suportabilidade
A.7	perturbador não-perturbador	A.8	perturbação

Na Figura A.9 estão mostradas as medianas das avaliações de todos os itens da ER, separados por grupo. Em todos os gráficos, foram adicionadas linhas entre os pontos equivalentes a cada item apenas para facilitar a visualização e comparação.

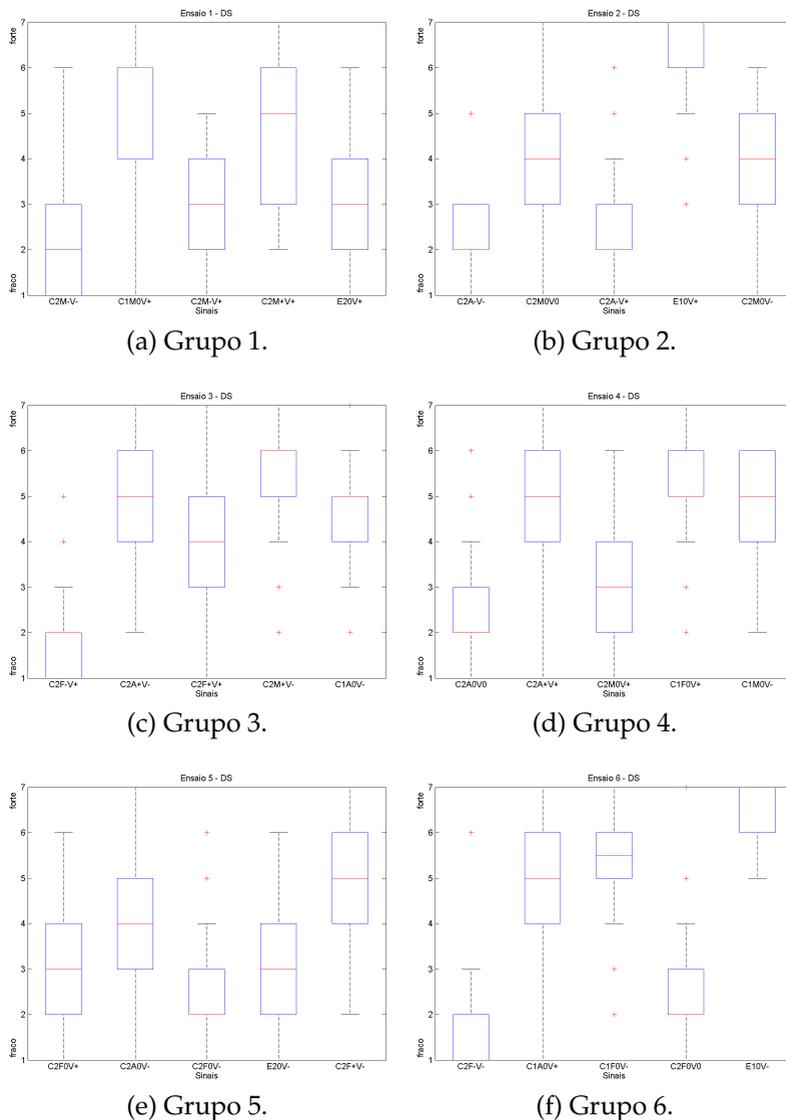
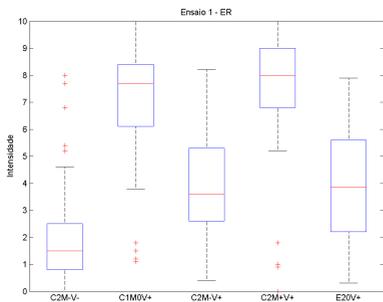
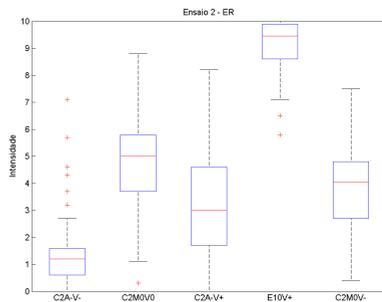


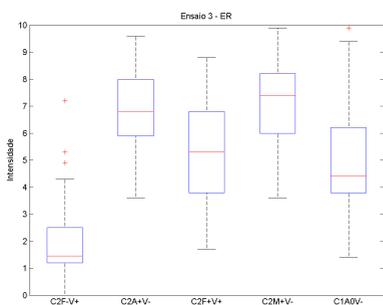
Figura A.1.: Diagramas de caixa resultantes das respostas para o par “forte/fraco” utilizando DS no ensaio preliminar.



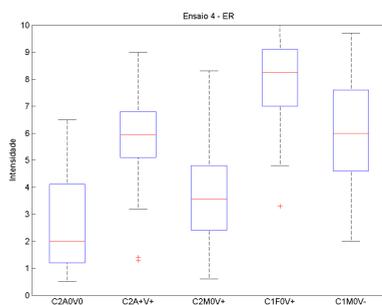
(a) Grupo 1.



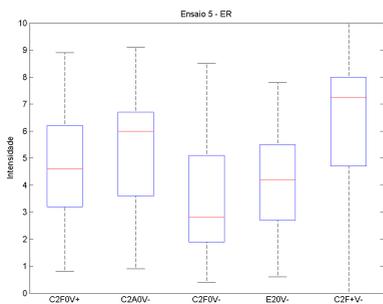
(b) Grupo 2.



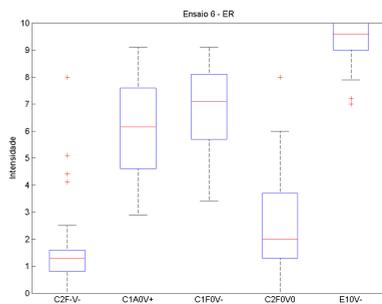
(c) Grupo 3.



(d) Grupo 4.



(e) Grupo 5.



(f) Grupo 6.

Figura A.2.: Diagramas de caixa resultantes das respostas para o item “intensidade” utilizando ER no ensaio preliminar.

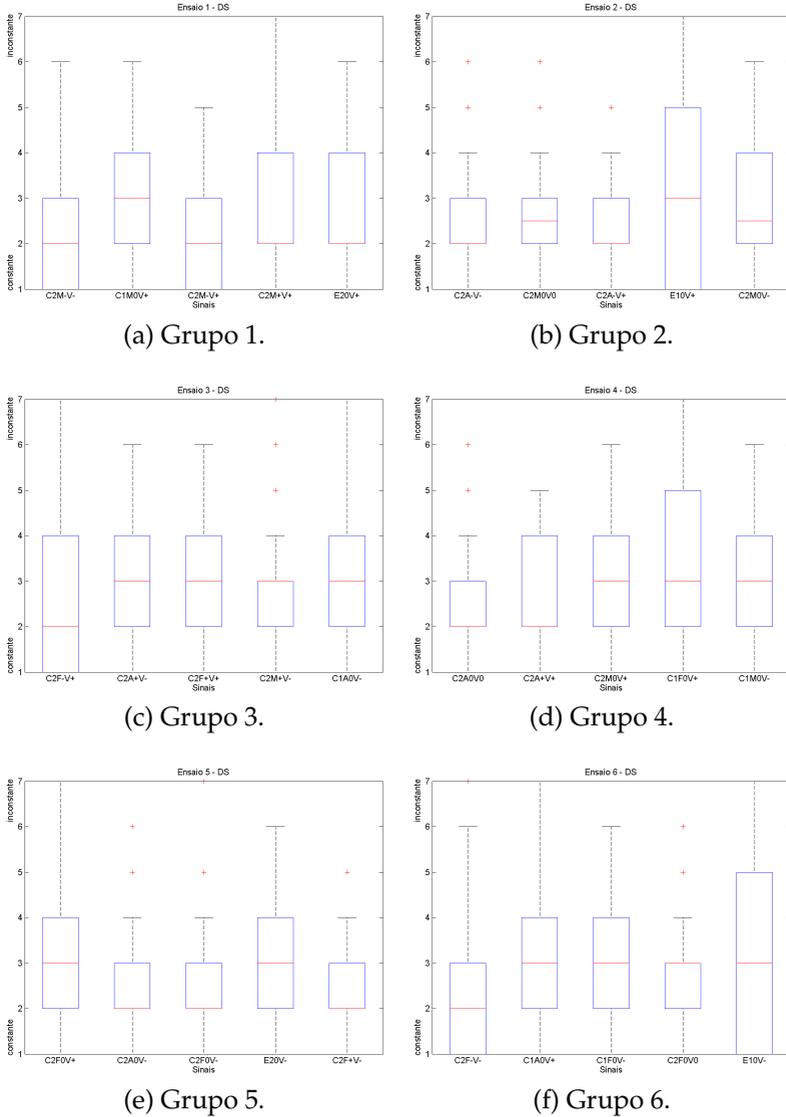
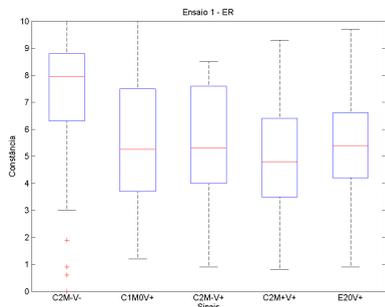
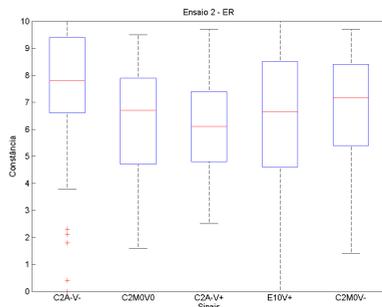


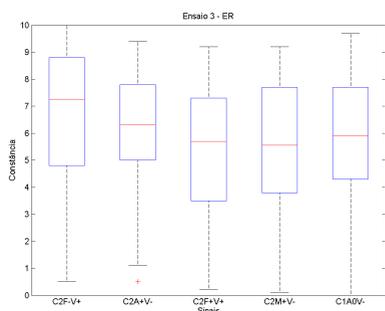
Figura A.3.: Diagramas de caixa resultantes das respostas para o par “constante/inconstante” utilizando DS no ensaio preliminar.



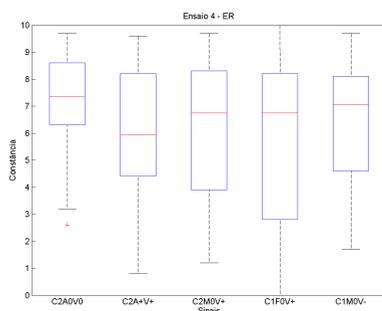
(a) Grupo 1.



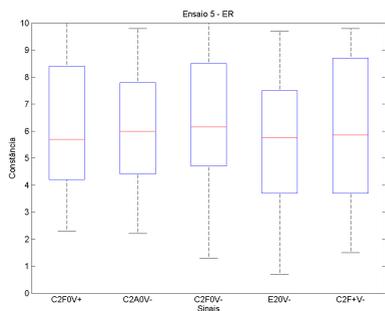
(b) Grupo 2.



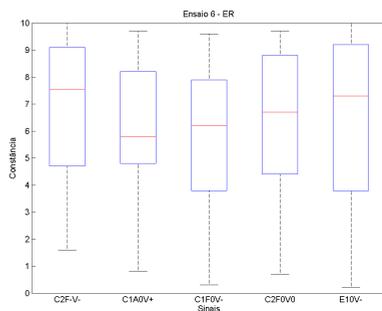
(c) Grupo 3.



(d) Grupo 4.



(e) Grupo 5.



(f) Grupo 6.

Figura A.4.: Diagramas de caixa resultantes das respostas para o item “constância” utilizando ER no ensaio preliminar.

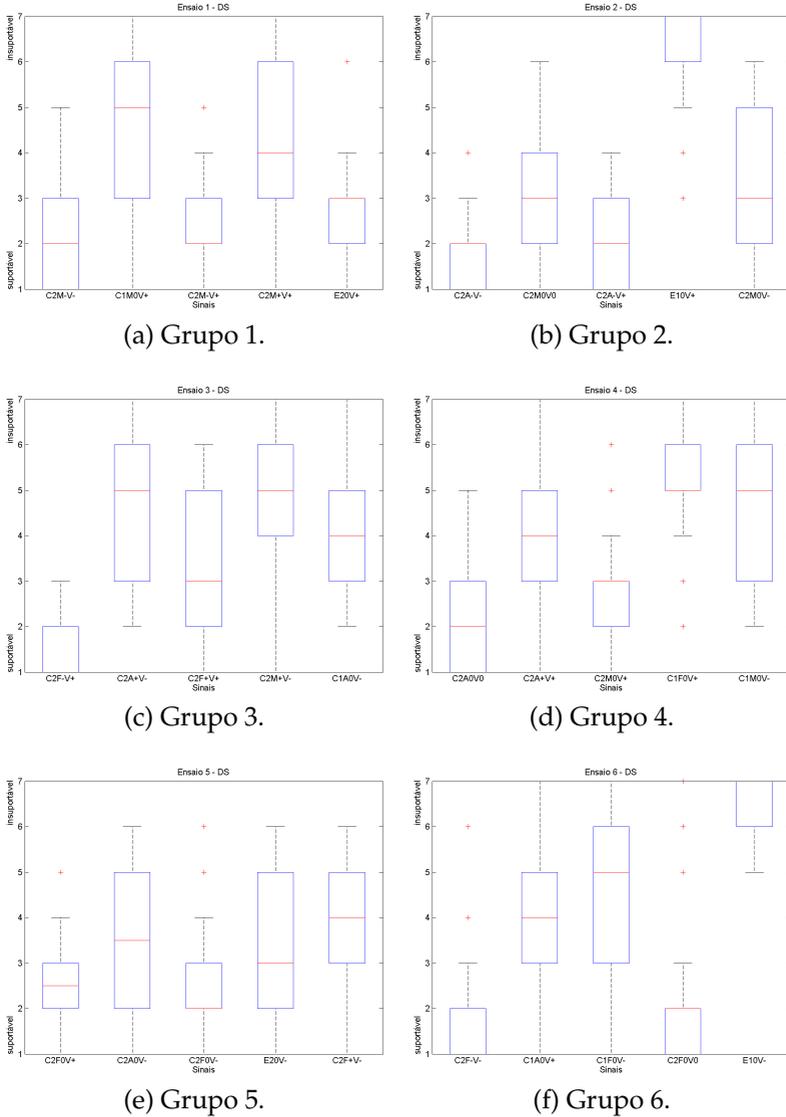
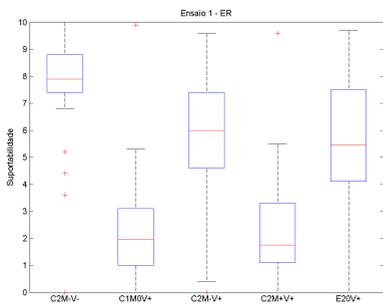
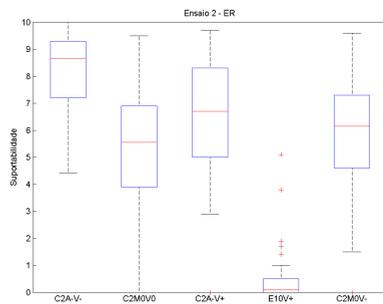


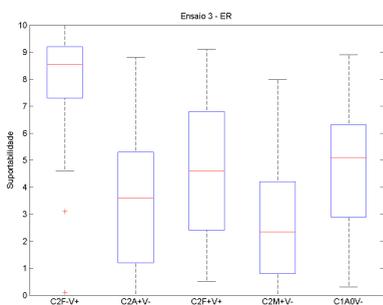
Figura A.5.: Diagramas de caixa resultantes das respostas para o par “suportável/insuportável” utilizando DS no ensaio preliminar.



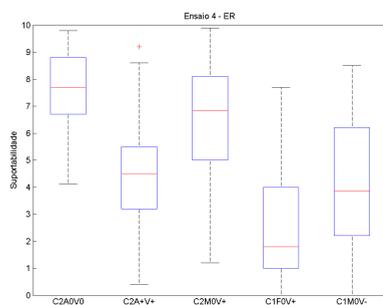
(a) Grupo 1.



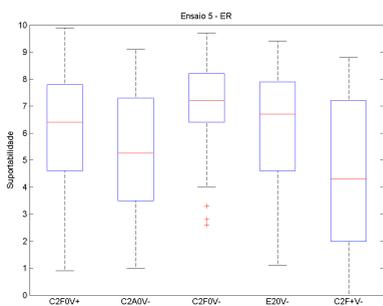
(b) Grupo 2.



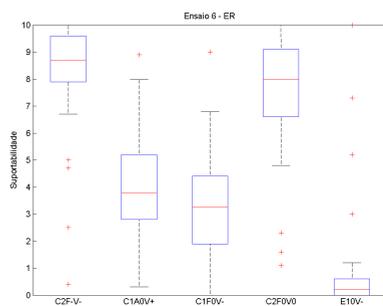
(c) Grupo 3.



(d) Grupo 4.

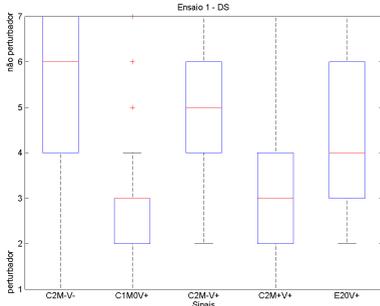


(e) Grupo 5.

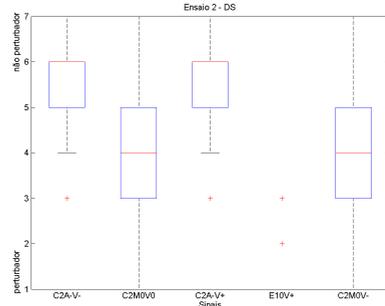


(f) Grupo 6.

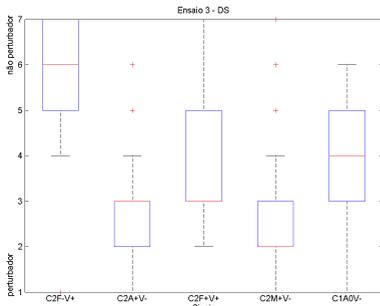
Figura A.6.: Diagramas de caixa resultantes das respostas para o item "suportabilidade" utilizando ER no ensaio preliminar.



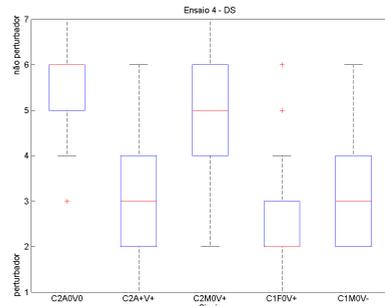
(a) Grupo 1.



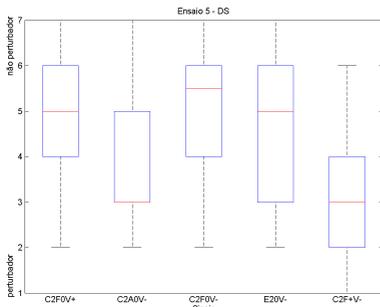
(b) Grupo 2.



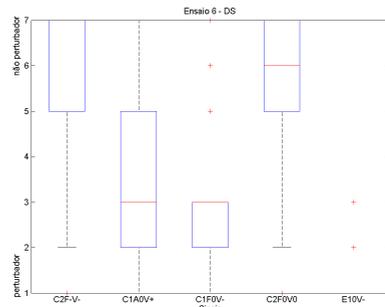
(c) Grupo 3.



(d) Grupo 4.

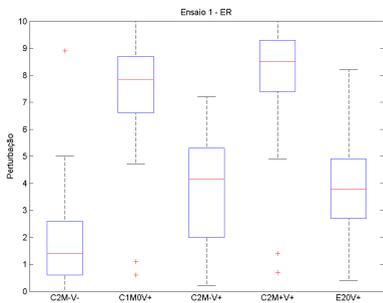


(e) Grupo 5.

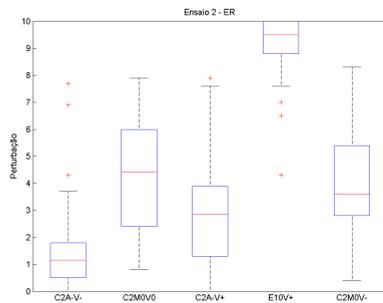


(f) Grupo 6.

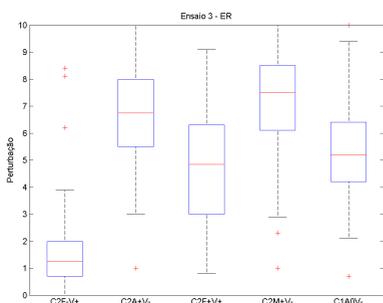
Figura A.7.: Diagramas de caixa resultantes das respostas para o par “perturbador/não-perturbador” utilizando DS no ensaio preliminar.



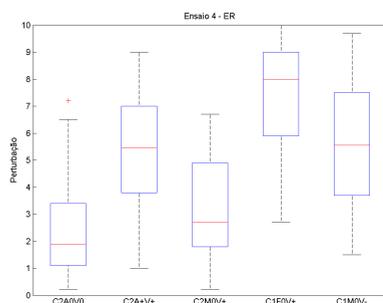
(a) Grupo 1.



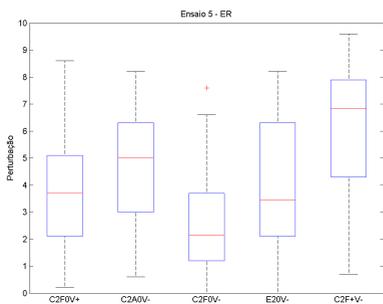
(b) Grupo 2.



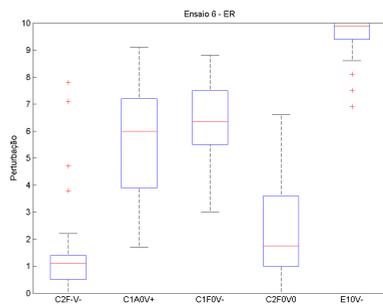
(c) Grupo 3.



(d) Grupo 4.

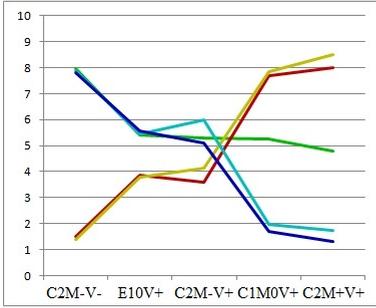


(e) Grupo 5.

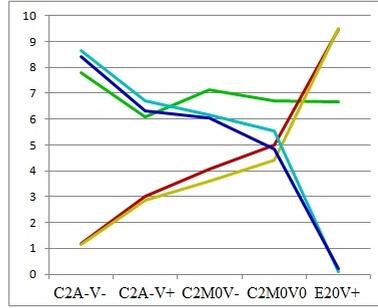


(f) Grupo 6.

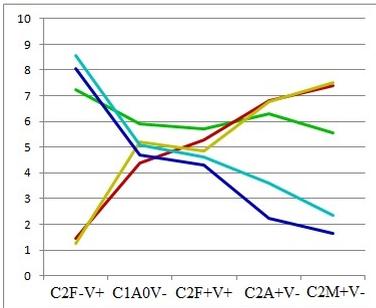
Figura A.8.: Diagramas de caixa resultantes das respostas para o item “perturbação” utilizando ER no ensaio preliminar.



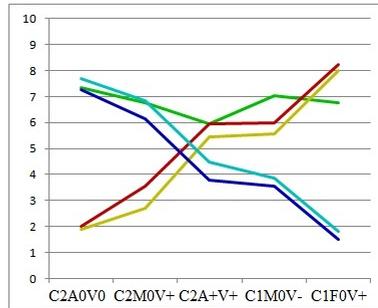
(a) Grupo 1.



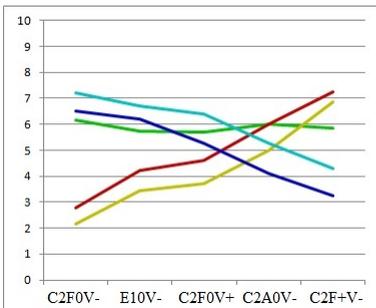
(b) Grupo 2.



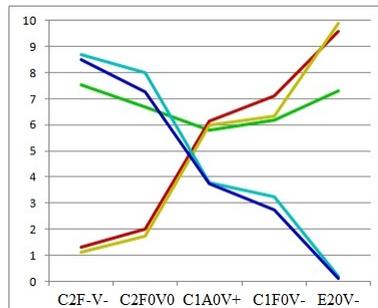
(c) Grupo 3.



(d) Grupo 4.



(e) Grupo 5.



(f) Grupo 6.

— Constância — Intensidade — Perturbação — Suportabilidade — Conforto

Figura A.9.: Medianas das avaliações de todos os itens utilizando ER no ensaio preliminar, separadas por grupo.

B Resultados extras do ensaio final para modelo de conforto

Neste Apêndice encontram-se os resultados complementares referentes ao ensaio descrito no Capítulo 7.

B.1 Análises de Componentes Principais

Para verificar se há diferença entre as respostas de cada um dos estímulos, foi feita uma Análise de Componentes Principais (ACP), com a Figura B.1 mostrando o cruzamento dos Fatores 1 e 2.

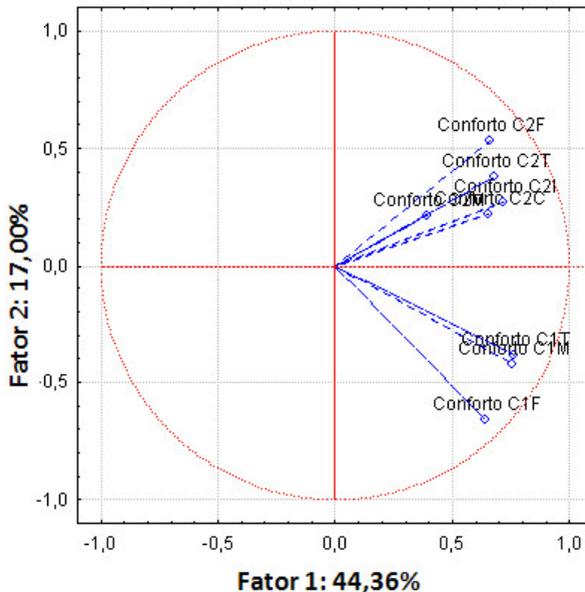


Figura B.1.: ACP da avaliação de conforto dos estímulos do ensaio final, cruzamento dos Fatores 1 e 2.

Percebe, pelo segundo fator, que há dois agrupamentos, e justamente entre os sinais de aeronaves diferentes: na metade inferior encontram-se as respostas para C1 e, na superior, as referentes a C2.

Era de se esperar que, havendo agrupamento, a primeira separação seria entre as aeronaves, até pela proximidade maior nas características dos estímulos. Devido à baixa relevância obtida nos dois primeiros fatores, também fez-se uma verificação dos dois seguintes, como se vê na Figura B.2.

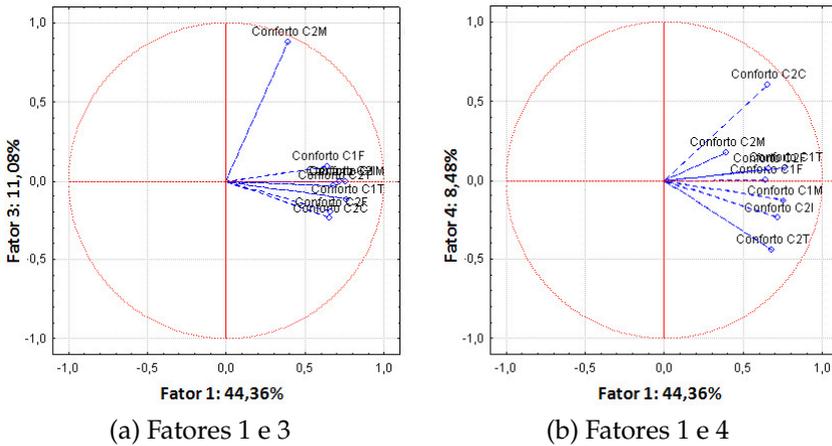


Figura B.2.: ACP da avaliação de conforto dos estímulos do ensaio final, cruzamento entre o Fator 1 e os Fatores 3 e 4.

Com o Fator 3, ainda se vê um comportamento diferenciado do estímulo C2M, enquanto que o Fator 4 agrupou todos os sinais, com um pouco de destaque para o C2C.

A seguir, seguem-se os resultados de ACP referentes às avaliações de ruído e vibração, para comparação com os resultados mostrados nas Figuras B.1 e B.2. Assim como ocorreram naqueles casos, tem-se uma separação de aeronaves nos Fatores 1 e 2 (Figuras B.3 (a) e B.4a), e do estímulo C2M nos Fatores 1 e 3 (Figuras B.3 (b) e B.4b).

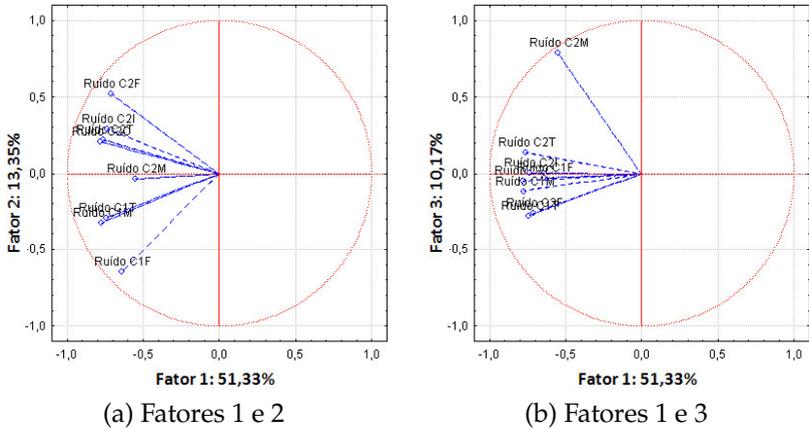


Figura B.3.: ACP da avaliação de ruído dos estímulos do ensaio final.

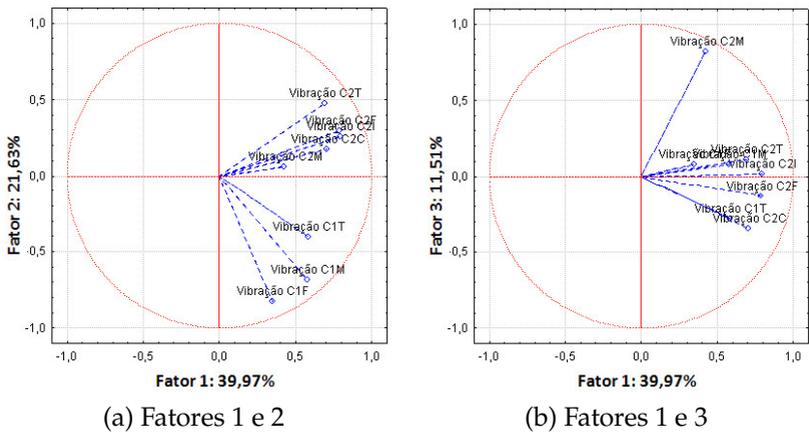


Figura B.4.: ACP da avaliação de ruído dos estímulos do ensaio final.

Têm-se também os diagramas de caixa de ruído e vibração, para comparar com os resultados de conforto mostrados na Figura 7.7.

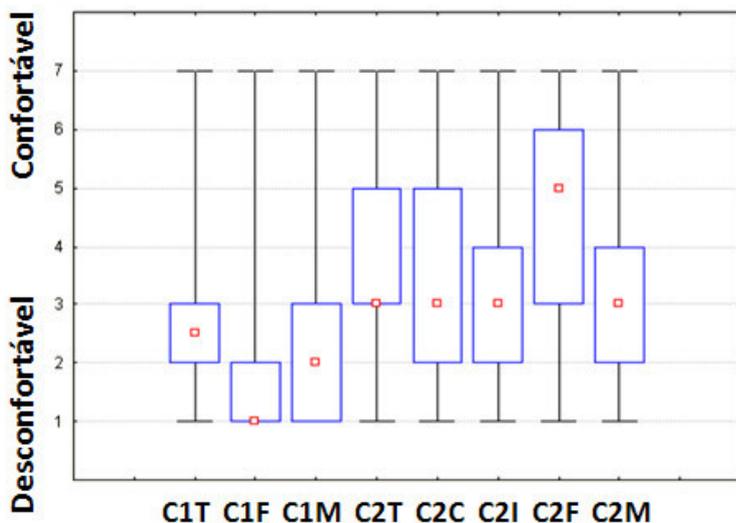


Figura B.5.: Diagrama de caixas para avaliação do conforto relativo apenas ruído no ensaio final.

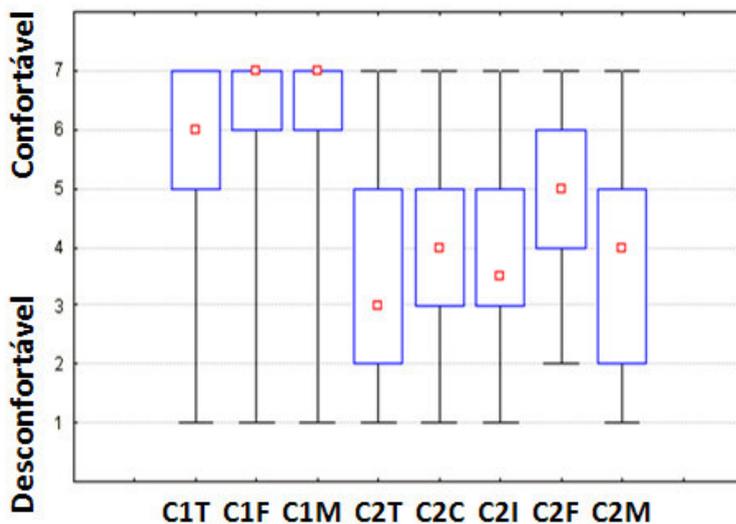


Figura B.6.: Diagrama de caixas para avaliação do conforto relativo apenas à vibração, no ensaio final.

B.2 Regressões lineares extras

Seguem as regressões lineares referentes às avaliações de ruído e vibração relativos aos seus respectivos parâmetros, vistos nas Subseções 7.2.1 a 7.2.6.

Da Figura B.7 à Figura B.10 estão mostrados os resultados dos modelos psicoacústicos referentes à avaliação do conforto relativo apenas ao ruído (pontos azuis), enquanto que da Figura B.11 à Figura B.17 estão mostrados os resultados dos modelos “psicovibratórios” referentes à avaliação do conforto relativo apenas à vibração (pontos vermelhos).

Os pontos em azul e vermelho referem-se apenas à avaliação média de cada estímulo, porém cada um dos modelos de regressão foi construído utilizando todas as avaliações dos jurados.

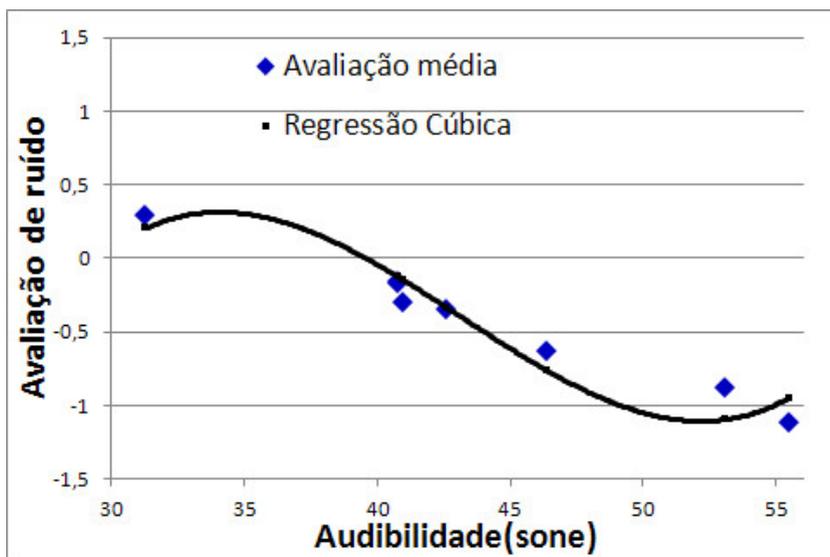


Figura B.7.: Regressão cúbica do modelo de audibilidade para o item Ruído no ensaio final.

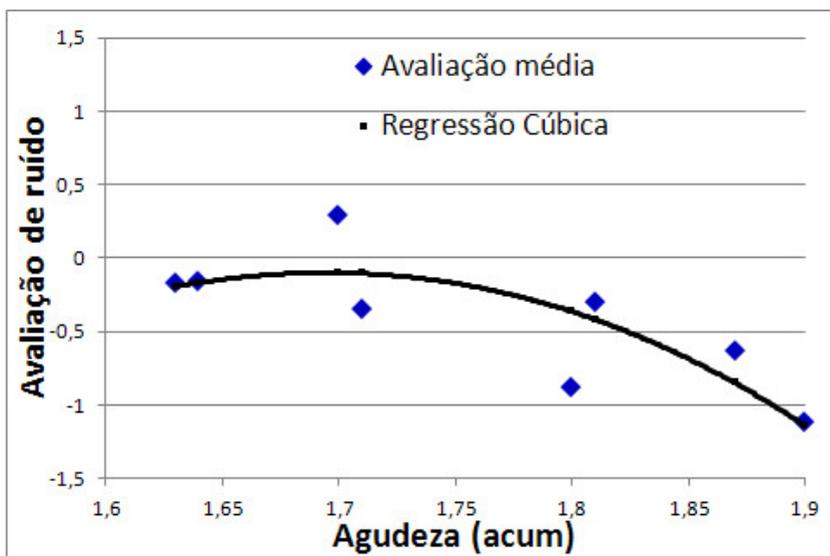


Figura B.8.: Regressão cúbica do modelo de agudeza para o item Ruído no ensaio final.

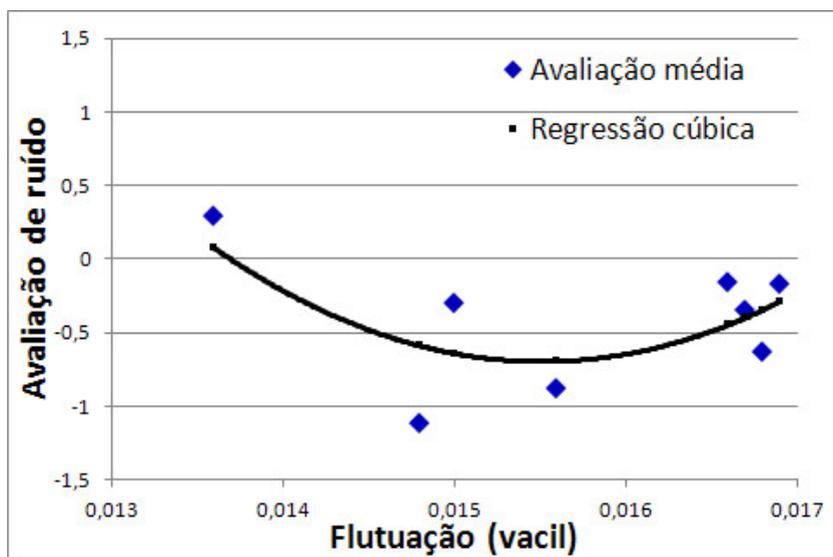


Figura B.9.: Regressão cúbica do modelo de flutuações lentas para o item Ruído no ensaio final.

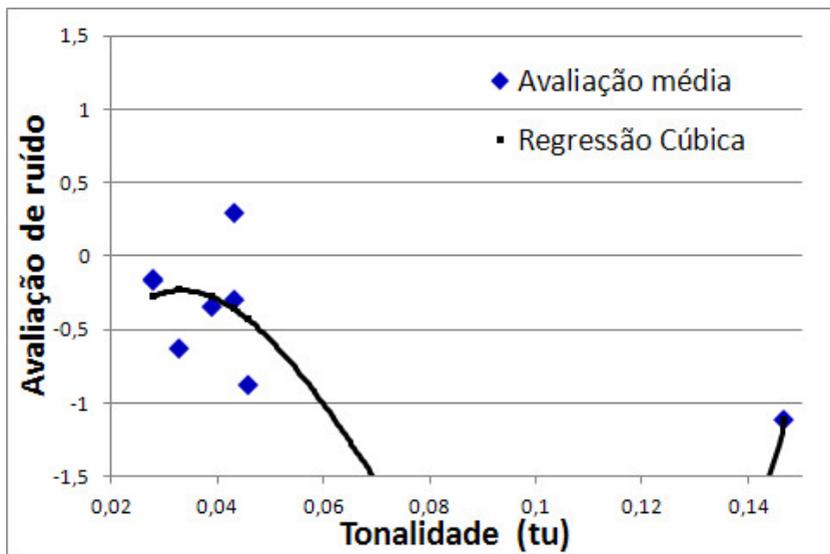


Figura B.10.: Regressão cúbica do modelo de tonalidade para o item Ruído no ensaio final.

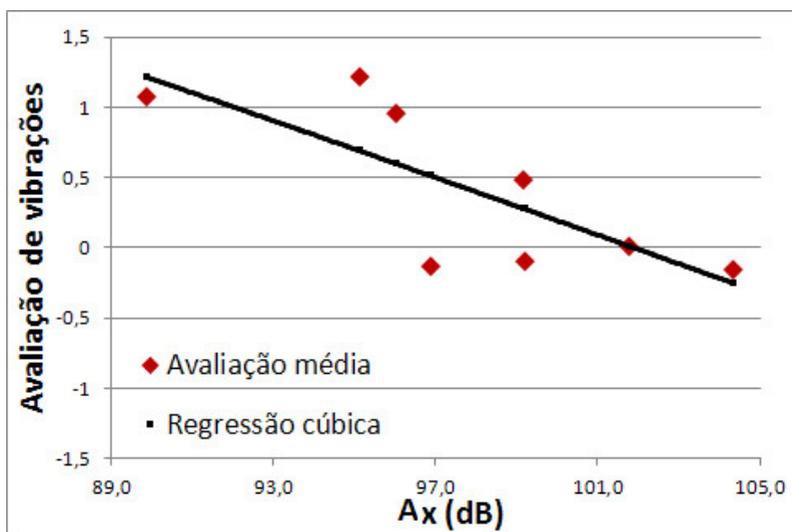


Figura B.11.: Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada frontal para o item Vibrações no ensaio final.

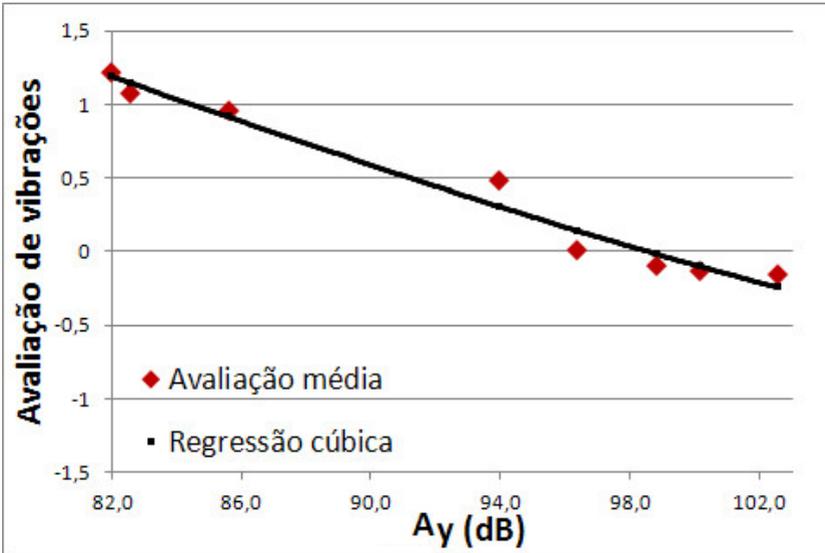


Figura B.12.: Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada lateral para o item Vibrações no ensaio final.

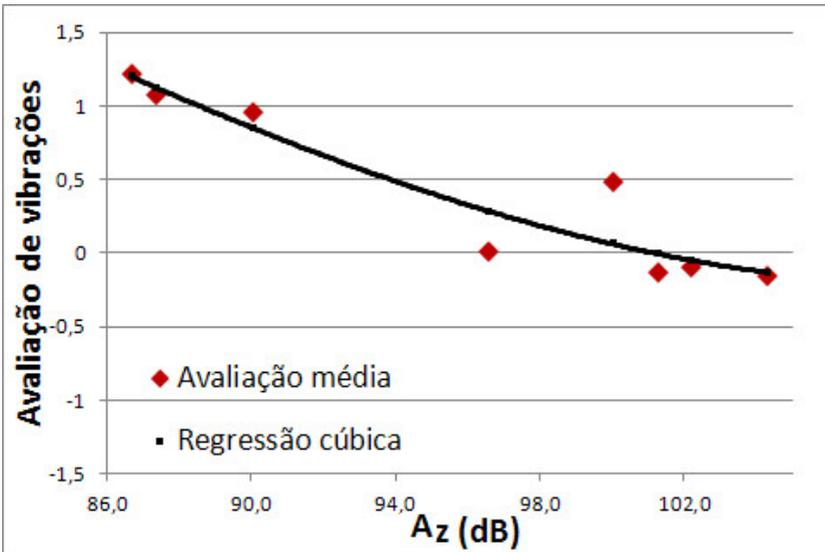


Figura B.13.: Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada vertical para o item Vibrações no ensaio final.

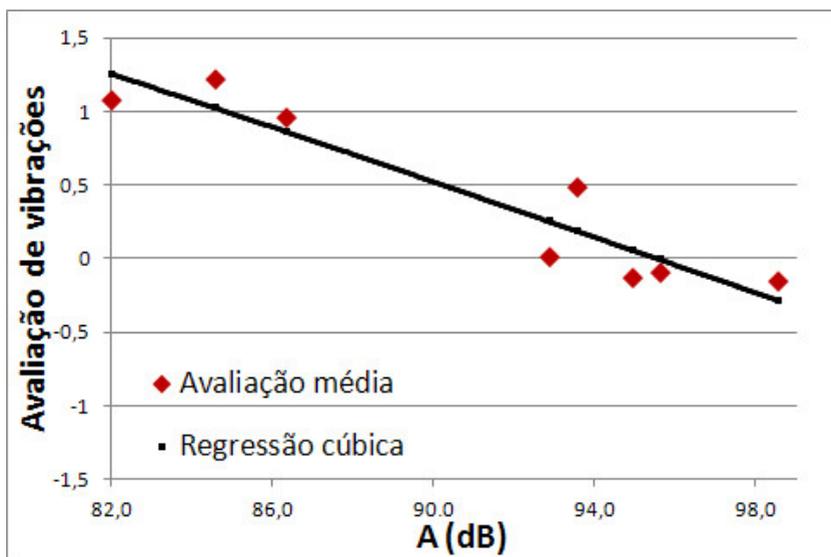


Figura B.14.: Regressão cúbica do modelo de aceleração ponderada resultante para o item Vibrações no ensaio final.

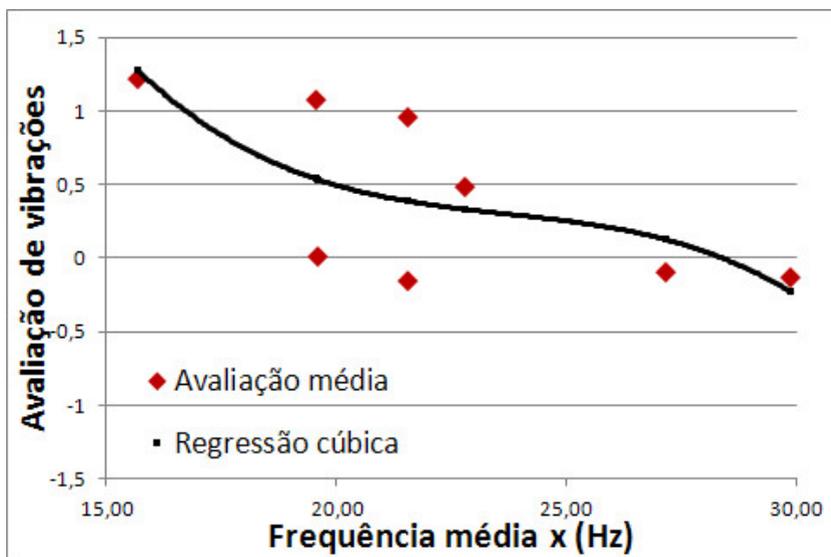


Figura B.15.: Regressão cúbica do modelo de frequência central na direção frontal para o item Vibrações no ensaio final.

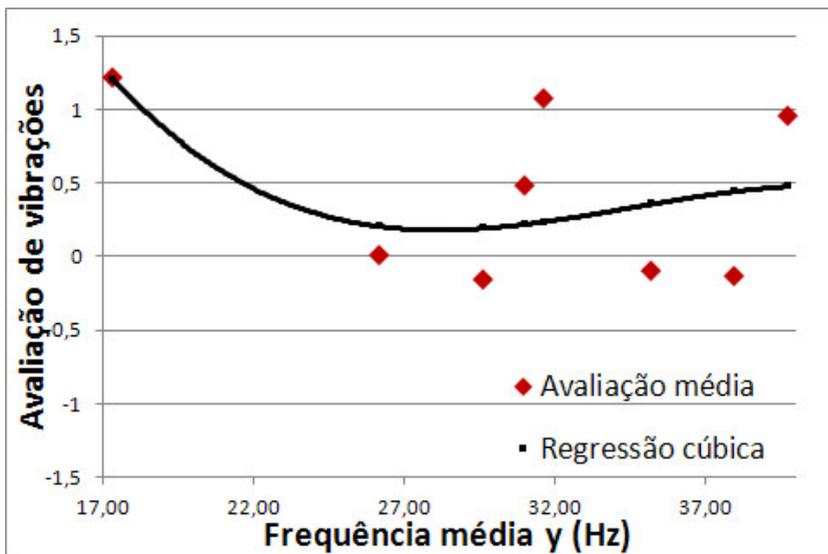


Figura B.16.: Regressão cúbica do modelo de frequência central na direção lateral para o item Vibrações no ensaio final.

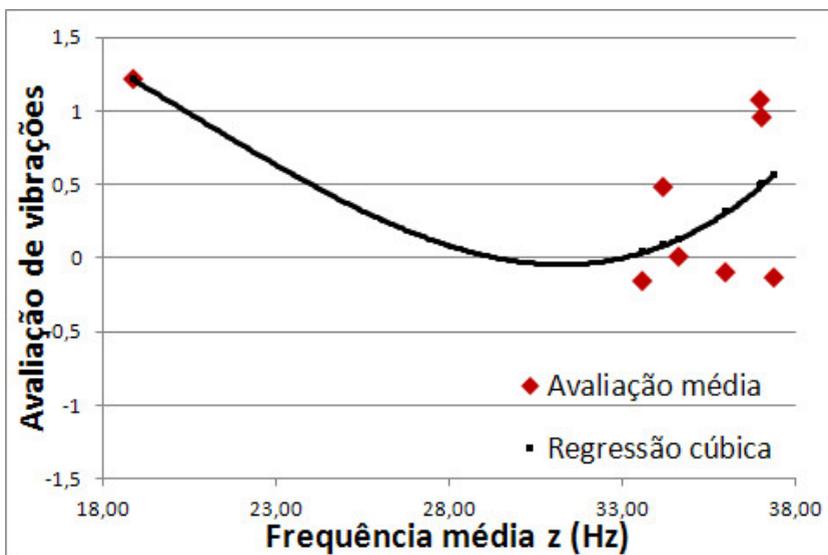


Figura B.17.: Regressão cúbica do modelo de frequência central na direção vertical para o item Vibrações no ensaio final.

B.3 Modelos finais de redes neurais artificiais

Seguem as funções usadas para gerar o modelo final de redes neurais artificiais visto na Subseção 7.2.9.

Nas figuras de B.18 a B.26 é possível visualizar as variações de cada parâmetro para cada um dos modelos.

Por fim, na Tabela B.1 estão mostrados os valores de sensibilidade de cada um dos parâmetros em todos os modelos (inclusive o Modelo combinado final, assinalado como “T”).

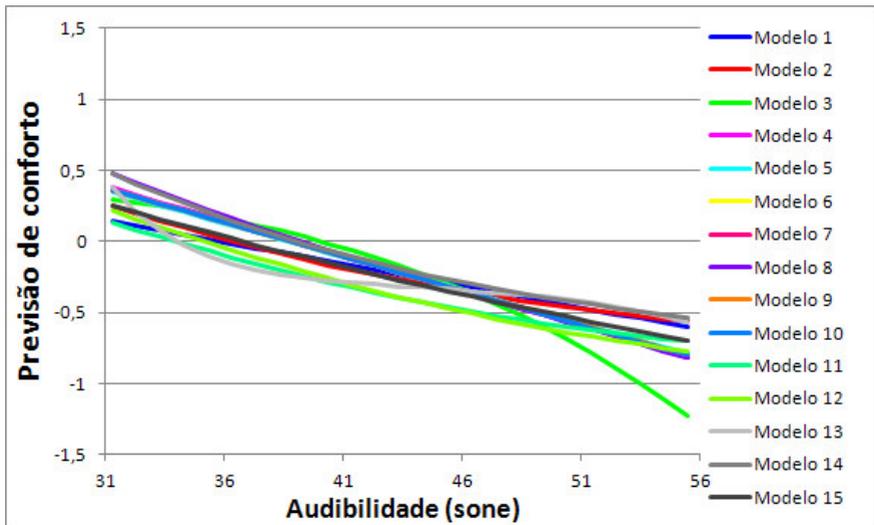


Figura B.18.: Influência da Audibilidade para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.

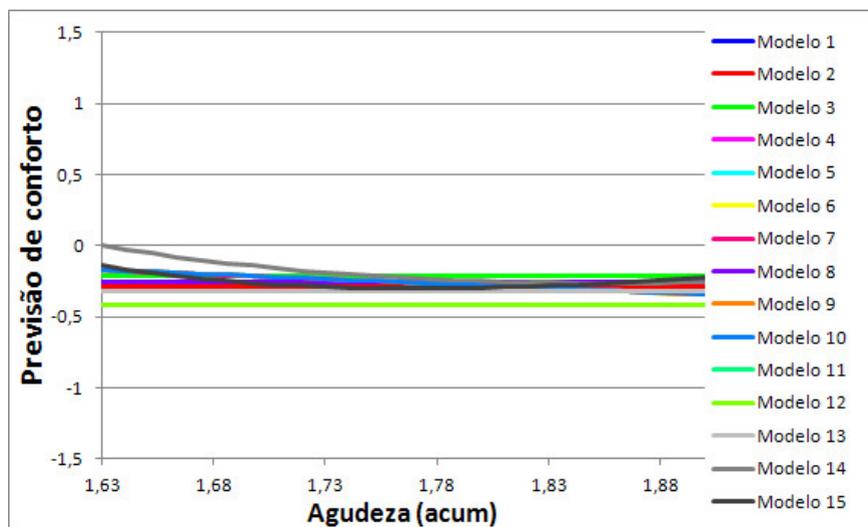


Figura B.19.: Influência da Agudeza para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.

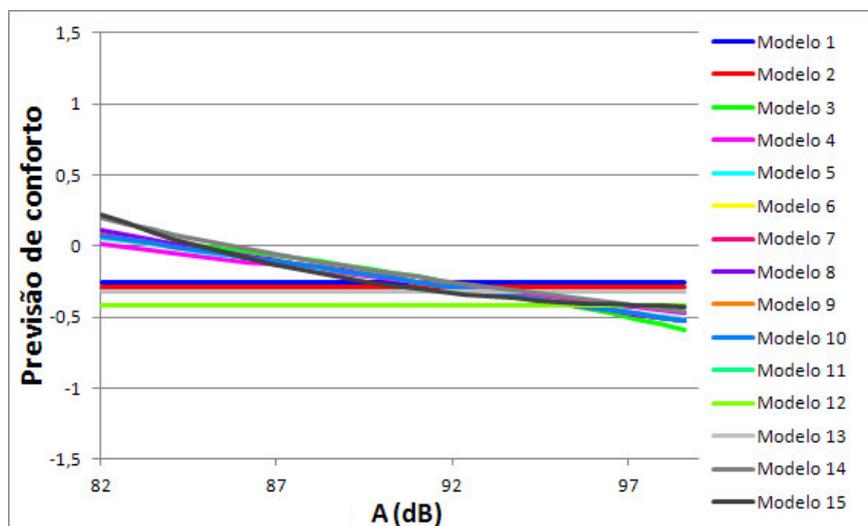


Figura B.20.: Influência da Aceleração ponderada resultante para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.

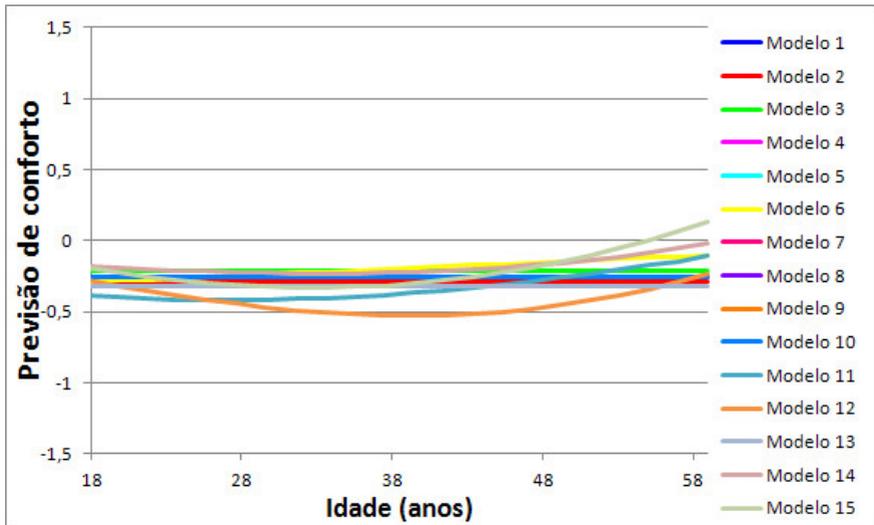


Figura B.21.: Influência da idade do voluntário para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.

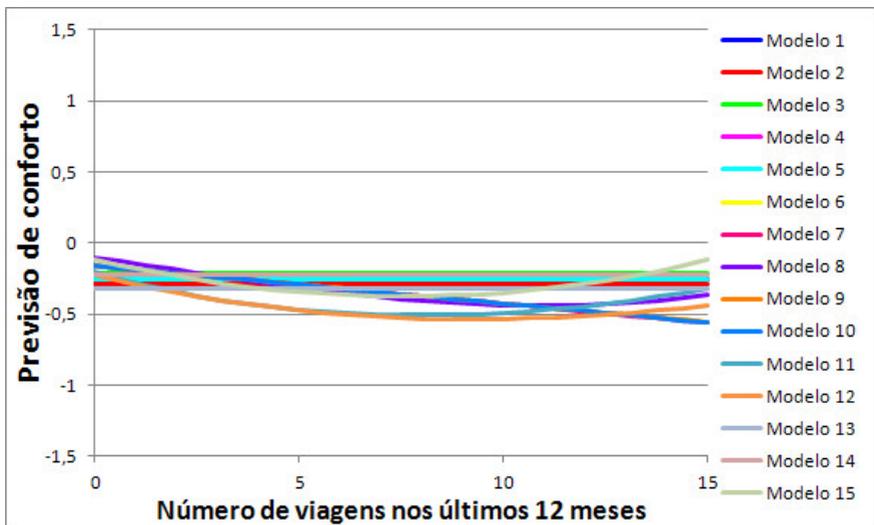


Figura B.22.: Influência do número de viagens recentes para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.

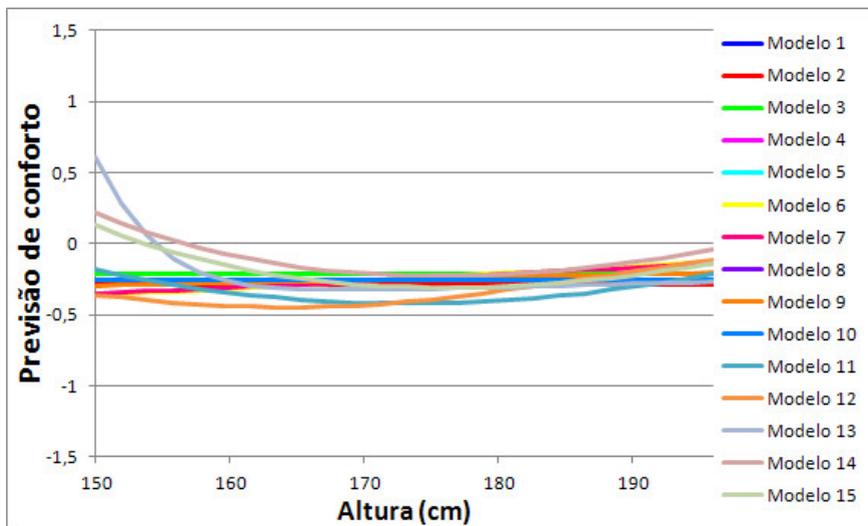


Figura B.23.: Influência da altura do voluntário para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.

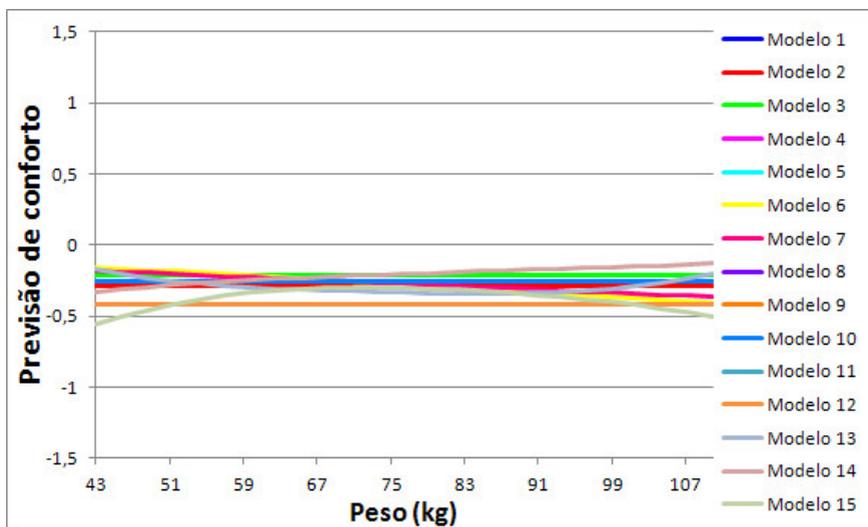


Figura B.24.: Influência do peso do voluntário para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.

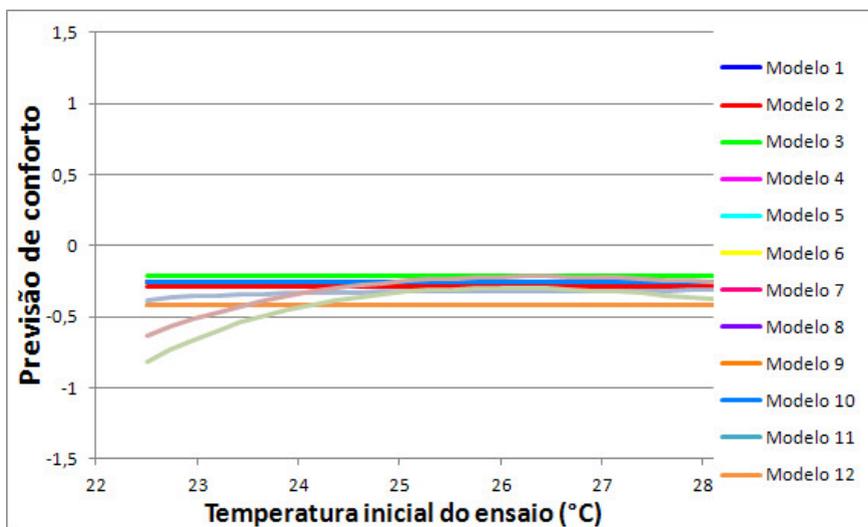


Figura B.25.: Influência da temperatura inicial da cabine para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.

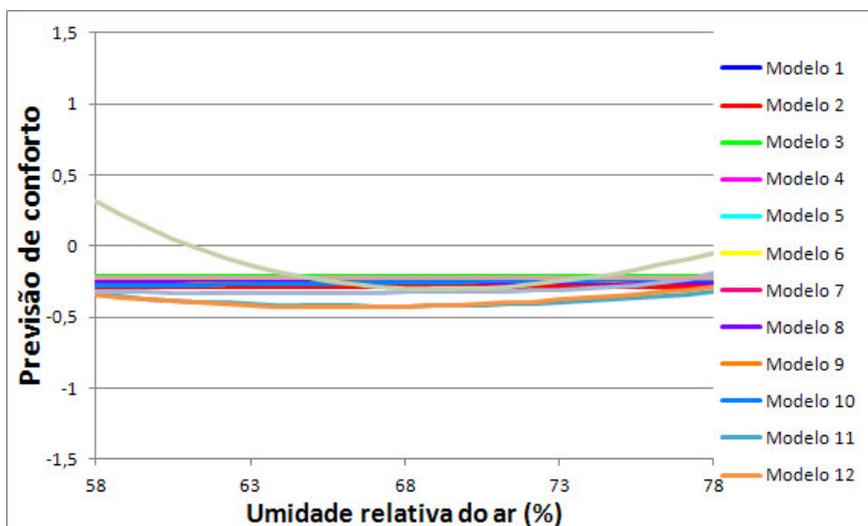


Figura B.26.: Influência da umidade do ar da cabine para o Conforto nos modelos finais de redes neurais artificiais.

Tabela B.1.: Sensibilidade dos parâmetros das redes neurais desenvolvidas para o modelo final de conforto vibroacústico.

Mod.	Sensibilidade								
	N	S	A	Id	Vi	Al	Pe	Ti	Um
1	1,06								
2	1,06								
3	1,15		1,08						
4	1,13		1,02						
5	1,12	1,01	1,03						
6	1,13	1,01	1,04		1,01	1,00	1,00		1,00
7	1,13	1,01	1,03		1,01	1,00	1,00		1,00
8	1,16		1,03		1,01				
9	1,12	1,01	1,03		1,01	1,00			1,00
10	1,12	1,01	1,03		1,01				1,00
11	1,07			1,01	1,01	1,01			1,00
12	1,07			1,01	1,01	1,01			1,00
13	1,07					1,04	1,02	1,00	1,02
14	1,12	1,02	1,05	1,01		1,02	1,02	1,02	
15	1,17	1,02	1,06	1,02	1,01	1,01	1,03	1,03	1,01
T	1,03	1,00	1,11	1,00	1,00	1,01	1,01	1,00	1,00

Anexos

A Parecer do comitê de ética

PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP**DADOS DO PROJETO DE PESQUISA**

Título da Pesquisa: Modelo de conforto vibroacústico para passageiros de aeronaves

Pesquisador: Júlio Alexandre de Matheucci e Silva Teixeira

Área Temática:

Versão: 2

CAAE: 36597014.7.0000.0118

Instituição Proponente: CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 881.054

Data da Relatoria: 20/11/2014

Apresentação do Projeto:

Trata-se da versão 2 para o atendimento às pendências do Parecer Consubstanciado nº 825.500 emitido em 03/10/2014 pelo CEP/UDESC. Pesquisa vinculada ao Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina e apresentado pelo doutorando Júlio Alexandre de Matheucci e Silva Teixeira. Participam da equipe o pesquisador assistente Mateus Lopes Siviero. Informado no projeto detalhado e os pesquisadores Prof. Roberto Jordan, Dr. Eng. e Eduarda Dandolini da Silva. Consta de que serão recrutados 100 voluntários para participarem do estudo. Informa de que cada voluntário, individualmente, será exposto a estímulos vibroacústicos similares aos típicos encontrados em aeronaves comerciais, cujo resultado analisará percepção de conforto. O simulador Vibrações e Acústica está instalado nas dependências do Laboratório.

Objetivo da Pesquisa:

O objetivo primário é o de desenvolver um modelo de conforto vibroacústico para usuários de aeronaves comerciais.

Os objetivos secundários: Avaliar a influência de parâmetros psicoacústicos e biométricos na opinião subjetiva de conforto das pessoas; avaliar a influência que cada um dos estímulos, seja acústico ou vibratório, pode ter nesta opinião.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Não consta o grau de risco do qual os participantes do estudo estarão expostos durante o

Endereço: Av. Madre Benvenutta, 2007

Bairro: Itacorubi

CEP: 88.035-001

UF: SC

Município: FLORIANOPOLIS

Telefone: (48)3321-8195

Fax: (48)3321-8195

E-mail: cepsh.reitoria@udesc.br

Continuação do Parecer: 881.054

procedimento metodológica da coleta dos dados, embora o pesquisador reconheça de que poderá ocorrer riscos, porém, "informa de que os estímulos a que os usuários são submetidos já são os usuais encontrados em aeronaves em condição de cruzeiro, sendo o som possuindo, ainda mais considerando o curto tempo de ensaio, intensidade abaixo de qualquer risco previsto à perda auditiva em todo o processo. Apesar do participante ficar isolado na cabine ao longo de todo o ensaio, todo o movimento na tela será monitorado pelo pesquisador. Os equipamentos serão higienizados antes da utilização do mesmo pelo próximo participante". No Projeto datilografado é informado sobre os níveis do ruído produzidos assim descritos "Os níveis de ruído a serem utilizados nos ensaios não ultrapassam 86 dB(A). A norma NR-15 recomenda que, para a intensidade de 86 dB(A), o tempo de exposição seja de no máximo 7 horas. Já os níveis de vibração a serem utilizados estão todos abaixo de 0,7 m/s², sendo este valor máximo considerado como levemente desconfortável pela norma ISO 2631-1 (1997)".

Não informa os benefícios diretos como previsto pela Resolução 466/12 CONEP. Os benefícios indiretos ocorrerão com as publicações dos resultados em revistas científicas especializadas, e assim as empresas de aeronaves poderão utilizar-se dos dados coletados para auxiliar no desenvolvimento e construção de aviões mais confortáveis para os passageiros, se considerado o conforto vibroacústico para os passageiros

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Trata-se de uma pesquisa com ensaios em simuladores de vibroacústico e psicoacústicos e biométricos. Os dados subjetivos e objetivos dos participantes (tanto relativos aos sons e à vibração quanto dos usuários) serão analisados para criação de um modelo de conforto através de métodos estatísticos como regressão linear e redes neurais.

A apresentação do projeto básico e o projeto detalhado foi readequada e escrita com detalhamento metodológico e com a inclusão dos instrumentos da coleta de dados.

A metodologia da condução da pesquisa descreve de que serão recrutados voluntários, através de divulgação por e-mail pelo sistema da universidade, serão marcados horários com cada um para ensaios individuais. Além do teste no simulador o participante responderá a um questionário.

Descritos no Projeto Básico e detalhado os mecanismos de segurança e (dis)estresse aos sujeitos participantes do estudo.

No projeto detalhado consta o questionário e a Escala de Resposta e Diferencial Semântico, sendo

Endereço: Av. Madre Benvenutta, 2007

Bairro: Itacorubi

CEP: 88.035-001

UF: SC

Município: FLORIANOPOLIS

Telefone: (48)3321-8195

Fax: (48)3321-8195

E-mail: cepsh.reitoria@udesc.br

Continuação do Parecer: 881.054

possível constatar de que tais instrumentos são simples e fácil preenchimento.

Igualmente, encontra-se descritos os níveis de ruídos: "Os níveis de ruído a serem utilizados nos ensaios não ultrapassam 86 dB(A). A norma NR-15 recomenda que, para a intensidade de 86 dB(A), o tempo de exposição seja de no máximo 7 horas. Já os níveis de vibração a serem utilizados estão todos abaixo de 0,7 m/s², sendo este valor máximo considerado como levemente desconfortável pela norma ISO 2631-1 (1997)".

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Folha de Rosto datado em 15/08/2014 e assinado pelo Diretor do Centro de Ciências da Saúde, o que gerou uma dúvida, pois todo o estudo e o pesquisador e o campo de área temática se referir a Engenharia. Na resposta incluída no Projeto Básico o pesquisador assim justifica: "A assinatura do diretor do Centro de Ciências da Saúde se faz presente porque há uma pesquisadora do curso de Fonoaudiologia. A opção foi feita em

detrimento do diretor do Centro Tecnológico porque não havia esta opção neste sistema".

Nos projetos encontram-se o questionário e a Escala de Resposta e/ou Diferencial Semântico.

O termo de Consentimento Livre e Esclarecido encontra-se redigido conforme modelo do CEP/UDESC, e conforme Resolução 466/12 CONEP. Escrito com clareza, apresentando o projeto, o objetivo, as medidas da qual será submetido o sujeito participante da pesquisa, embora não informe o grau de risco, menciona o desconforto e as medidas que serão tomadas visando minimizar ao máximo, assim descrito "Os riscos destes procedimentos serão alguma possibilidade de claustrofobia por envolver avaliação em um local fechado. Os materiais foram previamente higienizados e os níveis de vibração e ruído encontram-se em níveis seguros à sua saúde. Mesmo assim, o avaliador estará do lado de fora para qualquer eventualidade". Informa de que não será necessário responder a todas as perguntas e a liberdade em solicitar a retirada da pesquisa. O anonimato e sigilo será garantido ao identificar cada participante através de um número. É informado o nome dos pesquisadores responsáveis, com endereço e telefone, bem como o endereço e telefone do CEP/UDESC

Recomendações:

N/A

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

CUMPRIMENTO DAS PENDÊNCIAS

Endereço: Av. Madre Benvenutta, 2007**Bairro:** Itacorubi**CEP:** 88.035-001**UF:** SC**Município:** FLORIANOPOLIS**Telefone:** (48)3321-8195**Fax:** (48)3321-8195**E-mail:** cepsh.reitoria@udesc.br

Continuação do Parecer: 881.054

- 1) Estruturar melhor o Projeto Básico e o Projeto Detalhado - PENDÊNCIA CUMPRIDA, anexados novos Projetos com maior detalhamento metodológico da pesquisa.
- 2) Inserir a Escala de Resposta e/ou Diferencial Semântico - PENDÊNCIA CUMPRIDA, foi inserido no Projeto Datalhado com explicação e ilustração dos instrumentos.
- 3) Inserir o questionário - PENDÊNCIA CUMPRIDA, foi inserido no Projeto Datalhado o questionário com explicação e ilustração do instrumento.
- 4) Informar no Projeto Básico e no projeto detalhado o local e a abordagem para a seleção - PENDÊNCIA CUMPRIDA, ao informar de que os participantes serão recrutados através de divulgação por e-mail pelo sistema da universidade, serão marcados horários com cada um para ensaios individuais.
- 5) Esclarecer o cronograma da execução da pesquisa no projeto básico - PENDÊNCIA CUMPRIDA alterado o cronograma de execução cujas medidas iniciarão em novembro de 2014 e encerram em 2015.
- 6) Inserir o cronograma de execução da pesquisa também no projeto detalhado - PENDÊNCIA CUMPRIDA alterado o cronograma de execução cujas medidas iniciarão em novembro de 2014 e encerram em 2015.
- 7) Inserir na Folha de Rosto a assinatura do pesquisador, inclusive - PENDÊNCIA CUMPRIDA
- 8) Descrever no Projeto Básico e Detalhado o grau de risco aos participantes e os estresses da qual estarão sujeitos durante a pesquisa, bem como, as medidas para minimizar tais estresses e as formas de segurança para os participantes - PENDÊNCIA CUMPRIDA, descrito como "pela natureza dinâmica e interativa da avaliação e curta duração do ensaio, os graus de estresse envolvidos serão baixos".
- 9) Informar quais as medidas que serão tomadas se um participante sentir-se mal durante o teste

Endereço: Av. Madre Benvenutta, 2007

Bairro: Itacorubi

CEP: 88.035-001

UF: SC

Município: FLORIANOPOLIS

Telefone: (48)3321-8195

Fax: (48)3321-8195

E-mail: cepsh.reitoria@udesc.br

Continuação do Parecer: 881.054

no simulador, pois poderá ocorrer síndrome do pânico ou algo semelhante - PENDÊNCIA CUMPRIDA, informado de que "Os riscos destes procedimentos serão alguma possibilidade de claustrofobia por envolver avaliação em um local fechado. Os materiais foram previamente higienizados e os níveis de vibração e ruído encontram-se em níveis seguros à sua saúde. Mesmo assim, o avaliador estará do lado de fora para qualquer eventualidade".

10) Esclarecer a assinatura do Diretor do Centro de Ciências da Saúde na Folha de Rosto, uma vez que o Pesquisador Responsável declara que é do Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica - PENDÊNCIA CUMPRIDA, assim justificada: "A assinatura do diretor do Centro de Ciências da Saúde se faz presente porque há uma pesquisadora do curso de Fonoaudiologia. A opção foi feita em detrimento do diretor do Centro Tecnológico porque não havia esta opção neste sistema".

11) Inserir os membros integrantes da equipe de pesquisadores que deverão ser inscritos no Projeto Básico no campo Equipe de Pesquisa - PENDÊNCIA CUMPRIDA, ao inserir EDUARDA DANDOLINI DA SILVA.

12) Redigir o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido conforme modelo do CEP/UDESC, e conforme Resolução 466/12 CONEP - PENDÊNCIA CUMPRIDA

13) Informar sobre quais são os níveis de segurança para os estímulos vibroacústicos - PENDÊNCIA CUMPRIDA, informado no projeto detalhado "Os níveis de ruído a serem utilizados nos ensaios não ultrapassam 86 dB(A). A norma NR-15 recomenda que, para a intensidade de 86 dB(A), o tempo de exposição seja de no máximo 7 horas. Já os níveis de vibração a serem utilizados estão todos abaixo de 0,7 m/s², sendo este valor máximo considerado como levemente desconfortável pela norma ISO 2631-1 (1997)".

14) No projeto Básico no campo Identificação ID grupo, na 3ª coluna "Intervenções a serem realizadas, consta "0" (zero) quando deveria estar descrita - PENDÊNCIA CUMPRIDA.

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

Endereço: Av. Madre Benvenutta, 2007

Bairro: Itacorubi

CEP: 88.035-001

UF: SC

Município: FLORIANOPOLIS

Telefone: (48)3321-8195

Fax: (48)3321-8195

E-mail: cepsh.reitoria@udesc.br



UNIVERSIDADE DO ESTADO
DE SANTA CATARINA - UDESC



Continuação do Parecer: 881.054

Considerações Finais a critério do CEP:

O Colegiado Aprova o parecer da Relatoria, Processo Aprovado.

FLORIANOPOLIS, 22 de Novembro de 2014

Assinado por:
Luciana Dornbusch Lopes
(Coordenador)

Endereço: Av. Madre Benvenutta, 2007

Bairro: Itacorubi

CEP: 88.035-001

UF: SC

Município: FLORIANOPOLIS

Telefone: (48)3321-8195

Fax: (48)3321-8195

E-mail: cepsh.reitoria@udesc.br

B Termo de consentimento livre e esclarecido



TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

O(a) senhor(a) está sendo convidado a participar de uma pesquisa intitulada **Modelo de conforto vibroacústico para passageiros de aeronaves**, que fará uma avaliação de estímulos de aeronaves tendo como objetivo desenvolver um modelo de conforto de vibrações e ruídos para aeronaves comerciais. Os testes serão feitos a partir de um questionário pessoal e, após um período de ambientação, avaliação utilizando métodos como Diferencial Semântico e/ou Escala de Resposta. Estas medidas serão realizadas no simulador vibroacústico de aeronaves localizado no Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC. Não é obrigatório responder a todas as perguntas.

Os riscos destes procedimentos serão alguma possibilidade de claustrofobia por envolver avaliação em um local fechado. Os materiais foram previamente higienizados e os níveis de vibração e ruído encontram-se em níveis seguros à sua saúde. Mesmo assim, o avaliador estará do lado de fora para qualquer eventualidade. A sua identidade será preservada pois cada indivíduo será identificado por um número. Os benefícios e vantagens em participar deste estudo serão a possibilidade de desenvolvimento de aeronaves mais confortáveis para a população.

As pessoas que estarão acompanhando os procedimentos serão os pesquisadores Eduarda Dandolini da Silva, Mateus Lopes Siviero, o estudante de doutorado Júlio Alexandre M. S. Teixeira, o professor responsável Roberto Jordan. O(a) senhor(a) poderá retirar-se do estudo a qualquer momento, sem qualquer tipo de constrangimento.

Solicitamos a sua autorização para o uso dos seus dados para a produção de artigos técnicos e científicos. A sua privacidade será mantida através da não identificação do seu nome.

Este termo de consentimento livre e esclarecido é feito em duas vias, sendo que uma delas ficará em poder do pesquisador e outra com o sujeito participante da pesquisa.

Agradecemos a sua participação.

Júlio Alexandre de Matheucci e Silva Teixeira, Mestre em Engenharia Mecânica.

Tel.: (48) 9114-1648

Laboratório de Vibrações e Acústica - www.lva.ufsc.br

Departamento de Engenharia Mecânica

Universidade Federal de Santa Catarina

Bairro Trindade, Florianópolis – SC

CEP 88040-900 – BRASIL

Comitê de Ética em Pesquisa Envolvendo Seres Humanos – CEPESH/UEDESC

Av. Madre Benvenuta, 2007 – Itacorubi – Fone: (48)3321-8195 – e-mail: cepsh.reitoria@udesc.br

Florianópolis - SC

88035-001



TERMO DE CONSENTIMENTO

Declaro que fui informado sobre todos os procedimentos da pesquisa, que recebi de forma clara e objetiva todas as explicações pertinentes ao projeto, e que todos os dados a meu respeito serão sigilosos. Eu compreendo que, neste estudo, as medições dos experimentos/procedimentos de tratamento serão feitas em mim, e que fui informado que posso me retirar do estudo a qualquer momento.

Nome por extenso _____

Assinatura _____ Local: LVA/UFSC Data: / / .

Telefone: _____ e-mail: _____

C Manual técnico
Tela 8"
Navilock 8"TFT Touchscreen

Navilock 8" TFT Touchscreen



640x480, analog, NSTC/PAL, USB

Specifications

Product Description	Navilock LCD monitor - 8"
EAN	4043916283651
Dimensions (WxDxH)	20.5 cm x 3.1 cm x 15 cm
Weight	0.63 kg
Device Type	LCD monitor - 8"
Built-in Devices	Touch-screen
Native Resolution	640 x 480 at 60 Hz
Input Connectors	RGB

Input

Type	Touch-screen
------	--------------

TV Tuner

Analogue Video Format	NTSC, PAL
-----------------------	-----------

Connectivity

Interfaces	1 x USB
------------	---------

Audio

Output Power / Channel	0.15 Watt
------------------------	-----------

Power

Power Consumption Operational	10 Watt
-------------------------------	---------

General

Weight	0.63 kg
Diagonal Size	8"
Viewable Size	8"
Native Resolution	640 x 480 at 60 Hz
Display Type	LCD monitor / TFT active matrix
Dimensions (WxDxH)	20.5 cm x 3.1 cm x 15 cm

D Manual técnico
Termo-higrômetro
Incoterm 7666.02.0.00

TERMO-HIGRÔMETRO

temperatura interna/externa



MODELO 7666.02.0.00

Manual de Instruções

TERMO-HIGRÔMETRO

temperatura interna/externa

O termo-higrômetro digital é um instrumento de medição das temperaturas interna, externa e da umidade relativa do ar no ambiente onde trabalha. Possui também a capacidade de armazenar os respectivos valores de máximos e mínimos alcançados ao longo de um período de tempo das temperaturas.

1. Para colocar seu instrumento em funcionamento abra o compartimento da pilha na parte posterior do instrumento e remova o lacre isolante da pilha.
2. Ao ligar observe se todos os dígitos aparecem.
3. Para seu melhor conforto, o instrumento pode ser pendurado na parede através de um prego ou parafuso, ou ainda, colocar sobre a mesa, afastando o suporte localizado na parte posterior. (parafuso não incluso).
4. Depois de ligar o visor mostrara a temperatura e umidade atual. O visor superior mostrara a temperatura e o inferior mostrará a umidade.
5. Para verificar os valores máximos e mínimos pressione o botão IN/OUT localizado na parte posterior do instrumento para entrar no modo IN ou OUT.
6. No modo IN (temperatura interna onde se encontra o instrumento) pressione o botão MAX/MIN uma vez ele mostrará a temperatura máxima, duas vezes mostrará a temperatura mínima.
7. No modo OUT (temperatura externa sensor na ponta do cabo) pressione botão MAX/MIN uma vez ele mostrará a temperatura máxima, duas vezes mostrará a temperatura mínima.
8. Para apagar os valores máximos e/ou mínimos armazenados, pressione o botão MAX/MIN para conseguir observar os valores atuais que se deseja apagar e pressione o botão RESET por alguns segundos. Uma vez resetado os valores o instrumento começa a armazenar novamente.

Especificações Técnicas

Dimensões	35x27mm
Peso	85g
Material	Plástico ABS
Comprimento do cabo	± 2,4m
Pilhas	1,5 Volts - Tamanho AAA

Temperatura

Faixa de temperatura interna	0°C a 50°C (32°F a 122°F)
Faixa de temperatura externa	-50°C ~ 70°C (-58°F a 158°F)
Resolução int/ext	0,1°C/°F
Precisão int/ext	± 1°C/°F

Umidade

Faixa da umidade	15% a 95% UR
Resolução	1% UR
Precisão	± 5% UR



A INCOTERM garante a qualidade deste produto e firma o compromisso do atendimento em garantia e assistência técnica, bem como, a troca incondicional do mesmo caso sejam detectados e comprovados defeitos de fabricação. Esta garantia é válida pelo período de 06 (seis) meses a partir da data da compra e mediante apresentação de nota fiscal. Qualquer intenção de reparo por pessoas não autorizadas implicará na perda da garantia.

**E Manual técnico
Isoladores helicoidais
Vibranihil AME-5-XX**

REFERÊNCIA: AME-5-XX

AMORTECEDOR DE VIBRAÇÃO FREQUÊNCIA NATURAL DE 5 Hz, INDICADO PARA ISOLAÇÃO DE MÁQUINAS COM FREQUÊNCIA DE TRABALHO ACIMA DE 10 Hz (600 RPM).

CONSTRUÍDA EM MOLA HELICOIDAL DE AÇO COM INTERIOR EM BORRACHA, O QUAL AJUDA A ESTABILIDADE NA RESSONÂNCIA (LIGA E DESLIGA DO EQUIPAMENTO) E POR INTERFERÊNCIA NA LATERAL INTERNA DA MOLA, FILTRA AS ALTAS FREQUÊNCIAS (FAIXA AUDÍVEL).

APLICAÇÕES: EQUIPAMENTOS DE AR CONDICIONADO CENTRAL, VENTILADORES, COMPRESSORES, CHILLERS, FAN-COIL, BOMBAS.

ATENDE: RECOMENDAÇÃO DA AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERING ASHRAE-1991 HVAC-HANDBOOK CHAPTER 42.

NOTA: AS CARGAS SÃO INDICADAS PARA CADA PONTO DE APOIO DO EQUIPAMENTO.

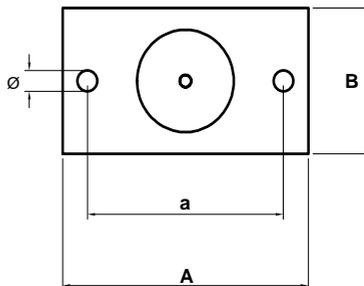
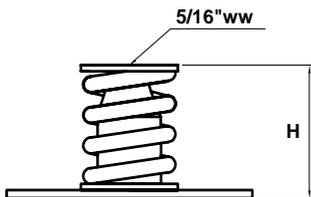
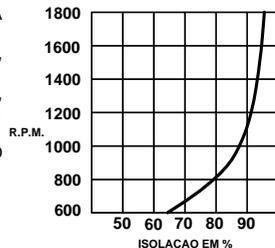
EM ALGUNS CASOS É NECESSÁRIO O USO DE UMA BASE DE INÉRCIA.

$$I(\%) = \{1 - 1/[(F_e/F_n)^2 - 1]\} \cdot 100$$

ONDE:

F_e ☒ FREQ. DE EXCITAÇÃO

F_n ☒ FREQ. DO AMORTECEDOR



REFERÊNCIA	CARGA EM Kg			H LIVRE	H CARGA	A	B	a	b	Ø
	MÍN	NOM	MÁX							
AME-5-6	3	6	7	66	56	120	70	100	-	8
AME-5-11	7	11	13	66	56	120	70	100	-	8
AME-5-16	12	16	18	66	56	120	70	100	-	8
AME-5-21	15	21	25	66	56	120	70	100	-	8
AME-5-31	25	31	35	66	56	120	70	100	-	8
AME-5-51	35	51	60	66	56	120	70	100	-	8

OUTRAS INFORMAÇÕES CONSULTAR O NOSSO DEPARTAMENTO TÉCNICO.

Fone 11 2917 1166 Fax 11 2917 1966

vibranihil@vibranihil.com.br

<http://www.vibranihil.com.br>

**F Manual técnico
Excitador
ButtKicker Concert**

 THE GUITAMMER COMPANY INC.
...leaders in low frequency sound...



Feel what you've been missing

Post Office Box 82 / Westerville, Ohio 43086
info@guitammer.com phone: 888.676.2828 fax: 815.346.9532

User's Guide

CONCERT
ButtKicker[®]
Feel what you've been missing

— The Guitammer Company Inc. —
Post Office Box 82 - Westerville, Ohio 43086

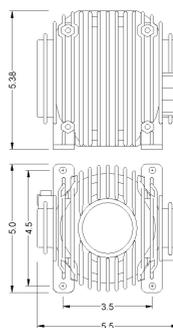
Thank you for your purchase of the ButtKicker® Concert the most powerful, musically accurate and long lasting low frequency audio driver available today.

This User's Guide is designed to help you install and use the ButtKicker in order to receive the most possible enjoyment.

If after following these instructions you are not COMPLETELY THRILLED with the ButtKicker, please contact us. Call, email or fax us. We will do everything possible to make sure you are completely satisfied.

Specifications.

Dimensions:	5.375" h x 5.5" w
Frequency Response:	5 – 200 Hz
Weight:	11 lbs. / 5 kg.
Nominal Impedance:	2 ohms, inductive
Power Handling:	400 watts min. / 1500 watts max.
Wiring polarity:	Red terminal is "Hot"
Thermal Limit (internal):	150 F. (70 C.)



ButtKicker Concert Dimensions
All measurement in inches

Contact Information

The Guitammer Company Inc.
PO Box 82
Westerville, OH 43086
support@guitammer.com
Voice: 888-676-2828
Fax: 815-346-9532

Please visit our website www.thebuttkicker.com for additional technical information, specifications and FAQs.

Product Description

The ButtKicker® Concert is a patented 2 ohm low frequency audio transducer that features a 3^{1/4} lb (1.48 kg) magnetically suspended piston. The ButtKicker is musically accurate, has powerful low frequency response, and is virtually indestructible and maintenance free. With a natural working range of approximately 5-200Hz, it is designed primarily to move structure, not air, and to provide a much more direct method of sound perception. The ButtKicker is an ideal solution for musician monitoring, especially when combined with the use of an in ear monitoring system. Drummers, bass players, keyboard players, other performers, DJ's and engineers have found that using the ButtKicker as part of their monitoring system enables them to play tighter and better than they ever have before. Additionally, the ButtKicker is ideal for recording studio use for accurate low frequency sound monitoring and mixing.

For home theater use, we recommend using the ButtKicker® LFE which features extended low frequency response for special effects. Additionally, the ButtKicker Power Amplifier can power up to four (4) ButtKicker LFE units for simplified installation and reduced overall cost in a multi-seating environment. Please refer to our website, www.thebuttkicker.com for further information.

Standing Performers – Bass, Keyboard, DJ's, etc.

Platforms

The ButtKicker® is an ideal monitoring solution for standing performers – bass players, keyboard players, other performers and DJ's – who need accurate low frequency reproduction without increasing SPL (volume). In these situations, we recommend using a simple platform (plywood is fine), mounting the ButtKicker on top and attaching rubber isolator feet to the bottom. An example of this can be found in the enclosed "Quick Start Guide." The main key to making and using a platform is to make sure that the platform itself is sturdy enough to support the performer's weight without sagging and that the platform is isolated (separated) from the floor by rubber feet so that the platform freely vibrates. Rubber feet can be purchased from ButtKicker dealers around the world.

G Manual técnico
Amplificador de Potência
ButtKicker BKA 1000-N



BKA1000-N Amplifier

Model# BKA1000-N



Product Specifications

Dimensions:	4.625" H x 12" W x 12" L
Frequency Response:	10 - 300 Hz
Power Output:	11 lbs / 5 kgs
Nominal Impedance:	1900 watt RMS @ 2 ohms 1000 watt RMS @ 4 ohms
Input Sensitivity:	80 mV for RCA 1.25 Volt for balanced 1.4" TRS
Filter Roll-Off:	12 dB per octave
Weight:	25 lbs / 11.3 kg
Voltage:	120V or 240V NOT SWITCHABLE

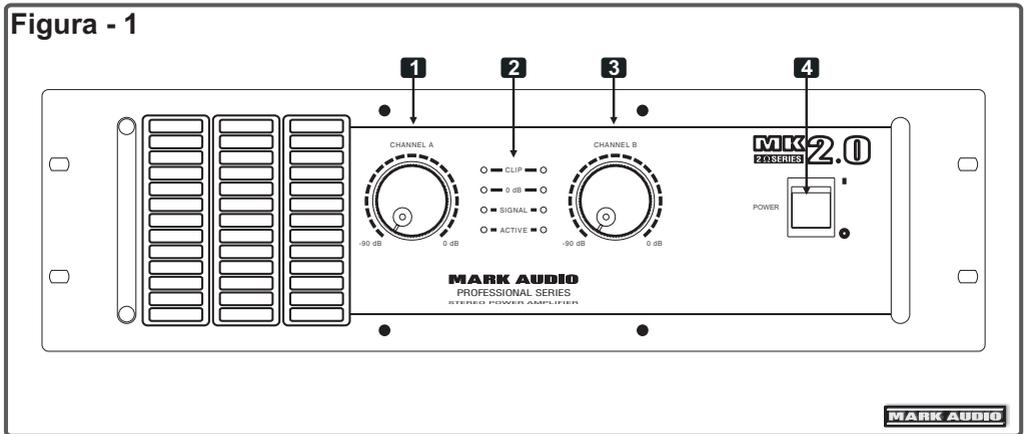
H Manual técnico

Amplificador de Potência

Mark Audio 2.0 e 3.0

4.1- Descrição dos Controles Painel Frontal

Figura - 1

**Observação:**

A figura 1 demonstra os controles para os modelos MK2.0 e MK3.0.

1 Controle de Volume Canal A

Este potenciômetro controla o volume do canal A do amplificador. Se este controle for todo aberto (todo no sentido horário) e o sinal o nível do sinal de entrada for de +4dBu (1,23V rms) o amplificador fornecerá a máxima potência.

2 Leds de Indicação

Estes leds indicam o estado de operação do amplificador. O led ACTIVE indica que o amplificador foi energizado. O led SIGNAL indica que há a presença de sinal na entrada do amplificador. O led 0dB indica que o amplificador está fornecendo a potência máxima especificada para a carga (em 4 Ohms) e o led CLIP indica que o sinal de entrada está com nível muito alto (maior que +4dBu ou 1,23V rms) e como conseqüência está ocorrendo saturação (clipe) do amplificador. Neste caso o sinal de entrada deverá ser baixado, pois, caso contrário há risco de queima de alto-falantes.

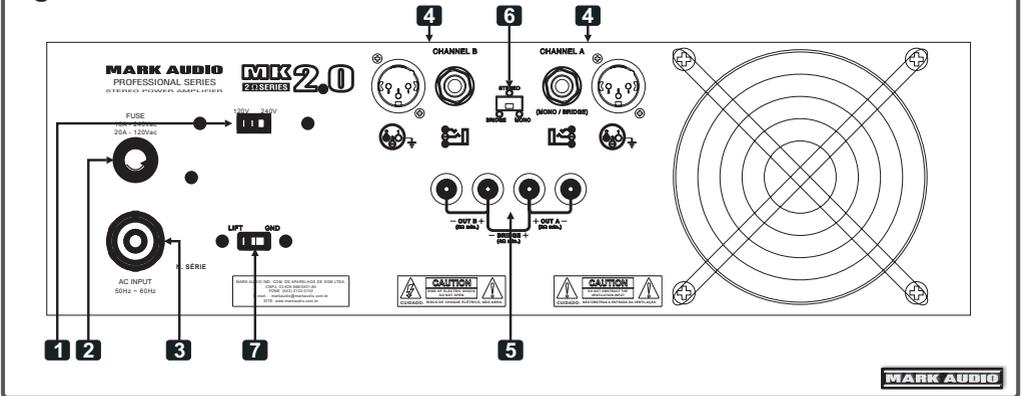
Importante: Este led deve trabalhar apenas com acendendo em picos musicais e não ficar constantemente aceso.

3 Controle de Volume Canal B

Este potenciômetro controla o volume do canal B do amplificador. Se este controle for todo aberto (todo no sentido horário) e o sinal o nível do sinal de entrada for de +4dBu (1,23V rms) o amplificador fornecerá a máxima potência.

4.2- Descrição dos Controlos Painel Traseiro

Figura - 1

**1** Chave Seletora de Voltagem

Esta chave seleciona a voltagem de operação do amplificador em 127 ou 220Vac.

Importante: Verifique sempre a voltagem da rede elétrica, ajuste a chave de seleção de voltagem para a posição adequada e coloque o fusível compatível com tal voltagem, antes de ligar o amplificador. Esta chave sai da fábrica selecionada para rede de 220Vac e com o fusível compatível com 220Vac.

2 Fusível de Proteção

Este conector possui o fusível de proteção da entrada de energia da rede elétrica. O valor do fusível deve ser selecionado de acordo com a rede elétrica que será utilizada.

Importante: Nunca utilize valores diferentes dos valores recomendados na inscrição do painel traseiro do amplificador.

3 Cabo de Energia

Este cabo conecta o amplificador na rede elétrica.

Importante: Nunca utilize extensões com bitolas de condutor menores do que a bitola do cabo do amplificador e evite sempre cabos com grandes distâncias. Nunca corte o terceiro pino do conector de AC, pois este é o pino de aterramento que deve ser sempre conectado a um bom aterramento para proteção do usuário.

4 Conectores de Entrada Canais A e B

Conectores utilizados para conectar o sinal vindo de um mixer, equalizador, ou outro periférico qualquer com nível de linha. Tratam-se de entradas balanceadas com os dois conectores ligados em paralelo em cada canal.

5 Bornes de Saída Canais A e B

Conectores utilizados para conectar as saídas do amplificador à carga (alto-falantes).

Importante: Nunca faça conexões com o amplificador ligado e nunca utilize cargas com impedância menor que 2 Ohms.

6 Chave de Seleção Mono/Bridge/Paralelo

Chave utilizada para colocar o amplificador em modo mono, paralelo ou bridge.

7 Chave de Lift/Ground

Chave utilizada para desconectar o terra elétrico do chassis.

Linha MK 2 Ohms

	MK2.0	MK3.0
Conectores de Entrada	2x Jack 1/4" TRS 2x XLR Fêmea	2x Jack 1/4" TRS 2x XLR Fêmea
Impedância de Entrada	10kΩ - unbal 20kΩ - bal	10kΩ - unbal 20kΩ - bal
Nível Nominal de Operação	+4dBu	+4dBu
Potência Máxima <small>(1kHz/THD+N=10%/127Vac/ dois canais operando)</small>	2000W rms @ 2Ω 1500W rms @ 4Ω 1100W rms @ 8Ω	3000W rms @ 2Ω 2000W rms @ 4Ω 1200W rms @ 8Ω
Resposta em Frequência	-0,5dB @ 20Hz -0,5dB @ 20kHz	-0,5dB @ 20Hz -0,5dB @ 20kHz
Distorção Harmônica (THD+N) <small>(22Hz-22kHz/-3dB/2Ω)</small>	<0,08%	<0,08%
Relação Sinal Ruído (S/N) <small>(22Hz-22kHz/0dB/2Ω)</small>	>80dB	>80dB
Crosstalk <small>(22Hz-22kHz/-3dB/2Ω)</small>	>70dB	>70dB
Damping Factor	>500	>500
Consumo Máximo	3500VA	4800VA
Tensão de Alimentação	127 / 220Vac	127 / 220Vac
Fusíveis	100 / 130Vac - 10A 200 / 240Vac - 20A	100 / 130Vac - 12A 200 / 240Vac - 25A
Classe de Operação	H	H
Unidades de Rack	3U	3U
Peso Líquido	18,5kg	21,5kg
Dimensões Máximas Altura Largura Profundidade	140mm 482,6mm 488mm	140mm 482,6mm 488mm

I Manual técnico
Conversor A/D D/A
RME ADI-8 DS



Overview

ADI-8 DS is an 8-channel AD/DA converter with reference approach. The compact 19" 1U rackmount enclosure includes several outstanding features, like Intelligent Clock Control (ICC), SyncCheck[™], SyncAlign[™], TDIF/ADAT converter and Bit Splitter. AD- and DA-circuit automatically operate either independently or linked. The latest 24-Bit converters with 128 times oversampling achieve 117 dBA true dynamic range. All digital inputs and outputs operate at full 24-bit resolution. If you have been waiting for a flexible, fully professional yet affordable multi-channel converter - the wait is over!

The ADI-8 DS is nearly identical to the ADI-8 PRO. Additional features include 88.2 and 96 kHz sample rate and Dither. DS stands for Double Speed, meaning double sample rate. As ADAT optical does not support sample rates higher than 48 kHz the DS mode requires two channels to transmit the data of one channel. The used method called Sample Split is compatible to S/MUX, and also found in the Hammerfall and Hammerfall Light. The combination Hammerfall/ADI-8 DS allows DVD-compatible Hi-End recordings (up to 8 channel @ 96 kHz), at an astonishing low price.

Use the following feature list to compare our ADI-8 DS with all other multitrack converters, and you will agree: The ADI-8 DS has the best price/performance ratio!

- 8 channel AD-converter, completely symmetrical and DC-coupled audio path, 117 dBA SNR AD
- 8 channel DA-converter, balanced output, 112 dBA DA
- ADAT optical inputs, 24-Bit, based on RME's unsurpassed Bitclock PLL for sample accurate lock
- ADAT optical outputs, 24-Bit, fully compatible to all ADAT optical inputs
- TDIF-1 interface, 24-Bit, Low Jitter PLL, Emphasis support, DA-88 compatible
- Bit Split/Combine, Copy Mode, ADAT and TDIF usable in all combinations
- Copy Mode adds a unique 24-Bit ADAT to/from TDIF converter
- Digital Patchbay operation, allows to copy, duplicate and distribute the digital input signals
- Dither available, for full compatibility to 16-Bit even at 96 kHz
- SyncCheck, unique technology to check clock synchronisation
- Virtual Sample Buffer, allows to use the internal Low Jitter Clock (quarz crystal) even for DA-conversion
- Automatic storage of all settings

Connectivity

- 8 x Analog I/O
- 2 x ADAT I/O
- 1 x TDIF-I/O
- Wordclock I/O

Features

- Intelligent Clock Control
- ADAT S/MUX
- SyncCheck[™]
- SyncAlign[™]
- cascadeable



Features

The ADI-8 DS' astonishing capabilities are easy to explore thanks to a simple and easy to understand user interface. Let's have a short walk over the front panel from left to right. Setting up the ADI-8 DS starts with an input sensitivity that perfectly suits your needs and maintains the excellent dynamic range of the AD-Converters. INPUT LEVEL lets you choose between Lo Gain, +4 dBu, -10 dBV.

Each analog input has its own 'Signal Present' and 'Clip' LED, so levels and Overload are easy to check. The key PROCESS activates Bit Split (spread the 24-Bit signal on two outputs), Double Speed mode (DS) and Dither (Dith.) Bit Split allows two 8-channel 16-Bit tape recorders to record 8 channels in 24-Bit resolution. Bit Split works with both TDIF and ADAT.

RME's intelligent clock control (ICC) provides professional features you won't find anywhere else. First set the clock of the AD-Converter, choose between INTERNAL, EXTERNAL (BNC word clock) or INPUT (the digital input signal ADAT or TDIF). The internal clock can be 44.1/48 or - when DS is active - 88.2 or 96 kHz. The DA-Converter has the same settings available. The current state of locking and clock synchronization is shown by blinking or constantly lit LEDs. The next key DIGITAL INPUT determines the used digital input, and the clock source in case INPUT was activated.

DIGITAL INPUT is already part of the DA-Converter section. Next is COMBINE which activates both the re-combination of split signals back to a full 24-Bit signal and Double Speed mode. The key COPY MODE routes the digital input to the digital outputs ADAT and TDIF. As these operate simultaneously sending identical data the ADI-8 DS not only turns into a superior ADAT/TDIF converter, but also allows copying between devices of the same format and a distribution to different devices. For example an ADAT signal can be distributed to 2 ADAT plus 2 TDIF outputs simultaneously. In Copy Mode also both Bit Split and COMBINE are available, so it's possible to recombine a split signal while copying, or split a not split signal, or recombine and split again into another format. With this the ADI-8 DS turns into an extremely powerful TDIF/ADAT interface.

Each analog output has its own 'Signal Present' LED which works in an analog fashion (brighter at higher levels.) A push on OUTPUT LEVEL sets Hi Gain, +4 dBu or -10 dBV as analog output level.

ADI-8 DS's back shows an impressive number of connectors of all kinds which result in an unbeaten flexibility and compatibility. Whatever it is - simply get connected and enjoy the sonic clarity you've been missing when doing multitrack recording for so long.

ADI-8 Inside

The ADI-8 DS internal structure can be divided into four distinct functional blocks:

- Analog In: analogue input stage with gain compensation, A/D-converter
- Analog Out: D/A converter and analogue output stage with gain compensation
- Digital I/O: ADAT optical and TDIF interfaces
- Clock Control: Controls all timing for all functions, Word Clock I/O, PLL

The ADI-8 can be routed internally in many ways which, in addition to its function as A/D-D/A converter, allows it to be used as a format converter, distributor or splitter.

- Format converter: 24-bit digital conversion from ADAT optical to TDIF and vice versa
- Distributor: Sends digital input to all outputs simultaneously, e.g. TDIF in to TDIF out and 2 x ADAT
- Splitter: Sends analogue input to all digital outputs simultaneously, i.e. for A/D conversion to 2 x TDIF and 2 x ADAT (optical)

Analog to Digital

Physical access to the analogue inputs is either via 1/4" stereo jack socket or 25-pin D-type connector conforming to the Tascam DAxx analogue I/O pinout. These recorders are very common, so a suitable multicore cable (e.g. for connecting directly to mixing consoles or to XLR) should be relatively easy to find. The entire input stage – from the sockets to the converter chip's internal input – is fully symmetrical. This is a special servo-balanced input circuit: if the signal at the input is unbalanced, input gain is automatically adjusted by +6 dB. Otherwise input sensitivity for an unbalanced signal would have been lower than for a balanced one.

Any A/D converter is only as good as the gain compensation at the input. The ADI-8 has 3 gain levels, making it compatible with a wide range of studio equipment – loss is avoided before the signal gets to the A/D converter. Input gain is switchable between Lo Gain, +4 dBu and -10 dBV, and employs a special damping technique: using latest hi-grade electronic switches (ADG 451), the gain switch could be placed in the best possible position within the signal path. This approach makes additional amplifier circuitry or long cables to mechanical components unnecessary (and obsolete.) The D/A converters get the best quality signal possible, so they can reach maximum SNR (signal-to-noise ratio) with minimum distortion.

Tech Specs

Input AD: 1/4"TRS jack and 25 pin D-type connector, servo balanced, completely symmetrical DC-coupled audio path

Output AD: ADAT optical, TDIF-1 (both 24-Bit), word clock

Input DA: ADAT optical, TDIF-1 (both 24-Bit), word clock

Output DA: 1/4"TRS jack and 25 pin D-type connector, servo balanced, DC-coupled audio path

SNR AD: 117 dB(A)

THD AD: < -110 dB (< 0,00032 %)

THD+N AD: < -104 dB (< 0,00063 %)

Crosstalk AD: > 130 dB

SNR DA: 112 dB(A) unmuted

THD DA: < -104 dB (< 0,00063 %)

THD+N DA: < -102 dB (< 0,0008 %)

Crosstalk DA: > 110 dB

Input/Output level at 0 dBFS @ Hi Gain: +19 dBu

Input/Output level at 0 dBFS @ +4 dBu: +13 dBu

Input/Output level at 0 dBFS @ -10 dBV: +2 dBV

Frequency response AD/DA -0,1 dB: 5 Hz - 21,5 kHz (sf 48 kHz)

Frequency response AD/DA -0,5 dB: < 5 Hz - 44,8 kHz (sf 96 kHz)

Power supply: internal, 100V-240 V AC, 100 V-240 V AC

Dimensions 483 x 44 x 200 mm

Warranty: 2 years



Worldwide Distribution

audioag

Am Pfänderling 60 · 85778 Haimhausen · Germany
Tel.: +49-08133-91810 Fax: +49-08133-9166

www.rme-audio.de

3 / 3

**J Manual técnico
Acelerômetro
Brüel & Kjær 4321**

PRODUCT DATA

Piezoelectric Accelerometer Triaxial Charge Accelerometer — Type 4321, 4321-S and 4321-V

FEATURES

- Triaxial
- General purpose accelerometer
- Wide frequency range
- Wide dynamic range
- Large temperature range
- Low base-strain sensitivity
- Vibration analysis on larger structures

Description

Type 4321 is a triaxial, piezoelectric, DeltaShear[®], Uni-gain[®] accelerometer with three independent outputs for simultaneous high-level measurements in three mutually perpendicular directions. Each transducing element is individually adjusted. Type 4321 features three 10–32 UNF-2A receptacles for output connection and can be mounted on the object by means of a 10–32 UNF threaded steel stud or M4 screw.

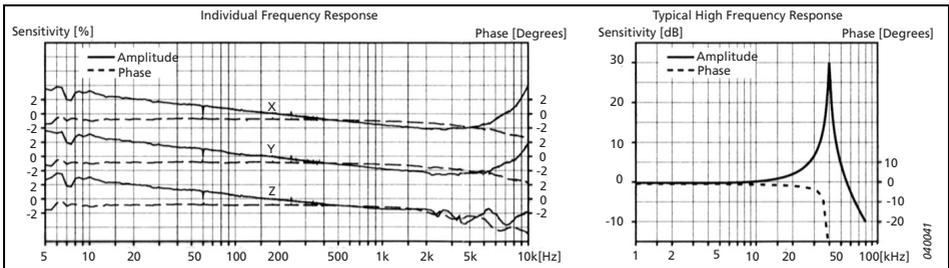
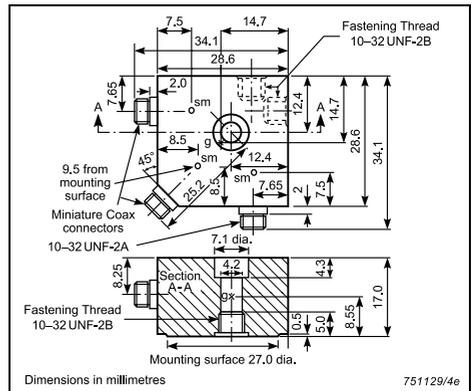
Characteristics

This piezoelectric accelerometer may be treated as a charge source. Its sensitivity is expressed in terms of charge per unit acceleration (pC/g). The DeltaShear design involves three piezoelectric elements and three masses arranged in a triangular configuration around a triangular centre post. The DeltaShear design provides a high sensitivity-to-mass ratio compared to other designs, a relatively high resonance frequency and high isolation from base strains and temperature transients. The piezoelectric element used in Type 4321 is a PZ23 lead zirconate titanate element. The housing material is titanium.



Calibration

The sensitivity given in the calibration chart is measured at 159.2 Hz and an acceleration of 10 g. For 99.9% confidence level, the accuracy of the factory calibration is $\pm 2\%$.



Specifications – Triaxial Charge Accelerometer Type 4321, 4321-S and 4321-V

	Units	4321/4321-S	4321-V
Dynamic Characteristics			
Charge Sensitivity (@ 159.2 Hz)	pC/g	9.8 ± 2%	9.8 ± 15%
Frequency Response		See typical Amplitude Response	
Mounted Resonance Frequency	kHz	40	
Amplitude Response ±10% [1]	Hz	0.1 to 10000	
Transverse Sensitivity	%	<4	
Transverse Resonance Frequency	kHz	14	
Electrical Characteristics			
Min. Leakage Resistance @ 20°C	GΩ	≥ 20	
Capacitance	pF	1200	
Grounding		Signal ground connected to case	
Environmental Characteristics			
Temperature Range	°C (°F)	-74 to 250 (-101 to 482)	
Humidity		Sealed	
Max. Operational Sinusoidal Vibration (peak)	g pk	500	
Max. Operational Shock (± peak)	g pk	1000	
Base Strain Sensitivity	Equiv. g/μ strain	0.002	
Thermal Transient Sensitivity	Equiv. g/°C (g/°F)	0.04 (0.022)	
Magnetic Sensitivity (50 Hz–0.03 Tesla)	g/T	0.4	
Physical Characteristics			
Dimensions		See outline drawing	
Weight	gram (oz.)	55 (1.93)	
Case Material		Titanium ASTM Gr.2	
Connector		10–32 UNF	
Mounting		10–32 UNF × 5 mm threaded hole/M4 screw	

[1] Low-end response of the transducer is a function of its associated electronics

Ordering Information

Type 4321 includes the following

accessories:

- Carrying box
- Calibration chart
- AO-0038: Low-noise cable fitted with 10–32 connectors, 1.2 m
- 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm
- M4 threaded steel screw. Length 16 mm

Type 4321-S includes the following

accessories:

- Carrying box
- Calibration chart
- AO-0038: Low noise cable fitted with 10–32 connectors, 1.2 m
- 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm
- M4 threaded steel screw. Length 16 mm
- UA-0146: Accessory box including:
 - Cementing Stud, 10–32 UNF, single unit
 - Input Adaptor, TNC to 10–32 UNF

microdot

- Box with beeswax
- Insulating disk
- Insulating stud
- Steel stud 10–32 UNF × ½"
- Tools

Type 4321-V includes the following

accessories:

- Carrying box
- Calibration chart
- 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm
- M4 threaded steel screw. Length 16 mm

OPTIONAL ACCESSORIES

- AO-0038-D-012: Teflon super low-noise cable 10–32 UNF to 10–32 UNF connector 250°C (482°F) 1.2 m (4ft)
- AO-0122-D-030: Reinforced super low-noise double screened cable 10–32 UNF to 10–32 UNF connector 250°C (482°F) 3 m (10ft)

- AO-0231-D-030: Teflon super low-noise cable 10–32 UNF to TNC connector 250°C (482°F) 3 m (10ft)
- JP-0162: 10–32 UNF to TNC adaptor
- QA-0013: Hexagonal key for 10–32 UNF studs
- QA-0029: Tap for 10–32 UNF thread
- QA-0038: Hexagonal key for M4 studs
- UA-0866: Cement stud 10–32 UNF 0.14 mm (set of 25)
- UA-2064: Set of 10 steel studs with flange 10–32 to 10–32, length 5.3 mm
- YJ-0216: Beeswax for mounting
- YQ-0534: Insulating mica washer 15.5 mm
- YP-0150: 10–32 UNF insulated stud. Length 12.7 mm
- YQ-0093: M4 threaded steel screw. Length 16 mm
- YQ-2960: 10–32 UNF threaded steel stud. Length 12.7 mm
- UA-2063: Set of 10 10–32 steel studs. Length 7.5 mm

Brüel & Kjær reserves the right to change specifications and accessories without notice

HEADQUARTERS: DK-2850 Nærum · Denmark · Telephone: +45 4580 0500
Fax: +45 4580 1405 · www.bksv.com · info@bksv.com

Australia (+61) 2 9889-8888 · Austria (+43) 1 865 74 00 · Brazil (+55) 11 5188-8166
Canada (+1) 514 695-8225 · China (+86) 10 680 29906 · Czech Republic (+420) 2 6702 1100
Finland (+358) 9-755 950 · France (+33) 1 69 90 71 00 · Germany (+49) 421 17 87 0
Hong Kong (+852) 2548 7486 · Hungary (+36) 1 215 83 05 · Ireland (+353) 1 807 4083
Italy (+39) 0257 68061 · Japan (+81) 3 3779 8671 · Republic of Korea (+82) 2 3473 0605
Netherlands (+31) 318 55 9290 · Norway (+47) 67 77 11 55 · Poland (+48) 22 816 75 56
Portugal (+351) 21 47 11 453 · Singapore (+65) 377 4512 · Slovak Republic (+421) 25-443 0701
Spain (+34) 91 659 0820 · Sweden (+46) 8 449 8600 · Switzerland (+41) 1 880 7035
Taiwan (+886) 2 2502 7255 · United Kingdom (+44) 14 38 739 000 · USA (+1) 800 332 2040

Local representatives and service organisations worldwide

Brüel & Kjær 



**K Manual técnico
Amplificador de carga
PCB 422E12**

Model Number

422E12

CHARGE AMPLIFIER [4]

Revision: K

ECN #: 14690

ELECTRICAL

Input Charge Range (2.5V output)	±pC	250 ±2%	
Overrange	±volts	3	
Maximum Input Voltage	volts	30	
Input Time Constant	sec	0.1	
Charge Sensitivity (at 100 Hz)	mV/pC	10 ±2%	
Charge Sensitivity Deviation over Operating Temp. Range		<1%	
Amplitude Linearity	%FS	≤1.0	
Low Frequency Cutoff (-5%)	Hz	5	
High Frequency Response (2.2 mA/4 mA/20 mA Constant Current)	kHz	50/75/100	[1] [3]
Sensitivity Deviation Due to Source Capacitance Loading	%/pF	0.0005	
Noise Broadband (1 Hz-10 kHz)	µV	20	[3]
Typical Spectral Noise:	(1 Hz)	µV/√Hz	17.0 [3]
	(10 Hz)	µV/√Hz	1.8 [3]
	(100 Hz)	µV/√Hz	0.2 [3]
	(1 kHz)	µV/√Hz	0.05 [3]
	(10 kHz)	µV/√Hz	0.04 [3]
Output in Relation to Input	polarity	Inverted	
AC Output Range	±volts	2.5	
Output Impedance	ohms	<10	
Output Bias Level	+volts	12.75 to 14.25	
Power Supply	+VDC/mA	18-28/2.2-20	
Minimum Insulation Resistance	MΩ	7	

ENVIRONMENTAL

Temperature Range (Operating)	°F [°C]	-65 to +250 [-54 to +121]
Shock	g [m/s ²]	1,000 [9 810]

PHYSICAL

Sealing	type	Welded Environmental Seal	
Connector: Input (micro)	type	10-32 Coaxial Jack	
Output	type	BNC Coaxial Jack	[2]
Size (lg x dia)	in [mm]	3.4 x 0.50 [86,36 x 12,7]	
Weight	oz [gm]	1.1 [31,2]	
Case Material		Stainless Steel	

NOTES:

- [1] Above stated frequency, the 422E12 becomes slew rate limited.
- [2] Optional BNC Plug Connector on output, order as 422E12/C.
Optional 10-32 (micro) Connector on output, order as 422E12/A.
- [3] Tested using voltage source and input capacitor equal to feedback capacitor, to simulate charge mode gauge.
- [4] Not to be used with low values of source resistance such as charge mode sensors at elevated temperatures or contaminated sensor cables (preventing low frequency peaking and/or output bias problems).
- [5] See PCB Declaration of Conformance PS024 for details.

SUPPLIED ACCESSORIES:

None

OPTIONAL VERSIONS

Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.

□ T - TEDS

Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4		
Operating Temperature Range	°F [°C]	-40 to +185 [-40 to +85]
Output Bias Level	+volts	13.35 to 14.85



In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.

ICP ® is a registered trademark of PCB Piezotronics, Inc.



Drawn	<i>[Signature]</i>	FEB 11, 02	Spec No.
Engineer	<i>[Signature]</i>	2/11/02	422-5120-80
Sales	<i>[Signature]</i>	2/11/02	
Approved	<i>[Signature]</i>	2/12/02	Sheet 1 of 1

L Manual técnico
Condicionador de sinais
PCB 482A16

MULTI-CHANNEL, LINE-POWERED ICP® SENSOR SIGNAL CONDITIONERS WITH GAIN

These full-featured, multi-channel, line-powered signal conditioners offer push-button, selectable gain for each channel and optional output switching to simplify data acquisition. Each features a bank of LED's on each channel to indicate gain setting, input overload, and input fault due

to open or short circuit connections. In addition to the channel specific BNC's, the optional switched output units offer additional output BNC's that carry the signals of the switch-selected channel.

Model 482A16
4 channel,
gain x1, x10, x100



Model 482A18
8 channel
gain x1, x10, x100
8 to 1 output
switching



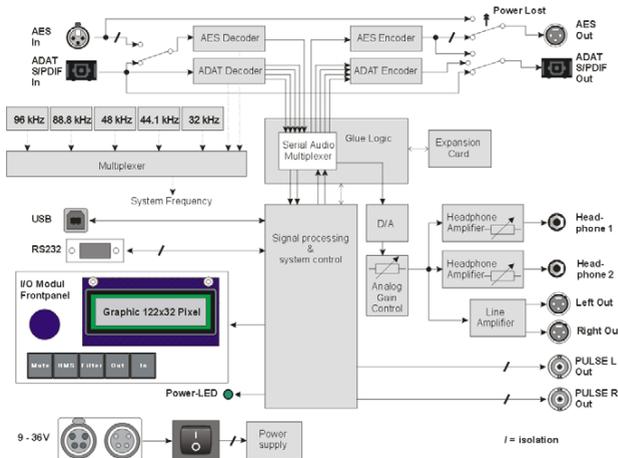
Full-Featured, Line-Powered Signal Conditioners with Gain		
Model Numbers	482A16	482A20
Style	Full Feature with gain	Full Feature with gain
Channels	4 channels	8 channels
Sensor excitation [1]	24 volt, 2 to 20 mA	24 volt, 2 to 20 mA
Gain (each channel)	x1, x10, x100	x1, x10, x100
Low frequency response (-5%)	0.225 Hz [2]	0.225 Hz [2]
High frequency response (-5%)	100 kHz	100 kHz
Broadband noise (at unity gain)	9.1 μ W rms	9.1 μ W rms
Power required	90 to 130 VAC 50 to 400 Hz	90 to 130 VAC 50 to 400 Hz
Input/output connectors	BNC/BNC	BNC/BNC
Size (height x width x depth)	6.3 x 2.9 x 9.7 in 160 x 73.7 x 246.4 mm	6.3 x 4.0 x 9.7 in 160 x 101.6 x 246.4 mm
Weight	32 oz (907.2 gm)	67.6 oz (23767 gm)
Optional Models		
4 to 1 output switching	482A17	482A19 [3]
8 to 1 output switching	N/A	482A18
210 to 250 VAC powerable	F482A16	F482A20
NOTES: [1] Current is factory set at 4 mA but is user adjustable between 2 and 20 mA. [2] Achieved with readout device having a 1 megohm input impedance. [3] Model 482A19 offers dual 4 to 1 output switching and is ideally suited for use with two channel analyzers.		

M Manual técnico
Equalizador
HEAD acoustics PEQ V



Features

- True to original playback of aurally accurate recordings in highest quality
- Two independently calibratable headphone outputs for dynamic headphones (HD IV.1 or HD IV.2)
- USB interface (USB 2.0) for direct connection to a notebook or PC
- AES/EBU input and output
- Optical interface (ADAT / S/PDIF)
- Line out, symmetrical
- Two pulse outputs (electrically isolated)
- Sampling rates: 32, 44.1, 48, 88.2 and 96 kHz
- Equalizations: LIN, ID, FF, DF, USER
- Convenient, intuitive turning knob for menu-based control
- User-friendly software-based control (via USB) or hand remote control unit
- Cascadable (ADAT, S/PDIF, AES/EBU)



Block diagram of the PEQ V

DATA SHEET

PEQ V (Code 2492)

Programmable, digital equalizer

with USB, AES/EBU, LINE as well as pulse and optical multi-channel interfaces for the true to original reproduction of aurally accurate recordings

Overview

The programmable equalizer PEQ V plays back aurally accurate recordings in the highest possible quality. Two headphone outputs suitable for the direct connection of dynamic headphones (HD IV.1 or HD IV.2) can be calibrated independently of each other.

Both data transmission and remote control are conveniently handled via one single cable: The PEQ V is connected directly to a notebook or PC via USB (USB 2.0). The PEQ V can be used as a standard Windows® audio device. A digital sound board is not necessary.

Furthermore, the user-friendly PEQ V is equipped with all common interfaces (ADAT, S/PDIF, AES/EBU, line, pulse), of which, for example, the optical ADAT interface allows up to four PEQs to be connected simultaneously for multi-channel playback. Artificial heads and other front ends, devices with optical outputs and analog power amplifiers can be connected directly to the PEQ V.

The PEQ V is equally well suited for stationary and mobile operation: It can be powered by a car battery as well as by its external power adapter.

With supported sampling rates of up to 96 kHz, the PEQ V is already prepared for future applications.

For loudspeaker playback, active loudspeakers can be connected as well. As a universal equalizer, the PEQ V can also be used for the playback of conventional recordings.

Applications

- True to original playback of aurally accurate recordings
- Mobile and stationary operation
- Direct playback from PC/notebook via PEQ V without an additional sound board
- A/B comparisons
- Use in the professional audio area
- Playback of conventional recordings

Headphone Outputs

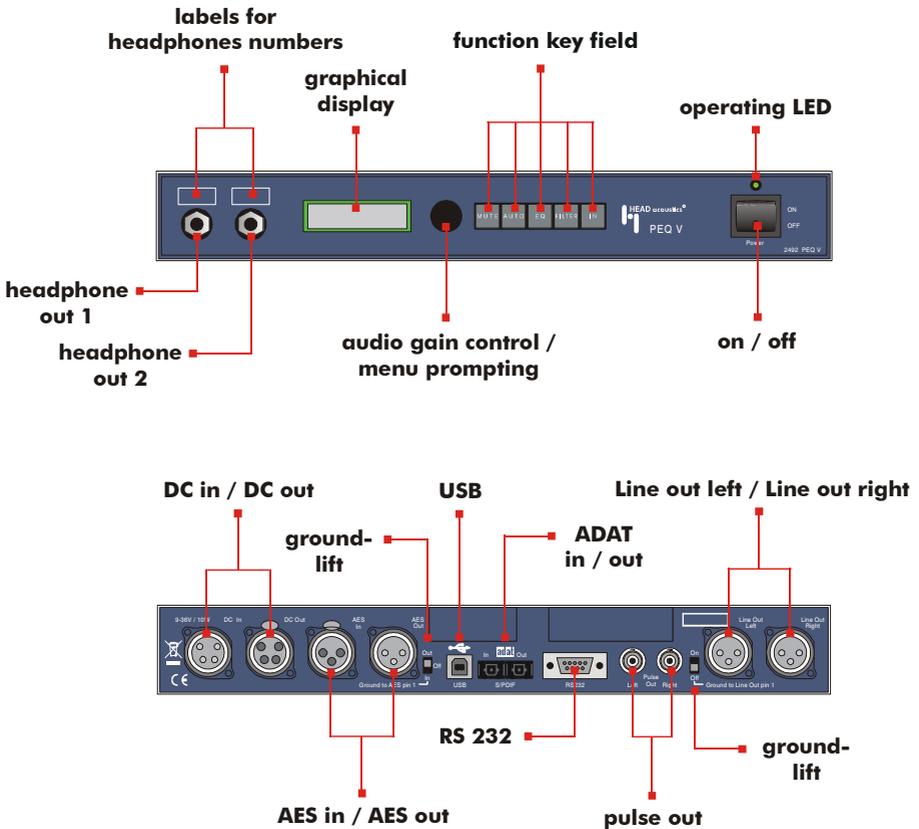
The PEQ V is equipped with two independent headphone outputs decoupled from each other by internal amplifiers. Each of the two amplifiers can be individually factory-calibrated for a specific dynamic headphone (HD IV.1 or HD IV.2 – not included). The combination of the PEQ V with the HD IV.1 headphones guarantees the highest possible playback quality. The serial number of the respective headphone can be found on a label above the corresponding headphone output, so there is a unique assignment of the headphones to the outputs.

USB

The USB port (USB 2.0) can be used to connect the PEQ V directly to a notebook computer or PC. Both data transmission and remote control are conveniently handled via one single (USB) cable. A digital sound board is not necessary for playback.

ADAT / S/PDIF

The optical ADAT interface (specification according to Wavefront) can also be used as an input and output for S/PDIF signals. In this case, the AES/EBU interface is deactivated.



Front side (top) and rear side of the PEQ V

Technical data

All inputs and outputs are protected against high voltage peaks; all outputs are permanently short-circuit-proof.

USB	USB 2.0 full speed
ADAT / S/PDIF	specification according to Wavefront
AES/EBU in	
Connector:	XLR socket
Standard:	AES3, IEC60958, EIAJ CP1201, electrically isolated
AES/EBU out	
Connector:	XLR socket
Standard:	AES3, IEC60958, EIAJ CP1201, electrically isolated
PULSE out	
Connector:	BNC socket
Standard:	TTL Pegel an 100 Ohm, electrically isolated
RS 232 interface	
Connector:	9-pin, DSUB socket
Standard:	EIA / TIA232E and CCIT V.28
Power supply for terminal:	5 V / 200 mA, electrically isolated

Analog out, general electrical data

Frequency response:	$\leq +0.05$ dB / -0.15 dB (0 - 20 kHz)
Distortion (THD+N):	≤ 0.0025 % (92 dB) at levels > -6 dBFs
	≤ 0.0015 % (96 dB) at levels = -6 dBFs
	≤ 0.02 % (74 dB) at levels < -6 dBFs
Cross-talk:	≥ 105 dB (0 - 20 kHz)
	≥ 110 dB at 1 kHz
Dynamic range (S/N):	≥ 104 dB
Linearity accuracy:	≥ 93 dB at $+0.05$ dB / -0 dB
Linearity accuracy:	≥ 100 dB at $+0.2$ dB / -0 dB
Linearity accuracy:	≥ 114 dB at $+0.8$ dB / -0 dB

Line out

Connector:	2 XLR
Nominal level:	1 V _{eff} equivalent to 94 dB _{SPL}
Maximum output level (with loads ≥ 1 kOhm):	17.66 V _{eff} equivalent to 119 dB _{SPL}
Output impedance:	10 Ohm ± 3 Ohm
Maximum current per channel:	150 mA
Maximum power per channel:	1.2 W
Load impedance:	≥ 200 Ohm

Headphone output

Number of headphone outputs:	2
Headphone type:	dynamic (typ. HD VI.1)
Connector:	6.3 mm stereo jack
Nominal level:	typ. 0.5 V _{eff} equivalent to 94 dB _{SPL}
Maximum output level (with loads ≥ 1 kOhm):	8.86 V _{eff} equivalent to 119 dB _{SPL}
Output impedance:	10 Ohm ± 3 Ohm
Maximum current per channel:	0.6 W
Maximum power per channel:	150 mA
Load impedance:	≥ 100 Ohm

Power Supply

Power Supply:	9 - 36 V DC
Power consumption:	6 W, typ., 8 W, max.

Environmental conditions

Temperature range:	Operation: -10 - +60°C
	Storage: -20 - +75°C
Dimensions:	327 mm x 230 mm x 44 mm / 12.9" x 9.1" x 1.7" (W x D x H)
Weight:	1900 g / 4.2 lb

The use of the PEQ V as standard Windows® audio device without digital sound board is possible as of firmware 1.8 and the hardware version 2492B. Older versions of the PEQ V can be retrofitted ex factory.

N Manual técnico
Fone de ouvido
Bose QuietComfort 15

For noise reduction *and* audio



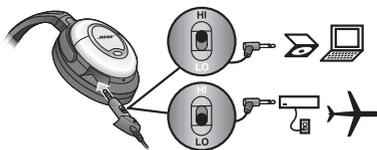
You can use the headphones with a variety of audio sources: airline audio, a CD, DVD or MP3 player, a personal or laptop computer, or home stereo. When using with Apple products, use the audio cable with remote and microphone. When using other audio sources, use the standard audio cable.

To enjoy both noise reduction and audio:

1. Gently push the headphones plug all the way into the connector opening on the left earcup, until the plug housing is flush with the earcup.



2. Connect the headphones cord to an audio source. For information on using your headphones on an airplane, see "Connecting to in-flight entertainment systems" on page 5.



Note: The LO setting of the LEVEL switch lowers the volume levels of strong audio output signals which are common on airline systems. If you find that the volume level is too low, set the LEVEL switch to HI. The switch has no effect on noise reduction performance.

3. Put on the headphones. On the right earcup, slide the power switch forward to the On position. The battery light indicator will illuminate.



**O Manual técnico
Manequim
HEAD acoustics HMS III**

Product Information

HMS III.LN (Code 1307LN)

Upgrade of the HMS III.0 to the HMS III.LN artificial head measurement system for aurally accurate measurements of very low sound levels



Overview

This factory-installed upgrade turns your HMS III.0 into the HMS III.LN artificial head measurement system.

The upgrade particularly includes the replacement of the microphones of the HMS III.0 with special high-sensitive, low-noise microphones.

HMS III.LN is excellently suited for aurally accurate measurements of very low noise levels, such as the noise emissions of IT products.

The proven functionality of the HMS III.0 is retained with the HMS III.LN.

Factory-installed upgrade of the HMS III.0 to HMS III.LN (Code 1307.LN)

You send your HMS III.0 to HEAD acoustics GmbH. At our factory, the following services are performed:

- Replacement of the microphones of the HMS III.0 with special high-sensitive, low-noise microphones
- Firmware update
- Calibration
- Adaptation of the equalization options

Your former HMS III.0 artificial head, now converted to a HMS III.LN low-noise artificial head measurement system, is shipped back to you

- including a custom equalization CD

Features of HMS III.LN (as compared to HMS III.0)

- Low-noise condenser microphones
- Extremely low inherent noise of typically 6.5 dB(A)_{SPL} (free-field-equalized)
- Maximum sound pressure level of 130 dB_{SPL}

Technical Data of HMS III.LN

(changes to the technical specifications in the HMS III.0 manual)

Max. sound pressure level:	130 dB _{SPL} rel. 20 Pa
Typ. inherent acoustic noise:	6.5 dB(A) _{SPL} rel. 20 m Pa with FF equalization
Nom. sound pressure level (selectable):	84 dB _{SPL,F} , 94 dB _{SPL,F} , 104 dB _{SPL,F} , 114 dB _{SPL,F} , 124 dB _{SPL}
Headroom (electr.):	6 dB

