

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Sistema de Apoio Acústico à Navegação Pessoal

João Neves Moutinho

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Prof. Dr. Diamantino Freitas
Co-orientador: Prof. Dr. Rui Araújo

Julho de 2009

© João Neves Moutinho, 2009

Resumo

Este documento apresenta os resultados obtidos na pesquisa e no desenvolvimento de um sistema de navegação pessoal que se apoia em referências sonoras. Ao longo deste trabalho, serão apresentados resultados das experiências que serviram de suporte e de verificação aos conceitos aqui abordados, e será descrito o sistema de orientação sonora (SOS) realizado no âmbito do projecto NAVMETRO®. Este projecto, fruto de uma parceria entre a Faculdade de Engenharia, a Metro do Porto, e a Associação de Cegos e Amblíopes de Portugal, tem como objectivo a criação de um sistema de informação e navegação para pessoas cegas em estações de metro do Porto.

O ouvido humano é um instrumento de elevada precisão e robustez. As suas estruturas e mecanismos, apesar de complexos, são extremamente interessantes e explicam como se processa a transdução da vibração sonora que chega ao ouvido na sua interpretação neuronal. São muitas as analogias mecânicas e eléctricas que se podem fazer, e perceber o seu funcionamento contribui de forma vital para perceber conceitos mais avançados, como a localização espacial de fontes sonoras. Aqui, realiza-se uma abordagem a esta capacidade humana em pessoas não cegas, e posteriormente a pessoas cegas. De um ponto de vista absoluto, ver-se-á neste documento que as pessoas em geral (sem problemas de audição), são capazes de localizar com precisão sons no plano horizontal, com menor precisão no plano sagital médio, e finalmente de forma não muito precisa no que respeita à percepção de distância. Analisadas as diferenças entre pessoas cegas e não cegas conclui-se que a capacidade de localização sonora de pessoas cegas não é significativamente maior senão em alguns casos específicos (o que contraria um pouco o senso comum, que enfatiza uma teoria baseada na assumpção que a privação de um sentido faz aguçar os restantes). Testes realizados permitiram confirmar os resultados da pesquisa, e obter novas conclusões, particularmente no que concerne à localização vertical na proximidade de fontes sonoras. Finalmente, o sistema de orientação sonora desenvolvido, baseado em tudo que foi pesquisado, analisado, e projectado, provou cumprir os requisitos especificados, funcionando como uma ferramenta essencial à promoção da acessibilidade para pessoas cegas, e provando a viabilidade do uso da navegação por referências sonoras.

Abstract

This document presents the results obtained in the research and development of a personal navigation system that relies on sound cues. Throughout this work, results will be presented from the support and verification experiments about these subjects, and the SOS (sound orientation system) will be described and explained. This system is part of the NAVMETRO® project, a partnership between the Faculty of Engineering of the University of Oporto, the Metro do Porto company (Oporto subway system), and the ACAPO (blind people's association), and has the objective of creating an information and navigation system for blind people, to use in the Oporto subway systems and stations.

The human hearing is an instrument of high accuracy and robustness. Its structures and mechanisms, although complex, are extremely interesting and explain how the transduction "air vibration - neural interpretation" happens. There are many mechanical and electrical analogies that can be done, and realizing its functioning is crucial to understand more advanced concepts like spatial sound localization. Here, one may find an approach to this theme, in the case of sighted people and afterwards for blind people. In an absolute point of view, it will be seen that everyone (with normal audition) is capable of localizing sound with good precision in the horizontal plane, not so good precision in the medial sagittal plane, and a poor distance estimation. Once analyzed the differences between blindfolded (sighted) and blind subjects, one will conclude that blind people, on the contrary of most people's opinion, don't have significantly better results than the others, except in some few situations. This is a little against the theory that when someone loses a sense, the others become more acute and sharp, although it was proved that it's not that simple and direct. Several tests were made that allowed to confirm the research results, and obtain new conclusions, especially in the vertical localization in the proximity of the sound source. Finally, the sound orientation system developed, supported on everything that was researched, analyzed, and projected, has proven to be capable of fulfilling the specified requisites, functioning as an essential tool for promoting the accessibility of the visually impaired people, and proving the validity of using sound cues to help people navigate.

Agradecimentos

Um agradecimento à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por ser a entidade que iniciou o projecto e o acarinhou tornando possível ao mesmo realizar-se. À empresa Metro do Porto que sendo desde logo parceira, se assumiu como potencialmente interessada, e que passado o período de financiamento público, assegurou as condições para a continuidade do projecto. À Associação de Cegos e Amblíopes de Portugal por ter-se disponibilizado a contribuir com ideias, discussão, e por ter recrutado e organizado grupos de pessoas cegas para testes. Ao Programa Operacional da Sociedade do Conhecimento, por ter permitido dar o arranque financeiro ao projecto, necessário para algo desta envergadura.

Um especial obrigado ao meu orientador, o Prof. Dr. Diamantino Freitas autor do projecto NAVMETRO®, que de forma incansável se dedicou ao projecto, e que particularmente tanto me ensinou ao longo de todos estes anos. Ao Prof. Dr. Rui Araújo, meu co-orientador, por ter sido tão prestável como foi. Sem ele não teria ingressado no projecto. Ao Arq. Manuel Teixeira por ter representado um empenho tão grande da Metro do Porto que permitiu o desenvolvimento do projecto, sem nunca se ter recusado a nada. À Arq. Joana Baptista por ter colaborado sempre de forma eficaz, e prestável no que foi necessário ao longo do tempo. Também um agradecimento especial à equipa técnica do NAVMETRO® E INFOMETRO na pessoa da Eng. Isabel Mafra encarregue dos diálogos e da interacção com o utilizador, ao Eng. João Machado responsável pela programação do IVR, e ao Eng. Jorge Alves na programação de webservices e afins. Na equipa da ACAPO agradeço também à Dra. Mariana Rocha, Dra. Diana Santos, Dra. Paula Azevedo, e ao Dr. João Fernandes, que prestaram sempre todo o apoio pedido. Uma palavra de agradecimento também a todas as pessoas cegas que participaram em testes, e que por tantas vezes ajudaram. De referir também o apoio prestado pela Prof. Dra. Brigitte Röder da Universidade de Hamburgo, coordenadora do “Brain Development Lab”, na pesquisa do estado da arte.

Finalmente um agradecimento muito especial à família na pessoa da minha esposa Raquel e do meu filho Luís, e aos meus pais que me criaram e me deram uma educação. Sem eles e a sua compreensão, colaboração e inspiração, não teria sido possível realizar este trabalho. Isto é para vós...

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xvi
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Motivação da Dissertação.....	2
1.2 Objectivos da Dissertação	3
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
Capítulo 2 - Localização Sonora.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Audição humana.....	7
2.3 Intensidade Sonora	33
2.4 Como se Processa a Localização Sonora Espacial	44
Capítulo 3 - Aplicabilidade da Localização Sonora para Pessoas com Deficiência da Visão.....	67
3.1 Introdução.....	68
3.2 Capacidade de Localização Espacial de Fontes Sonoras em Deficientes da Visão.....	69
Capítulo 4 - Testes e Ensaios	89
4.1 Introdução.....	89
4.2 Ensaios realizados.....	90
4.2.1 Testes preliminares qualitativos de localização.....	90
4.2.2 Testes preliminares qualitativos de localização e navegação	90
4.2.3 Testes preliminares com ambiente acústico real com pessoas cegas	92
4.2.4 Testes preliminares em espaço aberto para análise da acuidade azimutal para vários tipos de som de conteúdo espectral diferente.	93
4.2.5 Testes iniciais em ambiente de estação de metro apoiados no SOS.....	99
4.2.6 Adequação de sons a espaços públicos.....	100
4.2.7 Testes diferenciais ao uso do SOS.....	101

4.2.8	Teste à situação limite da localização vertical no SOS	102
4.3	Métodos de apontar para a localização da fonte sonora	110
4.4	Resenha dos resultados obtidos experimentalmente.....	112
Capítulo 5 - Sistema de Orientação Sonora		113
5.1	Especificação de Requisitos.....	115
5.1.1	Definição das características a testar e suas conclusões	115
5.1.2	Verificação do meio ambiente	117
5.1.3	Contacto com as necessidades dos Utilizadores.....	120
5.2	Guiar as pessoas com som.....	123
5.3	Instalação SOS.....	126
5.4	Dois subsistemas funcionais do SOS	134
5.5	Instalação de Dispositivos e suas Cablagens	138
5.6	Software	140
5.7	Conclusão	141
Capítulo 6 - Conclusões.....		145
6.1	Perspectivas de trabalhos futuros	149
Apêndice A A unidade Bel (B)		151
Apêndice B Considerações sobre as secções dos condutores.....		155
Apêndice C Identificação de condutores e secções normalizadas		157
Apêndice D Extracto da Tabela de Roteamento e da Tabela de Dispositivos.....		159
Apêndice E Esquema eléctrico de ligação aos Altifalantes tipo B		161
Apêndice F Plantas de Localização dos dispositivos.....		163
Apêndice G Medições de Ruído na Estação da Trindade.....		165
Apêndice H Árvore de Diálogos do Sistema NAVMETRO		167
Glossário.....		171
Índice Remissivo		173
Referências		175

Lista de figuras

Figura 1 - Visão esquemática do ouvido e suas principais dependências (MIROL, 2002).	7
Figura 2 - Secção do ouvido humano. Ilustração meramente indicativa dos volumes por Brodel em 1946 (Møller, 2006).....	7
Figura 3 - Partes constituintes do pavilhão auricular (Azevedo, 1994)	8
Figura 4 - Fotos de diferentes pavilhões auscultadores.....	8
Figura 5 - Reflexões (em cima) e Ressonâncias (em baixo) do pavilhão auricular (Duda, 2000)	9
Figura 6 - Ouvido médio e ouvido interno (Azevedo, 1994)	11
Figura 7 - Secção da cóclea (Blatrix).....	13
Figura 8 - Vista esquemática da cóclea em corte mostrando sua estrutura interna básica (Guyton, 2002).....	14
Figura 9 - Esquema simplificado das cavidades do ouvido (MIROL, 2002)	15
Figura 10 - Órgão de Corti (Blatrix).....	15
Figura 11 - Secção da cóclea com destaque ao órgão de Corti (MIROL, 2002).....	16
Figura 12 - Representação das ondas ao longo da membrana basilar. A) Sinais de alta frequência, B) Sinais de média frequência, C) Sinais de baixa frequência (Guyton, 2002).....	17
Figura 13 - Movimento do líquido na cóclea desenrolada após um impulso do estribo (Guyton, 2002).....	17
Figura 14 - Padrões vibratórios da membrana basilar ao longo do percurso (Møller, 2006)	19
Figura 15 - Gráfico da relação rigidez da membrana basilar, com a distância à janela oval (MIROL, 2002).....	19
Figura 16 - Analogia entre a membrana basilar e uma linha de transmissão	20
Figura 17 - Pormenor do órgão de Corti (Guyton, 2002).....	21
Figura 18 - Ilustração das CCI e das CCEs (Blatrix)	22

Figura 19 - Contração da CCE (Moore, 1997)	23
Figura 20 - Movimento da membrana basilar e das células lá apoiadas (MIROL, 2002)	24
Figura 21 - Equivalente eléctrico do comportamento das CCE	24
Figura 22 - Uma ilustração geral do percurso das ondas sonoras até ao nervo auditivo com sequência de funcionamento de 1 a 9 (MIROL, 2002)	25
Figura 23 - Gráfico da posição da membrana em função do tempo e relação com impulsos neurónais (MIROL, 2002)	26
Figura 24 - Vias do trato auditivo no SNC. O tempo médio de transmissão desde a cóclea até o córtex pode ser estimado em 10 milisegundos (MIROL, 2002)	29
Figura 25 - Actividade na membrana basilar para sinais de ruído de banda estreita com intensidade constante (ilustração de Lord Gatley e Evensen obtida de Lamancusa, 2000)	30
Figura 26 - Efeitos de máscara (Lamancusa, 2000)	31
Figura 27 - Comparação de estimativas de bandas críticas (Lamancusa, 2000)	32
Figura 28 - Curvas padronizadas para compensar variações de sensibilidade	34
Figura 29 - Limiar de audição e curvas de igual sonoridade	35
Figura 30 - Ilustração das dos fenómenos de reflexão, refacção e difusão (Duda, 2000)	38
Figura 31 - Reflexão das ondas sonoras por um corpo acusticamente reflector	38
Figura 32 - Exemplo de acústica de ambientes	40
Figura 33 - Gráfico típico de pressões sonoras ao longo do tempo para uma fonte efémera ..	40
Figura 34 - Representação da propagação das ondas sonoras com a distância em ar livre (Blauert, 1983)	43
Figura 35 - Representação dos eixos na orientação sonora (Blauert, 1983)	44
Figura 36 - Gráfico de variação de intensidade em função do ângulo azimutal para várias frequências (Moore, 1997)	45
Figura 37 - Representação do efeito do comprimento de onda em objectos de diversos tamanhos relativos (Yost, 2000)	46
Figura 38 - Funcionamento da Rede de linhas de atrasos neuronais (Hartmann, 1999)	48
Figura 39 - Ilustração do problema do comprimento de onda incidente em relação aos ouvidos (Hartmann W. M., 1999)	50
Figura 40 - Localização azimutal por diferenças interaurais	51
Figura 41 - Acuidade horizontal na localização de uma fonte sonora parada realizada com impulsos de ruído branco de 100ms (Blauert, 1983)	51
Figura 42 - Variação do MAA em função da frequência para vários azimutes (Moore, 1997) ..	52
Figura 43 - Cone de confusão. a) no plano horizontal b) em perspectiva (Azevedo, 1994)	53

Figura 44 - Localização da elevação na localização sonora (Duda, 2000)	54
Figura 45 - Acuidade na elevação (plano medial) (Blauert, 1983)	55
Figura 46 - Erros obtidos com a oclusão do pavilhão auricular (Oldfield & Parker, 1984)	55
Figura 47 - Gráfico de nível versus intensidade para som da frente, de cima, e de trás, tal como é ouvido no KEMAR. A comparação das curvas revela os ganhos relativos da HRTF (Hartmann W. M., 1999)	57
Figura 48 - Fotografias do KEMAR (Duda, 2000)	57
Figura 49 - Exemplo de uma HRIR (em cima) e HRTF (em baixo) para um azimute de 40° à direita com 0° de elevação (Stern, Wang, & Brown, 2006)	58
Figura 50 - Experiência de Wallach (1938, 1939, 1940) (Blauert, 1983)	59
Figura 51 - Ilustração do efeito de precedência (Hartmann W. M., 1999)	63
Figura 52 - Erro de localização da distância à fonte sonora com cabeça imobilizada, com uma intensidade de 70 fon a 4m (Blauert, 1983)	64
Figura 53 - Performance obtida na localização sonora binaural para cada hemicampo (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998)	71
Figura 54 - Performance obtida na localização sonora monaural para cada hemicampo (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998)	73
Figura 55 - Percentagem de ensaios em que os sons foram correctamente lateralizados na condição binaural e nos dois casos da condição monaural (ipsilateralmente e contralateralmente) (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998)	74
Figura 56 - Erro médio de auto-posicionamento em função da extensão da deficiência visual (Després, Candas, & Dufour, 2005)	75
Figura 57 - Planta da sala anecóica onde ocorreu a experiência (Després, Candas, & Dufour, 2005)	76
Figura 58 - Disposição dos altifalantes na experiência (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)	80
Figura 59 - Gradientes da percentagem de detecções (média e desvio padrão) (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)	81
Figura 60 - ERPs da zona Cz para o Array central (em cima) e periférico (em baixo) de altifalantes (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)	82
Figura 61 - Gradientes de amplitude N1 (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)	82
Figura 62 - Mapa topográfico de tensões relativas à componente N1 (efeito de atenção) dos ERP (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)	83
Figura 63 - Localização da elevação sonora: a) pessoas cegas, b) pessoas não cegas. Linha ideal a tracejado. (Lewald, 2002)	84
Figura 64 - Análise da regressão linear das respostas entre os coeficientes de correlação e a intercepção com o eixo vertical da linha da regressão. Os pontos começados pela letra "B" referem-se a cegos. (Lewald, 2002)	85

Figura 65 - Erro médio absoluto na elevação para pessoas cegas e não cegas (Zwiers, Opstal, & Cruysberg, 2001)	86
Figura 66 - Ilustração retirada do guião da experiência. Zona de testes de 324m ² junto ao auditório da Faculdade de Engenharia	91
Figura 67 - Fotografia de alguns dos elementos da equipa e das pessoas cegas em teste.	93
Figura 68 - Foto da zona de testes onde se percebe a circunferência graduada (para a medida). No centro encontra-se a plataforma de madeira onde o sujeito de teste se encontra parado apenas a rodar para a direcção de onde o som provém.....	94
Figura 69 - Foto ilustrativa do processo de medição do desvio angular e do capacete com espelho que o sujeito em teste usou	95
Figura 70 - Mais à esquerda uma foto do sistema do capacete com o espelho acoplado; No centro uma foto da graduação realizada com pequenas estacas de madeira legendadas e separadas com um espaçamento de 2º em torno de cada altifalante; À direita um grande plano da pequena plataforma onde os sujeitos de teste se encontraram parados apenas a rodar na direcção dos radiadores sonoros.....	96
Figura 71 - Gráfico dos resultados obtidos para o som tipo “chirp low-high”.	97
Figura 72 - Extracto da planta do piso intermédio da estação de metro da Trindade. O Altifalante em teste pertencente ao SOS, é o referenciado como “O8”.....	103
Figura 73 - Esquema do “setup” experimental, com foto sobreposta e calibrada dos resultados obtidos.	104
Figura 74 - Fotografia da posição de início 6 com o sujeito RV.	105
Figura 75 - Processo de marcação da posição final em sequência.	105
Figura 76 - Fotografia do local de testes. Em baixo no centro, observam-se os eixos do posicionamento; imediatamente por cima, observa-se o altifalante.....	106
Figura 77 - Fotografia calibrada com a ajuda de fita métrica constante na fotografia, e com a sobreposição dos pontos marcados.	107
Figura 78 - Gráfico com as localizações e médias. Eixo horizontal com -100cm a 80cm. Eixo vertical com -80cm a 60cm	109
Figura 79 - Comparação do ângulo de desvio entre três diferentes métodos: (A) cara, (B) corpo), (C) táctil.	110
Figura 80 - Diagrama exemplificativo simplificado do funcionamento do sistema NAVMETRO®	114
Figura 81 - Extracto das medições de ruído efectuadas em três situações, uma em cada piso (dBA)	118
Figura 82 - Gráfico de variação do ruído em função da frequência para três situações em três pisos da estação da Trindade	119
Figura 83 - Ilustração do trajecto perfeito AB (mais escuro) versus um trajecto típico por aproximações sucessivas (mais claro)	123

Figura 84 - Ilustração do conceito de navegação por “landmarks”	124
Figura 85 - Planta com o zonamento SOS do cais inferior da estação da Trindade	128
Figura 86 - Pormenor da planta ilustrando um exemplo de encaminhamento	129
Figura 87 - Placa de Relés comandada pelo “Sound Server”	130
Figura 88 - Esquema funcional do SOS	131
Figura 89 - Fotografia legendada da frente do bastidor NAVMETRO®	132
Figura 90 - Altifalantes usados na instalação SOS (tamanhos relativos aproximados).....	133
Figura 91 - Fotografias exemplificativas da instalação dos dispositivos	133
Figura 92 - Excerto da árvore de diálogos NAVMETRO® (Mafra, 2009)	134
Figura 93 - Representação esquemática com compromisso entre os três requisitos da instalação.....	139

Lista de tabelas

Tabela 1 - Correspondência entre “fons” e “sones”	36
Tabela 2 - Valores médios para alguns equipamentos geradores de ruído	37
Tabela 3 - Intervalos para o Mínimo Ângulo Audível para várias experiências de vários autores (Blauert, 1983)	52
Tabela 4 - Erros angulares de cada pessoa cega para cada som e cada altifalante (P1 a P5).	96
Tabela 5 - Ordenação de resultados por projector (altifalante) e por tipo de som	97
Tabela 6 - Participantes da experiência	103
Tabela 7 - Erros obtidos considerando uma altura média de cada sujeito de 1,65m.....	108
Tabela 8 - Tabela de médias da experiência	108
Tabela 9 - Encaminhamento da preferência “melhor caminho” tendo como partida a zona 18	128

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

ABR	<i>Auditory brainstem response</i>
ASR	<i>Automatic speech recognition</i>
ATF	<i>Anatomical transfer function</i>
CCD	<i>Charge-coupled device</i>
CCE	Células ciliadas externas
CCI	Células ciliadas internas
CE	Células ciliadas
DTMF	<i>Dual tone multi frequential</i>
ERP	<i>Event-related potential</i>
HRTF	<i>Head-related transfer function</i>
ILD	<i>Interaural level difference</i>
ITD	<i>Interaural time difference</i>
IVR	<i>Interactive voice response</i>
LCR	Líquido cefalorraquidiano
MAA	<i>Minimum audible angle</i>
SNC	Sistema nervoso central
SNS	Sistema nervoso simpático
SOS	Sistema de orientação sonora
TR	Tempo de reverberação
TTS	<i>Text-to-speech</i>
WPS	<i>Wireless Positioning System</i>

Lista de símbolos

a	Raio médio da cabeça
I	Intensidade de som
k	Correlação matemática entre a grandeza A e a potência
L_p	Nível de pressão sonora

L_w	Nível de potência sonora
N_c	Valor esperado de coincidências na célula e-e
P	Pressão
P_L	Taxa de picos neuronais do ouvido esquerdo
P_R	Taxa de picos neuronais do ouvido direito
t	Atraso
T_s	Duração do estímulo sonoro
T_w	Abertura da janela de coincidência do neurónio
τ	Atraso neuronal

Capítulo 1

Introdução

O papel do cidadão deficiente na sociedade tem sido progressivamente alvo de valorização por parte dos projectistas e investigadores, de forma a diminuir desigualdades sociais. Uma grande parte deste significativo segmento da população não tem ainda sequer condições para sair de forma segura e autónoma dos seus lares. Quando se procura saber porquê, as respostas infelizmente não são surpreendentes. Vivemos num mundo não acessível na sua generalidade e tudo o que é realizado raramente tem o cuidado de proporcionar exactamente as mesmas condições a toda a população de uma forma justa e igualitária. Uma pessoa cega quando deseja sair de casa terá de vencer provavelmente logo de imediato uma série de barreiras arquitectónicas. Depois terá de se deslocar até a um meio de transporte, e até lá terá de passar por passeios estreitos com obstáculos perigosíssimos (por vezes valas de obras, postes, obstáculos salientes com pé reduzido, etc.) e lá chegando terá de arranjar forma de continuar a verdadeira “aventura”. Dependendo do transporte a apanhar, existirão neste momento uma série de informações a receber mediante e para a escolha do destino desejado, nomeadamente, a carreira, o custo da viagem, a sua duração, etc., e na generalidade dos transportes públicos, nada disto será fácil de obter, ou vindo de outra forma, será muito provavelmente complicado.

Para se atingir a igualdade de oportunidades entre todos nesta matéria, sugere-se a introdução de um sistema de navegação pessoal, capaz de fornecer não só a informação mas também a orientação.

Mesmo não considerando a óbvia responsabilidade social que está inerente, compreende-se que, só através de medidas deste género se poderá usufruir mais do contributo desta numerosa população para a sociedade.

No contexto português, a problemática da acessibilidade dá passos cada vez mais consequentes, tendo já havido um assinalável esforço por parte das empresas de transportes públicos em adaptar-se a estas necessidades evidentes.

Segundo o Censo de 2001 (INE) cerca de 1,6% da população portuguesa é deficiente da visão. Este importante segmento da população constitui cerca de um quarto do total de pessoas com deficiências em Portugal, ou seja, aproximadamente 6,1% da população.

Abriu-se então a perfeita oportunidade para um projecto inovador que pretende a título experimental e logo que possível a título definitivo, revolucionar a acessibilidade dos deficientes da visão nas estações do metropolitano do Porto. A empresa Metro do Porto, S. A. tem vindo sistematicamente a apoiar e a contribuir para a investigação e desenvolvimento deste projecto que decorre no Laboratório de Sinais e Sistemas (LSS). Com o apoio da Associação de Cegos e Amblíopes de Portugal - ACAPO, foi possível a todo o momento adaptar a solução às verdadeiras necessidades dos utilizadores, construindo um sistema que pretende servir os cegos de forma a igualizar em todos os aspectos possíveis as condições de acesso ao serviço da Metro do Porto. Sublinhe-se a ambição de “igualizar em todos os aspectos” como o verdadeiro conceito de inclusão.

Além dos parceiros atrás mencionados, é importante referir a contribuição fundamental da linha de financiamento Inclusão Digital e posteriormente o Programa Operacional para a Sociedade do Conhecimento, cujo contributo foi decisivo para viabilizar a realização do sistema piloto que se encontra já em fase de pré-produção.

1.1 - Motivação da Dissertação

No âmbito da pesquisa realizada no projecto NAVMETRO® para a realização do Sistema de Orientação Sonora (SOS), e dos resultados posteriormente obtidos aquando de uma experimentação aprofundada, pensou-se que seria um passo importante a escrita de um documento que compilasse toda a pesquisa e resultados obtidos nesta matéria.

Estando o autor a trabalhar na área da acessibilidade há cerca de 3 anos, possui já uma clara sensibilidade para esta problemática, e para as necessidades destes membros da sociedade que muitas vezes não podem oferecer o seu contributo para a sociedade por não existirem condições para a sua movimentação e/ou acesso à informação.

A falta de referências bibliográficas na aplicabilidade dos princípios da localização sonora em soluções deste tipo e em particular em aplicações destinadas aos deficientes da visão, funcionou também como estímulo para a realização de um documento que efectue uma compilação do estado da arte nestas matérias, e simultaneamente forneça os primeiros estudos à aplicabilidade deste princípio de orientação sonora.

Com esta dissertação espera-se marcar um ponto de estabilização de uma ideia que já produziu resultados visíveis e altamente promissores, de acordo com as experiências realizadas e a implementação do SOS.

1.2 - Objectivos da Dissertação

Desde o século XIX que o sistema auditivo começou a ser alvo de uma vasta e sistemática investigação. Quer do ponto de vista anatómico, ou no ponto de vista funcional, têm sido desenvolvidos trabalhos com o objectivo de compreender os complexos mecanismos que se desenvolvem no sistema auditivo e como poderá ser usado com mais eficácia ou com outras funções.

Esta dissertação tem como objectivo estudar estas questões com algum detalhe, referindo e explicando os mecanismos associados à detecção e interpretação do som pelo ser humano, dando a conhecer características do som, e como o mesmo é quantificado e ainda mostrando como se processa a localização espacial de sons.

Como já foi referido, pretende-se que este documento sistematize o estado da arte das matérias fundamentais de que o sistema SOS faz uso, e simultaneamente documente um conjunto de simples mas importantes experiências que foram realizadas no seu âmbito. Numa primeira fase, testando a já bastante estudada capacidade humana em localizar referências sonoras no espaço e, numa segunda fase, realizando experiências que constituam uma base fundamental na aplicabilidade dos princípios da orientação sonora aos deficientes da visão, motivo pelo qual se revestem logo de grande importância.

Um dos objectivos desta Dissertação também se prende com a intenção de responder às questões mais vibrantes que se impõem para o uso da orientação sonora nesta aplicação específica: Conseguirá um deficiente da visão perceber com precisão e de forma útil de onde provém um som? Terá um cego mais condições para fazê-lo? Será um indivíduo capaz de fazer o mesmo em ambientes sonoros ruidosos (estações de metropolitano)?

Pretende-se também que este documento aborde os pormenores da implementação do SOS, parte integrante do sistema NAVMETRO®.

1.3 - Estrutura da Dissertação

Em termos estruturais a Dissertação encontra-se dividida em duas partes fundamentais que documentam a principal actividade realizada neste âmbito. A primeira parte é relativa a um extenso trabalho de pesquisa sobre o estado da arte nas matérias em questão, que se estende até ao capítulo 3. A segunda parte aborda toda uma actividade experimental vocacionada para a verificação de conceitos estudados, e o projecto e concretização de uma aplicação prática dessas temáticas.

No segundo capítulo é apresentado o estado da arte no que diz respeito à caracterização do sistema auditivo e do seu funcionamento, ou seja, a descrição anatómica do sistema auditivo e os princípios fundamentais para a interpretação das vibrações do ar em estímulos interpretados pelo sistema nervoso central. De seguida são focadas as questões mais técnicas relacionadas com a intensidade do som, que na sua essência tratam das questões

fundamentais da engenharia acústica. No ponto seguinte, encontrar-se-ão os resultados da pesquisa no estado a arte da localização espacial de fontes sonoras, com as diversas variáveis que este tópico possui.

No terceiro capítulo é abordada a aplicabilidade da localização espacial aos deficientes da visão. Existe no senso comum a ideia que alguém privado de um dos sentidos, tende a estimular mais os restantes. É então objectivo deste capítulo esclarecer e tirar conclusões objectivas em relação a possibilidade de aplicação de soluções de acessibilidade baseadas nesta tecnologia.

No quarto capítulo encontra-se o relato dos trabalhos experimentais realizados com o propósito de apurar a aplicabilidade do princípio em questão no público-alvo: os deficientes da visão. São descritos os “setups” experimentais, as condições de realização, os resultados obtidos e são apresentadas conclusões.

Perto do final, no quinto capítulo, far-se-á uma descrição com algum detalhe da maior experiência realizada: o SOS. O sistema de orientação sonora será portanto explicado nas suas partes e resultados obtidos.

Na conclusão encontrar-se-ão os comentários finais dos trabalhos desta Dissertação e lançar-se-ão ideias para trabalhos futuros nestas matérias.

Capítulo 2

Localização Sonora

Neste capítulo irá ser apresentada a problemática da localização de referências sonoras. Inicialmente será tratado o mecanismo da audição humana nos seus vários componentes. Esta secção irá permitir perceber melhor o funcionamento da cadeia de mecanismos que transformam a vibração do som captada no ambiente, em sinais nervosos interpretados pelo cérebro humano.

Seguidamente, uma secção irá frisar os aspectos mais importantes relacionados com o Nível de Pressão Sonora e os limites do ser humano nessa matéria. Serão também apresentadas as unidades que permitem quantificar estas grandezas.

Numa secção seguinte, irá ser abordada com alguma profundidade a problemática da localização espacial de sons, com especial atenção à aplicabilidade para a aplicação desejada, ou seja, o projecto NAVMETRO®. Será portanto uma localização essencialmente azimutal com informação da distância até à fonte sonora.

Finalmente, irá ser descrito como se processa a localização de fontes sonoras no espaço livre anecóico, e em espaços reverberantes.

2.1 Introdução

O sistema auditivo humano é uma máquina precisa, robusta, e perfeitamente integrada. Perceber como a audição funciona é fundamental para compreender como são ouvidos os sons que chegam até nós. O ouvido humano é de tal forma fascinante e preciso, que consegue detectar ínfimas diferenças de timbre entre um violino Stradivarius com 300 anos, e uma sua cópia moderna (Yost, 2000). Consegue receber uma gama muito vasta de amplitudes sonoras, e consegue seleccionar em ambientes ruidosos aquilo que lhe interessa. Possui ainda mecanismos de protecção para se defender de intensidades elevadas. É absolutamente um dos sentidos mais completos e robustos.

Esta análise servirá de apoio para se perceber como é feita a localização espacial de fontes sonoras. Verificar-se-á também que a precisão da localização espacial de fontes sonoras não é igual em todo o espaço circundante. Existem mesmo algumas zonas angulares em que se cometem erros significativamente maiores.

O tipo de som transmitido por uma fonte sonora tem uma grande importância na sua localização espacial. Entre uma grande variedade de tipos de som, podem-se considerar sinais de banda larga ou de banda estreita e sinais com diversos tipos de modulações.

São considerados sinais de banda larga aqueles que cobrem uma parte importante do espectro auditivo humano. A obtenção de um sinal de banda larga é possível por exemplo através da produção de um impulso, uma vez que a amplitude do seu espectro de frequência é constante. Contudo, a energia de tal sinal é limitada devido à limitação da máxima pressão sonora não passível de causar dano ao sistema auditivo. Uma forma de se ultrapassar esta dificuldade é produzir uma série de curtos impulsos com a duração desejada e espaçamentos aleatórios. Tal sequência originará uma aproximação ao denominado ruído branco cuja energia é função da duração escolhida e que posteriormente será limitado ao espectro auditivo. Alternativamente, um sinal de banda estreita arbitrária pode ser obtido através de filtragem linear passa-banda de ruído branco.

O ruído branco de banda larga é bastante utilizado nas experiências de audição, por conter energia em todas as frequências do espectro audível, enquanto que o ruído de banda estreita só tem energia nas frequências pretendidas (deixa de poder denominar-se “branco” por isso mesmo e numa analogia electromagnética ao espectro luminoso que na sua totalidade é representado pela luz branca).

Estes sinais de teste são os que permitem em princípio melhor precisão na localização espacial. Existem contudo outros sinais como tons puros, estalidos ou voz, que também têm sido utilizados para os estudos de localização sonora.

A partir de estudos da literatura realizados nesta matéria, irão ser apresentados alguns resultados que visam compreender como o sistema auditivo interpreta a informação espacial. Irá também ser enfatizada a diferença entre uma localização de uma fonte num espaço livre ou em espaços fechados reverberantes. Nestes últimos poderá constatar-se que existem condições muito próprias na audição humana para, por exemplo, salientar fontes de som existentes em ambientes ruidosos.

No que concerne à tentativa da ciência em replicar o fenómeno da audição num modelo controlável, foram já criados modelos que visam emular esse efeito. A maioria dos modelos existentes baseia-se nas funções de transferência do ouvido, considerando também fenómenos como a influência do tronco ou da cabeça na forma como o som (a vibração do ar) é transmitida aos receptores nervosos. Desenvolveram-se assim sistemas auditivos simulados que, fazendo uso de filtros (normalmente digitais), permitem obter características de amplitude e de fase.

2.2 Audição humana

O som é um fenômeno pertencente ao mundo físico e intimamente ligado aos seres vivos pela sua importância no reconhecimento do ambiente e como meio de comunicação. Ele é já percebido ainda antes do nascimento, havendo um aperfeiçoamento da sua recepção durante a fase de crescimento, com posterior declínio na fase senil.

O desenvolvimento embrionário do ouvido tem início com quatro semanas de gestação, quando aparecem os traços de sua formação; desenvolve-se em grande escala a partir da nona semana, sendo completado, em média, ao final da décima primeira semana. O amadurecimento de tal sistema está assegurado no quinto mês de gestação.

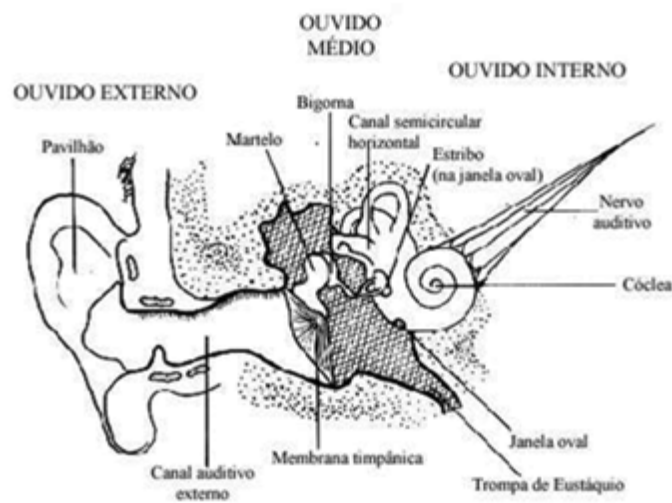


Figura 1 - Visão esquemática do ouvido e suas principais dependências (MIROL, 2002).

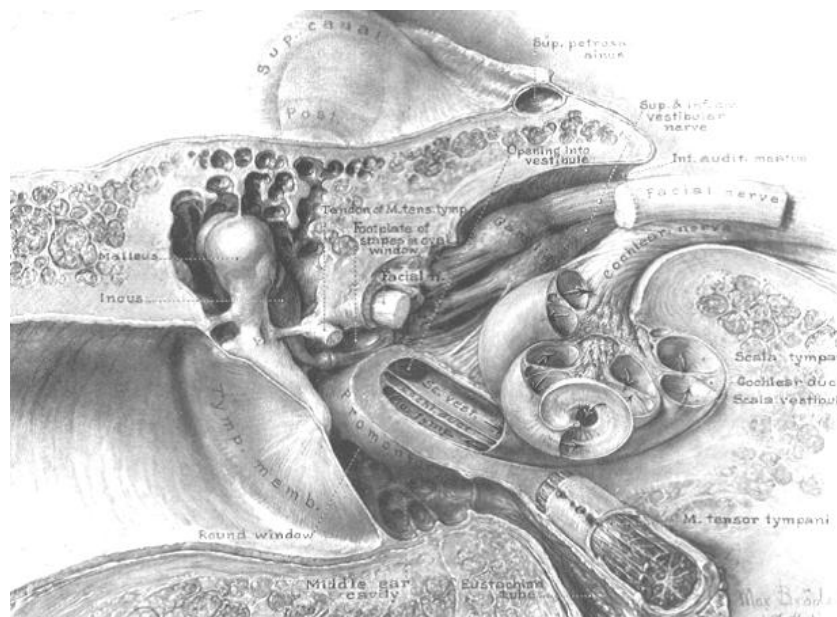


Figura 2 - Secção do ouvido humano. Ilustração meramente indicativa dos volumes por Brodel em 1946 (Møller, 2006)

2.2.1 Anatomia/Fisiologia

Do ponto de vista anatómico, o ouvido humano é algo de excepcional. Sendo a audição um sentido extremamente preciso, o mecanismo que possibilita que a vibração do ar seja interpretada como som, para além de complexo, é extremamente sensível e repleto de partes com uma mecânica totalmente peculiar. Na sua constituição é composto por três secções fundamentais: o ouvido externo, o médio e o interno.

2.2.1.1 O ouvido externo

O ouvido externo na sua essência é responsável pelo condicionamento da informação acústica externa, sendo composto por um pavilhão auricular, um canal auditivo, uma membrana timpânica e diversos meios de protecção física (pêlos, glândulas produtoras de cerúmen, o próprio pavilhão auricular, etc.), apresentando superfícies irregulares numa estrutura aproximadamente cónica que afunila para o interior da cabeça.

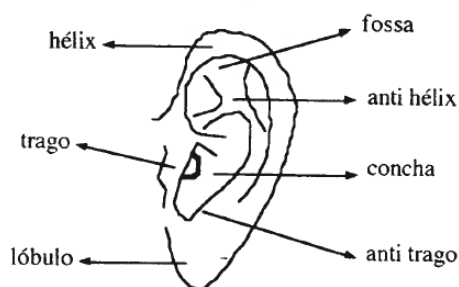


Figura 3 - Partes constituintes do pavilhão auricular (Azevedo, 1994)

O pavilhão auricular, que nos tempos que correm perdeu a mobilidade própria que provavelmente tinha nos nossos antepassados, mas que ainda se encontra em alguns mamíferos no sentido de melhorar a percepção direccional do som, modifica mesmo assim de forma acentuada as ondas sonoras que chegam do exterior. A sua forma em concha, com concavidade voltada para a frente-lado, faz com que o padrão tonal e a intensidade dos sons provenientes do quadrante frontal sejam diferentes dos que provenham dos lados ou de trás. As protuberâncias visíveis na face externa do pavilhão (Figura 4) influem em forma similar na forma como o sinal acústico é condicionado geometricamente pelo ouvido externo.



Figura 4 - Fotos de diferentes pavilhões auscultadores

Diferentes indivíduos terão certamente pavilhões auscultadores diferentes mas na sua essência as estruturas são semelhantes, como se pode verificar pela Figura 4, com funções bem definidas como indicado na Figura 5. Contudo, as pequenas variações de forma e tamanho que esta estrutura possui de indivíduo para indivíduo vão particularizar de alguma forma a sua capacidade em captar som vindo do exterior. Posteriormente este assunto irá ser debatido.

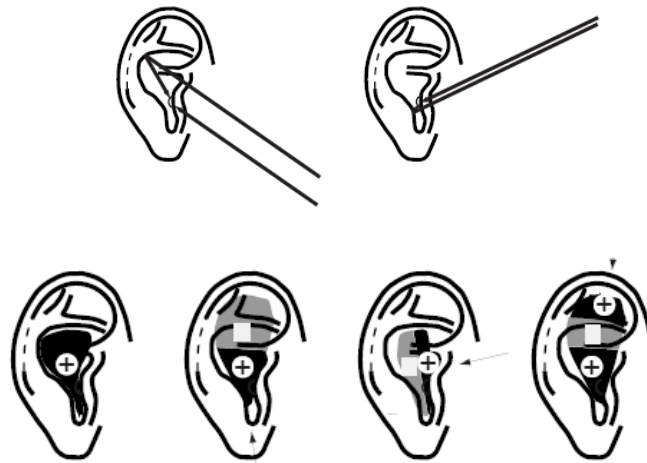


Figura 5 - Reflexões (em cima) e Ressonâncias (em baixo) do pavilhão auricular (Duda, 2000)

O canal auditivo externo tem a forma aproximada de um cilindro aberto ao exterior por um extremo e fechado pelo tímpano no outro. As dimensões são de aproximadamente 7mm de diâmetro por 25 a 27mm de comprimento (MIROL, 2002).

As ondas sonoras, directas ou reflectidas pelo pavilhão auricular, entram no canal auditivo externo para alcançar o tímpano e são modificadas pelas características ressonantes daquele, devido à sua forma que, por ser cilíndrica, o converte num sistema ressonante nas frequências centradas nos 3.500Hz.

Embora o pavilhão auricular influencie também essa ressonância, a sua função está principalmente relacionada com a percepção da direcção de origem dos sons. Aquele facto origina que se dê privilégio à zona do espectro audível onde se encontra a voz humana, muito importante para a percepção do significado das inflexões e modulações que a compõem e a fazem inteligível. O incremento da pressão sonora nessa faixa pode chegar a 10dB (MIROL, 2002).

O tímpano por sua vez é constituído por tecidos conjuntivos em forma de membrana, com uma área de 55mm² (Guyton, 2002). Tem uma forma aproximadamente cónica, com a concavidade voltada para baixo e para o exterior em direcção ao canal auditivo. Esta membrana irá transmitir a vibração do ar ao ouvido interno. Numa analogia eléctrica poder-se-ia referir que o tímpano pode ser visto como o enrolamento primário de um transformador de impedâncias que ocupa o ouvido médio.

Por outro lado, esta membrana é também o limite físico entre o exterior e o interior da cabeça, com a função de protecção que está implícita.

2.2.1.2 O ouvido médio

A membrana timpânica e o sistema ossicular, que constituem o ouvido médio (Figura 6), transmitem o som através dessa parte do ouvido. O sistema ossicular consiste em três pequenos ossos designados por martelo, bigorna e estribo.

O ouvido médio começa na face interna da membrana timpânica, que está exposta à câmara de ar do ouvido médio, cuja pressão oscila em torno da pressão atmosférica circundante. Isto é assegurado pela comunicação com o exterior, através do canal denominado "trompa de Eustáquio", que se abre à atmosfera na faringe tendo funções de protecção bacteriana do exterior, de ventilação, e drenagem (Costa, 2008). Também está em contacto com o martelo do sistema ossicular. Esta união é razoavelmente rígida e garante a oscilação síncrona entre o martelo e o tímpano. A vibração é transmitida à bigorna, que se encontra articulada de forma semi-rígida com o martelo e, funcionando como uma alavanca, transmite a vibração ao estribo, que por sua vez está acoplado à janela redonda. A partir deste ponto começará o ouvido interno, que será o destino final da cadeia que transportará a vibração sonora (Costa, 2008).

A membrana timpânica e o sistema ossicular referido permitem uma maior sensibilidade de audição às ondas sonoras de entrada, sem os quais um som de fraca intensidade seria quase inaudível. Por outro lado, se o som atingisse directamente a janela oval, a maior parte do mesmo seria reflectido em vez de entrar na cóclea, pelo facto de que a resistência ao movimento das ondas sonoras da janela oval ser bastante superior à do ar. Deste modo, o ouvido médio converte as ondas sonoras transportadas pelo ar em ondas hidro-mecânicas que viajam através do líquido que preenche a cóclea, ou seja, funciona como um transformador que adapta a impedância sonora do ar para a impedância sonora do fluido coclear. A transmissão sonora através do ouvido médio é mais eficiente às médias frequências (Moore, 1997).

A pressão estática de ar na cavidade timpânica é regulada para o valor exterior por meio de breves aberturas da Trompa de Eustáquio (Figura 1), geralmente durante o processo de bocejar e deglutir ou engolir. Normalmente, esse canal forma um espaço hermeticamente fechado e o volume de ar no ouvido médio está selado (Costa, 2008). Quando sons muito intensos atingem a membrana timpânica, 80-90dB após um período de 40 a 80 milissegundos, produz-se um reflexo que causa a contracção dos músculos do ouvido médio, diminuindo a transmissão ossicular de sons de baixa frequência (Guyton, 2002). Esse reflexo de atenuação permite diminuir a intensidade sonora até cerca de 30 a 40dB. Este mecanismo protege a cóclea de lesões provocadas por sons intensos e mascara os sons de baixa frequência em

lugares muito barulhentos, suprimindo uma parte importante do ruído ambiental. Uma outra função, menos evidente, é a de atenuar a percepção da própria voz. Este efeito é mediado por referências encefálicas simultâneas à activação dos núcleos da fala. O mecanismo reflexo envolvido afecta também o ouvido contra-lateral e pode ser considerado similar ao reflexo fotomotor (contração da íris com diminuição da pupila ocular) perante um estímulo luminoso muito intenso. Mesmo assim, este tipo de reflexo é relativamente lento e pode não conseguir proteger totalmente o sistema coclear de traumatismos com sons muito intensos e curtos ou, também, menores e continuados. O reflexo é auto-extinguível após breve tempo, por acomodação, e é parcialmente independente em ambos os ouvidos.

Um outro processo de audição que tem sido considerado por alguns autores, embora com importância secundária (Blauert, 1983), é a transmissão óssea do som. Como o ouvido interno se encontra na cavidade óssea do osso temporal, as vibrações do crânio podem ser transmitidas ao sistema do ouvido interno, comportando-se como uma via de condução auditiva de eficácia (sensibilidade) reduzida em 30dB. Se a cadeia ossicular fosse retirada, ou se estivesse seriamente danificada, as ondas sonoras chegariam directamente à janela oval, também com uma atenuação de mais de 30dB (que seria a atenuação pela falta de adaptação de impedâncias da interface ar-água). Contudo, a energia disponível não é suficiente para que se ouça de uma forma efectiva através do osso (Guyton, 2002).

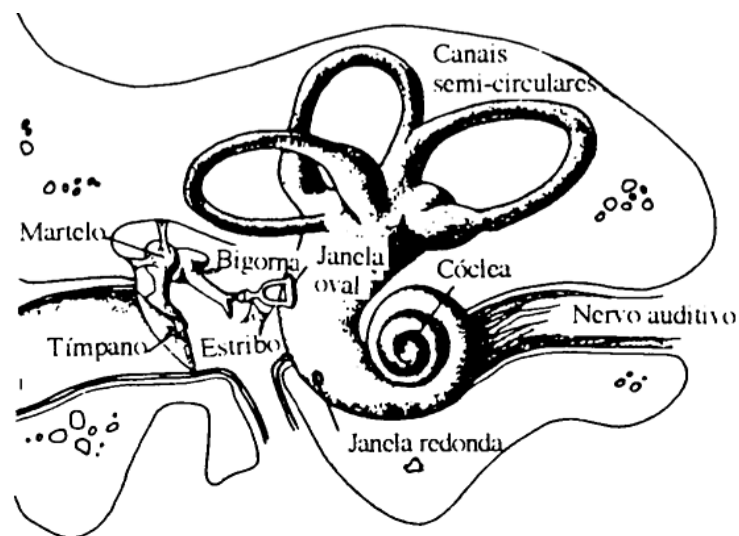


Figura 6 - Ouvido médio e ouvido interno (Azevedo, 1994)

A cadeia ossicular descrita acima forma um sistema de alavancas, cuja relação é de 1:1,3 (do tímpano à janela oval, o que implica uma força 1,3 vez maior nesta última), que funciona "em fase", ou seja, quando o tímpano "avança" no pico de pressão sonora, o estribo faz o mesmo para dentro da janela oval (Guyton, 2002). O estribo está fixado a esta janela de forma hermética para a água, por meio de um anel vedante entre ele e a abertura óssea da

janela. Este anel é também elástico, de modo a permitir o movimento de êmbolo do estribo dentro da janela, com o qual o movimento timpânico seria, finalmente, transmitido para o líquido que enche o ouvido interno. A relação de 1,3 mencionada facilitaria a adaptação de impedâncias entre o ar como veículo sonoro e o líquido (ouvido interno: meio líquido incompressível de alta inércia, necessitando altas pressões com pouca excursão), no entanto por si só é insuficiente para tal tarefa. No entanto, se considerarmos as áreas comunicadas por esta cadeia de propagação de sinal a situação compõe-se. Se, como foi referido, a área do tímpano é de 55mm^2 e a da janela oval de $3,2\text{mm}^2$, o efeito aumenta, então, para $1,3 \times (55/3,2)$, ou seja, a pressão sobre o líquido do ouvido interno será 22 vezes maior do que a do ar no tímpano (e o deslocamento, 22 vezes menor, segundo a razão de pressão na janela oval/Pressão no tímpano = $1,3 \times 0,55 / 0,032 = 22,34$). Considerando este fenómeno, pode-se concluir que a adaptação de impedâncias é de 50 a 75% do ideal para a faixa de frequências de 300 a 3000 Hz, o que permitiria a transferência quase total da energia das ondas sonoras nas faixas mais importantes (Møller, 2006)(Guyton, 2002).

A assinalar ainda esta delicada estrutura como um dos elementos que tornam possível a ocorrência da amplíssima faixa dinâmica que o ouvido é capaz de identificar. Basta lembrar que, para transmitir as vibrações correspondentes ao menos intenso som que o ouvido médio pode captar, o tímpano terá um deslocamento de somente 1 Angstrom, distância comparável às dimensões envolvidas de algumas moléculas ($1 \text{ \AA} = 0,000000001\text{m}$).

Em suma, os ouvidos externo e médio convertem vibrações sonoras de baixa pressão existentes no ar circundante em vibrações de baixa amplitude e alta pressão, adequados para serem transmitidos pelo meio líquido que envolve as células sensitivas do ouvido interno. Para além disso, permitem uma compressão dinâmica das ondas sonoras em frequências baixas, com o objectivo de proteger essas células sensitivas. Estas estruturas tornam também prioritárias as médias frequências em circunstâncias de uma elevada intensidade de ruído ambiente, de forma a que o Sistema Nervoso Central (SNC) faça a modulação da sensibilidade receptiva do sistema quando se tratar de fala humana.

2.2.1.3 O ouvido interno

O ouvido interno é o encarregado de realizar a transformação entre a energia mecânica da onda sonora captada e posteriormente adaptada, numa forma de energia (biológica, de base electroquímica) capaz de ser transmitida pelas fibras nervosas que, através do nervo auditivo, levarão a informação para ser processada pelas áreas correspondentes do SNC. Esta transformação será realizada depois da filtragem efectuada pelo ouvido externo e médio que transmitem a informação de forma analógica. Todavia, como as fibras nervosas não transmitem corrente eléctrica, ter-se-á de considerar uma nova grandeza analógica como será explicado. O órgão sensorial básico capaz de realizar estas funções será portanto a Cóclea.

O ouvido interno é constituído por uma estrutura espiralada cilíndrica em forma de cone, ou caracol, que se encontra repleta de um líquido ("perilínfa"), e que se inicia na janela oval. Esta hélice uma vez esticada mede 35 mm de comprimento, tendo uma secção junto à janela oval de 4 mm², diminuindo até 1 mm² no outro extremo. As suas paredes são rígidas por estarem inseridas directamente no osso temporal que é extremamente duro, sobre o qual desenvolve a sua forma espiralada (duas e meia voltas), ocupando um volume muito pequeno.

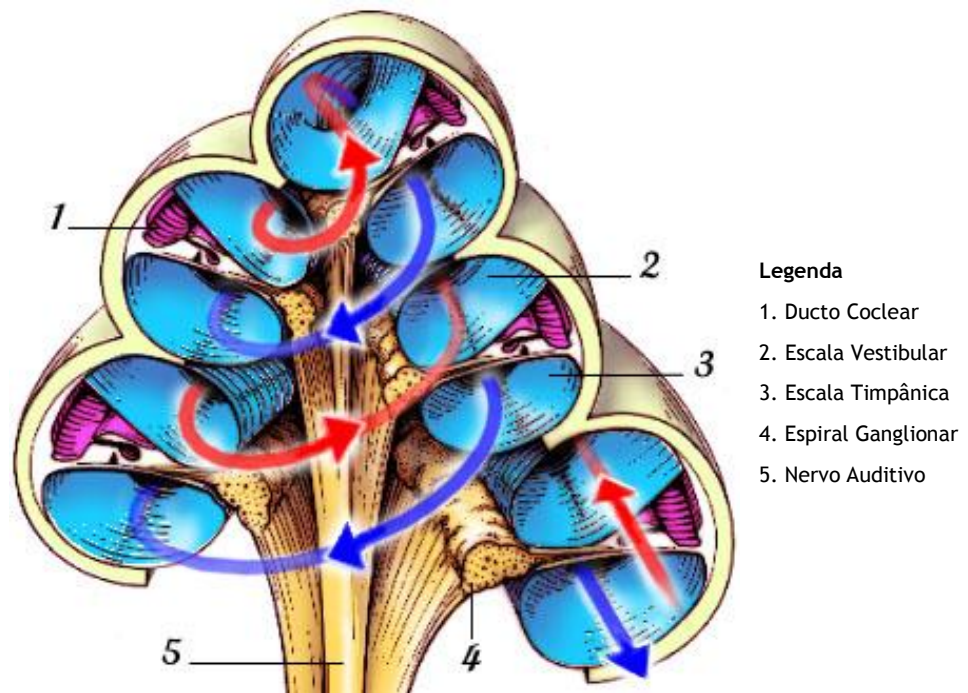


Figura 7 - Secção da cóclea (Blatrix)

É dividida longitudinalmente em três canais, ou escalas, por duas membranas (Figura 8). A primeira muito ténue e formada por uma capa simples de células, a membrana de Reissner, separa a escala vestibular da escala média. A outra, a membrana basilar, separa a escala média da escala timpânica. No extremo oposto à janela oval da espiral, a escala vestibular e a escala timpânica comunicam-se pelo helicotrema. A escala média, pelo contrário, está isolada. As escalas vestibular e timpânica estão cheias de um líquido (a perilínfa) muito pouco compressível, similar ao LCR (líquido cefalorraquidiano, que banha o cérebro e outras estruturas encefálicas e medulares), e a escala média por um líquido similar fisicamente, mas de distinto conteúdo químico e propriedades eléctricas, a endolínfa.

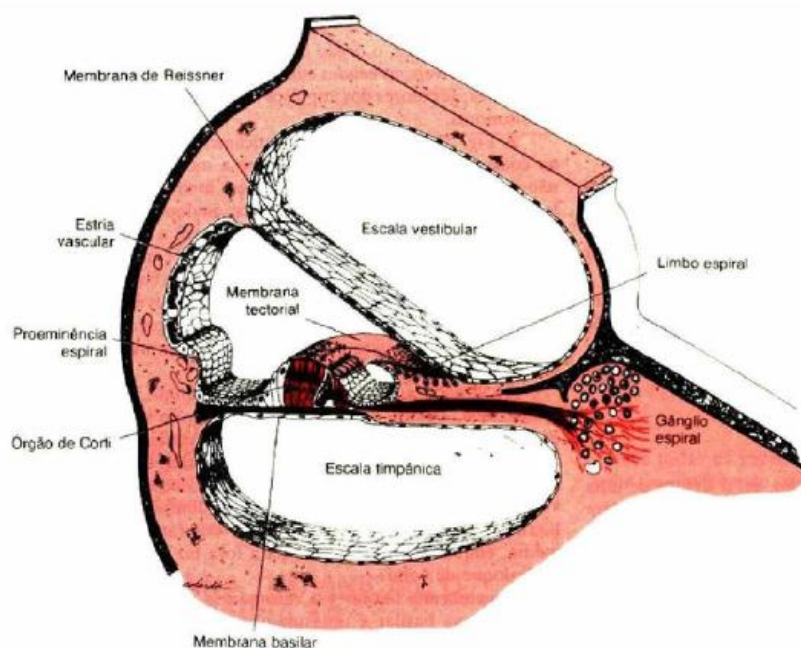


Figura 8 - Vista esquemática da cóclea em corte mostrando sua estrutura interna básica (Guyton, 2002)

Correndo ao longo da membrana basilar, encontra-se uma estrutura muito complexa que fará a transdução das ondas vibratórias que são veiculadas pela perilinfa e a endolinfa: o órgão de Corti (assim chamado em homenagem ao anatomista do século XIX que o descreveu).

Desta forma, o estribo irá transmitir vibrações à perilinfa na janela oval, que irão viajar pela escala vestibular, e passando pelo helicotrema continuarão pela escala timpânica, terminando na janela redonda, que fecha a cóclea por meio de uma membrana elástica que se abre no ouvido médio e serve de elemento descompressor. Naturalmente, e dependendo da frequência, as ondas poderão atravessar a membrana de Reissner e a membrana basal e fazer um caminho mais curto em direção à janela redonda, como se explicará no parágrafo seguinte.

Foi referido que o espaço existente entre a membrana basilar e a membrana de Reissner (a escala média) está preenchido por um líquido muito similar à perilinfa, denominada endolinfa. A sua particularidade é estar polarizado com um potencial elétrico positivo que tem por função auxiliar na formação dos potenciais de ação das células sensitivas. Do ponto de vista acústico-mecânico, é praticamente irrelevante devido à membrana de Reissner ser completamente transparente às vibrações (Guyton, 2002).

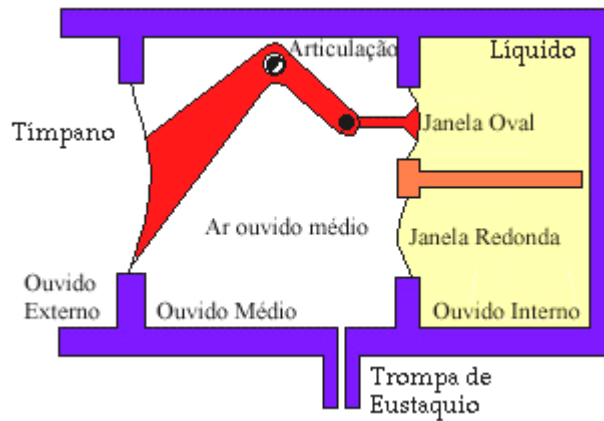
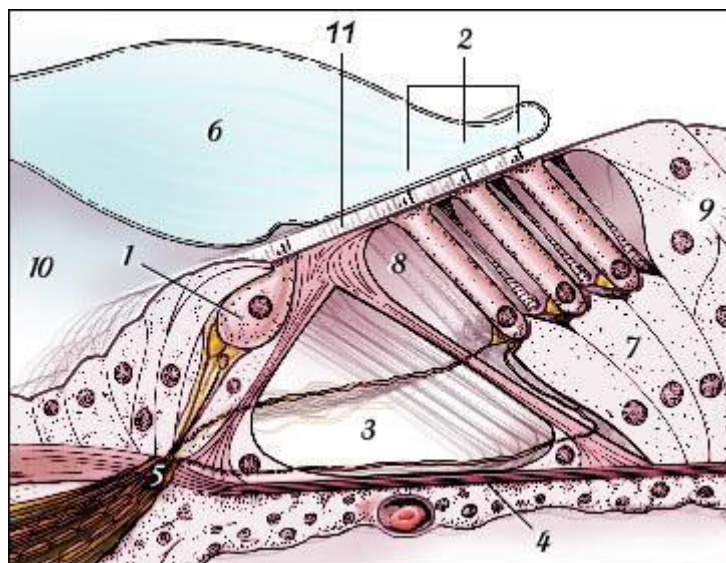


Figura 9 - Esquema simplificado das cavidades do ouvido (MIROL, 2002)

Analisando a Figura 9, pode-se observar de uma forma simplificada o caminho básico que percorrem as ondas desde a janela oval até à janela redonda, atravessando para isso a membrana basilar. As ondas de muito baixa frequência (que são muito poucas) fá-lo-ão pelo helicotrema, na extremidade oposta à janela oval. Neste atravessamento o órgão de Corti desempenha um papel fundamental.



Legenda

1. Células Ciliadas internas (CCI)
2. Células Ciliadas externas (CCE)
3. Túnel de Corti
4. Membrana Basilar
5. Habenua Perforada
6. Membrana Tectorial
7. Células de Deiters
8. Espaço de Nuel
9. Células de Henson
10. Sulco da Espiral Interior
11. Membrana Reticular

Figura 10 - Órgão de Corti (Blatrix)

A membrana basilar, de uma forma simplificada, pode ser vista como um elemento que permite discriminar e limitar as frequências que entram na cóclea. Contudo, o mecanismo é significativamente mais complexo. A membrana basilar contém uma estrutura fundamental que define mecanicamente o seu comportamento. Helmholtz, no século XIX, foi o primeiro a sistematizar o funcionamento vibrátil da cóclea.

Em 1863, escreveu que a análise espectral dos sons (Fourier) era realizada pelos segmentos ressonantes ao longo da membrana basilar. Os pilares de Corti teriam participação

básica nesse mecanismo ao imprimir distintas características ressonantes a diferentes partes da membrana basilar.

Posteriormente, observou que os anfíbios e aves não possuíam esses pilares e também que a característica ressonante da cóclea era função da membrana basilar determinada pelas suas características estruturais. Observações realizadas nessa época mostraram que a membrana basilar tinha uma formação peculiar, iniciando-se muito estreita próximo à janela oval e terminando bem mais larga no final. Ele postulou que fibras basilares que, em número de 20.000 a 30.000, se estendem da parede óssea da cóclea (o médiolo, vizinho ao gânglio espiral) até se inserirem frouxamente na membrana basilar, perto da parede externa, estariam em condições de vibrar e imprimir as suas características ressonantes ao conjunto do órgão de Corti. Estas fibras variam em forma e dimensões ao longo deste último. Esta segunda teoria expressa em 1877, é hoje a mais lembrada.

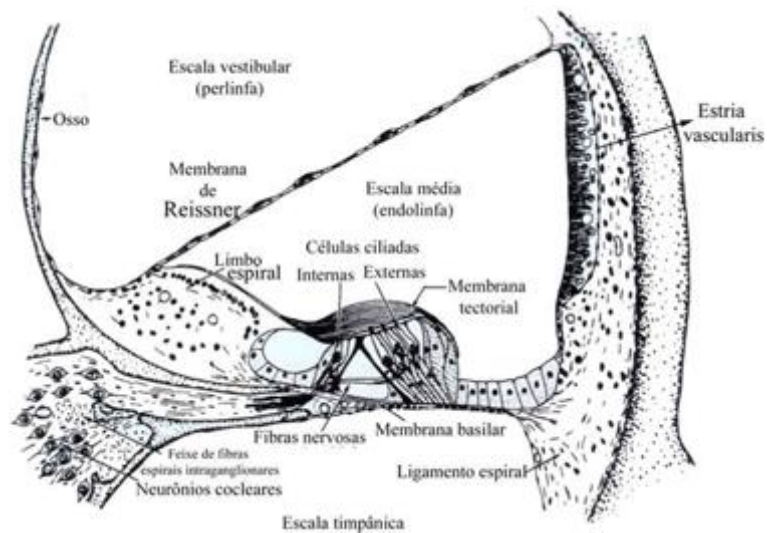


Figura 11 - Secção da cóclea com destaque ao órgão de Corti (MIROL, 2002)

No século passado (1960), Georg von Békésy mostrou que a interpretação da frequência pela cóclea se baseava mais no comportamento geral da membrana basilar que permite que menor onda mecânica se gere ao ser estimulada por ondas sonoras na janela oval. As secções transversais da membrana basilar iniciam-se perto da janela oval sendo curtas (0,04mm) e rígidas. Na outra extremidade as secções são 12 vezes mais longas (0,5mm) e muito mais finas, de modo a serem 100 vezes menos rígidas. Isto faz com que a membrana basilar tenha frequências de ressonância altas no início e baixas no final (Figura 12). Esta membrana tem a forma de uma lâmina gelatinosa. Békésy descobriu-o quando a esticou com uma micro-pipeta e observou que esta deformação não era a que seria de esperar se estivesse conformada por fibras tensas.

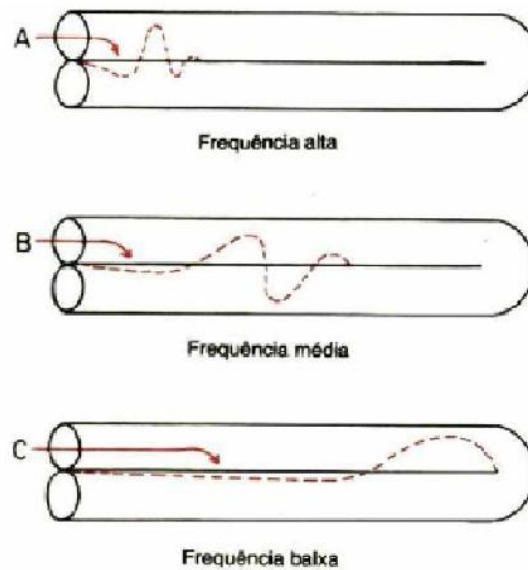


Figura 12 - Representação das ondas ao longo da membrana basilar. A) Sinais de alta frequência, B) Sinais de média frequência, C) Sinais de baixa frequência (Guyton, 2002)

Como foi referido anteriormente, o diâmetro do canal coclear é no início maior do que no final. Portanto, o movimento linear da massa líquida que se movimenta quando uma vibração é induzida pelo estribo na janela oval é muito menor do que perto do helicotrema, onde o diâmetro da cóclea é, como vimos, menor. A carga da massa líquida sobre a membrana basilar é diferente perto da janela oval se comparada ao que ocorre próximo ao helicotrema. De facto, este actua como uma carga indutiva (novamente a analogia eléctrica), o que define as constantes de tempo com a crescente elasticidade da membrana basilar em cada ponto ao longo do seu comprimento.

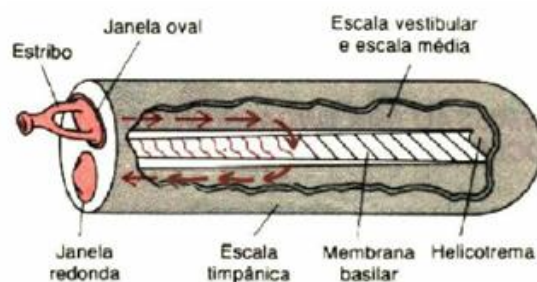


Figura 13 - Movimento do líquido na cóclea desenrolada após um impulso do estribo (Guyton, 2002)

Na eventualidade de um tom puro existirá um intervalo limitado da membrana basilar que irá vibrar com maior intensidade, excitando com maior intensidade o grupo de células sensitivas que lá estejam situadas junto do seu ponto central (Guyton, 2002). A onda sonora que se apresenta na janela oval vinda do ouvido médio, inicia uma modificação periódica de pressão no meio líquido da escala vestibular (Figura 13), cujo intercâmbio de energia com a

escala média e timpânica e as estruturas subjacentes (através da elasticidade da membrana basilar e mais posteriormente da membrana que separa da cóclea a janela redonda) forma uma onda "viajante", assim como definiu Georg von Békésy. Esta onda avança pela cóclea em todo o seu comprimento até o helicotrema e a membrana basilar é induzida pelo padrão vibratório. Como se verificou anteriormente, esta membrana possui características mecânicas únicas, que provocam um aumento da amplitude da onda viajante, de maneira a haver um crescimento até ao ponto ou região onde há o maior deslocamento, após o qual a amplitude decai rapidamente. O ponto máximo de deslocamento é único para cada frequência e depende da frequência de ressonância da membrana nesse ponto, local onde a membrana basilar se comporta como sendo "transparente" absorvendo a maior parte da energia que é transferida através da escala média para a escala timpânica e para a janela redonda, o que causa a rápida atenuação da onda no sentido do interior da cóclea. Somente as ondas de menor frequência fecharão o circuito através do helicotrema (na extremidade mais afastada da janela oval). O que restar da onda atravessa a membrana basilar e a de Reissner noutros locais dependendo da frequência.

O local deste intervalo irá depender da frequência da onda em causa e todo o mecanismo de discriminação de frequências do ouvido baseia-se nisso mesmo. De notar que irá haver também a excitação de outras células, no entanto isso acontecerá com menor intensidade à medida que se afastam do ponto de máximo e principalmente na direcção contrária à janela oval. A título de exemplo, aquando de um tom puro de 5Hz os neurónios da região coclear correspondente a 2500Hz estarão mais excitados que os da região que corresponde a 10Hz. O mecanismo do ouvido leva em consideração também a excitação das áreas contíguas, o que faz com que um maior número de fibras nervosas envie informação, que o cérebro usará para determinar a frequência e a intensidade, como se verá posteriormente. Para frequências inferiores a 3000Hz, o ritmo de estimulação também é importante. A intensidade, por sua vez, é discriminada pelo número de células vizinhas estimuladas (Guyton, 2002).

Existe portanto uma codificação espacial ou um mapeamento das frequências e do conteúdo harmónico dos sons. Desta forma, os sons serão transmitidos através das instâncias iniciais da condução do estímulo, pelas fibras nervosas aferentes. Ou seja, a cóclea transforma um padrão oscilatório no tempo num padrão oscilatório no espaço. Esse padrão (ou "mapa") vibratório está distribuído segundo a forma aproximadamente logarítmica ao longo da membrana basilar. A cada duplicação da frequência, corresponde um deslocamento do ponto de oscilação máxima de 3,5 a 4,0mm.

Separando a cóclea em três secções de comprimento igual, podemos dizer que as altas frequências terão sua energia absorvida pela membrana basilar a uma distância correspondente ao primeiro terço; as médias frequências serão absorvidas dentro do segundo terço da extensão coclear e as ondas sonoras de baixa frequência só serão absorvidas no terceiro terço da extensão coclear, ou seja, na proximidade do helicotrema (Figura 12).

Uma outra característica da propagação das ondas no ouvido médio é a sua propagação rápida na membrana basilar, diminuindo progressivamente a sua velocidade à medida que a distância aumenta. Essa transmissão inicialmente rápida das ondas permite que sons de alta frequência avancem o suficiente ao longo da cóclea para se distribuir separadamente uns dos outros sobre a membrana basilar. Não tendo esta característica, todas as ondas sonoras de alta frequência estariam misturadas no início da membrana basilar, impedindo que as frequências fossem discriminadas entre si (Figura 14 e Figura 15).

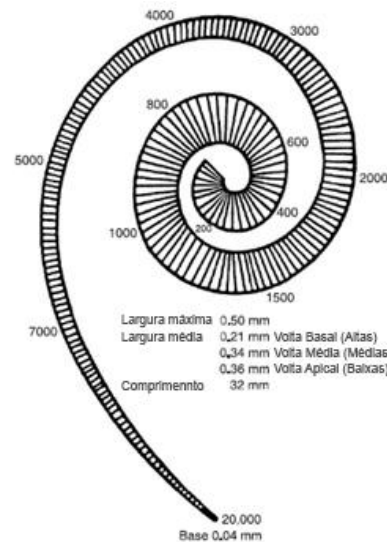


Figura 14 - Padrões vibratórios da membrana basilar ao longo do percurso (Møller, 2006)

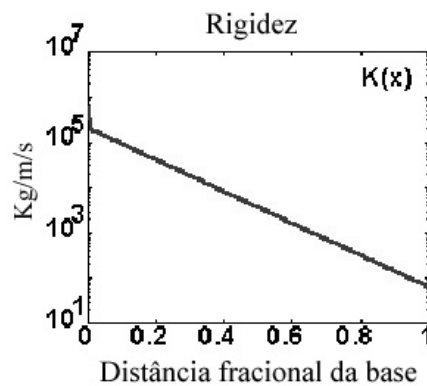


Figura 15 - Gráfico da relação rigidez da membrana basilar, com a distância à janela oval (MIROL, 2002)

Existem diferenças de fase em porções diferentes para o mesmo padrão de onda. A acção das células externas é outro factor de resposta vibracional específica. Com níveis de vibração baixos, a acção das células ciliadas externas (CCE) representa um papel importante. As células ciliadas possuem também um mecanismo pelo qual apresentam ressonância eléctrica, amplificando os efeitos da ressonância mecânica.

Em níveis de vibração altos, é a vibração acústica da endolinfa que domina. Portanto, mesmo para estímulos de frequência fixa tipo tom puro, o padrão vibratório do órgão de Corti pode mudar em função do nível de intensidade acústico. Uma mudança no padrão vibratório pode ser convertida em alterações da fase da resposta em alguns pontos.

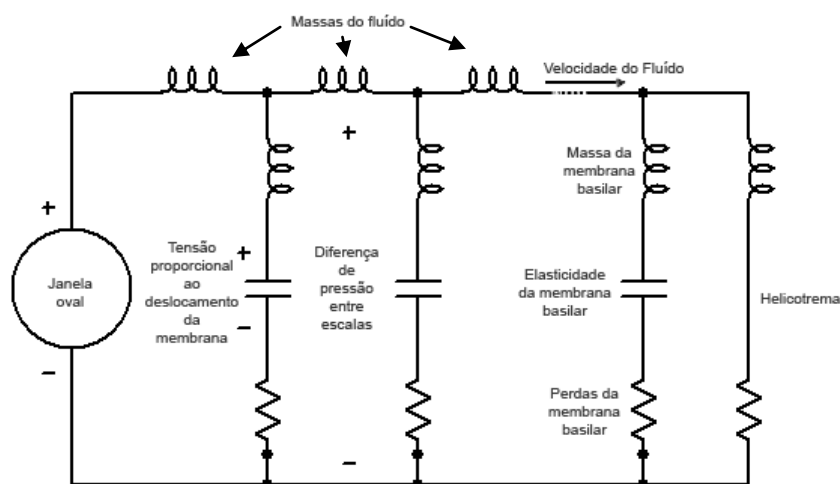


Figura 16 - Analogia entre a membrana basilar e uma linha de transmissão

Na Figura 16 observamos uma analogia a um circuito eléctrico para o modelo da cóclea no que diz respeito a fenómenos de ressonância e ao comportamento da onda viajante. Bobinas em série representam as massas do fluido e bobinas em paralelo os segmentos da membrana basilar. Condensadores representam por sua vez a rigidez da membrana e as resistências assemelham-se às perdas na membrana. A velocidade do estribo na janela oval será a corrente da fonte à esquerda. Não se consideram os fenómenos activos ou não linearidades da membrana. Este modelo também não reflecte a resposta passa banda estreita típica dos tecidos vivos.

Considerando o comportamento da cóclea como um todo, incluindo a membrana basilar com as suas características ressonantes, é possível observar que esta se comporta como um filtro passa-baixo quando se observa do lado do helicotrema. Se visualizarmos um sector isolado, vemos um comportamento de filtro passa-banda relativamente largo.

O comportamento da membrana basilar é de ordem mecânica e não teria correspondência útil em termos de funcionalidade para o SNC. O órgão de Corti serve o propósito de converter esses estímulos mecânicos em informação capaz de ser transmitida pelos nervos e processada pelo SNC. De notar que a funcionalidade do órgão de Corti está muito relacionada com a sua constituição, que será vista em pormenor.

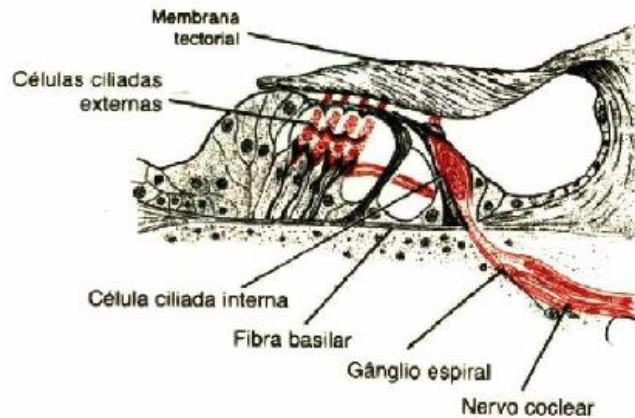


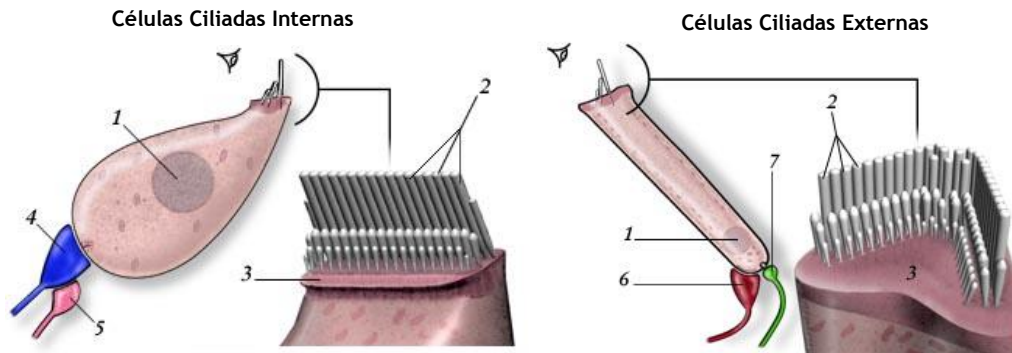
Figura 17 - Pormenor do órgão de Corti (Guyton, 2002)

Desde a saliência óssea na linha média interna da cóclea (o medíolo) a membrana basilar estende-se até à parede externa, formando uma área elástica que permite que a escala vestibular e a escala média, por uma parte, e a escala timpânica, por outra, estejam em comunicação cinética. Este fenómeno permite que, ao se movimentarem, os líquidos respectivos se comuniquem de forma vibrátil, como através de um condensador em série.

Na Figura 10 observam-se dois grupos anatómicos básicos: a membrana tectorial e a membrana basilar.

Existem 3500 células ciliadas internas (CCI) e mais de 20000 células ciliadas externas (CCE). As CCI estão fixas na sua base na membrana basilar, perto do nervo auditivo. As CCE, mais externas, estão fixas na membrana basilar por intermédio das células de Deiter, de consistência viscosa. Das bases de ambos os tipos de células emergem as fibras iniciais da cadeia de condução nervosa. Noventa por cento das fibras aferentes originam-se nas CCI e o restante nas CCE. As células ciliadas recebem também sinais do SNC através de 500 fibras que chegam principalmente às CCE.

O extremo superior das células ciliadas (CC) está em contacto com a lâmina reticular, membrana fibrosa que limita o bordo superior do conjunto celular basal. Esta lâmina está fixa na membrana basilar pelos pilares de Corti e é atravessada pelos cílios das CC. Como se vê, os pontos de flexão da membrana tectorial e do conjunto celular basal são diferentes, o que faz com que, quando a membrana basilar se movimenta de acordo com a movimentação da perilinfa, induz movimentos diferentes nas duas membranas que estão em contacto com as células, modulando, assim, a magnitude da deformação dos cílios (Figura 18).



Legenda

1. Núcleo
2. Cílios
3. Placa Cuticular
4. Extremidade do Nervo Radial Aferente (dendrito do neurónio tipo I)
5. Extremidade do Nervo Lateral Eferente
6. Extremidade do Nervo Medial Eferente
7. Extremidade do Nervo Espiral Aferente (dendrito do neurónio tipo II)

Figura 18 - Ilustração das CCI e das CCEs (Blatrix)

Os cílios estão inseridos em quantidades de 100 a 200 por célula ciliada, na membrana celular das CCE na proximidade de poros que serão activados com o seu movimento. Os cílios estão agrupados em conjuntos de 9+2, com o mais longo deles fazendo contacto com a membrana tectorial. Estes poros são capazes de mudar o potencial de repouso da membrana celular e, finalmente, disparar potenciais de acção nas células ciliadas. Os cílios das CCI, 50 por célula, flutuam no líquido (endolinfa) da escala média, sujeitos a movimentos da membrana tectorial. Os cílios das CCE estão em contacto directo com essa membrana. Segundo observações recentes, um dos cílios, o mais longo, está fixo nela. Os cílios restantes de comprimentos cada vez menores, estão unidos entre si por minúsculos filamentos. A sensibilidade dos cílios é suficiente para que sejam accionados por movimentos brownianos da perilinfa quando isolados. A união dos cílios por pontes filamentosas impede-os de movimentar-se isoladamente. Desta forma, os cílios exercerão efeito despolarizante nas células ciliadas quando deslocados no sentido do mais longo e hiperpolarizante quando no sentido oposto. O efeito despolarizante poderá levar à geração de potenciais de acção, dependente do somatório dos seus movimentos individuais. AS CCE tem um citoplasma 45 a 50 mV mais negativo relativamente à perilinfa e -125 mV em relação à endolinfa, que por sua vez está a 80 mV acima da perilinfa. Este potencial endolinfático é causado por excesso de iões K^+ produzidos na estria vascularis. Quando os cílios são desviados, canais de Ca^{++} são abertos e estes potencializam a abertura de canais permeáveis ao K^+ , que entra na célula. A hiperpolarização é produzida por afluxo de K^+ para a perilinfa, que contém baixas concentrações de K^+ . A ter em conta que, quando se fala de cílios, consideram-se organelos de uma massa ínfima, suspensos num líquido viscoso, sendo portanto muito sensíveis a qualquer aceleração do mesmo (Møller, 2006).

No momento em que as ondas de pressão estão presentes na escala vestibular, a membrana basilar é deformada no sentido da escala timpânica, arrastando no seu movimento toda a estrutura contida na membrana basilar (Figura 19). A membrana tectorial, contudo, terá um movimento diferente em relação à membrana basilar, porque o seu eixo de rotação é diferente ao correspondente desta última. Isto faz com que o movimento relativo entre ambas as membranas seja de deslocamento lateral entre elas, causando uma deformação dos cílios das CCE e das CCI. Isto acontece porque a lâmina reticular, que limita acima a extremidade dos cílios, move-se em bloco, usando como “pivot” os pilares de Corti que, por sua vez, têm a sua base na membrana basilar (daí o nome). Como consequência, a membrana basilar (e as células nela apoiadas) move-se para cima, a lâmina reticular fá-lo para cima e para dentro e a membrana tectorial fá-lo para cima e um pouco para fora, causando o efeito de cisalhamento entre ambas (Figura 20). A não coincidência dos eixos de rotação da membrana tectorial do grupo celular basal causa um deslizamento entre ambas e, com isso, a torção dos cílios. Os cílios excitam (diminuindo o potencial de membrana por entrada do ião potássio da endolinfa) e, eventualmente, despolarizam as CCE quando são desviados para a direita na figura, ou seja, quando a membrana basilar é empurrada no sentido da escala vestibular e os filamentos interciliares aumentam a sua tensão. Esta despolarização ocasiona um aumento no número de potenciais de accção na fibra nervosa cujos dendritos estão conectados na base das CCE. O movimento inverso causa hiperpolarização (ou retorno ao normal) das CCE.

A Figura 19 mostra, esquematicamente, o efeito da contracção das CCE aproximando a lâmina reticular da membrana basilar e modificando, assim, a intensidade da deformação das CCI perante estímulos vibráteis.

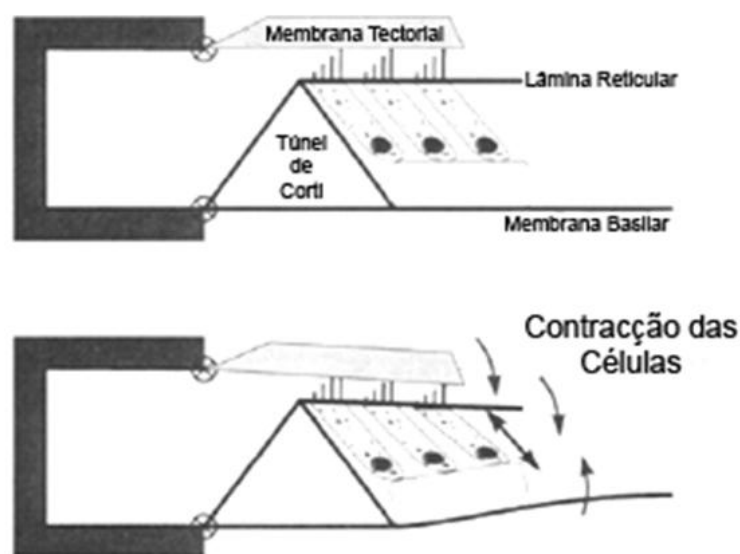


Figura 19 - Contracção da CCE (Moore, 1997)

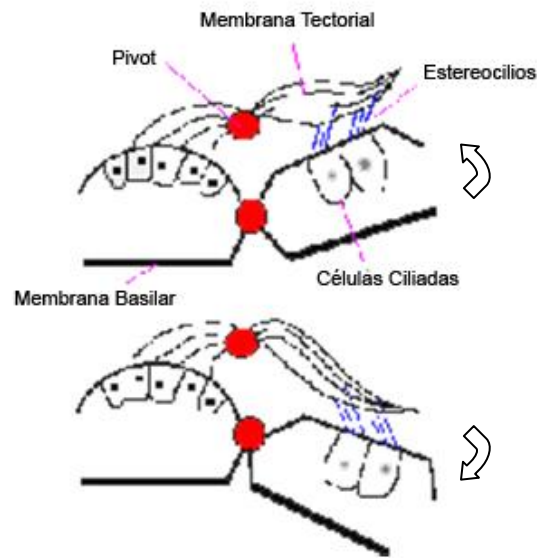


Figura 20 - Movimento da membrana basilar e das células lá apoiadas (MIROL, 2002)

A Figura 21 permite estabelecer uma nova analogia eléctrica, mas desta vez para o funcionamento das CCE. A viscosidade da união da lâmina reticular com a membrana basilar actua como um filtro passa-alto mecânico que compensa a filtragem eléctrica tipo passa-baixo do potencial receptor das CCE.

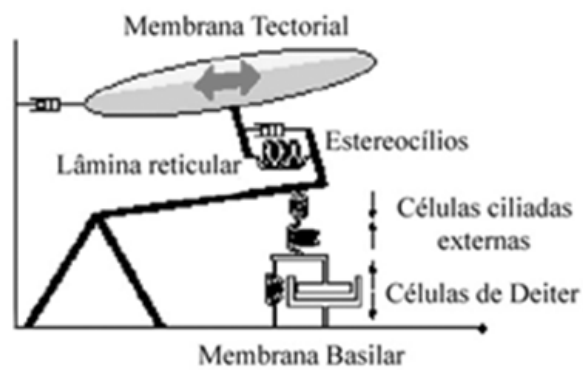


Figura 21 - Equivalente eléctrico do comportamento das CCE

Verificou-se anteriormente que o órgão de Corti possui dois tipos de células sensitivas: as CCE e as CCI. As CCE possuem características muito particulares que as diferenciam de outras células sensitivas. A sua membrana é capaz de se contrair quando despolarizada. O mecanismo é diferente quando comparado com o das células musculares, nas quais moléculas contrácteis de actina e miosina do seu interior sofrem encurtamento. Parece haver uma

modificação da estrutura proteica da membrana que produz o seu encurtamento quando a deformação dos cílios (que emergem de um dos seus extremos) provoca a libertação de cálcio na superfície. Ao contraírem-se, aproximam a lâmina reticular da membrana basilar, causando uma modificação no ângulo de deflexão dos cílios das CCI e, em consequência disso, alteram a sensibilidade aos movimentos da membrana tectorial. Este mecanismo constitui a base do que se costuma chamar o "amplificador coclear". O tempo de latência da resposta é de 120 microsegundos e consegue, por isso, influenciar respostas das CCI até vários KHz.

Tal mecanismo pode ser explicado devido à geometria da estrutura do órgão de Corti, onde os cílios das células sensíveis às vibrações da endolinfa, as CCI, são menos violentamente distorcidas como consequência dos sons mais intensos e assim são, além de protegidas, menos excitadas. O contrário é também verificado. O estado de relaxamento das CCE deixa as CCI respondendo directamente as vibrações da endolinfa. O mais importante neste processo é que o ouvido consegue por este meio uma enorme gama de sensibilidade, ou seja, uma grande faixa dinâmica. O ouvido normal consegue ter um limiar de sensibilidade que se aproxima do ruído electrónico, ou seja, de 10^{-5} Pa. A estes níveis, o movimento da membrana timpânica é cerca de metade do diâmetro de uma molécula de Hidrogénio, ou seja, 10^{-9} cm. Na outra extremidade, este mecanismo evita que a célula seja destruída pela grande excursão que seria necessária se respondesse em forma linear ao estímulo, de modo a poder aceitar pressões da ordem de 10^2 a 10^3 Pa. Isto abrange uma faixa dinâmica de mais de 140dB, 1×10^{14} vezes em potência ou de 1×10^7 em pressão.

As CCE fazem parte de um processo não linear de realimentação positiva da energia mecânica e actuam como um controle automático de ganho, aumentando a sensibilidade do ouvido.

Na Figura 22 é possível observar-se uma representação de todos os fenómenos originados no ouvido até à transmissão ao nervo auditivo, cuja função será vista de seguida.

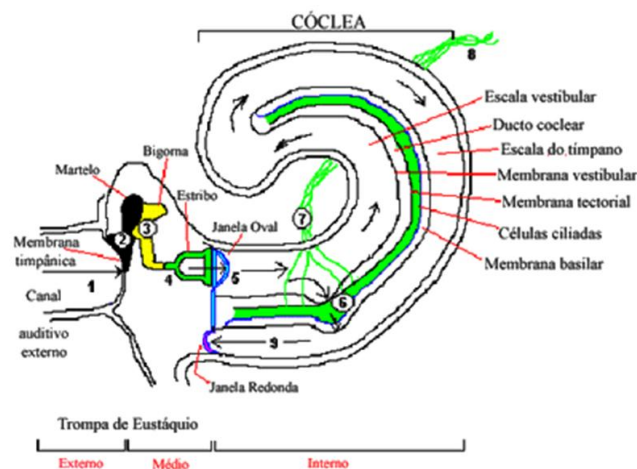


Figura 22 - Uma ilustração geral do percurso das ondas sonoras até ao nervo auditivo com sequência de funcionamento de 1 a 9 (MIROL, 2002)

A Figura 22 representa uma sequência de acções (de 1 a 9) e dá uma perspectiva simplificada do funcionamento do sistema auditivo. Também é observável (de uma forma simplificada) o processo de formação da onda viajante por deflexão da membrana basilar em 6.

A forma exacta como as células ciliadas informam o SNC sobre a chegada de sinais sonoros ainda não é totalmente compreendida. As CCI são despolarizadas quando os seus cílios são excitados. Tal fenómeno é facilitado pelo potencial da endolinfa, que é de +140 mV (o da perilinfa é de 60 mV e no interior das células ciliadas é de 0 mV). Este potencial da endolinfa é gerado pelo acumular de iões K^+ , cuja origem estaria na estria vestibularis, na parede externa da cóclea. Quando os cílios são movidos no sentido da emergência do nervo auditivo (ou seja, quando a membrana basilar oscila no sentido da escala vestibular), os canais vizinhos abrem-se, deixando os iões K^+ entrarem na célula. Isto faz com que as CCI libertem neuro-transmissores na sua base, que está em contacto com terminais nervosos que vão até ao gânglio auditivo. O acumular de neuro-transmissores diminui o potencial de membrana destas células até que, quando alcançado o limiar, gera-se um potencial de acção que é propagado. No momento em que os cílios são dobrados no sentido oposto, nenhum estímulo é gerado. Numa analogia eléctrica conclui-se portanto que as células ciliadas comportam-se como rectificadores de onda.

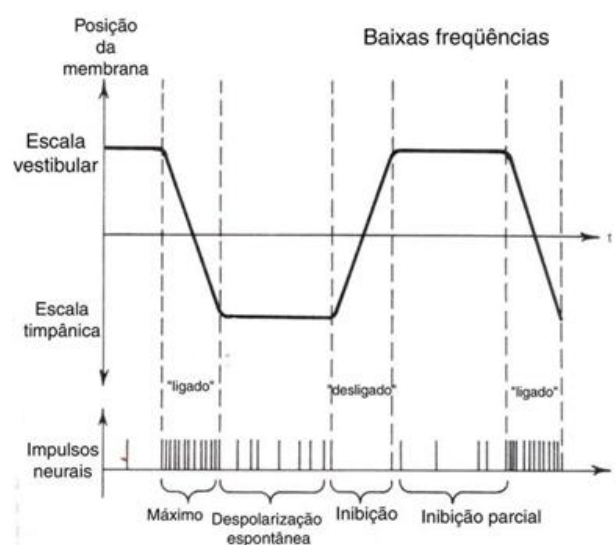


Figura 23 - Gráfico da posição da membrana em função do tempo e relação com impulsos neuronais (MIROL, 2002)

Na Figura 23 pode-se observar que durante um quarto do ciclo (na figura, o descendente) os receptores disparam em alta frequência. Durante o quarto seguinte, disparam com o padrão de repouso. Na fase ascendente da onda são inibidos e, na parte superior, existe uma inibição parcial.

Na cóclea, mais particularmente no seu centro espiralado, estende-se um grupo de células nervosas que formam o gânglio espiral. As suas células são bipolares, com vários prolongamentos de entrada (dendritos) e uma de saída (axónio). Pelos dendritos recebem-se estímulos (são despolarizadas) das células ciliadas, principalmente das CCI, e pelo axónio levam-se esses estímulos através do nervo coclear, formando as chamadas fibras auditivas primárias, em direcção à medula. Antes de progredir para o Sistema Nervoso Simpático (SNS), as vias de condução dos estímulos carregam informação codificada originada das CCI. Essa informação pode ser codificada de variadas formas.

É frequente verificar-se noutros órgãos sensoriais que os estímulos nervosos são disparados com frequências que estão relacionadas com a magnitude física do estímulo. Contudo, esses disparos não seriam regularmente espaçados já que o que importa é a frequência média de disparos. Por outro lado, em repouso e sem estímulo, esses mesmos nervos disparam aleatoriamente com frequências de até algumas dezenas de Hertz, e quando o estímulo persiste sempre igual, a frequência dos disparos diminui até um patamar mais baixo. Alguns nervos respondem aos estímulos sensoriais no tempo e outros respondem a determinadas características de padrões temporais do estímulo, ou detalhes.

Existem características anatómicas que influenciam a forma de colectar informações. A título de exemplo, cada fibra nervosa conectada a uma CCI recebe estímulos unicamente dessa célula e cada CCI pode estar conectada a várias (até 20) fibras aferentes. Por outro lado, as fibras conectadas às CCE fazem-no com dezenas delas, recebendo assim informação de áreas mais amplas da membrana basilar. O tipo de estímulo desencadeador do disparo também é diferente: as CCI disparam em função da velocidade do líquido perilinfático, enquanto que as CCE parecem reagir aos deslocamentos (no caso, da membrana tectorial com a membrana basilar). Por último, as CCE também recebem estímulos do SNS por vias eferentes que causam contracção das suas membranas, como se viu anteriormente.

Os movimentos da membrana basilar em direcção à escala timpânica produzem despolarização em frequências que dependem da velocidade do deslocamento. Os movimentos em sentido contrário inibem esses disparos (Figura 23).

Observando o padrão resultante de estímulos que deixam o gânglio coclear em direcção ao SNS, verifica-se que, para frequências de até alguns kHz, existe uma frequência de disparos alta durante uma fase do ciclo e muito menor quando o movimento da membrana é de retorno. O que parece ser o código é que o SNC recebe informação sobre: a) se a fibra correspondente a determinada região da cóclea está a disparar ou não, e isso dá uma informação primária sobre a frequência do estímulo; b) a distribuição temporal dos impulsos leva a informação sobre a periodicidade e outros detalhes do padrão vibratório.

O padrão de impulsos que viajam pelo nervo auditivo não se correlaciona directamente com a frequência sonora envolvida, excepto para frequências baixas. O padrão de impulsos é aleatório (considerado em relação à forma da onda de entrada) e a informação vai codificada

tanto na distribuição tonométrica derivada da estimulação de cada CCI, como de informações derivadas do accionar conjunto de grupos de CCI noutros lugares da membrana basilar. Digamos que a maioria das fibras que percorrem o nervo auditivo pode transmitir impulsos com uma intensidade de até 1000 disparos por segundo. Acima dos colículos inferiores, a velocidade de disparo não excede os 200 por segundo. Isto implica necessariamente que qualquer análise derivada da frequência de disparo dos receptores deva ser realizada em estágios iniciais, não além dos núcleos basais.

Cada grupo de CCI dispara impulsos durante a fase descendente da onda de entrada, como se observa na Figura 23. Este fenómeno leva a um grupo de impulsos aferentes por ciclo. Contudo, estes impulsos são simplesmente mais frequentes nesse quarto de onda. Durante o resto dela, existem disparos aleatórios de baixa frequência. Nas baixas frequências, este mecanismo tem relevância. Nas médias/altas frequências, é somente o padrão variante de impulsos (que serão mais frequentes) que informará sobre a frequência além, naturalmente, da posição das células que disparam (padrão espacial). Existe no entanto outro factor que se faz sentir nas regiões intermédias entre duas ondas, derivado à vibração da membrana basilar com um padrão entre elas. Este padrão é o de superposição de ondas, com formato dependente da fase entre elas. No padrão de disparos resultante poderá ser reconhecido um padrão de grupo de disparos que o SNC parece ter condições de analisar e reconhecer, como ilustrado na Figura 23. É possível que parte desse mecanismo seja aprendido na infância.

Considera-se que a banda de frequências audíveis para o ser humano se encontra entre os 20Hz e os 20KHz. Este intervalo varia de pessoa para pessoa, com a idade e com a vivência.

A discriminação da intensidade do estímulo é realizada pela análise espacial (quanto mais intenso o estímulo, mais células vizinhas à frequência correspondente serão estimuladas ou recrutadas) e temporal (haverá mais fibras nervosas estimuladas com frequências maiores). Existem por outro lado algumas células ciliadas que são estimuladas somente a partir de certo valor de amplitude de vibração. Existem fibras que embora provenientes da mesma CCI, possuem diferentes características de padrão de disparos relacionados com a intensidade sonora, em forma de diferenças entre o padrão em repouso e o do limite de sensibilidade dinâmica. Isto significa que a informação seria transmitida por diferentes fibras de diferente forma.

Observando os potenciais de acção em fibras isoladas do nervo acústico, veremos que para cada uma delas há uma frequência característica na qual a sensibilidade é máxima. Em torno dessa frequência, a sensibilidade vai diminuindo com a diferença. Se forem traçadas curvas de iso-intensidade de uma fibra, observa-se uma curva de sintonia na frequência característica não tão selectiva como a que seria necessária para justificar por si a sensibilidade de afinação do SNC, o que demonstra que outros mecanismos intervêm nessa discriminação sensorial.

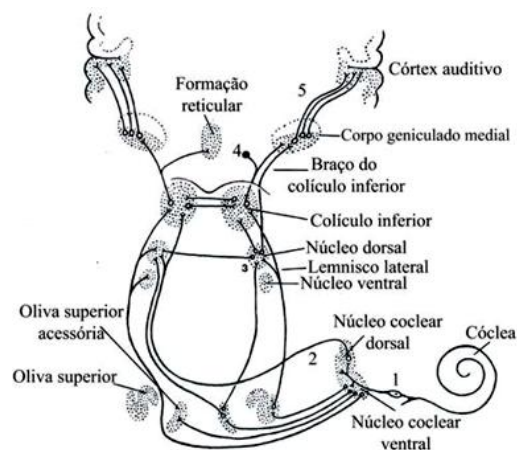


Figura 24 - Vias do trato auditivo no SNC. O tempo médio de transmissão desde a cóclea até o córtex pode ser estimado em 10 milissegundos (MIROL, 2002)

Na sua composição, o nervo coclear é constituído por cerca de 30.000 fibras nervosas e atinge o tronco encefálico na junção ponto-medular, fazendo sinapse com neurónios dos núcleos cocleares situados junto ao pedúnculo cerebelar médio. Desses núcleos, 80% das fibras cruzam a ponte, chegando ao complexo olivar contralateral, e 20% das fibras encaminham-se ao complexo olivar homolateral. O entrecruzamento das fibras de um lado para o outro constitui o corpo trapezóide. Do complexo olivar, uma parte das fibras chega ao lemnisco lateral, já na junção ponto-encefálica, e daí encaminha-se para o colículo inferior da lâmina quadrigémina, situado no mesencéfalo, enquanto a maior parte se dirige directamente ao colículo inferior (Figura 24). Algumas fibras fazem a intercomunicação desses núcleos e a maioria segue até ao corpo geniculado medial, situado no diencéfalo. Aqui também se entrecruzam algumas fibras e a maioria, através da irradiação talâmica, chega à área auditiva primária no córtex cerebral, situado no giro temporal transversal anterior. Em cada um desses núcleos é possível captar potenciais eléctricos em forma de ondas. As ondas que provêm do nervo coclear até ao colículo inferior constituem a ABR (Auditory Brainstem Response). Jewett e Willington caracterizaram cinco ondas, a primeira delas sendo o potencial de acção do nervo acústico na cóclea, e as demais advindas dos núcleos do tronco encefálico (núcleos cocleares, complexo olivar, lemnisco lateral e colículo inferior). Essas ondas aparecem nos primeiros 10ms após o estímulo e há um padrão de normalidade, tanto das latências absolutas como do intervalo entre as ondas.

A partir de cada instância das vias auditivas, existem retornos eferentes que se dirigem ao órgão de Corti. Essas fibras terminam nas CCE e a sua activação produz uma diminuição da sensibilidade, que pode ser selectiva para diversas frequências ou para diferentes padrões sonoros. Supõe-se que isto serve para isolar e retirar atenção ao que não interessa momentaneamente. Conclui-se então que o órgão de Corti tem um papel activo e autónomo, embora comandado pelo SNC.

2.2.2 Efeito de máscara de sons

O efeito de máscara de sons acontece quando um som interfere na percepção de outro. É causado quando duas áreas excitadas da membrana basilar se sobrepõem (devido a dois ou mais sons). Como se observa na Figura 25, dois tons são apenas distinguíveis como tons separados se houver uma diferença suficiente nas suas frequências. Esta “diferença suficiente” é denominada como largura de banda crítica e é naturalmente função da frequência.

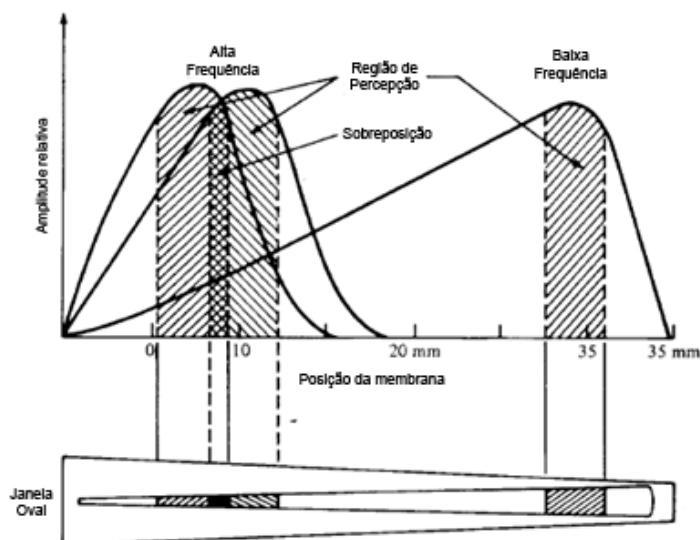


Figura 25 - Actividade na membrana basilar para sinais de ruído de banda estreita com intensidade constante (ilustração de Lord Gatley e Evensen obtida de Lamancusa, 2000)

As baixas frequências tendem a mascarar frequências mais altas. Como referido anteriormente, o ouvido humano é um instrumento de análise de frequência extremamente sensível. Diferentes regiões da membrana basilar são sensíveis a diferentes frequências. As altas frequências, como foi já referido, excitam a zona mais próxima da janela oval. Um tom de baixa frequência excita de forma assimétrica uma porção maior da membrana basilar, embora do lado contrário. Este movimento da membrana basilar na extremidade mais oposta à janela oval, pode interferir com a percepção de som de alta frequência. As altas frequências, na extremidade contrária, causam movimento apenas na sua zona e não interferem com a percepção de som de baixa frequência. Este é o chamado efeito “upward spread of masking”, onde as baixas frequências podem efectivamente mascarar frequências mais elevadas, mas não o contrário. Este efeito pode ser verificado qualitativamente na Figura 25 e quantitativamente na Figura 26 nas situações a) e b). Esta assimetria é mais pronunciada para intensidades elevadas. A Figura 26 situação c) ilustra que o ruído branco de banda estreita causa maior efeito de máscara em torno da sua frequência central que um tom puro à mesma frequência, já que excita uma área maior da membrana basilar, sublinhando o efeito.

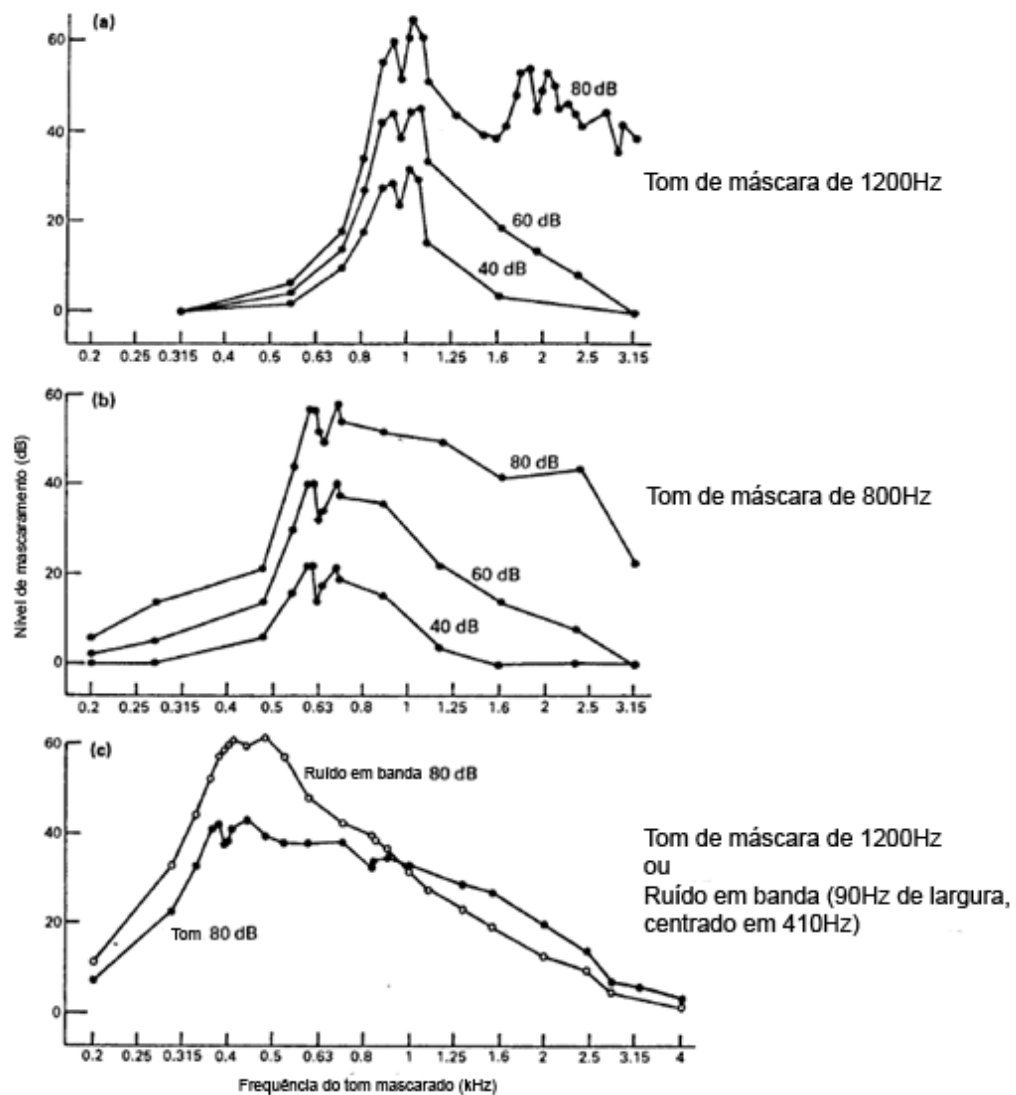


Figura 26 - Efeitos de máscara (Lamancusa, 2000)

Na Figura 26 os tons que mascaram têm as seguintes frequências: a) 1200Hz, b) 800Hz. Na situação c) a frequência do tom puro que mascara é 400Hz e a banda de ruído branco tem 90Hz de largura, centrada nos 410Hz.

Em suma, o efeito de máscara será reduzido se o tipo de oscilação da membrana basilar provocado por um som ficar fora da banda crítica de outros sons em vigor.

Quando o som que mascara é um ruído de banda larga e o sinal é um tom puro, várias partes do espectro do ruído têm contribuições diferentes para o efeito de mascaramento. A banda crítica para mascaramento refere-se a essa porção do ruído que é eficaz no mascaramento de um sinal tipo tom puro. A banda crítica aumenta com a frequência como se verifica na Figura 27. Uma grandeza relacionada é a razão crítica, que é a largura de banda do ruído que mascara e que contém potência sonora igual ao tom puro centrado nessa banda

no limiar inferior da audição do tom. Esta grandeza está também presente na Figura 27 e, como se observa, está extremamente ligada à banda crítica, excepto nas baixas frequências como seria de esperar.

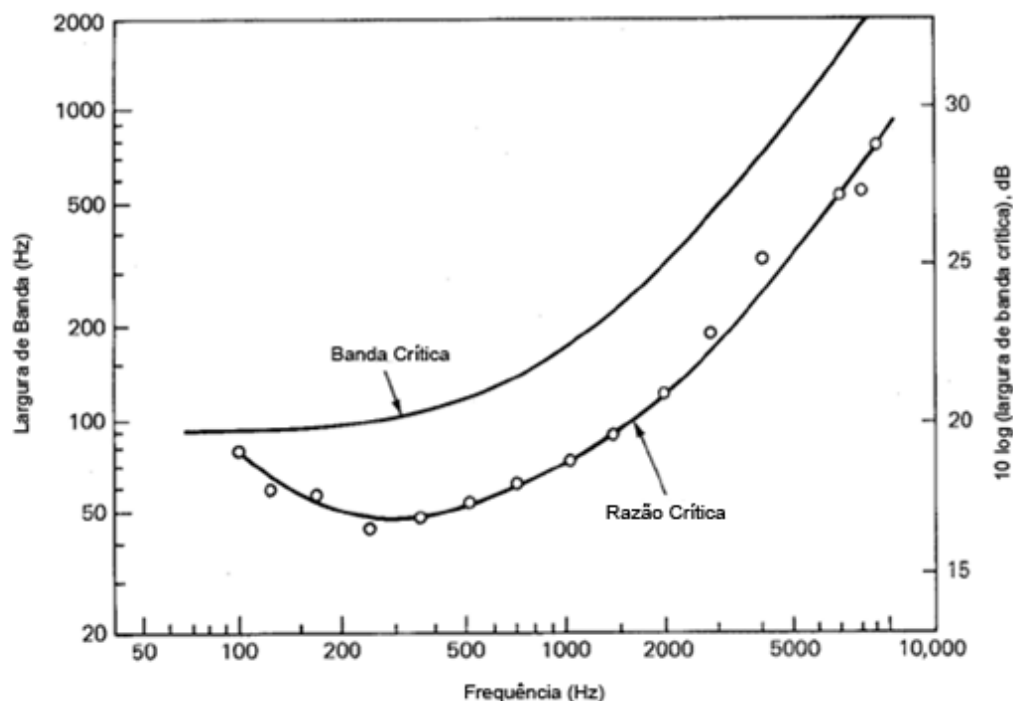


Figura 27 - Comparação de estimativas de bandas críticas (Lamancusa, 2000)

2.2.3 O efeito “Cocktail Party”

O ser humano tem a capacidade de ouvir uma voz no meio de muitas outras, no meio de uma conversa ou de vários ruídos. O sistema auditivo humano pode portanto discernir entre várias fontes sonoras (Roman, Wang, & Brown, 2002). Este é o chamado efeito “Cocktail Party”. Cada característica sonora é integrada com outros sons no ambiente, para criar a pressão da onda que chega ao nosso sistema de percepção auditivo (Arons, 2006). O sistema perceptivo usa uma característica do som para extrair cada fonte sonora da pressão da onda, sendo que alguns dos aspectos usados para esse feito são: a similaridade dos sons, a origem da fonte sonora, a continuidade e o ritmo dos sons (Blauert, 1983).

Este efeito pode acontecer, quer quando se está a prestar atenção a um dado som à nossa volta, quer quando é invocado por um estímulo que captura a atenção subitamente. O seu nome advém de um exemplo que se dá de seguida. Numa festa de “cocktails” ruidosa e povoada, um indivíduo encontra-se a falar com os seus amigos. Este consegue ouvir e perceber os seus amigos apesar do ruído, e simultaneamente consegue estar a ignorar o que

outras pessoas próximas podem estar a falar. Nesse momento, se alguém do outro lado da sala chama o seu nome, este apercebe-se imediatamente e responde-lhe.

A audição humana chega a conseguir suprimir níveis de ruído entre os 9 aos 15 dB, que é o mesmo que dizer que a fonte sonora na qual um humano se concentre, parece estar 3 vezes mais “alta” que o ambiente ruidoso que se encontra à volta (Arons, 2006).

2.3 Intensidade Sonora

A intensidade sonora é efectivamente uma das grandezas envolvidas na discussão de qualquer matéria relativa ao uso da audição. Uma vez abordados no ponto anterior os mecanismos que compõem a audição humana, é então necessário interiorizar os conceitos relativos à intensidade sonora.

2.3.1 Pressão sonora

É medida pela pressão que as ondas sonoras exercem sobre uma superfície e a unidade usada é o padrão do Sistema Internacional Newton por metro quadrado (N/m^2), também denominada Pascal (Pa). Os valores extremos de pressão sonora são:

- 2×10^{-5} Pa é a pressão mais baixa que em média pode ser percebida por uma pessoa. É o valor adoptado como nível de referência para a pressão sonora;
- 1×10^2 Pa é o maior nível que se observa.

A proporção entre o nível mais alto e o mais baixo é significativamente alta (5×10^6). A natureza dotou a espécie humana de uma sensibilidade auditiva que diminui com o aumento da pressão sonora. Assim, por exemplo, se um som tem uma determinada pressão P e é aumentado para $2P$, não causará a impressão de ter dobrado, mas sim de uma variação menor. Tal fenómeno sugere uma curva de sensibilidade logarítmica. O nível de pressão sonora é definido de acordo com o conceito de decibel, com $k = 2$ porque usa relação entre pressões:

$$L_p = 20 \log (p / p_0) , \quad (2.1)$$

onde L_p é o nível de pressão sonora expresso em dB, p a pressão medida em Pa, e finalmente p_0 como a pressão de referência em Pa (2×10^{-5} Pa).

Substituindo o valor de p_0 , a fórmula pode ser simplificada:

$$L_p \approx 20 \log p + 94 . \quad (2.2)$$

Contudo, a equação (2.1) pode ser reescrita em termos de potências sonoras:

$$L_p = 10 \log (p^2/p_0^2) . \quad (2.3)$$

Se considerarmos várias fontes não correlacionadas e a adição das potências,

$$L_p = 10 \log [(p_1^2 + p_2^2 + \dots) / p_0^2] = 10 \log [(p_1 / p_0)^2 + (p_2 / p_0)^2 + \dots], \quad (2.5)$$

Das relações matemáticas dos logaritmos e de (2.3),

$$(p_i / p_0)^2 = 10^{(L_{pi}/10)} .$$

Portanto, o nível de pressão sonora equivalente à contribuição de várias fontes não coerentes é:

$$L_p = 10 \log [10^{(L_{p1}/10)} + 10^{(L_{p2}/10)} + \dots]. \quad (2.5)$$

2.3.2 Curvas de sensibilidade

A indicação da pressão sonora em decibel conforme o ponto anterior seria suficiente se a sensibilidade humana fosse independente da frequência, mas isso não acontece.

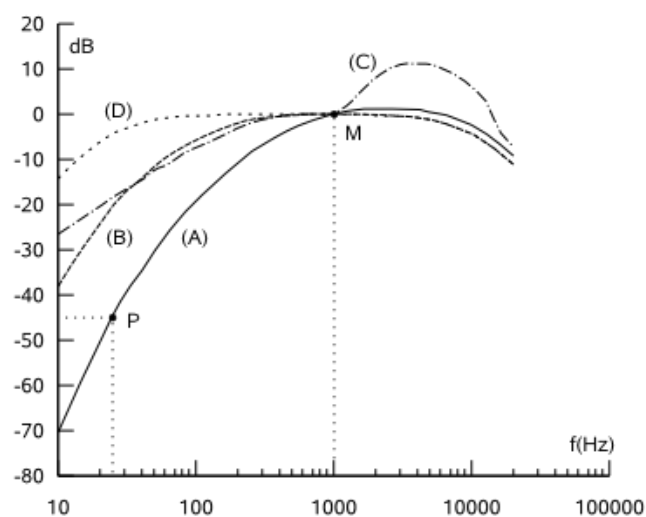


Figura 28 - Curvas padronizadas para compensar variações de sensibilidade

Como pode ser visto na Figura 28, um som de 100dB e frequência de 100 Hz é percebido de forma menos intensa que um de 100 dB e 1000 Hz.

Para compensar as variações de sensibilidade com a frequência, foram criadas curvas padronizadas (A, B, C e D) conforme gráfico da Figura 28.

Os valores em decibel indicam as atenuações em relação à frequência de referência de 1000 Hz. Os dados atenuados são indicados por dB seguido da letra da curva correspondente (dBA, dBB, etc).

Por exemplo, uma fonte sonora de 25 Hz (ponto P da curva A) e 50 dB de pressão corresponde a $50 - 44,7 = 5,3$ dBA. Isto significará que ela é percebida com a mesma intensidade de uma fonte de 1000 Hz e 5,3 dB.

Habitualmente as fontes sonoras não emitem uma única frequência. Na realidade, são complexas e seus espectros são-no igualmente numa determinada faixa. Os instrumentos que medem a pressão sonora (popularmente denominados sonómetros) fazem uma correcção do nível total de pressão acústica medido de forma ponderada de acordo com as frequências predominantes do espectro, de forma a obter o resultado segundo a curva desejada.

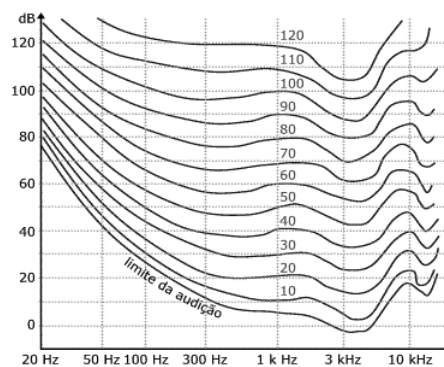


Figura 29 - Limiar de audição e curvas de igual sonoridade

O nível 0dB SPL é o nível sonoro mínimo detectável na ausência de qualquer outro som. Deste modo, é habitual escolher-se para nível de referência o limite de um indivíduo ao som que está a ser usado. Define-se assim o nível de sensação, expresso em dB SL, onde SL significa "sensation level", como sendo $20\log(p/pSL)$, em que pSL é o limite de audibilidade do som que se pretende medir.

Uma outra medida é a sonoridade. Para determinar o nível de sonoridade de um dado som, o indivíduo ajusta o nível de um sinal sinusoidal de 1000Hz até obter a mesma sonoridade que o sinal de teste. O nível do sinal de 1000Hz que tem a mesma sonoridade é o nível de sonoridade do som de teste, medido em "fon". A Figura 29 apresenta as curvas de igual sonoridade. Como se pode verificar, as curvas de igual sonoridade são cada vez mais planas com o aumento do nível de pressão, ou seja, quando o nível de pressão aumenta, as componentes de baixa frequência de um sinal de banda larga têm cada vez mais peso perceptual relativamente às altas frequências.

Por exemplo: um nível de audibilidade de 100 fons equivale, segundo a curva correspondente, a 100dB com 1000Hz e aproximadamente 110dB com 50Hz.

De notar que, quanto menores forem os níveis de sonoridade considerados, maiores são as diferenças, isto é, as curvas são menos planas. Essa é a razão para a existência de várias curvas de compensação para medições, como referido anteriormente.

A curva A (dBA) é usada para níveis até 55 fons. A curva B (dBB) usada para a faixa de 55 a 85 fons. A curva C (dBC) usada para níveis acima de 85 fons. A curva D (dBD) é especial e usada para sons de alta frequência de turbinas de aviões a jacto.

Tabela 1 - Correspondência entre “fons” e “sones”

Fons	40	50	60	70	80	90	100
Sones	1	2	4	8	16	32	64

O “sone”, por sua vez, é uma escala subjectiva de audibilidade, cuja unidade foi definida como igual a 40 fons. A cada duplicação corresponde um incremento de 10 fons conforme a Tabela 1.

2.3.3 Potência sonora

A pressão sonora é uma grandeza relativamente fácil de se medir. Existe uma variedade de aparelhos disponíveis, que usam microfones e circuitos electrónicos, analógicos ou digitais, para a correcção de acordo com as curvas e indicação dos valores.

Entretanto, a pressão sonora por si só não caracteriza quantitativamente uma fonte. Em comparação com uma lâmpada (fonte luminosa): pode-se medir a intensidade luminosa num determinado local, mas o valor não tem necessariamente relação com a potência da lâmpada. Uma lâmpada mais potente situada a uma distância maior pode produzir a mesma intensidade luminosa.

A fim de caracterizar quantitativamente uma fonte sonora, foi definida uma escala de nível de potência sonora. Também em decibel, e de forma similar à pressão, com uma potência de referência.

$W_0 = 10^{-12}$ watts. E a grandeza é definida por:

$$L_W = 10 \log (W / W_0) , \quad (2.6)$$

onde: L_W : nível de potência sonora em dB; W : potência da fonte em watts; W_0 : potência de referência em watts.

Notar novamente que, diferente da pressão, o coeficiente k é igual a um, uma vez que as grandezas relacionadas são potências. Substituindo o valor de W_0 e simplificando,

$$L_W = 10 \log W + 120 \quad (2.7)$$

E como medir a potência sonora? Em geral ela não é medida, mas calculada. A equação abaixo dá uma relação aproximada:

$$L_W = L_p + 10 \log A, \quad (2.8)$$

onde L_W é o nível de potência sonora em dB (em algumas referências, é usado dBW para distinção da grandeza); L_p é o nível de pressão sonora em dB a um metro da fonte; A é a área da fonte em m^2 .

A potência sonora caracteriza uma fonte. Na Tabela 2 apresentam-se valores médios para alguns tipos de equipamentos geradores de ruídos.

Tabela 2 - Valores médios para alguns equipamentos geradores de ruído

Tipo de fonte	W	dBA
Foguete espacial	100 000 000	200
Jacto militar	100 000	170
Ventilador centrífugo grande (850000 m^3/h)	100	140
Orquestra 75 músicos. Ventilador axial 170000 m^3/h	10	130
Moinho de martelo grande	1	120
Ventilador centrífugo 22000 m^3/h	0,1	110
Automóvel em estrada	0,01	100
Triturador de alimentos	0,001	90
Máquina de lavar louça	0,0001	80
Voz em nível de conversação	0,00001	70
Conduta de ar com silenciador	0,00000001	40
Voz muito baixa (cochicho)	0,000000001	30
Menor fonte audível	0,000000000001	0

2.3.4 Propagação do som

O som, ou mais propriamente as ondas sonoras, têm um comportamento muito específico quando interagem com outros objectos que se encontram no seu meio de propagação livre. Quando se consideram espaços fechados, surgem fenómenos que modificam o panorama sonoro de um dado espaço e que, de forma mais ou menos assinalável, podem conduzir a percepções diferentes dos sons.

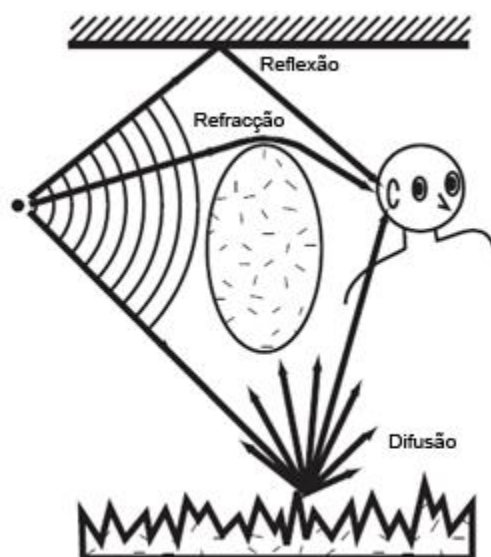


Figura 30 - Ilustração das dos fenômenos de reflexão, refração e difusão (Duda, 2000)

Reflexão - é o princípio básico do comportamento de um som num ambiente fechado. As ondas sonoras são emitidas de um determinado ponto (a fonte sonora) e propagam-se em esferas concêntricas até atingir um obstáculo. Aí podem suceder dois fenômenos: ou o obstáculo é constituído por um material isolante acústico (tecido, fibra, etc.) e então as ondas serão parcial ou totalmente absorvidas, ou o material é reflector (madeira, cimento, etc.) e as ondas regressam ao espaço de onde vieram (Figura 31). Mais ou menos análogo ao lançamento de uma pedra numa piscina: ao tocar na água a pedra cria ondas que se propagam até atingirem a borda da piscina. Dependendo de como essa borda for constituída, essas ondas podem desaparecer ou voltar para o meio da piscina.

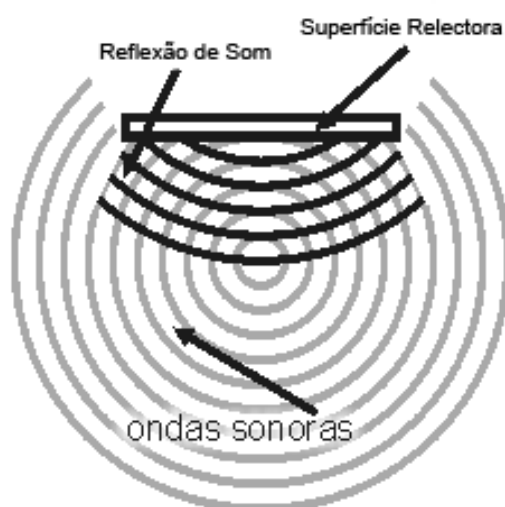


Figura 31 - Reflexão das ondas sonoras por um corpo acusticamente reflector

A partir dos conceitos de reflexão e de ondas fora de fase vem o conceito de frequência de ressonância. No entanto, previamente deve-se falar no espaço percorrido por uma onda de som. O som tem uma velocidade normal no ar de 343 m/s. Se considerarmos uma frequência de 440Hz, portanto 440 ciclos num segundo, esses 440 ciclos ocupam um espaço de 343m. Assim, quando tocarmos a nota “Lá” num instrumento, a onda sonora percorrerá 343m até se comprimir e descomprimir 440 vezes. Qual seria o espaço percorrido por uma única compressão e descompressão? Dividindo 440 por 343 chegamos ao valor de 1.3 metros. Este é então o comprimento que cada ciclo inteiro de compressão e descompressão do ar, que a frequência de 440 Hz, ocupa no espaço.

Assim, teoricamente, se for construída uma caixa de um metro e trinta centímetros, com material acusticamente reflector, e a nota “Lá” for produzida dentro dessa caixa, quando atingir as paredes da caixa o som será reflectido e a onda reflectida estará em fase com a onda que está a viajar em direcção à parede. Assim a reflexão somar-se-á ao som incidente e o resultado será um som mais forte. É esse então o significado de frequência de ressonância de um espaço: a frequência na qual as reflexões de um som dentro desse espaço estão em fase com o som não incidente, frequência que por isso, vai soar mais forte dentro desse espaço do que outras.

É certo, porém, que o cálculo da frequência de ressonância de um corpo não é tão simples, requerendo fórmulas complexas que levam em conta, entre outras coisas, o formato do corpo e a forma como o som penetra nele. Também por isso, as maneiras como um dado material reflecte ou absorve determinados sons dependerão das frequências do som e das frequências de ressonância de cada objecto. Dispositivos usados para amortecer acusticamente um ambiente dependerão não só do material usado, mas também da largura e espessura com que são dimensionados, e da configuração da sua superfície.

Reverberação: A base da acústica de ambientes apoia-se no conceito de reflexão do som. Dentro de uma sala fechada com paredes de material mais ou menos reflector, quando um som é emitido espalha-se por todo o ambiente (Figura 32). Para uma pessoa num dado ponto de uma sala, o primeiro som a ser ouvido é o som proveniente directamente da fonte sonora (indicado como “directo” na Figura 32). Enquanto isso, o som continua a espalhar-se pela sala, reflecte-se nas paredes e vai de encontro ao ouvinte. Algumas reflexões seguem o menor caminho entre a parede e o ouvinte, enquanto muitas outras vão percorrer um caminho maior antes de alcançá-lo (de comparar as distâncias percorridas entre R1 e R3, na Figura 32).

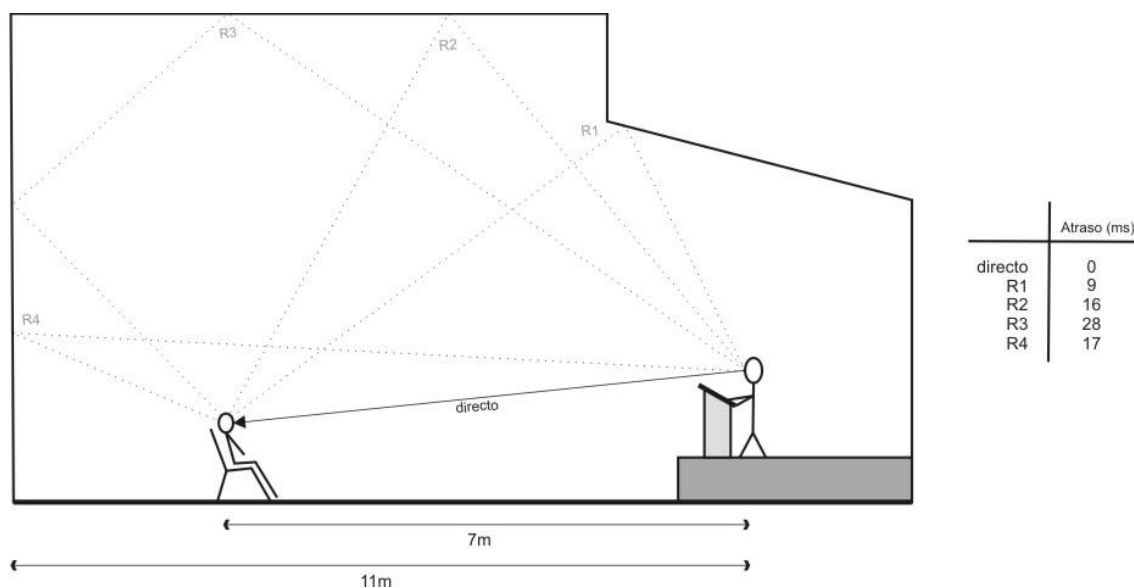


Figura 32 - Exemplo de acústica de ambientes

É o conjunto dessas várias ondas que irá formar o som captado pelo ouvinte: uma soma do som directo (vindo directamente da fonte sonora) com o som reverberante (reflectido). Essa soma dá ao som uma característica única de "ao vivo", "cheio", própria de ambientes fechados. O campo sonoro produzido num espaço apresenta aspectos com uma terminologia própria que é explicada de seguida.



Figura 33 - Gráfico típico de pressões sonoras ao longo do tempo para uma fonte efémera

Som directo - é o som que atinge o ouvinte vindo directamente da fonte sonora, sem ter sido reflectido. Apesar de muito rápido, o som não chega no ouvinte no mesmo tempo em que foi criado. Ele precisa de tempo para atravessar o ar. Esse tempo pode ser muito curto. Considerando a velocidade do ar como 343m/s, uma onda sonora levará apenas cerca de 50 milissegundos (ms) para percorrer 20 m.

Primeiras reflexões - chegada das primeiras ondas reflectidas. São em número de quatro ou cinco e variam de tempo de acordo com a sala, a posição do ouvinte, etc. Nas últimas destas reflexões iniciais o campo reverberante geral começa a chegar ao ouvinte e por isso

elas já não são escutadas tão separadamente quanto as primeiras. Esta fase da reverberação também é chamada de “pré-delay”.

- **Reverb** - é a chegada de todas as reflexões dos diversos pontos da sala. Elas chegam num número muito maior que as primeiras reflexões e têm um tempo muito menor a separá-las, criando um som difuso e misturado.

- **Decay** - é a forma que é apresentada pela pressão acústica durante todo o processo de duração total até que o nível da pressão sonora desça 60dB preferencialmente e tempo de “decay”, denominado por tempo de reverberação (TR), ilustra se uma sala terá pouco nível de reverberação (na gíria da engenharia de som, uma sala “seca”) ou muita reverberação (uma sala “viva”). É a própria sala que determina o “decay” apropriado. Por exemplo uma sala de concerto musical deverá ter um tempo de “decay” que ronde os 1,8 segundos. Para cada espaço pode considerar-se um tempo de reverberação óptimo.

Como o processo de percepção do som não é muito rápido, a diferença entre estes passos muitas vezes é pouco perceptível. Um intervalo de tempo considerado máximo no caso de um som do tipo conversação, entre um som directo e a primeira reverberação é geralmente de 40ms. Para música, esse tempo aumenta um pouco mais, ficando em 70ms. Esse tempo é apelidado de pré-atraso e o fenómeno é apelidado de efeito de precedência, ou efeito de “Haas” (Blauert, 1983). Quanto a primeira reverberação chega antes, o som não é separado pelo nosso sistema auditivo e podem ocorrer erros na localização sonora, devido a reverberações vindas de vários ângulos com intensidades que chegam “cedo” e se integram na percepção humana para serem percebidos como o mesmo som (Moore, 1997). Se por ventura o som atrasado chegar menos de 1ms depois em certas frequências, a percepção da direcção de onde proveio o som inicial é alterada, passando a ser algures entre a fonte sonora (som directo) e a reflexão. Este fenómeno é chamado de localização sumativa (Blauert, 1983) e está na base de várias técnicas usadas, incluindo a reprodução de sinais estereofónicos (Damaske, 2008). Se dois altifalantes estiverem na frente de um indivíduo de forma simétrica em relação ao plano sagital médio, se o ângulo do vértice junto ao indivíduo do triângulo formado pelos altifalantes e o indivíduo for aproximadamente 60° e os dois altifalantes estiverem a emitir o mesmo som, o indivíduo percepção um único evento auditivo no plano médio. Um pequeno atraso ou enfraquecimento de um dos sons provenientes de um dos altifalantes irá transmitir imediatamente a sensação que o som provém da direcção do som que chegou mais cedo, ou que está mais intenso, conforme as frequências.

O denominado efeito de precedência será discutido posteriormente neste documento e estas questões serão analisadas num contexto de localização sonora espacial.

O parágrafo anterior acrescentou um novo factor à forma como os sons são percebidos: a qualidade. De facto, a reverberação pode ser benéfica ou maléfica para o som de uma sala. Pouca reverberação deixa o som muito pobre e sem vida (a gíria da

engenharia de som é bem apropriada). Muita reverberação (como a encontrada em ambientes muito grandes, como igrejas) deixa o som muito confuso, diminuindo a inteligibilidade (ou seja, não se consegue perceber a mensagem do falante). Um nível adequado de reverberação ajuda a inteligibilidade e melhora a qualidade do som, dando-lhe uma certa “riqueza”. Claro que falar em qualidade é sempre relativo aos aspectos subjectivos envolvidos, no entanto, um espaço sem reverberação não é natural e o mecanismo da audição humana baseia-se muito nessa característica para se localizar espacialmente.

Um parâmetro importante é a diferença de intensidade entre o som directo e o som reverberante. Se o som directo é muito mais intenso quase não se ouve a reverberação. Se for o contrário, há o perigo do eco sobrepor completamente o som directo.

Além disso, há ainda o timbre da reverberação. Essa reverberação vai fortalecer determinadas frequências e enfraquecer outras, criando um timbre que pode alterar fortemente o do som directo. A acústica de salas é um tópico em que estas questões se revestem de uma importância fundamental, dada a necessidade de fornecer a várias posições das salas condições acústicas próprias. A título de exemplo, ilustra-se o facto de por vezes os sistemas de som de salas de espectáculo se encontrarem dispostos em “arrays” verticais de altifalantes que, controlando a fase entre eles, preenchem o ambiente acústico da sala de uma forma quase direccionada, de forma a evitar criar condições da acústica da sala que resultem na deterioração da forma como o som vai ser ouvido nas várias posições do espaço.

Atenuação do som em espaço livre

O som, para além de colidir com objectos, tem também uma atenuação que é função da distância, mesmo no caso de não encontrar nenhum objecto no seu caminho. Isto acontece por dois factores:

1.º Dispersão das ondas: o som ao propagar-se no ar livre (ondas esféricas) tem a sua área de propagação aumentada em função do aumento da área da esfera.

$$\text{Intensidade} = \text{Potência} / \text{Área} \quad (2.9)$$

Considerando uma propagação esférica em que a área é $4 \cdot \pi \cdot r^2$:

$$I = P / (4 \cdot \pi \cdot r^2) \quad (2.10)$$

Pode-se escrever que há uma atenuação de 6dB por cada duplicação de r .

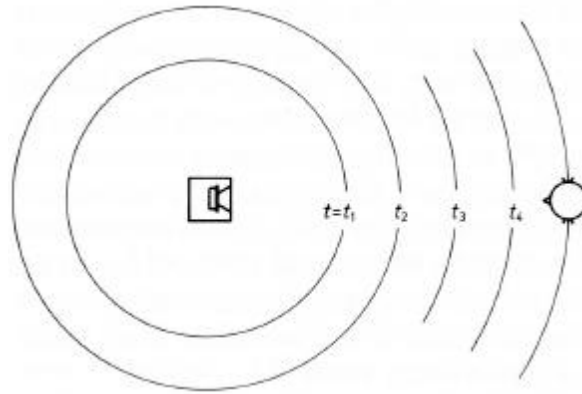


Figura 34 - Representação da propagação das ondas sonoras com a distância em ar livre (Blauert, 1983)

Admitindo que a energia sonora (energia de vibração das moléculas de ar) é constante, ocorre uma “diluição” dessa energia, causando uma atenuação na intensidade. A cada vez que dobramos a distância da fonte, a área da esfera aumenta 4 vezes, diminuindo a intensidade sonora em 4 vezes, ou seja, 6dB com o dobro da distância. Em relação a, por exemplo, uma onda cilíndrica, a pressão sonora diminui apenas 3dB com o dobro da distância, porque a superfície cresce proporcionalmente a r e não r^2 .

2.º Perdas entrópicas: Numa onda sonora, onde acontecem sucessivas compressões e rarefações, ocorrem pequenos aumentos e diminuições na temperatura do ar. Pela 2ª Lei da Termodinâmica, sempre que se realiza uma transformação energética acontece uma perda, ou seja, parte da energia perde-se em forma de calor. É a chamada perda entrópica. Assim, na propagação do som parte da energia transforma-se em calor; esta atenuação depende da sua frequência, da temperatura, da humidade relativa do ar e da pressão média.

Em suma, a atenuação do som com a distância em campo livre é:

- Directamente proporcional à frequência, ou seja, um som agudo perde intensidade em poucos metros, enquanto que um som grave se pode ouvir a quilómetros de distância;
- Inversamente proporcional à temperatura e à humidade relativa.

2.4 Como se Processa a Localização Sonora Espacial

Provavelmente desde os primórdios da Humanidade que o ser humano é capaz de usar a audição para localizar fontes sonoras. Desde localizar possíveis fontes de perigo a ajudar a filtrar um determinado som no meio de um panorama sonoro complexo, este mecanismo básico, apesar de aparentemente simples, é extremamente avançado e desenvolvido. A caracterização desta capacidade animal constitui um interessante estudo físico, fisiológico e psicológico. No século XIX, John William Strutt (Lord Rayleigh) estudou esta questão e teceu parte do que se crê até à data ser o mecanismo humano para a localização espacial de fontes sonoras. Esta teoria baseava-se na observação de que, quando um som se encontra à direita de um ouvinte, a orelha esquerda estará na “sombra” provocada pela sua cabeça, prevendo-se assim que o som captado pela orelha direita seja mais intenso que o recebido pela orelha esquerda. Esta diferença foi então interpretada por Lord Rayleigh como uma possível forma de perceber que o som se encontra à direita.

Estas conclusões permitiram formular a denominada teoria “Duplex”, em que se enuncia que dois fenómenos estão envolvidos na localização espacial de fontes sonoras.

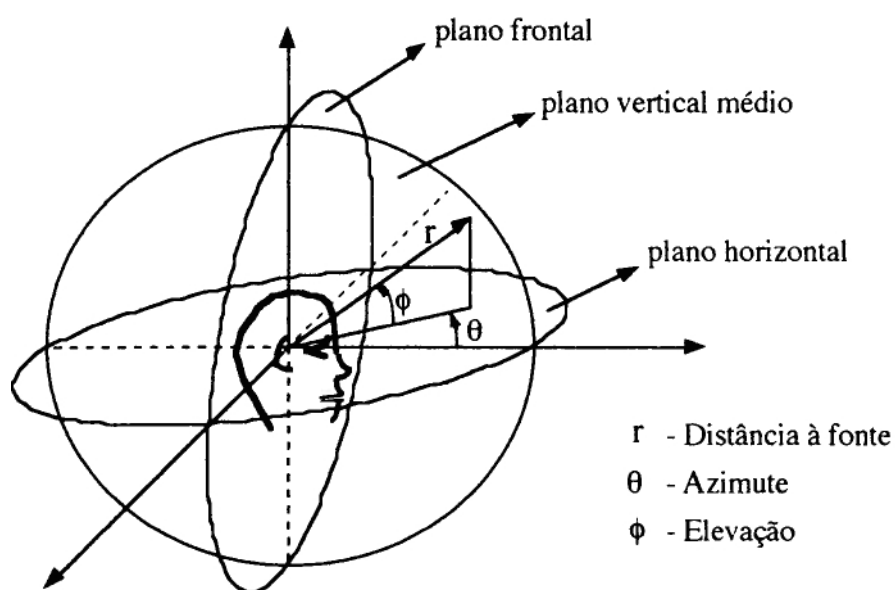


Figura 35 - Representação dos eixos na orientação sonora (Blauert, 1983)

2.4.1 Diferença de Nível Interaural (ILD)

A comparação de intensidades entre as orelhas esquerda e direita é conhecida por “Diferença de Nível Interaural” (ILD). No mesmo espírito que deu origem à teoria da “vaca esférica”, um físico pode estimar a dimensão do efeito, calculando a intensidade acústica de dois pólos opostos na superfície de uma esfera face a uma onda sonora plana incidente, e aí calcular o rácio. Esta diferença é expressa em dB. Pela figura seguinte, verifica-se a forte variação da ILD em função da frequência por todo o espectro audível (20-20 000Hz) [Moore].

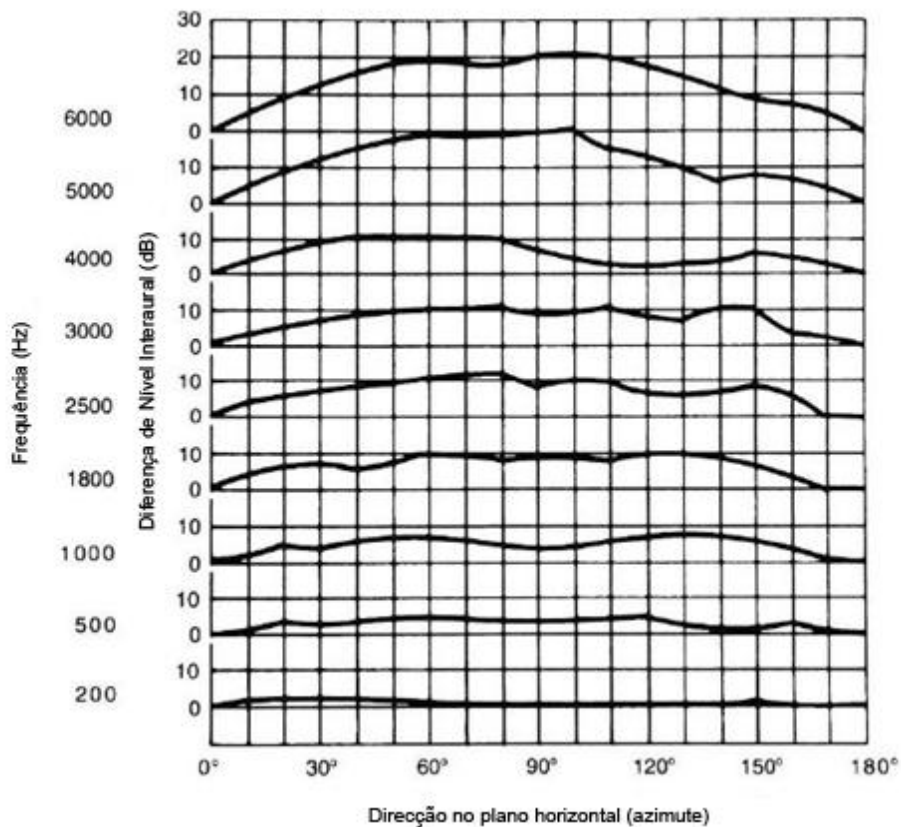


Figura 36 - Gráfico de variação de intensidade em função do ângulo azimutal para várias frequências (Moore, 1997)

Este fenómeno deve-se essencialmente à difracção das ondas sonoras quando os seus comprimentos de onda são superiores ao diâmetro da cabeça humana. À frequência de 500Hz, o comprimento de onda é de 69cm, portanto, cerca de 4 vezes o diâmetro da cabeça (18cm). Verifica-se então que, abaixo desta frequência, a ITD vai ser menor, desde que a fonte sonora esteja a mais de um metro de distância do ouvinte.

$$\frac{343m/s}{0,18m} = 1916Hz \quad (2.11)$$

Pela equação 2.11 e Figura 36 verifica-se que, para valores superiores aos 1900Hz, existe uma “sombra” ocasionada pela cabeça.

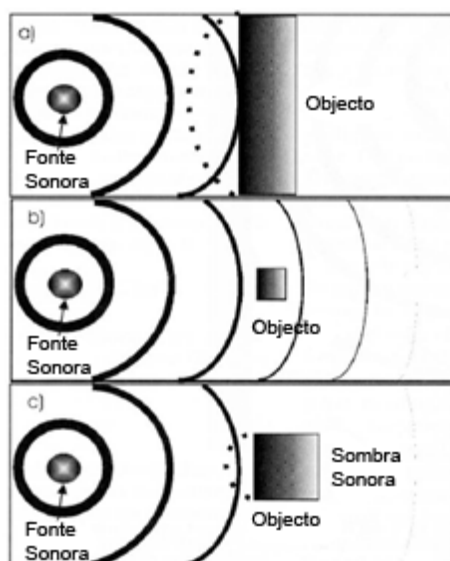


Figura 37 - Representação do efeito do comprimento de onda em objectos de diversos tamanhos relativos (Yost, 2000)

Na Figura 37 observa-se o efeito do comprimento de onda em vários objectos de dimensões diferentes. Desta figura tiram-se três tipos possíveis de fenómenos presentes na colisão do som com objectos:

- a) Pequenos comprimentos de onda (em relação ao tamanho do objecto) são reflectidos e criam interferência;
- b) Comprimentos de onda maiores passam pelo objecto;
- c) Comprimentos de onda intermédios causam uma “sombra acústica”.

Em última instância, o que define uma ILD pequena ou grande depende em muito da sensibilidade do sistema nervoso central. Em termos evolutivos, faria sentido que a sensibilidade do sistema nervoso central reflectisse de alguma forma os valores de ILD que se encontram presentes nos estímulos sonoros que ocorrem nestes tempos. De facto isso não parece o caso, já que experiências psicoacústicas detectam que o sistema nervoso central é igualmente sensível a todo o espectro. A diferença mais pequena em ILD é de aproximadamente 0,5dB, independentemente da frequência (Yost, 2000). Deste modo, a ILD é uma forma potencial de localização de sons a qualquer frequência onde a variação é fisicamente maior que 1dB.

A aproximação da cabeça humana a uma esfera é obviamente uma simplificação (Treeby, Paubally, & Pan, 2007). A cabeça inclui um variado conjunto de difusores secundários que levam a uma estruturação nas altas frequências dependentes da ILD. Desta forma, esta

estrutura pode servir como referência para a localização sonora espacial, como se verificará posteriormente neste documento.

Se os sons forem localizados apenas na base da ILD, torna-se muito difícil localizar sons com um conteúdo frequencial exclusivamente inferior a 900Hz [Moore 99]. Foi então com surpresa que Rayleigh descobriu que se conseguiam localizar tons puros de 256 ou 128Hz. Face a este acontecimento, e ao facto de saber que esta localização não poderia estar a suceder por ILD, que em 1907 concluiu que a este mecanismo se deveria ainda adicionar um que detecta as diferenças de fase entre formas de onda nos dois ouvidos. A chamada “Diferença de Tempo *Interaural*” (ITD).

2.4.2 Diferença de Tempo Interaural

Para um tom puro como Rayleigh utilizou, a diferença em fase é equivalente à diferença entre tempos de chegada de características da forma de onda (como picos e zeros) nos dois ouvidos. Uma diferença de fase $\Delta\phi$ corresponde a uma ITD de $\Delta t = \Delta\phi / (2\pi f)$ para um tom de frequência f . No limite superior de comprimentos de onda grandes, a fórmula para a difracção para uma esfera dá uma diferença de tempo interaural Δt como função do ângulo azimutal θ (esquerda-direita):

$$\Delta t = \frac{3a}{c} \sin \theta , \quad (2.12)$$

onde “ a ” é o raio médio da cabeça (aproximadamente 9cm) e “ c ” é a velocidade do som (34300 cm/s). Portanto, $3a/c = 787\text{ms}$.

A aproximação da cabeça humana a uma esfera é realizada apenas com o propósito de determinar aproximadamente uma expressão da ITD em função do tempo. Outros autores levam com mais pormenor esta questão como se verifica em (Treeby, Paurobally, & Pan, 2007).

Experiências psicoacústicas mostram que os humanos conseguem localizar uma onda sinusoidal de 500Hz com precisão considerável. Perto da posição central (θ perto de zero), os ouvintes são sensíveis a diferenças $\Delta\theta$ tão pequenas como 1-2° (Roman, Wang, & Brown, 2002). A ideia de que esta sensibilidade é obtida a partir de uma diferença de tempo interaural parece altamente improvável. Sendo que 1° em azimute corresponde a um ITD de apenas 13 μs , parece que o sistema neuronal humano, com atrasos sinápticos na ordem do milissegundo, não conseguiria supostamente detectar tão pequenas variações que resultam em microsegundos. Contudo, o corpo humano, contra esta aparente incongruência matemática, revela-se novamente surpreendente e permite esta façanha. Esta experiência pode ser realizada com auscultadores, já que possibilitam imporem-se ITDs independentemente de ILDs. A razão para este sucesso na performance no sistema neuronal humano prende-se

essencialmente com a capacidade humana para o processamento paralelo. Aparentemente, o sistema binaural vence este desafio transmitindo informações temporais através de muitos neurónios. Estimativas baseadas em teoria estatística da decisão apontam para um número de neurónios necessários que varia entre os 6 a 40 por cada banda de um terço de oitava.

Resta ainda o problema lógico de como o sistema auditivo consegue usar ITDs. Existem actualmente provas que a oliva superior (um centro de processamento no núcleo no cérebro médio) é capaz de executar operações de correlações cruzadas nos sinais captados pelos dois ouvidos (Hartmann 99)(Recanzone & Sutter, 2008). Em 1948, Lloyd Jeffress sugeriu que o sistema auditivo processa ITDs usando uma rede de linhas de atrasos neuronais terminando em neurónios e-e (Jeffress, 1948). Um neurónio pode ser visto em analogia a uma porta lógica “AND”, respondendo apenas se houver excitação nas suas duas entradas (daí a denominação “e-e”). De acordo com o modelo de Jeffress, uma entrada provém do ouvido esquerdo e a outra do direito. As entradas são atrasadas por linhas de atrasos neuronais de forma que células e-e diferentes experimentem uma coincidência em diferentes tempos de chegadas aos dois ouvidos.

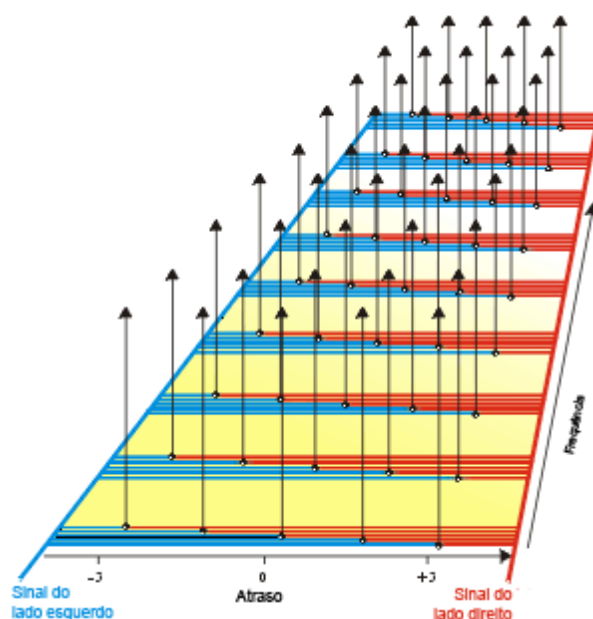


Figura 38 - Funcionamento da Rede de linhas de atrasos neuronais (Hartmann, 1999)

O funcionamento de como esta rede é imaginada é mostrado na Figura 38. Um vector de células e-e está distribuído por dois eixos: frequência e atrasos neuronais internos. O eixo da frequência é necessário devido ao facto do processamento binaural tomar lugar em canais de dadas frequências. Estes canais representam uma análise em frequência, o primeiro estágio no processamento auditivo. Portanto, qualquer modelo plausível terá de incluir os referidos canais.

Entradas do ouvido esquerdo ou do ouvido direito seguem por linhas de atrasos neuronais em cada canal e coincidem nas células e-e em que o atraso neuronal τ compensa exactamente o facto de o sinal ter começado num ouvido antes do outro. Por exemplo, se a fonte sonora deixa de ser captada pelo lado esquerdo, aí os sinais começam através das linhas de atraso antes do lado esquerdo. Os sinais coincidem com os correspondentes sinais do ouvido direito quando os neurónios da direita de $\tau = 0$, isto, claro, em valores positivos de τ . A coincidência de sinais dos neurónios causa o envio de picos para os centros de processamento mais elevados do cérebro, a partir dos neurónios e-e.

O valor esperado de coincidências N_c na célula e-e especificada por atraso t é dado em termos das taxas $P_L(t)$ e $P_R(t)$ de picos neuronais do ouvido esquerdo e direito pelo seguinte integral para a correlação:

$$N_c(\tau) = T_W \int_0^{T_S} P_L(t') P_R(t' + \tau) dt' , \quad (2.13)$$

onde T_W é a abertura da janela de coincidência do neurónio e T_S a duração do estímulo. Desta forma, N_c é então a correlação cruzada entre sinais provenientes dos dois ouvidos. Atrasos neuronais e circuitos de coincidência deste tipo foram encontrados na oliva superior medial do cérebro de gatos (Yin T, 1990).

As experiências com auscultadores com ITDs fornecem ao utilizador uma experiência peculiar. A posição da imagem é localizada da esquerda para a direita como esperado, dependendo do sinal da ITD, mas a imagem parece estar localizada dentro da sua cabeça e, portanto, não é percebida como sendo exterior no “mundo real”. Tal imagem considera-se assim lateralizada e não localizada. Embora esta lateralização seja uma sensação bastante diferente para o ouvinte (devido ao efeito da proveniência do som), experiências mostram que a lateralização está intimamente ligada à localização.

Usando auscultadores, pode-se medir a mais pequena variação em ITD como função da própria ITD. Estes dados de ITD podem ser usados com a equação 2.13 para prever a menor variação detectável em azimute $\Delta\phi$ para uma fonte sonora real como função de ϕ . Quando as experiências de localização são realizadas com fontes sonoras reais, os resultados vão de acordo com as previsões, como seria de esperar no caso do cérebro se basear em ITDs para efectuar decisões acerca de localizações sonoras (Darwin & Hukin, 1999).

Como qualquer sistema sensível à fase, o detector de fase binaural que possibilita o uso de ITDs sofre de ambiguidade de fase quando o comprimento de onda é comparável à distância entre duas medidas (neste caso os dois ouvidos). Este problema é ilustrado na Figura 39.

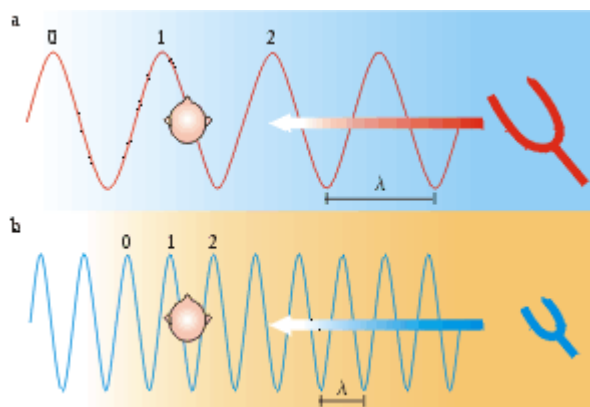


Figura 39 - Ilustração do problema do comprimento de onda incidente em relação aos ouvidos (Hartmann W. M., 1999)

O ponto de vista equivalente mas com uma perspectiva temporal enuncia que, para evitar ambiguidades, um meio período da onda deve ser maior que o atraso entre ouvidos. Quando o atraso é exactamente meio período da onda, os sinais captados pelos dois ouvidos ficam exactamente fora de fase e a ambiguidade é completa. Para períodos menores, entre o dobro do atraso e o atraso em si, a ITD leva a uma aparente localização sonora da fonte que na realidade é do lado oposto à realidade. Desta forma, parece razoável pensar-se que seria melhor não ter sensibilidade à ITD do que ter um processo que poderia levar a interpretações erradas. Contudo, o sistema binaural humano resolve o problema na forma que parece ser a mais apropriada: ele perde a sensibilidade muito rapidamente para ITDs quando a frequência da onda sonora aumenta desde os 900 aos 1500Hz (exactamente o intervalo em que a diferença de fase é mais ambígua).

Poder-se-ia pensar que a rede de linha de atrasos e os detectores de coincidência descritos anteriormente desaparecessem a frequências superiores a 1500Hz. Tais resultados seriam consistentes com as experiências realizadas com tons puros (Shigeno & Sakamoto, 1983)(Stevens & Newman, 1934), no entanto tais modelos deverão estar errados. De facto, o sistema binaural consegue com sucesso registar ITDs que ocorrem a frequências tão altas como 4000Hz, se o sinal for modulado. A modulação, por sua vez, deve ter uma frequência que seja inferior a 1000Hz (Brungart, Durlach, & Rabinowitz, 1999). Desta forma, a falha do sistema de medição de temporizações binaurais em processar sinusóides acima dos 1500Hz não pode ser pensada como uma falha dos neurónios binaurais sintonizados para as altas frequências. Em vez disso, a “falha” é melhor descrita no domínio temporal, como uma não capacidade de registar variações rápidas.

Para sumariar a questão das diferenças binaurais, a fisionomia do sistema binaural é sensível a diferenças de intensidade de ILDs a qualquer frequência, mas para ondas planas incidentes só se conseguem interpretar para frequências superiores a 500Hz. Estas diferenças tornam-se grandes e fiáveis acima dos 3000Hz, fazendo-as mais adequadas para as altas frequências. Por outro lado, a fisiologia binaural é capaz de usar a informação de diferença

de fase (ITDs) a baixas frequências, abaixo de no máximo 1500Hz. Para sinusóides de frequências intermédias como 2000Hz, nenhuma destas capacidades funciona correctamente. Como resultado, a localização espacial nesta gama tende a ser má.

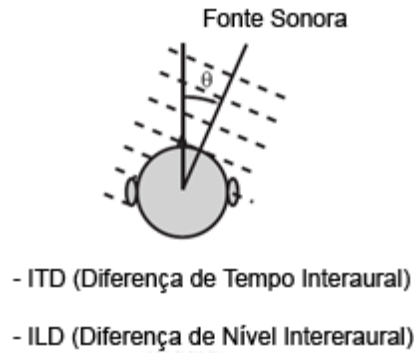


Figura 40 - Localização azimuthal por diferenças interaurais

A “performance” da capacidade humana para localizar sons no espaço pode ser vista de duas formas:

- Direcção percebida versus direcção real;
- Detecção de uma mudança de posição na fonte sonora.

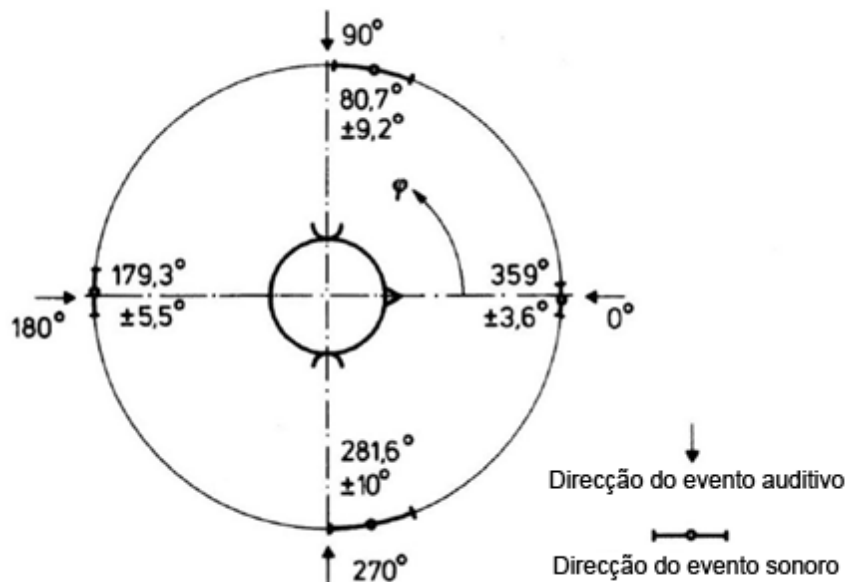


Figura 41 - Acuidade horizontal na localização de uma fonte sonora parada realizada com impulsos de ruído branco de 100ms (Blauert, 1983)

No que concerne à detecção de mudanças da posição da fonte sonora, Blauert publicou a seguinte tabela que reúne várias experiências com vários tipos de sinal, onde constam os vários intervalos de MAA (Minimum Audible Angle), e portanto o menor ângulo audível em que se percebe uma deslocação.

Tabela 3 - Intervalos para o Mínimo Ângulo Audível para várias experiências de vários autores (Blauert, 1983)

Referência	Tipo de sinal	MAA
Klemm (1920)	Impulsos (clicks)	0.75°-2°
King and Laird (1930)	Impulsos (clicks)	1.6°
Stevens and Newman (1936)	Sinusóides	4.4°
Schmidt et tal. (1953)	Sinusóides	>1°
Sandel et tal. (1955)	Sinusóides	1.1°-4.0°
Mills (1958)	Sinusóides	1.0°-3.1°
Stiller (1960)	Ruído de banda estreita	1.4°-2.8°
Boerger (1965)	Rajadas de ruído gaussiano	0.8°-3.3°
Gardner (1968)	Fala	0.9°
Perrott (1969)	Rajadas de tons com diferentes fases, tempos de decay.	1.8°-11.8°
Blauert (1970)	Fala	1.5°
Haustein and Schirmer (1970)	Ruído de banda larga	3.2°

Posteriormente, Moore publicou um gráfico onde se ilustra a variação do MAA em função da frequência para vários azimutes (Moore, 1997).

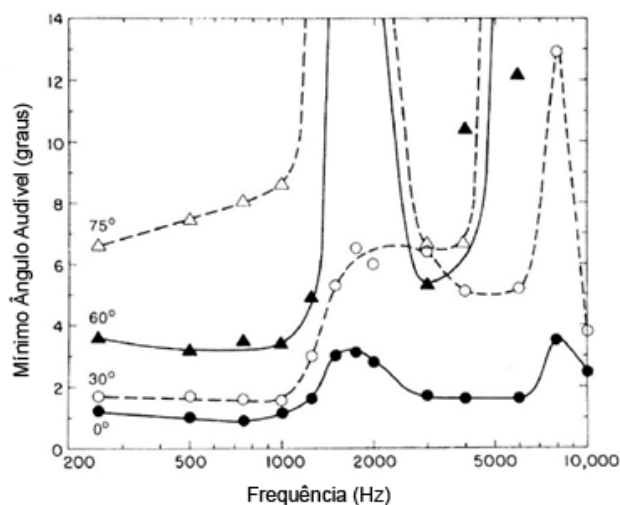


Figura 42 - Variação do MAA em função da frequência para vários azimutes (Moore, 1997)

Pela Figura 42, observam-se os dois picos nas médias/altas frequências na já referida zona de fronteira entre ILD e ITD em que se verifica que o MAA cresce significativamente, especialmente em fontes sonoras periféricas (não frontais).

2.4.3 A não adequação de referências binaurais

As diferenças de tempo e intensidade binaurais são referências poderosas para a localização de uma fonte sonora, mas têm importantes limitações. Novamente, tendo em consideração uma aproximação à cabeça humana por uma esfera, a não adequação das diferenças internaúrais é evidente porque, para uma fonte sonora movendo-se no plano sagital médio (o bissector perpendicular de uma linha traçada entre os dois ouvidos), os sinais do ouvido esquerdo para o ouvido direito (e consequentemente as diferenças binaurais) são as mesmas. Como resultado disso, o ouvinte com a hipotética cabeça esférica não consegue distinguir entre fontes sonoras atrás de si, à sua frente ou sobre a sua cabeça. Graças a uma sensibilidade fina às diferenças binaurais, este ouvinte consegue detectar deslocações de apenas 1° de um lado para o outro, mas não consegue distinguir o que vem de trás do que vem da frente. Este tipo de localização dificilmente não corresponde à nossa experiência quotidiana.

Existe um outro problema com este modelo de diferenças binaural: se um tom ou ruído de banda larga é ouvido por auscultadores com uma ITD, uma ILD ou ambas, o ouvinte fica com a impressão de lateralização. Embora a noção do movimento da fonte sonora está correcta, a imagem sonora parece vir de dentro da sua cabeça, podendo até parecer difusa e confusa em vez de compacta. Esta sensação é também pouco usual na experiência do mundo real, em que os sons são percebidos como exteriores à cabeça.

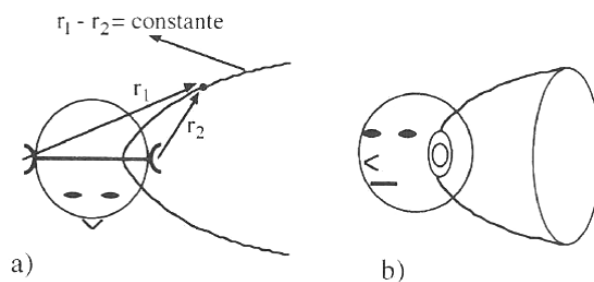


Figura 43 - Cone de confusão. a) no plano horizontal b) em perspectiva (Azevedo, 1994)

A resolução da confusão trás-frente e a externalização de imagens sonoras apela ao uso de outras ferramentas para a localização sonora, tal como a função de transferência anatómica (ATF) ou também denominada Função Transferência Relativa à Cabeça (Head Related Transfer Function-HRTF).

2.4.4 A localização vertical

Foi visto anteriormente que a simples utilização de diferenças interaurais, denominada de teoria Duplex formulada por Rayleigh, não é suficiente para uma localização espacial efectiva. É necessário ter-se em consideração a referida função de transferência (HRTF), que torna possível a localização de sons com elevação.

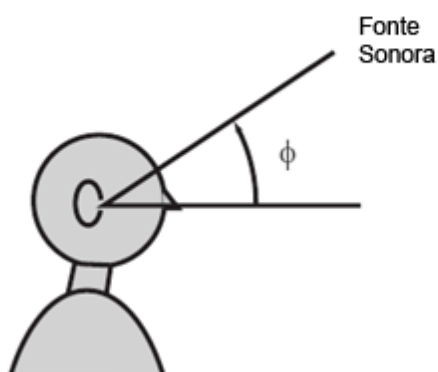


Figura 44 - Localização da elevação na localização sonora (Duda, 2000)

Pela análise de trabalhos relativos ao desempenho da localização no plano vertical médio, verifica-se que esse depende do tipo de sinal e que existe um processo de aprendizagem, ou seja: a localização pode variar com o tempo e a familiaridade com o sinal fornecido pela fonte sonora tem um papel importante para o desempenho da localização de alguns tipos de sinais.

A maioria dos trabalhos de análise do plano vertical tem incidido no estudo do plano vertical médio. Isto deve-se ao facto de neste plano as diferenças interaurais serem mínimas e, deste modo, os principais procedimentos de localização serem monaurais, ao contrário do plano horizontal, onde os principais procedimentos de localização são biaurais. Enquanto que os procedimentos biaurais para localização no plano horizontal foram considerados há bastante tempo, só recentemente é que se começou a discutir o papel das distorções provocadas pela aurícula, cabeça e tronco para a localização espacial no plano vertical médio (a referida HRTF). As mudanças espectrais provocadas principalmente pelo pavilhão auricular permitem a codificação da posição espacial da fonte sonora.

Um dos que reintroduziu o papel do pavilhão auricular na localização do plano vertical médio foi Blauert (uma das referências inequívocas deste trabalho). Pela experiência por ele realizada, utilizando três posições do plano vertical médio, verificou que a aurícula realça algumas zonas de espectro naquilo que ele designou por bandas de frequências direccionais de preferência (Blauert, 1983). O problema da experiência de Blauert foi ter baseado a sua teoria em três zonas de localização: frente, cima e trás. Estes resultados tornam-se inconclusivos, pois não foi testado todo o plano vertical médio para relacionar as bandas

preferenciais. Além disso, a maioria dessas bandas encontrava-se abaixo de 7 KHz e foi comprovado a existência do empobrecimento na localização quando se limitava a banda do sinal a valores abaixo de 7 KHz. Segundo Hartmann, para existir uma localização precisa no plano vertical médio, o som deve ser complexo e conter frequências acima de 7000 Hz (Hartmann W. M., 1993). Nas altas frequências, o comprimento de onda torna-se suficientemente curto, permitindo a interação do som com o pavilhão auricular.

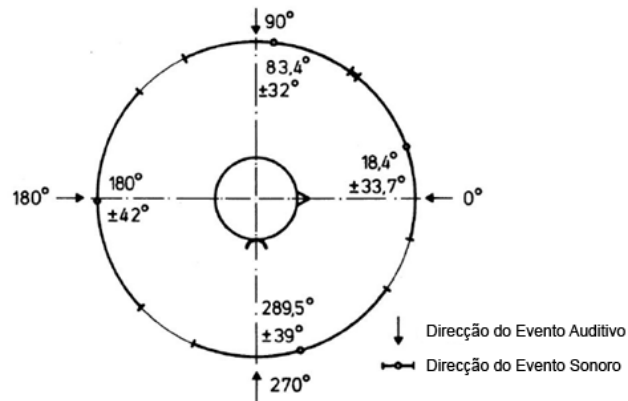


Figura 45 - Acuidade na elevação (plano medial) (Blauert, 1983)

Para analisar o papel da aurícula têm sido realizados muitos estudos, principalmente através da oclusão da mesma e análise dos resultados assim obtidos (Oldfield & Parker, 1984)(Roffler & Butler, 1968), verificando-se que a habilidade de localização no plano médio diminui com o aumento da oclusão. Desses resultados confirma-se a grande importância do pavilhão auricular na localização no plano vertical médio. Por exemplo, a Figura 46 apresenta o resultado obtido por (Oldfield & Parker, 1984), numa experiência em que se efectuou a oclusão da aurícula para posições da fonte sonora em todo o espaço.

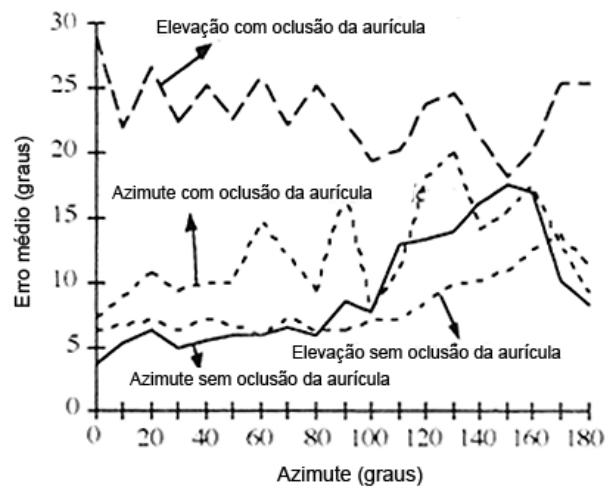


Figura 46 - Erros obtidos com a oclusão do pavilhão auricular (Oldfield & Parker, 1984)

Quanto ao tipo de sinal, têm sido efectuadas várias experiências com especial incidência na largura de banda. Vários autores, que efectuaram experiências em sinais de banda estreita ou sinais de baixa frequência, verificaram que os indivíduos eram incapazes de obter uma localização precisa (Blauert, 1983)(Roffler & Butler, 1968), ou que os sinais tendiam a ser localizados em determinadas posições particulares independentes da posição actual da fonte (Blauert, 1983)(Moore, 1997). Tal como será visto de seguida com mais pormenor, todos estes resultados sugerem que, se o procedimento de localização de uma dada direcção da fonte estiver representado numa dada zona do espectro, a existência de energia apenas nessa banda provoca a percepção da fonte sonora apenas nessa direcção, independentemente da direcção real da fonte e, deste modo, os picos do espectro seriam os principais procedimentos da localização vertical (Middlebrooks & Green, 1991)(Hartmann W. M., 1999).

2.4.5 A Função de Transferência Anatômica

Ondas sonoras provenientes de diferentes direcções no espaço são dispersadas de uma forma diferente pelos ouvidos do ouvinte, cabeça, ombros e tronco superior. A dispersão leva a uma filtragem acústica dos sinais captados pelos ouvidos esquerdo e direito. A filtragem pode ser descrita por uma complexa função de resposta, a Função de Transferência Anatômica (ATF), também conhecida como a Função de Transferência Relativa à Cabeça (HRTF - Head Related Transfer Function). Também de referir a utilidade da ferramenta constituída pela função de resposta impulsional da cabeça (HRIR - Head Related Impulse Response). Estas funções são particulares de cada indivíduo e são o resultado de uma aprendizagem ao uso da anatomia de cada um (Hofman, Riswick, & Opstal, 1998), no entanto, na sua essência e nas médias frequências, as características são semelhantes e podem ser comparadas entre indivíduos.

Devido à ATF, ondas sonoras provenientes de trás tendem a ser aumentadas na região de frequência dos 1000Hz, onde as ondas que provêm da frente são aumentadas na região dos 3000Hz. Os efeitos mais dramáticos ocorrem acima dos 4000Hz: nesta região, o comprimento de onda é inferior a 10 cm e particularidades da cabeça, especialmente os ouvidos ou o pavilhão auricular, tornam-se dispersores significativos. Acima dos 6000Hz, a ATF torna-se significativamente diferente para cada indivíduo, mas existem algumas características que são encontradas de uma forma geral (Brungart, Durlach, & Rabinowitz, 1999).

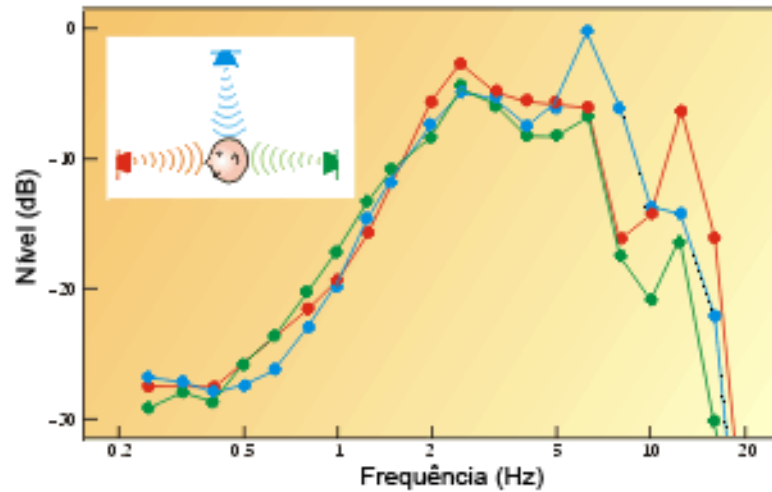


Figura 47 - Gráfico de nível versus intensidade para som da frente, de cima, e de trás, tal como é ouvido no KEMAR. A comparação das curvas revela os ganhos relativos da HRTF (Hartmann W. M., 1999)

Na maioria dos casos, existem estruturas tipo vale e pico que tendem a mover-se para frequências mais altas sempre que a elevação de fontes sonoras aumenta de baixo para cima da cabeça (Blauert, 1983). Por exemplo, a Figura 47 mostra o espectro de fontes sonoras na frente, atrás e exactamente por cima da cabeça, medidas dentro do ouvido de um manequim usado para fins de pesquisa acústica, chamado KEMAR (Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research).



Figura 48 - Fotografias do KEMAR (Duda, 2000)

O pico perto dos 7000Hz é conhecido como sendo uma característica proeminente para sons vindos de cima da cabeça (Blauert, 1983).

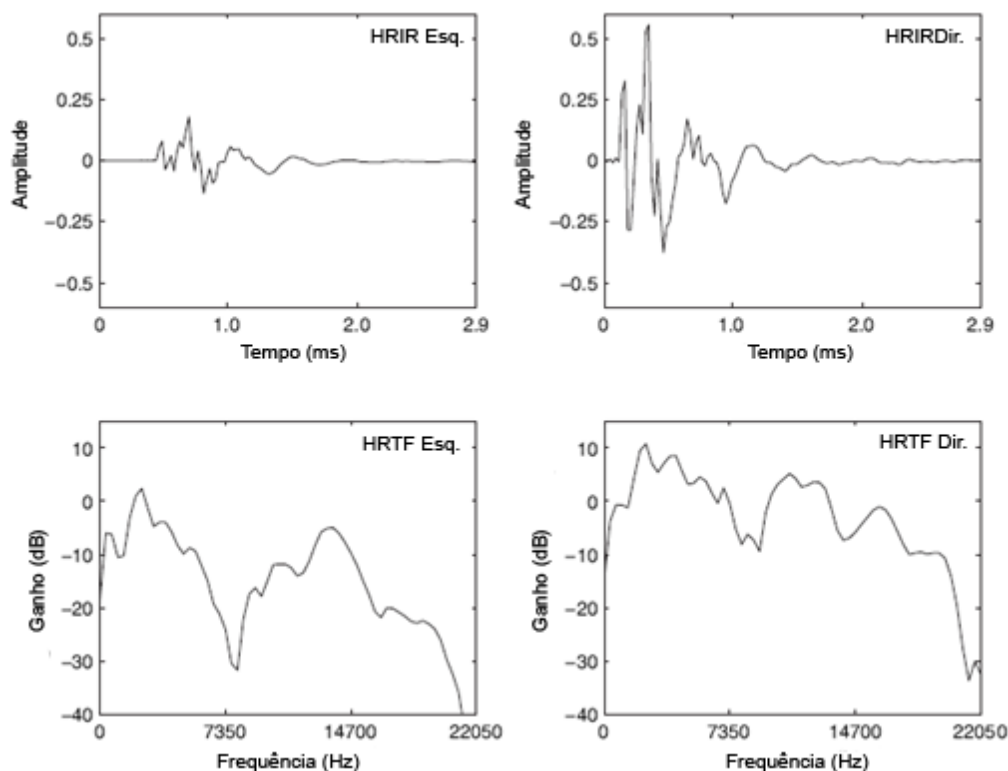


Figura 49 - Exemplo de uma HRIR (em cima) e HRTF (em baixo) para um azimute de 40° à direita com 0° de elevação (Stern, Wang, & Brown, 2006)

A filtragem dependente da direcção, realizada pela anatomia de cada indivíduo e usada pelos mesmos para resolver possíveis confusões entre a frente e trás para uma dada elevação, é também um componente necessário para a exteriorização. Experiências subsequentes mostram que a obtenção da ATF correcta através de técnicas de realidade virtual é suficiente para exteriorizar a imagem. Mas existe um problema óbvio na aplicação da ATF à priori: não existe maneira de um ouvinte perceber se uma característica espectral provém de uma filtragem dependente da direcção ou se é parte do som original. Por exemplo, um sinal com um forte forte perto dos 7000Hz pode não necessariamente vir de cima, mas tratar-se apenas de um som que tem maior intensidade perto dos 7000Hz.

Confusões deste tipo entre o espectro de uma fonte sonora e a ATF aparecem imediatamente com sinais de banda estreita como tons puros ou bandas de ruído de apenas alguns semitons. Quando a um ouvinte é pedido para dizer se um som de banda estreita provém da frente, trás ou de cima da sua cabeça a resposta dependerá inteiramente da frequência do som. A verdadeira localização do som é portanto irrelevante (Blauert, 1983). Assim, para sons de banda estreita, a confusão entre o espectro da fonte sonora e a sua localização é completa. O ouvinte pode resolver este problema de localização apenas rodando a cabeça de forma a que a fonte sonora deixe de se encontrar no plano sagital médio (Blauert, 1983).

Existem duas classes de movimentos realizados pela cabeça humana, para efectuar uma localização sonora (Blauert, 1983):

- O movimento espontâneo (reflexivo), mais ou menos consciente, da cabeça em direcção ao evento auditivo, e conseqüentemente em direcção à posição mais provável da fonte sonora. O significado biológico deste movimento é evidente, mas requer um evento auditivo capaz de ser mais ou menos localizado com precisão antes do movimento propriamente dito. Quando a cabeça se move o erro de localização diminui, já que localização é posteriormente realizada na frente, ou seja, uma zona privilegiada de localização;
- Os movimentos de procura e orientação efectuados mais ou menos conscientemente. A sua função é claramente de reunir mais informação de forma a estabelecer uma posição final para o evento auditivo que inicialmente não havia sido precisamente localizado. Geralmente, a localização do evento auditivo torna-se mais definida durante o movimento da cabeça. Em alguns casos, o evento auditivo muda de posição de uma forma específica, por exemplo, da frente para trás ou da frente para cima da cabeça.

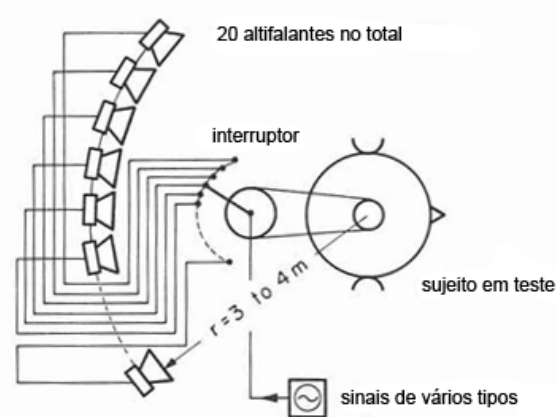


Figura 50 - Experiência de Wallach (1938, 1939, 1940) (Blauert, 1983)

Numa interessante variação deste tema, Frederic Wightman e Doris Kistler da Universidade de Wisconsin - Madison mostraram que não é suficiente que a fonte se mova por si. O ouvinte ficará sempre confuso e não distinguirá o que vem de trás ou da frente. A confusão pode ser resolvida, contudo, se o ouvinte tiver sob seu controlo o movimento da fonte (Wightman & Kistler, 1999). Wallach, em 1938 e 1939, levou a cabo experiências incorporando este efeito, conforme a Figura 50. Usando 20 altifalantes dispostos num arco em redor de um sujeito, ele ligou um comutador rotativo ao movimento da sua cabeça. Esta

relação entre o movimento da cabeça e do comutador era variável. Este comutador fazia activar o altifalante respectivo ao movimento efectuado pela cabeça, com tons pulsados, música, voz e “clicks”.

A maioria dos sons do dia-a-dia são de banda larga e relativamente benignos na sua variação espectral, de modo que os ouvintes podem localizar a fonte e identificá-la na base do espectro. Ainda não é inteiramente claro como o processo da localização funciona. Os primeiros modelos deste processo que se focam em particularidades espectrais (como a referida dos 7000Hz para uma fonte sonora em cima da cabeça) abriram caminho, sob a pressão de investigação recente, para modelos que usam todo o espectro.

2.4.6 Experiências com auscultadores

A maior parte do que se sabe sobre localização sonora foi aprendido a partir de experiências usando auscultadores. Com auscultadores, o experimentador pode controlar com precisão os estímulos fornecidos ao ouvinte. Até em experiências realizadas em gatos, aves e roedores foram colocados nestas pequenas criaturas auscultadores miniatura.

No princípio muito foi aprendido sobre os fundamentos das capacidades binaurais através de experiências com auscultadores com simples diferenças em intensidade e tempos de chegada para tons de várias frequências e ruído de várias composições (Blauert, 1983)(Hartmann W. M., 1999)(Moore, 1997). Contudo, trabalhos nas questões maiores da localização sonora tiveram de esperar por vários desenvolvimentos tecnológicos para atingirem uma composição fiel da ATF de cada ouvido. Primeiramente foram as medidas acústicas propriamente ditas, realizadas com pequenos microfones tipo sonda inseridos nos canais auditivos dos ouvintes a apenas poucos milímetros dos ossículos do ouvido. As funções de transferência medidas com estes microfones permitiram experiências para criar simulações precisas do mundo real usando auscultadores, uma vez que a sua função de transferência e a dos microfones foi compensada por filtragem inversa.

Contudo, uma filtragem adequada requer processadores digitais de sinal rápidos, ligados ao computador que corre as experiências. O movimento da cabeça do ouvinte pode ser tomado em conta através de um localizador de cabeça electromagnético. Este localizador de cabeça consiste num transmissor fixo, cujas três bobines produzem campos magnéticos de baixa frequência, e um receptor, também com três bobines, que é montado na cabeça do ouvinte. O localizador dá uma leitura de todos os seis ângulos de liberdade do movimento da cabeça 60 vezes por segundo. Baseado no movimento da cabeça, o computador que controla instrui o rápido processador digital de sinal para refiltrar os sinais para os ouvidos para que o cenário sonoro se mantenha estável e realístico. Esta tecnologia de realidade virtual é capaz de sintetizar um ambiente acústico convincente. Começando por uma simples gravação monaural de uma conversação, o experimentador pode colocar os vários intervenientes da conversa no espaço. Se a cabeça do ouvinte roda de forma a ficar face a face com um

falante, a imagem auditiva mantém-se constante tal como na vida real. O que é mais importante para um psico-acústico é que esta tecnologia abriu toda uma vasta gama de experiências controláveis.

2.4.7 Problemas possíveis na simulação do processo de localização

Com auscultadores, o experimentador pode criar condições não encontradas na natureza, para tentar entender o papel de diferentes mecanismos de localização. Por exemplo, introduzindo uma ILD que aponta para a esquerda, oposta a uma ITD que aponta para a direita, pode permitir estudar a importância relativa destes dois tipos de mecanismos de localização. De uma forma não surpreendente, verifica-se que as ILDs dominam as altas frequências enquanto as ITDs dominam as baixas. Mas a percepção não está limitada apenas à localização de pontos, também inclui forma e tamanho. Experiências com ITDs e ILDs contraditórios levam a uma imagem difusa: a imagem ocupa uma região difusa dentro da cabeça, que um ouvinte consegue consistentemente descrever. Este efeito pode também ser medido como uma variação crescente nos juízos de lateralização.

Incorporando a ATF em simulações de auscultadores, expande-se consideravelmente a variedade de efeitos bizarros. Uma síntese fidedigna de som de banda larga leva à percepção que a cena é como o mundo real: as imagens auditivas são localizadas, exteriorizadas e compactas. Provocar erros na síntese, por exemplo, ir progressivamente eliminando a ITD de linhas espectrais mantendo a componente da amplitude da ATF, pode fazer com que a imagem se aproxime da cabeça, bata na cabeça, forme uma bolha que entra no canal auditivo e finalmente entre na cabeça. Este processo pode ser revertido por progressivamente restaurar valores correctos de ITD (Hartmann & Wittenberg, 1996).

Uma vasta variedade de efeitos pode ocorrer, por acidente ou design, com síntese não precisa. Existem algumas regras gerais: imprecisões tendem a expandir o tamanho da imagem, colocar a imagem dentro da cabeça, produzir imagens que estão na parte de trás em vez de estarem à frente. É necessária uma precisão excelente para evitar a confusão trás-frente. A tecnologia permite que um ouvinte ouça o mundo com os ouvidos de outra pessoa, e o resultado normalmente é uma confusão maior na determinação do que está à frente ou atrás. Precisão reduzida coloca frequentemente a imagem atrás, mesmo assim mantendo-a externa à cabeça. Baixando ainda mais a precisão, para além da imagem ficar atrás, fica também na parte de dentro da cabeça (dentro atrás).

2.4.8 Salas e Reflexões

As operações de ITD e ILD e de alteração do espectro dos sons são normalmente testadas com auscultadores ou por localização sonora em salas anecóicas, onde todos os sons viajam em linhas directas entre a fonte sonora e o ouvinte. A maior parte da audição que o ser

humano faz no seu dia-a-dia é no entanto diferente e repleta de paredes, chão, tectos e outros objectos grandes que reflectem ondas sonoras. Destes reflexos resultam mudanças físicas dramáticas nas formas de onda. É difícil imaginar, que vindos de todas as direcções, possam contribuir de alguma forma (que não seja aleatória) na localização sonora. Desta forma, espera-se que as reflexões e reverberações introduzidas numa sala sejam inevitavelmente más no que diz respeito à localização sonora. E isto é especialmente verdade para o uso de referências provenientes de ITDs.

A ITD é particularmente vulnerável porque depende da coerência entre os sinais dos dois ouvidos, tal como foi explicado anteriormente. Som reverberado não contém informação coerente e, em salas grandes onde o som reflectido domina o som directo, a ITD torna-se não fiável.

Em contraste, a ILD até é favorecida. Primeiro, como se demonstrou por experiências com auscultadores, não é relevante para a comparação binaural de intensidade se o sinal binaural é coerente ou não. Tais detalhes de temporizações de neurónios são descartados quando se trata de ILDs. Logicamente, a precisão de ILDs é adversamente afectada pela presença de ondas estacionárias nas salas, mas aqui aparece a segunda vantagem das ILDs: quase todas as superfícies reflectoras têm a propriedade da sua absorção acústica aumentar com a frequência; como resultado, a potência reflectida torna-se efectivamente menor comparada com a intensidade da componente directa do som. Devido ao facto da neurofisiologia binaural ser capaz de usar ILDs por todo o espectro audível com igual sucesso, é normal para melhorar a experiência em espaços fechados que se utilizem sons de elevada frequência desde que se ouçam. Experiências em espaços altamente reverberantes descobriram efectivamente os ouvintes a utilizarem essa técnica, usando sons acima dos 8000Hz. Uma análise de teoria da decisão estatística usando ILDs e ITDs medidos em manequins, permitiu observar experimentalmente que o padrão de erro de localização pode ser entendido assumindo que os ouvintes se apoiam completamente em ILDs, e de forma nenhuma em ITDs. No entanto esta estratégia de colocar um peso diferente no equilíbrio das importâncias das diferenças interaurais revelou-se inteiramente inconsciente.

2.4.9 O efeito de precedência

Existe ainda uma outra estratégia que os ouvintes empregam inconscientemente para lidar com referências distorcidas que ocorrem numa sala: eles fazem os seus juízos de localização instantaneamente baseando-se nas ondas que chegam mais cedo no acontecimento de um som novo. Esta estratégia é conhecida como o efeito de precedência, devido ao facto da onda sonora que chega primeiro (aquela que vem directamente e que contém a informação de posição correcta) tem precedência sobre as subsequentes reflexões e reverberações que contêm informação não precisa. Todos os que vaguearam por uma sala tentando localizar um tom puro sem ouvir o início do mesmo podem testemunhar o valor e a

importância deste efeito. Sem a ação do efeito de precedência na primeira onda que chega, a localização seria virtualmente impossível. Não há qualquer informação de ITD usável e, devido à onda estacionária, a sensação de intensidade do tom (“loudness”) é na sua essência não relacionada com a proximidade da sua fonte (Maltby, 2002).

O funcionamento do efeito de precedência é muitas vezes pensado como uma porta neuronal que é aberta pelo início de uma fonte sonora, acumula informação de localização em 1ms e aí fecha para desligar subsequentes referências de localização. Esta operação aparece claramente em experiências onde é vantajoso para o ouvinte ouvir as ondas seguintes, mas o efeito de precedência evita-o. Um modelo alternativo refere que o efeito de precedência é um mecanismo que não corta absolutamente após esse milissegundo, mas sim coloca um peso (valor) diferente na interpretação dos seguintes, não sendo totalmente excluídos do mecanismo de localização.

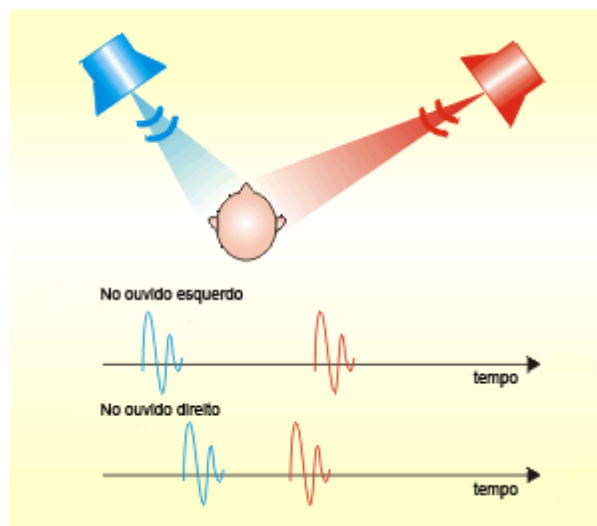


Figura 51 - Ilustração do efeito de precedência (Hartmann W. M., 1999)

A precedência pode ser facilmente demonstrada com um sistema de som com emissão monaural, de forma a que o mesmo som esteja a ser reproduzido pelos dois altifalantes. Colocando-se entre os altifalantes, fica a sensação que o som provém da frente ao centro. Aproximando-se meio metro do altifalante esquerdo faz com que fique a sensação que o som vem todo da esquerda e que o altifalante direito deixa de ser ouvido. A análise deste resultado é que cada altifalante envia um sinal para os dois ouvidos. Cada altifalante cria uma ILD e, mais importante ainda, um ITD, e estas diferenças competem, como na Figura 51. Devido ao efeito de precedência, o primeiro som (do lado esquerdo) ganha a competição e o ouvinte tem a percepção que o som provém da esquerda. No entanto, embora pareça que o som provém da esquerda apenas, o altifalante direito continua a ter uma contribuição de “loudness” e uma sensação de extensão espacial. Esta percepção pode ser verificada desligando subitamente o altifalante direito, onde se nota imediatamente o referido. Desta

forma, o efeito de precedência é restringido à formação de uma única imagem fundida com uma localização definitiva. O efeito de precedência aparenta não depender somente de diferenças interaurais; ele funciona também em diferenças espectrais causadas por filtragens anatómicas para fontes no plano sagital médio (Litovsky, 1997).

2.4.10 Percepção das distâncias

A capacidade de um ouvinte localizar a distância que existe entre si e a fonte sonora é manifestamente má. Não são necessários estudos muito elaborados para perceber empiricamente esse facto. Existe claramente uma falta de investimento de tempo no estudo desta dimensão da localização sonora. No entanto, encontram-se breves referências nos trabalhos de (Middlebrooks & Green, 1991), (Moore, 1997) e (Blauert, 1983) acerca deste tópico.

Se a intensidade sonora de uma fonte é conhecida, a distância poderia ser interpretada pelo sistema auditivo do ouvinte como sendo função da intensidade sonora do som recebido. No entanto, é muito pouco frequente conhecer-se esta intensidade para a maioria dos casos. Mostrou-se que, para uma conversação tida numa câmara anecóica, a distância entre pessoas era percebida com alguma precisão. Colocando um altifalante a reproduzir a mesma conversa, e variando o volume, transmitiu a ideia de nova distância. Conclui-se, portanto, a importância da familiaridade do som para se poder inferir sobre a distância.



Figura 52 - Erro de localização da distância à fonte sonora com cabeça imobilizada, com uma intensidade de 70 fon a 4m (Blauert, 1983)

Como foi referido anteriormente, num ambiente anecóico, a intensidade de uma fonte sonora diminui 6dB pela duplicação da distância. Se por ventura se dá uma mudança na intensidade aparente (“loudness”), essa diferença deveria ser capaz de ser prevista e a nova distância à fonte calculada. Este resultado foi confirmado para distâncias superiores a 3m. Para distâncias inferiores, as diferenças de intensidade têm que ser bastante maiores para o indivíduo conseguir com sucesso distinguir uma variação. Também se demonstrou que movimentar a cabeça (ao contrário das localizações azimutal e vertical) não beneficia em nada o processo. Foram também realizados estudos com auscultadores, concluindo-se que à

medida que a energia das baixas frequências do espectro aumenta, o mesmo acontece também à distância aparente da fonte sonora.

Outros estudos em ambiente não anecóicos concluíram que as estimativas de distância, quando feitas as médias entre indivíduos e ensaios, correlacionam-se significativamente com as distâncias reais quando as fontes sonoras se encontram localizadas de um lado, e não quando se encontram à frente. Pensa-se assim que o indivíduo pode estimar melhor a distância a uma fonte sonora se o ambiente circundante não é anecóico. Numa sala normal, uma fonte sonora distante produz energia sonora que chega aos ouvidos do indivíduo através de caminhos directos e indirectos. Diferenças na relação destas duas energias poderão produzir diferenças perceptíveis na “qualidade” da fonte sonora, como função da distância (Middlebrooks & Green, 1991). Esta referência para a distância da fonte sonora é, contudo, fortemente influenciada pelas reflexões específicas do ambiente onde o ouvinte se encontra. Estudos mostram que estimativas de distância para uma fonte de ruído de banda larga, reproduzido durante apenas 5s, se tornam completamente diferentes numa sala reverberante. Aparentemente, estes efeitos não são robustos. Não existem estudos sistemáticos que apontem como esta relação entre som directo e indirecto influencia a percepção da distância.

2.4.11 Conclusões resumidas sobre a localização espacial de sons

Discutir localização espacial de som é discutir três tipos de localização com características muito próprias e precisões muito diferentes (Getzmann, 2003). De uma forma decrescente em capacidade humana apresentam-se em jeito de resumo:

- Localização de azimutes de eventos auditivos relativos às direcções de som incidente no plano horizontal;
- Localização de ângulos de elevação de eventos auditivos relativos à direcção do som incidente no plano médio;
- Localização da distância a que ocorre um evento auditivo relativo à distância da fonte sonora.

Depois de mais de 100 anos de investigação, ainda são muitas as questões por responder sobre a localização sonora. Continua uma área activa na pesquisa da psicoacústica e na fisiologia da audição. Mais recentemente, houve um significativo aumento entre observações perceptuais, informação fisiológica no sistema de processamento binaural e modelação neuronal.

A problemática da localização sonora não é simples. O processo está associado a uma computação complexa e mental. Mas à medida que o problema fica mais complicado, as

ferramentas para os estudar tornam-se melhores. Técnicas psicofísicas melhoradas para síntese flexível de estímulos realísticos, experiências fisiológicas sondando diferentes regiões neuronais simultaneamente, métodos de imagiologia cerebral mais rápidos e mais precisos e modelos computacionais mais realísticos irão um dia resolver este problema de como perceber este mecanismo de localizar o som.

Capítulo 3

Aplicabilidade da Localização Sonora para Pessoas com Deficiência da Visão

Neste capítulo abordar-se-á a problemática da aplicabilidade da localização espacial de fontes sonoras no caso específico dos deficientes da visão.

Numa primeira secção irão ser introduzidos alguns aspectos relativos à problemática da reabilitação social de pessoas com deficiências visuais, com especial atenção à sua navegação e mobilidade pessoal.

De seguida irão abordar-se os resultados de alguns trabalhos na área da investigação das capacidades psico-acústicas de deficientes da visão. Entre muitas outras experiências encontradas na literatura da área, irão ser discutidas comparações entre pessoas vendadas e pessoas cegas, no sentido de perceber-se se há efectivamente um sentido auditivo mais apurado quando há privação da visão, ou se por outro lado essa teoria amplamente divulgada pelo senso comum, não tem razão de existir.

Nesta matéria em específico ainda serão distinguidas situações de cegueira congénita ou adquirida. Os resultados são muito interessantes, e abrem expectativas para os resultados experimentais executados no âmbito deste documento, e abordados no capítulo seguinte.

A grande maioria dos estudos realizados no estudo da capacidade humana em localizar sons, baseia-se sempre na sua componente horizontal (azimutal), mesmo quando se efectua a comparação entre pessoas cegas e não cegas. Contudo, neste capítulo são apresentados alguns resultados obtidos no que concerne à comparação entre pessoas cegas e não cegas no seu desempenho na localização vertical (elevação) de fontes sonoras.

Numa secção complementar à anterior, abordar-se-á um assunto fundamental que está na essência do projecto adjacente a este documento: a navegação por referências sonoras espaciais. Neste tema, será efectuada a distinção entre os dois tipos possíveis de navegação: a integração de caminhos que usa os outros sentidos, visando estudar como o ser humano mantém uma noção da sua posição e orientação através da integração do seu movimento relativo a um ponto de partida, e em alternativa a navegação por “landmarks” que é a que,

produzindo melhores resultados, vai ser explorada com uma aplicação concreta de promover a acessibilidade de pessoas cegas em espaços amplos, através de ajuda orientadora à sua navegação e movimentação dos mesmos. Trata-se do projecto NAVMETRO.

3.1 Introdução

Nas últimas duas décadas têm vindo a ser desenvolvidos esforços cada vez maiores de integração das populações com deficiências visuais na sociedade. Uma grande parte desta significativa população, não tem ainda sequer condições para sair de forma segura e autónoma dos seus lares. Quando se procura saber porquê, as respostas infelizmente não são surpreendentes. O mundo não é acessível na sua generalidade, e tudo o que é realizado, raramente tem o cuidado de proporcionar exactamente as mesmas condições a toda a população de uma forma justa e igualitária. Para sair de casa, um deficiente da visão, terá de vencer provavelmente logo de imediato uma série de barreiras arquitectónicas. Depois terá de se deslocar até a um meio de transporte, e até lá terá de passar por passeios estreitos com obstáculos perigosíssimos (por vezes valas de obras, postes, obstáculos salientes sem pé de suporte, etc.) e lá chegando terá de arranjar forma de continuar a aventura. Dependendo do transporte que deseje usar, existirão neste momento uma série de informações a receber, mediante o destino desejado, nomeadamente, a sentido, o custo da viagem, a sua duração, etc., e na generalidade dos transportes públicos, nada disto será fácil de obter, ou vindo de outra forma, será necessariamente complicado.

São 163 mil em Portugal e cerca de 225 milhões no mundo, aqueles que de uma forma grave (cegos ou amblíopes), tem problemas na sua navegação e lutam todos os dias para chegar a algum sítio.

Para se atingir a igualdade de oportunidades entre todos, são apresentadas neste documento informações e experiências, de um sistema de navegação pessoal, capaz de fornecer não só a informação mas também a orientação para pessoas com deficiências da visão, ou no extremo, para cegos.

O cego que defronta as dificuldades em se relacionar a si mesmo (posição de segurança) com os objectos e lugares do exterior imediato, por meio de uma estimativa subjectiva da sua distância ou direcção, encontrará também dificuldade em encontrar o seu caminho.

Para ajudar os deficientes da visão a reunir as aptidões necessárias para se tornarem pessoas auto-suficientes e independentes, criaram-se programas de reabilitação que lhes ensinaram técnicas de mobilidade e movimentação. Estas técnicas permitem-lhes caminhar e movimentar-se em espaços não preparados para eles, no entanto continuam a existir limitações muito grandes para um cego num mundo em que a visão parece essencial. É certo, que um cego bem integrado que domine a “técnica da bengala” consegue normalmente chegar ao seu destino, quando mais não seja por experimentação de todas as possibilidades.

No entanto é de se prever que seja um caminho muito mais longo e demorado do que a recta teórica que uniria os dois pontos, o da partida e o da chegada. Um cego dificilmente pode usar esta recta para chegar onde deseja, já que muitas vezes se baseia quase exclusivamente em integração de caminhos (“path integration”), e portanto dispendo quase apenas de informação vestibular e proprioceptiva.

Este trabalho visa investigar se existem condições para se usar a localização espacial de fontes sonoras como técnica para orientar uma navegação fácil e eficiente por parte da comunidade
invisual.

3.2 Capacidade de Localização Espacial de Fontes Sonoras em Deficientes da Visão

O cego está dependente, para caminhar com segurança, da eficiência com que usa o sentido da audição.

A capacidade que o ouvido humano tem de localizar um som no espaço é notável no que diz respeito à sua precisão e velocidade. Instintivamente a cabeça humana roda em direcção a um som inesperado produzido perto de nós, calculando (inconscientemente) ao mesmo tempo que o fazemos, o seu azimute, elevação e distância. Contudo, para a maior parte das pessoas sem deficiências visuais, a informação auditiva deste género tem que ser confirmada pelo feedback visual, antes de ser seguida. Esta última é uma verificação dupla em relação à anterior. Mas para as pessoas cegas a localização tem de ser feita unicamente com base na informação auditiva e o grau de precisão com que é feita é crucial. O cego, ao aprender a usar os sons circundantes tem que, com base nessa informação, tomar instantaneamente decisões que afectam a sua segurança, se não a sua sobrevivência.

Nem todos os cegos têm uma audição perfeita ou normal. No entanto, felizmente é relativamente raro encontrarem-se pessoas que por infelicidade estejam privadas desses dois sentidos simultaneamente. De sublinhar portanto que a validade das conclusões aqui tiradas, aplica-se somente a indivíduos privados de faculdades da visão e sem deficiências auditivas.

Tanto para aqueles que ouvem “normalmente” como para aqueles que têm perdas auditivas, aprender a localizar o som mais eficientemente, é um processo que requer prática e tempo. Não sucede automaticamente só porque se perdeu o uso da vista. Portanto, para os estudos aqui apresentados, não se consideram estas transições.

Como foi verificado no capítulo anterior, a capacidade de localização espacial de referências sonoras, foi já amplamente estudada. Ficou então comprovado que em indivíduos sem deficiências sonoras ou auditivas, é possível perceber-se com alguma precisão a origem de um determinado som. Neste documento, embora tenha sido abordada a problemática a localização espacial em três dimensões (azimute, elevação e distância), foi dado especial enfoque à localização azimutal, por se tratar do aspecto mais importante a verificar dada a

aplicação em causa (Sistema de Orientação Sonora do sistema NAVMETRO®). Nesta abordagem à verificação das diferenças nesta capacidade entre deficientes da visão e pessoas sem deficiências, a postura será a mesma. Dar-se-á portanto especial atenção à orientação azimutal, mantendo-se as fontes sonoras na maioria dos casos à mesma cota que os ouvidos dos sujeitos em teste. Será contudo também abordada a problemática da localização vertical de fontes sonoras, numa vertente comparativa entre pessoas não cegas e cegas. Uma das razões de interesse desta forma de localização é a de ser através desta combinação da localização vertical com a azimutal (horizontal) que se consegue uma aproximação eficaz ao local assinalado com uma referência sonora posicionada a uma cota elevada. Note-se que próximo deste local, a fonte sonora passará a estar por cima, e não à frente.

Auto-posicionar-se ou navegar requer representação espacial do ambiente ou do caminho da viagem. A navegação baseada na posição baseia-se principalmente em sinais externos que indicam a posição e orientação do observador; tais sinais incluem “landmarks” visíveis ou audíveis (bóias sonoras) conhecidas do sujeito. Claramente, cegos terão uma desvantagem considerável relativamente aos não cegos, já que a visão fornece informação acerca do que se encontra em redor ao perto e ao longe. Os cegos de nascença podem até ter ainda mais desvantagens se for necessária experiência visual para o desenvolvimento de capacidades espaciais normais.

Vários autores mostraram já que todavia cegos de nascença desenvolvem capacidades melhoradas de localização auditiva. Estas capacidades espaciais foram até já relatadas como sendo superior à de pessoas sem deficiências (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998)(Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999).

Estes autores provaram já que pessoas cegas de nascença conseguem mapear o ambiente auditivo de um espaço, com melhor precisão que pessoas não cegas. Sabe-se ainda que ao contrário de pessoas não cegas, eles conseguem localizar sons correctamente de forma monaural. Surpreendentemente, indivíduos cegos com visão periférica residual obtêm os piores resultados, abaixo mesmo de pessoas não cegas, confirmando que o processo de compensação auditiva varia com a etiologia ou extensão da cegueira (Kujala, et al., 1997).

Os resultados obtidos por testes realizados, fornecem provas comportamentais que indivíduos completamente cegos têm melhor capacidade auditiva que pessoas não cegas, e que lhes permite compensar a sua falta da visão.

3.2.1 Localização Binaural

A performance da localização sonora na condição binaural é mostrada na Figura 53. Neste estudo realizado por Lessard, uma análise preliminar mostrou que o erro médio em cada hemicampo não foi diferente para pessoas não cegas vendadas e os controlos (pessoas não cegas), agregando-se os resultados conforme o caso a) da Figura 53.

Os resultados mais evidentes neste teste binaural, mostram que pessoas completamente cegas são pelo menos tão precisas na localização, como os controlos como se verifica no caso c) da mesma figura.

Demonstra-se portanto que pessoas cegas podem desenvolver um mapa tridimensional do espaço usando informação auditiva.

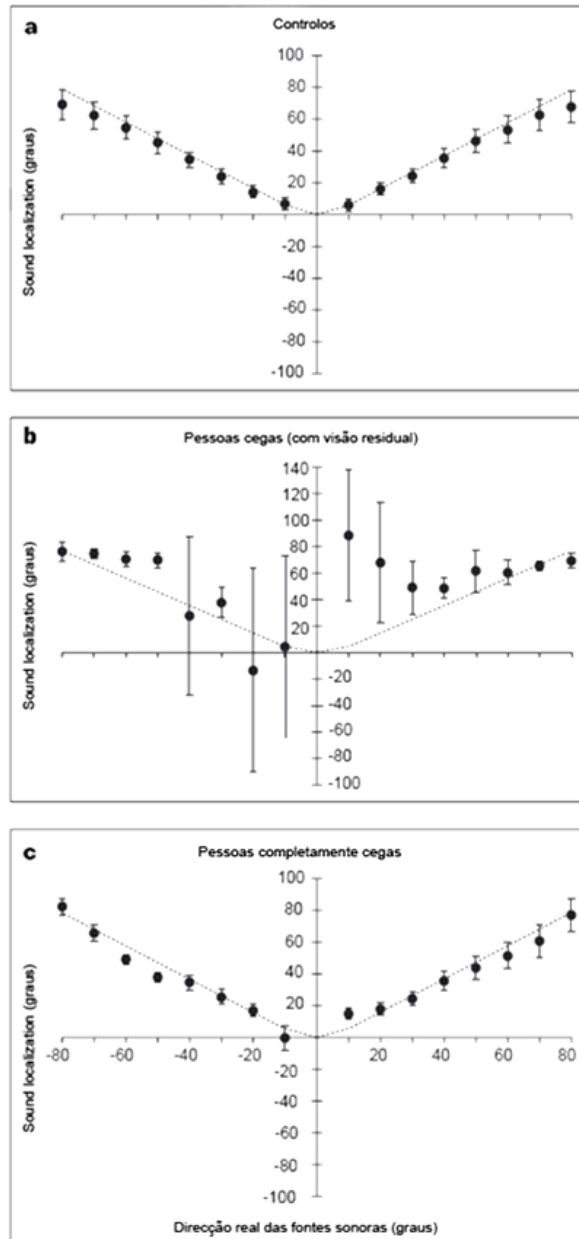


Figura 53 - Performance obtida na localização sonora binaural para cada hemicampo (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998)

Como se observa na Figura 53 c), pessoas cegas com visão residual tiveram resultados piores que todos os outros sujeitos, particularmente no campo central. Estes resultados não seriam de esperar já que estes indivíduos deveriam obter resultados semelhantes na periferia

(onde a visão está presente), e uma performance semelhante aos cegos de nascença no campo visual central (onde a visão faltava). Este comportamento anormal em todo o campo auditivo tem três possíveis explicações. Primeiro, estes indivíduos precisariam de desenvolver um mapa auditivo, suportado em parte pela visão (campo periférico) e em parte independente da visão (no campo central), o que pode causar alguma confusão. Segundo, se a compensação auditiva em pessoas cegas depende do recrutamento de zonas sensitivas que sofrem de aferênciação, poderia acontecer que neste caso (visão residual) esse fenómeno aconteça em menor dimensão já que acontece num ritmo reduzido, usando apenas praticamente as aferências normais. Terceiro, estas pessoas parcialmente cegas, demonstram comportamentos de orientação anormais que podem interferir com a correcta localização, já que frequentemente fixam a fonte sonora de um som, rodando a sua cabeça de forma a colocá-la no seu campo visual residual.

3.2.2 Localização monaural

Na condição de teste monaural, onde o estímulo sonoro é actuado enquanto um ouvido está obstruído, pessoas não cegas vendadas ou não voltaram a obter resultados indistinguíveis, ficando novamente agregados. A Figura 54 a) mostra que estes indivíduos localizaram o som no lado do ouvido obstruído, aproximadamente no campo médio independentemente do lado de onde o som é originário.

Tal como na condição binaural, a performance de pessoas cegas com visão residual foi pior que todos os outros como se observa na mesma figura, no caso b). Verifica-se também que estes indivíduos obtêm um “offset” posicional para o lado do ouvido obstruído, quando localizando um som apresentado do mesmo lado.

Contudo, a performance das pessoas completamente cegas foi realmente excepcional como se verifica na Figura 54. Metade dos indivíduos aparenta ter respondido como os controlos, ou seja, com um “offset” posicional favorecendo o lado do ouvido obstruído. Contudo, de forma contrária aos controlos, a sua performance mostra mais variabilidade quando o estímulo está presente do lado do ouvido obstruído. Adicionalmente, estes sujeitos relataram que o som colocado deste lado lhes parecia qualitativamente diferente. Por exemplo, um sujeito reportou que o som lhe parecia ter sido filtrado, como se algumas frequências tivessem sido cortadas.

Os resultados mais interessantes destes testes monaurais, encontram-se na Figura 54 d). A restante metade de pessoas completamente cegas localizaram o som do lado correcto, mesmo quando o som se encontrava do lado do ouvido obstruído.

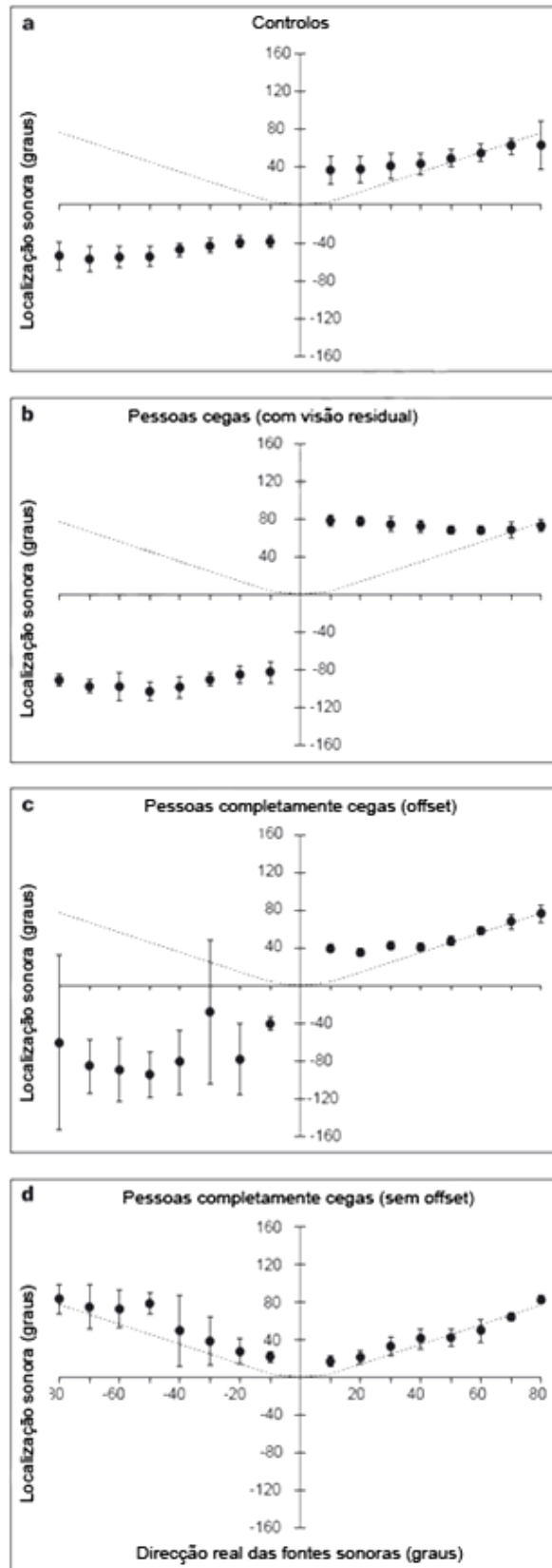


Figura 54 - Performance obtida na localização sonora monaural para cada hemicampo (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998)

3.2.3 Compensação auditiva

A capacidade de localizar som no hemicampo correcto, independentemente da precisão, quer na condição monaural ou binaural é ilustrada na Figura 55. A observação mais saliente concerne ao caso de pessoas completamente cegas: metade delas localizou correctamente o som presente do lado do ouvido obstruído. Este comportamento, contudo, não foi marginal, já que a performance foi quase perfeita, e nem sequer foi observada em nenhum das pessoas não cegas testadas (29 pessoas, 7 vendadas).

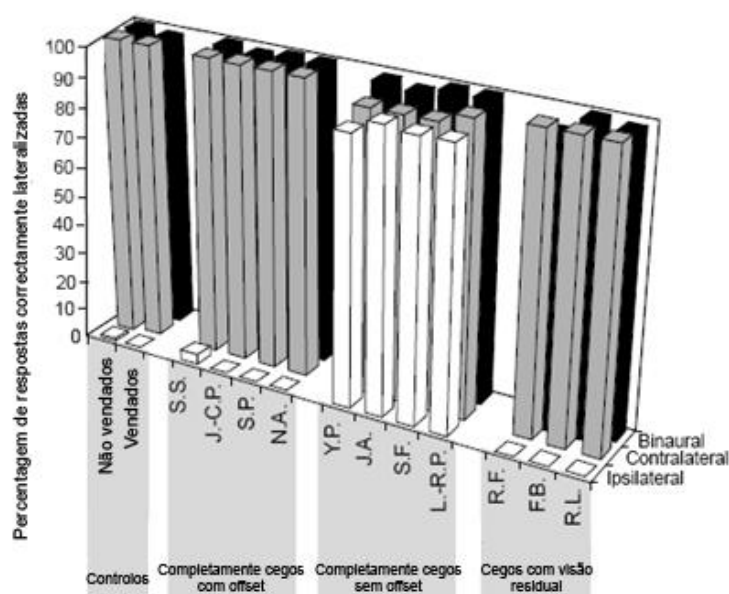


Figura 55 - Percentagem de ensaios em que os sons foram correctamente lateralizados na condição binaural e nos dois casos da condição monaural (ipsilateralmente e contralateralmente) (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998)

Este achado, juntamente com a observação das outras pessoas completamente cegas, embora incapazes de localizar o som do lado correcto, reportaram contudo diferenças qualitativas nos sons presentes do lado do ouvido obstruído (novamente um comportamento não visto em qualquer um dos outros grupos). Isto sugere que indivíduos cegos utilizam referências sonoras monaurais mais eficientemente para auditivamente explorar o seu ambiente (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998)(Doucet, Guillemot, Lassonde, Gagné, Leclerc, & Lepore, 2005).

Esta conclusão que cegos de nascença conseguem ter melhor performance que pessoas não cegas pode ser atribuída à reorganização das populações neuronais envolvidas no processamento da localização de referências e/ou de melhorar a aprendizagem. Assim, a compensação auditiva pode resultar do aumento incremental do uso de informação espectral dentro ou entre as estruturas normalmente envolvidas na análise espacial, incluindo os colículos superior e inferior, assim como o córtex primário auditivo.

Alternativamente, a compensação pode ocorrer devido ao recrutamento de estruturas cerebrais abandonadas pela falta da visão. Em gatos, a cegueira logo após a nascença resulta em efeitos compensatórios ao nível colicular, respostas auditivas melhoradas nos neurónios envolvidos no processamento visual, e uma performance na localização superior. De forma idêntica, em cegos de nascença Röder mostrou (como se verá posteriormente neste documento) que usando ERPs (Event-Related Potentials), a resposta a estímulos auditivos é distribuída mais posteriormente comparando com os controlos não cegos, sugerindo um uso incremental das zonas cerebrais parietal ou occipital na localização sonora (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)(Lewald, 2002).

Mostra-se também que a compensação auditiva se dá mesmo quando a deficiência da visão é apenas parcial, como é o caso da miopia (Dufour & Gérard, Improved auditory spatial sensitivity in near-sighted subjects, 2000)(Ito, Kawabata, Fujimoto, & Adachi-Usami, 2001)(Koller, Haas, Zulauf, Koerner, & Mojon, 2001).

Uma consequência das capacidades melhoradas na localização espacial de sons é a representação espacial do ambiente em redor com maior rigor, e consequentemente uma capacidade mais avançada em se posicionar nesse meio.

Num estudo realizado no Centro de Estudos de Fisiologia Aplicada de Strasbourg (França) (Després, Candas, & Dufour, 2005), que reuniu cegos adquiridos e congénitos, amblíopes, míopes, e pessoas sem deficiências vendadas, obtiveram-se alguns resultados que se consideram inovadores e que permitem atestar que deficientes da visão usam referências sonoras para se posicionarem no seu ambiente com maior precisão que pessoas sem deficiências simplesmente vendadas. Simultaneamente esta diferença mostrou-se ser relacionada com a extensão da deficiência.

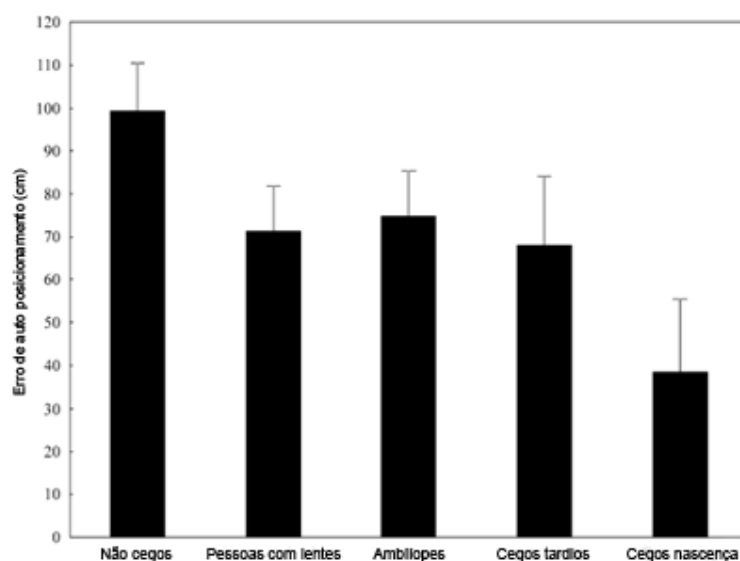


Figura 56 - Erro médio de auto-posicionamento em função da extensão da deficiência visual (Després, Candas, & Dufour, 2005)

Em suma, estudos recentes mostram que algumas pessoas cegas têm a capacidade de localizar sons com maior precisão que pessoas não cegas. Os resultados referidos, apontam também para um melhor uso das referências espectrais com a localização monaural, facto esse que pode ser a causa dessa melhoria em algumas pessoas cegas (Doucet, Guillemot, Lassonde, Gagné, Leclerc, & Lepore, 2005).

Com uma amostragem de 69 sujeitos em teste com audição normal segundo audiogramas realizados na gama dos 250-8000Hz, experiência consistiu em colocar cada pessoa sujeita a um estímulo sonoro dado por 16 altifalantes situados nas paredes de uma sala. Cada sujeito foi guiado até uma sala escura anecóica com ruído ambiente aproximadamente igual a 30dB SPL. Até à experiência começar, usaram auscultadores com música para impedir que ganhassem referências sonoras que os pudessem dar alguma vantagem. Para os desorientar, e confirmar um início completamente sem nenhuma desigualdade, cada pessoa foi “passada” durante dois minutos até a um ponto de início a um dos pontos aleatórios definidos A, B, C ou D (Figura 57), onde se sentou numa cadeira virada para uma dada parede (assinalada na planta da Figura 57). De seguida foi-lhes pedido que estivessem atentos às referências sonoras que iam ser oferecidas: conjuntos de dois sons de ruído branco de banda larga (20-20000Hz) com 250ms de duração e 45dB SPL a 1m.

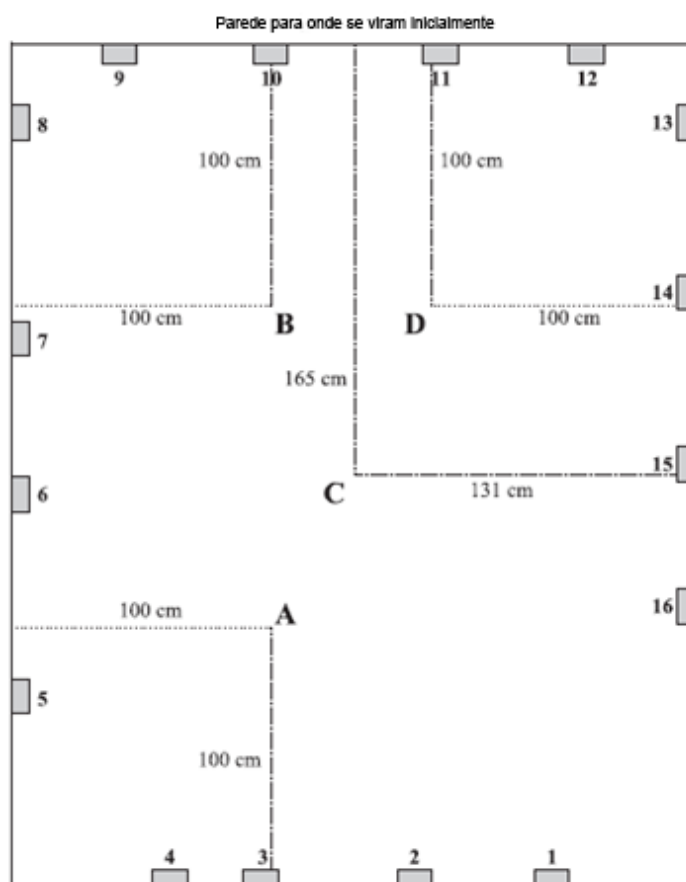


Figura 57 - Planta da sala anecóica onde ocorreu a experiência (Després, Candau, & Dufour, 2005)

A experiência sonora consistiu portanto de 5 repetições de 8 altifalantes em sequência aleatória, com 2 por cada parede. No final era pedido que marcassem a sua posição numa planta da sala (desenhada no caso de pessoas sem deficiência, e em relevo para deficientes da visão). Os resultados obtidos relativos ao desvio da posição indicada e a posição real são os indicados na Figura 56. Desta experiência sublinham-se dois aspectos interessantes da plasticidade compensatória da visão. Primeiro, parece que mesmo indivíduos com um pequeno déficit na visão, têm um grande aumento na adaptação da compensação auditiva. Estes tiveram comprovadamente muito melhor capacidade de posicionamento que pessoas sem qualquer deficiência e com visão perfeita. Um estudo anterior atestava já isso mesmo (Dufour & Gérard, Improved auditory spatial sensitivity in near-sighted subjects, 2000). No entanto, com estes resultados parece-se concluir que a consequência desta capacidade melhorada em localizar sons no espaço é obter uma representação espacial melhorada do ambiente acústico em redor. Pode parecer surpreendente que sujeitos míopes mostrem uma capacidade de localização espacial por referências sonoras melhor que pessoas com a visão sem defeitos, até porque estes indivíduos costumam ter óculos ou lentes que corrigem com eficácia essas deficiências, mas na realidade existe uma explicação. Embora a miopia possa ser corrigida com lentes, essa correção é feita apenas na visão central, e não na visão periférica provocando então essa estimulação maior na compensação auditiva (Ito, Kawabata, Fujimoto, & Adachi-Usami, 2001)(Koller, Haas, Zulauf, Koerner, & Mojon, 2001).

O segundo aspecto muito interessante dos resultados obtidos é que aparentemente a experiência de visão enquanto não se cega, não parece ser um factor muito importante para o desenvolvimento de capacidades auditivas espaciais, já que cegos congénitos mostram uma capacidade de auto-localização bastante melhor que pessoas que cegaram mais tarde (Després, Boudard, Candas, & Dufour, 2005).

Alguma literatura sugere que o desenvolvimento de capacidades de localização espacial está sujeito à necessidade de “calibrar” localização com a visão. Portanto cegos congénitos poderiam ter mais dificuldades que pessoas que já viram e que entretanto perderam a visão, em proceder à localização espacial.

A plasticidade dependente da experiência na calibração visual do mapa do espaço auditivo, foi demonstrada no tecto óptico da coruja do celeiro (Knudsen & Knudsen, 1990)(Brainard & Knudsen, 1993)(Feldman & Knudsen, 1997), onde neurónios formam um mapa do espaço auditivo baseando-se nas diferenças interaurais já referidas anteriormente. Quando o mundo visual e o auditivo se tornam experimentalmente desalinhados por crias de coruja através de prismas que deslocam em azimute o campo visual, neurónios do tecto recebem respostas a ITDs que correspondem ao deslocamento do campo visual, e os neurónios abandonam respostas a ITDs normais. Isto parece suportar a noção que a visão é essencial para calibrar o espaço, incluindo o espaço auditivo.

Contudo, os resultados obtidos noutras experiências com humanos completamente cegos, provam exactamente o contrário já que cegos de nascença desenvolvem uma excelente capacidade de representação espacial sem nunca terem visto.

Esta última conclusão está em consonância com resultados publicados mais recentemente (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998)(Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999). Contudo, embora a visão possa contribuir para a representação espacial auditiva, não será certamente o único sistema envolvido, sendo suportado também por outros sistemas com retroacção como o proprioceptivo (Després, Candas, & Dufour, 2005).

Contudo, existiram já alguns trabalhos que reportaram resultados aparentemente contraditórios como o de (Loomis, Klatzky, Golledge, Cicinelli, Pellegrino, & Fry, Nonvisual Navigation by Blind and Sighted: Assessment of Path Integration Ability, 1993) em que os resultados obtidos comparativamente entre cegos e pessoas sem deficiências vendadas, mostravam precisamente os cegos eram menos capazes de localizar em situações de navegação espacial. Outros confirmam isto mesmo, mas considerando estendendo a sua aplicabilidade em crianças cegas (Morrongiello, Timney, Humphrey, Anderson, & Skory, 1995). No entanto, em ambos os casos, encontra-se a explicação para esta aparente fonte de discórdia de resultados. No primeiro caso, o trabalho de Loomis baseia-se na integração de caminhos, e portanto na informação vestibular e proprioceptiva para processos de localização espacial, e como será visto mais à frente, os seus resultados são aplicáveis de uma forma diferente, a um tipo de navegação diferente que o baseado em “Landmarks” também denominado por “pilotagem” referido mais à frente (Loomis, Klatzky, Golledge, Cicinelli, Pellegrino, & Fry, Nonvisual Navigation by Blind and Sighted: Assessment of Path Integration Ability, 1993). No segundo caso, verifica-se a aplicabilidade das conclusões em fases de mudança e adaptação como é o caso das crianças. O período após a cegueira pode ser propício à organização e reorganização das funções cerebrais e portanto tornar mais aguçados os outros sentidos. É por esse motivo que testes em que se deseje apurar as capacidades humanas para a orientação espacial com uso de referências sonoras, devem ser realizados em adultos, com as deficiências estabilizadas. Alguns autores, usam mesmo como sujeitos de teste, adultos que adquiriam a sua deficiência visual há pelo menos 10 anos. Um recente estudo de imagiologia neuronal mostrou que a reorganização cortical parece ser mais efectiva para o processo de leitura de Braille, quando a cegueira se instalou depois dos 16 anos de idade. Portanto, parece razoável colocar a hipótese que assim como há uma adaptação de uma passagem de um estímulo visual (leitura) para um estímulo táctil (Braille), também o mesmo acontece para o desenvolvimento de capacidades de localização espacial, aquando da passagem a uma navegação essencialmente visual, a uma navegação quase exclusivamente acústica. Isto portanto poderá ser a explicação para a divergência entre resultados de vários autores. Contudo é importante referir que os últimos desenvolvimentos na matéria, apontam efectivamente para os resultados do estudo de Després.

A descoberta que os cegos congénitos conseguem ter melhores resultados na localização espacial com referências sonoras face a pessoas sem deficiências, pode ser atribuída à reorganização das populações neuronais envolvidas em processar referências de localização e/ou nos processos aprendizagem. Assim, a compensação pode resultar do maior uso da informação espectral dentro ou entre as estruturas normalmente envolvidas na análise espacial, incluindo o colículo superior e inferior, assim como o córtex auditivo primário. Alternativamente, a compensação pode-se dar através do “recrutamento” de estruturas cerebrais não usadas pela falta de estímulos visuais. Nos gatos, cegueiras logo após a nascença, tem resultado em efeitos compensatórios ao nível colicular, melhores respostas a estímulos auditivos nos neurónios envolvidos no processamento da visão, e melhor performance em tarefas de localização espacial. Da mesma forma, pessoas cegas de nascença quando sujeitas a magnetoencefalogramas em situação de estímulos sonoros, tiveram respostas distribuídas em zonas mais frontais do cérebro comparativamente às zonas usadas na visão, sugerindo um uso maior de zonas do cérebro parietal ou mesmo occipital (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998).

Uma explicação para o fenómeno dos deficientes da visão terem melhor capacidade em perceber a sua posição no espaço através de referências acústicas, pode ter a ver com a melhor capacidade de memória, por motivos de uma maior estimulação da mesma.

Para verificar se o fenómeno referido está a influenciar os resultados da experiência, torna-se então necessário realizar uma outra experiência com um cariz diferente.

Estudos de imagiologia neuronal têm apontado diferenças na organização cerebral entre cegos e pessoas não cegas, mas a relação entre estas alterações dos padrões de activação cortical, e um sentido auditivo mais aguçado ainda não são claras.

Um estudo baseado em índices comportamentais e electrofisiológicos baseado na capacidade humana para a localização espacial dentro da região central ou periférica do espaço auditivo (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999), permitiu tirar algumas elações de uma forma mais objectiva a hipótese levantada anteriormente: serão indivíduos privados da visão mais capazes de localizar espacialmente com a audição o som?

Gravações electrofisiológicas (por electroencefalograma) obtidas ao mesmo tempo que os estímulos sonoros foram fornecidos, revelaram respostas mais prontas dos mecanismos da atenção espacial em sujeitos cegos. Diferenças na distribuição da actividade eléctrica cerebral na zona do escalpe, entre os dois tipos de indivíduos, sugerem uma reorganização compensatória das zonas cerebrais nos cegos que podem resultar numa resolução melhor na localização espacial.

A capacidade humana de focar a atenção selectivamente para fontes sonoras externas relevantes é essencial para a percepção auditiva. Estudos comportamentais mostraram que a atenção auditiva, assim como a visual, está localizada no espaço na forma de um gradiente,

com o processamento mais eficiente do som a ocorrer nas localizações esperadas com um declínio progressivo à medida que a distância do som aumenta. Os mecanismos cerebrais para a atenção na localização espacial de som, têm sido estudados extensivamente através de gravações não invasivas de ERPs (event-related potentials). Em particular, focar a atenção numa fonte sonora no ambiente é indexado por um ERP negativo começando 80-100ms após a chegada do estímulo (a componente N1), que é maior em amplitude para sons em localizações esperadas que nas inesperadas.

Trabalhos anteriores apontavam haver resultados ainda mais evidentes de uma melhoria na localização espacial de sons por parte de cegos ou deficientes da visão, aquando de uma localização sonora periférica. Portanto, para se testar essa teoria, foi então realizado um ensaio experimental, que para além de testar a zona frontal, testa também a zona periférica.

O setup experimental foi então composto por 8 altifalantes divididos em dois grupos conforme a Figura 58:



Figura 58 - Disposição dos altifalantes na experiência (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)

Nesta experiência foi pedido aos participantes que premissem um botão cada vez que detectassem que os altifalantes de 2 a 7 fossem activados. Portanto o objectivo foi detectar quando eram detectados os desvios do altifalante 1 e 8, respectivamente o da frente e o do lado. Resultados em que a percepção dos sujeitos foram o erro de não localizar o se o som foi de 1 a 4 em vez de 5 a 8 e vice-versa, por serem muito pouco frequentes, foram omitidos. Os resultados são mostrados na Figura 59 onde se pode comparar os resultados obtidos com cegos e com pessoas sem deficiências da visão.

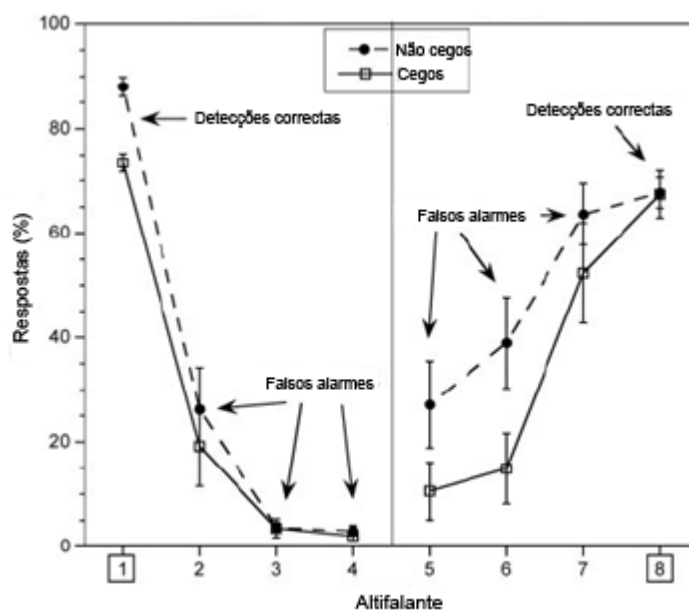


Figura 59 - Gradientes da percentagem de detecções (média e desvio padrão) (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)

Neste teste em particular, cegos e não cegos não diferiram muito na detecção de falsos alarmes na zona frontal. No entanto na zona periférica, os cegos obtiveram um gradiente mais bem ajustado de atenção que os sujeitos em teste não cegos.

Resultados anteriores mostraram haver melhorias na auto-localização dos cegos face a um ambiente. Sugeriu-se a hipótese que efectivamente esses resultados poderiam ter a ver com uma maior capacidade de memória por parte dos mesmos. Estes resultados parecem confirmar isso mesmo, já que pelos resultados de cima não parece haver claramente uma melhoria na localização de fontes sonoras no espaço, mas sim, uma capacidade de errar menos vezes aquando de uma fonte sonora colocada na periferia. Curiosamente ou não, um resultado semelhante acontece quando se procura explicar porque um sujeito míope mostra melhorias na sua localização espacial face a pessoas sem deficiências da visão. Tal como foi explicado anteriormente, tal fenómeno poderá estar relacionado com o constante estímulo cerebral e o conseqüente exercício, de desenvolver capacidade de localização auditiva periférica, em detrimento da localização espacial frontal (realizada com o auxílio da visão corrigida com lentes).

Ainda no mesmo ensaio obtiveram-se os ERPs dos indivíduos em teste com o objectivo de realizar uma análise comparativa entre os estímulos cerebrais de cegos e não cegos, com especial destaque à tentativa de se chegarem a conclusões se efectivamente há condições mais apuradas para a localização espacial de sons na periferia por parte dos cegos.

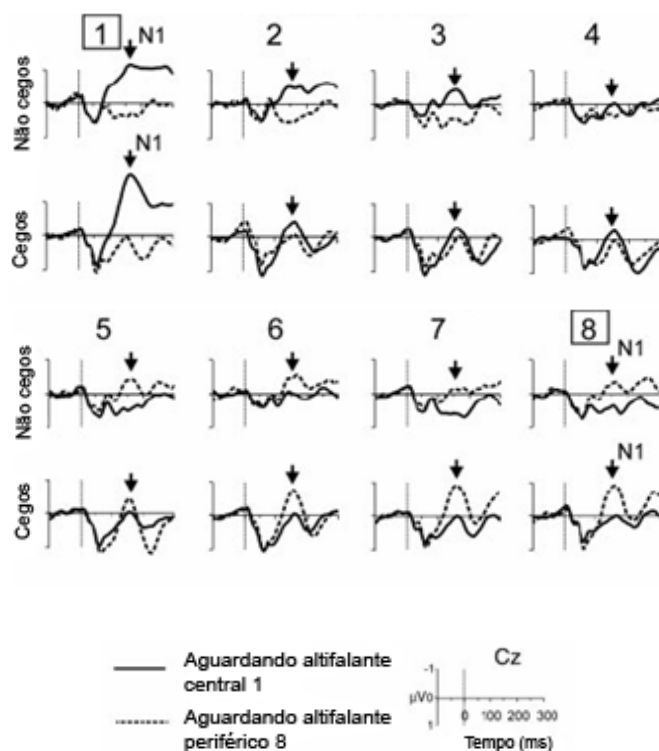


Figura 60 - ERPs da zona Cz para o Array central (em cima) e periférico (em baixo) de altifalantes (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)

Na Figura 60 observam-se os potenciais relacionados com o evento sonoro de rajadas de ruído. Mediram-se os ERPs da zona (Cz) em resposta ao som para o altifalante 1 (linha contínua) e para o altifalante 8 (linha tracejada). A componente N1 é indicada por setas em cima das formas de onda. Porque não são pedidas respostas comportamentais, a amplitude N1 reflecte a precisão espacial auditiva sem nenhuma contaminação do sistema motoro.

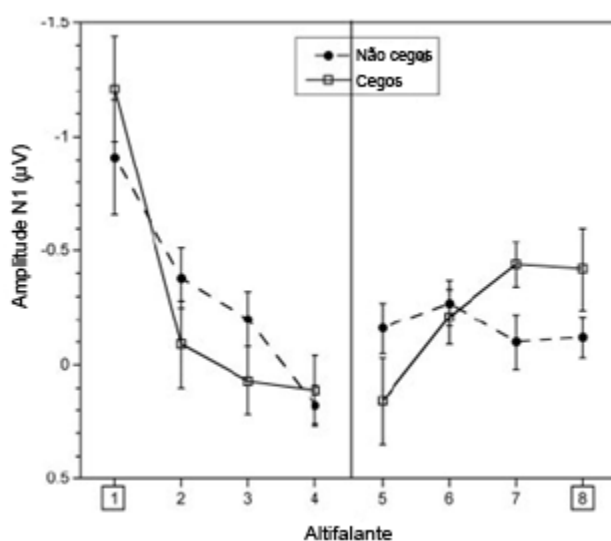


Figura 61 - Gradientes de amplitude N1 (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)

Na Figura 61 são mostrados os gradientes da amplitude média da componente N1 (entre os 100 e 200ms após o estímulo) em resposta a estímulos dos altifalantes frontais e periféricos.

Como se pode verificar, o mecanismo de primeira atenção indexado por N1, encontra-se mais apurado no caso de sujeitos cegos, no que concerne à espera por altifalantes da periferia. Na zona central, os resultados são semelhantes, confirmando assim a validade de trabalhos anteriores que referem que na zona frontal a distinção entre cegos e não cegos é pequena.

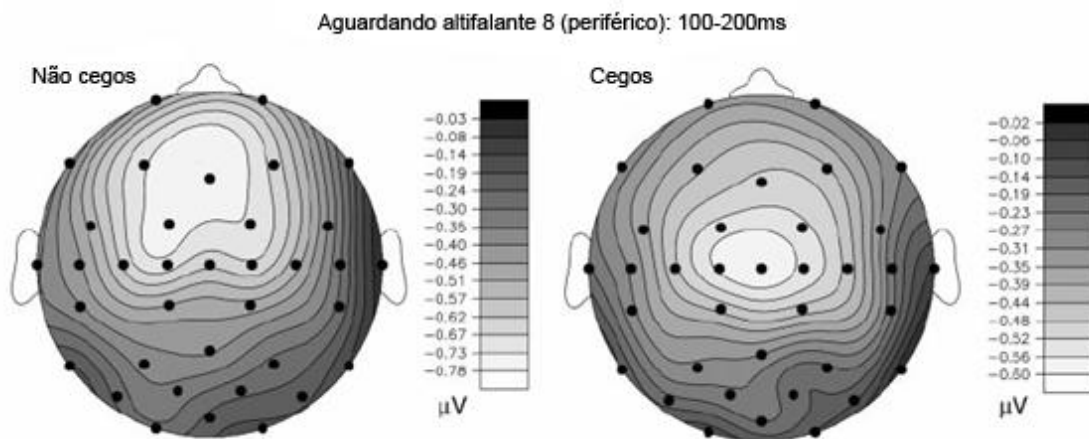


Figura 62 - Mapa topográfico de tensões relativas à componente N1 (efeito de atenção) dos ERP (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999)

Para verificar se existe uma reorganização compensatória do sistema neuronal para uma selecção antecipada no caso das pessoas cegas, o mesmo estudo comparou as distribuições da componente N1 no escalpe durante o momento da atenção auditiva para cegos e não cegos. Como se observa na Figura 62 relativa aos sons periféricos, no grupo das pessoas não cegas a maior “negatividade” encontra-se na zona anterior do escalpe, e no caso dos cegos existe um deslocamento para as zonas posteriores.

Este fenómeno é uma prova forte da reorganização dos substractos neuronais da primeira selecção auditiva.

Novamente se validam as conclusões anteriores relativas á diferença na capacidade entre pessoas cegas e não cegas. Uma atenção mais apurada na periferia é sinal de uma compensação auditiva melhorada dos mecanismos de localização espacial, mesmo quando a privação da visão não é de nascença (Röder, Teder-Sälejärvi, Sterr, Rösler, Hillyard, & Neville, 1999).

Finalmente, é de considerar-se como é possível um refinamento da localização espacial quando nunca houve visão no caso de cegos à nascença. Estudos indicam que recém nascidos orientam-se para os sons no escuro e antes da preponderância da visão, indicando que inicialmente a representação espacial auditiva se baseia na retroacção “sensimotor”.

Contudo, quando a visão se torna claramente disponível, ela parece dominar e controlar a representação dos restantes sentidos.

3.2.4 Localização vertical em pessoas cegas

É já firmemente tido em consideração que cegos de nascença compensam a sua falta de visão por um apuramento geral da localização auditiva espacial. Contudo, a maioria dos estudos aborda esta problemática numa vertente assumidamente azimutal, portanto relacionada com a direcção. Contudo, existem alguns estudos que abordam a questão da localização vertical do som (Lewald, 2002)(Zwiers, Opstal, & Cruysberg, 2001)(Zwiers, Opstal, & Paige, 2003).

Na dimensão vertical, as principais referências para a localização sonora são as distorções no espectro do som proveniente, que são produzidas por difracção e reflexão sonora dentro das convulsões do pavilhão auricular, tal como foi abordado no capítulo 2. Contudo, como também foi referido anteriormente, mudanças da forma espectral destas referências podem ser relacionadas com a elevação sonora apenas de uma forma relativamente complexa, e portanto referências verticais audiomotoras podem ser menos eficazes que a localização horizontal (Zwiers, Opstal, & Cruysberg, 2001).

Estas considerações implicam que a calibração visual pode desempenhar um papel mais importante na localização sonora vertical que acontecia no caso da localização sonora horizontal, modificando portanto a diferença na performance entre pessoas cegas e não cegas. Um estudo focado nestas diferenças testou esta capacidade tendo obtido erros absolutos muito mais significativos no caso de pessoas cegas (Lewald, 2002).

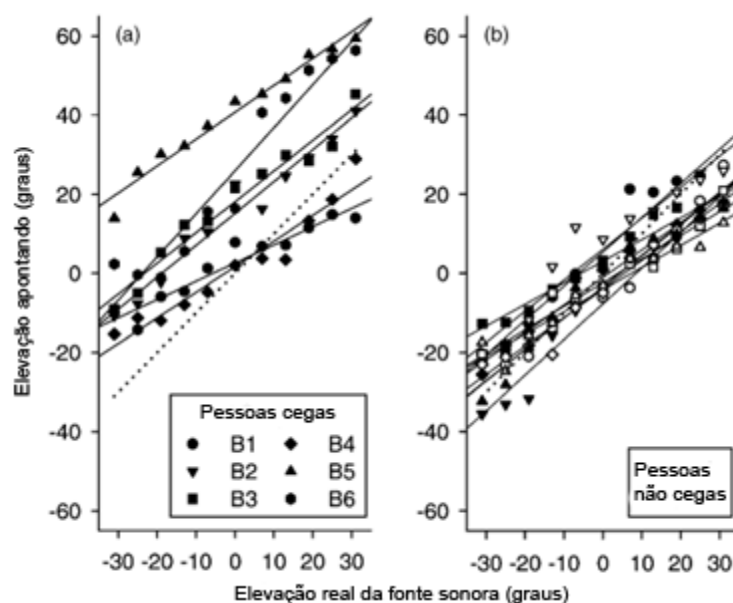


Figura 63 - Localização da elevação sonora: a) pessoas cegas, b) pessoas não cegas. Linha ideal a tracejado. (Lewald, 2002)

Estes resultados sugerem um possível défice de algumas pessoas cegas no que concerne à localização vertical absoluta do espaço auditivo. Contudo, a localização vertical relativa não padece do mesmo problema. Este resultado quando tido em conta com resultados anteriores obtidos na localização sonora horizontal em indivíduos cegos pode ser explicada da seguinte forma. Na dimensão horizontal, o ponto de zero das diferenças interaurais está alinhado com o plano médio da cabeça. Consequentemente, existe um ponto de referência (obviamente inato) que de forma precisa relaciona o plano médio da cabeça e o espaço auditivo entre si, e as referências audiomotoras podem servir para recalibrar as relações espaciais entre localizações sonoras laterais e as coordenadas do corpo sem ter retroacção visual. De forma contrária, uma relação inata entre as referências direccionais para a localização vertical e as coordenadas corporais está em falta. Então, em particular durante o crescimento, as referências espectrais, dependendo da complexidade e das características únicas e individuais da convulsão do pavilhão auricular, assim como do tamanho e forma da cabeça, podem necessitar de calibração. Este processo de calibração pode basear-se de forma crítica na disponibilidade de informação visual. A utilização de referências não visuais (muito provavelmente retroacção audiomotora) parece ser suficiente para o desenvolvimento de uma capacidade bastante precisa de inferir sobre a posição relativa de som de banda larga na dimensão vertical.

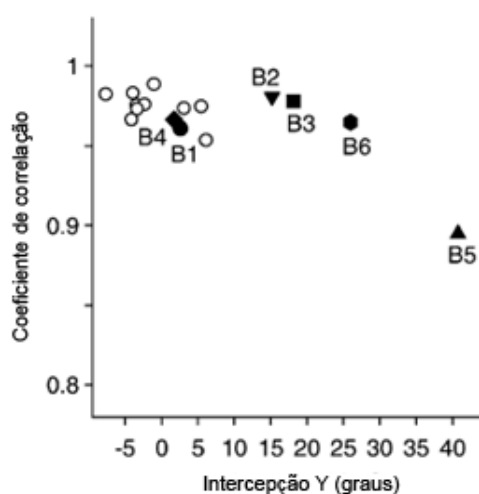


Figura 64 - Análise da regressão linear das respostas entre os coeficientes de correlação e a intercepção com o eixo vertical da linha da regressão. Os pontos começados pela letra “B” referem-se a cegos. (Lewald, 2002)

Na Figura 63 a) e na Figura 64 verifica-se que o resultado da localização vertical absoluta de duas das pessoas cegas (B1 e B4) foi no entanto dentro dos resultados obtidos por controlos não cegos. Este resultado pode indicar que referências não visuais, em casos específicos, permitem também o desenvolvimento de capacidades idênticas às pessoas não cegas.

Novamente, verifica-se que duas pessoas cegas com visão residual apresentaram os erros maiores na localização absoluta. Tal pode ser interpretado como reflectindo um conflito sensorial entre referências visuais e não visuais para a recalibração do espaço auditivo. A tendência do cérebro em dar preferência à utilização da visão sobre outras modalidades sensoriais pode induzir erros substanciais nos casos em que a visão residual fornece informação espacial muito distorcida ou inexistente. Esta conclusão já tinha sido obtida anteriormente nos resultados de localização horizontal espacial (Lessard, Paré, Lepore, & Lassonde, 1998).

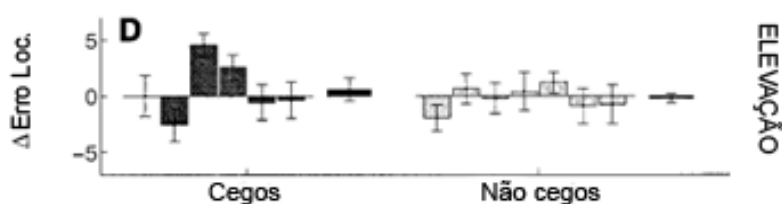


Figura 65 - Erro médio absoluto na elevação para pessoas cegas e não cegas (Zwiers, Opstal, & Cruysberg, 2001)

Em suma, pode-se concluir que no que diz respeito à localização vertical de fontes sonoras, as pessoas cegas têm uma capacidade menor de interpretar a elevação de onde provém o som de uma forma absoluta. No entanto, no que diz respeito a localizar relativamente sons em elevação, já não se consegue efectuar distinções entre pessoas cegas e não cegas.

Ainda na localização vertical, observa-se que a visão residual é novamente a causa de uma localização sonora diminuída. Na Figura 64 os sujeitos B5 e B6 reincidentemente são prova disso.

3.2.5 Navegação sonora por pessoas cegas

Uma navegação eficaz para humanos envolve um mundo de capacidades, incluindo a actualização da sua posição e orientação durante um percurso, formar e fazer uso de representações do ambiente pelo qual o percurso toma caminho, e planejar rotas sujeito a várias restrições (distância mais curta, menor duração de percurso, máxima segurança, etc.). Métodos de actualizar posição e orientação podem ser classificados segundo o tipo de informação usada: posição, velocidade, ou aceleração. Navegação baseada na posição (chamada “pilotagem” ou por “landmarks”) baseia-se em sinais externos que indicam a posição e orientação do sujeito. Tais sinais incluem marcos visíveis ou audíveis conhecidos ao sujeito.

Uma outra forma de navegação bastante testada mas que não é alvo de grande aprofundamento neste documento, é a baseada em velocidade chamada de “integração de

caminhos” (Loomis, Klatzky, & Golledge, 2001) (Klatzky, Beall, Loomis, Golledge, & Philbeck, 1999). Este tipo de navegação requer sinais externos indicando a velocidade e direcção instantânea do sujeito em movimento. Deslocamentos lineares e angulares em relação à posição e orientação inicial são processados por integração das componentes linear e angular da sua velocidade. Propriocepção, fluxo óptico e fluxo acústico estão entre os sinais disponíveis para se perceber movimento.

Um outro tipo de navegação será o baseado na aceleração, também denominado por “navegação por inércia”. Acelerações lineares ou angulares do sujeito são duplamente integradas para obter deslocamentos lineares e angulares em relação à posição e orientação inicial. Estes tipos de navegação baseados em integração não requerem informação sensitiva externa: o sistema vestibular humano e de outras espécies fornece informação acerca da velocidade linear e angular e da aceleração linear. O processo de movimentação do ser humano faz sem dúvida uso destes três tipos de informação (Loomis, Klatzky, Golledge, Cicinelli, Pellegrino, & Fry, *Nonvisual Navigation by Blind and Sighted: Assessment of Path Integration Ability*, 1993).

Claramente pessoas cegas estão em considerável desvantagem relativamente a não cegas, já que a visão fornece a estas informação sobre o ambiente que as circunda. Crê-se contudo que pessoas cegas criam um mapa auditivo do panorama sonoro que as envolve; este mapa é o resultado do amearhar de um conjunto grande e quase inconsciente de informações acústicas que surgem directa ou indirectamente (reflexos ou reverberações) e que compõem com um determinado horizonte possibilidades de caminhos pelos quais o próprio poderá decidir se irá enveredar ou não. Este horizonte será tanto maior quanto a atenção ou capacidade de memória do sujeito. Consequentemente, os resultados obtidos por integração das variáveis associadas ao movimento (velocidade e aceleração) serão efectivamente menos positivos já que apelam a esta necessidade. Um exemplo disso mesmo são as assumpções relacionadas com a distância ao destino. Resultados obtidos por estudos do mecanismo de integração de caminhos mostram por exemplo que há uma clara tendência em sobrestimar curtas distâncias e subestimar longas. Contudo, mesmo com estas e outras limitações, é sem dúvida mais fascinante o funcionamento deste mecanismo face ao baseado em “pilotagem” (“landmarks”). Esta forma de navegação denominada de “pilotagem” é efectivamente a mais simples. Se um dado estímulo sonoro estiver presente em constante repetição, a navegação até à sua origem é um processo iterativo de aproximações sucessivas a uma trajectória rectilínea entre a sua posição actual e o seu destino. O sucesso ou performance deste tipo de navegação não oferece contestação já que se baseia no consagrado mecanismo de localização sonora, que é conhecido como sendo fiável e preciso. Esse facto faz com que não seja alvo de muitos estudos, motivo pelo qual no capítulo seguinte constam os resultados obtidos usando este tipo de navegação.

Capítulo 4

Testes e Ensaios

No âmbito desta dissertação e do projecto que se encontra na génese, foram realizados vários ensaios mais ou menos formais com o objectivo de apurar a viabilidade da orientação sonora que está na base da navegação por “landmarks”.

Numa primeira fase os ensaios realizados são essencialmente de primeiro impacto com a problemática, sendo que com o avançar do tempo e a existência de condições fornecidas pelo “setup” experimental entretanto montado a propósito do projecto NAVMETRO® e do seu sistema SOS, os ensaios foram cada vez mais tendo a profundidade e a verificação desejada, necessária para a correcta validação dos conceitos necessários para a implementação do conceito e a sua entrada em produção com efectivamente uma ferramenta para ser usada pela comunidade cega.

No capítulo seguinte dar-se-á a conhecer o sistema implementado na estação de metro da Trindade, como consequência de alguns destes estudos: o Sistema de Orientação Sonora (SOS).

4.1 Introdução

Com o objectivo de apurar a possibilidade de uso deste conceito para a solução pretendida, foram realizados quatro testes preliminares e vários outros com o sistema já instalado e funcional.

Entre testes perfeitamente informais realizados apenas com colegas de laboratório não cegos, nas mais variadas condições acústicas, a testes realizados com um painel seleccionado de cegos e não cegos realizados com condições mais ou menos controladas, vários foram os testes que de uma forma simples irão ser explicados e as suas conclusões tiradas.

Como consta nos primeiros capítulos deste documento, o estudo da localização sonora nos seres humanos, é algo que já foi amplamente estudado, e certamente não se esperaria que

no contexto da realização de um projecto com tempo e recursos limitados, se encontrassem resultados muito inovadores que fizessem o que mais ninguém se lembrou em mais de 100 anos de estudo. Contudo, o último ensaio que aqui irá ser descrito é curiosamente simples e inovador. Ele estuda a situação limite na localização sonora vertical em que a fonte sonora se encontra imediatamente por cima do sujeito em teste. Novamente, este teste reveste-se de particular importância devido à necessária validação que se impõe, já que esta capacidade é necessária ao SOS para a navegação composta (navegação em que um dado percurso tem passagem por várias bóias sonoras como será explicado no capítulo seguinte). No entanto, os seus resultados são válidos para a comunidade científica.

4.2 Ensaio realizados

4.2.1 Testes preliminares qualitativos de localização

Os primeiros testes foram realizados em ambiente de laboratório na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e visaram fornecer uma primeira abordagem à problemática da orientação sonora. Consistiram essencialmente em colocar diferentes emissores de sons (contínuos e impulsionais) em posições diferentes (azimute e elevação) relativamente aos sujeitos, neste caso sem deficiências visuais ou auditivas, e desta forma tentar perceber a várias distâncias de onde vinha o som. Os resultados da experiência foram muito positivos. Embora não se tivessem efectuado medições, qualitativamente era fácil perceber que quando se desvendava o testando, a posição da fonte sonora era confirmada visualmente provocando desde logo a sensação do possível erro, que parecia pequeno ou inexistente. No entanto, ainda nestes ensaios rapidamente se começam a notar também algumas não linearidades. Nem todos os tipos de sons, nem a todas as frequências, nem sequer todos os indivíduos, produzem resultados idênticos. Os primeiros ensaios realizados foram importantes para clarificar as variáveis que haveriam de ser tratadas.

4.2.2 Testes preliminares qualitativos de localização e navegação

Num segundo conjunto de testes realizados num local amplo, com sujeitos também sem qualquer deficiência visual ou auditiva, mas que foram vendados, testaram-se aspectos relacionados com a mobilidade tendo por base fontes sonoras. Foram testados trajectos que tinham uma particularidade: os pontos de partida e de destino não tinham linha de vista como se pode observar na Figura 66. Houve portanto que considerar um ponto intermédio que serviria de ponto de viragem. Os resultados, permitiram concluir que numa primeira

abordagem ao problema, pessoas sem deficiências devidamente vendadas, conseguem orientar-se com sons e mesmo alcançar destinos sem linha de vista. Esta particularidade era novamente uma característica necessária à validade do SOS a implementar, e portanto foi desde logo testada. Foi desde logo apelidada navegação por bóias sonoras já que sendo navegação por “landmarks” acrescentava o pormenor de não haver linha de vista (e consequentemente som directo) a partir de alguns pontos do percurso.

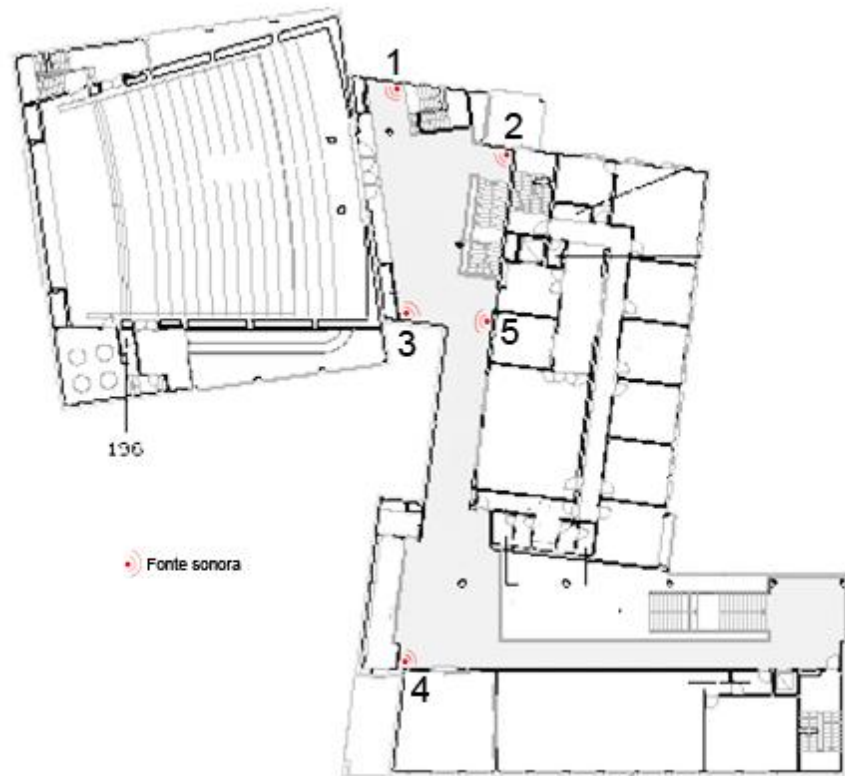


Figura 66 - Ilustração retirada do guião da experiência. Zona de testes de 324m² junto ao auditório da Faculdade de Engenharia

Revezadamente cada um dos participantes foi vendado e submetido a um conjunto de trajectórias definidas da seguinte forma:

- 1-5 (dirigir-se a 5 a partir de 1) - Simples deslocação;
- 5-4 (dirigir-se a 4 vindo de 5) - Teste à distância;
- 4-5-3 (dirigir-se a 3 estando em 4) - Teste à distância e a bóias sonoras;
- 3-2 (dirigir-se a 2 a partir de 3) - Procurar escadas de descida;
- 2-1 (dirigir-se a 1 vindo de 2) - Testar caminhos não directos.

Nesta fase usou-se como tipo de som uma música perfeitamente normal, por possuir um vasto conteúdo frequencial, e uma complexidade semelhante à que o ouvido humano está

habitado (sons de banda larga). Testes com ruído branco habitualmente usados para este tipo de ensaios produziram expectavelmente resultados semelhantes.

Ainda no mesmo ensaio realizou-se ainda um pequeno teste informal, que levantou uma primeira dificuldade e constatou algo que já tinha sido referido pela literatura no que diz respeito à discriminação de pontos no plano sagital médio. O teste consistiu em colocar à volta de uma pessoa vendada e parada, uma fonte sonora (a cerca de 30cm da cabeça), e pedir à mesma para indicar a direcção de proveniência do som com o braço testando-se quer a direcção (azimute), quer a altura (cota). Regra geral, todos os quatro sujeitos não cegos em teste conseguiram em todas as ocasiões com sucesso e rapidez apontar na direcção correcta. A constatação mais interessante aconteceu em situações que o som vinha exactamente de um dado ângulo atrás da nuca próximo dos 180°, em que a direcção de proveniência do som era confundida como vindo de frente. Com um desvio lateral mínimo, rapidamente isso era corrigido e em repetição não voltava a acontecer devido ao que se supõe ser aprendizagem.

Contudo este fenómeno tal como já foi explicado no segundo capítulo, explica-se pela semelhança de interpretação que é feita em sons que se situam na mesma posição simétrica com o espaço frontal. Aí o reconhecimento da posição azimutal, deixa de ser por diferenças interaurais, e passa a ser realizada por outro fenómeno relacionado com a função de transferência acústica resultante da configuração anatómica que cada indivíduo possui.

Este resultado, crê-se que dificilmente afectará o uso do sistema em vista, já que os utilizadores nunca estarão completamente parados quer com a sua cabeça, quer com a movimentação do seu corpo. Por esta razão rapidamente sairão do possível deste ponto de ambiguidade e perceberão de onde vem efectivamente o som.

4.2.3 Testes preliminares com ambiente acústico real com pessoas cegas

Numa sessão de testes seguinte, já em ambiente de estação de metro (com todas as variáveis e dificuldades que isso implica, nomeadamente a reverberação acústica e o elevado nível de ruído ambiente não estacionário provocado pela chegada e partida de composições e pelos anúncios sonoros) e já com 5 sujeitos cegos, avaliaram-se desempenhos de orientação e mediram-se tempos de percurso.

No que respeita á aplicabilidade da solução para pessoas cegas, um estudo chega mesmo a apontar estas pessoas têm vantagem sobre as não cegas em processar as reflexões e reverberações em ambientes fechados (Dufour, Després, & Candas, Enhanced sensitivity to echo cues in blind subjects, 2005).

Contudo esta experiência permitiu confirmar de forma absoluta a validade da orientação sonora no ambiente final a que se destina o SOS. De especial importância foi ter-se observado que as técnicas e níveis de segurança na mobilidade pessoal dos cegos produzem muitas diferenças em resultados absolutos. Por exemplo, um sujeito em teste, com pouca experiência em mobilidade pessoal, procurava claramente a parede com a bengala e seguia

ao longo desta até ao último momento possível para seguir em direcção ao som. Outros sujeitos faziam-no em linha recta e de forma mais segura e directa. Foi claro, contudo, que os sujeitos cegos conseguiram seguir os sons e caminhar até às respectivas fontes. O passo seguinte foi quantificar a performance deste encaminhamento e portanto a acuidade azimutal na localização sonora azimutal. A localização vertical não foi inicialmente considerada como fundamental já que a navegação pessoal se dá apenas no plano horizontal, e o SOS não necessitava previsivelmente desta capacidade, porque todos os objectos ou locais para onde se pretendiam encaminhar pessoas cegas, eram encontrados por varrimento da bengala ou de forma táctil, ou por conhecimento prévio da sua elevação. Um exemplo disso seria um som junto de uma máquina de venda de títulos. O altifalante estará por cima da mesma, e portanto caminhando um cego até ela, quando a alcançar saberá onde procurar os seus botões e não precisará de informação de elevação da mesma.

4.2.4 Testes preliminares em espaço aberto para análise da acuidade azimutal para vários tipos de som de conteúdo espectral diferente.

O último teste preliminar, já com carácter formal, serviu o propósito de apurar a acuidade azimutal que os cegos conseguem ter na localização de sons. Simultaneamente deram-se também os primeiros passos de validação experimental na avaliação dos tipos de sons mais favoráveis à orientação sonora. Tratou-se de um teste ao ar livre entre edifícios, cujas fachadas produziam ecos significativos. Os tipos de sons empregues foram chirlos (chirps), rajadas de várias durações e frequências e um som de canto de um pássaro, exemplificativo de um som altamente modulado e muito rico espectralmente.



Figura 67 - Fotografia de alguns dos elementos da equipa e das pessoas cegas em teste.

Este ensaio foi já algo complicado logisticamente, já que envolveu 7 pessoas cegas (cedidas gentilmente pela Associação de Cegos e Amblíopes de Portugal) num ensaio realizado em espaço e céu aberto, meios técnicos e materiais já algo complicados, e uma coordenação de esforços de 5 pessoas a prestar apoio à sua realização.



Figura 68 - Foto da zona de testes onde se percebe a circunferência graduada (para a medida). No centro encontra-se a plataforma de madeira onde o sujeito de teste se encontra parado apenas a rodar para a direcção de onde o som provém

A experiência foi realizada num espaço central relvado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Nesse local foi traçada uma circunferência de 10m de raio e marcado um ponto central com uma pequena plataforma (onde a pessoa cega em teste se tinha de manter).

Esta circunferência tinha então marcado no seu perímetro 5 pontos equidistantes, correspondentes aos vértices de um pentágono regular circunscrito. Em cada um desses vértices encontrava-se um altifalante de 2W de potência eléctrica e pequena dimensão colocado à cota média do ouvido humano. Em torno de cada um destes pontos estavam marcados no chão em forma de pequenas estacas de 20cm, graduações de 2° em torno desse ponto, com valores negativos arbitrados no sentido contrário ao ponteiro dos relógios, e valores positivos no sentido directo dos ponteiros dos relógios.

Em cada altifalante sonorizado, numa sequência alternada que constava no guião e para vários tipos de som, era pedido que o sujeito se orientasse de frente para a fonte sonora sem

se mover do centro (rodando apenas). Portanto com uma técnica de apontar em que se usa o corpo solitário com a cabeça. Uma vez dada a confirmação verbal pelo sujeito confirmando a sua direcção actual como sendo a definitiva e final, era então efectuada a medição do desvio angular em relação à fonte sonora. O processo de medição é descrito então de seguida.

Processo de medição

O processo de medição do desvio angular consistiu num mecanismo de alinhamento de reflexos através de um espelho colocado no capacete usado pelo sujeito em teste.



Figura 69 - Foto ilustrativa do processo de medição do desvio angular e do capacete com espelho que o sujeito em teste usou

Como se pode ver pela figura anterior, estavam envolvidos dois elementos na medida e outro na anotação dos resultados. Na medida encontrava-se um elemento entre o sujeito de teste e a circunferência. Este elemento depois de confirmada a direcção final do cego em relação ao radiador sonoro actuado, ajustava-se angularmente e radialmente de forma a conseguir ver-se centrado no espelho do capacete do cego. Com um gesto, o mesmo confirmava a posição final e o segundo elemento traçava visualmente um alinhamento entre o cego e o primeiro elemento, fazendo interceptar essa recta com a circunferência (devidamente graduada com resolução de dois graus), e transmitindo o resultado ao elemento encarregue das anotações.



Figura 70 - Mais à esquerda uma foto do sistema do capacete com o espelho acoplado; No centro uma foto da gradação realizada com pequenas estacas de madeira legendadas e separadas com um espaçamento de 2° em torno de cada altifalante; À direita um grande plano da pequena plataforma onde os sujeitos de teste se encontraram parados apenas a rodar na direcção dos radiadores sonoros

Escolha do tipo de sons

A escolha dos sons visou colocar em teste sons de diferentes tipos e com características psicoacústicas bastante diversificadas. Desde Chirps a Tons puros, de Ruído Branco a um Chilrear de uma ave, o objectivo foi apurar experimentalmente se existem sons com melhor orientabilidade que outros. Tal como já foi amplamente discutido anteriormente, a questão da informação espectral terá mais a ver com a localização vertical que com a azimutal, contudo o objectivo deste ensaio era também validar, e portanto assim se fez. No entanto, considerando o ambiente e as condições acústicas circundantes, poder-se-á crer que a informação espectral do som poderá influenciar os resultados na medida que o utilizador poderá receber som não directo.

Resultados

A experiência correu tal como tinha sido planeada e os resultados apurados permitem-nos concluir que fomentar a orientação de pessoas cegas através de referências sonoras, é não só possível como bastante preciso. No entanto, pela interpretação dos resultados da Tabela 4 é possível tirar algumas ilações.

Tabela 4 - Erros angulares de cada pessoa cega para cada som e cada altifalante (P1 a P5).

Nome	Idade	Idade Cegueira	Som1 - Chirp Low-High				Som2 - Uirapuru				Som3 - White Noise				Som4 - Tone High				Som5 - Chirp Low				Média	Desv. Padrão					
			P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4							
PJ	32	25	2	1	10	0	7	6	10	6	7	3	0	2	3	7	5	10	4	4	3	4	1	3	6	1	5	4,4	3,00
MR	21	0	0	0	0	1	-1	-5	0	-6	1	4	-5	-1	-2	1	-8	-2	0	2	1	-2	-7	-8	-6	-4	-6	-2,12	3,40
CL	35	32	-3	2	1	5	1	0	5	4	4	4	0	1	3	3	1	0	-1	5	1	0	-5	1	1	2	0	1,4	2,43
MB	57	50	-4	3	-4	-7	7	4	9	10	5	10	7	8	1	4	1	4	2	-2	-2	-1	7	6	3	3	2	3,04	4,55
HC	47	33	-2	-1	-3	0	0	0	-2	1	5	2	2	-1	-3	2	-1	9	-6	2	-3	-2	2	2	4	1	-3	0,2	3,12
MS	35	0	-4	-4	-2	4	4	-4	7	2	8	7	6	7	4	7	3	5	-2	3	7	2	1	6	-2	4	-3	2,64	4,04
AR	30	0	-2	4	1	5	8	3	9	3	11	4	11	5	11	10	5	8	8	4	7	6	2	5	8	8	6	6	3,29

Independentemente do tipo de som e do local de onde o mesmo foi radiado, a média de desvio angular foi de apenas 2,22°, ou seja, um pequeno desvio positivo no sentido dos ponteiros do relógio, e um desvio padrão de 4,22°.

O local de onde provém o som e as condições acústicas do meio envolvente interferem claramente no desvio angular.

Tabela 5 - Ordenação de resultados por projector (altifalante) e por tipo de som

Ordem por Média		1º	4º	2º	5º	3º
Projector	Projector	P1	P2	P3	P4	P5
	Média	1,34	2,40	2,06	3,20	2,11
	Desv. Padrão	4,70	4,31	4,19	3,91	4,00
Intervalo de confiança Inferior 5%		-0,21	0,97	0,67	1,90	0,79
Intervalo de confiança Superior 5%		2,90	3,83	3,45	4,50	3,44

Ordem por Média		1º	5º	4º	3º	2º
Som	Som	Som1	Som2	Som3	Som4	Som5
	Média	0,83	3,91	2,83	2,23	1,31
	Desv. Padrão	3,85	4,27	4,28	3,86	4,35
Intervalo de confiança Inferior 5%		-0,45	2,50	1,41	0,95	-0,13
Intervalo de confiança Superior 5%		2,10	5,33	4,25	3,51	2,76

Como se pode observar pela Tabela 5, independentemente do tipo de som, o altifalante P1 teve excelentes resultados, enquanto que o altifalante P4 sofreu a pior média. Isto deve-se aparentemente a factores arquitectónicos do meio onde ocorreu a experiência. A existência de algumas paredes próximas, e de alguns elementos arquitectónicos influenciou claramente através das reverberações (os radiadores com piores resultados foram aqueles que se encontravam mais orientados para as paredes mais próximas).

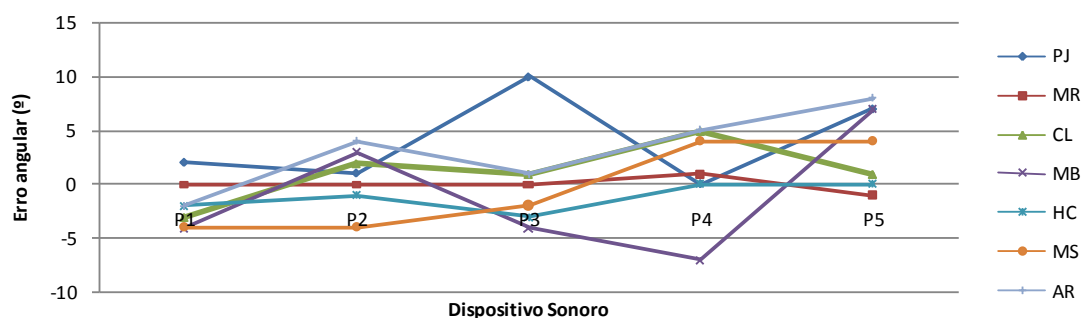


Figura 71 - Gráfico dos resultados obtidos para o som tipo “chirp low-high”.

É também possível concluir-se que não existem (de uma forma significativa) diferenças nas capacidades de orientação sonora dos vários indivíduos. Se bem que, pelas médias, se poderia pensar que alguns indivíduos que rondaram em média a perfeição dos zero graus (HC, CL) teriam melhor capacidade de orientação que outros com resultados em média piores (PJ, AR), na realidade suspeita-se de um erro de medida sistemático que terá desviado no sentido positivo todas as medições inviabilizando assim conclusões claras a tirar apenas com a média. No entanto, pelo desvio padrão podemos então perceber que não existe grande diferença entre as capacidades dos indivíduos para se orientarem através de sons.

Foi constatado portanto um erro sistemático aquando do tratamento de dados. Há um claro desvio positivo na média das medições, independentemente do som e do radiador de onde o mesmo foi emitido. Na realidade, seria de esperar que a média estivesse bastante mais centrada e próxima do zero. No entanto, é visível a existência de um erro de “offset” que terá vindo certamente da orientação que o espelho tinha em função do capacete, já que é a única causa que é comum a todas as situações que aconteceram: todos os indivíduos usaram o mesmo capacete e sem ter existido qualquer ajuste do espelho do mesmo. Este erro não representa graves problemas para o tratamento dos resultados já que sendo esperado, se trata do reflexo de uma certa coerência, e é sinal de que o restante processo de medição não propagou o erro significativamente além desse já existente. É até claro que no exemplo das medições a HC, devido à sua cabeça mais pequena que o normal (em que o capacete ficou mais solto que o costume segundo as notas tiradas da experiência) que esse desvio do espelho deverá ser sido anulado pela má colocação do capacete, e terá produzido os resultados nos casos da não existência desse erro sistemático de “offset”. Lembre-se que a média desse indivíduo foi centrada em zero (como seria de esperar), sendo que o desvio padrão foi de 3,12°;

A análise do tipo som reservou uma surpresa, mas no entanto explicável. Os dois sons mais apropriados foram realmente os previsíveis. Um “chirp low-high” (varrimento de 1 segundo dos 440Hz até 2kHz) com pausa de dois segundos, foi como se esperava o som com melhores resultados. Trata-se de um som que cobre a maioria das frequências naturais, e como se esperava o ouvido humano e a sua percepção sonora reagiram muito bem a ele. O segundo melhor som (entenda-se o segundo com melhores resultados) foi igualmente outro “chirp” mas de menor gama e mais graves (menor frequência e menos orientáveis - 100Hz - 440Hz). Em terceiro lugar um tom puro (uma sinusóide de 2kHz de 1 segundo) que embora não seria tão orientável verticalmente (por razões psicoacústicas já referidas), azimuthalmente acaba por ter características interessantes devido à maior direccionalidade das altas frequências (e consequentemente à melhor interpretação da diferença interaural necessária à orientação sonora azimuthal). Em quarto lugar surge o ruído branco (combinação simultânea de todas as frequências) que embora cobrindo todas as frequências, o faz de uma forma quase simultânea, e ao contrário do primeiro “chirp” o efeito produzido acaba por ser mais confuso produzindo assim resultados não tão favoráveis. A surpresa surgiu com o som de uma ave (brasileira de nome “Uirapuru”) em que apesar da agradabilidade do som, produziu os piores resultados do ensaio (embora o seu desvio padrão não seja muito diferente dos outros). Isso poder-se-á explicar por se tratar de um som não tão constante quando os outros em teste. O som é caracterizado por uma série de chilreios dados de uma forma impulsiva e quase errática, e essa poderá ser a razão pelo qual esse som terá produzido ligeiramente piores resultados. No entanto, é importante lembrar que esta análise quase não tem

significado dadas as diferenças serem tão pequenas, e existir o erro de “offset” que foi referido anteriormente.

No que concerne à diferença de resultados entre cegos de nascença e cegos posteriores, não se observa uma diferença que permita tirar nenhuma conclusão já que a média dos primeiros é de 2.17° face a 2.26° dos segundos. Poder-se-ia esperar uma melhor localização sonora por parte de cegos de nascença, tal como visto anteriormente. Mas tal não se verificou nos resultados a não ser pontualmente. Este facto não constitui um resultado problemático para a viabilidade do SOS já que efectivamente a precisão que se dá a localização azimutal é já assim suficiente para a aplicação em causa.

Conclusão

Em suma, toda a experiência permitiu tirar algumas conclusões importantes. Apesar do ambiente do teste não ter sido o mais desfavorável, a realidade é que esteve longe também de ser o mais favorável. Desde máquinas de cortar relva a passar até às condições acústicas do meio envolvente, dificilmente esta seria a situação mais favorável para os resultados. No entanto, a aplicação final que origina este ensaio tem condições ligeiramente piores, sendo assim ainda imprescindível testar em ambiente de estação de metro a aplicação do conceito de orientação sonora. Contudo, é desde já possível concluir que em ambientes não muito ruidosos e com bastante reverberação, o uso de referências sonoras é uma forma eficaz e precisa de orientar azimutalmente indivíduos completamente cegos.

4.2.5 Testes iniciais em ambiente de estação de metro apoiados no SOS

Posteriormente ao projecto e instalação do sistema SOS surge então uma nova fase de testes realizados em ambiente real de aplicação, destinados a tirar conclusões acerca da eficácia da ideia, e da solução implementada.

Como será referido no próximo capítulo, onde se retrata com detalhe a constituição e funcionalidades do SOS, a instalação é composta por 55 dispositivos sonoros dispersos em várias centenas de metros quadrados de uma estação de metro no Porto. Essa estação (Trindade) possui três pisos, dois dos quais com cais de embarque sendo que um deles tem até dois conjuntos de cais com funções diferentes. Milhares de pessoas transitam nesta estação, produzindo ruído que em conjunto com factores ambientais como os veículos e as suas partidas e chegadas, constituem um ambiente acústico com desafios muito interessante.

Neste âmbito conduziram-se os primeiros testes fazendo uso do sistema projectado, numa perspectiva de validar o que já se tinha inferido.

Os primeiros testes foram realizados com a colaboração de cegos (os utilizadores deste sistema), e consistiram em verificar binariamente se os utilizadores conseguiam caminhar para os locais onde sons eram activados e assim permaneciam, repetidos com intervalos de 2 segundos. Inicialmente, e face a resultados anteriores, os sons usados foram chirps (já

utilizados na experiência anterior) numa tentativa de separar os sons a serem seguidos, dos sons já presentes na estação. As pessoas cegas ouviam, esperavam por uma ou duas repetições para se orientarem com a cabeça para o som, e começavam a caminhar nessa direcção com uma precisão que embora não tenha sido medida, teria certamente impressionado. Mesmo com obstáculos verificou-se que por aproximações sucessivas, a direcção e o caminho tomado, eram realmente efectivos, tal como se tinha já concluído num estudo anterior (Walker & Lindsay, 2006). Testes anteriores realizados no âmbito deste projecto tinham demonstrado técnicas de mobilidade em que as paredes eram procuradas e seguidas até ao último momento possível, e portanto será de esperar que tal aconteça novamente. No entanto, pessoas com segurança na sua mobilidade pessoal, traçam o segmento de recta entre a sua localização inicial e final, e seguem-no com uma eficácia moralizadora para o autor, os seus coordenadores, e os responsáveis do projecto.

4.2.6 Adequação de sons a espaços públicos

Após a realização de inquéritos realizados a utilizadores da estação de metro e alguns cegos, chegou-se à conclusão que o som tipo “chirp” usado inicialmente na localização sonora, não é o mais confortável para os utilizadores do espaço público. Esta solução de acessibilidade baseia-se também no compromisso de não criar desconforto acústico adicional a aquele que de forma indesejada já é causado pelos veículos, informação verbal sonora, trânsito de pessoas, ruído exterior à estação, etc.. Esta restrição parece ir na direcção contrária ao que se pretende na localização sonora, em que se deseja um som distinguível dos outros para ser localizado. No entanto, chegou-se a uma solução que cumprindo esta condição, respeita também o ambiente acústico do espaço, provocando até uma sensação de bem estar aos restantes utilizadores.

Desde os primeiros ensaios, que o som de aves foi equacionado para esta solução. As aves, mais especificamente as aves canoras, têm a característica de ter na sua forma de comunicar por som, a capacidade de se destacar do meio envolvente, e de transmitir associado ao seu chilrear uma sensação de calma e relaxação aos humanos. Do ponto de vista espectral, os sons produzidos são ricos em variações de frequência que facilitam em muito a localização espacial, principalmente a vertical. Em espaços fechados são sons que produzem muito pouca onda estacionária devido ao rico conteúdo, diversidade frequencial e velocidade de modulação. Todas estas características são a solução para o problema da convivência entre vários tipos de utilizadores das estações de metro, e de possivelmente no futuro, de outro tipo de espaços fechados que se desejem acessíveis a invisuais.

De um catálogo de cerca de 150 sons de aves obteve-se uma selecção de 20, que posteriormente voltou a ser filtrada por pessoas cegas que elegeram 3 sons que futuramente servirão as preferências de cada utilizador. Destes 3 sons, apenas um tem sido usado nos testes que o validaram e que verificaram a mesma performance que os que utilizavam o

“chirp”. Desta forma, validou-se portanto a sua adequação e capacidade de ser usado para a orientação sonora.

4.2.7 Testes diferenciais ao uso do SOS

Um teste necessário à demonstração da validade do SOS é a comparação em termos de eficácia entre o uso do sistema ou não. De uma forma prudente, tornou-se necessário prever argumentos que pudessem colocar em causa a necessidade de um sistema deste tipo. Que vantagens terá uma pessoa cega em usar um sistema sonoro para se dirigir a um local? O tempo usado para activar o sistema ou cumprir o percurso assinalado, não será maior que apenas dirigir-se lá? Para abordar o problema é necessário colocar-se dois cenários opostos: a pessoa cega conhece bem o local e é uma pessoa confiante no que concerne à sua mobilidade; a pessoa cega não conhece o espaço, e não é confiante na sua mobilidade. Demonstrar o primeiro caso, não provaria a eficácia do sistema. Contudo, qualquer benefício no segundo caso já seria desejável.

De uma forma muito simples realizou-se um teste em que se pediu a dois cegos não habituados a navegar com referências acústicas, a deslocar-se desde um ponto fixo na entrada da estação da Trindade, até a um local que é do conhecimento de todos e de relativa facilidade de acesso. Para ilustrar os dois cenários acima referidos, estes dois cegos correspondem exactamente aos perfis descritos. O percurso tinha como ponto inicial a entrada da estação principal, e o destino era a loja Andante muito perto do início. Cada pessoa fez duas vezes o percurso, sendo que da segunda vez, a pessoa era desorientada de forma a não se basear em qualquer tipo de integração de caminho, ou informação proprioceptiva. Da primeira vez, não se fornecia qualquer indicação sonora, indicando-se apenas o destino à pessoa e o local onde se encontrava, assim como a direcção face à porta de entrada, e sem indicar qualquer regra. Da segunda vez, só se dava a partida quando a primeira bóia sonora era activada, fornecendo as indicações do percurso por localização sonora através de duas bóias em sítios de quebra de linha de vista. De notar que o segunda pessoa cega se encontrava isolada do primeiro de forma a não saber o que a esperava. Para cada percurso foram medidos os tempos, e foi avaliada a performance do percurso.

Os resultados são curiosos e extremamente elucidativos. O primeiro utilizador, como pessoa experimentada, mal se deu a partida (sem apoio do SOS) agarrou o braço da primeira pessoa que encontrou (para surpresa e espanto de todos) e pediu educadamente que a guiasse para a loja andante. A pessoa, simpaticamente levou-o até lá rapidamente e quando lá chegou, parou-se o cronómetro e obteve-se 70 segundos. Do lado da organização da experiência pensou-se em repetir a mesma, já que não parecia correcto efectuar-se posteriormente a comparação de tempos, com o que parecia contornar as regras. No entanto, pensada a situação chegou-se à conclusão que não. As regras haviam sido cumpridas, e o melhor cenário havia sido encontrado. A fasquia era elevada, mas efectivamente poder-se-ia

pensar que realmente assiste o direito de cada um pedir ajuda para dirigir-se a um local, e portanto ser uma ferramenta para a deslocação de pessoas cegas a locais. De seguida, e após ter deslocado a pessoa cega novamente para o ponto inicial depois de a ter desorientado, deu-se a partida, mas desta vez com sons a ser seguidos pelo utilizador, e passando por duas bóias sonoras com alguns ângulos relativamente apertados e sem linha de vista. Uma vez chegado ao local com uma precisão excelente, mediu-se o tempo, e constatou-se mesmo assim uma melhoria de 5 segundos, tendo demorado 65 segundos. Embora ténue, esta diferença é considerável, principalmente tendo em conta como foi obtido o primeiro resultado.

O segundo utilizador, menos experiente, conhecedor da estação e confiante, teve resultados antagónicos. Na primeira situação ele não pedindo ajuda a ninguém e tentando por si chegar ao destino, excedeu o tempo máximo da experiência (15 minutos), não tendo lá chegado perto sequer. No segundo caso, e usando o SOS demorou apenas 80 segundos. De salientar mesmo assim a diferença considerável (15 segundos) face ao primeiro utilizador que alerta para a necessidade de ter cuidados adicionais com determinados utilizadores. Contudo, este resultado demonstra que efectivamente este sistema promove o verdadeiro conceito de acessibilidade.

4.2.8 Teste à situação limite da localização vertical no SOS

Tal como foi referido anteriormente, a precisão na localização vertical não é de capital importância devido ao facto da navegação do SOS se basear na movimentação no plano horizontal com o uso da localização azimutal. Contudo existe um aspecto importante nesta componente que se torna necessário testar no sentido de quantificar a performance do posicionamento final, ou mesmo da passagem por bóias sonoras

Como se apurou no capítulo 3, existem alguns estudos que abordam a localização vertical em situações de ausência de visão. Contudo, não foram encontradas informações relativas a testes ao caso limite da localização vertical, em que o sujeito se encontra imediatamente por baixo da fonte sonora. Foi então necessário realizar uma experiência que se crê inovadora e que se passa a descrever.

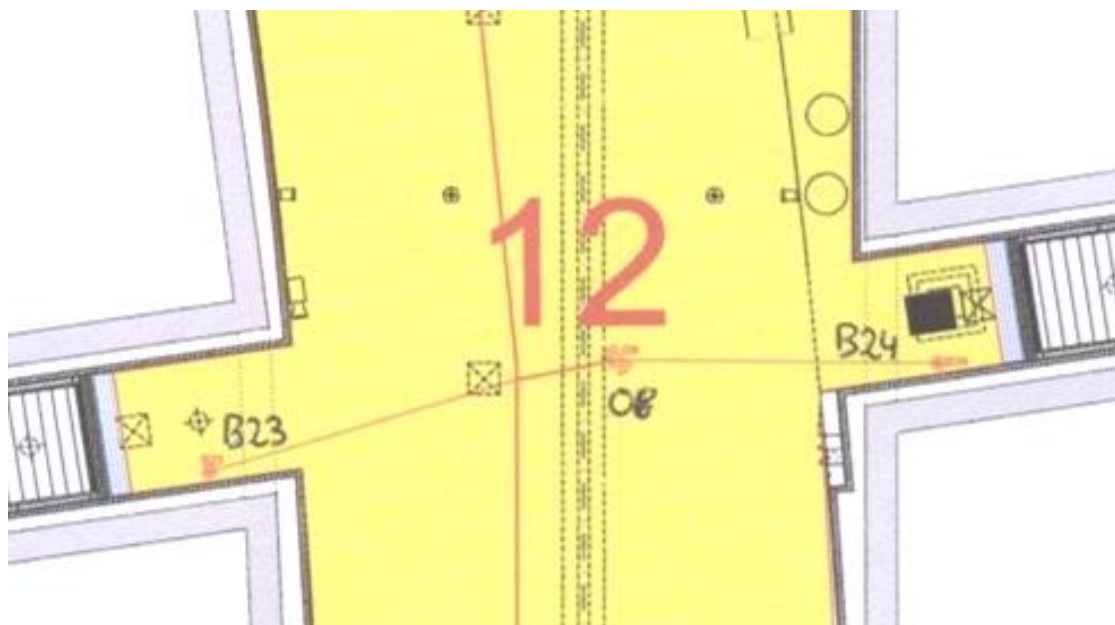


Figura 72 - Extracto da planta do piso intermédio da estação de metro da Trindade. O Altifalante em teste pertencente ao SOS, é o referenciado como “O8”.

Usando a instalação do sistema SOS, e 1 dos 55 dispositivos sonoros lá instalados (Figura 72), criou-se um “setup” experimental baseado numa circunferência de 3m no solo com o centro sob o ponto central de um altifalante embutido no tecto á cota de 3m, direccionado para baixo.

Por se tratar de uma estação de metro em funcionamento, e não se desejar criar obstáculos ao livre movimento de todos, optou-se por realizar todas as marcações no piso com fita adesiva vermelha. No início da experiência, para além do centro da circunferência (o ponto de erro zero), encontrava-se marcado no chão: os raios de 45 em 45°, e os seis pontos de partida para os sujeitos.

Tabela 6 - Participantes da experiência

Nome	Género	Idade	Idade Cegueira	Causa de cegueira	Visão Residual
JF	Masculino	49	24	Retinose Pigmentar	Luz ténue
RV	Masculino	31	28	Nevrite Óptica	Luz muito ténue
DF	Masculino	54	NA	NA	NA
IM	Feminino	39	NA	NA	NA
JA	Masculino	42	NA	NA	NA

No perímetro desta circunferência encontram-se 6 pontos de partida (Figura 73) para 6 medições a efectuar aos 5 sujeitos em teste conforme a tabela anterior. Estes 6 pontos foram escolhidos de forma a separem-se angularmente o máximo possível uns dos outros e de forma

a anular possíveis “offsets” devido a reflexões ou reverberações do espaço circundante, já obtidos em resultados experimentais anteriores. O algoritmo relativo a cada ponto refere também a sequência com que se deu as partidas.

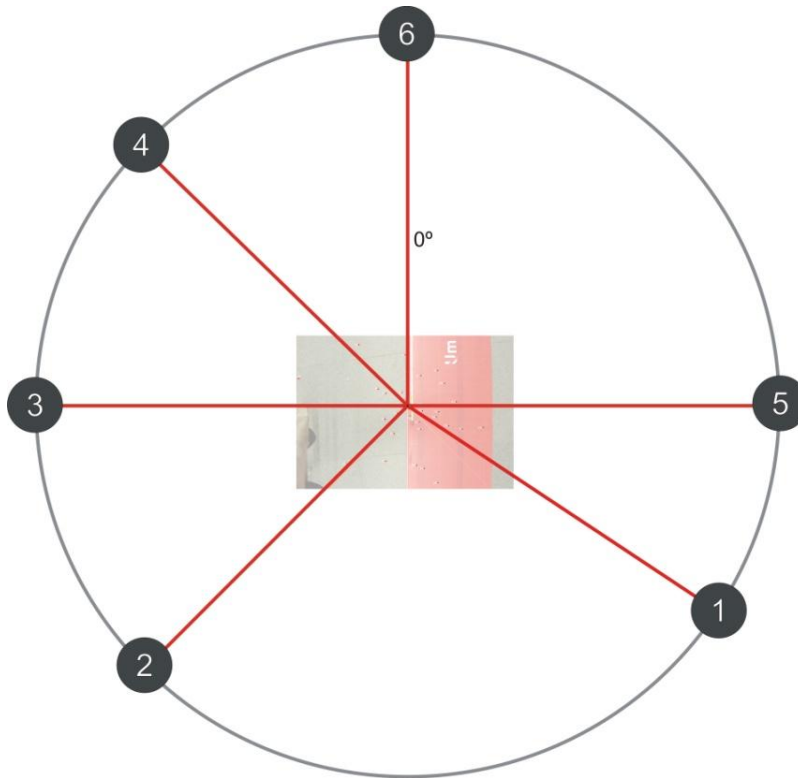


Figura 73 - Esquema do “setup” experimental, com foto sobreposta e calibrada dos resultados obtidos.

Do procedimento da experiência constam duas fases diferentes, em que se testam dois sons diferentes: o som da ave usado actualmente no SOS; e o “chirp” inicialmente usado. O “chirp” foi alterado de forma a ter a mesma duração que o chilrear, e o período de repetição foi também adaptado. O objectivo desta adaptação foi a de viabilizar comparações performance entre os dois sons.

De uma forma simples, o ensaio consistiu em testar 5 pessoas (2 cegas, e 3 não cegas mas vendadas), em seis medições realizadas de seis pontos de arranque diferentes (no sentido de despistar possíveis mnemónicas, e informação proprioceptiva). No caso das três primeiras medições o som usado foi o das aves. Nas restantes três testou-se o “chirp”.

Foi dito a cada sujeito em teste que o tempo estava a ser contado para provocar alguma competição entre indivíduos e provocar resultados melhores, sendo que para conclusões do ensaio, o tempo só pode contribuir para justificar levemente possíveis resultados piores, quando o mesmo é curto e demonstra não ter existido muito ajuste fino do posicionamento.



Figura 74 - Fotografia da posição de início 6 com o sujeito RV.

Dada a partida, depois de activado o som e activado o cronómetro, cada sujeito caminhava para o local que lhe parecia ser o ponto imediatamente por baixo do altifalante embutido no tecto. Assim que o sujeito em teste dizia “já está!” o tempo e o som parava, e pedia-se a cada indivíduo que mantivesse os pés juntos e parados. Seguia-se um processo de marcação ilustrado na Figura 75. Colocando um cartão com um círculo recortado no interior (com diâmetro capaz de envolver calçado relativamente grande), aberto num dos lados, em torno dos pés parados do sujeito em teste na posição que indicou como final, pedia-se à pessoa para sair do lugar enquanto se segurava no cartão mantendo a posição. De seguida, registava-se a posição, colocando fita-cola no chão na zona do centro, marcando um ponto central dessa circunferência, e identificando-o com as iniciais do sujeito e o número da medição.



Figura 75 - Processo de marcação da posição final em sequência.

Tratando-se de uma estação de metro muito movimentada que serve milhares de pessoas por dia, a opção de efectuar marcações sem relevo no chão, foi realmente vital para assegurar a integridade da experiência. A opção de não se efectuarem as medições e o registo da posição entre cada medida, foi também fundamental para minimizar tempos de espera entre os sujeitos em teste, de um ensaio que já foi conseqüentemente demorado.

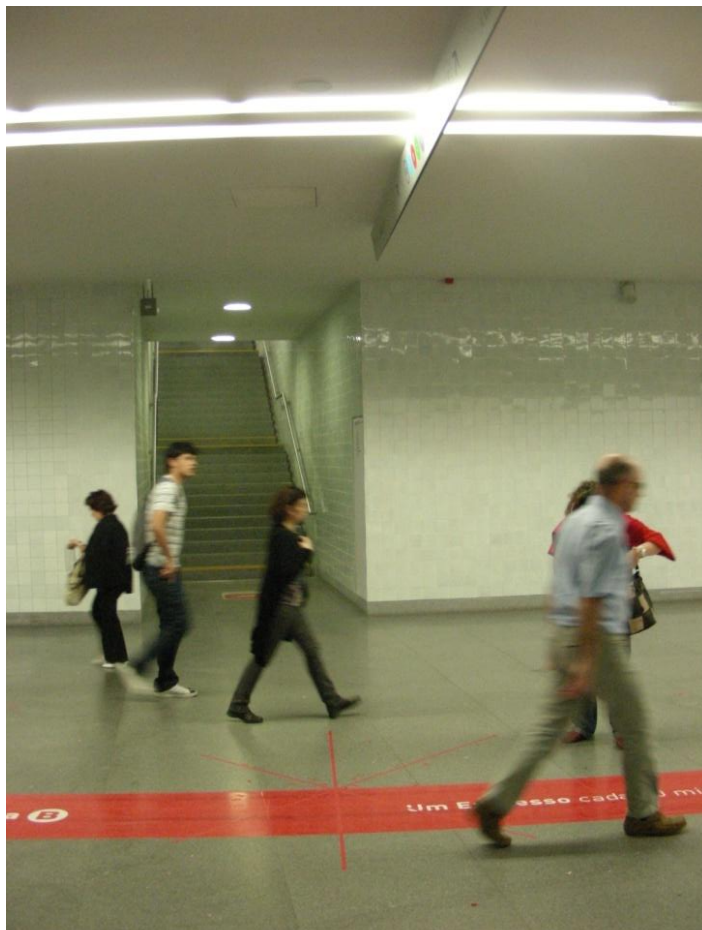


Figura 76 - Fotografia do local de testes. Em baixo no centro, observam-se os eixos do posicionamento; imediatamente por cima, observa-se o altifalante.

Realizadas as 30 marcações, recolheu-se fotograficamente os resultados (com elementos de escala para apoio á calibração), com a ajuda de um escadote tirando uma fotografia como se olhasse a partir do altifalante em teste.

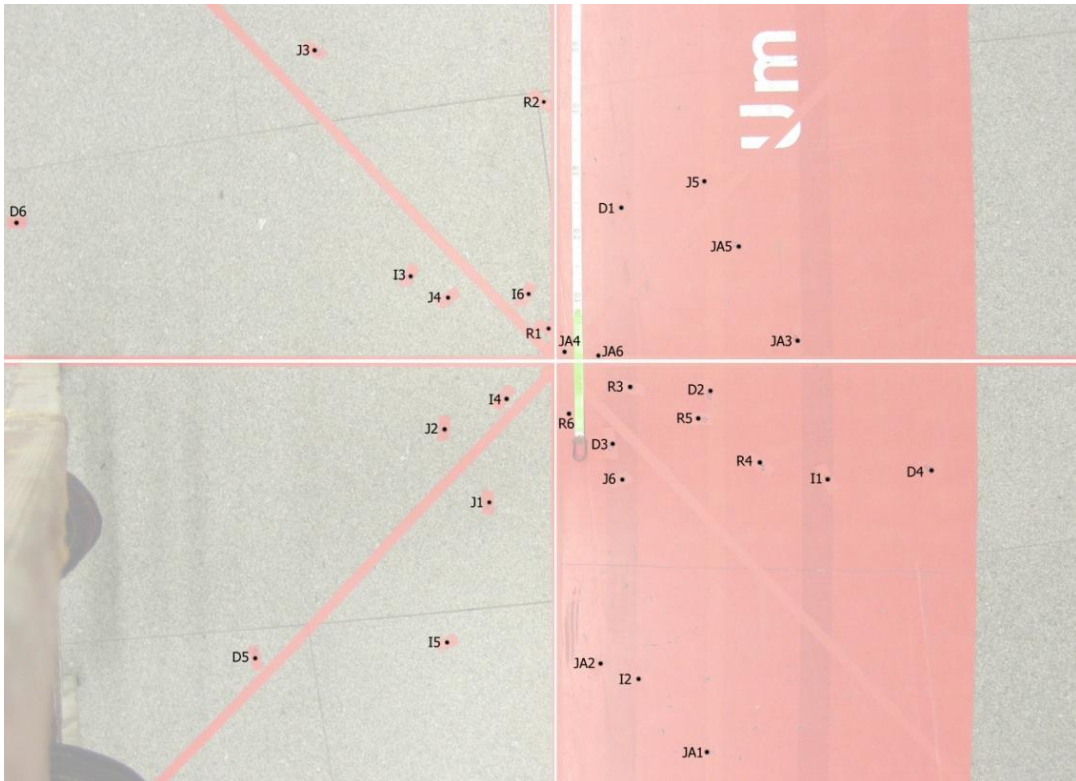


Figura 77 - Fotografia calibrada com a ajuda de fita métrica constante na fotografia, e com a sobreposição dos pontos marcados.

Posteriormente, com o apoio de software de georeferenciação, realizou-se o levantamento de todos os pontos em coordenadas vectoriais, e polares. Através destas segundas, obteve-se o raio de cada localização final, que será o valor a ter em consideração na performance do ensaio. Os resultados obtidos foram os constantes nas Tabela 7 e Tabela 8, e demonstram que o posicionamento foi deveras preciso, obtendo-se uma média geral de 33,47cm. Portanto um erro relativamente baixo tendo em conta a dimensão média humana. O som de aves teve um resultado médio muito ligeiramente inferior que o “chirp”. Tal como se poderia prever, conclui-se portanto que para este tipo de localização, o som de aves e as suas vantagens já referidas, não deteriora em nada a performance da localização. Arranques da posição 4 e 6 mostraram ter melhores resultados de localização. No entanto, considerando que a unidade é o centímetro, poderá ser enganador pensar que a acústica do meio terá influenciado este fenómeno.

Entre as muitas possíveis ilações que se podem tirar, existe uma que se destaca claramente. Os resultados obtidos por RV destacam-se bastante dos outros por ser relativamente mais preciso. Este resultado faz sentido já que RV é músico, e tem portanto o que se chama um “ouvido educado” capaz de ter uma performance de localização melhor que os outros. Tal resultado não parece surpreendente, no entanto não foram encontrados estudos que relacionem este facto com as capacidades de localização sonora. Será

possivelmente um bom estudo a realizar no futuro, perceber como a “educação” dos vários sistemas auditivos, pode ter um papel preponderante localização sonora.

Tabela 7 - Erros obtidos considerando uma altura média de cada sujeito de 1,65m

	Raio (cm)	Ângulo (graus)	Tempo (s)	Raio médio (cm)	Âng. médio (graus)	Tempo médio (s)
JF1	24,81	10,41	12,32	31,51	12,96	11,33
JF2	21,16	8,91	10,63			
JF3	63,41	25,16	10,38			
JF4	20,34	8,57	9,69			
JF5	37,63	15,58	12,40			
JF6	21,69	9,13	12,58			
RV1	5,41	2,29	20,50	21,66	9,02	18,27
RV2	41,45	17,07	18,48			
RV3	12,74	5,39	17,50			
RV4	36,87	15,27	21,16			
RV5	24,93	10,46	17,67			
RV6	8,58	3,64	14,29			
DF1	24,93	10,46	30,30	48,14	18,97	29,24
DF2	25,56	10,72	42,56			
DF3	16,01	6,77	48,78			
DF4	63,59	25,22	17,62			
DF5	67,99	26,73	17,34			
DF6	90,75	33,91	18,82			
IM1	48,00	19,57	10,53	32,86	13,48	15,81
IM2	52,30	21,18	16,82			
IM3	27,32	11,44	14,24			
IM4	9,91	4,20	17,46			
IM5	47,99	19,57	18,70			
IM6	11,66	4,94	17,13			
JA1	66,85	26,34	40,09	33,18	13,48	34,68
JA2	48,57	19,79	36,42			
JA3	39,53	16,32	37,73			
JA4	2,14	0,91	30,19			
JA5	35,02	14,54	31,33			
JA6	6,99	2,97	32,33			

Tabela 8 - Tabela de médias da experiência

	Raio (cm)	Angulo (gaus)	Tempo (s)
Média Geral	33,47	13,93	21,87
Média Ave	34,54	14,35	24,49
Média Chirp	32,41	13,50	19,25
Média Pos. 1	34,00	14,14	22,75
Média Pos. 2	37,81	15,65	24,98
Média Pos. 3	31,80	13,26	25,73
Média Pos. 4	26,57	11,13	19,22
Média Pos. 5	42,71	17,56	19,49
Média Pos. 6	27,94	11,69	19,03

Analisando o gráfico de dispersão que pode ser observado na Figura 78, fica-se imediatamente com a sensação que existe uma maior concentração nas zonas próximas do centro, que na periferia. Conciliando os resultados da Tabela 7 com a Figura 78 observa-se

que os três resultados mais afastados ocorreram no mesmo utilizador (DF) e nas últimas três medições. Como se observa que os últimos três resultados em causa foram também realizados com tempos inferiores a metade dos valores das três primeiras vezes, podem-se apontar duas razões possíveis: ou passou a existir a falsa sensação que o segundo som tipo “chirp” era mais fácil de orientar, e demorando menos tempo se confirmava a posição final, chegando a estes resultados mais divergentes; ou não houve um esforço tão grande por parte do sujeito em teste em refinar a sua posição final. Esta última conclusão levanta um possível problema da experiência, relacionado com a determinação da posição final.

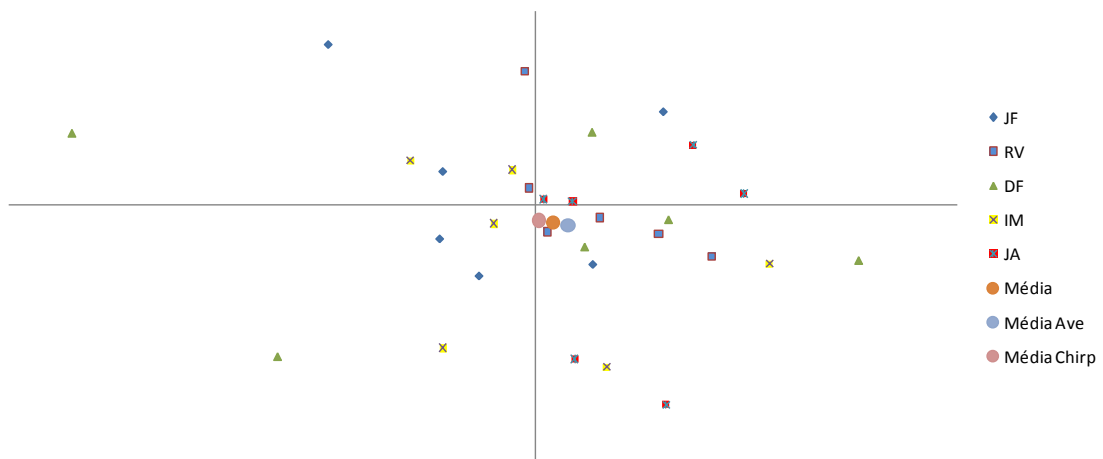


Figura 78 - Gráfico com as localizações e médias. Eixo horizontal com -100cm a 80cm. Eixo vertical com -80cm a 60cm

Não considerando estes três pontos claramente dissonantes, o erro médio passa de 33,47cm para 28,96cm, um valor consideravelmente mais baixo tendo em conta que se deixam de considerar apenas 10% dos resultados.

No que concerne à distinção entre os resultados de pessoas cegas e não cegas, observaram-se melhores resultados com as pessoas cegas, já que obtiveram os melhores resultados médios nos dois sons usados (JF e RV). As duas pessoas cegas obtiveram em média 26,59cm face aos 38,06cm obtidos por pessoas não cegas.

Verifica-se também que o erro angular médio situou-se próximo dos 14 graus face à vertical, para uma altura média dos sujeitos de 1,65m. Este resultado, embora esperado, mostra um erro angular significativo, face ao erro angular azimutal já estudado. Contudo, como o altifalante se encontra relativamente baixo em cota (3m de altura), este erro reflecte-se num erro posicional baixo.

Em suma, os resultados desta experiência permitem concluir que o posicionamento horizontal de indivíduos, cegos ou não, por baixo de fontes sonoras é realizado com bastante precisão para fontes sonoras a cotas não muito elevadas. Tal facto, valida categoricamente a funcionalidade de localização e passagem por bóias sonoras usada no SOS.

4.3 Métodos de apontar para a localização da fonte sonora

No decorrer da recolha de elementos bibliográficos para este documento verificou-se existirem por vezes algumas discrepâncias entre os resultados encontrados para diversos fenómenos relacionados com localização sonora. Uma das possíveis causas para esta ocorrência poderá prender-se com o facto de se utilizarem diferentes métodos para o sujeito em teste apontar a direcção da proveniência do som. No sentido de descobrir o método mais preciso e adequado de apontar para a localização sonora de um dado som em pessoas com deficiências visuais, foi efectuada uma comparação da precisão de três diferentes métodos de apontar (Fujii, Ohsugi, Yamamoto, Nakamura, Sugiura, & Tauchi, 2007). Os três métodos em teste foram: (1) direccionar a cara, (2) direccionar o corpo numa cadeira rotativa, e (3) indicar de forma táctil numa superfície tipo transferidor a direcção.

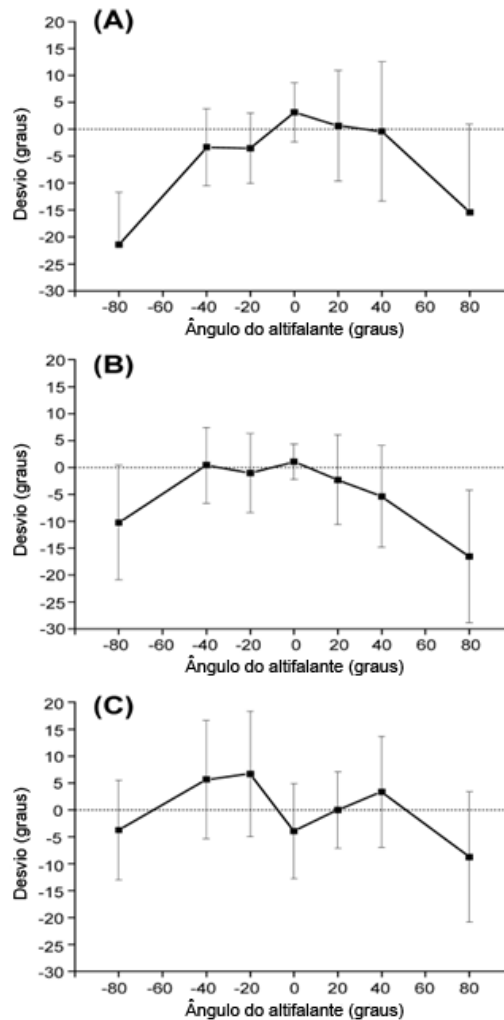


Figura 79 - Comparação do ângulo de desvio entre três diferentes métodos: (A) cara, (B) corpo), (C) táctil.

Facilmente se percebe que um método envolvido numa medição pode afectar em grande parte os resultados. Desta forma será de imaginar que um método tão simples como apontar com o braço poderá ser extremamente falível, logo, desde o momento que o som não provém do chão (a posição de descanso), o efeito da gravidade faz-se sentir fazendo o braço mover-se em redor da zona que se deseja efectivamente indicar. Este erro será tanto maior quanto a duração da medição e o cansaço se instale. Será portanto necessário pensar em métodos confortáveis para o sujeito em teste e cujo processo de medição não afecte a medida.

A Figura 79 mostra o desvio médio de direcções apontadas por seis pessoas cegas face à proveniência real de sons. No caso (A) observa-se o resultado obtido pelo método de apontar com a cara, no caso (B) pela direcção do corpo e (C) por uma superfície táctil. Valores positivos e negativos de desvio indicam sobre e subestimação do ângulo indicado de proveniência da fonte sonora. Valores negativos são relativos ao lado esquerdo do sujeito, sendo os positivos relativos ao lado direito.

Na Figura 79 (A) verifica-se alguma sobrestimação assim como subestimação pelo método de apontar com a cara na zona central, e uma subestimação bastante mais significativa na periferia. No caso do método de apontar pelo corpo (caso B), um pequeno desvio é observado numa determinada direcção na zona do centro, e na periferia uma significativa subestimação, parecendo desde já melhor que o primeiro método. O método assinalado em (C) mostrou contudo uma tendência diferente dos anteriores, o desvio na periferia manteve-se ao mesmo nível do observado na zona central, embora se note alguma subestimação. Com uma média de desvio na zona frontal de $0,5^\circ$, foi sem dúvida o método com melhores resultados.

Uma vez analisada a performance de cada um dos métodos, consegue-se perceber que em muito têm a ver com a capacidade física de manter o valor que se deseja apontar. Rodando a cabeça apoiada no corpo, consegue-se perceber que pequenos movimentos do corpo ou do pescoço irão estar sempre a afectar as medições. No caso de se medir a rotação do corpo e estando solidária a cabeça e o corpo sentado numa cadeira, facilmente se prevêem melhores resultados. Finalmente, se a informação da localização for dada de forma de táctil, a medição deverá estar sujeita a erros menores, o que parece ser o caso.

4.4 Resenha dos resultados obtidos experimentalmente

No âmbito deste projecto e desta Dissertação foram realizadas várias experiências com o intuito de confirmar resultados já previamente obtidos por vários autores, de verificar a aplicabilidade da solução usada pelo SOS, de efectuar comparações entre pessoas cegas e não cegas, e de em última instância criar a sensibilidade necessária para perceber a problemática inerente a estas matérias.

Questões como a validação das experiências de diferenças interaurais, e a verificação da confusão trás-frente, foram importantes do ponto de vista pedagógico e crítico.

Tal como seria de esperar, grande parte dos resultados foram de encontro ao que na literatura se havia concluído. Por exemplo, na dimensão azimutal percebeu-se que pessoas cegas conseguem localizar com $2,22^\circ$ de erro médio ou $4,22^\circ$ de desvio padrão, os sons no espaço, muito de acordo com os resultados divulgados por Jens Blauert (Blauert, 1983).

Um aspecto testado que não havia sido encontrado em nenhuma experiência (o posicionamento de pessoas cegas e não cegas por baixo de fontes sonoras), contribuiu para dar alguma inovação à matéria e validar uma das características do sistema desenvolvido no âmbito do projecto (SOS).

De salientar que o trabalho experimental irá continuar com o acompanhamento da entrada em produção do SOS, que posteriormente dará origem a nova documentação sobre a matéria.

Capítulo 5

Sistema de Orientação Sonora

O sistema de orientação sonora é uma parte fundamental do sistema NAVMETRO®. O sistema NAVMETRO® é um sistema informativo e de apoio à navegação pessoal para pessoas cegas ou com deficiências na visão. Este sistema visa fornecer telefonicamente ao cliente da Metro do Porto deficiente da visão as mesmas condições informativas e de acesso que os clientes comuns possuem, com algumas condições:

- Não recorrer a dispositivos (hardware) complicados, caros, ou que os utentes não possuam já ou não possam adquirir com facilidade;
- Tornar todos os mecanismos simples, eficientes e expeditos, de forma a não desencorajar o seu uso;
- Implementar numa primeira fase de teste, o sistema na estação da Trindade do Metro do Porto (três pisos e a mais complicada de toda a rede);
- Não perturbar a operação normal da estação, nem os seus clientes;
- Criar um sistema claramente fiável e confiável de forma a poder ser usado por pessoas com necessidades especiais, e portanto particularmente sensíveis.

De forma a realizar esta função, o NAVMETRO® baseia-se em três partes fundamentais: o sistema interactivo por voz (IVR), o Sistema de Orientação Sonora (SOS), e o sistema de acesso à informação e actuação de recursos. Neste documento, apenas o segundo será abordado com mais profundidade dado tratar-se da responsabilidade directa do autor e do tema desta dissertação, embora a referência aos outros possa surgir, para explicar ou relacionar fenómenos.

De uma forma simples, o sistema, que cumpre já comprovadamente os requisitos acima referidos, é baseado numa interacção pessoa máquina realizada por canal telefónico e por bóias acústicas. É do conhecimento geral, que todas as pessoas possuem actualmente pelo menos um telefone móvel. No caso de deficientes da visão, a regra aplica-se e portanto faz-

se uso desse equipamento para se fazer uma chamada (gratuita) para um número que é atendido por um IVR que através de um cuidado e estudado diálogo, fornece opções e informações ao cliente. A vertente informativa é altamente otimizada de forma a não ser extensa nem de complicada memorização. Por vezes, é até função das preferências do próprio utilizador, ou mesmo dos dados de partida e destino que o mesmo selecciona. Esta interacção é realizada através de ASR (Automatic Speech Recognition) ou DTMF (Dual Tone Multi Frequential) tornando este processo confortável e fiável. Simultaneamente todo o texto gerado pelo IVR é também sintetizado por um TTS (Text-To-Speech) que de forma natural e muito agradável gera a conversação que é realizada com o utilizador. De seguida é ilustrado um diagrama que exemplifica uma utilização possível do sistema:

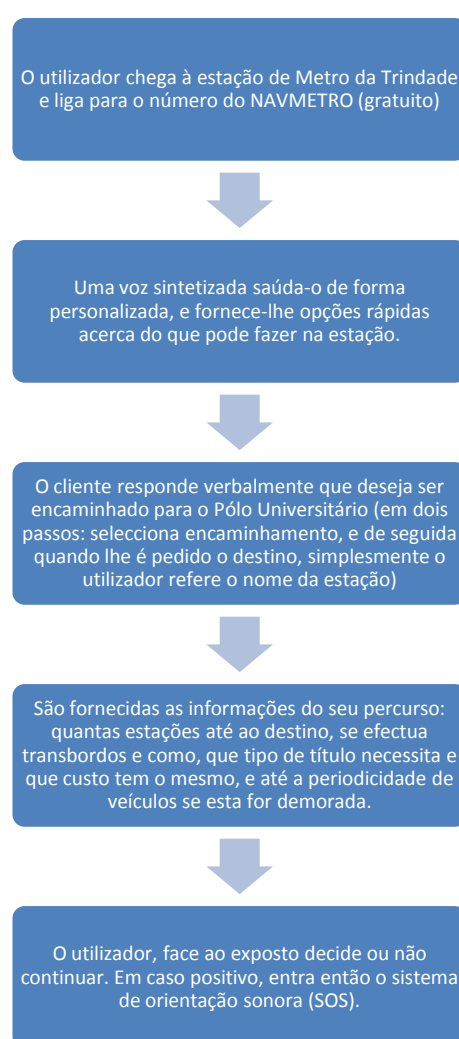


Figura 80 - Diagrama exemplificativo simplificado do funcionamento do sistema NAVMETRO®

Como se observa pela Figura 80 a entrada em acção do SOS dá-se apenas depois de se ter seleccionado um dado destino final. Esse destino pode ser interno à estação ou pode até ser uma estação distante de outra linha.

A sua função será a de conduzir de forma sonora os utilizadores através do espaço até ao seu destino seja ele qual for, fornecendo-lhe exactamente as mesmas condições que todos os outros utilizadores que são apoiados pela informação visual existente

Neste capítulo será abordada com alguma profundidade este sistema tão importante ao sistema NAVMETRO® que como o nome indica se baseia no seu princípio funcional: a navegação em espaços de Metro.

5.1 Especificação de Requisitos

Quando se projecta um dado sistema, é necessário especificar os requisitos para elaborar com segurança o que se pretende sem nunca perder de vista os constrangimentos e os objectivos que são propostos. Para tal, no início dos trabalhos torna-se necessário realizar os seguintes passos:

- Definição das características a testar no que diz respeito ao público-alvo;
- Verificação do meio ambiente (estação de metro);
- Contacto com as necessidades dos utilizadores.

5.1.1 Definição das características a testar e suas conclusões

Desde o início dos trabalhos que se tornou claro que seria necessário testar a capacidade que pessoas cegas têm em perceber de onde vem um determinado som, para se sentirem as dificuldades e se resolverem os problemas, de forma a cumprir os objectivos propostos.

Tal como foi descrito no capítulo anterior, foi necessário primeiramente testar pessoas sem deficiências devidamente vendadas e criar um esquema de testes que visou apurar se este tipo de orientação é funcional. Uma vez esta verificação realizada, foi então imperativo verificar a aplicabilidade das conclusões anteriores e estendê-las considerando acima de tudo o público-alvo: as pessoas cegas (à primeira vista, o caso extremo).

Realizados os testes descritos, chegou-se à conclusão que numa primeira fase apenas duas das três dimensões associadas à localização sonora seriam absolutamente necessárias para uma correcta navegação de pessoas usando referências sonoras: o azimute e a distância à fonte.

No que concerne à direcção azimutal, todos os resultados apontam para uma capacidade humana excepcional em perceber de onde provém um som. No caso das pessoas cegas, consegue-se provar que esta capacidade ainda é mais extraordinária, podendo até em alguns casos e cenários ser melhor de que a de pessoas sem deficiências na visão. Resultados obtidos pela literatura, e validados experimentalmente, comprovam isso mesmo.

Relativamente à distância à fonte, não é possível ter-se o mesmo optimismo, já que comprovadamente o ser humano tem uma fraca capacidade de perceber a distância que se encontra das fontes sonoras. Sendo esta estimativa maioritariamente baseada na intensidade, a capacidade de perceber a distância à fonte, está fortemente influenciada por factores externos e pela falta de referenciais. Conforme referido anteriormente neste documento, esta capacidade só melhora quando o ser humano cego ou tem referências e portanto detecta um aproximar ou afastar relativamente ao som. Contudo se a intensidade do mesmo variar, essa percepção pode tornar-se errónea.

Embora a terceira dimensão, a vertical, não seja obrigatória para a navegação, esta assume um papel que poderá considerar-se importante na criação do mapa auditivo gerado pelas pessoas cegas. Perceber-se se um som, provém da elevação sobre cabeça ou de junto dos pés, poderá ser uma valência para uma localização de objectos com detalhe. No entanto, a navegação propriamente dita dá-se principalmente num plano horizontal, e portanto aquela dimensão fará maior sentido que seja usada para descrição ambiental, mais que para navegação. Porém, a capacidade humana em localizar sons verticalmente (em elevação) também não é muito eficaz. É apenas em proximidade (ou no seu limite como foi demonstrado experimentalmente) que esta componente da localização começa a ser usada. À medida que o sujeito se aproxima do som, a componente azimutal (mais precisa) começa a perder importância e a localização vertical embora menos eficiente começa a preponderar, obtendo-se resultados muito satisfatórios para bóias sonoras a cotas não muito elevadas.

Numa vertente diferente é preciso apurar qual a forma de navegação mais eficaz. Se a baseada em “landmarks” (bóias sonoras) ou qualquer outro tipo baseada em informação vestibular e proprioceptiva como a integração de caminhos (velocidade ou aceleração). Colocou-se a hipótese de as pessoas serem capazes de navegar com referências relativas (à esquerda do som, atrás do som, etc.) ou se necessitam de referências absolutas (o som marca o local). Rapidamente se percebeu, que apenas a forma de navegação baseada em referências sonoras fixas, sempre presentes e constantes, pode ser utilizada com confiança. As alternativas, baseadas em integração de grandezas como a velocidade ou a aceleração, dependem de capacidades individuais que podem ser muito mais influenciadas por factores pontuais externos, causando erros muito mais significativos que podem acumular de forma muito grave em percursos extensos ou complicados. Testes informais realizados com pessoas cegas e não cegas permitiram confirmar o que já se encontrava referenciado na bibliografia, principalmente por não se conseguir reproduzir com fidelidade os mapas auditivos sobre a forma de um percurso. Depois da técnica do quadrado, vem o teste do quadrado, e um teste tão simples como dar dois passos para a frente, dois passos para a esquerda, novamente dois para a esquerda, e finalmente outra vez dois passos para a esquerda, falha redondamente. Certas pessoas chegam mesmo quase a dar duas voltas, sendo que nenhuma fica sequer perto da posição final. Isto comprova a falta de capacidade motora em fazer corresponder uma

forma geométrica conhecida em movimento. Se a este facto se somarem ainda possíveis erros relacionados com a interpretação sonora dos segmentos de recta que compõem um percurso, facilmente se percebe que a navegação se deverá basear num mecanismo constante de determinação azimutal por aproximações sucessivas, até à imediação da fonte sonora, onde se nota também um pico na sua intensidade.

5.1.2 Verificação do meio ambiente

É definitivamente um desafio desejar implementar um sistema que use as capacidades auditivas humanas num ambiente acusticamente reverberante, e com uma variedade de cenários sonoros tão diversificados como uma estação de metro de três pisos com características muito diferentes. As variáveis são muitas e os intervalos que assumem têm amplitudes diversas. A presença de pessoas, a chegada, partida, ou abertura de portas de um veículo, o nível da intensidade sonora da informação ao público ou da MetroTV, o ruído citadino vindo do exterior, o elevado ruído dos exaustores da estação, e muitos outros pequenos factores, são os problemas que uma análise de ruído à estação da Trindade demonstrou. Embora a estação na sua generalidade seja um local mais silenciosos que outros sistemas de Metro, a verdade é que medições de ruído realizadas no âmbito deste projecto demonstraram níveis de ruído em situação normal numa medição prolongada de 22 minutos, que rondam os 72dBA no piso da superfície.

O silêncio absoluto é algo que é inatingível quando interpretado pelo ser humano, e portanto falar de ruído é sempre uma questão relativa. Qualquer utente de um sistema de metropolitano de uma rede mais antiga como por exemplo a de Lisboa, fica surpreendido com a diferença de ruído que na rede de metro do Porto se encontra, podendo até descrevê-la como sendo silenciosa. O conhecido John Cage, famoso compositor americano do século 20, realizou uma experiência que se revelou como sendo extremamente elucidativa deste conceito. Fechando-se numa câmara anecóica silenciosamente por 30 minutos constatou surpreendentemente que começou a ouvir dois curiosos sons: um som agudo contínuo, e um som grave e periódico. Quando interrogado acerca do fenómeno ele descreveu os sons como sendo respectivamente o seu sistema nervoso, e o seu sistema circulatório (Buxton, Gaver, & Bly, 1994). Esta curiosa constatação confirma a não existência do silêncio absoluto, mas sim mais ruído e menos ruído.

É então evidente a necessidade de avaliar acusticamente e de forma absoluta a estação da Trindade. Tal análise foi realizada e serviu de base ao cálculo das intensidades sonoras necessárias aos altifalantes. Considerando um alcance máximo pretendido de 5 metros (especificação de projecto), e a necessidade de acréscimo de 10dB_{SPL} (valor bastante seguro) para se distinguir o som do ruído ambiente do som a reproduzir, considerando também um valor médio de ruído de 72dBA equivalente a $78,65\text{dB}_{\text{SPL}}$ (valor médio do piso mais ruidoso), e

finalmente acrescentando $4dB_{SPL}$ devido à contribuição da reverberação num espaço fechado como o da estação, calcula-se que a pressão a 5m deva ser superior a $84,65dB_{SPL}$.

$$P_{5m} \geq 78,65 + 10 - 4 = 84,65dB_{SPL} \quad (5.1)$$

Como para 5 metros existe uma atenuação de $6,66dB_{SPL}$, a potência máxima disponível do altifalante a 1 metro de si terá de ser $84,65+6,66= 91,31dB_{SPL}$. Desta forma, todos os dispositivos escolhidos terão que obedecer a este critério mínimo na sua folha de especificações no que respeita à pressão acústica máxima.

Na Figura 81 observam-se três situações características de cada piso. Na superfície e no piso intermédio, ilustram-se situações normais. No piso inferior, sendo muito silencioso, opta-se por mostrar uma situação de ruído moderado aquando da chegada de um veículo.

Pela análise dos dados e considerando as frequências centrais às quais o ouvido humano é efectivamente sensível (mais cinzentas na figura), percebe-se que dos valores de ruído para uma sensibilidade tipo A não são preocupantes para os utilizadores pontuais da estação. Contudo, para o sistema sonoro do SOS ser audível e efectivo terá de superar este nível de pressão acústica, principalmente às frequências predominantes que os sons utilizados operam.

f (Hz)	Normal superior	Normal Intermédio	Chegada Inferior
12,5	58,9	58	60,7
16	61,8	65,5	64,6
20	61,8	63,9	61,8
25	60,2	68,2	63,2
31,5	63,7	67,8	64,7
40	64,4	64,6	68,3
50	66,2	63	70,3
63	58,8	62,9	64,7
80	57,1	60,2	62,8
100	61	59,4	65
125	64	60,1	66,9
160	67,3	58,9	68,4
200	64,9	58	66,7
250	63,2	60	65,2
315	63,5	61,9	65,4
400	64,5	60,8	69,9
500	63,9	61,6	68,1
630	63,7	61,5	64,6
800	62,6	60,9	62,7
1k	62,9	58,4	62,7
1,25k	62,8	57,8	61,4
1,6k	58,5	55,6	59,6
2k	58,5	53,3	58,3
2,5k	58,5	50,7	58,3
3,15k	53,9	49,4	56
4k	52,3	47,2	54,9
5k	50,8	43,7	53,8
6,3k	48,8	40,7	48,9
8k	41,9	37,8	42,6
10k	40,1	33,7	36,9
12,5k	34,8	29	36,2
16k	28,7	24,2	41,8
20k	22,9	---	21,6
A	71,5	67,8	72,8
L	76,9	76,2	79,4
DeltaT	22:06	02:45	01:09

Figura 81 - Extracto das medições de ruído efectuadas em três situações, uma em cada piso (dBA)

Uma análise mais aprofundada aos resultados obtidos, permite detectar determinadas características sonoras da estação aquando de alguns eventos, como a chegada de um veículo e o aparecimento de picos na zona dos 400Hz onde predominam ruídos mecânicos dos veículos à chegada, como se pode observar na Figura 82.

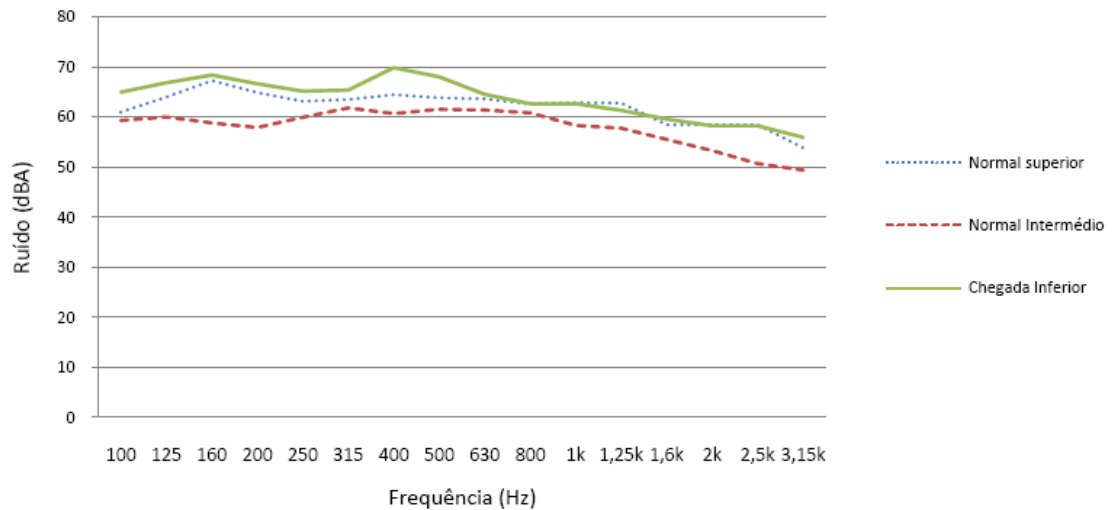


Figura 82 - Gráfico de variação do ruído em função da frequência para três situações em três pisos da estação da Trindade

Uma análise às restantes medições de ruído efectuadas permite detectar outras características típicas da estação como o “beep” das portas, e a campainha que os veículos tocam quando chegam à estação. Contudo, para efeitos do projecto do SOS, uma análise aos valores médios é suficiente para efectuar um correcto dimensionamento da instalação sonora. Verificou-se que o piso superior possui os níveis acústicos mais elevados, e que a chegada e partida de veículos não altera significativamente os níveis de pressão sonora neste piso. Este fenómeno deve-se à elevada interferência que este piso sofre do ruído exterior à estação, relativo às ruas e à passagem de veículos na sua proximidade. No piso inferior o factor mais marcante é o da partida e chegada de veículos. Nas medições efectuadas verificou-se que o nível de ruído “em silêncio” ou “com pessoas” é mínimo, oferecendo níveis muito baixos de ruído, não constando sequer da análise. Isto deve-se certamente à altura dos pés-direitos dos tectos, e ao facto de não haver ruído exterior. No piso intermédio, tendo sido realizados todos os testes em “horário de ponta”, verifica-se uma variação significativa aquando da chegada de veículos do piso de baixo, ou do piso de cima. Isto deve-se não aos veículos mas ao movimento de pessoas que de um momento para o outro invadem aquele piso apenas de passagem.

Numa outra perspectiva que não a sonora, é também importante analisar os requisitos no que concerne a condicionantes físicas: perigos, barreiras arquitectónicas, as linhas e os seus

desníveis, esquinas, becos, e afins. Desta análise surgiram várias constatações relativas ao ambiente de estação, e dos cuidados a ter no projecto do SOS.

O primeiro aspecto a considerar foi efectivamente a presença de um desnível assinalável na zona das linhas. Uma queda por parte de um utilizador mais distraído, poderá ter repercussões muito complicadas e preocupantes, devendo ser evitada a todo o custo. Um segundo aspecto, prende-se com a existência de esquinas aguçadas, e de mobiliário saliente como contentores de lixo, e corrimões de protecção da linha. Já em segundo plano e relacionado com o primeiro aspecto referido, constatou-se a existência de locais de passagem relativamente apertados muito próximo dos cais de embarque. Com o avolumar de pessoas a aguardar os veículos nessas zonas, os espaços de passagem ficam diminutos podendo conduzir a pessoa cega a aproximar-se perigosamente do desnível do canal (“linha”) e ocasionar um acidente.

Deste processo de avaliação do meio ambiente, resultaram um conjunto de medidas que foram tomadas em consideração no mecanismo de encaminhamento projectado (SOS). Como se poderá ler posteriormente, as tabelas de roteamento desenhadas com intervenção humana, a escolha dos sons, e o dimensionamento da instalação sonora, tiveram efectivamente em consideração os aspectos relacionados com as constatações obtidas nesta fase de observação.

5.1.3 Contacto com as necessidades dos Utilizadores

Não é possível pensar em criar um sistema para pessoas com necessidades especiais sem as consultar para isso. Graças à Associação de Cegos e Amblíopes de Portugal (ACAPO), isso foi possível desde início, mostrando-se desde logo necessário entrar em contacto com os futuros utilizadores e perceber as suas angústias e anotar os seus desejos para criar um sistema adaptado às suas necessidades.

Neste período de consulta e de inquérito, foi muito fácil perceber a frustração que afecta estas pessoas no que diz respeito à acessibilidade. Estes contactos permitiram especificar uma série de funcionalidades que o sistema teria de ter, para efectivamente cumprir esses propósitos. No entanto, é de se notar que existem algumas alterações que foram sugeridas que não estão ao alcance da realização deste sistemas, mas que foram devidamente encaminhadas, sendo que algumas delas até já estão a ser resolvidas.

Curiosamente, chegou-se à conclusão que a especificação de funcionalidades inicial, dispunha até de mais condições para utilizadores cegos, que para o público em geral que é obrigado a reunir informação, ver mapas, consultar tabelas gerais, etc.. Este facto, não compensa obviamente a deficiência que está implícita, mas é prova clara do esforço de promoção de acessibilidade que está implícito.

Este facto leva a equipa de coordenação do projecto a pensar que uma possível ideia será alargar o âmbito do projecto ao público em geral, especialmente aquele que usa o sistema de

metro pontualmente de possíveis nacionalidades diferentes. Contudo a sua vertente de orientação sonora, será obviamente de manter exclusiva, até por motivos de reserva de recursos, já que como se verá posteriormente, optou-se por limitar um utilizador por piso, ficando os restantes em fila de espera.

Uma questão que se destaca imediatamente quando se fala num sistema sonoro, é perceber em que medida as necessidades de uns, podem provocar problemas em outros. Será que a existência de referências sonoras a serem seguidas por pessoas cegas vão contribuir para um aumento da pressão sonora de um dado piso numa estação, e por isso causar desconforto aos restantes utilizadores? Uma pessoa não cega, é também um utilizador, e as suas necessidades podem de certa forma entrar em conflito com as das pessoas cegas. Muitos dos sistemas de navegação pessoal que servem de apoio a deficiências da visão, são autónomos e viajam com o próprio indivíduo (óculos com CCDs, bengalas com sonar, mochilas com hardware, etc.), que em alguns casos usa auscultadores. Nenhum sistema encontrado baseia-se na emissão sonora focada individualmente em ambiente público para efeitos de navegação, como este o faz, e é este o motivo que o faz ser alvo de uma patente, e que o torna inovador e fascinante. Será contudo que esta aparente limitação o prejudica? Em alguns semáforos, a luz verde nas passadeiras é acompanhada por um sinal acústico bastante agudo e intermitente para informar qual o momento de passagem para o outro lado às pessoas cegas. Muitos moradores em zonas urbanas, especialmente em horário nocturno, poderão não gostar muito desta funcionalidade, mas é certo que beneficia em muito a qualidade de vida e segurança destes utilizadores especiais.

Inicialmente os testes de localização sonora espacial realizados em estação foram realizados com sons tipo “chirp” (tal como foi referido no capítulo anterior). Estes sons pouco naturais, apesar de serem muito adequados para serem localizados em ambientes reverberantes, causavam uma clara estranheza aos transeuntes que usavam a estação não conhecedores do que se estava a passar. Quando interrogados, embora não descrevessem a situação como desconfortável, ficavam contudo alertados. Alguns alegaram até existir uma semelhança com sirenes de emergência tipo incêndio, que claramente os perturbava. Quando se justificava que se tratava de um sistema de apoio a pessoas cegas, aí todos os interrogados se mostraram compreensivos, enaltecendo até o esforço. Contudo, as opiniões genuínas eram efectivamente as iniciais, e seriam efectivamente aquelas a ter em consideração.

Durante este período de recolha de informações sobre o que são as necessidades dos utilizadores (cegos e não cegos), foi perceptível a significativa quantidade de informação sonora verbal que assola a estação. Devido a este facto conclui-se que qualquer contribuição sonora adicional, se deva fazer preferencialmente com sons que não de voz.

Por outro lado verificou-se que devido à arquitectura muito peculiar da estação em causa (Trindade), e aos seus variados recantos, a cobertura sonora dos espaços deve ser cuidada, de forma a cobrir todos os espaços e possibilidades do espaço.

Conclui-se portanto que a difusão sonora em espaços públicos não pode ser realizada sem ter alguns aspectos em consideração:

- Incremento dos níveis de pressão sonora;
- Influência que o tipo de som terá nos restantes utilizadores;
- Interferência causada na percepção da restante informação sonora verbal;
- Cobertura espacial da estação.

Estando a projectar-se um sistema de navegação para pessoas cegas, é fundamental perceber quais as necessidades de movimentação das mesmas, e determinar se existem obstáculos para as mesmas. Apesar do esforço notável por parte da Metro do Porto, em dotar as suas infra-estruturas (estações e veículos) de condições de acessibilidade física, muito há ainda a fazer. Os inquéritos realizados nesta matéria mostraram várias situações comuns, sendo que no entanto se destacam pela importância as seguintes:

- Falta de acessibilidade das máquinas de venda de títulos e elevadores;
- Falta de informação em suporte táctil (Braille, etc.);
- Bordos dos cais por vezes não assinalados com guias tácteis eficazes.

No que concerne às necessidades de movimentação da estação a resposta foi na realidade simples: as pessoas cegas têm exactamente as mesmas necessidades que todas as outras. Poder-se-ia pensar que prefeririam escadas fixas em detrimento de escadas mecânicas ou elevadores, ou mesmo que máquinas de “vending” seriam a evitar por não serem facilmente acessíveis. No entanto as respostas não dão margem de engano possível, frisando o que é tido como o verdadeiro conceito de acessibilidade: as mesmas condições de acesso que todos de forma igualitária.

Os possíveis destinos da estação a considerar são então:

- As máquinas de venda de títulos (também como opção de passagem quando um destino tipo estação é seleccionado);
- Os validadores (também como opção de passagem quando um destino tipo estação é seleccionado);
- A Loja Andante;
- Os dois bares;
- As várias máquinas de “vending” agrupadas em duas zonas no piso inferior;
- O WC;
- Cada uma das três saídas possíveis indicadas pela rua onde se ligam (Trindade, Bom Jardim, e Camões);

- E cada um dos cinco cais possíveis de embarque com as dezenas de destinos de estações associados a cada um e associados a 6 linhas.

Do ponto de vista da informação a fornecer ao utilizador cego, existirão dois tipos de informação necessária: informação descritiva necessária à movimentação na estação, e informação relativa à viagem de metro. O primeiro prende-se com fornecer pormenores como os locais dos botões de elevador, o tipo de escadas (mecânicas, ou fixas), o número de andares a subir ou descer de elevador, etc.. O segundo será relativo à informação escrita e gráfica que se encontra afixada na estação, como por exemplo, o número de estações até um dado destino e o sentido a tomar, o número de zonas para um percurso, o custo desse número de zonas, o local de embarque, etc..

Uma vez fornecidos estes destinos possíveis, e esta informação valiosa, e considerando as condicionantes encontradas e referidas, está estabelecida a base necessária para realizar um sistema acessível e que melhora de forma significativa o usufruto das estações por pessoas com deficiências visuais.

5.2 Guiar as pessoas com som

Como foi referido anteriormente, é perfeitamente viável conduzir pessoas cegas (e mesmo não cegas) com o uso de referências sonoras. Cada indivíduo pode fazê-lo, usando um mecanismo constante de determinação azimutal por aproximações sucessivas enquanto caminha até à imediação da fonte sonora, onde nota um pico na sua intensidade e um aumento da elevação, e percebe que chegou ao local.



Figura 83 - Ilustração do trajecto perfeito AB (mais escuro) versus um trajecto típico por aproximações sucessivas (mais claro)

Na Figura 83 ilustra-se um caso muito simples em que o ponto A e o ponto B têm linha de vista sem obstáculos pelo meio. No entanto, é frequente a situação ser bastante mais complicada, como por exemplo se considerarmos que existe o fosso da linha de metro entre os dois pontos, que obrigue a usar escadas para uma passagem inferior para se chegar ao outro lado. Nesse caso, torna-se necessário coordenar uma série de dispositivos que de forma

inteligente vão marcando pontos de passagem no percurso. Daí advém o conceito de bóias sonoras ou “landmarks” referido anteriormente. Na Figura 84 ilustra-se isso mesmo sendo representado por “E1” o ponto de início das escadas de descida para a passagem inferior. O ponto “E2” será o do início das escadas ascendentes ainda na passagem inferior.

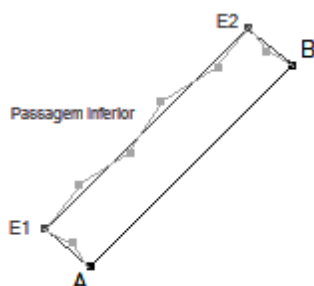


Figura 84 - Ilustração do conceito de navegação por “landmarks”

Pelas situações acima demonstradas, percebe-se o conceito de encaminhamento simples e composto, que o SOS usa no seu funcionamento. Para implementar a situação descrita segundo a filosofia do sistema SOS seriam necessárias as seguintes bóias sonoras:

- E1 - a representar o início das escadas de descida para o piso de baixo onde se dá a passagem inferior;
- E2 - a representar o início das escadas para a subida para o piso original, mas do outro lado da linha;
- B - a representar o destino final já do outro lado da linha (por exemplo o local de embarque no veículo).

Como se pode imaginar, a coordenação da activação e desactivação de sons, parte de uma inteligência de um sistema avançado que é centralizado na sala técnica sem intervenção de operador. Para decidir qual o caminho a adoptar, este sistema deverá ter cinco dados fundamentais: o local de partida, o local onde se encontra num dado momento, a preferência de interface de um dado utilizador (escadas, elevador, ou a opção mais rápida), o tipo de som preferido pelo utilizador, e o destino.

A localização inicial e o destino pretendido, são os dados fundamentais para se traçar um dado roteamento em direcção ao destino seleccionado. Contudo, ter a informação da localização da pessoa pontualmente, ou a todo o momento, também o é, já que se torna necessário coordenar a actuação/desactuação dos dispositivos sonoros. O tipo de som usado e a preferência no uso de interfaces, são efectivamente menos importantes num contexto de encaminhamento, mas ditarão certamente a facilidade e a satisfação com que o fazem.

No que respeita a conhecer a posição das pessoas em pleno encaminhamento, várias abordagens foram testadas. Numa fase inicial, pretendia-se utilizar o campo gerado por um Access Point Bluetooth para perceber a chegada de um utilizador ao raio de um dado local. O telefone móvel do utilizador registar-se-ia e comunicava centralmente que um dado endereço físico se encontrava no campo desse dispositivo sinalizando a sua posição. Posteriormente, devido a limitações técnicas da tecnologia Bluetooth (elevada latência no registo, consumo nos equipamentos móveis, campo gerado pouco limitado), passou-se a uma abordagem de localização por Wi-Fi absoluta, denominada por WPS. Esta nova forma de localização de pessoas, permitiria teoricamente localizar num dado mapa e a todo o tempo um dado telefone móvel com a mesma tecnologia desde que existisse um software cliente instalado nesse equipamento. De uma forma simples, esse telefone móvel e a aplicação cliente referida, ligar-se-ia à rede Wi-Fi que foi instalada para o projecto (para comunicação VOIP sobre Wi-Fi, como alternativa à ligação GSM) e comunicaria a uma dada aplicação qual as intensidades de sinal recebidas de cada Access Point nessa localização. Essa aplicação, possuindo um modelo previamente concebido do espaço, faria com uma margem de erro relativamente baixa uma previsão do local onde o equipamento se encontraria. Contudo, até à data a empresa fornecedora dessa solução de localização não conseguiu ainda ultrapassar dificuldades ambientais electromagnéticas, sendo os resultados até à data insuficientes para serem usados com confiança em algo tão importante como saber onde as pessoas se devem dirigir, com as implicações que segurança que se podem imaginar, e que serão discutidas posteriormente neste documento. Foi então necessário introduzir um conjunto de técnicas alternativas que substituísse, mesmo que provisoriamente, essa forma de localização. Essas técnicas baseiam-se na confirmação por parte do utilizador da sua posição quando na imediação de uma bóia sonora, e serão discutidas com profundidade posteriormente no ponto 5.4.

Tal como referido, a escolha do caminho a ser percorrido em função dos pontos de partida e de destino, será função das preferências do utilizador. Se ele prefere escadas em vez de elevador, será conduzido sempre por escadas. Se a sua preferência é seguir pelo caminho mais recomendado, aí o caminho escolhido será o mais eficiente independentemente se a forma de mudança de piso é realizada por escadas ou elevador. Para a escolha deste caminho, everedou-se inicialmente por um mecanismo de roteamento automático que decidia em tempo real qual o caminho mais curto colocando pesos nos ramos constituídos pela união de cada ponto onde se encontravam bóias sonoras. Contudo, após alguma análise concluiu-se que este mecanismo para servir completamente todas as condições para um roteamento eficaz, tornar-se-ia muito complicado e pesado, e tendo sidas analisadas todas as possibilidades, optou-se por mudar para um roteamento baseado em tabelas fixas que face a qualquer zona de partida da estação, possui o caminho optimizado para cada tipo de preferência visto caso a caso. A importância de um caminho seleccionado considerando

questões como o movimento de pessoas numa zona, como a usabilidade da estação, como a existência de perigos para pessoas cegas, ou outras questões mais pequenas, é como se pode imaginar muito importante. A introdução deste tipo de restrições a um roteamento automático, para além de complicado, tiraria a flexibilidade futura a um possível operador administrativo em alterar caminhos, numa medida excepcional de evitar um dado local por motivo de obras por exemplo. Portanto, com uma tabela fixa de roteamento, qualquer pessoa com conhecimento da arquitectura pode operar alterações de forma muito fácil, segura, e eficaz.

A problemática do caminho mais curto, ou do caminho mais rápido, é uma questão incontornável quando se aborda a acessibilidade. É do conhecimento geral que o caminho acessível para pessoas de mobilidade reduzida é quase sempre mais longo e demorado. Isto deve-se normalmente a questões estruturais da arquitectura, e da colocação de elevadores em espaços. Contudo, quando se aborda a acessibilidade para cegos, o melhor caminho é o caminho que a pessoa escolher, supondo que não haja mobilidade reduzida e não haja constrangimento quando ao uso de escadas ou elevadores. No entanto, na presença de alguns perigos como o de queda à linha, ou a existência de esquinas e obstáculos, ou mesmo volumes significativos de trânsito de pessoas em zonas estreitas, colocam na equação do caminho a escolher factores adicionais. Justifica-se devido a esse facto, um dos motivos da escolha do caminho a realizar tendo por base uma tabela pré-concebida.

No que concerne à escolha do tipo de sons a serem usados no encaminhamento sonoro, de forma a cumprir os requisitos referidos, e não incomodar outros utilizadores, a opção recaiu no som de aves. Para além de serem óptimos para serem localizados (como foi demonstrado no capítulo anterior), não incomodam os restantes utilizadores de nenhuma forma. O seu chilrear agradável (de sons pré seleccionados por serem agradáveis e fáceis de seguir) contribui para tornar mais agradável um espaço urbano, mecânico e tenso como o das estações de metro típicas. A experiência no seu uso tem surtido óptimos resultados, tendo até sido alvo de vários recortes de imprensa.

5.3 Instalação SOS

Tendo já certezas em relação em relação à possibilidade de uso do conceito de orientação sonora, e dispondo já da necessária preparação, era então altura de concretizar o SOS.

Sendo uma estação de três pisos, com uma área considerável, e três interfaces de metro diferentes, apresentava-se então um desafio bastante significativo. Aliás, esse havia sido o motivo da escolha da estação da Trindade como objectivo para esta fase inicial do projecto.

Para a instalação física deste sistema, foi necessário:

- Realizar a escolha do tipo de dispositivos sonoros a utilizar;
- Desenho e projecto de posicionamento de dispositivos na estação de forma a fazer face a todas as necessidades de cada utilizador (indiscriminadamente);
- Conceber e instalar todo o sistema de controlo e suas ligações;
- Organizar e coordenar toda a instalação e ligação de dispositivos.

Do SOS concretizado resultaram:

- 55 Dispositivos sonoros (a sua maioria localizada em pontos de interesse, ou em interfaces tipo escadas ou elevadores);
- 5,6Km de cabos (de variadas secções e tipos);
- 5 tipos de altifalantes e de fixações (em vários locais, com vários tipos de impacto visual, e com diferentes tipos de direccionalidade pretendidos);
- Um bastidor técnico com equipamento de difusão sonora, e todas as ligações centralizadas.
- O constante respeito pelas infra-estruturas já existentes (sistema de som existente, sistemas de emergência, limpeza, CCTV, Metro TV, etc.).

Devido às distâncias grandes entre a sala técnica da estação (local onde se situa o bastidor do sistema) e os dispositivos, foi necessário efectuar cálculos e recorrer ao transporte de som em tensão elevada. Em anexo podem-se encontrar os cálculos realizados para determinação das secções de cabos, em função das potências desejadas e do tipo de dispositivo na extremidade, e respeitando um critério de menos de 3% de perdas. Os mesmos cabos tiveram também de obviamente respeitar as condições de segurança impostas nas instalações Metro do Porto no que concerne a emissão de gases em caso de incêndio.

Foi também realizado um grande esforço de actualização de mercado de forma a encontrar soluções de hardware que servissem os propósitos desejados, quer em altifalantes, quer nos dispositivos a montante responsáveis por gerar o som.

O SOS incluiu a criação de zonas que visaram servir os trajectos que haviam sido pensados para roteamento dentro da estação. Estas zonas compreendem vários pontos de interesse e visam funcionar como unidade para a localização das pessoas na estação, tendo em vista o encaminhamento das mesmas. Na Figura 85 observa-se em planta o piso inferior da estação da Trindade onde se observam as zonas 15 a 20. Embora com limites graficamente definidos, estas zonas têm apenas fronteiras aproximadas, sendo as suas zonas de intercepção distantes de dispositivos sonoros.

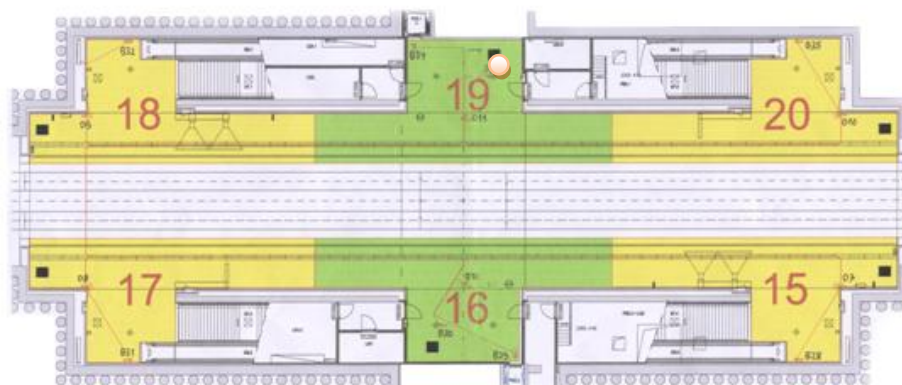


Figura 85 - Planta com o zonamento SOS do cais inferior da estação da Trindade

Tal como foi referido anteriormente, a “zona” é a unidade definida como a área aproximada de um local de partida para um dado percurso. Imaginando que um utilizador sai das escadas que vieram do piso intermédio (acima do ilustrado) na zona 18, a tabela de encaminhamento correspondente à preferência do utilizador que no caso prefere o “melhor caminho” (com um excerto Tabela 9) procurará uma correspondência entre a zona 18 e o seu destino que poderemos assumir como sendo as máquinas de “vending”, marcado com um ponto laranja num dispositivo denominado por B33. Este exemplo de percurso pode ser visto com mais detalhe na Figura 86.

Tabela 9 - Encaminhamento da preferência “melhor caminho” tendo como partida a zona 18

18	Loja Andante	B32	B21-S1	B8		
18	Bar	B32	O8	O9-P	B25	O4-I
18	Máquinas de Vending	O11-P	B33			
18	Casa de Banho	B32	O6-I			
18	Saída Trindade	B32	B22	B1		
18	Saída Bom Jardim	B32	O8	O9-E	B13-I	
18	Saída Camões	B32	O8	O9-E	B14	
18	Cais Dragão	B32	B22	D2		
18	Cais Póvoa	B32	O8	O9-P	B25	D5-I
18	Cais S. João	D9-I				
18	Cais D. João II	B32	B16	D7-I		
18	Cais Póvoa Expresso	B32	B21-S1	D3-I		

Pela tabela referida, é possível observar-se que o encaminhamento composto necessário para o conjunto: partida zona 18, destino máquinas de “vending”, com a opção do “melhor caminho”, se faz pelo “O11-P” e posteriormente chegando ao destino B33, conforme a Figura 86.

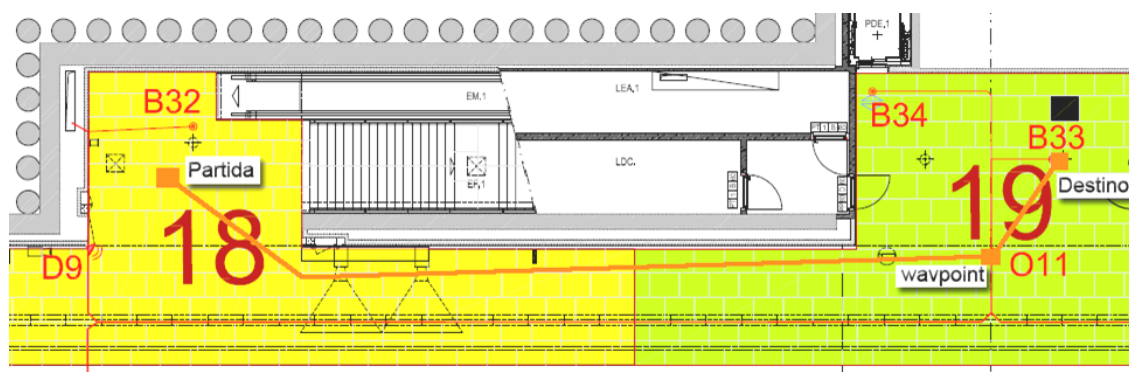


Figura 86 - Pormenor da planta ilustrando um exemplo de encaminhamento

Uma leitura mais cuidada terá verificado a existência de um dispositivo denominado por “O11” na planta, e uma referência diferente (“O11-P”) na tabela de roteamento. Esta diferença introduz o conceito de dispositivo sonoro virtual. Esta subtilidade na denominação é interpretada pelo “Sound Server” (ferramenta que coordena toda a operação do sistema sonoro descrita posteriormente), como uma forma de transmitir informação adicional para além do dispositivo a ser actuado. O dispositivo “O11”, para além de ser de passagem “-P” é também usado noutras rotas como dispositivo tipo “-I” e portanto de interesse. Neste último caso ele representa a posição central do cais, óptima para embarcar em veículos em direcção ao Hospital São João.

Adicionar este tipo de informação ao dispositivo foi uma forma eficaz de passar informação adicional sem recorrer a mais tabelas e sem torná-las demasiado densas e complicadas de preencher manualmente. Por outro lado, este mecanismo torna-se muito útil para passar mensagens ao sistema de voz interactivo (IVR) que é responsável pela interacção com o utilizador. Considerando um dispositivo sonoro à entrada de um elevador, será lógico pensar que a sua simples actuação embora conduza a pessoa para o elevador, não lhe transmite se terá que subir ou descer, ou quantos andares o terá de fazer. No apêndice C encontra-se um excerto das tabelas que são interpretadas automaticamente pelo “Sound Server”. Estas tabelas incluem também as mensagens a ser transmitidas por telefone ao utilizador como pistas para localizar melhor objectos ou locais. O exemplo referido do elevador, é prova disso mesmo. Na mensagem de encaminhamento para um elevador, é descrito o local onde se encontra o botão de chamada do mesmo. Estas ajudas, e o facto da maioria dos objectos e locais se encontrarem a elevações conhecidas é o facto pelo qual este sistema não se baseia na localização vertical, tal como foi explicado anteriormente, a não ser quando se pretende que o utilizador fique imediatamente por baixo da fonte sonora.

Para criação dos pontos onde se situarão as fontes sonoras, e a limitação das zonas referidas, foram estudadas exaustivamente todas as possibilidades de forma a não acontecerem erros ou não acontecerem ambiguidades, que numa instalação desta dimensão implicariam certamente grandes custos e transtornos. Como foi referido, houve também um

cuidado muito grande na definição dos caminhos, em minimizar possíveis perigos ou zonas muito populadas. Foi portanto uma tarefa de enorme responsabilidade que agora pode ser anunciada como tendo sido muito bem sucedida.

Quando inicialmente se começou o projecto bastaria uma placa de som multicanal com 24 canais para exteriorizar sons para os pontos de parte da estação. Seria apenas um projecto-piloto e portanto seria de demonstrar o seu funcionamento em parte da estação. Rapidamente se desejou expandir o projecto a toda a estação, e mesmo tendo dimensionado inicialmente o hardware com margens, foi impossível prever tamanha alteração e tornou-se necessário encontrar uma solução de recurso que permitisse usando pouco mais hardware e orçamento limitado, implementar a solução. Foi então necessário implementar uma alteração e adicionar um novo conceito: orientação absoluta de curta distância. Por um lado haveria os altifalantes a permitir orientar as pessoas a grandes distâncias (previstos inicialmente), por outro lado teriam de existir pequenos dispositivos (de actuação por tensão DC) que permitissem fazer pequenos encaminhamentos desde os anteriores até aos destinos finais. Estes dispositivos era actuados ou não por uma placa de relés com ligação USB (Figura 87) que se encontrava ligada ao computador servidor onde o software “Sound Server” operava. Abrir um relé “N” actuaria o dispositivo “N” que passava a ser alimentado por uma fonte que se encontrava no bastidor. Fechar o relé, cortaria a sua alimentação ficando desactivado.

No exemplo acima referido, o “O11” seria de “altifalante Omnidireccional 11” e o “B33” de “Buzzer 33”. Poder-se-ia pensar em utilizar altifalantes mesmo para soluções de proximidade, no entanto por motivos orçamentais foi necessário pensar em “buzzers” que por serem de accionamento por uma tensão DC, ficavam na sua generalidade muito mais económicos. Tinham contudo o inconveniente grande de possuírem um som fixo tipo “beep” incomodativo e relativamente alertante para os outros utentes, motivo pelo qual foram recentemente substituídos por altifalantes também de pequena dimensão usando os mesmos sons que os outros já existentes. Tal como se havia especificado nos requisitos, não é aceitável prejudicar o ambiente acústico da estação. Portanto uniformizar tudo com sons de aves, passa até a contribuir para um ambiente natural e relaxante.



Figura 87 - Placa de Relés comandada pelo “Sound Server”

Uma vez alterados os dispositivos tipo “buzzer” para altifalantes, foi necessário pensar numa forma de conseguir enviar som controlado individualmente para os mesmos, não adquirindo mais amplificadores ou saídas de placa de som. Optou-se então pelo uso de saídas de som de reserva já existentes e multiplexadas por intermédio da mesma placa de relés conforme esquema em anexo. Como por motivos de segurança se enveredou por orientar uma pessoa de cada vez por cada piso, ficou alocada a cada piso uma saída de som amplificada (3 das 4 possíveis em reserva). Cada uma dessas saídas fica ligada em comum a todos os dispositivos tipo “buzzer” dependendo do piso, seleccionando-se o dispositivo a ser actuado em exclusividade por piso, através da placa de relés já existente e ligada aos dispositivos. Assim, em vez de interromper a alimentação DC que os “buzzers” necessitavam, interrompe-se assim a saída amplificada de som, que é emitido de forma coordenada e sincronizada com a abertura dos relés.

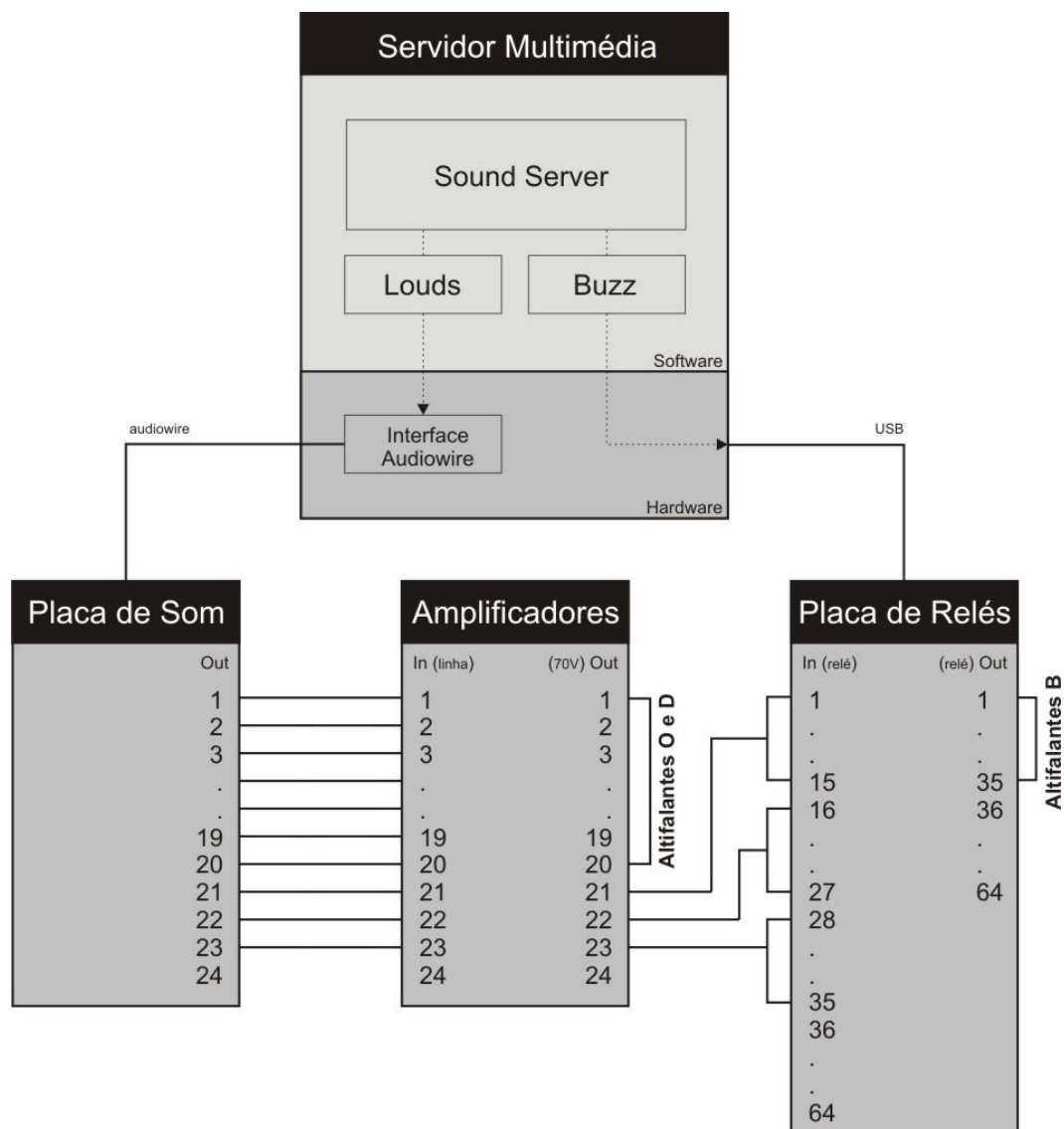


Figura 88 - Esquema funcional do SOS

De uma forma resumida apresenta-se o equipamento que consta como sendo a parte fixa do sistema, ou seja o equipamento que dá origem ao sistema de orientação sonora:

- Bastidor (com acessórios e instalação eléctrica)
- Motu 24 I/O + PCI-Exp 424
- Placa de Interface Digital de 64 relés QUANCOM USBREL64
- 2X Amplificador Yorkville Coliseum CA12 (12 canais com saída a 70V)
- 55X Altifalantes 70V RCS
 - 4X - RC-120-C (embutir)
 - 11X - CS-015 (direccionais)
 - 5X - KL-620 (omnidireccionais)
 - 30X - CSL-106 (embutir pequenos)
 - 4X - KL510 (omnidireccionais pequenos)
 - 1X - CSP-115 (directional de exterior)
- PC Servidor HP com performance multimédia.

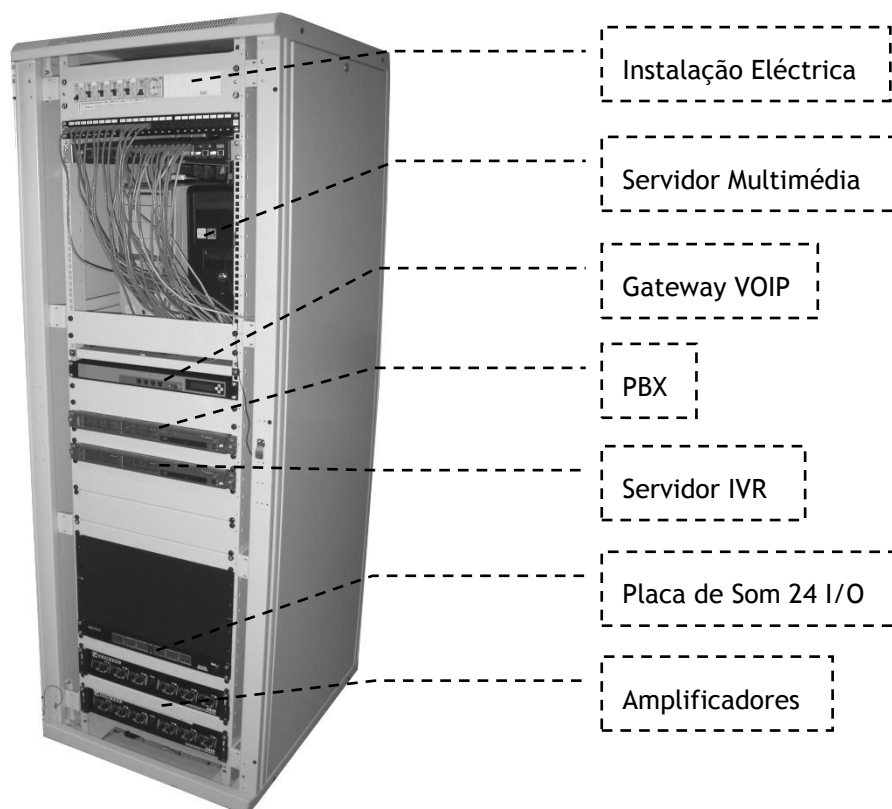


Figura 89 - Fotografia legendada da frente do bastidor NAVMETRO®



Figura 90 - Altifalantes usados na instalação SOS (tamanhos relativos aproximados)



Figura 91 - Fotografias exemplificativas da instalação dos dispositivos

5.4 Dois subsistemas funcionais do SOS

O sistema de orientação sonora é composto por dois tipos de aplicação que se podem realizar usando a mesma infra-estrutura: o encaminhamento, e a determinação da posição inicial. O primeiro foi o motivo inicial da instalação SOS e é sem dúvida o cerne da vertente de navegação do sistema, tal como foi descrito no ponto anterior. O segundo tipo tem na sua génese a necessidade de uma alternativa à solução de localização que tem por base Wi-Fi. Como sem uma posição inicial conhecida não é possível providenciar encaminhamento, este mecanismo de localização assume uma importância vital.

Quando os testes funcionais realizados com posição conhecida (simulada) se realizaram e comprovaram a validade da solução e a sua eficácia, rapidamente a empresa do Metro do Porto decidiu colocar a sistema em funcionamento de exploração. Face às dificuldades de obtenção da posição dos utilizadores referidas, foi necessário tomar providências e criar uma forma de obter esse posicionamento. Face à existência de um sistema sonoro adequado, foi então desenhado um sistema capaz de, com respostas fornecidas pelo utilizador, determinar a sua posição.

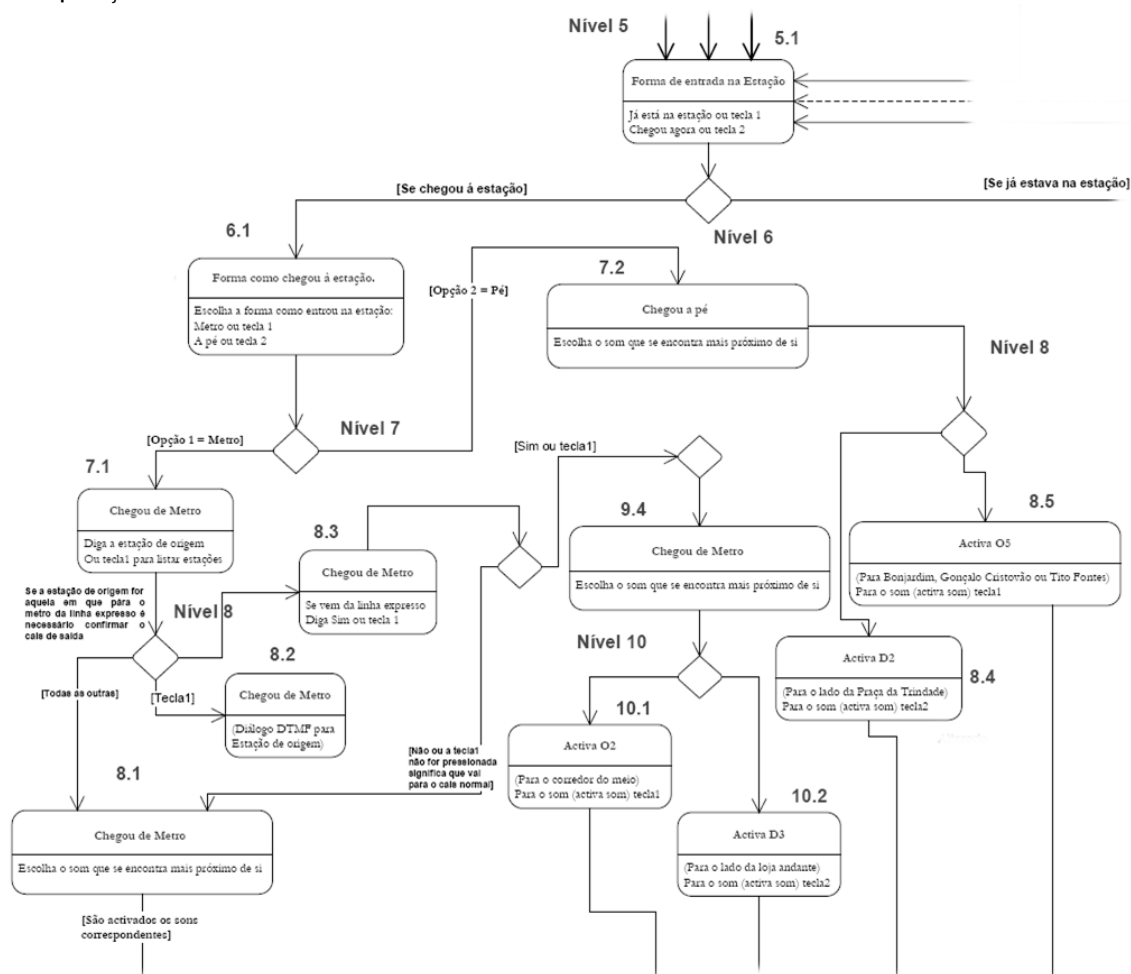


Figura 92 - Excerto da árvore de diálogos NAVMETRO® (Mafra, 2009)

Através de um sistema de diálogo fornecido pelo IVR, são realizadas perguntas ao utilizador que através do teclado do seu telefone móvel (DTMF) responde ao diálogo e aos estímulos sonoros produzidos.

Como se poderá perceber pelo diagrama (excerto da árvore de diálogos), o mecanismo de localização inicial procura da forma mais eficiente possível perceber, por perguntas realizadas ao utilizador, determinar o local (ou locais) onde o mesmo se pode encontrar. Posteriormente, o mesmo mecanismo tenta apurar com maior exactidão a posição ajustando a posição do utilizador para o seu ponto sonoro mais próximo, ou seja o local de um dispositivo que tenha sido seleccionado por um utilizador como tendo sido o som a ser percebido com maior intensidade. Numa tentativa de poupar tempo de chamada e aumentar a eficácia, os sons reproduzidos são auto-explicativos da tecla a ser seleccionada no telefone móvel para responder.

Existem três cenários possíveis aquando do início de uma localização inicial:

- O utilizador chegou à estação a pé e acabou de entrar;
- O utilizador chegou à estação de metro;
- O utilizador ligou para o sistema sem saber onde está, e depois de já se ter movimentado desde que chegou.

No primeiro caso, o utilizador só poderá estar situado em duas zonas possíveis: a da entrada da rua da Trindade, ou a da entrada da rua do Bom Jardim. Uma vez seleccionada esta opção, dois sons são reproduzidos sequencialmente na instalação. De um lado o altifalante reproduz um som que diz “primeira” (tecla depreende-se), e do outro lado “segunda”. Posteriormente é pedido que se seleccione no teclado o som percebido com maior intensidade. Seleccionado o altifalante depreende-se imediatamente a zona provável de posicionamento, contudo ainda existe um mecanismo de confirmação que pede ao utilizador para seguir o som de ave exemplificada na chamada. Uma vez confirmada a chegada ao local, a tecla 8 é premida confirmando ao sistema que efectivamente o utilizador se encontra imediatamente por baixo do local (em média a cerca de 30cm do ponto exacto, segundo o que foi apurado experimentalmente), e a posição é confirmada. De referir ainda um mecanismo muito importante de segurança que foi implementado. Como existe a presença de desníveis acentuados devido aos caminhos de ferro, aquando da movimentação para confirmação da posição, é incentivada a maior atenção possível na mobilidade de cada indivíduo no sentido de precaver uma confirmação de som distante em que o caminho até ele atravessa a linha. Se tal acontecer a tecla 1 deve ser premida para reiniciar o mecanismo de localização inicial a partir de um ponto seguro. Tal erro poderá acontecer em situações limite em que a diferença de intensidade percebida de dois dispositivos poderá ser semelhante.

No entanto, tais cuidados são precavidos com a existência de altifalantes direccionais, e com a regulação cuidada dos volumes de cada um dos 55 altifalantes existentes.

No segundo caso, em que a chegada é de metro, é apenas perguntada a proveniência. Face à proveniência sabe-se logo o cais de saída e passam a existir apenas 3 zonas possíveis em cada cais, conforme as plantas que podem ser consultadas em anexo. Essas três zonas passam exactamente pelo mesmo procedimento descrito acima para uma entrada a pé na estação. A selecção do som mais intenso: “primeira, segunda, terceira”, e a confirmação caminhando até ao local do som seleccionado, obviamente sem descurar o aspecto de segurança referido que é de capital importância.

O terceiro caso pode ser o mais extenso em diálogo, mas é mesmo assim breve. Distingue-se dos outros pelo facto de não haver qualquer pista acerca do local onde o utilizador poderá estar na estação. Será também o menos frequente, já que a maioria das utilizações do sistema serão feitas logo à chegada da estação. Este terceiro caso começa por determinar o piso do utilizador. Três sons são reproduzidos simultaneamente em todos os altifalantes principais de cada piso, sendo que na superfície o som é “superfície”, no intermédio é “intermédio”, e no inferior da mesma forma o som é “inferior”. É atribuída uma tecla a cada um, e portanto, um dado utilizador só ouve o som do seu piso e selecciona o piso onde se encontra sem erro de percepção possível. Seleccionado o piso, e da mesma forma que se viu anteriormente, os sons “primeira”, “segunda”, “terceira”, e assim em diante, são reproduzidos em zonas principais de cada piso. A sua selecção, face à sensação de proximidade do dispositivo sonoro, é da mesma forma pedindo confirmação caminhando até o mesmo, e confirmando a posição. No piso intermédio que é amplo e não tem o problema do desnível do caminho de ferro, não necessita confirmação e valida logo o posicionamento.

Experimentalmente, a localização inicial tem produzido óptimos resultados, sendo contudo ainda necessário realizar testes mais prolongados que validem na plenitude este mecanismo. Prevê-se que a utilização deste aumente a duração do período de conversação com o sistema, sem caminhar efectivamente para o destino, em cerca de 30%, em média. Contudo, aquando da introdução deste mecanismo, procedeu-se a uma actualização do diálogo anterior tendo-se obtido uma optimização de semelhante valor, fazendo com que a totalidade tenha ficado com a mesma duração média. Contudo, essa será uma falsa questão já que com a entrada em funcionamento de um mecanismo de localização transparente ao utilizador, haverá efectivamente uma redução de cerca de 30% em tempo de chamada sem caminhar. Para já, existe uma solução que não fazendo uso de tecnologia relativamente recente (Wi-Fi), consegue localizar com eficácia os utilizadores, que na realidade se auto-localizam. Numa perspectiva de acessibilidade este mecanismo tem essa vantagem.

Estes mecanismos baseados na selecção do dispositivo que aparenta estar mais próximo devido à percepção de intensidade que o mesmo reproduz, podem ser falíveis. Embora experimentalmente se tenha verificado que os cuidados tidos de projecto nas intensidades

sonoras dos dispositivos, e nos seus diagramas de radiação, são capazes de ser usados com este propósito, existe ainda o factor humano e o erro a ele associado. Anteriormente verificou-se que o ser humano infere muito mal acerca das distâncias, e que esta análise só é efectiva quando feita relativamente. Como a selecção pedida pelo sistema, é feita relativamente a outros sons, será de esperar bons resultados. No entanto, picos de ruído como a chegada de veículos, anúncios sonoros, ou factores externos, poderão mascarar o som mais próximo (tal como foi referido anteriormente) e induzir uma resposta errada. Planeia-se portanto uma possibilidade que embora seja rebuscada, tornaria este mecanismo automático e portanto mais rápido e menos falível. Estes mecanismos estão agora a ser desenhados, e poderão ser uma extensão ao trabalho até agora realizado. Baseiam-se em duas possíveis aproximações que com processamento do sistema seleccionariam automaticamente o som mais próximo:

- Captar o som pelo microfone do telefone móvel e pela diferença de fase de cada pico de cada onda, perceber qual o som mais próximo;
- Captar o som pelo microfone do telefone móvel e identificar cada pico pelas frequências, e comparar amplitudes dos mesmos, para seleccionar o som mais próximo.

A primeira hipótese peca pela direccionalidade do microfone do telefone móvel. Suspeita-se à partida que a direcção do microfone iria influenciar largamente a amplitude de alguns sinais que não seriam mais próximos mas teriam picos maiores. Contudo não se abandonou esta possibilidade ainda devido à proximidade que tem com o mecanismo usado actualmente (baseado em intensidade) e porque seria sempre possível pedir aos utilizadores para colocarem o dispositivo horizontalmente de forma a que a direccionalidade do microfone se oriente para cima, não privilegiando nenhuma direcção. Pouco elegante e ortodoxo, mas possível.

A segunda hipótese, a mais promissora, poderá ter contudo dois problemas que poderão surgir. Por um lado a condição reverberante do espaço poderá induzir picos em frequências que se encontrem desfasadas do som directo, e devido a esse facto atribuir distâncias às fontes sonoras erradamente. Por outro lado, a sincronização que terá de haver entre a emissão sonora e a captura do som poderá ter erros que afectem a medição de distâncias. Esta segunda dificuldade pode ser resolvida com a emissão de dois sinais seguidos no mesmo ficheiro de som, um de sincronização e outro para medição.

Será prematuro inferir sobre a viabilidade ou não desta funcionalidade, e qual a forma de a implementar. Espera-se contudo que seja extremamente estimulante continuar a desenvolver esta função brevemente como uma continuação do trabalho realizado até à data, e uma melhoria à operacionalidade do sistema.

Foi referido anteriormente que por motivos de segurança se reserva a apenas um utilizador a navegação num dado piso. Embora cada utilizador possa seleccionar de uma lista de 8 sons de aves aquando da sua inscrição no sistema, poderia acontecer que um dado utilizador tenha escolhido o mesmo som que outro, e a sua reprodução simultânea no mesmo piso ocasionasse confusões que poderiam ser preocupantes (devido ao perigo de queda na linha). Para evitar este fenómeno foi implementado pela equipa de desenvolvimento dos webservices do sistema, um mecanismo de filas de espera que reserva a apenas um utilizador a utilização de um dado piso na vertente da navegação. Os outros utilizadores, embora possam interagir com o sistema, informar-se e seleccionar opções, quando desejarem caminhar para um som, ou localizarem-se ouvindo sons e indicando o mais próximo, terão de esperar segundo uma mensagem de espera que lhes é transmitida periodicamente na chamada activa. Assim que o piso é libertado (por chegada ao destino, ou mudança de piso do utilizador que se encontrava a navegar) o segundo elemento da fila ganha acesso ao piso e começa a interagir com os sons desse piso. Embora se possa considerar esta situação como uma limitação do SOS, é importante referir que a mesma acontece apenas por motivos de segurança. Garantindo sons bastante diferentes para cada utilizador, poder-se-ia permitir utilizadores simultâneos. No entanto sendo sons de aves, poderia ser difícil conseguir tantos diferentes. Por outro lado, esta limitação acaba por não ser significativa por não existir uma volume muito grande de cegos ou deficientes da visão que simultaneamente usem a estação. Espera-se contudo que isso venha a mudar com a introdução deste sistema, e a continuação da promoção das condições de acessibilidade nas estações de metro, e possivelmente de futuro noutros espaços fechados.

5.5 Instalação de Dispositivos e suas Cablagens

Uma vez tendo sido realizado o projecto do SOS, foi então necessário proceder-se à sua instalação na estação da Trindade, contratando-se uma empresa externa para esse efeito.

Como se poderia esperar, ocorreram alguns imprevistos que condicionaram a localização exacta de alguns dos dispositivos sonoros. Questões relacionadas com a aparência dos dispositivos, das suas fixações, da cota de colocação, entre outras particularidades, foram todas tomadas em conta, para que o resultado final da instalação não maculasse de forma nenhuma o excelente trabalho arquitectónico que compõe a estação e que é a sua imagem de marca. Contudo, em nenhum momento se diminuiu a funcionalidade em benefício da aparência. A instalação dos dispositivos obedeceu a três requisitos simultâneos e interligados: o custo, a aparência, e a funcionalidade.

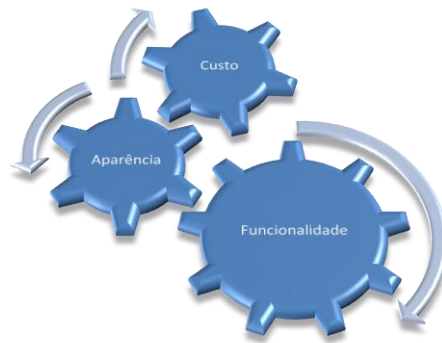


Figura 93 - Representação esquemática com compromisso entre os três requisitos da instalação

O projecto do sistema SOS tem entre as suas especificações requisitos mínimos para cada parte que o compõe, desde os altifalantes aos amplificadores, passando por placas de som até dispositivos acessórios. Face a estes requisitos, a empresa vencedora da consulta de fornecimento, optou por sugerir altifalantes RCS (uma marca alemã), tendo os amplificadores Yorkville (americanos) sido sugeridos pelo autor. Estes dispositivos depois de testados foram validados em laboratório, tendo ficado demonstrado, que apesar do seu relativo baixo custo, a sua performance é muito aceitável mostrando-se adequados ao sistema. A equipa de arquitectura responsável pela estação, validou também a sua aparência o que permitiu definitivamente a sua instalação.

Foi ainda necessário no entanto, em projecto de execução, definir formas de fixar ou suportar os dispositivos, e de na outra extremidade equipar um bastidor com as condições necessárias para acolher os equipamentos de controlo e geração sonora. No que concerne a fixações e suporte, optaram-se por várias alternativas. Os altifalantes esféricos da Figura 90 foram em alguns casos fixados a partir de um mastro proveniente do tecto até uma cota idêntica a dispositivos CCTV já existentes, para respeitar a harmonia das anteriores instalações. Como a elevação dos dispositivos não é realmente crítica para a solução em causa (conforme já foi referido), esta elevação e outras, foi contudo projectada como função do raio de alcance que um dado dispositivo deve ter, de acordo com as suas especificações de abertura angular sonora para as frequências em jogo (o som de aves). Na Figura 91 à direita pode-se observar um caso onde a impossibilidade de fixar os dispositivos vindos em mastro a partir de um tecto muito alto em betão (no piso inferior), obrigou à criação de um suporte tipo braço fixado em parede com formas arredondadas e adequadas ao meio e à aparência de dispositivos. Dispositivos cilíndricos do tipo dos altifalantes direccionais, ficaram sempre fixados directamente às paredes como se observa na Figura 91 à esquerda. Os restantes altifalantes de embutir, são como o nome sugere muito fáceis de integrar em tectos, estando portanto a sua elevação definida e sendo a sua aparência menos crítica. Contudo, foi tido em

conta um grande cuidado com os alinhamentos de dispositivos já existentes: outros altifalantes, detectores de incêndio, antenas GSM, alçapões, luminárias, etc..

A passagem dos cabos e as suas distâncias e calibres, corresponderam com eficácia ao projecto que tinha sido realizado.

Uma vez os cabos passados e os dispositivos instalados efectuaram-se as ligações dos cabos aos bornes do bastidor. Após a montagem da empresa instaladora, os primeiros testes permitiram fazer rectificações de trocas e más ligações aos dispositivos. Seguiu-se um processo de teste aos altifalantes em que se testou caso a caso cada um para assegurar as boas condições do equipamento. Este teste consistiu em variar intensidade em reprodução de música, restando vários regimes em pico e em baixa intensidade. Todos os altifalantes, como se esperava passaram o teste, mostrando-se como projectado capazes de transmitir a potência eléctrica desejada possuindo ainda assim alguma margem de segurança. Foi um processo lento e demorado, mas que deu origem a um sistema plenamente funcional logo desde a primeira utilização após verificações, fruto de um cuidado processo de planeamento, e de experimentação prévia. Uma vez instalado, começaram-se a realizar testes ao sistema, conforme foi referido no capítulo anterior. Estes testes permitiram efectuar uma regulação de intensidades para cada dispositivo segundo o nível de ruído do local onde se encontram, e a função que têm (se dispositivos de proximidade, ou de maior alcance). Pretende-se que uma nova versão num futuro próximo, possa integrar uma regulação automática de amplitude sonora por zona em função de medição em tempo real do nível de ruído do espaço em causa.

5.6 Software

No que concerne à criação de software, foi necessário desenvolverem-se alguns módulos de software cruciais à gestão do sistema.

A placa Motu 24 I/O possui 24 saídas analógicas adaptadas a aplicações de áudio profissional com os seus drivers ASIO e GSIF. Contudo para a aplicação em causa, era então necessário desenvolver uma aplicação de acesso básico ao sistema de som, para que fosse transparente ao mecanismo de actuação de som, o hardware que se encontra a montante. Se de futuro se tornar necessário mudar de equipamento só se terá de desenvolver nova rotina de acesso básico, sem modificar o “Sound Server” explicado à frente. Essa aplicação de nome “lounds” é de utilização tão simples que só necessita de aceitar como argumentos, a identificação do dispositivo a actuar, o volume, e o nome do ficheiro a ser reproduzido. O desenvolvimento desta aplicação faz uso dos drivers WDM (Windows) da placa Motu, e das suas formas de reprodução. Contudo o software foi preparado para ser adaptado a outro tipo de interfaces de som, se necessário.

Numa outra vertente, foi também providenciada uma aplicação de nome “buzz” encarregue da actuação dos “buzzers” (e dos altifalantes que os substituíram

posteriormente). Esta aplicação, actuando na placa de relés da Quancom, foi também idealizada com um acesso básico aos drivers da placa em questão segundo a sua API. Da mesma forma simples, também se passam apenas dois parâmetros: o dispositivo pretendido, e o seu estado (ligado ou desligado). De notar que dado que são saídas em relé e têm memória, ao contrário do som, necessitam de comando para desactivação. Posteriormente quando se realizou a mudança de “buzzers” para altifalantes, esta aplicação manteve a sua utilidade já que como se explicou, a actuação destes novos dispositivos se dá de forma multiplexada, actuando e desactuando os relés, usando agora também a aplicação “louds”, como seria natural, e foi anteriormente explicado.

Numa camada superior foi necessário conceber o projecto de uma aplicação de nome “Sound Server”, posteriormente a ser implementada por outra pessoa da equipa do projecto. Este software serviria o propósito de controlar de forma centralizada a necessidade de actuação/desactuação de cada dispositivo segundo certos argumentos e segundo uma base de dados que é actualizada pelo IVR (o cérebro do sistema). Sendo uma aplicação que corre em background esta encontra-se permanentemente a monitorizar uma base de dados, à procura de ordens realizadas pelo IVR. A mesma aplicação “limpa” as ordens e efectua a activação ou desactivação do dispositivo em causa (utilizando as rotinas desenvolvidas para o acesso básico aos dispositivos). A mesma aplicação determina a periodicidade com que o som é repetido nos altifalantes, permitindo a sua alteração manual.

5.7 Conclusão

Estando na eminência de uma entrada em funcionamento para os clientes que deverá acontecer algures na data de fecho deste documento, é então possível dizer-se com algumas certezas que o Sistema de Orientação Sonora é uma mais-valia em particular para a mobilidade de pessoas com deficiências da visão, mas também para as pessoas em geral. Utilizado no NAVMETRO®, o SOS assume ainda mais um papel de maior amplitude. A conjugação de um sistema de Informação com um sistema de orientação e navegação, resulta num salto considerável para a verdadeira inclusão. Fornecem-se então a esta significativa mas quase sempre esquecida população, praticamente as mesmas condições de utilização da estação e dos seus transportes e recursos, que a outra pessoa sem deficiências. Um utilizador do sistema, pode até ter vantagens em relação ao público comum, já que lhe é centralizada a compilada toda a informação sem a ter de procurar de forma física. É fácil perceber mesmo estando pouco tempo na estação, que existem muitas pessoas a todo o momento na estação que não sabem como proceder, onde estão os espaços, como comprar e validar o título, etc.. Todas as pessoas que fiquem paradas um pouco num local da estação terão certamente a oportunidade de ser abordados por alguém (sem deficiência) que lhe pedirá ajuda. No entanto, um utilizador do sistema NAVMETRO® não terá (virtualmente) que recorrer a outras

peçoas, nem andar perdido. Ele escolhe o seu destino, escolhe o que quer fazer, e é encaminhado para l, de uma maneira informada (custo, tipo de título que deverá ter validade, quantas estações até ao destino, se terá de fazer transbordos e aonde, etc.). Por isto e por outros motivos poder-se- equacionar de futuro uma versão para peçoas sem deficiência. No entanto o fundamental  primeiro assegurar a sua exclusividade a quem mais precisa.

De um catálogo de mais de 150 sons de aves, uma profunda análise dos mesmos conseguiu colocar em seleção apenas 8 sons que foram dados a escolher a um painel de cegos, e peçoas responsáveis pelo projecto. Destes 8 sons cada peçoia poderá escolher um, passando a ser o som que ouvir para ser orientada. Curiosamente o som escolhido tem sido frequentemente o mesmo, mas numa entrada em serviço do sistema, pretende-se aquando no registo de um cego na utilização do sistema NAVMETRO, que sejam indicadas algumas preferências. O som com que deseja ser encaminhado na estação, é uma delas. Este som, tornar a orientação sonora possível respeitando um requisito fundamental e basilar: não contribuir de nenhuma forma negativa para o ambiente da estação. Todos os testes realizados com o som de Aves tem tido uma excelente aceitação por parte de todos, quer sejam utilizadores do sistema, ou mesmo utentes sem deficiências da estação.

Durante este período de ajustes ficou também assente, por aceitação das sugestões dos utilizadores que não se irá permitir a utilização do sistema por mais que um cego em cada piso da estação. Esta decisão foi também tomada pela coordenação do projecto que privilegia a todo o momento a segurança acima de tudo. É absolutamente imperativo, e foi sempre tido em consideração, que em momento algum se possa colocar em perigo o utilizador. Nunca poderá indicar-se um encaminhamento que implique passar através de uma linha. Apesar do NAVMETRO no seu sistema de diálogos estar sempre a reforçar a importância do cuidado na mobilidade peçoal, e ressaltar constantemente que o sistema deve ser usado apenas como uma ajuda, e não de uma forma exclusiva à mobilidade, é de capital importância que não aconteçam este tipo de situações. Para além de descredibilizarem o sistema, podem em caso de peçoas menos seguras ou menos experientes na sua mobilidade (que encontrámos várias vezes em vários testes), criar situações de perigo. Estão a ser equacionados mecanismos de segurança que para além dos existentes no sistema, visaro evitar as mais remotas hipóteses de se concretizarem.

Para além do actual estado funcional e da inovação do projecto, existem desde já algumas ideias (algumas já referidas), que permitirão expandir o leque de possibilidades ainda mais além. Funcionalidades relacionadas com promover ainda mais condições de “visualização” a peçoas invisuais através da infra-estrutura de sons existentes, e outras relacionadas com aspectos de melhoria do sistema actual, serão sempre expansões desejadas a um sistema que se pretende em melhoria contínua.

Em suma, o projecto assume-se como estando a ser bem sucedido. A partir deste momento tem as condições para ser testado em regime de utilização normal, por um painel de utilizadores cegos, que durante um período vão avaliar o sistema e relatar de sua justiça a utilidade do que foi encontrado, e quais as melhorias a fazer para uma massificação do sistema por toda a rede.

Brevemente, e tal como foi referido, irá começar-se a desenvolver um mecanismo de determinação da localização inicial sem interacção do utilizador baseado em emissão sonora na instalação sonora, e a sua captação pelo terminal telefónico.

De futuro, espera-se introduzir novas funcionalidades que baseando-se na instalação existente, forneçam mais informação a pessoas com deficiências da visão. Uma destas ideias, prende-se com fornecer ao utilizador uma caracterização do espaço envolvente. Até agora o SOS fornece apenas a informação relativa a um caminho escolhido em função do local de partida e do seu destino. Esta nova ferramenta, a ser implementada, irá oferecer ao utilizador uma descrição sonora do meio envolvente, de uma forma idêntica ao que uma pessoa sem deficiência faz quando olha à sua volta, e vê o “panorama”.

Capítulo 6

Conclusões

A audição é um dos sentidos mais estimulados pela experiência quotidiana. O ser humano vive num planeta com uma atmosfera gasosa que permite a propagação das vibrações sonoras até ao ouvido humano. Não existe espaço nem momento em que a percepção humana de som seja silêncio. Mesmo numa câmara anecóica onde os estímulos sonoros exteriores são anulados, os sons próprios ao corpo humano são ouvidos. Os mecanismos da audição são portanto muito exercitados, criando uma ferramenta muito precisa e adaptada capaz de surpreender. Possui mecanismos de protecção de intensidades elevadas por contracção de músculos, e avançados adaptadores de impedâncias. Pode distinguir cerca de 400 000 sons diferentes, alguns tão ténues que movem a membrana timpânica tão pouco quanto um décimo da molécula de hidrogénio. Consegue discriminar e interpretar sons num intervalo aproximado entre os 20Hz até 20000Hz. O ser humano pode ouvir o som de um mosquito numa tarde silenciosa de verão, ou um avião a jacto que aparece a voar no céu. Dois sons tão diferentes tanto em intensidade como em características, que o sentido da audição humano pode reconhecer e rotular. Numa festa, o ser humano consegue ouvir uma voz e percebê-la no meio de muitas outras, ou de muito ruído. Neste processo consegue suprimir os níveis de ruído entre os 9 e os 15dB, parecendo que consegue ouvir essa voz onde se concentra com a sensação que a mesma está com 3 vezes maior intensidade.

Conclui-se de uma forma muito simplificada que a audição funciona da seguinte forma: o som propaga-se produzindo ondas sonoras que se deslocam até atingir a orelha. O mecanismo da audição adapta estas ondas, transmite-as à cóclea que de uma forma específica transforma estas ondas em sinais eléctricos transmitidos como mensagens, através do nervo auditivo para o nosso cérebro que as interpreta. Todo este processo, é realizado de forma inconsciente e automática.

No que diz respeito à localização espacial de sons, conclui-se que o ser humano dispõe de dois mecanismos essenciais para efectuar a localização num plano horizontal, e um outro para determinar a elevação. Num plano horizontal, o ser humano baseia-se nas diferenças de

tempo (ou fase) interaural (ITDs) para sons de baixa frequência, e nas diferenças de nível interaural (ILDs) para as altas frequências. Estes dois mecanismos são relativamente eficazes para sons simples, obtendo-se resultados que rondam 1 ou 2 graus de precisão. Sons complexos podem contudo não ser facilmente localizados.

Num contexto de elevação, ou localização vertical, usar apenas as diferenças interaurais não é suficiente, existindo locais do denominado “cone de confusão” que têm valores iguais das diferenças interaurais mesmo sendo em locais bastante diferentes. Para resolver esta ambiguidade o ser humano reage movendo a cabeça. Contudo, perceber a elevação da fonte sonora juntamente com a direcção horizontal (azimute) é algo que se consegue com relativa eficácia graças à função de transferência anatómica (também denominada por Head Related Transfer Function). Esta função reflecte a transformação que o som sofre desde a fonte sonora até ao ouvido (uma resposta impulsiva para cada ouvido). Cada ser humano tem a sua função específica, sendo todas no entanto bastante semelhantes até às médias frequências. Esta função descreve como um dado som captado é filtrado pelas propriedades de difracção e reflexão da cabeça, pavilhão auricular, e tronco, antes do som chegar ao ouvido médio e interno. Esta componente da localização não é tão precisa como a realizada no plano horizontal exclusivamente, só obtendo resultados razoáveis na proximidade das fontes sonoras, onde o ângulo de elevação é maior, e pequenas diferenças de posição originam variações maiores (e portanto mais fáceis de distinguir) na elevação.

No que concerne à percepção da distância, o ser humano não consegue precisar com rigor distâncias absolutas. Quando o som e a sua intensidade sonora na proximidade são conhecidos, o julgamento da distância face à atenuação de intensidade é satisfatório. Contudo, sendo um mecanismo baseado quase exclusivamente na intensidade do som captada, e sendo a mesma afectada pelo inverso do quadrado da distância, é muito complicado inferir sobre a distância à fonte, até porque a intensidade sonora com que o som está a ser reproduzido pela sua fonte pode ser variável. Por outro lado, devido à maior atenuação das frequências altas com a distância ar, o ouvido humano tende a relacionar maiores energias nas baixas frequências percebidas com uma distância à fonte maior. Todo este mecanismo tende a ser muito falível, e desta forma a localização das fontes sonoras em termos de distância não é fiável.

Em espaços fechados e portanto normalmente reverberantes, o ser humano consegue inconscientemente lidar com referências distorcidas derivadas de reflexões e reverberações. Esta característica baseia-se no denominado efeito de precedência, que usa o som que chega primeiro (a onda que vem directamente da fonte sonora) para distinguir o local da fonte sonora original. O intervalo de tempo entre a chegada do som directo e a primeira reverberação/reflexão é chamado de pré-atraso e para um som do tipo conversação, deverá ser maior que 40ms para que não haja um efeito sumativo entre as várias componentes do

mesmo som que chegam ao ouvinte. Para música, esse tempo aumenta um pouco mais para os 70ms, devido à característica variabilidade frequencial deste tipo de som.

No que concerne à aplicabilidade da localização de fontes sonoras a pessoas cegas, vários autores mostraram que estas, logo desde o nascimento desenvolvem capacidades melhoradas de localização auditiva e conseguem mapear o ambiente auditivo de um espaço, com melhor precisão que pessoas não cegas, especialmente na zona periférica onde a visão central das pessoas não cegas não chega sem rodar a cabeça. Sabe-se ainda que ao contrário de pessoas não cegas, elas conseguem localizar sons correctamente de forma monaural. Surpreendentemente, indivíduos cegos com visão periférica residual obtêm os piores resultados, abaixo mesmo de pessoas não cegas, confirmando que o processo de compensação auditiva varia com a etiologia ou extensão da cegueira. No que respeita à localização monaural verifica-se que a performance das pessoas completamente cegas é realmente excepcional, levando a crer que os fenómenos de localização no plano azimutal, mesmo não se baseando em diferenças interaurais são bem sucedidos. Este fenómeno leva a considerar uma possível compensação auditiva atribuída à reorganização das populações neuronais envolvidas no processamento da localização de referências e/ou de melhorar a aprendizagem. Alternativamente pensa-se que esta compensação pode ocorrer devido ao recrutamento de estruturas cerebrais abandonadas pela falta da visão.

Em suma, os estudos mais recentes mostram que algumas pessoas cegas têm a capacidade de localizar sons com maior precisão que pessoas não cegas. Os resultados obtidos com a localização monaural (e devido ao conseqüente uso de referências espectrais) podem justificar essa maior capacidade.

Literatura da área e alguns estudos mais antigos, sugerem que o desenvolvimento de capacidades de localização espacial está sujeito à necessidade de “calibrar” localização com a visão. Portanto pessoas cegas de nascença poderiam ter mais dificuldades que pessoas que já tiveram visão, e que entretanto a perderam, em proceder à localização espacial. Contudo, existem resultados mais recentes que provam efectivamente o contrário mostrando até que pessoas cegas de nascença obtêm claramente melhores resultados que pessoas que já viram, ou ainda têm visão residual. Pensa-se que esse facto poderá contribuir para o não desenvolvimento de determinadas características como a localização monaural melhorada, ou mesmo do recrutamento de estruturas cerebrais para a audição.

Relativamente à localização de fontes sonoras na componente vertical (em elevação), os resultados sugerem um possível défice de algumas pessoas cegas no que concerne à localização vertical absoluta do espaço auditivo relativamente a pessoas não cegas. Contudo, no que concerne à localização vertical relativa não se verifica o mesmo problema. A presença de visão residual é novamente sinónimo de resultados mais negativos na localização vertical absoluta. Tal facto pode ser interpretado como reflectindo um conflito sensorial entre referências visuais e não visuais para a recalibração do espaço auditivo.

A navegação de pessoas cegas pode-se realizar através da actualização de posição e orientação, e pode ser classificada segundo o tipo de informação usada: posição, velocidade, ou aceleração. A navegação baseada em posição (“pilotagem”) baseia-se em sinais externos que indicam a posição e orientação do sujeito, é o tipo de navegação que oferece resultados melhores. Todas as outras abordagens baseadas na integração da velocidade ou aceleração, sofrem de erros significativos, que tornam este tipo de navegação inviável, se bem que muito interessante.

No que concerne à verificação experimental de muitos dos conceitos aqui abordados relativos aos mecanismos da audição humana e localização espacial para pessoas cegas e não cegas, realizaram-se vários testes com o intuito de validar a introdução do mecanismo de orientação sonora de nome SOS, no sistema NAVMETRO®. Tais ensaios foram necessários para se obter a sensibilidade necessária para perceber a problemática inerente a estas matérias, e validar questões ambientais relativas ao espaço onde se destina a solução: estações de metro da rede do Porto. Tal como seria de esperar, grande parte dos resultados foram de encontro ao que na literatura se havia concluído. Por exemplo, na dimensão azimutal percebeu-se que pessoas cegas conseguem localizar com $2,22^\circ$ de erro médio ou $4,22^\circ$ de desvio padrão, os sons em plano azimutal. No entanto, um dos ensaios mais complexos, visou testar um aspecto que não havia sido encontrado em nenhuma experiência: o posicionamento de pessoas cegas e não cegas por baixo de fontes sonoras. Este ensaio original contribuiu para dar alguma inovação à matéria e validar uma das características do sistema desenvolvido no âmbito do projecto (SOS). Verificou-se então que pessoas cegas e não cegas conseguem posicionar-se em média a 33,47cm do ponto vertical imediatamente por baixo da fonte sonora, que se situa à altura de 3m, ou seja um erro angular em média de 14° considerando uma altura média dos sujeitos de 1,65m.

Finalmente, conclui-se que o Sistema de Orientação Sonora desenvolvido como parte do sistema NAVMETRO® (um sistema de apoio à informação e navegação de pessoas com deficiências da visão em estações de metro no Porto), é confirmadamente uma mais valia significativa para a promoção de acessibilidade nesse contexto, e na direcção de um mundo cada vez mais inclusivo. Este sistema, baseado numa navegação tipo “landmarks”, em que as referências de encaminhamento são sonoras com o som de aves, é já alvo de uma patente.

Em suma, conclui-se que o sistema tal como se encontra actualmente, cumpre desde já todos os requisitos que foram especificados inicialmente. Um utilizador cego que entre na estação e conheça minimamente o serviço, pode logo após a sua interacção telefónica com o serviço, ter acesso a toda a informação se encontra afixada na estação (horários, linhas, zonamento, destinos, custos, etc.), e dirigir-se a qualquer lugar da estação da Trindade (bares, máquinas de venda de títulos, loja andante, WC, etc.). Para esse efeito recorrerá a dois tipos de mecanismos do SOS: a localização inicial e o encaminhamento. Este primeiro, necessário para definir o ponto de partida para qualquer local seleccionado pelo utilizador,

irá interagir com o utilizador através de sons para que este indique por aproximações sucessivas onde se encontra, caminhando finalmente uma pequena distância até ele de forma a ser determinada a sua posição exacta como um ponto onde se encontra um dispositivo sonoro. O segundo, denominado de “encaminhamento”, fará com que o utilizador, seguindo sons até à sua fonte, caminhe numa rota que o leva em segurança, em eficácia, e conforme as suas preferências, até ao seu destino. Se o seu destino for uma estação que não a da Trindade onde se encontra, o seu destino será o cais e ser-lhe-á transmitida informação de transbordos, custo da viagem, e quantidade de estações até ao seu destino.

Prevê-se que o sistema NAVMETRO® tenha uma expansão grande para as outras estações da rede, tendo-se começado já os primeiros esboços do futuro caderno de encargos em que se inclui o sistema nas estações ainda a construir. Uma das grandes vantagens deste sistema é o seu custo relativamente baixo de implementação que facilita a tomada de decisão dos responsáveis pelos projectos.

A entrada em produção do NAVMETRO® e conseqüentemente do SOS está agendada para uma data muito próxima ao fecho da escrita deste documento.

6.1 Perspectivas de trabalhos futuros

A acessibilidade é um requisito cada vez mais obrigatório em espaços públicos. Já é do conhecimento público que construções novas devem possuir rampas, elevadores e outros recursos para as pessoas de mobilidade reduzida. Da mesma forma, espera-se que este trabalho e outros contribuam de forma semelhante para sensibilizar futuros projectos e contemplar a acessibilidade para invisuais. Mais concretamente espera-se que o sistema possa integrar outros sistemas de transporte, ou mesmo outros espaços fechados amplos.

Existem também valências neste sistema que podem ser transportadas para uma aplicação que não se destine a pessoas cegas, mas sim viajantes por exemplo que não dominam a língua e que precisam de informação e de saber para onde se dirigir. As conclusões no que respeita à orientação sonora são igualmente válidas para pessoas sem deficiências da visão. São desde já imensas as possíveis aplicações que podem derivar desta ideia com patente já registada. Não será contudo nesta forma ainda um sistema para massas, ou para um uso simultâneo de muitos utilizadores como já se explicou, devido à saturação do ambiente sonoro dos espaços. Contudo, a área da navegação por integração de caminhos é ainda algo a abordar e a investigar com maior atenção, já que poderá resolver esse problema, e otimizar a solução existente.

De salientar ainda que o trabalho experimental e de investigação irá continuar com o acompanhamento da entrada em produção do SOS, o que posteriormente dará origem a nova documentação sobre a matéria.

Apêndice A

A unidade Bel (B)

A unidade Bel é definida pelo Sistema Internacional como a unidade de uma escala numérica cujos valores são dados pelo logaritmo decimal da relação entre o valor considerado de uma potência e um valor de potência tomado como referência. Na prática, é usado única e exclusivamente o submúltiplo decibel (dB), com o qual se mede toda a grandeza N que pode ser expressa por uma equação do tipo:

$$N = 10 k \log (A_2/A_1) , \quad (A.1)$$

onde A_2 e A_1 são grandezas da mesma espécie (pressões, tensões eléctricas, correntes, etc), e k é um número determinado pela correlação matemática entre a grandeza A e a potência, como por exemplo o nível de pressão sonora.

Pela definição, pode-se notar que o decibel sozinho não é uma grandeza física absoluta, mas uma transformação de uma relação linear entre duas grandezas da mesma espécie numa relação logarítmica (Maltby, 2002).

Considere-se a título de exemplo um amplificador que tem um ganho de potência, expresso como relação linear, de 100 vezes. Isso não significa que a potência de saída seja 100 multiplicada por uma grandeza como watt. Significa que a potência de saída é 100 vezes a de entrada. Se, por exemplo, esta última for 1W, a de saída será 100W. Se for 3W, a de saída será 300W. É claro que, na prática, a potência de saída de um amplificador ou qualquer outro dispositivo é limitada pela capacidade dos seus componentes. Assim, essa relação é válida até à potência máxima que ele pode fornecer. Se se deseja expressar o ganho do amplificador anterior em decibel, usar-se-á a equação (A.1):

$$(A_2/A_1) = 100$$

Como são unidades de potência, $k = 1$. Assim,

$$N = 10 \log 100 = 20\text{dB}.$$

Simultaneamente, o decibel pode ser usado para indicar uma grandeza absoluta. Basta considerar um valor de referência para A_1 . Se, por exemplo, A_1 é igual a 1 miliwatt, o valor de A_2 pode ser calculado a partir do valor em decibel. Esta especificação de potência como o valor em decibel em relação a uma referência de 1mW é denominada dBm e é muito usada em telefonia, em amplificadores de áudio e em rádio-frequência.

Se, por exemplo, o referido amplificador tem uma potência máxima de saída de 100 W, pode-se especificá-la em dBm. Assim,

$$N = 10 \log (100/0,001) = 50\text{dBm}.$$

Ou seja, no amplificador considerado o ganho de potência é 20dB e a potência máxima é 50dBm.

No exemplo anterior foi considerado $k=1$ porque se tratavam de unidades de potência. No entanto, esta variável assume outros valores quando estão envolvidas outras grandezas. A título de exemplo, e conforme expressão da potência eléctrica e a lei de Ohm, a relação entre a potência e a corrente que circula numa resistência é dada por $P = RI^2$. E a relação entre duas potências P_2 e P_1 , dissipadas por essa resistência na presença das correntes I_2 e I_1 , é dada por:

$$P_2 / P_1 = R I_2^2 / R I_1^2 = (I_2 / I_1)^2.$$

E a relação logarítmica é:

$$\log (P_2 / P_1) = \log ((I_2 / I_1)^2) = 2 \log (I_2 / I_1).$$

Portanto, tendo em consideração a equação (A.1) é lógico supor que $k = 2$ para a corrente eléctrica. Pode-se demonstrar que o mesmo valor é válido para a tensão eléctrica e a pressão mecânica.

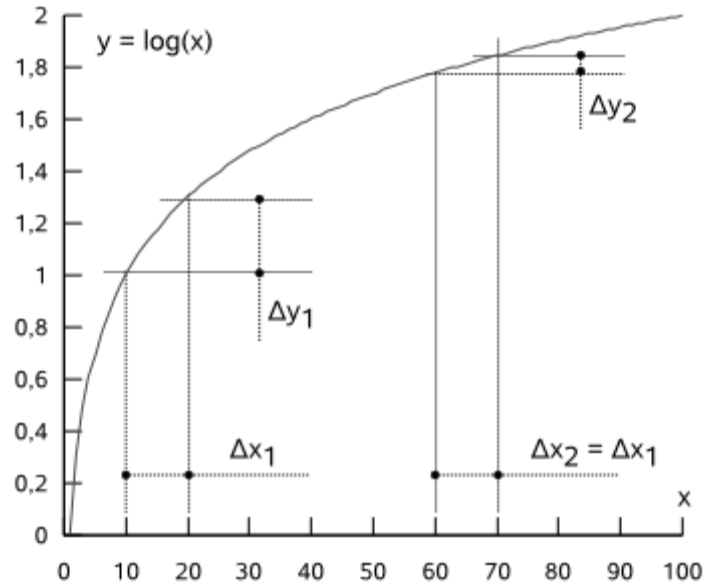


Figura A1 - Gráfico da função $y = \log x$ para o intervalo de $x=1$ a $x=100$

A função logarítmica é efectivamente adequada para a utilização de variáveis cujos valores numéricos se encontram em intervalos bastante amplos. É comum o uso de escalas logarítmicas em gráficos com grandes variações de valores.

De notar que uma pequena variação numérica de y em relação à variação de x (0 a 2 contra 1 a 100). E, se a variação de x fosse, por exemplo, 100 vezes (1 a 10000), a variação de y seria apenas de 0 a 4.

Outra consequência da função logarítmica é a ausência de proporcionalidade para variações, conforme indicado na mesma figura:

- Uma variação Δx_1 no início do intervalo corresponde a uma variação de resposta Δy_1 ;
- A mesma variação Δx_2 (igual a Δx_1), mais perto do final do intervalo corresponde a uma variação de resposta $\Delta y_2 < \Delta y_1$.

Apêndice B

Considerações sobre as secções dos condutores

Critério de queda de tensão inferior a 3%

$$V_A = \frac{Z}{Z+R} \cdot V_G$$

$$\frac{Z}{Z+R} \geq 0.97 \Leftrightarrow Z \geq 0.97Z + 0.97R \Leftrightarrow 0.97R \leq Z - 0.97Z = 0.03Z$$

$$R \leq \frac{0.03Z}{0.97} = Z \cdot \frac{3}{97}$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = \rho \cdot \frac{2l}{S}$$

$$\rho_{Cu} = 0.0172 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = 0.0172 \frac{\Omega \cdot 10^{-6} \text{m}^2}{\text{m}} = 17.2 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

$$R = 17.2 \times 10^{-9} \times 2 \times \frac{1}{S}$$

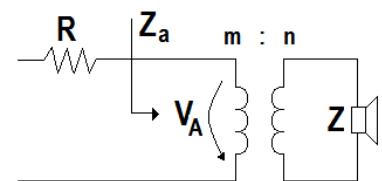
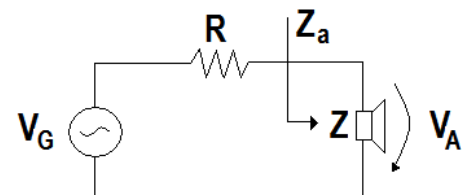
$$R = 34.4 \times 10^{-9} \Omega \cdot \frac{1}{S}$$

Considerando uma situação em que :

$$Z = 8\Omega$$

$$R \leq 8 \cdot \frac{3}{97} \Leftrightarrow 34.4 \times 10^{-9} \cdot \frac{1}{S} \leq 8 \cdot \frac{3}{97} \Leftrightarrow 1 \leq 8 \cdot \frac{3}{97} \cdot \frac{1}{34.4 \times 10^{-9}} \cdot S$$

$$S \geq \frac{97 \times 34.4 \times 10^{-9}}{3 \times 8} \cdot 1$$



ρ - resistividade do cobre

l - comprimento do cabo bifilar

S - secção recta de cada condutor

Para um cabo de secção :

$$S = 0.5\text{mm}^2 \Rightarrow l \leq 3.6\text{m}$$

Alternativamente, para :

$$l \geq 20\text{m} \Rightarrow S \geq 2.78\text{mm}^2$$

Por outro lado, considerando o sinal em linha de 70V :

$$V_G = 70\text{V}$$

$$P = P_0$$

$$Z_A = \frac{Z_0^2}{P} = \frac{Z_0^2}{P_0}$$

$$S \geq \frac{97 \times 34.4 \times 10^{-9}}{3 \times 70^2} \cdot P_0 \cdot l$$

Para um cabo de secção :

$$S = 0.5\text{mm}^2$$

e potência :

$$P_0 = 25\text{W}$$

$$l \leq \frac{70^2}{25} \cdot \frac{3}{97} \cdot \frac{1}{34.4 \times 10^{-9}} \cdot 0.5 \times 10^{-6}$$

$$l \leq 88.11\text{m}$$

Apêndice C

Identificação de condutores e secções normalizadas

Cabo ref.	Tipo	Dim. Ext.	Origem	Localização Origem	Destino	Loc. Destino
TSM001-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	1	Bastidor NavMetro	O1	Superfície
TSM002-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	2	Bastidor NavMetro	O2	Superfície
TSM003-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	3	Bastidor NavMetro	O3	Superfície
TSM004-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	4	Bastidor NavMetro	O4	Superfície
TSM005-NAV	RZ1-K 2x1,5mm ²	8	5	Bastidor NavMetro	O5	Superfície
TSM006-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	6	Bastidor NavMetro	O6	Intermédio
TSM007-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	7	Bastidor NavMetro	O7	Intermédio
TSM008-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	8	Bastidor NavMetro	O8	Intermédio
TSM009-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	9	Bastidor NavMetro	O9	Intermédio
TSM010-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	10	Bastidor NavMetro	O10	Inferior
TSM011-NAV	RZ1-K 2x1,5mm ²	8	11	Bastidor NavMetro	O11	Inferior
TSM012-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	12	Bastidor NavMetro	D1	Superfície
TSM013-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	13	Bastidor NavMetro	D2	Superfície
TSM014-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	14	Bastidor NavMetro	D3	Superfície
TSM015-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	15	Bastidor NavMetro	D5	Superfície
TSM016-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	16	Bastidor NavMetro	D6	Intermédio
TSM017-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	17	Bastidor NavMetro	D7	Inferior
TSM018-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	18	Bastidor NavMetro	D8	Inferior
TSM019-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	19	Bastidor NavMetro	D9	Inferior
TSM020-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	20	Bastidor NavMetro	D10	Inferior
TSM021-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	21	Bastidor NavMetro	B1	Superfície
TSM022-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	22	Bastidor NavMetro	B2	Superfície
TSM023-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	23	Bastidor NavMetro	B3	Superfície
TSM024-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	24	Bastidor NavMetro	B4	Superfície
TSM025-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	25	Bastidor NavMetro	B5	Superfície
TSM026-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	26	Bastidor NavMetro	B6	Superfície
TSM027-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	27	Bastidor NavMetro	B7	Superfície
TSM028-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	28	Bastidor NavMetro	B8	Superfície
TSM029-NAV	RZ1-K 2x1,5mm ²	8	29	Bastidor NavMetro	B9	Superfície
TSM030-NAV	RZ1-K 2x1,5mm ²	8	30	Bastidor NavMetro	B10	Superfície
TSM031-NAV	RZ1-K 2x1,5mm ²	8	31	Bastidor NavMetro	B11	Superfície
TSM032-NAV	RZ1-K 2x1,5mm ²	8	32	Bastidor NavMetro	B12	Superfície
TSM033-NAV	RZ1-K 2x1,5mm ²	8	33	Bastidor NavMetro	B13	Superfície

TSM034-NAV	RZ1-K 2x1,5mm ²	8	34	Bastidor NavMetro	B14	Superfície
TSM035-NAV	RZ1-K 2x1,5mm ²	8	35	Bastidor NavMetro	B15	Superfície
TSM036-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	36	Bastidor NavMetro	B16	Intermédio
TSM037-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	37	Bastidor NavMetro	B17	Intermédio
TSM038-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	38	Bastidor NavMetro	B18	Intermédio
TSM039-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	39	Bastidor NavMetro	B19	Intermédio
TSM040-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	40	Bastidor NavMetro	B20	Intermédio
TSM041-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	41	Bastidor NavMetro	B21	Intermédio
TSM042-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	42	Bastidor NavMetro	B22	Intermédio
TSM043-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	43	Bastidor NavMetro	B23	Intermédio
TSM044-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	44	Bastidor NavMetro	B24	Intermédio
TSM045-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	45	Bastidor NavMetro	B25	Intermédio
TSM046-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	46	Bastidor NavMetro	B26	Intermédio
TSM047-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	47	Bastidor NavMetro	B27	Intermédio
TSM048-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	48	Bastidor NavMetro	B28	Inferior
TSM049-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	49	Bastidor NavMetro	B29	Inferior
TSM050-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	50	Bastidor NavMetro	B30	Inferior
TSM051-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	51	Bastidor NavMetro	B31	Inferior
TSM052-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	52	Bastidor NavMetro	B32	Inferior
TSM053-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	53	Bastidor NavMetro	B33	Inferior
TSM054-NAV	JZ-500 2x0,5mm ²	5	54	Bastidor NavMetro	B34	Inferior
TSM055-NAV	JZ500 - 2x1mm ²	6	55	Bastidor NavMetro	B35	Inferior

Tabela B1 - Lista de cabos SOS com secção normalizada e correspondentes dispositivos na extremidade

Apêndice D

Extracto da Tabela de Roteamento e da Tabela de Dispositivos

Zona de Origem	Local de Destino	Best-Bóia1	Best-Bóia2	Best-Bóia3	Best-Bóia4	Best-Bóia5
1	Bilheteira	B3-B				
1	Validador	O1-V				
1	Loja Andante	B2	D3-P	B8		
1	Bar	B4	O9-P	B25	D5-P	O4-I
1	Máquinas de Vending	B2	D3-P	B5-D2	B33	
1	Casa de Banho	B4	O7-P	O6-I		
1	Saída Trindade	B1				
1	Saída Bom Jardim	B4	O9-E	B13-I		
1	Saída Camões	B4	O9-P	D6	B27-S2	
1	Cais Dragão	D2				
1	Cais Póvoa	B4	O9-P	B25	D5-I	
1	Cais S. João	B2	D3-P	B5-D2	O11-P	
1	Cais D. João II	B4	O7-P	O6-P	B16	D7-I
1	Caís Póvoa Expresso	B2	D3-I			
2	Bilheteira	B3-B				
2	Validador	O1-V				
2	Loja Andante	B2	D3-P	B8		
2	Bar	B4	O9-P	B25	D5-P	O4-I
2	Máquinas de Vending	B2	D3-P	B5-D2	B33	
2	Casa de Banho	B4	O7-P	O6-I		
2	Saída Trindade	B1				
2	Saída Bom Jardim	B4	O9-E	B13-I		
2	Saída Camões	B4	O9-P	D6	B27-S2	
2	Cais Dragão	D2				
2	Cais Póvoa	B4	O9-P	B25	D5-I	
2	Cais S. João	B2	D3-P	B5-D2	O11-P	
2	Cais D. João II	B4	O7-P	O6-P	B16	D7-I
2	Caís Póvoa Expresso	B2	D3-I			

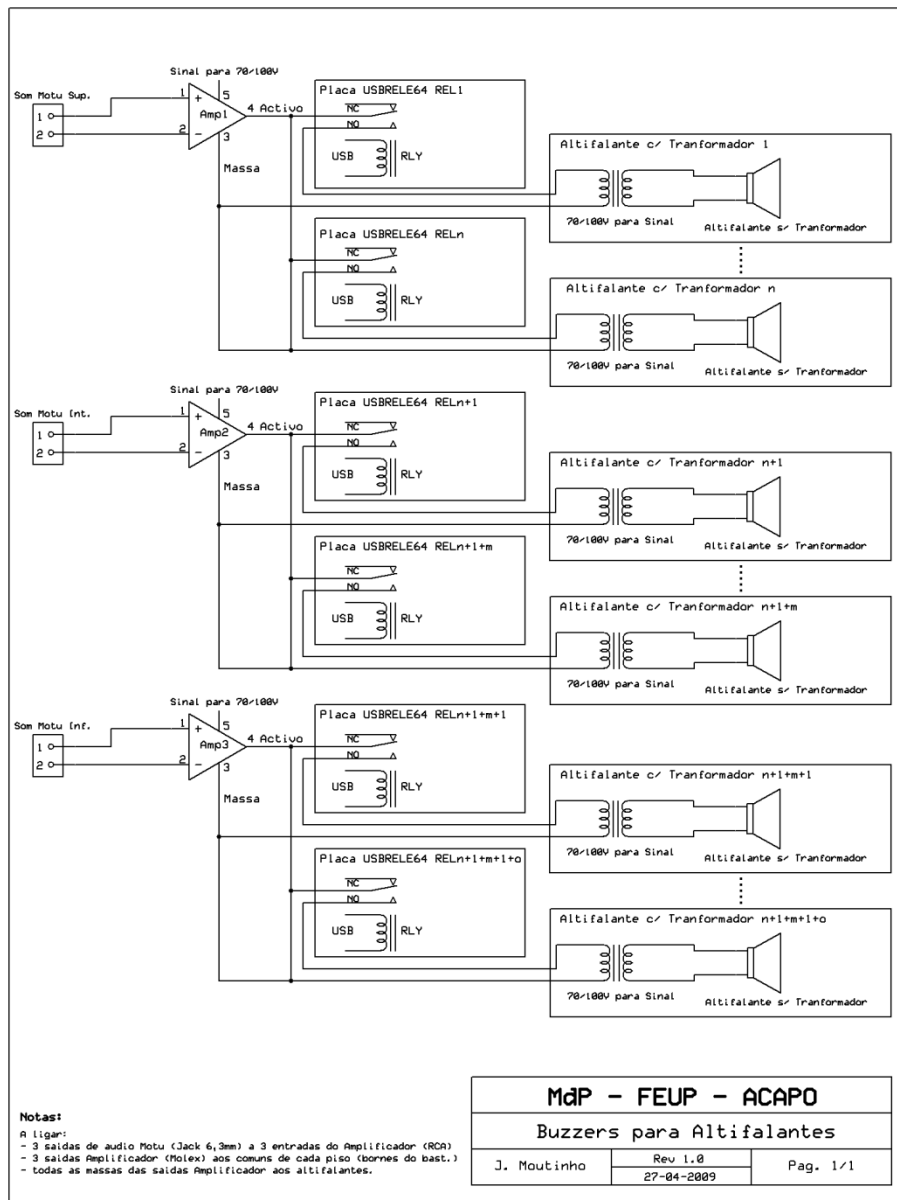
Tabela D1 - Extracto da tabela de Roteamento

Dispositivo-Função	Zona	Piso	Mensagem à Chegada	Mensagem Posterior
O1-V	1	0	Chegou ao Validador. Valide o seu andante.	Quando acabar de validar prima a tecla 8.
O1-P	1	0		
O2-P	4	0		
O2-I	4	0	Chegou ao centro do cais. Aguarde o veículo e embarque. Tenha em atenção a guia tátil no chão como bordo do cais.	
O3	6	0		
O4-P	8	0		
O4-I	8	0	Chegou ao Bar.	
O5-V	9	0	Chegou ao Validador. Valide o seu andante.	Quando acabar de validar prima a tecla 8.
O6-I	10	1	Chegou à casa de banho. Se a porta estiver fechada, peça que a abram ao agente de estação.	
O6-P	10	1		
O7-V	11	1	Chegou ao Validador. Valide o seu andante.	Quando acabar de validar prima a tecla 8.
O7-P	11	1		
O8	12	1		
O9-P	13	1		
O9-E	13	1	Chegou a escadas rolantes. As de subida são as do lado direito.	
O10-I	16	2	Chegou ao centro do cais. Aguarde o veículo e embarque. Tenha em atenção a guia tátil no chão como bordo do cais.	
O10-P	16	2		
O11-I	19	2	Chegou ao centro do cais. Aguarde o veículo e embarque. Tenha em atenção a guia tátil no chão como bordo do cais.	
O11-P	19	2		
D1	2	0	Desça as escadas. À direita tem escadas fixas, e à esquerda são rolantes.	Quando chegar ao final das escadas prima a tecla 8.
D2	1	0	Chegou ao cais perto da parte frontal do veículo. Aguarde o veículo e embarque. Tenha em atenção a guia tátil no chão como bordo do cais.	
D3-P	3	0		
D3-I	3	0	Chegou ao centro do cais. Aguarde o veículo e embarque. Tenha em atenção a guia tátil no chão como bordo do cais.	

Tabela D2 - Extracto da tabela de Dispositivos

Apêndice E

Esquema eléctrico de ligação aos Altifalantes tipo B



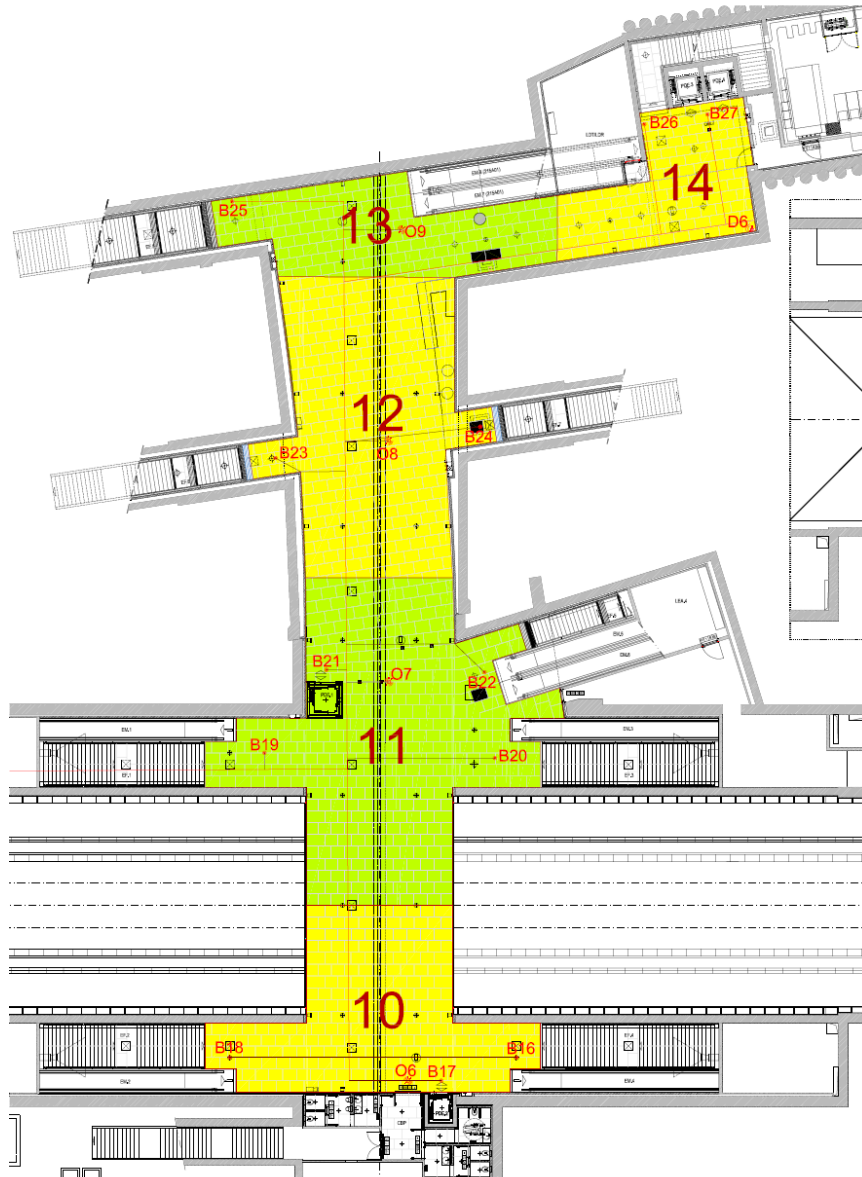


Figura F3 - Instalação SOS no piso inferior da Estação da Trindade

Apêndice G

Medições de Ruído na Estação da Trindade

f (Hz)	Normal superior	Silêncio superior	Pessoas Superior	Chegada Superior	Partida Superior	Normal Intermediário	Silêncio Intermediário	Pessoas Intermediário	Partida Intermediário	Chegada Inferior
12,5	58,9	56,3	66,1	55,9	64	58	57,1	60,2	62	60,7
16	61,8	58,1	66,2	59,8	64,3	65,5	65,5	67,6	61,7	64,6
20	61,8	57,7	65,7	60	62	63,9	62,9	65,1	62,4	61,8
25	60,2	59	67,3	63,3	65	68,2	67,4	69,1	64,4	63,2
31,5	63,7	60,4	68	66,1	65,5	67,8	66,7	68,5	66,7	64,7
40	64,4	62,4	68,3	67,1	67,4	64,6	62,8	68,8	67,9	68,3
50	66,2	59,2	73,4	67,2	67,9	63	63,3	65,4	65,6	70,3
63	58,8	57,8	65,6	64,9	67,4	62,9	63,7	63,6	63,6	64,7
80	57,1	55,3	64,8	64,2	64,9	60,2	60,5	61,4	62,8	62,8
100	61	53,6	65,4	65,2	64,5	59,4	58,8	60,6	62,7	65
125	64	51,9	65,4	66,2	64,8	60,1	58,9	61,5	59,9	66,9
160	67,3	53,2	70,6	66,9	67,8	58,9	58,2	61,3	61,6	68,4
200	64,9	53,7	68,8	66,2	68,1	58	58,7	59,4	62,9	66,7
250	63,2	52,2	68	65,9	66,4	60	59,7	60,3	63	65,2
315	63,5	52,3	68,1	66,6	68,7	61,9	59,6	62,1	62,2	65,4
400	64,5	53,5	68,1	69,4	68,5	60,8	59,9	60,5	64,9	69,9
500	63,9	53,5	67,1	67	66,8	61,6	56,4	60,9	62,6	68,1
630	63,7	51,7	67,4	66,3	67,6	61,5	55,1	60,8	60,8	64,6
800	62,6	49,2	66,3	64,5	67,1	60,9	55,1	60,2	59,8	62,7
1k	62,9	47,6	67,3	63,9	73	58,4	55,1	58,1	57,4	62,7
1,25k	62,8	45,1	67	63,7	77,2	57,8	53,3	55,8	56,9	61,4
1,6k	58,5	44,1	62,3	60,9	69,5	55,6	51,8	54,4	55,4	59,6
2k	58,5	41,9	62,8	60	65,3	53,3	50,2	54	57,2	58,3
2,5k	58,5	40,2	59,7	59,2	64,7	50,7	48,8	52,5	57,2	58,3
3,15k	53,9	38,7	56,7	57,9	58,3	49,4	46,4	50	50,4	56
4k	52,3	36,6	56,2	57,5	58,4	47,2	44,3	48,5	48,8	54,9
5k	50,8	34,2	53,8	56,9	57,8	43,7	40,3	45,6	46,6	53,8
6,3k	48,8	31,2	49,4	53,1	55,6	40,7	37,2	43,7	45,7	48,9
8k	41,9	28,7	43,9	44,1	52,1	37,8	33,1	41,1	45,3	42,6
10k	40,1	25,6	38,4	40,9	49,3	33,7	29	37,3	41,4	36,9
12,5k	34,8	22,2	34,3	36,9	44,9	29	23,8	33,1	37,9	36,2
16k	28,7	---	32	33,7	38,9	24,2	---	29,4	33,6	41,8
20k	22,9	---	27,1	33,1	35,5	---	---	22,5	28,6	21,6
A	71,5	58	75,3	73,8	80,7	67,8	63,8	67,4	70	72,8
L	76,9	69,7	81,4	79,4	82,5	76,2	74,9	77,5	76,9	79,4
DeltaT	22:06	01:41	00:47	00:36	00:31	02:45	01:18	01:06	00:18	01:09

Situações:

Normal - Medições realizadas sobre todas as condições normais do piso em causa durante períodos de tempo maiores

Silêncio - Medições realizadas em condições excepcionalmente mínimas de ruído

Chegada - Medições realizadas desde o momento que se ouve a chegada do veículo até à sua paragem, e abertura de portas

Partida - Medições efectuadas desde o fechar de portas do veículo, passando pelo arranque, até ao momento onde se deixa de ouvir

Apêndice H

Árvore de Diálogos do Sistema NAVMETRO

NOTAS IMPORTANTES:

- O Menu CLIP tem um timeout.

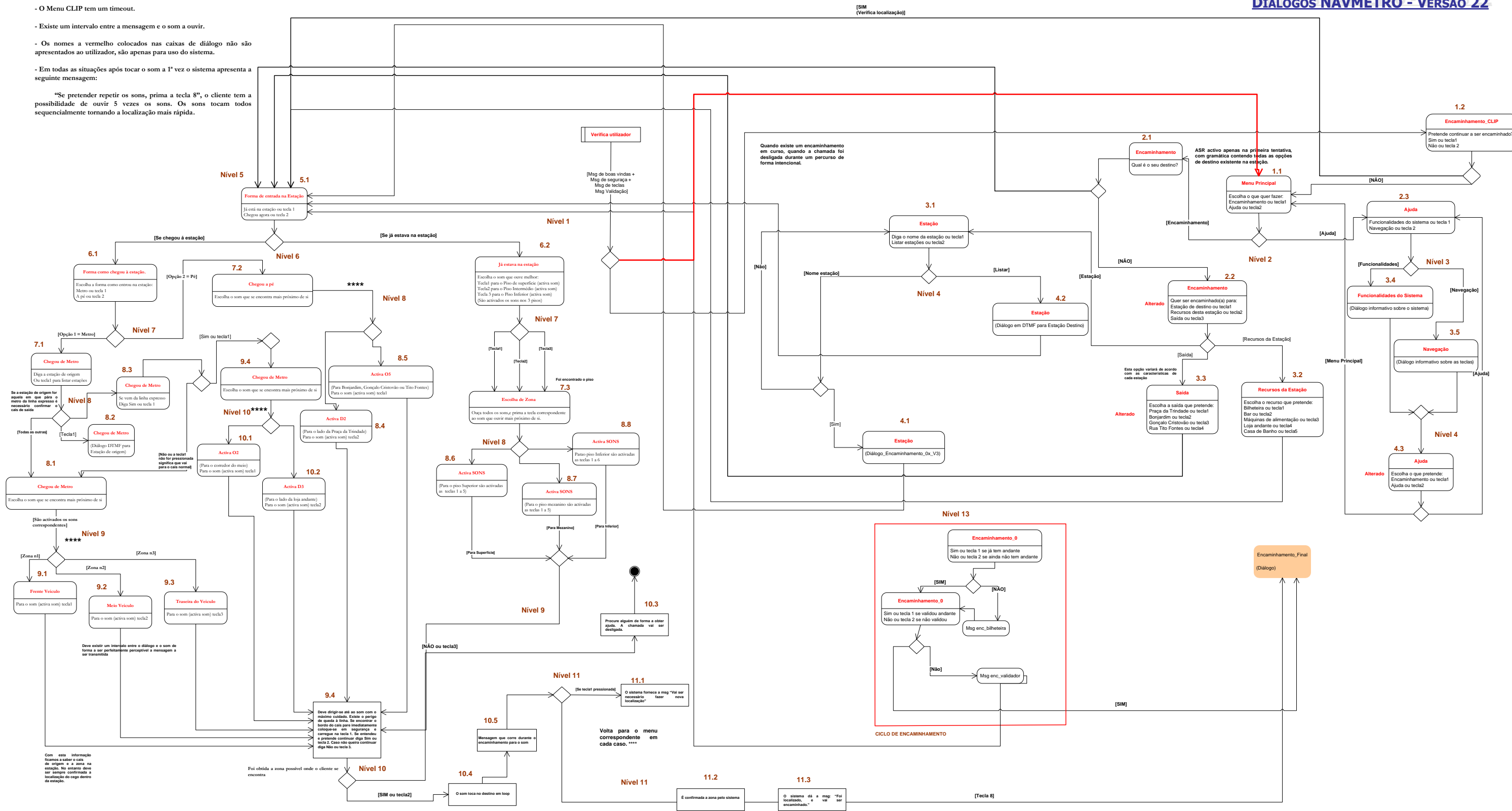
- Existe um intervalo entre a mensagem e o som a ouvir.

- Os nomes a vermelho colocados nas caixas de diálogo não são apresentados ao utilizador, são apenas para uso do sistema.

- Em todas as situações após tocar o som a 1ª vez o sistema apresenta a seguinte mensagem:

“Se pretender repetir os sons, prima a tecla 8”, o cliente tem a possibilidade de ouvir 5 vezes os sons. Os sons tocam todos sequencialmente tornando a localização mais rápida.

DIÁLOGOS NAVMETRO - VERSÃO 22



Glossário

Acessibilidade - a facilidade com que algo pode ser utilizado, visitado ou acedido pelas pessoas em geral, especialmente por aquelas que têm algum tipo de deficiência.

Ambliopia - é uma disfunção oftálmica caracterizada pela redução ou perda da visão num dos olhos, ou mais raramente em ambos, sem que o olho afectado mostre qualquer anomalia estrutural.

“Auditory Brainstem Response (ABR)” - é um sinal eléctrico invocado pela parte inferior do cérebro humano aquando do estímulo sonoro de um dado som como por exemplo um "click".

“Automatic Speech Recognition (ASR)” - técnica que permite o reconhecimento de palavras por software.

“Chirp” - sinal em que a frequência aumenta ou diminui com o tempo.

Cílios - apêndices das células eucarióticas com movimento constante numa única direcção. Este nome deriva do latim, com o significado de pestana, pela sua similaridade aparente.

Colículo - região do sistema nervoso central que se divide em “superior” e “inferior”. O “superior” recebe aferências multissensoriais (visuais, auditivas e somestésicas) e responsáveis pelo posicionamento dos olhos e da cabeça em relação aos estímulos que provêm do meio ambiente. O “inferior”, situado abaixo do “superior” tal como o nome indica, é o principal núcleo do cérebro médio, sendo a primeira instância onde a informação de orientação vertical se funde com a da orientação horizontal.

“Dual Tone Multi Frequential (DTMF)” - correspondência entre teclas do telefone e conjuntos de dois tons de duas frequências utilizados em telefonemas.

“Event Related Potential (ERP)” - é qualquer resposta medida do cérebro que é directamente o resultado de pensamentos ou percepções.

Impedância - é a relação entre o valor eficaz da diferença de potencial entre dois pontos de um circuito em consideração, e o valor eficaz da corrente resultante desse circuito.

“Interactive Voice Response (IVR)” - Tecnologia que coordena diálogo e interacção de utilizadores ao telefone, com um dado sistema de informação de forma automática.

Magnetoencefalograma - é uma técnica não invasiva que regista a actividade funcional cerebral, mediante a captação de campos magnéticos, permitindo investigar as relações entre as estruturas cerebrais e as suas funções.

Proprioceptiva - vinda de órgão e estruturas internas como articulações, tendões, músculos, vísceras, que pode ser consciente ou não, estar relacionada ao funcionamento de órgãos profundos, e com a execução precisa dos movimentos e manutenção do equilíbrio.

Relé - dispositivo electromecânico ou não, com inúmeras aplicações possíveis em comutação de contactos eléctricos.

Ruído branco - é um sinal aleatório com uma densidade espectral de potência plana. Uma combinação simultânea de sons de todas as frequências.

Sistema Nervoso Central (SNC) - conjunto do encéfalo e da medula espinhal dos vertebrados. Forma, junto com o sistema nervoso periférico, o sistema nervoso, e tem um papel fundamental no controle do corpo humano.

Sistema Nervoso Simpático (SNS) - um dos componentes do sistema nervoso autónomo, o qual é responsável pelo controlo involuntário de vários órgãos internos.

“Text-To-Speech (TTS)” - Síntese de fala a partir do texto, sem necessidade de recorrer à reprodução de gravações prévias.

Tom puro - tem uma forma de onda sinusoidal e caracteriza-se pela sua frequência.

Vestibular - que contribui para o equilíbrio e para o sentido espacial de orientação. O sistema vestibular é o sistema sensorial que fornece a informação dominante sobre movimento e equilíbrio do ser humano.

“Wireless Positioning System (WPS)” - sistema que permite explorar redes Wi-Fi integrando capacidades de localização em tempo real.

Índice Remissivo

- Acessibilidade, iii, 1, 2, 4, 68, 100, 102, 120, 122, 126, 136, 138, 148, 149
Amplificador, 25, 151, 152
Analogia eléctrica, 9, 17, 24, 26
Banda crítica, 30, 31
Banda larga, 6, 31, 35, 52, 53, 60, 61, 65, 76, 85, 92
Campo sonoro, 40
Canal auditivo, 8, 9, 61
Células ciliadas, 19, 21, 22, 26, 27, 28
Cílios, 21, 22, 23, 25, 26
Cóclea, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 29, 145
Coclear, 10, 11, 17, 18, 25, 27, 29
Colículo, 29, 79
Corti, 14, 15, 16, 20, 21, 23, 24, 25, 29
dBA, 35, 36, 37, 118
Decay, 41
Decibel, 33, 34, 35, 36, 151, 152
Deficiente da visão, 2, 3, 68, 113
Difusão, 38, 122, 127
Dispersão das ondas, 42
Efeito “Cocktail Party”, 32
Efeito de máscara, 30, 31
Efeito de máscara, 30
Efeito de precedência, 41, 62, 63, 146
Endolinfa, 13, 14, 20, 22, 23, 25, 26
Escala média, 13, 14, 18, 21, 22
Escala vestibular, 13, 14, 17, 21, 23, 26
Helicotrema, 13, 14, 15, 17, 18, 20
Janela redonda, 10, 14, 15, 18
Localização espacial, iii, 3, 4, 5, 6, 44, 51, 54, 65, 67, 69, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 83, 100, 145, 147, 148
Localização sumativa, 41
Logarítmica, 18, 33, 151, 152, 153
Membrana basilar, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31
Membrana de Reissner, 13, 14
Membrana tectorial, 21, 22, 23, 25, 27
Metro, iii, v, vii, 2, 113, 115, 117, 122, 127, 134
NAVMETRO®, iii, v, vii, 2, 3, 5, 70, 89, 113, 114, 115, 132, 134, 141, 142, 148, 149
Ondas esféricas, 42
Ondas sonoras, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 18, 19, 25, 33, 37, 38, 43, 45, 56, 62, 145
Ouvido, iii, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 25, 30, 39, 42, 48, 49, 53, 57, 60, 63, 69, 72, 74, 91, 94, 98, 107, 118, 145, 146
Pavilhão auricular, 8, 9, 54, 55, 56, 84, 85, 146
Percepção do som, 41
Perdas entrópicas, 43
Perilínfa, 13, 14, 21, 22, 26
Plano sagital médio, iii, 41, 53, 58, 64, 92
Potência sonora, 31, 36, 37
Pressão mecânica, 152
Pressão sonora, 5, 6, 9, 11, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 43, 119, 121, 122, 151
Primeiras reflexões, 40
Razão crítica, 31
Reflexão, 38, 39, 41, 84, 146
Refracção, 38
Ressonância, 9, 16, 18, 19, 20, 39
Reverb, 41
Reverberação, 39
Ruído branco, 6, 30, 31, 51, 92, 98
Sensation level, 35
Sensibilidade, 2, 10, 11, 12, 22, 25, 28, 29, 33, 34, 35, 46, 47, 50, 53, 112, 118, 148
Sistema auditivo, 3, 5, 6, 26, 32, 41, 48, 64
Sistema ossicular, 10
Som directo, 40
SOS, iii, v, 2, 3, 4, 89, 90, 91, 92, 99, 101, 102, 103, 104, 109, 112, 113, 114, 118, 119, 120, 124, 126, 127, 128, 133, 134, 138, 139, 141, 148, 149
Tímpano, 9, 10, 11, 12
Tipo de som, 6, 91, 96, 97, 122, 124, 147
Tom puro, 17, 18, 20, 30, 31, 47, 62, 98

Referências

- Arons, B. (2006). *A Review of the Cocktail Party Effect*. Cambridge: MIT Media Lab.
- Azevedo, J. A. (1994). *Localização e simulação de som - Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores*. Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Blatrix, S. (s.d.). Cochlea. <http://www.cochlea.org/> .
- Blauert, J. (1983). *Spatial Hearing, 2nd edition*. Cambridge: MIT Press.
- Brainard, M. S., & Knudsen, E. I. (1993). Experience-dependent Plasticity in the Inferior Colliculus: A Site for Visual Calibration of the Neural Representation of Auditory Space in the Barn Owl. *The Journal of Neuroscience Vol. 13(11)* , 4589-4608.
- Brungart, D. S., Durlach, N. I., & Rabinowitz, W. M. (1999). Auditory localization of nearby sources—II: localization of a broadband source. *Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 106, N° 4* , 1956-1968.
- Buxton, W., Gaver, W., & Bly, S. (1994). *Auditory Interfaces: The Use of Non-Speech Audio at the Interface*.
- Costa, M. F. (2008). *Estudo biomecânico do ouvido médio - Dissertação de Doutoramento*. Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Damaske, P. (2008). *Acoustics and Hearing*. Goslar, Germany: Springer.
- Darwin, C. J., & Hukin, R. W. (1999). Auditory Objects of Attention: The Role of Interaural Time Differences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance Vol. 25 N° 3* , 617-629.
- Després, O., Boudard, D., Candas, V., & Dufour, A. (2005). Enhanced self-localization by auditory cues in blind humans. *Disability and Rehabilitation Vol. 27(13)* , 753-759.

Després, O., Candas, V., & Dufour, A. (2005). The extent of visual deficit and auditory spatial compensation: evidence from self-positioning from auditory cues. *Cognitive Brain Research* Vol. 23 , 444-447.

Doucet, M. E., Guillemot, J. P., Lassonde, M., Gagné, J. P., Leclerc, C., & Lepore, F. (2005). Blind subjects process auditory spectral cues more efficiently. *Experimental Brain Research* Vol. 160 , 194-202.

Duda, R. O. (2000). *An Introduction to Human Spatial Hearing*. UC Davis: CIPIC Interface Laboratory.

Dufour, A., & Gérard, Y. (2000). Improved auditory spatial sensitivity in near-sighted subjects. *Cognitive Brain Research* Vol. 10 , 159-165.

Dufour, A., Després, O., & Candas, V. (2005). Enhanced sensitivity to echo cues in blind subjects. *Experimental Brain Research* Vol. 165 , 515-519.

Feldman, D. E., & Knudsen, E. I. (1997). An Anatomical Basis for Visual Calibration of the Auditory Space Map in the Barn Owl's Midbrain. *The Journal of Neuroscience* Vol. 17(17) , 6820-6837.

Fujii, A., Ohsugi, Y., Yamamoto, Y., Nakamura, T., Sugiura, T., & Tauchi, M. (2007). Comparison of Different Pointing Methods for Sound Localizability Measurement in the Vision Impaired Subjects. *Journal of Physiological Anthropology* , 381-385.

Getzmann, S. (2003). A Comparison of the Contrast Effects in Sound Localization in the Horizontal and Vertical Planes. *Experimental Psychology* Vol. 50(2) , 131-141.

Guyton, A. H. (2002). *Tratado de Fisiologia Médica - 10a. ed. - Capítulo 52*. Rio de Janeiro: Ed.Guanabara-Koogan.

Hartmann, W. M. (1993). Auditory Spectral Discrimination and the Localization of Clicks in the Sagittal Plane. *J. Acoustic Society America* Vol. 94 N° 4 , 2083-2092.

Hartmann, W. M. (1999). How we localize sound. *Physics Today* , 24-29.

Hartmann, W. M., & Wittenberg, A. T. (1996). On the externalization of sound images. *Journal Acoustic Society America* Vol. 99 , 3678-3688.

Hofman, P. M., Riswick, J. G., & Opstal, A. J. (1998). Relearning sound localization with new ears. *Nature Neuroscience* Vol. 1 N° 5 , 417-421.

- Ito, A., Kawabata, H., Fujimoto, N., & Adachi-Usami, E. (2001). Effect of Myopia on Frequency-Doubling Perimetry. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* Vol. 42 N° 5 , 1107-1110.
- Jeffress, L. (1948). A place theory of sound localization.41 (1948), pp. 35-39. *J. Comp. Physiol. Psychol.* Vol. 41 , 35-39.
- Klatzky, R. L., Beall, A. C., Loomis, J. M., Golledge, R. G., & Philbeck, J. W. (1999). Human navigation ability: Tests of the encoding-error model of path integration. *Spatial Cognition & Computation* 1 , 31-65.
- Knudsen, E. I., & Knudsen, P. F. (1990). Sensitive and Critical Periods for Visual Calibration of Sound Localization by Barn Owls. *The Journal of Neuroscience* Vol. 70(l) , 222-232.
- Koller, G., Haas, A., Zulauf, M., Koerner, F., & Mojon, D. (2001). Influence of refractive correction on peripheral visual field in static perimetry. *Graefes archive for clinical and experimental ophthalmology* Vol. 239 N° 10 , 759-762.
- Kujala, T., Alho, K., Huotilainen, M., R., J. I., Lehtokoski, A., Leinonen, A., et al. (1997). Electrophysiological evidence for cross-modal plasticity in humans with early- and late-onset blindness. *Psychophysiology* Vol. 34(2) , 213-216.
- Lamancusa, J. S. (2000). *Noise Control - Human response to sound* 3.7. Penn State.
- Lessard, N., Paré, M., Lepore, F., & Lassonde, M. (1998). Early-blind human subjects localize sound sources better than sighted subjects. *NATURE* Vol. 395 , 278-280.
- Lewald, J. (2002). Vertical Sound Localization in Blind Humans. *Neuropsychologia* Vol. 40 , 1868-1872.
- Litovsky, R. Y. (1997). Psychophysical and Physiological Evidence for a Precedence Effect in the Median Sagittal Plane. *The Journal of Neurophysiology* Vol. 77 No. 4 , 2223-2226.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., & Golledge, R. G. (2001). Navigating without vision: basic and applied research. *Optometry and Vision Science* Vol. 78 N° 5 , 282-289.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Pellegrino, J. W., & Fry, P. A. (1993). Nonvisual Navigation by Blind and Sighted: Assessment of Path Integration Ability. *Journal of Experimental Psychology* Vol. 122. N° 1 , 73-91.
- Mafra, I. (2009). *Sistema de Diálogos do Sistema NAVMETRO*. Porto, Portugal.: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Metro do Porto; ACAPO.
- Maltby, M. T. (2002). *Principles of Hearing Aid Audiology*. Yorkshire: Whurr Publishers.

Middlebrooks, J. C., & Green, D. M. (1991). Sound localization by human listeners. *Ann. Rev. Psychol.* 42 , 135-159.

MIROL, V. (2002). Fisiologia da Audição: Revisão e Considerações. *Anais do SeMEA - UFMG* .

Møller, A. R. (2006). *Hearing : anatomy, physiology, and disorders of the auditory system - Second Edition*. Texas: Academic Press.

Moore, B. C. (1997). *Hearing*. Cambridge, England: Academic Press.

Morrongiello, B. A., Timney, B., Humphrey, G. K., Anderson, S., & Skory, C. (1995). Spatial knowledge in blind and sighted children. *Journal of experimental child psychology* Vol. 59(2) , 211-233.

Oldfield, S. R., & Parker, S. P. (1984). Acuity of sound localization: a topography of auditory space I. Normal hearing conditions. *Perception* Vol. 13 , 581-600.

Recanzone, G. H., & Sutter, M. L. (2008). The Biological Basis of Audition. *The Annual Review of Psychology* 59 , 119-142.

Röder, B., Teder-Sälejärvi, W., Sterr, A., Rösler, F., Hillyard, S. A., & Neville, H. J. (1999). Improved auditory spatial tuning in blind humans. *Nature* Vol. 400 , 162-166.

Roffler, S. K., & Butler, R. A. (1968). Factors that influence the localization of sound in the vertical plane. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 43 N° 6 , 1255-1259.

Roman, N., Wang, D., & Brown, G. J. (2002). Location-based sound segregation. *Neural Networks, 2002. IJCNN '02. Proceedings of the 2002 International Joint Conference* , 1013-1016.

Shigeno, S., & Sakamoto, N. (1983). Localization of pure tones, white noise, single resonance tones, and synthetic vowels. *Ann. Bull ILP* 17 , 123-128.

Stern, R. M., Wang, D., & Brown, G. (2006). *Binaural Sound Localization - Capítulo 5 de Computational Auditory Scene Analysis*. New York: Wiley/IEEE Press.

Stevens, S. S., & Newman, E. B. (1934). The Localization of Pure Tones. *Proc Natl Acad Sci U S A* , 593-596.

Treeby, B. E., Paurobally, R. M., & Pan, J. (2007). The effect of impedance on interaural azimuth cues derived from a spherical head model. *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 121 Issue: Number 4 , 2217-2226.

Walker, B. N., & Lindsay, J. (2006). Navigation Performance With a Virtual Auditory Display: Effects of Beacon Sound, Capture Radius, and Practice. *Human Factors Vol. 48 N° 2* , 265-278.

Wightman, F. L., & Kistler, D. J. (1999). Resolution of front-back ambiguity in spatial hearing by listener and source movement. *Journal Acoustical Society America 105* , 2841.

Yin T, C. J. (1990). Interaural time sensitivity in medial superior olive of cat. *Journal of Neurophysiology Vol. 64 No.2* , 465-488.

Yost, W. A. (2000). *Fundamentals of Hearing: An Introduction*. San Diego: Academic Press.

Zwiers, M. P., Opstal, A. J., & Cruysberg, J. R. (2001). Two-dimensional sound-localization behavior of early-blind humans. *Experimental Brain Research Vol. 140* , 206-222.

Zwiers, M. P., Opstal, A. J., & Paige, G. D. (2003). Plasticity in human sound localization induced by compressed spatial vision. *Nature Neuroscience Vol. 6 N° 2* , 175-181.