

Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

**LOCALIZAÇÃO E SIMULAÇÃO
DE SOM TRIDIMENSIONAL**

1994

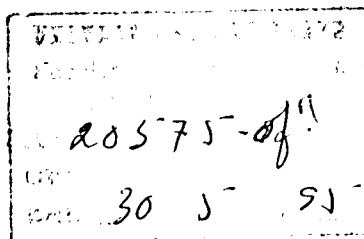
B.S. 860

Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

Localização e simulação de som tridimensional

Dissertação de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
na área de Telecomunicações, efectuado na

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



621.3 (013)
R2Ej/LOC

1994

U43M
A 987L

Agradecimentos

Pretendo deixar aqui o meu maior reconhecimento a todos os que tornaram possível esta tese:

O orientador desta tese, o Prof. António Manuel Casimiro que propôs este trabalho e de quem tive sempre todo o apoio e ajuda necessária, fazendo todos os possíveis para que este trabalho avançasse resolvendo qualquer necessidade para a sua prossecução.

Os professores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em especial os professores de Mestrado, de quem obtive os fundamentos para o meu desenvolvimento intelectual e ao Prof. Adriano Carvalho por toda a colaboração prestada.

À minha esposa, que tudo fez na ajuda a este trabalho e ainda pela sua compreensão no decurso do mesmo.

À minha mãe e tia, por tudo aquilo que fizeram por mim e aos meus irmãos, pelo seu estímulo.

Aos meus colegas e amigos pelo insentivo que demonstraram para a realização deste trabalho, em especial o Eng^o Alberto Velez Grilo pela sua ajuda nas experiências realizadas.

Ao Eng^o Correia Lopes da Universidade do Porto, ao Eng^o Pena da Universidade de Vigo, Espanha, ao Dr. John Bunton do CSIRO, Austrália, ao Dr. Robert Jacobson da World Design de Seattle, ao Dr. Brian Carr do centro tecnológico de Washington e ao Dr. Hilmar Lehnert da Universidade de Bochum, Alemanha, pela a sua -disponibilidade no envio de material bibliográfico.

À secção de Telecomunicações da Faculdade de Engenharia da Universidade do porto e à unidade de Engenharia da Universidade da Madeira pelos meios que colocaram à minha disposição.

Índice

Prefácio	v
1.1 Introdução	vi
1.2 Motivação da tese	vii
1.3 Objectivos da tese.....	vii
1.4 Estrutura da tese	vii
Glossário	x
1 Localização de fontes sonoras	1
1.1 Introdução	2
1.2 Mecanismo de audição humana	3
1.2.1 Ouvido externo	4
1.2.2 Ouvido médio	6
1.2.3 Ouvido interno	8
1.3 Limite de audição e unidades	13
1.4 Resolução do sistema auditivo na localização de uma fonte sonora no espaço livre	15
1.4.1 Sistema espacial de coordenadas	15
1.4.2 Precisão de localização no espaço livre	16
1.4.2.1 Acuidade espacial na localização auditiva	17
1.4.2.2 Discriminação frente/trás	30
1.5 Procedimentos de localização auditiva no espaço livre	33
1.5.1 Localização no plano horizontal	34
1.5.1.1 Diferença de tempo interauricular	37
1.5.1.2 Diferença de intensidade interauricular	42
1.5.1.3 Relação entre as diferenças de tempo e intensidade	46
1.5.1.4 Localização monauricular	49
1.5.1.5 Funções de transferência do ouvido	51
1.5.2 Localização no plano vertical	56
1.5.2.1 O papel da aurícula e espectro necessário	56
1.5.2.2 Localização biauricular	61
1.5.2.3 Funções de transferência do ouvido	64
1.5.3 Localização frente/trás	69
1.5.4 Localização no azimute e elevação	70

1.5.5	Percepção da distância	78
1.5.6	Outros procedimentos de localização	80
1.5.6.1	Movimentos da cabeça	80
1.5.6.2	Visão	82
1.6	Localização de fontes múltiplas	83
1.6.1	Fontes que emitem sinais coerentes e efeito de precedência	84
1.6.2	Fontes que emitem sinais não coerentes e efeito "cocktail party"	91
1.7	Aplicações	95
1.7.1	Sistemas que usam modelos matemáticos de localização espacial	97
1.7.2	Sistemas perceptuais biauriculares	101
1.7.3	Simulação biauricular em salas	107
2	Desenvolvimento e teste de modelos	111
2.1	Introdução	112
2.2	Visão geral do suporte computacional	113
2.3	Programas de simulação desenvolvidos no NeXT	116
2.3.1	Programa para simulação de fontes no plano horizontal ...	116
2.3.2	Plano vertical e localização extra-cranial da fonte sonora	120
2.3.3	Reverberação	122
3	Conclusões e trabalhos futuros	126
3.1	Resumo-conclusão	126
3.2	Trabalhos futuros	131
	Apêndices	132
	Apêndice 1 - Programa de simulação no plano horizontal	133
	Apêndice 2 - Programa de exteriorização	138
	Apêndice 3 - Programa de reverberação	140
	Apêndice 4 - Sistemas comerciais de localização.....	144
	Referências	145
	Índice de autores	156

Prefácio

1.1 Introdução

A compreensão dos seus próprios mecanismos físicos permite ao homem a possibilidade de construir máquinas que, imitando-o, consigam criar uma realidade virtual agradável com vista à compenetração com o meio e meios que o cercam. Um desses mecanismos é o sistema auditivo, capaz de recolher energia sonora que lhe chega de todo o espaço para seleccionar a informação importante à compreensão do que o rodeia. Enquanto que no sistema visual só é perceptível aquilo que se encontra dentro do campo de visão, o sistema auditivo recebe informação de qualquer direcção, de um modo independente da orientação do ouvinte, devido à facilidade de curvamento das ondas sonoras.

O som é originado pelo movimento ou vibração de um objecto. Este movimento é comunicado ao meio ambiente através de um padrão de mudanças de pressão. O que acontece é que as partículas atmosféricas ou moléculas são mais comprimidas umas às outras do que o normal (condensação) e depois são mais afastadas do que o normal (rarefacção). As ondas sonoras movem-se para fora dos corpos em vibração mas as moléculas não avançam com a onda, apenas vibram à volta do equilíbrio. A onda sonora geralmente torna-se mais fraca com a distância à fonte e pode estar sujeita a reflexões e refracções causadas pelos objectos ao longo do seu percurso. Deste modo, a imagem auditiva que alcança o ouvido pode diferir daquela que foi inicialmente gerada. Este é um dos motivos principais pela qual as experiências realizadas na localização de fontes sonoras necessitam de espaços anecóicos. A onda sonora mais simples é a senoide e que também se pode designar por tom puro.

A localização dos sons que rodeiam os seres humanos, e animais, é imprescindível para a determinação dos objectos a ter em atenção. O objectivo da localização é a determinação da direcção e distância da fonte sonora relativamente ao ouvinte. O sistema de localização auditivo é notável mesmo em ambientes ruidosos e reverberantes, conseguindo seleccionar os sons de uma fonte sonora e excluir ao mesmo tempo os sons provenientes de outras fontes sonoras.

1.2 Motivação da tese

A ideia de simular por processamento de sinal os fenómenos envolvidos na audição, de modo a poder realizar um ambiente sonoro virtual, tem vindo a criar um crescente interesse neste campo principalmente nas empresas ligadas ao meio audio-visual e à instrumentação musical, embora já se estenda também às empresas de jogos com efeitos sonoros.

Estando-se, no âmbito do Projecto Europeu COST 229 "Processamento de sinal para as Telecomunicações", a trabalhar em colaboração com a Universidade de Linköping, na Suécia, no campo da telepresença, torna-se necessário efectuar o levantamento do estado da arte no campo da localização e simulação de fontes sonoras, testando alguns dos modelos usados neste campo e adquirindo informação e conhecimento para o desenvolvimento futuro de novos modelos.

1.3 Objectivos da tese

Há mais de 150 anos, que o sistema auditivo começou a ser objecto de uma vasta e sistemática investigação, na interpretação dos vários atributos sonoros. Nestes estudos, a localização de fontes sonoras tem tido um espaço muito importante. Apesar do longo período de investigação, os modelos usados para a descodificação da direcção da fonte têm-se baseado principalmente nas diferenças dos sons que chegam aos dois ouvidos. Só muito recentemente é que foi considerada a codificação efectuada por parte do ouvido externo, cabeça e tronco, elaborando-se assim um modelo mais aproximado da realidade da audição, mas ainda longe do domínio completo dos fenómenos desta realidade.

Esta tese tem por objectivo principal resumir e sistematizar o estado da arte no campo da localização e simulação de fontes sonoras, testando também alguns dos modelos mais importantes de entre os apresentados.

Devido à dificuldade em obter artigos actualizados neste campo, pois a investigação é de utilização industrial quase imediata, estes objectivos não seriam possíveis sem a prestável colaboração de laboratórios internacionais, nomeadamente a "Human Interface Technology Laboratory" de Washington,

a Universidade de Bochum na Alemanha e Espanha que gentilmente cederam documentação de trabalho actualizada.

1.4 Estrutura da tese

O núcleo principal da tese está dividido em dois grandes capítulos. O primeiro resume o estado da arte relativamente à localização espacial de fontes sonoras e o segundo apresenta alguns modelos criados pelo autor que simulam alguns efeitos analisados no primeiro capítulo, interpretando os resultados obtidos.

No primeiro capítulo, inicialmente é apresentado o percurso sonoro ao longo de todo o sistema auditivo até aos centros nervosos, ou seja, a análise de "como o ouvido ouve".

Na localização, é apresentado em primeiro lugar o erro que o sistema auditivo comete na localização de fontes sonoras em função dos parâmetros espaciais e, de seguida, os procedimentos de localização utilizados para codificação da direcção da fonte, neste caso para o espaço livre ou anecóico. Os espaços reverberantes, como salas ou lugares onde existem várias fontes sonoras, serão também referidos. Procura-se assim saber como o sistema auditivo é capaz de discriminar, em ambientes ruidosos, ou seleccionar uma fonte sonora no meio de várias.

Por fim, este capítulo apresenta alguns modelos importantes que permitem simular o ouvido externo na localização ou detecção de fontes.

No segundo capítulo são apresentados três modelos desenvolvidos com base no capítulo anterior. O primeiro permite a localização de fontes sonoras no plano horizontal, tendo em conta os principais procedimentos de localização para este plano para apresentação através de auscultadores. Os auscultadores têm sido bastante utilizados nas tarefas de localização devido à facilidade de controlo das excitações sonoras.

O segundo modelo apresentado permite simular exteriorização de sons apresentados por auscultadores, contrariando a tendência que estes possuem de fazer perceber o som como vindo de dentro da cabeça.

Prefácio

O último modelo adiciona reverberação a um sinal, de modo a dar a sensação de espaço sentida em ambientes reverberantes.

Como a realidade acústica varia de indivíduo para indivíduo, os modelos apresentados seguem os parâmetros médios apresentados no capítulo anterior.

O terceiro capítulo apresenta as conclusões dos trabalhos desta tese e indica trabalhos futuros a serem desenvolvidos neste campo.

Nos apêndices encontram-se os programas desenvolvidos para os modelos de simulação. Estes foram realizados em linguagem C com conceitos orientados por objectos, numa "workstation" NeXT.

Para uma fácil pesquisa da bibliografia utilizada, além das referências, também é apresentado um índice de autores indicando as páginas em que cada um deles aparece.

Glossário

ângulo mínimo audível	minimum audible angle
biauricular	binaural
diferença de tempo interauricular	interaural time difference
diferença de intensidade interauricular	interaural intensity difference
diferença perceptível	just noticeable difference
efeito de precedência	precedence effect
estalidos	clicks
funções de transferência do ouvido	head-related transfer functions
imagem auditiva	auditory event
interauricular	interaural
lateralização	lateralization
localização extra-cranial	out-of-head localization
localização dentro da cabeça	in-head localization
método das imagens	mirror-image method
método dos raios	ray-tracing method
modelo de apontagem	pointing method
monauricular	monaural
plano vertical médio	median sagittal plane
procedimentos de localização	localization cues
razão biauricular	binaural trading-ratio
ruído branco	white noise
sistema auditivo	auditory system

Localização de fontes sonoras

1.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado, inicialmente, uma descrição do sistema auditivo humano com o objectivo de ajudar a compreender como é que nós ouvimos os sons que nos chegam diariamente aos dois ouvidos. A sua compreensão servirá como apoio à análise que irá ser efectuada sobre o modo de como o ser humano, ou mais concretamente o complexo sistema ligado à audição, obtém a informação sobre a localização das fontes sonoras no espaço.

Já na localização espacial, será mostrado que a precisão na detecção das fontes sonoras não é igual em todo o espaço. Existem zonas do espaço onde é mais fácil a detecção das fontes e outras onde se comete maiores erros. O ângulo mínimo audível compara a discriminação auditiva com a discriminação do espaço onde existem as fontes.

O tipo de sinal, transmitido pela fonte sonora, tem uma grande importância na localização espacial. De entre estes, dois tipos de sinal têm particular relevância: o de banda larga e o de banda estreita.

Um sinal de banda larga é considerado aquele que cobre todo o espectro auditivo humano. Para se obter uma excitação de banda larga é possível através de um impulso, uma vez que a amplitude da resposta em frequências é unitária. Contudo, a energia de tal sinal é limitada devido à máxima pressão sonora permitida sem causar dano ao sistema auditivo. Um modo de se ultrapassar esta dificuldade é utilizar uma série de impulsos curtos com a duração pretendida e espaçamento entre impulsos e sinais dos mesmos aleatórios. Isto dá origem ao chamado ruído branco limitado ao espectro auditivo cuja energia é agora controlada pela duração.

Um sinal de banda estreita, é normalmente obtido utilizando a filtragem linear do ruído branco.

Estes dois tipos de sinais são bastante utilizados nas experiências de audição pelo facto de o sinal de banda larga conter energia em todas as frequências do espectro audível, enquanto que o de banda estreita só tem energia naquelas frequências pretendidas. Por outro lado, o sinal de ruído é o que permite melhor precisão na localização espacial. Existem ainda outros

tipos de sinais como sinusoides, estalidos, voz, ruído Gaussiano, etc. que têm sido usados para o estudo da localização de fontes.

Existe imensa literatura sobre os estudos efectuados, na tentativa de se compreender como é que o sistema auditivo interpreta a informação espacial. Destes estudos, tentar-se-à obter os procedimentos de localização, quer biauriculares, referente aos sinais presentes em ambos os ouvidos, quer monauriculares, referente apenas aos sinais presentes num dos ouvidos, que permitem a localização em todo o espaço auditivo, em condições de espaço livre. O objectivo é obter os principais procedimentos que permitem a localização do azimute, elevação e distância da fonte sonora. Ao contrário do ambiente em espaço livre, a localização de fontes sonoras em espaços fechados sofre efeitos especiais que permitem ao sistema auditivo, por exemplo, realçar fontes sonoras embebidas em ruído.

Uma vez que a informação espacial é introduzida pelo sistema auditivo externo, aparecem modelos que tentam imitar esse efeito, alterando as excitações sonoras do sinal emitido, de modo a simularem a fonte sonora em qualquer ponto do espaço. A maioria dos modelos existentes baseiam-se nas funções de transferência do ouvido, funções essas com as características direccionais necessárias à localização das fontes sonoras. Desenvolveram-se, assim, sistemas auditivos virtuais, tridimensionais, que usam filtros, normalmente digitais, para obterem as características de amplitude e fase dessas funções de transferência.

A variabilidade dessas funções, de indivíduo para indivíduo, levou à necessidade de se procurar modelos matemáticos que de alguma forma simulem os procedimentos de localização.

1.2 Mecanismo de audição humana

Pretendendo dar uma ideia do mecanismo que permite ao ser humano a percepção dos sinais sonoros, nesta secção será descrito o percurso das ondas de som através do sistema auditivo (Blauert, 1983; Allen 1985; Guyton, 1986; Moore, 1992, Evans, 1993).

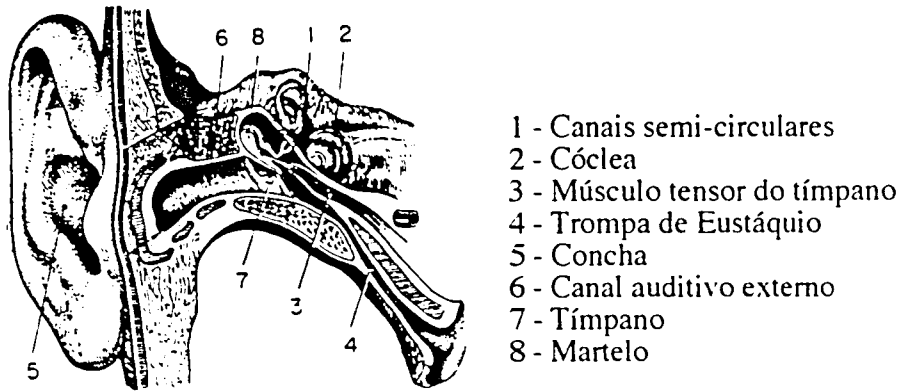


Fig. 1.1 - Sistema auditivo.

Os seres humanos têm dois ouvidos localizados à mesma altura no lado esquerdo e direito da cabeça. Como veremos mais tarde, o facto de se ter dois ouvidos, a sua posição e distância entre eles tem um papel preponderante na localização espacial de fontes sonoras.

O sistema auditivo é constituído pelo ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno. O ouvido externo e médio obtêm a energia sonora e fornecem-na de um modo eficiente ao ouvido interno. Nós ouvimos devido à acção analisadora do som no ouvido interno e nos centros auditivos do cérebro. A figura 1.1 apresenta uma representação esquemática do ouvido humano. Utilizando simplificações do sistema auditivo, vários autores têm construído modelos que simulam os vários processos da audição (Boer e MacKay, 1980; Allen, 1980, 1985; Holmes, 1987; Lyon e Mead, 1988; Payton, 1988; Kates, 1991). Esses modelos tentam reproduzir o comportamento mecânico e neuronal do ouvido, com especial incidência do ouvido interno. Tais mecanismos permitem o estudo do processamento de sinal realizado pelo sistema auditivo, funções auditivas e desenvolvimento de aparelhos eléctrico-mecânicos de ajuda à audição.

1.2.1 Ouvido externo

Como pode ser visualizado pela figura 1.1, o ouvido externo é constituído pela aurícula e canal auditivo. As ondas sonoras interagem com o tronco, cabeça, aurícula, paredes do canal auditivo e membrana timpânica, de modo a

alterar o sinal de entrada para inclusão da informação referente à direcção da fonte sonora no espaço tridimensional.

A aurícula é constituída por uma estrutura de cartilagem coberta por pele envolvendo o canal auditivo. As suas características não são exactamente iguais para todos os indivíduos. Por um longo período de tempo, a aurícula humana foi considerada como sendo uma corneta sonora colectora dirigindo o som para o canal auditivo (Rodgers, 1981). Devido às dimensões da aurícula, o seu efeito seria apenas às altas frequências. Contudo, na investigação recente, a aurícula é mais do que um simples colectador sonoro. Mais recentemente, começou-se a dar importância às suas estruturas irregulares, saliências e depressões (ver figura 1.2), que podem servir como superfícies reflectoras. De notar também a assimetria à volta da abertura do canal do ouvido, sugerindo que as saliências estão organizadas de modo que a mudança angular do som de entrada corresponda a uma mudança no padrão de reflexões (Watkins, 1978). Como veremos mais tarde, a aurícula tem um importante papel na localização das fontes sonoras. Os seus efeitos acústicos baseiam-se nos fenómenos físicos, tais como reflexão, difracção, dispersão, sombreamento sonoro, interferência e ressonância. Shaw e Teranishi (1968), usando uma aurícula artificial, detectaram um conjunto de frequências de ressonância para vários ângulos de incidência da fonte com a aurícula. Comparando com medidas em aurículas reais, confirmaram a existência da primeira e segunda ressonância.

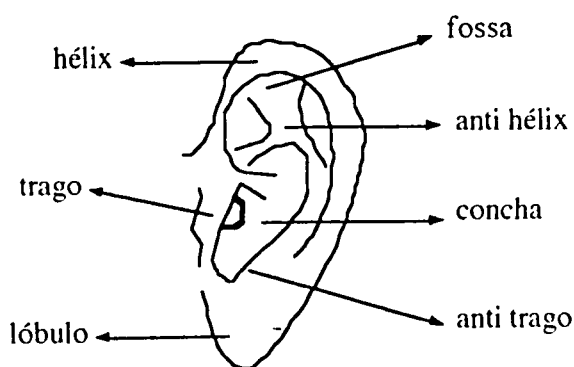


Fig. 1.2 - Principais saliências e depressões da aurícula.

O canal auditivo é um tubo ligeiramente curvo revestido de pele que tem início na cavidade da concha e termina na membrana timpânica ou tímpano. Em média, o canal tem cerca de 25 mm de comprimento e 7-8 mm de diâmetro (Blauert, 1983). Devido à sua geometria, o canal auditivo suporta um

número infinito de modos acústicos. Como a área sectorial do canal é muito pequena comparativamente aos comprimentos de onda dos sinais acústicos, o principal modo de propagação é uma onda plana progressiva. Os modos mais elevados existem apenas para frequências acima do espectro audível ou perto da entrada do canal e perto da membrana timpânica, onde a distribuição de pressão é mais complexa (Rabbit e Holmes, 1988). As ondas evanescentes propagam-se apenas por uma distância limitada e a sua influência na onda plana é mínima. Deste modo, é possível aplicar a teoria unidimensional para análise do comportamento das ondas acústicas no canal auditivo.

1.2.2 Ouvido médio

A membrana timpânica e o sistema ossicular, que constituem o ouvido médio (ver figura 1.3), transmitem o som através dessa parte do ouvido. O sistema ossicular consiste em três pequenos ossos designados por martelo, bigorna e estribo.

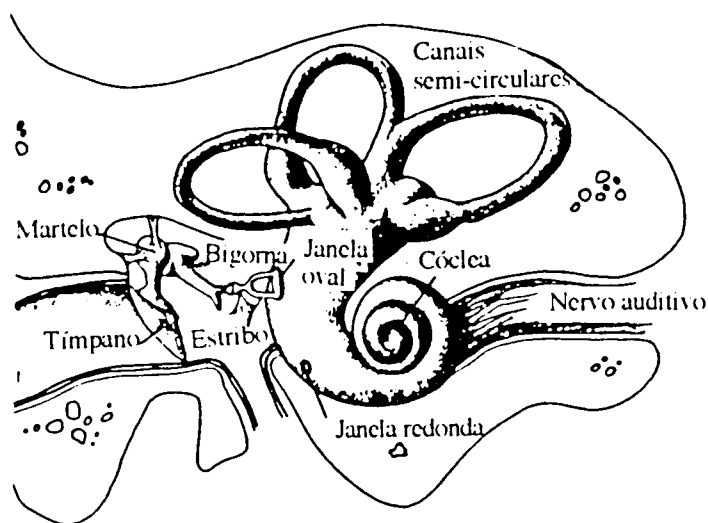


Fig. 1.3 - Ouvido médio e ouvido interno.

A membrana timpânica é um diafragma cutâneo com forma cônica e cuja cavidade se encontra para baixo e para fora em direcção ao canal auditivo. A área aproximada da superfície da membrana timpânica é de 55 mm². Ligado ao centro da membrana timpânica está o cabo do martelo que, por seu lado, está ligado à bigorna, de modo que quando o martelo se move a bigorna move-se em sincronia com ele. O extremo oposto da bigorna articula-se com a

haste do estribo que por sua vez descansa sobre o labirinto membranoso na abertura da janela oval, onde as ondas são transmitidas ao ouvido interno, ou seja, à cóclea. A membrana timpânica e o sistema ossicular permitem uma maior sensibilidade de audição às ondas sonoras de entrada, sem os quais um som forte 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 da janela oval ser bastante diferente da 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 com a impedância sonora do fluido coclear. A transmissão sonora através do ouvido médio é mais eficiente às médias frequências (Moore, 1992).

Para que a membrana timpânica entre em oscilação deve ser exercida uma força. Esta força resulta da diferença de pressão entre os dois lados do diafragma, sendo para todas as frequências,

$$F = S_{\text{eff}}(f)(p_{\text{Tr}} - p'_{\text{Tr}}) \quad (1.1)$$

onde $S_{\text{eff}}(f)$ é a área efectiva do diafragma, que varia com a frequência, p_{Tr} e p'_{Tr} são as pressões em ambos os lados do diafragma.

A pressão de ar estática na cavidade timpânica é regulada para o exterior por uma breve abertura da Trompa de Eustáquio (ver figura 1.1), geralmente durante o processo de bocejar e engolir. Normalmente, esse tubo forma um espaço hermeticamente fechado e o volume de ar no ouvido médio está selado. Quando sons muito intensos atingem a membrana timpânica, 80-90 dB após um período de 40 a 80 milisegundos, produz-se um reflexo que causa a contracção dos músculos do ouvido médio, diminuindo a transmissão ossicular de sons de baixa frequência. Esse *reflexo de atenuação* permite diminuir a intensidade sonora até cerca de 30 ou 40 dB. 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.

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. Contudo, a energia disponível não é suficiente para que se ouça através do osso (Guyton, 1986).

Aparecem alguns modelos que se propõem descrever a conversão realizada pelo ouvido médio. Na figura 1.4 é apresentado o modelo proposto por Sghera e Zweig (1992). Devido à sua linearidade, este modelo pode ser visto como uma "caixa preta" caracterizado pela sua resposta em frequências. A figura 1.4 também apresenta a equação que relaciona as pressões, P , com a velocidade do volume, V , através da matriz de impedâncias, Z .

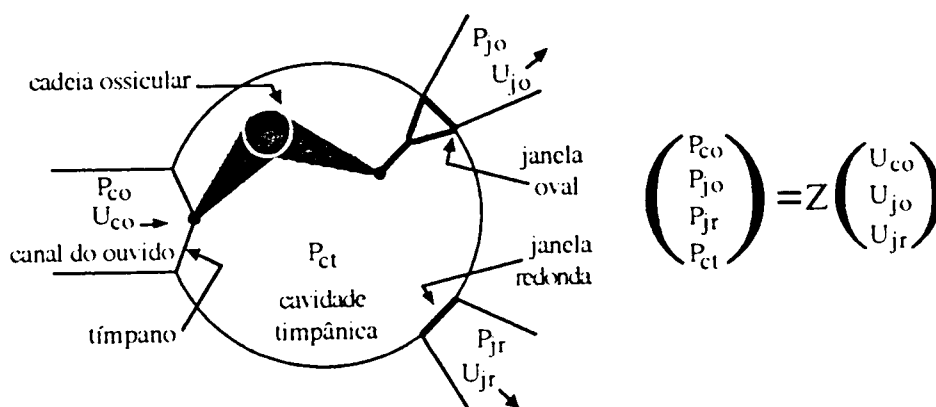


Fig. 1.4 - Representação esquemática do ouvido médio.

1.2.3 Ouvido interno

O ouvido interno é constituído pela cóclea, vestíbulo e canais semi-circulares. A cóclea inclui o órgão de Corti, como pode ser visualizado na figura 1.5, que contém os receptores da audição. O vestíbulo e os canais semi-circulares contêm os órgãos vestibulares com receptores para o sentido do equilíbrio. Os canais semi-circulares podem ser visualizados nas figuras 1.1 e 1.3.

A cóclea é a parte mais importante do ouvido, pois o seu entendimento fornece grande parte das características da percepção auditiva. A cóclea, com paredes rígidas e preenchida por líquidos quase incompressíveis, é constituída por um sistema de três tubos diferentes enrolados, apresentado nas figuras 1.3 e 1.5, denominados por escala vestibular, escala média (separados pela

membrana de Reissner) e pela escala timpânica (separada da escala média através da membrana basilar). Na superfície da membrana basilar encontra-se o órgão de Corti, que contém uma série de células sensíveis a excitações mecânicas - as células ciliadas. Estas células constituem os órgãos receptores que geram impulsos nervosos em resposta às vibrações sonoras.

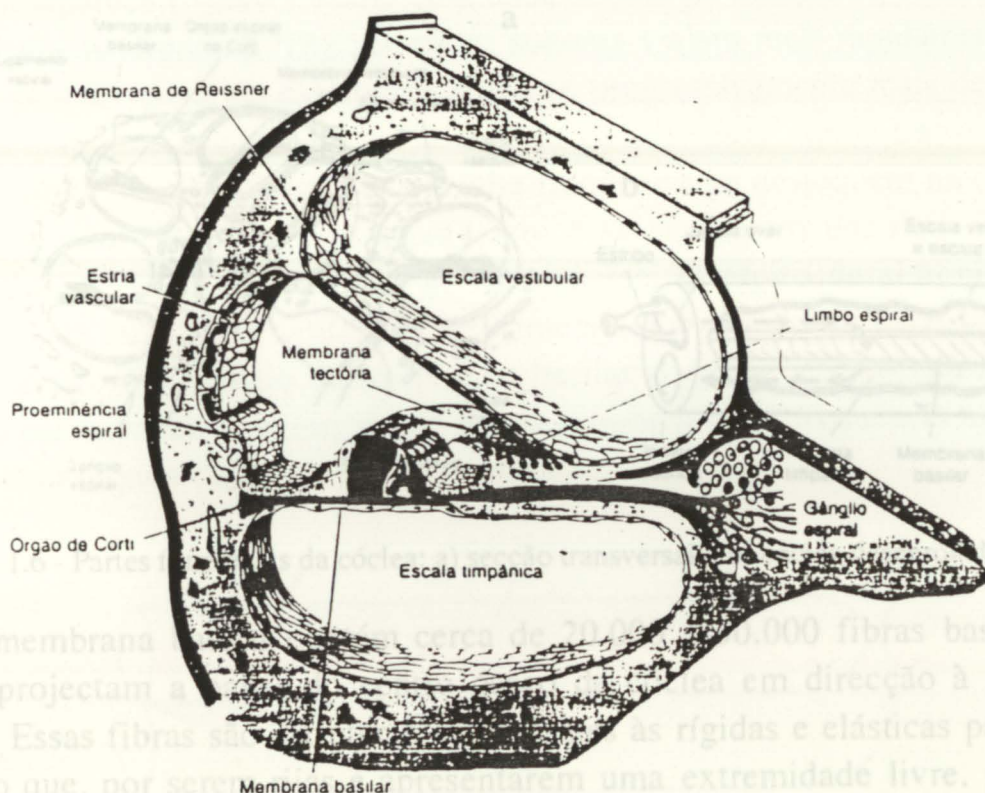


Fig. 1.5 - Secção da cóclea.

A figura 1.6a) apresenta a secção transversal da cóclea e a figura 1.6b) apresenta a cóclea desenrolada para melhor compreensão da transmissão das vibrações sonoras. Dado que a membrana de Reissner é muito fina, para efeitos de transmissão sonora, a escala vestibular e a escala timpânica são consideradas como um só canal. As vibrações sonoras penetram pela janela oval, a partir do ouvido médio, provocando um movimento do líquido coclear, que por sua vez vai causar o movimento da janela redonda. A janela redonda actua para completar o circuito permitindo, desse modo, o movimento do fluido. As escalas vestibular e timpânica comunicam entre si através de uma pequena abertura designada por helicotrema e que se encontra na parte apical da cóclea. Quando o estribo se move muito lentamente para dentro, o líquido da escala vestibular é empurrado através do helicotrema para a escala timpânica. Contudo, se o estribo vibrar rapidamente, o líquido não terá tempo

de passar através do helicotrema, atingir a janela redonda e voltar à janela oval entre duas vibrações sucessivas. Neste caso, a onda líquida toma um atalho através da membrana basilar, fazendo-a arquer a cada vibração sonora. Assim, cada frequência sonora produz um padrão de vibração permitindo a discriminação das frequências.

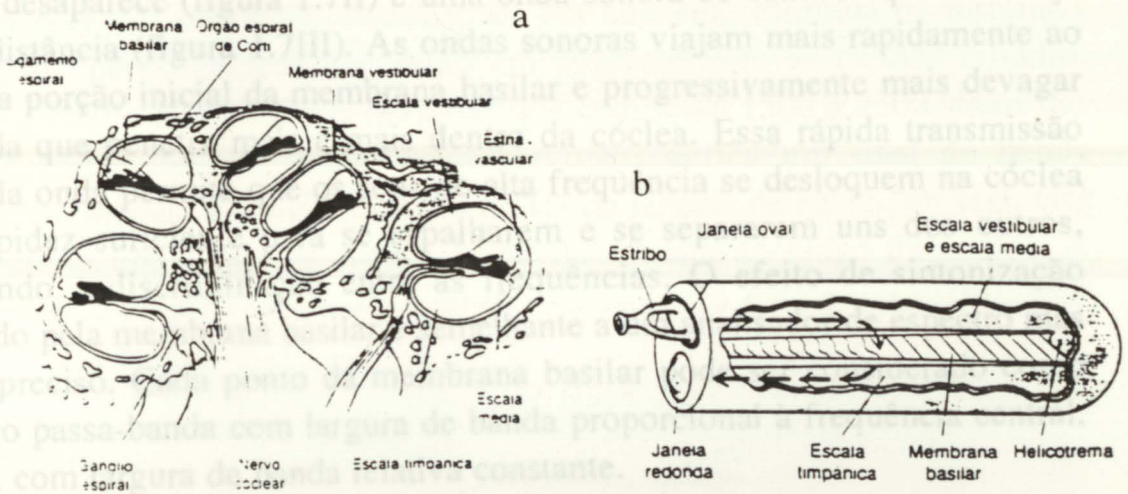


Fig. 1.6 - Partes funcionais da cóclea: a) seção transversal e b) cóclea desenrolada.

A membrana basilar contém cerca de 20.000 a 30.000 fibras basilares, que se projectam a partir do centro ósseo da cóclea em direcção à parede externa. Essas fibras são estruturas semelhantes às rígidas e elásticas palhetas de sopro que, por serem rijas e apresentarem uma extremidade livre, podem vibrar. Os comprimentos das fibras basilares aumentam progressivamente desde as janelas oval e redonda até ao helicotrema. Os diâmetros das fibras basilares diminuem desde a base até ao helicotrema, de modo que a sua rigidez diminui. Assim, as fibras mais curtas e mais rígidas tendem a vibrar numa frequência elevada, enquanto que as longas e flexíveis tendem a vibrar numa frequência mais baixa. Além destas diferenças, as fibras também são diferentemente "carregadas" pela massa líquida da cóclea, isto é, quando a fibra vibra para a frente e para trás todo o líquido entre esta fibra e as janelas oval e redonda também se deve mover. Assim, para uma fibra que esteja ao nível da base da cóclea, a massa total de líquido que se move é pequena em comparação com aquela que vibra ao nível da helicotrema, o que vai favorecer a vibração de altas frequências ao nível das janelas e as baixas frequências no outro lado.

O comportamento da onda progressiva que viaja ao longo da membrana basilar foi primeiramente desvendada por G. von Békésy em 1928. Uma onda sonora de alta frequência viaja apenas uma pequena distância ao longo da membrana basilar antes de alcançar o seu ponto de ressonância e desaparecer (figura 1.7I), uma onda de média frequência viaja cerca de metade da distância e então desaparece (figura 1.7II) e uma onda sonora de baixa frequência viaja toda a distância (figura 1.7III). As ondas sonoras viajam mais rapidamente ao longo da porção inicial da membrana basilar e progressivamente mais devagar à medida que penetra mais e mais dentro da cóclea. Essa rápida transmissão inicial da onda permite que os sons de alta frequência se desloquem na cóclea com rapidez suficiente para se espalharem e se separarem uns dos outros, permitindo a discriminação entre as frequências. O efeito de sintonização efectuado pela membrana basilar é semelhante a um analisador de espectro mas menos preciso. Cada ponto da membrana basilar pode ser considerado como um filtro passa-banda com largura de banda proporcional à frequência central, ou seja, com largura de banda relativa constante.

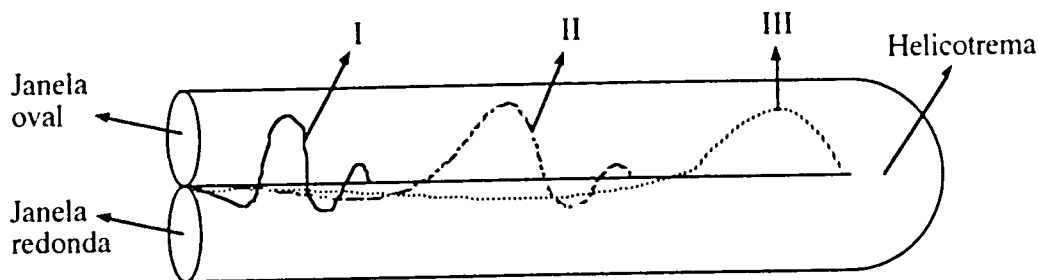


Fig. 1.7 - Representação das ondas que viajam ao longo da membrana basilar. I) sons de alta frequência, II) sons de média frequência e III) sons de baixa frequência.

Como já foi dito, o órgão de Corti, que se encontra na superfície da membrana basilar, é o responsável pela geração de impulsos nervosos em resposta à vibração da mesma. Os receptores sensoriais são constituídos por uma fila de células ciliadas internas, num total de cerca 3500, e 3 a 4 filas de células ciliadas externas, num total de cerca 20000, como está representado na figura 1.8. As células ciliadas internas detectam a velocidade da onda e convertem o movimento em padrões de impulsos nervosos. Para níveis baixos de som, algumas frequências são amplificadas devido à energia adicionada pelas células ciliadas externas (funções de controlo de ganho), de modo a ajustar as respostas mecânicas dentro de uma gama limitada de valores.

A partir das células ciliadas projectam-se pequenos cílios que tocam na superfície da membrana tectorial. Os movimentos da membrana basilar fazem com que os cílios oscilem num e noutro sentido contra a membrana tectorial. O deslocamento dos cílios produz variações alternadas do potencial eléctrico através da membrana das células ciliadas¹. Esse potencial alternado é o potencial receptor da célula ciliada que, por sua vez, estimula os terminais nervosos do nervo coclear que estão em contacto com as células ciliadas. Existem cerca de 30.000 fibras nervosas que codificam 1500 a 2500 sinais das células ciliadas internas. Cada fibra nervosa codifica um sinal de banda estreita, com apenas algumas centenas de Hz de largura de banda, ou seja, elas actuam como um banco de filtros de banda estreita ao longo da cóclea. A relação entre a entrada mecânica e a resposta eléctrica é a de um rectificador de meia onda (Allen 1985).

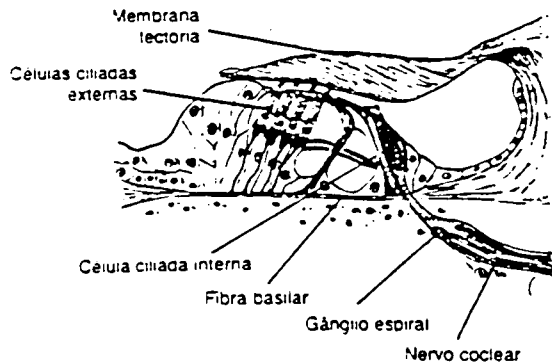


Fig. 1.8 - Órgão de Corti.

As fibras nervosas que inerm da cóclea transportam sinais acústicos na forma de "trem de impulsos" bioeléctricos num formato temporal específico, em que todos os impulsos têm o mesmo tamanho e formato. A informação que transmitem é transportada para o cérebro em variações temporais entre os impulsos. Os dois aspectos importantes desses trens de impulsos são a taxa de descarga e o padrão temporal. Contudo, essas fibras nervosas têm um alcance dinâmico limitado (200 impulsos por segundo). A taxa de descarga de impulsos

¹ A escala média encontra-se preenchida por um líquido denominado *endolinfa*, diferente da *pirilinfá* encontrada nas escalas vestibular e timpânica. A endolinfa contém uma elevada concentração de potássio e uma concentração muito baixa de sódio, sendo o inverso na pirilinfá. Existe sempre um potencial eléctrico de aproximadamente +80 mV entre a endolinfa e pirilinfá, potencial endococlear, que se acredita ser gerado pela secreção contínua de iões positivos de potássio para a escala média pela estria vascular. O potencial endococlear é importante porque a porção superior das células ciliadas projectam-se na endolinfa da escala média, enquanto a pirilinfá banha a porção inferior das células ciliadas. As células ciliadas têm um potencial intracelular negativo de -70 mV em relação a pirilinfá e de -150 mV em relação a endolinfa.

aumenta com a intensidade do som mas apenas até a um valor máximo. Para ultrapassar esta limitação, dado que comunicamos numa gama de intensidades cerca de um bilião para 1, pressupõe-se que nos núcleos cocleares do cérebro existem dois tipos de células (Marwick, 1989). Um dos tipos de células processa a taxa de descarga de impulsos e o outro lida com o padrão temporal dos trens de impulsos em resposta a uma excitação sonora. Contudo, ainda se está longe de se compreender totalmente o complexo processamento de sinal realizado na cérebro, na percepção sonora.

Até há relativamente pouco tempo, pensava-se que o processo de conversão do sistema auditivo operava num só sentido. Devido às descobertas recentes (Wit, Langevoort e Ritsma, 1981; Zurek, 1985), de emissões acústicas verificadas nos ouvidos humanos, tem-se colocado a hipótese de o sistema auditivo operar no sentido oposto, ou seja, a conversão dos estímulos fisiológicos em movimento mecânico.

1.3 Limite de audição e unidades

A intensidade do som é determinada pelo sistema auditivo pelo menos de três modos diferentes:

- À medida que o som se torna mais intenso, a amplitude de vibração da membrana basilar e das células ciliadas também aumenta, de modo que as células ciliadas excitam as terminações nervosas com frequências mais rápidas.

- O aumento da amplitude de vibração tem como resultado a estimulação de um número cada vez maior de células ciliadas, situadas nas bordas da porção da membrana basilar.

- Certas células ciliadas não são estimuladas até que a vibração da membrana basilar alcance uma intensidade relativamente elevada e daí o sistema nervoso é informado de que o som é muito intenso.

O ouvido humano consegue interpretar as alterações na intensidade do som desde o sussurro mais leve até ao ruído mais intenso, representando um aumento de energia de cerca de 1 bilião de vezes. Contudo, o ouvido interpreta esta grande diferença de nível sonoro como sendo uma alteração de

aproximadamente 10.000 vezes, resultando numa escala de intensidade bastante comprimida pelos mecanismos de percepção sonora do sistema auditivo. Isto permite que uma pessoa interprete diferenças de intensidade de som numa gama bastante ampla, muito mais do que seria possível se não existisse compressão da escala.

Devido às extremas alterações de intensidade sonora que o ouvido pode detectar e discriminar, as intensidades sonoras costumam ser expressas em termos do logaritmo das suas intensidades reais. Um aumento de 10 vezes na energia sonora (ou o aumento da raiz quadrada de 10 na pressão sonora, porque a energia é proporcional ao quadrado da pressão) é denominado por 1 *bel* e *decibel* é um décimo do bel. Um dos métodos para expressar a intensidade sonora é através da diferença de pressão existente entre o pico da onda de compressão sonora e a depressão dessa onda. Uma pressão de 0,0002 dina/cm² (dina = 10⁻⁵N) ou 20 μ Pa é considerada pelos audiologistas como sendo a unidade de intensidade, sendo especificada em dB SPL ("sound pressure level"), sendo este valor o zero de referência quando convertido para a escala logarítmica, aproximadamente a mínima intensidade de som que pode ser detectada pelo ouvido na frequência de 3000 Hz. Este sistema encontra-se representado na figura 1.9, onde é também indicado o limiar de audição para cada frequência. A gama de frequências sonoras que o ouvido consegue detectar varia, em geral para uma pessoa jovem, entre os 20 a 20000 Hz.

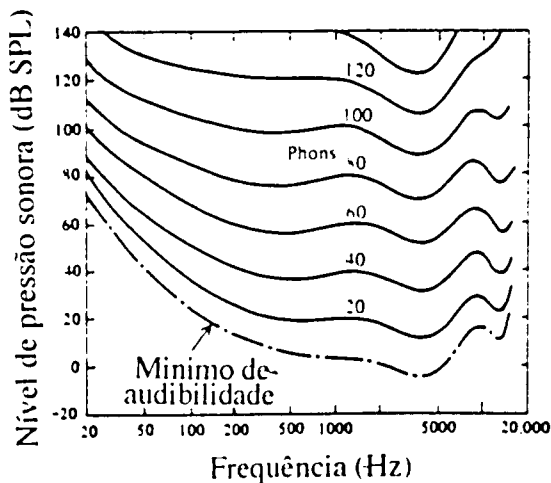


Fig. 1.9 - Limiar de audição em função da frequência e curvas de igual sonoridade.

O nível 0 dB SPL é o nível sonoro mínimo detectável na ausência de qualquer som externo. Deste modo, é usual 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 $20\log(p/p_{SL})$, em que p_{SL} 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 1 KHz até obter a mesma sonoridade que o sinal de teste. O nível do sinal de 1 KHz que tem a mesma sonoridade é o nível de sonoridade do som de teste, medido em "phon". A figura 19 também 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.

A definição dBA indica que a medida da pressão foi executada através de um filtro de pesagem especial.

1.4 Resolução do sistema auditivo na localização de uma fonte sonora no espaço livre

1.4.1 Sistema espacial de coordenadas

A figura 1.10 apresenta o sistema de coordenadas que será utilizado por toda a tese e que se baseia no sistema utilizado pela maioria dos autores.

Existem três principais planos usados na localização espacial de sons: plano horizontal, plano vertical médio e plano frontal. O plano vertical médio divide a cabeça em dois sectores simétricos. O plano horizontal passa pelos dois ouvidos e intercepta, perpendicularmente, o plano vertical médio nas posições frontais e posteriores à altura dos olhos. O plano frontal passa pelos dois ouvidos fazendo ângulos rectos com os dois planos anteriores.

As posições no plano horizontal são especificadas pelo azimute (θ) e as posições no plano vertical médio são especificadas pela elevação (ϕ). A origem

deste sistema de coordenadas (0° de azimute e 0° de elevação) encontra-se directamente à frente do ouvinte.

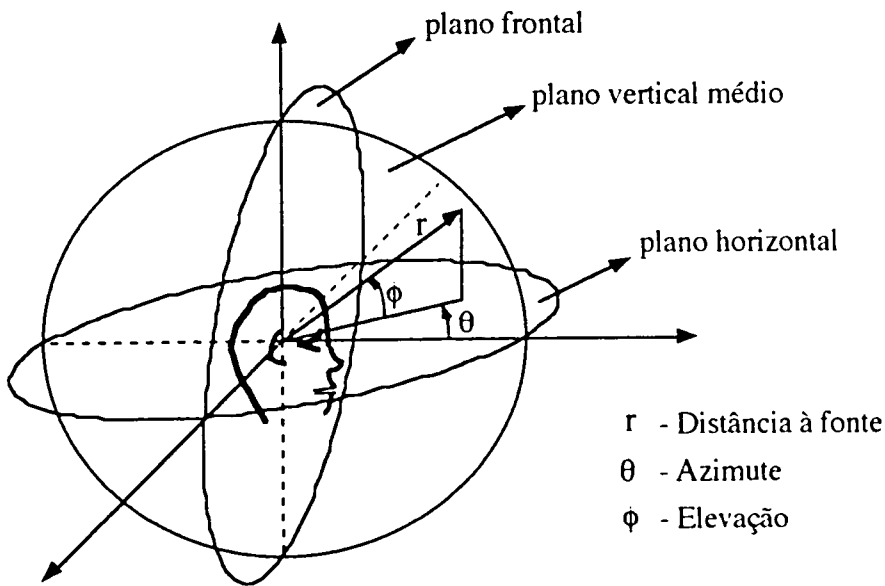


Fig. 1.10 - Sistema de coordenadas utilizado na localização espacial.

1.4.2 Precisão de localização no espaço livre

Um som no espaço livre é aquele que é sentido num ambiente anecóico, ou seja, onde não existem reflexões. Na natureza encontramos este fenómeno, por exemplo, no cimo das montanhas. No laboratório é obtido recorrendo-se a câmaras anecóicas. Este tipo de ambiente é importante para a localização espacial de fontes, pois o único sinal que chega ao ouvinte é o sinal directo da fonte, não havendo reflexões que provocariam maiores erros na localização.

A localização de uma fonte sonora, no espaço livre, pressupõe a determinação da direcção e distância da mesma relativamente à cabeça do ouvinte. Contudo, o sistema auditivo não obtém uma localização exacta e precisa da posição da fonte devido a erros de interpretação dessa posição. Para análise da precisão com que o sistema auditivo é capaz de determinar a direcção da fonte surgem duas definições. A primeira trata-se de identificar a direcção da fonte quando esta é colocada em qualquer ponto do espaço. Mede-se deste modo o erro absoluto na localização auditiva. A segunda consiste em determinar o mais pequeno deslocamento da fonte, que conduz a uma alteração na percepção da posição dessa fonte. Aqui é medida a precisão relativa ou

resolução do sistema espacial. É costume designar esta medida de resolução auditiva por ângulo mínimo audível. Estes dois tipos de experiências pretendem analisar a acuidade espacial na localização auditiva. Outro tipo de erro que pode surgir na localização é que estando uma fonte à frente do ouvinte ela pode ser percebida como se estivesse atrás ou vice-versa. Este último é conhecido por confusão frente/trás. Estes erros dependem do tipo de sinal enviado pela fonte e da posição da fonte no espaço.

1.4.2.1 Acuidade espacial na localização auditiva

Neste tipo de análise é pretendido determinar a precisão do sistema de localização auditiva em função da posição da fonte sonora no espaço e do tipo de sinal fornecido pela fonte sonora, como duração, espectro, intensidade, entre outras características. As fontes sonoras utilizadas pelos autores nas várias experiências aqui apresentadas foram normalmente altifalantes em câmaras anecóicas.

Começaremos por apresentar alguns resultados em sinais de banda larga.

Perrot e Saberi (1990) determinaram o ângulo mínimo audível para trens de estalidos com 50 ms de duração e intensidade de 52 dBA. Foi utilizada uma fila de fontes sonoras em posições que rodavam à volta de 0° de azimute e 0° de elevação em planos oblíquos sucessivos de 10° , sendo a separação angular entre as fontes de $0,46^\circ$. Para as fontes no plano horizontal, o ângulo mínimo audível foi de $0,97^\circ$ e para o plano vertical de $3,65^\circ$. Com as fontes em planos oblíquos, rodando desde o plano horizontal até ao plano vertical, o ângulo mínimo audível manteve-se aproximadamente à volta de 1° para rotações até 60° e para rotações superiores a 60° o valor do ângulo mínimo audível aumentou até atingir o valor do plano vertical. A figura 1.11a) apresenta esses resultados e a figura 1.11b) apresenta esses mesmos dados quando dividido em variação de azimute e elevação. Como se pode verificar, o ângulo mínimo audível no plano vertical é cerca de 4 vezes o do plano horizontal, já obtido por outros autores.

Para analisar o plano vertical médio, Roffler e Butler (1968) utilizaram sinais de ruído branco com intensidade de 20-30 dB SPL. Os ouvintes, cuja cabeça foi mantida imóvel, indicavam a posição percebida da fonte sonora através do sinal luminoso numérico que se encontrava no painel dos

altifalantes. Para valores reais de elevação da fonte de -13° , -2° , 9° e 20° , os erros médios de elevação foram -3° , -5° , 1° e 1° , respectivamente. O sinal negativo indica que o som foi detectado numa elevação abaixo da posição real da fonte e o sinal positivo para posições acima da posição real. Para o plano horizontal, Shelton e Searle (1978), usando sinais de ruído branco com intensidade de 72 dB SPL em 3 posições de azimute, 0° , 90° e 180° , obtiveram erros de 1° , 8° e 5.5° , respectivamente.

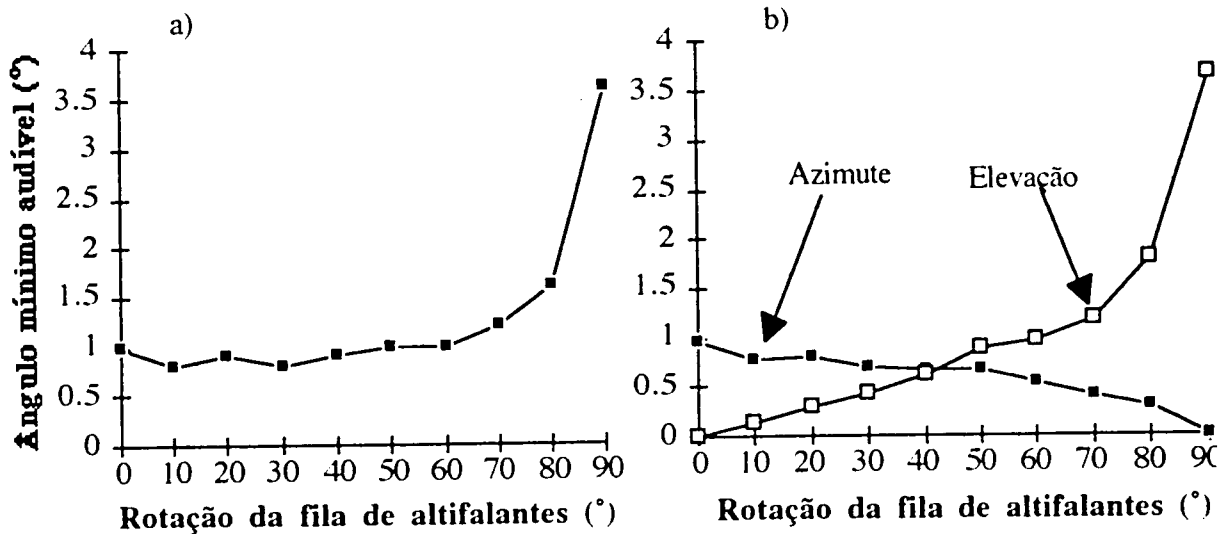


Fig. 1.11 - Ângulo mínimo audível médio, na posição frontal, em função da rotação do plano das fontes sonoras (ângulos a partir do plano horizontal: a) nos respectivos planos e b) dividido em azimute e elevação.

Tentando obter um mapa da acuidade de localização auditiva, Oldfield e Parker (1984) efectuaram um estudo numa vasta gama do espaço auditivo determinando-se, deste modo, a precisão com que um indivíduo consegue discriminar o azimute e elevação. Para a localização da fonte sonora foram utilizados sinais de ruído branco, com intensidade de 70 dBA, e as fontes encontravam-se numa gama de azimutes entre 0° a 180° e na gama de elevações entre -40° a 40° , com variações de 10° , obtendo-se um total de 171 posições diferentes em apenas um dos lados da cabeça (ambos os lados da cabeça apresentaram erros semelhantes). O método de indicação da posição foi a técnica de apontagem, com uma pistola especial e a cabeça foi mantida imóvel. Foi efectuada uma experiência que testava este método na indicação da posição, o que demonstrou que qualquer influência do método não afectou os resultados gerais. As figuras 1.12 e 1.13 apresentam gráficos de erros absolutos, de azimute e elevação, obtidos para fontes nas várias posições do espaço.

Relativamente ao erro de azimute em função do azimute, verificou-se um comportamento mais ou menos uniforme para posições frontais e valores mais elevados para posições posteriores, com maior incidência em azimutes desde 110° a 160° . O erro de azimute em função da elevação apresentou um comportamento relativamente uniforme ao longo das várias elevações, excepto para valores mais altos, entre 20° a 40° , com tendência a aumentar. Quanto ao erro de elevação em função do azimute, apresentou um comportamento mais ou menos uniforme para todos os azimutes, excepto para valores entre 160° e 180° . Por seu lado, o erro de elevação em função da elevação foi relativamente uniforme para todos os valores. Como se pode verificar, os valores mais baixos de erros de azimute aparecem no plano vertical médio, ou seja, este plano é o mais preciso para cálculo do azimute. Blauert (1983) apresenta ângulos mínimos audíveis do azimute para sinais de ruído branco posicionados no plano horizontal (intensidade de 70 phon), de $3,6^\circ$, 10° e $5,5^\circ$, nos azimutes 0° , 90° e 180° , respectivamente. Quanto ao ângulo mínimo audível de elevação, Blauert (1983) apresenta um valor de 4° para ruído branco com intensidade de 60 phon, para a posição $\theta=0^\circ$ e $\phi=0^\circ$.

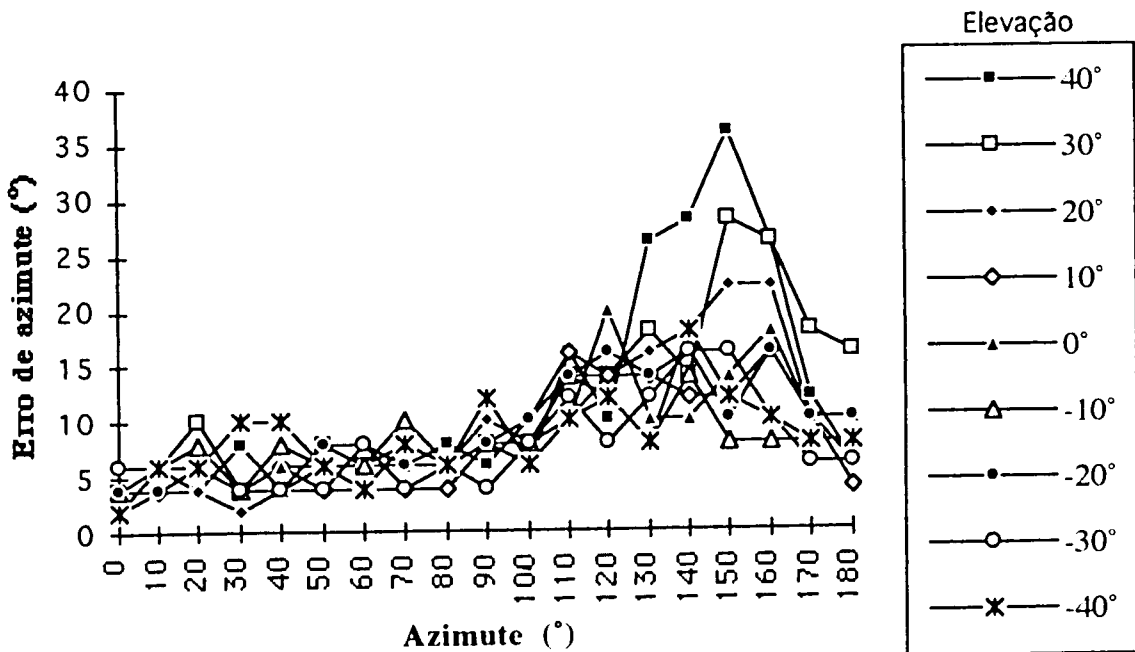


Fig. 1.12 - Erro médio de localização do azimute.

Para se obter mais dados do desempenho de localização em todo o espaço, Makous e Middlebrooks (1990) utilizaram sinais de banda larga (sinal sintetizado digitalmente) com intensidade de 40-50 dB SL. As posições

espaciais variavam na gama entre 0° a 160° de azimute e elevações entre -45° a 45° . O processo de indicação da posição percebida da fonte sonora consistiu na apontagem com a cabeça, rodando-a para essa posição (o som terminava antes que o indivíduo pudesse responder). A figura 1.14 e 1.15 apresenta o erro médio de azimute e elevação, respectivamente. Da análise das figuras pode-se verificar que a localização do azimute é mais precisa no quadrante frontal, no plano médio e, em geral, com melhor desempenho no plano horizontal relativamente às elevações mais altas ou mais baixas.

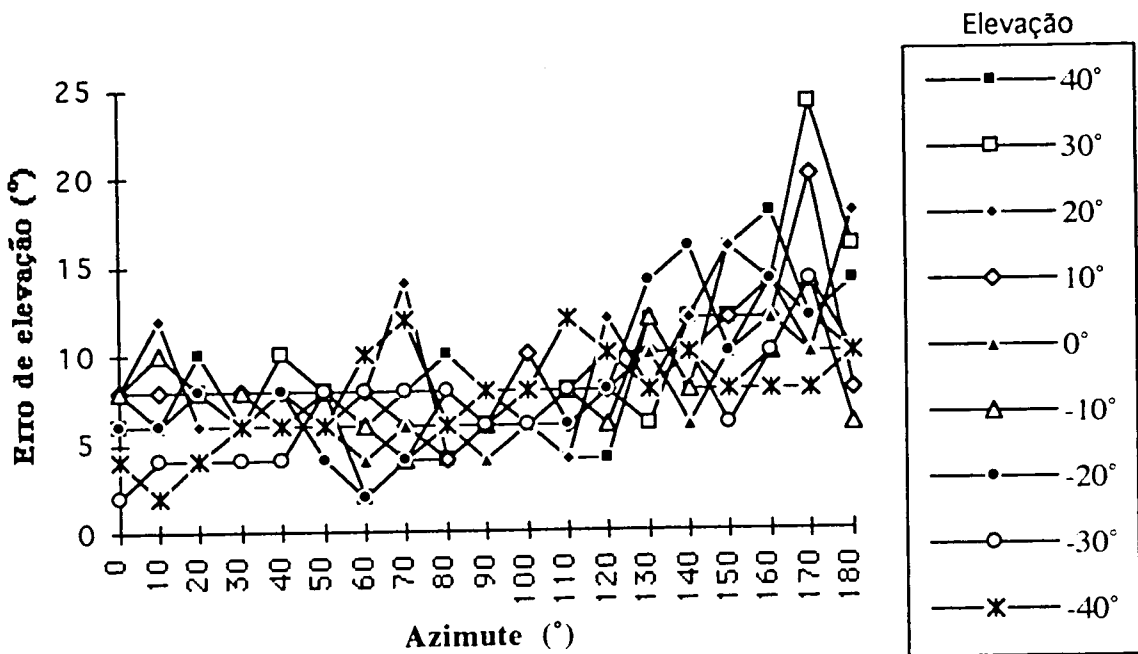


Fig. 1.13 - Erro médio de localização da elevação.

Quanto ao quadrante posterior o erro de azimute aumenta, entre os valores de 120° a 160° . Para o erro de localização da elevação, verifica-se uma variação mais ou menos uniforme ao longo do azimute, excepto para os valores, do quadrante posterior, à volta de 160° nas elevações mais afastadas do plano horizontal. Verifica-se ainda o aumento do erro de elevação com a elevação relativamente ao plano horizontal (para cima e para baixo). A localização vertical era considerada pior que a localização horizontal. Este resultado foi comprovado principalmente para posições à volta do plano vertical médio.

Localização de fontes sonoras

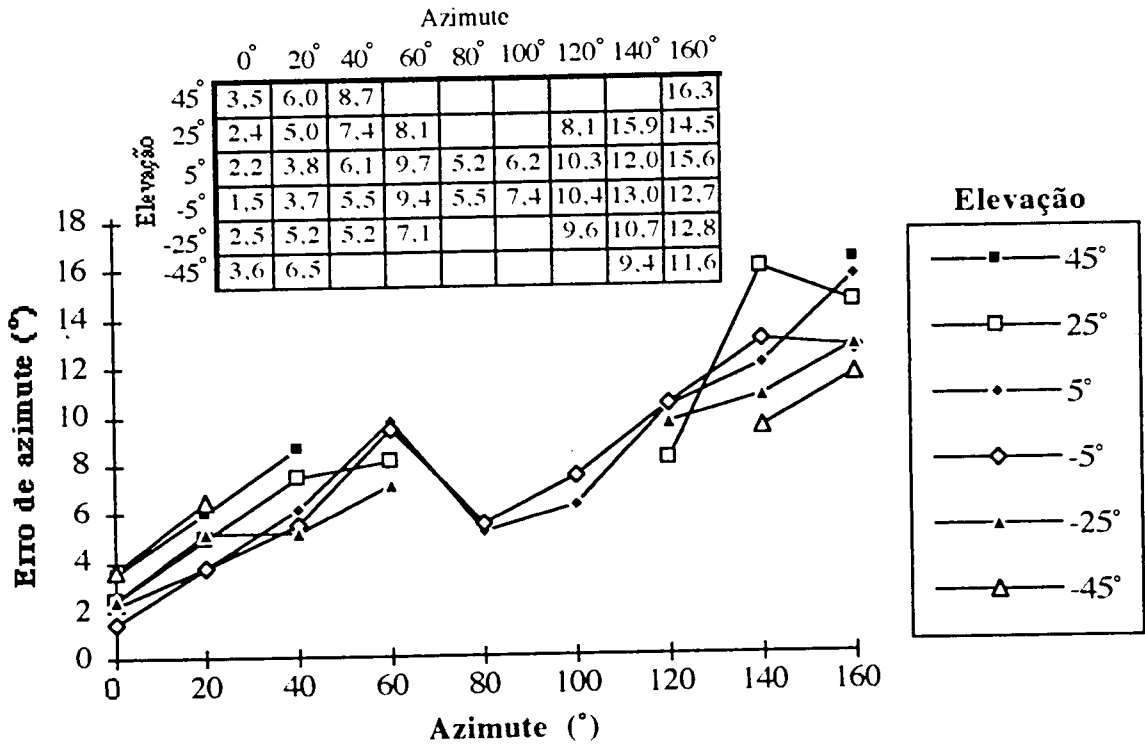


Fig. 1.14 - Erro médio de localização do azimute.

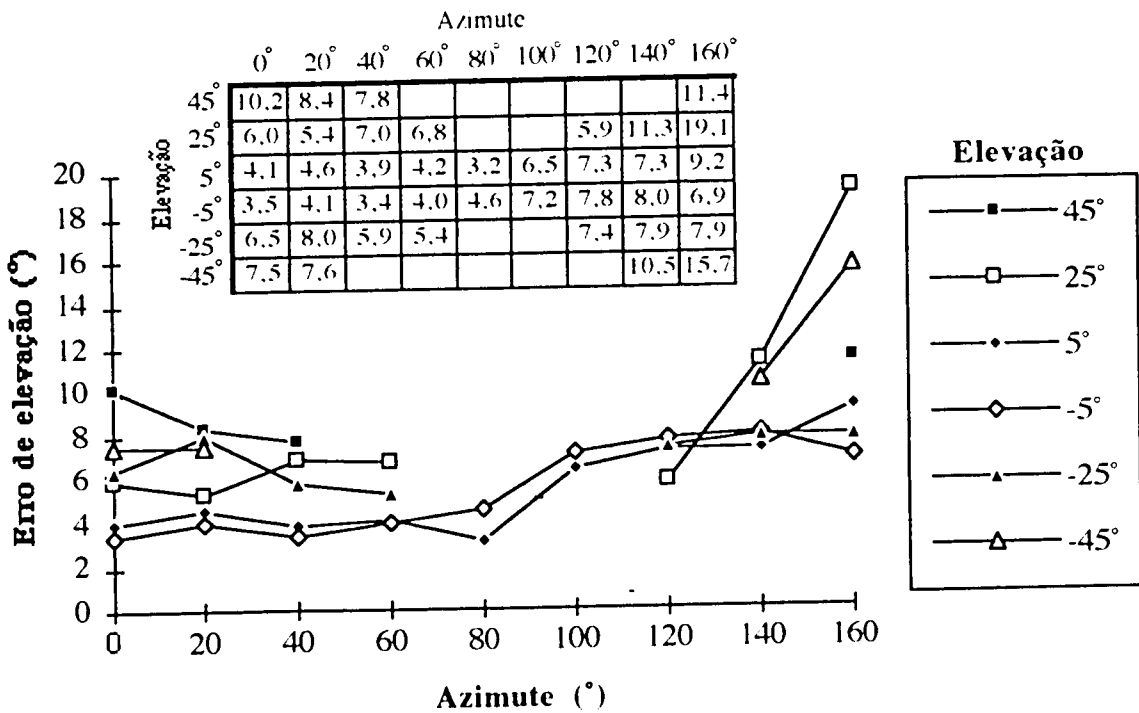


Fig. 1.15 - Erro médio de localização da elevação.

Localização de fontes sonoras

Os desvios padrões das respostas obtidas nas figuras 1.14 e 1.15, dos seis indivíduos utilizados nas experiências, são apresentados na figura 1.16. O desempenho da localização apresentado pelos vários indivíduos foi qualitativamente semelhante.

Elevação	Azimute									Azimute								
	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°
	45°	3.8	3.3	5.6						8.2	6.7	4.0	3.0					
25°	1.4	2.1	3.6	5.2			3.8	6.4	5.6	2.9	2.8	2.7	2.2			3.2	2.7	9.2
5°	0.7	1.9	2.5	4.6	2.2	4.6	3.1	6.3	6.7	1.3	1.8	1.8	1.6	1.3	2.5	4.1	3.8	5.4
-5°	0.4	1.4	2.3	4.4	2.0	3.8	3.8	4.5	5.6	1.0	1.4	1.8	1.0	2.0	2.2	3.3	4.6	2.5
-25°	0.6	2.3	3.0	2.6			4.4	4.2	4.1	3.7	4.7	2.9	4.0			3.9	2.6	2.6
-45°	3.6	3.5						4.3	4.2	3.2	3.2						3.2	4.6

Desvio padrão do azimute
Desvio padrão da elevação

Fig. 1. 16 - Desvios padrões em torno das respostas.

Com o objectivo de simular o espaço livre através de auscultadores, Wightman e Kistler (1989b) analisaram a precisão de localização utilizando ruído Gaussiano, de intensidade de 70 dB SPL, para analisar a localização em 144 posições do espaço. A figura 1.17a) apresenta a média de ângulos de erro cometido por vários indivíduos para as zonas indicadas (de notar que este erro engloba o erro de azimute e de elevação). As zonas de azimute analisadas são: frente (-45° a 45°), lado (-120° a -60° e 60° a 120°) e trás (-165° a -120° e 120° a 180°). Quanto às zonas de elevação são: baixo (-36° e -18°), médio (0° e 18°) e alto (36° e 54°). Desses resultados, verifica-se que a maior precisão é obtida lateralmente, com erros ligeiramente superiores na frente e com maiores erros para altas elevações da parte posterior.

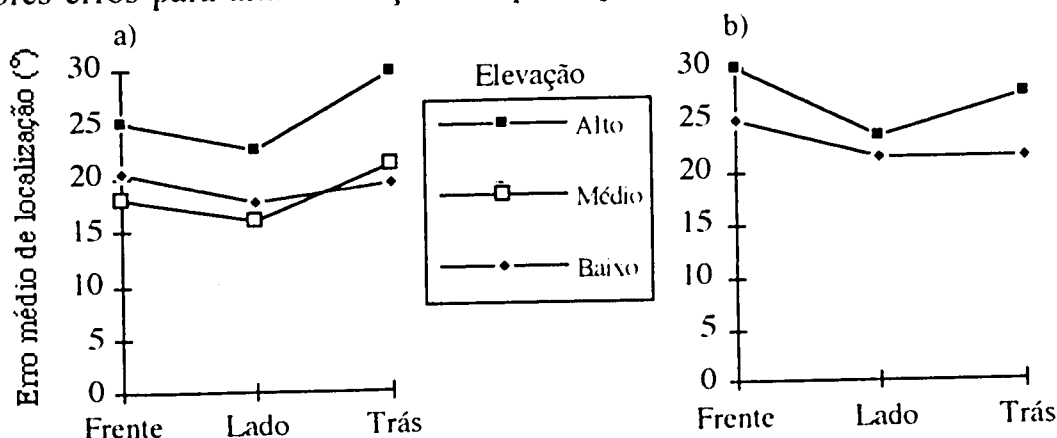


Fig. 1.17 - Ângulo médio de erro obtido em várias posições do espaço: a) Wightman e Kistler (1989b) e b) Wenzel, Arruda, Kistler e Wightman (1993).

Localização de fontes sonoras

Das experiências de Wightman e Kistler verificaram-se ainda diferenças notórias entre os resultados obtidos pelos vários indivíduos, verificando-se a existência de um superior desempenho de alguns dos indivíduos relativamente a outros. Wenzel, Arruda, Kistler e Wightman (1993) também efectuaram um estudo semelhante, utilizando ruído Gaussiano com as mesmas características dos usados por Wightman e Kistler (1989b). A figura 1.17b) apresenta os resultados para as baixas e altas elevações.

A análise seguinte será efectuada em sinais de banda estreita.

Mills (1958) mediu o ângulo mínimo audível para sinais sinusoidais com valores desde 250 a 10.000 Hz de fontes sonoras colocadas no plano horizontal, com intensidade de 50 dB. A figura 1.18 apresenta os resultados obtidos para ângulos de azimute entre 0° a 90°. Pode-se verificar que o ângulo mínimo audível aumenta com o ângulo no plano horizontal, tendo no azimute de 90° valores médios superiores a 40°. É notório, ainda, a variação com a frequência, havendo zonas em que o ângulo mínimo audível é máximo e outras em que ele é mínimo.

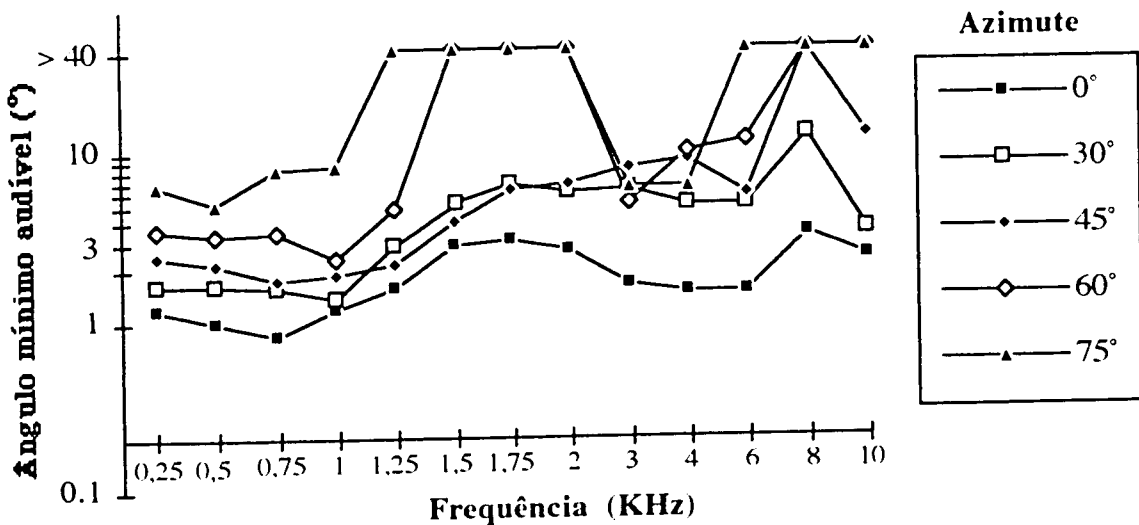


Fig. 1.18 - Ângulo mínimo audível médio em função da frequência e azimute.

Usando bandas de ruído, Rofler e Butler (1968) investigaram a localização de fontes no plano vertical médio em função da frequência central. As características da experiência são as já indicadas anteriormente para localizar fontes nas elevações -13°, -2°, 9° e 20°. A figura 1.19a) apresenta os resultados do erro médio da elevação para localizar as fontes com sinais de

ruído com filtragem passa-baixo (<2000 Hz) e passa-alto (>2000 Hz e >8000 Hz). O sinal do erro tem o significado já conhecido. A figura 1.19b) apresenta a experiência com sinais sinusoidais, 600 Hz e 4800 Hz, indicando onde os mesmos são encontrados. Para o sinal de 600 Hz, ele tende a ser localizado à volta de -2° e o de 4800 Hz à volta de 12° . Daqui, os indivíduos foram incapazes de determinarem correctamente o sinal de ruído passa-baixo e os sons tonais.

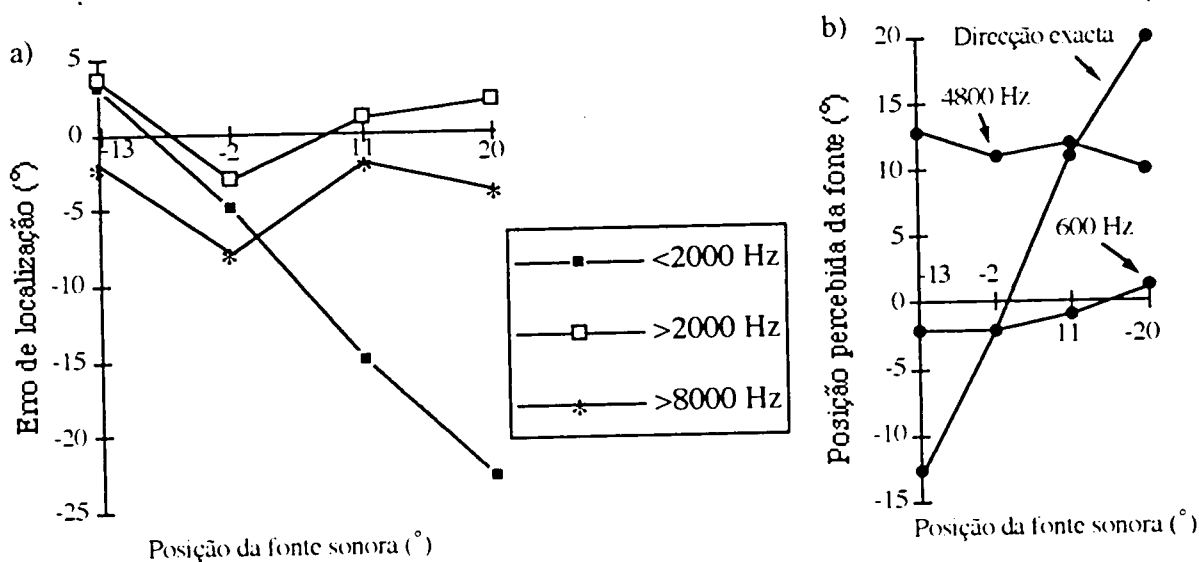


Fig. 1.19 - Localização de sinais de banda estreita: a) erro de elevação e b) sons tonais.

Para analisar o efeito da largura de banda na localização sonora, Musicant e Butler (1985) utilizaram sinais de ruído branco com 40 dB SL de intensidade e de largura de banda 1 KHz centradas a várias frequências. Tendo sido fornecidos com a posição dos altifalantes, os indivíduos indicavam de qual das posições era percebido o som. A figura 1.20 apresenta, para dois indivíduos, o erro cometido na localização do azimuth quando a fonte estava localizada em 90° do plano horizontal. O sinal do erro indica que a posição percebida foi acima (sinal positivo) ou abaixo (sinal negativo) da posição da fonte sonora.

Com sinais de ruído de 1/6 de oitava de largura de banda e intensidade 50 a 60 dB acima do valor medido em $\theta=0^\circ$ e $\phi=0^\circ$, Middlebrooks (1992) analisou os erros cometidos na localização em função de bandas estreitas. Os altifalantes estavam em azimutes entre -160° e 160° e as elevações entre -60° e 90° (com incrementos de 10°). O método de indicação da posição percebida consistiu na orientação da cabeça para o som. A figura 1.21 apresenta os

Localização de fontes sonoras

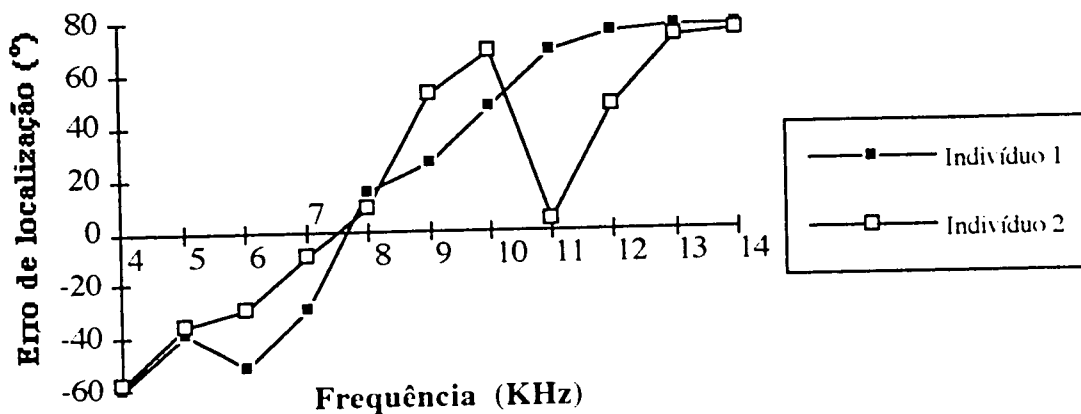


Fig. 1.20 - Erro de localização do azimute de sinais de ruído branco em função da frequência central para uma fonte localizada em 90° de azimute

resultados para as frequências centrais 6, 8, 10 e 12 KHz. As figuras aparecem de frente e de lado. Por exemplo, para a frequência central de 6 KHz da excitação, a maioria das respostas dos indivíduos aparecem nas altas elevações e à frente, independentemente da posição, enquanto para 10 KHz, as respostas tendem a aparecerem abaixo do plano horizontal e atrás do indivíduo. Através das banda de frequências, as posições da resposta referente ao plano vertical dependem mais da frequência central das excitações da fonte sonora do que da sua posição. Contudo, as componentes horizontais da localização parecem bastante precisas. No entanto, comparando as figuras 1.20 e 1.21, verifica-se discordância relativamente à variação do erro do azimute com a frequência central. Contudo, num conjunto de experiências efectuadas por Middlebrooks (1992) para comparar com os resultados de Musicant e Butler (1985), os resultados parecem comprovar o que foi dito atrás. Uma razão que pode comprovar a disparidade de resultados é que enquanto a experiência da figura 1.20 se baseia na localização de apenas uma posição do espaço, a experiência da figura 1.21 é realizada para uma-grande quantidade de posições, logo permitindo retirar conclusões mais gerais.

Localização de fontes sonoras

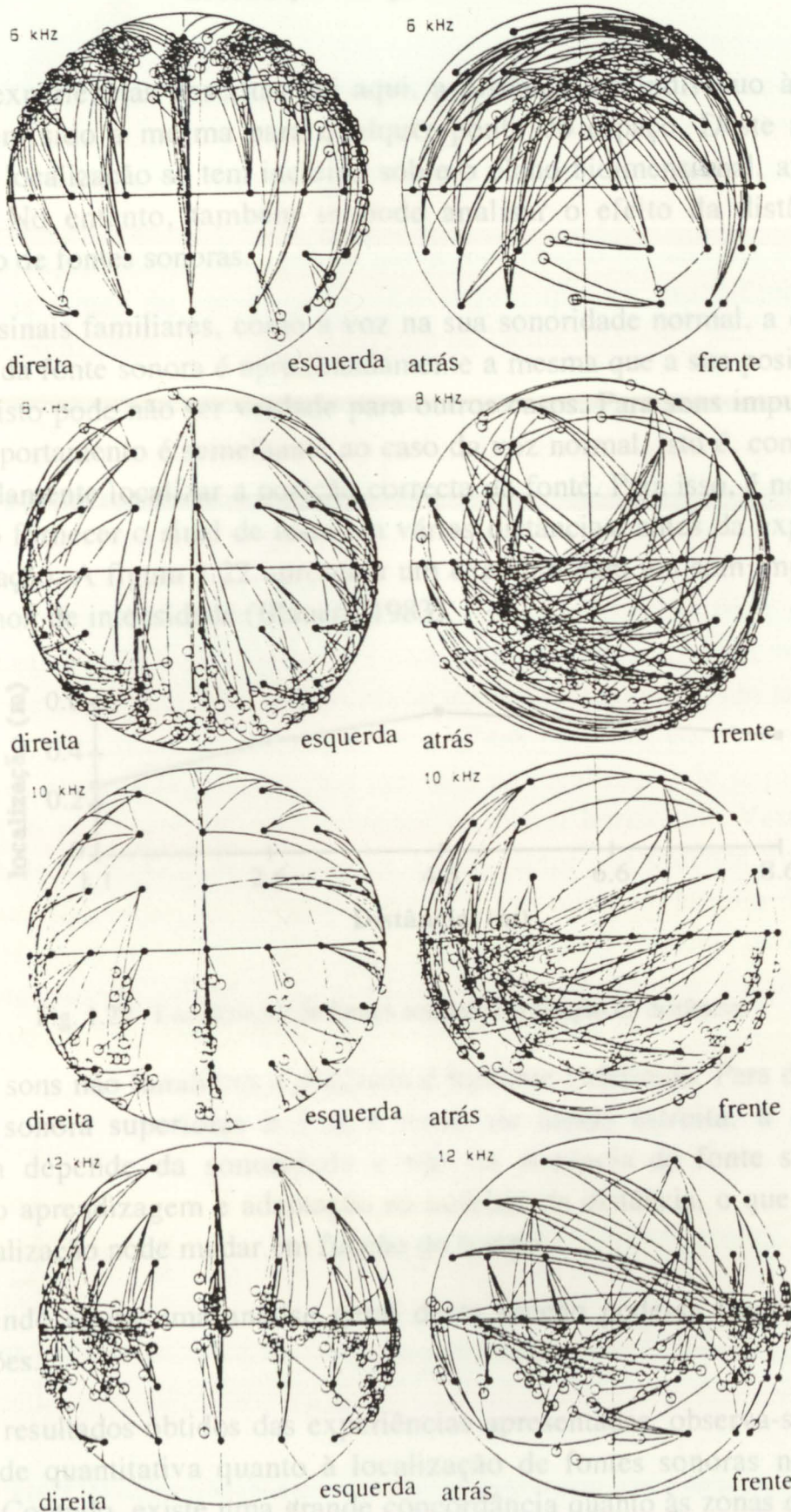


Fig. 1.21 - Localização de sinais de ruído de banda estreita.

Nas experiências descritas até aqui, a distância do indivíduo às fontes sonoras tem sido a mesma para qualquer ponto do espaço. Deste modo, a análise da localização só tem incidido sobre o plano bidimensional, azimute e elevação. No entanto, também se pode analisar o efeito da distância na localização de fontes sonoras.

Para sinais familiares, como a voz na sua sonoridade normal, a distância percebida da fonte sonora é aproximadamente a mesma que a sua posição real. Contudo, isto pode não ser verdade para outros casos. Para sons impulsivos, o seu comportamento é semelhante ao caso da voz normal, isto é, consegue-se aproximadamente localizar a posição correcta da fonte. Para isso, é no entanto necessário fornecer o sinal de teste em várias distâncias, antes da experiência da localização. A figura 1.22 apresenta um exemplo para um som impulsional com 70 phon de intensidade (Blauert, 1983).

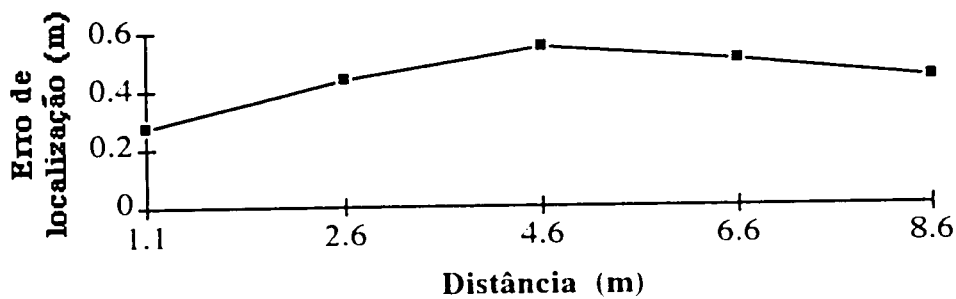


Fig. 1.22 - Localização de fontes sonoras em função da distância.

Para sons não familiares a distância é bastante indefinida. Para distâncias da fonte sonora superiores a 3 m e sinais de banda estreita, a distância percebida depende da sonoridade e não da distância da fonte sonora. É observado aprendizagem e adaptação na audição da distância, o que significa que a localização pode mudar em função do tempo.

Fazendo agora uma análise geral desta secção pode-se fazer algumas observações.

Dos resultados obtidos das experiências apresentadas, observa-se alguma disparidade quantitativa quanto à localização de fontes sonoras no espaço auditivo. Contudo, existe uma grande concordância quanto às zonas do espaço onde a localização é mais precisa. Das várias figuras pode-se verificar que a

localização das fontes sonoras é mais precisa para azimutes à volta de 0° . A zona que provoca maiores erros de localização é o quadrante posterior para as mais altas elevações. A localização do azimute parece ser mais precisa que a localização da elevação. Para sinais de banda estreita aparecem erros elevados na localização da elevação, enquanto que a localização do azimute mantém a precisão dos sinais de banda larga. Isto sugere que os procedimentos de localização do azimute são imunes à largura de banda do sinal.

A variação entre os diversos resultados deve-se a uma variedade de factores em que as experiências foram realizadas. Foi notória a disparidade de precisão da localização das fontes sonoras entre os vários indivíduos utilizados nas diversas experiências, em que alguns poderiam ser considerados como bons localizadores e outros como maus localizadores. O método de indicação da fonte sonora, sendo diferente nas várias experiências, é também fonte de algum erro. Nichols (1975) comparou o método de apontagem com o método designado de sopro, em que os indivíduos sentem tactualmente um jacto de ar indicando as posições das fontes sonoras (bom para cegos). A figura 1.23 apresenta os erros obtidos pelos dois métodos na localização de seqüências de estalidos (16 por segundo) para posições no plano horizontal. Verifica-se a superioridade no método de apontagem. Outro factor que provoca disparidade de respostas são os sinais utilizados, como a sua duração, largura de banda, intensidade sonora, etc. No caso de sinais de banda estreita, os erros são bastante elevados, o que sugere que existem procedimentos de localização no espectro que são eliminados deste modo, como veremos mais.

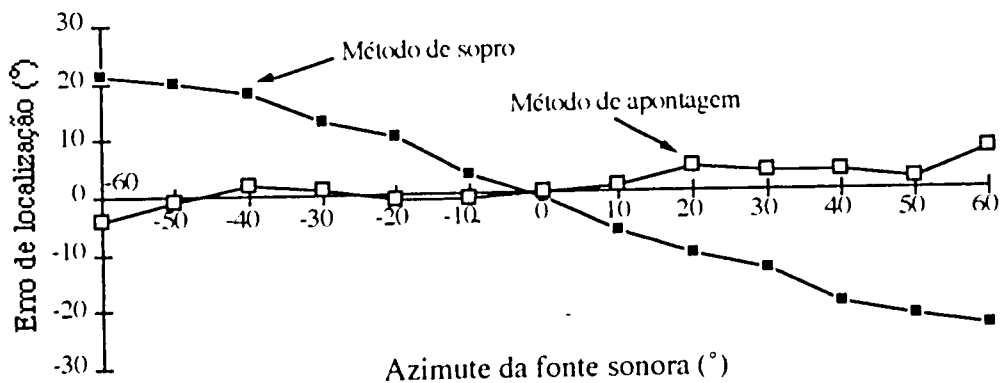


Fig. 1.23 - Comparação entre o método de apontagem com o de sopro.

Relativamente ao ângulo mínimo audível, este reflecte o facto de que o espaço auditivo é menos diferenciado que o espaço das fontes sonoras. Essa discriminação também não é igual para todo o espaço auditivo, como foi verificado. A análise efectuada incidiu nas fontes estáticas. No entanto, muitas vezes o sistema auditivo necessita de localizar fontes sonoras em movimento. Isto acontece quando a própria fonte está em movimento, ou então, é a cabeça que se move. Deste modo, enquanto que o ângulo mínimo audível mede a acuidade de fontes estacionárias, o ângulo mínimo audível de movimento mede a resolução espacial de fontes em movimento. Este último é o ângulo mínimo de variação necessário para detectar a direcção do movimento de uma fonte sonora. Para sinais de banda larga, a acuidade em baixas velocidades é semelhante ao caso estático (Saberri e Perrot, 1990), aumentando com o aumento da velocidade. Para sinais de banda estreita, a acuidade é baixa entre 1300 e 2000 Hz. Segundo Perrot e Pacheco (1989), para uma fonte sonora fornecendo um som tonal de 500 Hz, o deslocamento foi da ordem dos $8,3^\circ$ quando a fonte se movia a $90^\circ/s$ e $21,2^\circ$ para $360^\circ/s$. Para sinais de ruído, se a fonte tiver um movimento de $20^\circ/s$, o mínimo ângulo audível é de $0,9^\circ$ mas, se a velocidade aumentar para $32^\circ/s$, esse valor duplica. Isto sugere a existência de um tempo mínimo de integração necessário ao processo de mudança da informação dos sinais que chegam ao indivíduo. Este tempo de integração foi obtido por Perrot e Pacheco (1989) como sendo de 100-150 ms para sinais de ruído de banda larga. Strybel, Manligas e Perrot (1992) utilizando sinais de ruído de banda larga, para uma velocidade da fonte sonora de $20^\circ/s$, verificaram que o mínimo ângulo audível de movimento variava entre 1° e 3° para fontes posicionadas no sector frontal do plano horizontal, aumentando com o azimute. Para as elevações mais altas e variando no azimute, esse valor encontrava-se entre 3° e 10° .

Uma característica interessante do sistema auditivo, é que mesmo com a surdez total de um dos ouvidos, a localização de fontes sonoras no plano horizontal continua a ser possível, embora com erros mais elevados. Blauert (1983) apresenta um exemplo em que os indivíduos, com surdez total no ouvido esquerdo e audição normal no ouvido direito, apresentam ângulos mínimos audíveis de $33,7^\circ$, 32° , 42° e 39° , nos azimutes 0° , 90° , 180° e 270° , respectivamente (utilizando sinais de ruído branco).

1.4.2.2 Discriminação frente/trás

Outro tipo de anomalia encontrado na localização de fontes sonoras é a ocorrência de inversões frente/trás, ou seja, os sons provenientes da frente são percebidos atrás e vice-versa. Nesta secção analisa-se as características dos sinais e posições das fontes sonoras que provocam essas inversões. Algumas das experiências foram as indicadas na secção anterior.

Consideremos o caso de sinais de banda larga.

No estudo efectuado da acuidade da localização, efectuado por Oldfield Parker (1984), encontraram-se várias inversões frente/trás. A figura 1.24 apresenta a percentagem de inversões que ocorreram nos vários pontos do espaço. Pode-se verificar a existência de poucas inversões no quadrante frontal, ocorrendo a maioria delas no quadrante traseiro nas elevações mais altas.

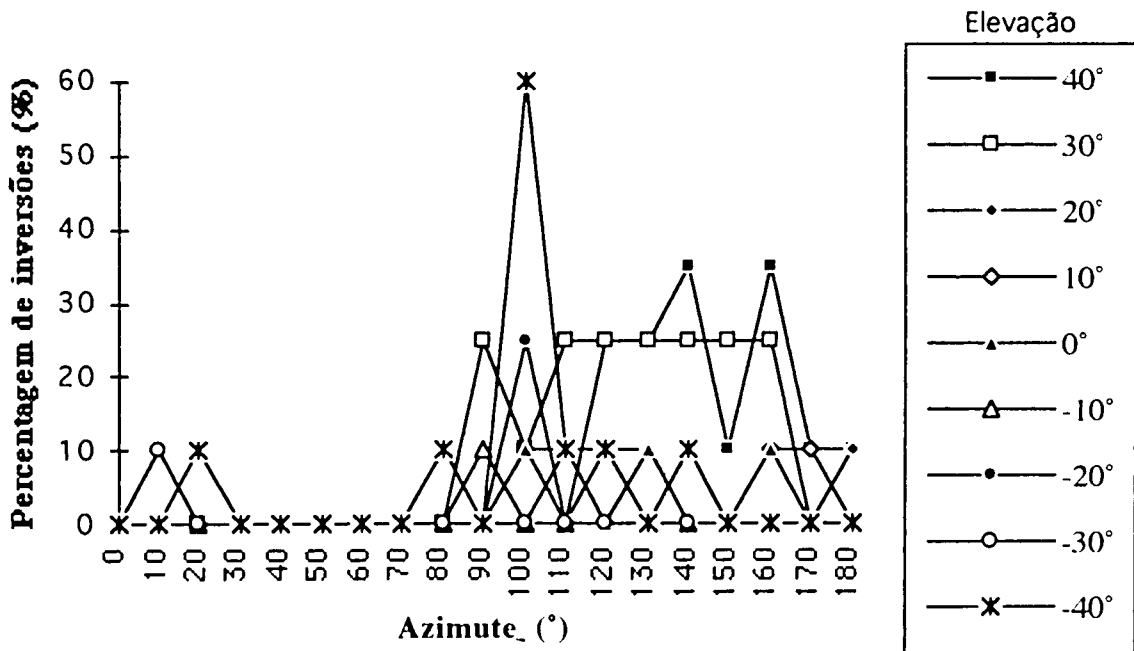


Fig. 1.24 - Percentagem média de inversões frente/trás.

Da experiência de Makous e Middlebrooks (1990) obteve-se a frequência de confusões frente/trás para o espaço auditivo. As inversões ocorreram com uma frequência entre 2% a 10% entre os vários indivíduos. A figura 1.25 mostra esses resultados. Para qualquer elevação, as inversões ocorrem para

Localização de fontes sonoras

azimutes à volta de 90° , ou seja, na parte lateral do indivíduo. Para toda a maioria dos azimutes, as inversões ocorrem nas elevações mais altas com grande incidência na parte detrás do indivíduo.

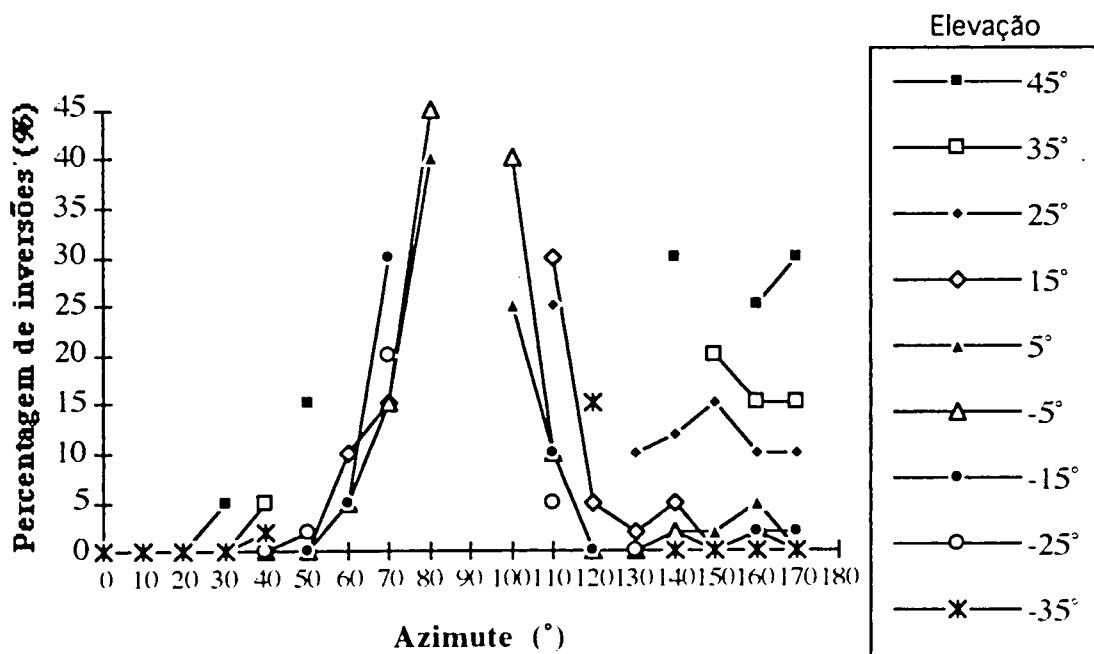


Fig. 1.25 - Porcentagem média de inversões frente/trás.

As inversões frente/trás obtidas por Wightman e Kistler (1989), nos indivíduos, e por Wenzel, Arruda, Kistler e Wightman (1993) são apresentadas na figura 1.26a) e 1.26b), respectivamente. Como se pode verificar por ambas as figuras, as inversões frente/trás ocorrem com maior frequência do quadrante frontal para o quadrante traseiro e às altas elevações.

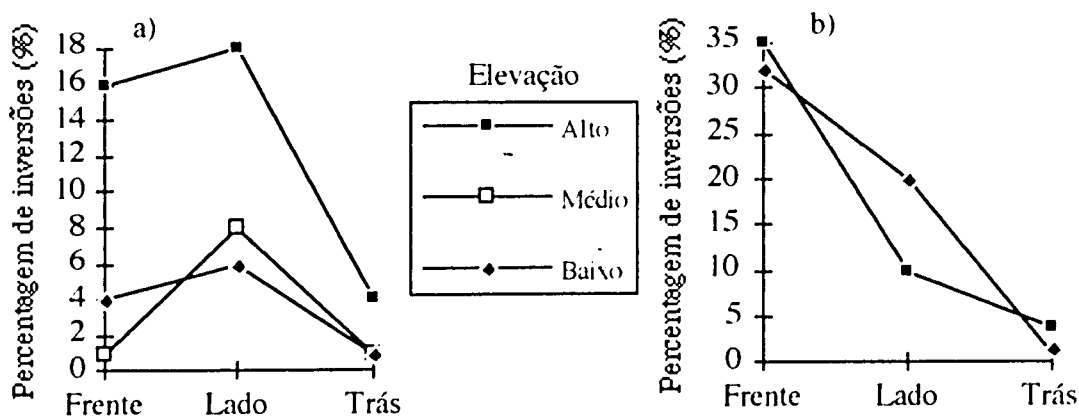


Fig. 1.26 - Inversões frente/trás obtidos para: a) Wightman e Kistler (1989b) e b) Wenzel, Arruda, Kistler e Wightman (1993).

Wenzel, Arruda, Kistler e Wightman (1993) também observaram confusões na elevação, em que as fontes sonoras posicionadas acima do plano horizontal eram percebidas abaixo do mesmo. A figura 1.27 apresenta esses resultados. Estas inversões ocorrem com baixa frequência.

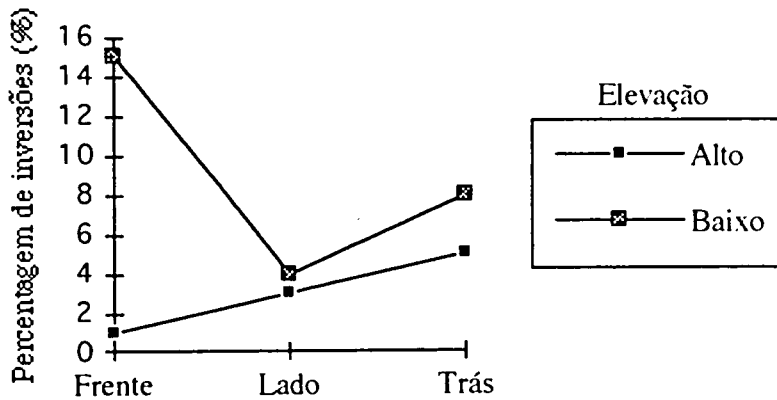


Fig. 1.27 - Inversões cima/baixo.

Consideremos agora o caso de sinais de banda estreita. Da figura 1.21, podemos verificar que quando o sinal é de banda estreita, as inversões frente/trás ocorrem com uma frequência elevada. Através das bandas de frequências, da mesma forma que a elevação, as confusões frente/trás dependem mais da frequência central das excitações da fonte sonora do que da sua posição. Estes erros podem reflectir a interpretação errada, pelos mecanismos da audição que calculam a posição frente/trás, do espectro de banda estreita.

Se os indivíduos tiverem a liberdade de moverem a cabeça durante a localização dos sons e a duração dos mesmos for suficiente para poder explorar os movimentos da cabeça, as confusões frente/trás podem ser eliminadas.

1.5 Procedimentos de localização

O espaço auditivo não é representado directamente na membrana basilar, na cóclea, implicando que os procedimentos de localização devem ser extraídos pelo sistema nervoso a partir da energia sonora dos sinais de entrada nos dois ouvidos. Quais são esses procedimentos de localização e a possibilidade de simulação desses mesmos procedimentos tem sido um trabalho que continua desde longa data. Durante várias décadas, os procedimentos primários para a localização da posição da fonte sonora foram a diferença no tempo de chegada e a diferença de intensidade entre os dois ouvidos (aqui o termo intensidade refere-se ao nível de pressão sonora e não a energia por unidade de área). Devido à separação entre os dois ouvidos e devido ao sombreamento sonoro provocado pela cabeça, as diferenças interauriculares do som variam sistematicamente com a posição da fonte sonora. Contudo, as diferenças interauriculares conduzem a ambiguidades, isto é, não conseguem definir uma única posição espacial, existindo uma gama de potenciais posições que se encontram na superfície de uma hipérbole (considerando uma cabeça esférica) cujas diferenças interauriculares são iguais (ver figura 1.28), o que tem sido designado por cone de confusão (Blauert, 1983; Musicant e Butler, 1984; Oldfield e Parker, 1984; Moore, 1992). Um dos modos de resolver o cone de confusão é através dos movimentos da cabeça. No entanto, existem casos em que os movimentos da cabeça não fornecem procedimentos de localização, como por exemplo, se os sons tiverem uma duração inferior a 200-300 μ s, pois neste caso o som termina antes que o indivíduo tenha tempo de mover a cabeça, continuando contudo a ser possível a localização espacial. Deste modo, para codificação da elevação e resolução das confusões frente/trás, devem existir outros procedimentos que resolvam o cone de confusão: as modificações do espectro sonoro de entrada provocadas por reflexão, difracção e ressonância nas concavidades da aurícula, cabeça e ombros.

O ser humano tem dois ouvidos fazendo com que os procedimentos necessários à localização de fontes sonoras estejam divididos em duas classes:

- Os procedimentos que só requerem a actuação de um ouvido na localização e que normalmente são designados por monauriculares.

- Os procedimentos que requerem a actuação dos dois ouvidos na localização, sendo neste caso designados por biauriculares.

Uma vez que é difícil a separação destas duas classes, nas experiências realizadas na procura dos procedimentos de localização, é usual a utilização de auscultadores que permitem a apresentação dos sinais a ambos os ouvidos de uma forma controlada. Um dos factores causadores de por muito tempo não se ter obtido o conhecimento dos procedimentos de localização auditiva é a dificuldade de controlar as excitações acústicas.

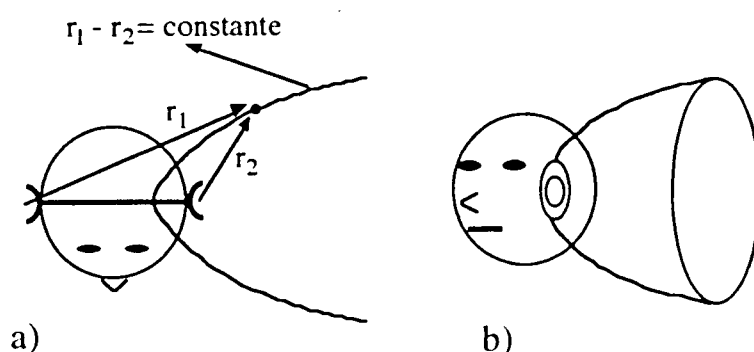


Fig. 1.28 - Cone de confusão: a) no plano horizontal e b) em perspectiva.

Analisaremos de seguida os vários procedimentos conhecidos para localização espacial da fonte sonora. Existem dois planos de análise, o plano horizontal e o plano vertical médio, que serão analisados inicialmente em separado e, de seguida, o estudo conjunto da elevação e azimute para todo o espaço.

1.5.1 Localização no plano horizontal

Se forem apresentados sinais idênticos a ambos os ouvidos, por exemplo através de um altifalante posicionado no plano horizontal no azimute de 0° , a imagem auditiva percebida pelo ouvinte será observada nessa posição. Neste caso, a diferença de tempo e a diferença de intensidade entre os dois ouvidos serão nulas. Se a fonte sonora for deslocada no azimute, a intensidade do sinal no ouvido oposto ao do deslocamento será inferior e o sinal chegará a esse ouvido com um maior atraso. Deste modo, a imagem auditiva deslocar-se-à para o ouvido em que o sinal chegar primeiro e onde a intensidade for maior, ou seja, deslocar-se-à no sentido do deslocamento da fonte. Isto deu origem à

teoria "duplex", na qual a diferença de tempo interauricular seria utilizada na localização de sinais de baixa frequência e a diferença de intensidade interauricular na localização de sinais de alta frequência. Contudo, sendo verdade para sinais sinusoidais, o mesmo não acontece para qualquer tipo de sinal. Também alguns investigadores notaram que a habilidade de um indivíduo localizar sinais sinusoidais quer às baixas quer às altas frequências era superior relativamente às médias frequências (Perrot, 1969; Moore, 1992). Assim, de seguida procura-se analisar algumas características dos sinais nas quais cada uma das diferenças interauriculares são utilizadas.

O estudo da influência da cabeça foi muitas vezes realizado por aproximação a uma esfera de dimensões semelhantes. Blauert (1983) apresenta uma breve descrição matemática do campo sonoro na superfície de uma esfera, que é de seguida apresentado.

Consideremos que uma fonte sonora radia um sinal sinusoidal a uma distância tal que permita aproximar o campo sonoro na superfície da esfera a uma onda plana. Deste modo, a pressão sonora num ponto da superfície, quando a esfera não se encontra presente, é

$$p_0(t) = \text{Real}(\hat{p}_0 e^{j2\pi ft}) \quad (1.2)$$

Com a esfera presente e considerando que a difracção é um processo linear, a pressão sonora nesse mesmo ponto é

$$p(t) = \text{Real}(\hat{p} e^{j(2\pi ft + \Phi)}) \quad (1.3)$$

representando a onda perturbada. A razão de difracção é dada por

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\hat{p}}{\hat{p}_0} e^{j\Phi}. \quad (1.4)$$

A solução deste problema é dada por

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2m+1}{D_m} L_m(-\cos\theta) e^{j(v_m - m\pi/2)} \quad (1.5)$$

com D_m e v_m determinados por

$$\begin{cases} (2m+1)D_m \cos v_m = \left(\frac{\lambda}{4r}\right)^{1/2} \left[mN_{m-1/2}\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) + (m+1)N_{m+3/2}\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) \right] \\ (2m+1)D_m \sin v_m = \left(\frac{\lambda}{4r}\right)^{1/2} \left[(m+1)I_{m+2}\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) - mI_m\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) \right] \end{cases} \quad (1.6)$$

onde L_m , I_m e N_m são as funções de Legendre, Bessel e Neumann de ordem m , respectivamente. O modelo da esfera rígida permitiu tirar algumas conclusões quanto às diferenças interauriculares.

O avanço da técnica dos microfones, tem permitido fazer medições directamente no ouvinte ou em cabeças artificiais.

A diferença entre os sinais nos dois ouvidos pode ser dada, para cada frequência f , por

$$\underline{A}(f) = |\underline{A}(f)| e^{j\varphi(f)} \quad (1.7)$$

Os dois tipos de diferenças interauriculares serão então:

- Diferença relacionada com o tempo de chegada aos dois ouvidos, que nos tempos é definida como diferença de tempo interauricular e que nas frequências é descrita por diferença de fase interauricular, $\varphi(f)$. A relação entre a diferença de tempo e de fase é dada pelo atraso de fase $\tau_{fa} = \varphi(f)/2\pi f$ e o atraso de grupo por $\tau_{gr} = d(\varphi(f))/d(2\pi f)$.

- Diferenças entre o nível de pressão nos dois ouvidos, designado por diferença de intensidade interauricular, $|\underline{A}(f)|$ ou $20 \log |\underline{A}(f)|$.

Na tentativa de se analisar os dois tipos de procedimentos biauriculares em separado, a localização tem sido frequentemente dirigida para o uso de auscultadores (Mills, 1958; Hafter e Jeffress, 1968; Babkoff, Sutton e Barris, 1973; Plenge, 1974; Nuetzel e Hafter, 1976; Hafter, Dye, Nuetzel e Aronow, 1977; Yost, 1977; Bloom e Jones, 1978; Ruotolo, Stern e Colburn, 1979; Henning, 1980; Abel e Kunov, 1983; Blauert, 1983; Bernstein e Trahiotis, 1985; Stern, Zeiberg e Trahiotis, 1988). Uma vez que este tipo de localização é diferente da realizada naturalmente no espaço livre é costume atribuir-se o nome de lateralização em vez de localização. Uma das conseqüências da lateralização é que a imagem auditiva é percebida dentro da cabeça, ao

contrário da localização na qual a imagem é percebida fora da cabeça. Isto acontece pelo facto do sinal fornecido aos dois ouvidos não ser o sinal natural (alterado pelo sistema auditivo externo). Foi provado (Plenge, 1974; Wightman e Kistler, 1989) que se forem utilizados sinais semelhantes aos obtidos pelo ouvido, originários de uma fonte externa e alterados pelo sistema auditivo externo, é possível a localização extra-cranial. Se sinais idênticos são apresentados por auscultadores a ambos os ouvidos, é observado uma imagem caindo no plano médio do espaço auditivo. Se o sinal num dos ouvidos é reduzido em intensidade ou atrasado relativamente ao outro, essa imagem move-se na direcção do ouvido não alterado.

1.5.1.1 Diferença de tempo interauricular

Tem sido largamente aceite que o sistema auditivo compara os aspectos temporais das entradas binauriculares para extrair a informação acerca da localização espacial da fonte sonora. O caso mais simples de diferença de tempo interauricular é quando os sinais são iguais em amplitude em ambos os ouvidos mas existindo um atraso de tempo de um deles relativamente ao outro. Através da lateralização, se se atrasar um dos sinais num dos ouvidos, relativamente ao outro, a imagem começa a afastar-se do plano vertical médio na direcção do ouvido em que o sinal chega primeiro. Uma medida da sensibilidade do sistema auditivo relativamente à diferença de tempo interauricular é a chamada diferença perceptível, considerada como a mais pequena mudança na diferença de tempo interauricular que conduz a deslocamento da imagem auditiva. Alguns exemplos de diferenças perceptíveis obtidas por vários autores (Blauert, 1983) para o azimute de 0° são: sinusoides, 6-12 μ s; série de estalidos, 11 μ s; ruído de banda larga, 10 μ s; bandas de ruído de 150-1700 Hz e 2400-3400 Hz, 9 μ s e 44 μ s, respectivamente.

Como qualquer sinal físico, os sons que ocorrem na natureza têm tempos de subida diferentes de zero, ou seja, existe um período transitório inicial. As diferenças interauriculares no tempo de chegada desses transitórios podem fornecer procedimentos para a localização além do procedimento da diferença de tempo interauricular relativos a todo o sinal (Perrot, 1969; Yost, 1977; Moore, 1992). Para sons com uma duração superior a algumas milésimas do segundo, os procedimentos devido ao início do sinal não têm quase nenhum

efeito. Contudo, para sinais muito curtos, como estalidos, este tipo de procedimento é muito importante.

Têm surgido fórmulas simplificadas da diferença de tempo interauricular que consideram a diferença de percursos para ambos os ouvidos. Sendo D a distância entre os dois ouvidos, e tendo em conta os três casos de posições da fonte, como é apresentado na figura 1.29, poderemos relacionar a diferença de tempo interauricular, DTI , com o azimute θ . Se $r \gg \frac{D}{2}$ (figura 1.29a) e considerando "c" a velocidade do som, a diferença de tempo interauricular é então

$$DTI = \frac{D}{2c} (\theta + \text{sen}\theta) \quad (1.8)$$

Khun (1977) determinou a diferença de tempo interauricular, mas tendo em conta o efeito da frequência notando a variação com a mesma. Desses resultados, enquanto que para as médias e altas frequências a expressão podia ser aproximada pela equação (1.8), para as baixas frequências (<500 Hz) o valor da diferença de tempo interauricular seria diferente, com valor

$$DTI \approx \frac{3D}{2c} \text{sen}\theta . \quad (1.9)$$

Não considerando a variação na frequência, para o caso da figura 1.29c) em que $\text{sen}\theta \leq \frac{D}{2r}$ teremos

$$DTI = \frac{D}{c} \theta \quad (1.10)$$

e finalmente se $\text{sen}\theta > \frac{D}{2r}$ (figura 1.29b)

$$DTI = \frac{D}{2c} \left[\theta + \arcsen\left(\frac{D}{2r}\right) \right] + \sqrt{r^2 - \frac{D^2}{4}} - \sqrt{\frac{D^2}{4} + r^2 - D.r.\text{sen}\theta} . \quad (1.11)$$

Num exemplo apresentado para impulsos rectangulares em Blauert (1983), mostra que a relação entre os resultados medidos e os valores obtidos pela equação (1.8) revelam uma boa equivalência.

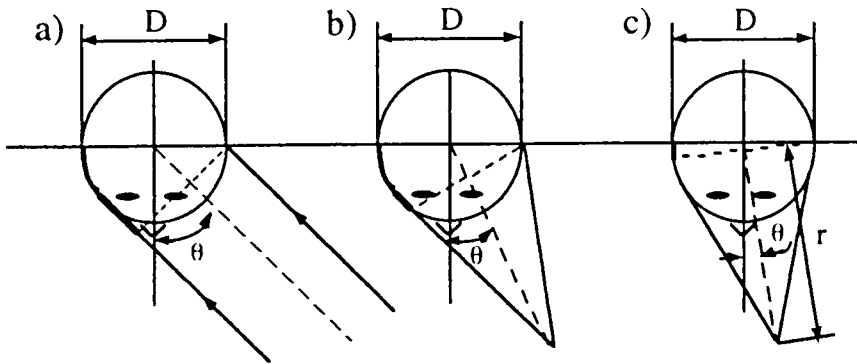


Fig. 1.29 - Diferenças de percursos entre os dois ouvidos para várias posições da fonte: a) som incidente paralelo. b) e c) pontos próximos da cabeça.

Pelo facto de termos dois ouvidos a uma dada distância, estamos restringidos na gama de frequências em que a diferença de fase de um tom puro pode operar sem ambiguidade. Para evitar este problema devemos ter uma diferença de tempo interauricular dada por

$$DTI < \frac{1}{2f} \quad (1.12)$$

onde f é a frequência. Substituindo esta equação na equação (1.8) e considerando $D=17.5$ cm, teremos

$$0.5 > (0.0875/340)(\theta + \sin\theta)f \quad (1.13)$$

As combinações de f e θ que não satisfazem a inequação acima não permitem uma única estimativa do azimuth. O uso da diferença de tempo interauricular, pelos seres humanos, está restringido à frequência à volta de 1400 Hz (Mills, 1958; Zurek, 1980), o que corresponde a um valor de cerca de 45°. Este valor de 1400 Hz, que também é dado por outros como sendo à volta de 1500-1600 Hz (Henning, 1980; Blauert, 1983; Moore, 1992), deve-se aos diferentes tamanhos da cabeça utilizados. Continuando com o caso de 1400 Hz, a fase interauricular pode ser empregue para estimar o azimuth com inversões ocorrendo apenas quando a frequência está entre 700 e 1400 Hz e o ângulo entre 45° e 90°. Abaixo de 700 Hz nunca ocorre ambiguidades de fase e acima de 1400 Hz a fase é ambígua para fontes sinusoidais. Isto significa que o deslocamento lateral máximo só é obtido para sinusoides cuja frequência não seja superior a 700 Hz, ou seja, cuja metade do período não é inferior a cerca

de 700 μ s, e entre 700 Hz e 1400 Hz os deslocamentos da imagem auditiva são cada vez menores até que acima de 1400 Hz já não existe lateralização.

Pelo que foi dito acima, tem havido o consenso de que a diferença de tempo interauricular é o procedimento primário em baixas frequências. Contudo, sendo verdade para tons puros, existem outros tipos de excitações complexas em que isto não é verdade e na qual as imagens auditivas dos sinais de alta frequência podem ser deslocadas através do atraso da envolvente em vez da portadora (Nuetzel e Hafter, 1976; Yost, 1977; Bloom e Jones, 1978; Henning, 1980; Abel e Kunov, 1983; Bernstein e Trahiotis, 1985; Moore, 1992). Assim, quando o sinal não tiver componentes abaixo de 1400-1600 Hz, o sistema auditivo ignora o atraso de tempo interauricular da portadora (estrutura fina) e avalia apenas a envolvente. Este resultado pode continuar a ser válido mesmo que os sinais sejam diferentes em ambos os ouvidos, mas é necessário que a envolvente seja a mesma. Contudo, se por exemplo os sinais forem duas sinusoides de diferentes frequências moduladas pela mesma envolvente, só é definida uma imagem auditiva quando as frequências caem abaixo de um certo limite (Blauert, 1983). Se as frequências forem muito diferentes o sistema auditivo desassocia em duas imagens. Nuetzel e Hafter (1976) tentaram a lateralização, sem resultado, em que foi apresentado a um ouvido um sinal modulado por uma senoide e no outro ouvido uma senoide igual à da envolvente. Deste modo, o desempenho de lateralização é melhor quando as frequências da portadora são idênticas e tendo um mau desempenho quando as ondas complexas em cada ouvido não têm componentes frequenciais comuns. Bloom e Jones (1978) verificaram a lateralização em médias e altas frequências utilizando sinusoides moduladas por sinusoides, cujas frequências variavam entre 2,4 KHz a 7,2 KHz e frequências de modulação na gama de 50 Hz a 600 Hz, verificando que a sensibilidade da lateralização de cada portadora, para valores fixos de modulação, era geralmente da mesma ordem da sensibilidade da audição aos tons puros. Nuetzel e Hafter (1976) comprovaram a habilidade de os indivíduos responderem aos pequenos atrasos de tempo interauricular nas envolventes de sinais de alta frequência, na lateralização de sinais complexos de modulação de amplitude na qual apresentou alguns traços encontrados nos tons de baixa frequência.

No espaço livre quer as portadoras dos sinais num dos ouvidos quer as envolventes são atrasadas no tempo relativamente ao outro ouvido e

geralmente por diferentes quantidades. O atraso da portadora é dado pelo atraso de fase e o atraso da envolvente pelo atraso de grupo. Para baixa frequência, a lateralização é influenciada quer pela diferença de tempo interauricular da estrutura fina quer pela diferença de tempo interauricular da envolvente, mas os atrasos baseados na estrutura fina parecem dominar sobre os atrasos da envolvente. Para alta frequência, os atrasos baseados na envolvente produzem deslocamentos das imagens auditivas, sendo estas influenciadas pela taxa de modulação. Segundo Bernstein e Trahiotis (1985), obtém-se maior deslocamento da imagem auditiva com altas taxas de modulação e para baixas taxas de modulação os atrasos de todo o sinal produzem maiores deslocamentos da imagem para portadoras de baixa frequência do que de alta frequência (onde os procedimentos da portadora não são utilizados). Quando os sinais incluem componentes acima e abaixo de 1400-1600 Hz e se o atraso de tempo interauricular da portadora for diferente do atraso da envolvente, a imagem auditiva pode ser dissociada em duas partes.

A imagem auditiva pode ser separada num conjunto de componentes adjacentes quando o atraso de tempo interauricular varia com a frequência (Blauert, 1983).

A posição da imagem auditiva pode ser grandemente afectada pela largura de banda. Por exemplo (Stern, Zeiberg e Trahiotis, 1988), a figura 1.30 apresenta a lateralização de uma banda de ruído centrada em 500 Hz com uma diferença de tempo interauricular de 1500 μ s. O apontador utilizado na experiência foi outra banda de ruído, em que a posição da imagem auditiva era controlada pela diferença de intensidade interauricular (DII). Pode-se verificar que para um dado valor baixo de largura de banda, a imagem auditiva aparece num dos lados da cabeça e quando a largura de banda aumenta, a imagem passa para o outro lado. Uma justificação para este facto é que quando a banda de ruído é muito estreita, o sinal aproxima-se do tom puro, que neste caso é de 500 Hz. O atraso de 1500 μ s faz com que um dos ouvidos conduza o sinal, mas como o período de 500 Hz é de 2000 μ s o resultado é como se o outro ouvido passasse a conduzir o sinal com um atraso de 500 μ s. Quando a largura de banda aumenta, o sinal aproxima-se do de banda larga e a imagem auditiva passa de um lado da cabeça para o outro, para a sua posição correcta no espaço.

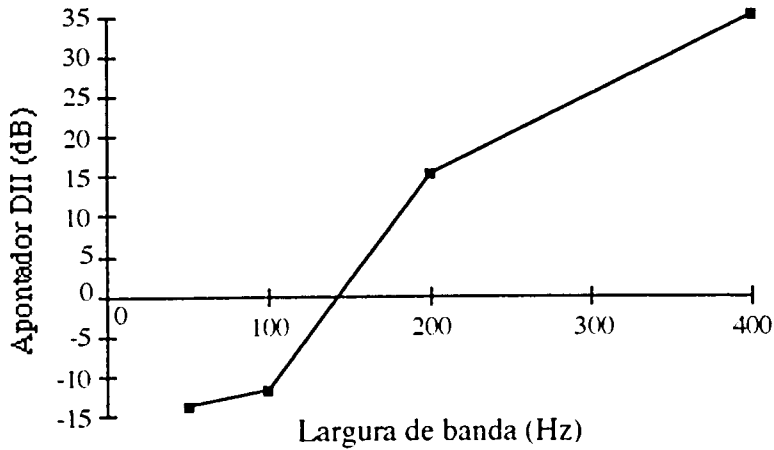


Fig. 1.30 - Lateralização de um sinal de ruído com uma diferença de tempo interauricular de $1500 \mu\text{s}$ em função da largura de banda.

A maioria das teorias de interacção biauriculares assume que o processamento auditivo pode ser modelizado pela passagem dos sinais auditivos através de um conjunto de filtros passa-banda, em que cada um deles analisa uma frequência central diferente. Também é assumido que o sistema auditivo realiza uma correlação cruzada interauricular das saídas dos filtros. Segundo Stern, Zeiberg e Trahiotis (1988), o sistema auditivo determina o máximo na função de correlação, no valor da diferença de tempo interauricular, se o sinal for de banda larga. Se o sinal for de banda estreita, o sistema auditivo é incapaz de distinguir entre vários picos na correlação, causando o deslocamento da imagem para posições diferentes.

1.5.1.2 - Diferença de intensidade interauricular

As variações de nível de pressão sonora resultam do sombreamento sonoro provocado pela cabeça. Às baixas frequências o comprimento de onda do som é bastante maior que o tamanho da cabeça, permitindo que este a possa rodear facilmente. Este fenómeno é designado por difracção. Por outro lado, quando o comprimento de onda é mais pequeno do que a cabeça, a partir de cerca de 1 KHz, o nível de pressão sonora no ouvido mais afastado pode ser consideravelmente reduzido, ocorrendo sombreamento sonoro. Nos valores de frequências onde as discriminações temporais deixam de ter efeito, os comprimentos de onda tornam-se de tal modo curtos que a difracção é bastante pequena, produzindo diferenças razoáveis no nível de pressão do som nos ouvidos. A diferença de intensidade interauricular pode ser desprezável a

baixas frequências mas podem ter variações de cerca 20 dB às altas frequências.

Este caso pode ser analisado como foi realizado para os procedimentos das diferenças de tempo. Contudo, as diferenças de intensidade também podem ser discriminadas monauricularmente, ou seja, a mudança do azimute pode ser obtida através da variação de intensidade num dos ouvidos em vez, ou em adição, à variação da diferença de intensidade entre os ouvidos (Mills, 1958). Hafter, Dye, Nuetzel e Aronow (1977) verificaram que, como acontecia com a diferença de tempo interauricular, a sensibilidade a incrementos de intensidade interauricular decresceu pouco numa vasta gama de posições no espaço de lateralização.

Em Blauert (1983) é indicado que a imagem auditiva é completamente deslocada para um dos lados da cabeça quando a diferença de nível é de 15-20 dB ou 10 dB para impulsos de ruído branco ou impulsos de ruído de baixa frequência. Até ao deslocamento lateral total, a diferença de nível interauricular é mais ou menos linear relativamente ao deslocamento. Indivíduos com experiência na localização notaram a existência de duas imagens quando os sinais tinham componentes abaixo de 1400-1600 Hz. Enquanto que uma delas deslocava-se na direcção em que o nível de pressão era mais forte, a outra imagem permanecia centrada no centro da cabeça, independentemente da diferença de intensidade interauricular.

Como acontece com a diferença de tempo interauricular, podem surgir múltiplas imagens se as componentes espectrais dos sinais tiverem diferentes diferenças de intensidade.

A diferença perceptível é aqui definida como a mais pequena mudança da diferença de intensidade interauricular que conduz a um deslocamento da imagem auditiva. Alguns exemplos de diferenças perceptíveis obtidos por vários autores e apresentado em Blauert (1983) são: estalidos (35, 40 e 80 phon), 1,5 dB; sinusoides 200-6000Hz, 0,6-2 dB. A diferença perceptível depende de vários factores como tipo de sinal, níveis de sonoridade e duração. A lateralização com a diferença de intensidade interauricular é um processo variante no tempo imposto pela adaptação (rápida perda de sensibilidade auditiva), fadiga (devido a altos níveis de intensidade e duração) e processo de aprendizagem.

Shaw (1974) apresenta um conjunto de curvas sonoras no plano horizontal que representam as transformações do nível de pressão sonora do espaço livre para o tímpano em função da frequência e do azimute. As funções foram obtidas do seguinte modo: a função de transferência da pressão do espaço livre para a entrada do canal auditivo é dada por

$$T_e(\theta, f) = L_e(\theta, f) - L(\theta, f) \quad (1.14)$$

onde $L_e(\theta, f)$ é o nível de pressão sonora no ouvido esquerdo e $L(\theta, f)$ é o nível de pressão sonora no centro da cabeça com o indivíduo removido. A diferença de intensidade interauricular é

$$\begin{aligned} DII(\theta, f) &= T_e(\theta, f) - T_e(-\theta, f) \\ &= L_e(\theta, f) - L_e(-\theta, f) - L(\theta, f) + L(-\theta, f) \\ &= L_e(\theta, f) - L_e(-\theta, f) \end{aligned} \quad (1.15)$$

considerando que $L(\theta, f)$ não varia com θ .

Para se obter as funções de transferência no tímpano foi utilizado a função de transferência média da entrada do ouvido para o tímpano, apresentada na figura 1.31.

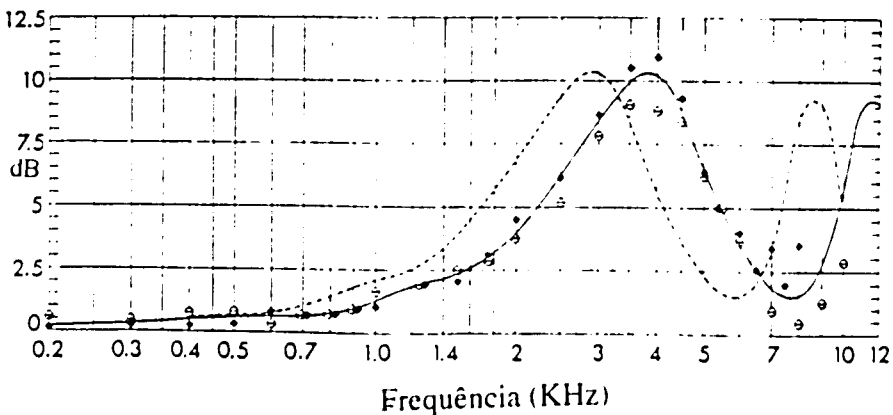


Fig. 1.31 - Função de transferência do canal do ouvido.

As curvas da diferença de intensidade interauricular para todo o espaço horizontal em função da frequência são apresentadas na figura 1.32.

Localização de fontes sonoras

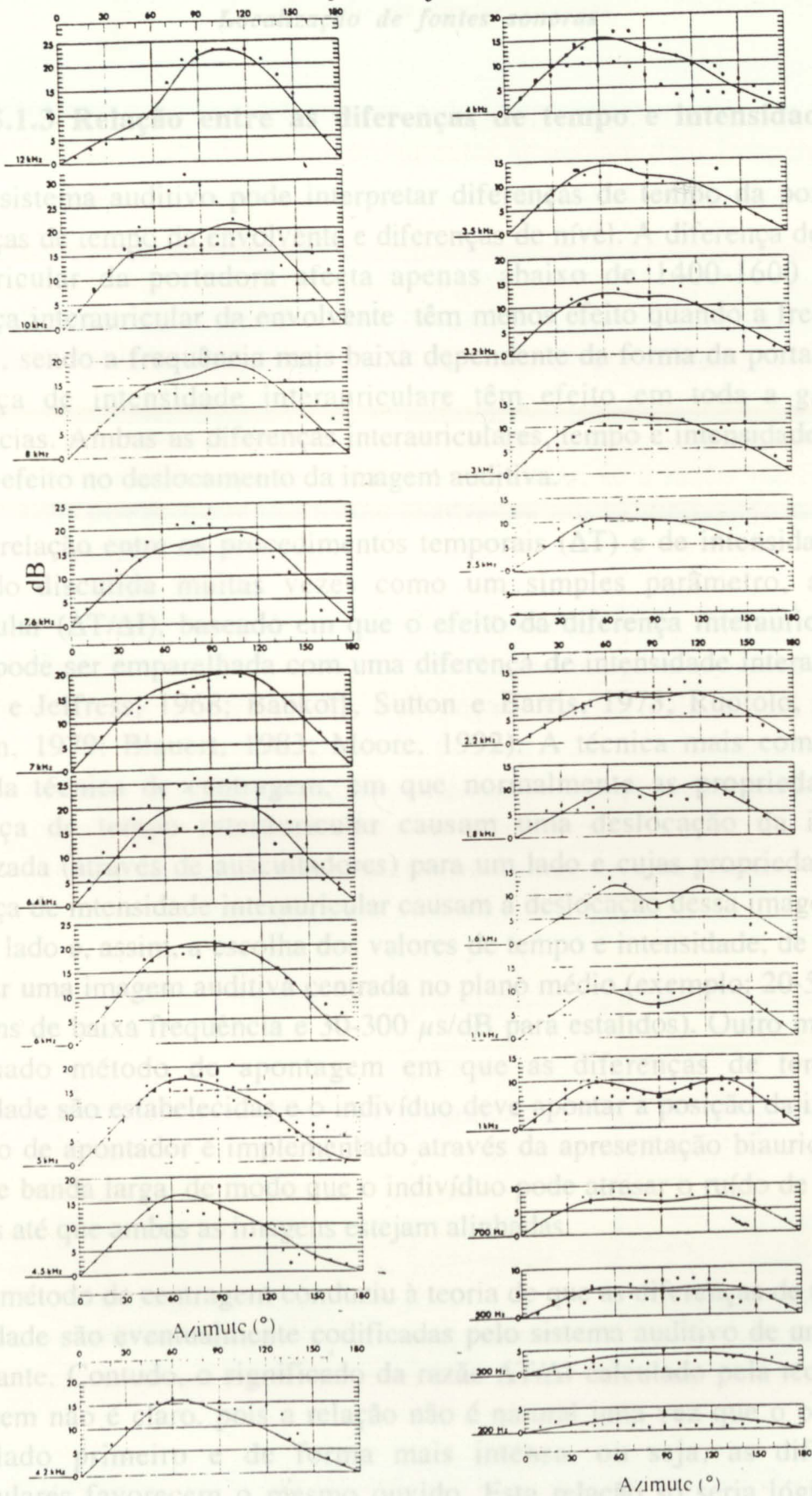


Fig. 1.32 - Diferença de intensidade interaural, $DII(q,f)$.

1.5.1.3 Relação entre as diferenças de tempo e intensidade

O sistema auditivo pode interpretar diferenças de tempo da portadora, diferenças de tempo da envolvente e diferenças de nível. A diferença de tempo interauricular da portadora afecta apenas abaixo de 1400-1600 Hz. A diferença interauricular da envolvente têm menos efeito quando a frequência diminui, sendo a frequência mais baixa dependente da forma da portadora. A diferença de intensidade interauricular têm efeito em toda a gama de frequências. Ambas as diferenças interauriculares, tempo e intensidade, têm o mesmo efeito no deslocamento da imagem auditiva.

A relação entre os procedimentos temporais (ΔT) e de intensidade (ΔI) tem sido discutida muitas vezes como um simples parâmetro, a razão biauricular ($\Delta T/\Delta I$), baseado em que o efeito da diferença interauricular de tempo pode ser emparelhada com uma diferença de intensidade interauricular (Haftner e Jeffress, 1968; Babkoff, Sutton e Barris, 1973; Ruotolo, Stern e Colburn, 1979; Blauert, 1983; Moore, 1992). A técnica mais comum é a chamada técnica de centragem, em que normalmente as propriedades da diferença de tempo interauricular causam uma deslocação da imagem lateralizada (através de auscultadores) para um lado e cujas propriedades das diferença de intensidade interauricular causam a deslocação dessa imagem para o outro lado e, assim, a escolha dos valores de tempo e intensidade, de modo a aparecer uma imagem auditiva centrada no plano médio (exemplo: 20-50 $\mu s/dB$ para tons de baixa frequência e 30-300 $\mu s/dB$ para estalidos). Outro método é o chamado método de apontagem em que as diferenças de tempo ou intensidade são estabelecidas e o indivíduo deve apontar a posição da imagem. Um tipo de apontador é implementado através da apresentação biauricular de ruído de banda larga, de modo que o indivíduo pode atrasar o ruído de um dos ouvidos até que ambas as imagens estejam alinhadas.

O método de centragem conduziu à teoria de que as diferenças de tempo e intensidade são eventualmente codificadas pelo sistema auditivo de um modo semelhante. Contudo, o significado da razão $\Delta T/\Delta I$ calculado pela técnica de centragem não é claro, pois a relação não é natural uma vez que o ouvido é estimulado primeiro e de forma mais intensa, ou seja, as diferenças biauriculares favorecem o mesmo ouvido. Esta relação só seria lógica se a relação entre ΔT e ΔI fosse ortogonal e linear. Por outro lado, alguns autores

verificaram que quando era fornecida a de tempo interauricular em oposição com a diferença de intensidade interauricular apareciam duas imagens. Hafter e Jeffress (1968) verificaram este fenómeno quer para sinusoides quer para estalidos. Outro exemplo (Hafter e Jeffress, 1968; Babkoff, Sutton e Barris, 1973; Ruotolo, Stern e Colburn, 1979), para sinais sinusoidais, quando os indivíduos eram apresentados simultaneamente com as diferenças de tempo e intensidade ouviam duas imagens, designando-se por imagem de tempo e imagem de intensidade. Enquanto que a imagem de intensidade reflectia o efeito das diferenças interauriculares de tempo e intensidade, a imagem de tempo reflectia a diferença de tempo interauricular, se a razão interauricular for de 0.3-20 $\mu\text{s}/\text{dB}$. Estes resultados confirmam que as diferenças de tempo e intensidade não são equivalentes.

Como se verificou, se as relações interauriculares não corresponderem a qualquer situação natural de audição, a fusão das imagens auditivas nos dois ouvidos pode ser reduzida. As diferenças interauriculares de tempo e intensidade, que nos estudos da razão interauricular conduzem a múltiplas imagens, não excedem necessariamente a gama de situações de audição natural. Contudo, no espaço livre as diferenças interauriculares não são independentes, havendo combinações de diferenças de tempo e intensidade que são reconhecidas pelo ouvido.

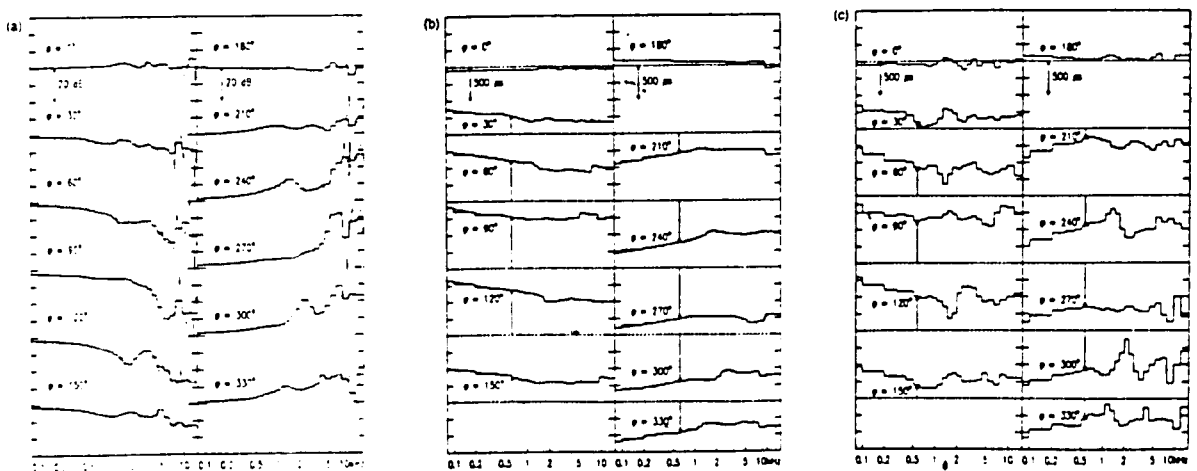


Fig 1.33 - a) Diferença de intensidade interauricular; b) atraso de fase interauricular e c) atraso de grupo interauricular.

Outro processo para se obter as razões interauriculares é através da medição das funções de transferência nos dois ouvidos. Gaik (1993) obteve as combinações naturais das relações das diferenças interauriculares de tempo e de intensidade através deste processo. Nessa análise, as respostas impulsivas dos ouvidos esquerdo e direito, $h_{E,a}(n)$ e $h_{D,a}(n)$, foram divididas em 24 sinais de banda estreita desde 20 Hz até 15,5 KHz, $h_{Ei,a}(n)$ e $h_{Di,a}(n)$, onde "a" lembra-nos a dependência da direcção, "i" refere-se ao número da banda crítica e "n" o índice na escala discreta temporal. Para a banda crítica "i" e para cada direcção de incidência a diferença de intensidade interauricular é

$$DII_{i,a} = 10 \log \frac{\sum_{n=0}^N h^2_{Di,a}(n)}{\sum_{n=0}^N h^2_{Ei,a}(n)} \quad (1.16)$$

Para se obter um valor único para cada banda crítica do atraso de fase interauricular é executada uma análise de correlação cruzada entre $h_{Di,a}(n)$ e $h_{Ei,a}(n)$ (fazendo a convolução de $h_{Di,a}(n)$ com o simétrico de $h_{Ei,a}(n)$). O valor do atraso é o máximo na função de correlação. Para se obter o atraso de grupo interauricular é mais uma vez realizada a análise da correlação cruzada, utilizando as envolventes dos sinais em vez dos mesmos. As envolventes foram determinadas através da transformada de Hilbert. A figura 1.33 apresenta os resultados obtidos para várias posições no plano horizontal. Como se pode verificar pela figura 1.33b), a diferença dos atrasos de fase varia com a frequência, diminuindo com o aumento da mesma e mantendo-se aproximadamente constante acima de 1-2 KHz. Isto está em concordância com o que foi dito na sessão 1.5.1.1 (Khun, 1977).

A figura 1.34 apresenta as relações interauriculares. Foi realizada uma experiência psico-acústica para testar como o sistema auditivo reage às combinações de diferenças interauriculares. Verifica-se que quando as relações interauriculares se afastavam das obtidas na figura 1.34, consideradas como naturais, o número de ocorrências de divisão da imagem auditiva aumentava.

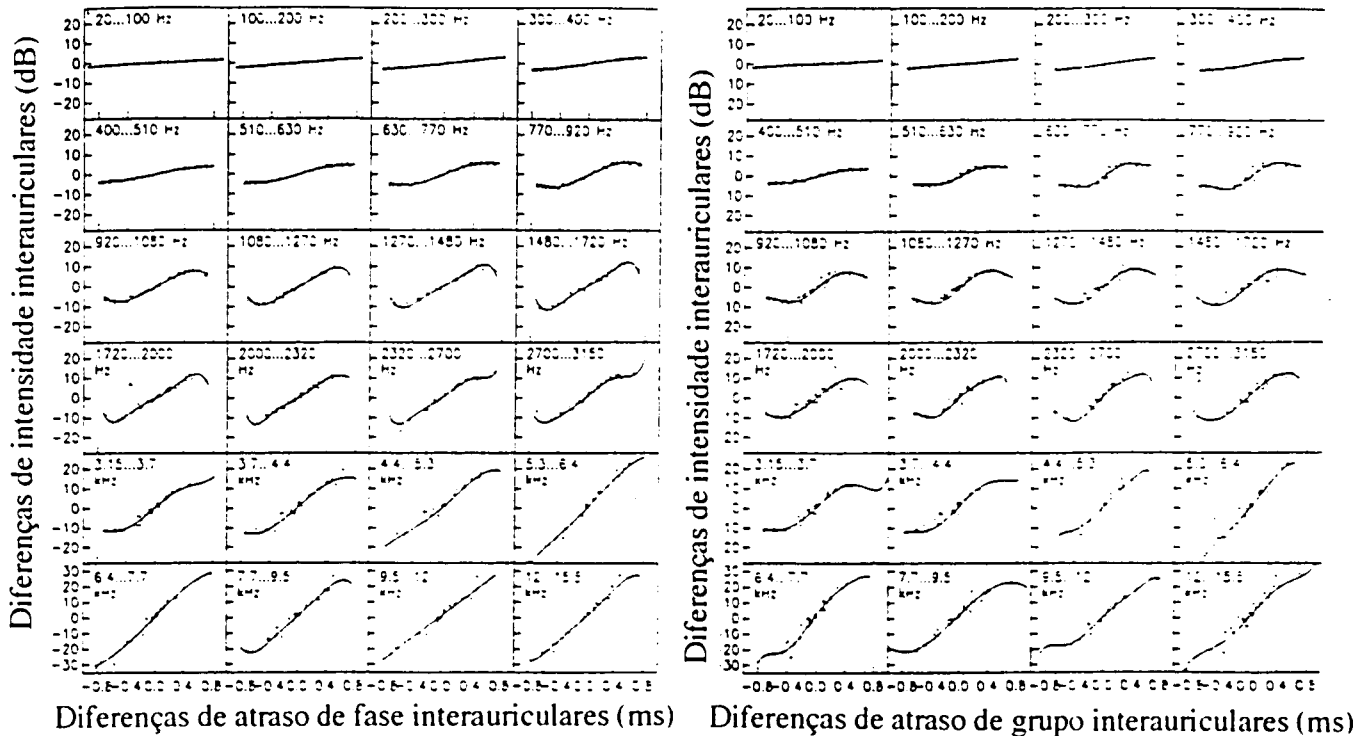


Fig 1.34 - a) Diferença de intensidade interauricular em função do atraso de fase interauricular e b) diferença de intensidade interauricular em função do atraso de grupo interauricular.

1.5.1.4 Localização monauricular

A localização do som no espaço é realizada com a ajuda das diferenças interauriculares de tempo e intensidade. No entanto, não são essenciais para uma precisão razoável dessa tarefa. Tem sido demonstrada a localização monauricular no plano horizontal (Butler e Planert, 1976; Butler, 1983; Musicant e Butler, 1985). Tem-se também verificado que a habilidade de um surdo de um ouvido localizar fontes sonoras melhora com o tempo. Surge, então, a questão de quais os procedimentos de localização que permitem a localização monauricular no plano horizontal. Os movimentos da cabeça, que conduzem à estimulação máxima do-ouvido funcional, indicam o segmento do arco de onde o som é originário e, assim, os indivíduos devem apenas discriminar entre mudanças sucessivas de sonoridade. Contudo, mesmo sem os movimentos da cabeça é possível a localização monauricular. Foi sugerido outro procedimento: a variação espectral nas altas frequências dos sons complexos, provocada principalmente pela aurícula, de um modo semelhante à realizada no plano vertical médio onde as diferenças interauriculares são mínimas. Por exemplo, as sinusoides e o ruído de baixa frequência não podem

ser localizados sem as diferenças interauriculares de tempo e intensidade. Butler e Planert (1976), variando a largura de banda dos sinais de ruído, pretendiam obter diferentes desempenhos na localização. As bandas estavam centradas à volta de 8 KHz e as fontes posicionadas nos azimute de 0° a 60° com incrementos de 15°. Foi verificado que o erro total diminuiu com o aumento da largura de banda (figura 1.35).

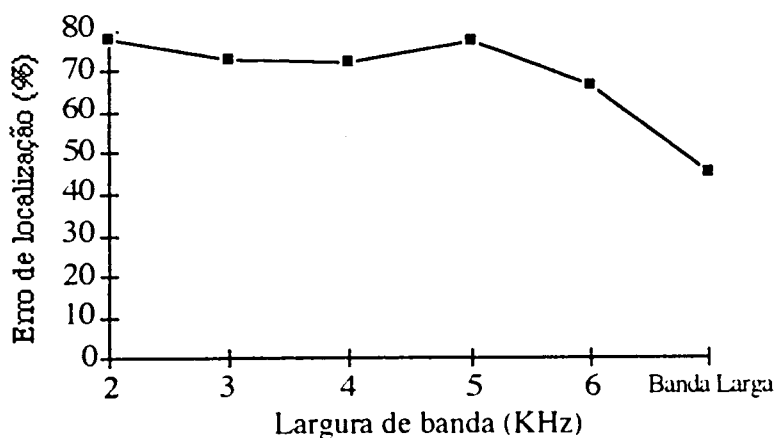


Fig. 1.35 - Erro de localização monauricular no plano horizontal em função da largura de banda.

Musicant e Butler (1985) comprovaram que a localização horizontal sem auxílio das diferenças interauriculares é obtida desde que o sinal contenha uma banda larga de frequências, acima de 4 KHz. Numa experiência de localização monauricular de bandas de ruído de 1 KHz de largura de banda foi verificado que esta era influenciada pelo conteúdo espectral. Por exemplo, a banda centrada em 4 KHz aparecia perto da frente e a banda centrada em 8 KHz na posição lateral, repetindo-se com as bandas de 9 e 12 KHz para a frente e lado, respectivamente.

Como a localização monauricular no plano horizontal está desprovida dos procedimentos interauriculares, a análise desta situação é semelhante à do plano vertical médio, que será feita na secção 1.5.2, e na qual algumas das conclusões podem ser aqui aplicadas: aquelas que dizem respeito à localização monauricular.

1.5.1.5 Funções de transferência do ouvido

Utilizando a equação (1.14), Shaw (1974) obteve curvas para vários azimutes. A figura 1.36 apresenta as funções de transferências médias do espaço livre para o tímpano, resultantes do trabalho de vários autores. De notar o mínimo em $T(\theta, f)$ no sector frontal entre 1,0 e 1,3 KHz. Segundo Shaw, entre 0° a 60° , e talvez no lateral, verifica-se a existência de interferência que se pressupõe depender da interacção entre a onda directa e a reflectida pelos ombros e, entre -15° e -75° , existe uma zona de interferência entre as ondas difractadas que alcançam o ouvido por lados opostos da cabeça.

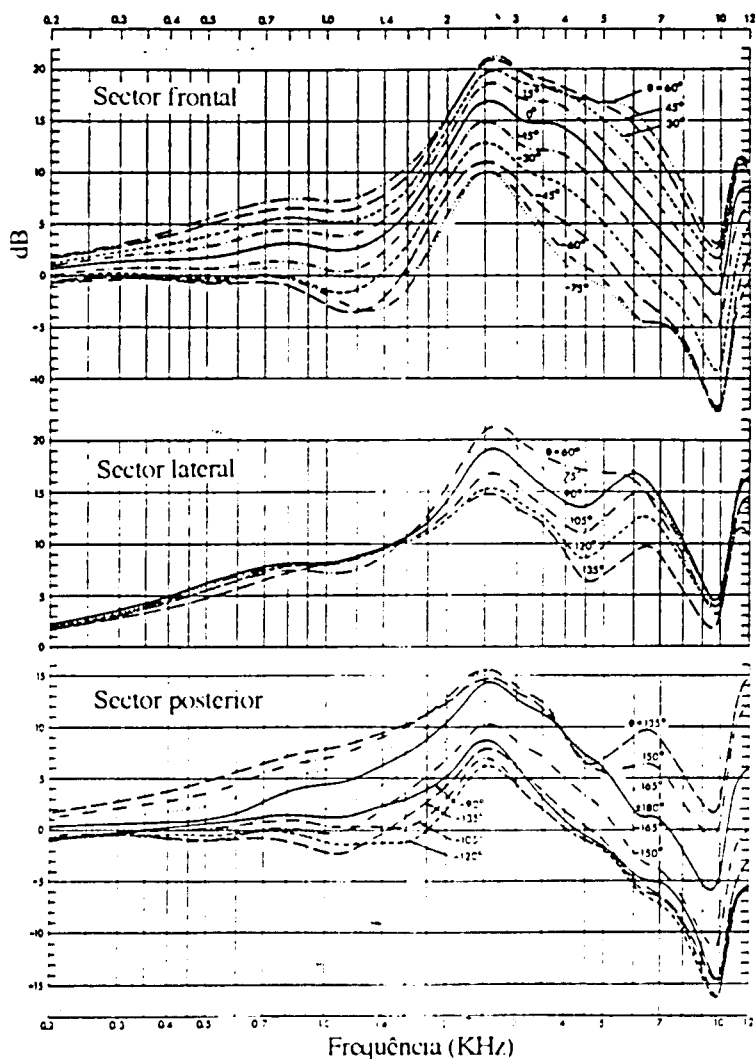


Fig. 1.36 - Funções de transferência do ouvido, do espaço livre para o tímpano.

Pretendendo alargar a gama de frequências (2-15 KHz) e incluir os efeitos da fase, Mehrgardt e Mellert (1977) realizaram medições da função de

transferência do ouvido no plano horizontal, em módulo e fase. Os sinais medidos foram

$$\begin{aligned}x_0(t) &= p_0(t)*s(t)*e(t) \\x_1(t) &= p_1(t)*s(t)*e(t)\end{aligned}\tag{1.17}$$

onde * significa convolução, $x_1(t)$ corresponde à pressão $p_1(t)$ na entrada do canal e $x_0(t)$ corresponde à pressão $p_0(t)$ no espaço livre. A resposta impulsional do microfone é $s(t)$ e $e(t)$ é a resposta da aparelhagem electrónica. A função de transferência é

$$H(\omega) = \frac{X_1(\omega)}{X_0(\omega)} = \frac{P_1(\omega)S(\omega)E(\omega)}{P_0(\omega)S(\omega)E(\omega)}\tag{1.18}$$

A fase só é definida com uma ambiguidade de 2π . Para evitar erros de 2π pode-se suavizar a função, mas isto implica perder a estrutura fina. Assim, recorre-se a outro processo. A fase $\varphi(\omega)$ da função de transferência $H(\omega)$ é dividida em fase mínima $m(\omega)$ (contém a estrutura fina) e fase passa-tudo $a(\omega)$,

$$H(\omega) = |H(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}\tag{1.19}$$

$$m(\omega) = \mathfrak{H}(-\ln|H(\omega)|) \quad \mathfrak{H} - \text{transformada de Hilbert}\tag{1.20}$$

$$a(\omega) = \varphi(\omega) - m(\omega)\tag{1.21}$$

Assim, $m(\omega)$ contém a estrutura fina e a fase passa-tudo já pode ser suavizada sem perda de informação do sistema. Adicionando $a(\omega)$, agora, a $m(\omega)$ produz a fase desejada. É também eliminado um atraso médio da fase.

A amplitude e a fase continuam ainda a conter estruturas finas não pretendidas que podem ser eliminadas por suavização. A suavização pode ser proporcional à frequência, ou seja, constante na escala de frequências logarítmica. A suavização de uma ordem numérica y_m de comprimento M , representando a amplitude ou fase, é executada por convolução com uma função f_j .

O resultado é

$$y'_n = \sum_{m=0}^{M-1} y_m f_{n-m} \quad (1.22)$$

com

$$f_i = \begin{cases} (2k+1)^{-1} & |i| \leq k \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad (1.23)$$

onde k determina a extensão da suavização.

Assim a equação acima pode ser realizada recursivamente.

$$y'_{n+1} = y'_n + (2k+1)^{-1} (y_{n+k+1} - y_{n-k}) \quad (1.24)$$

Também foi efectuado a medição da função de transferência do canal do ouvido. A figura 1.37 apresenta esse resultado e compara-o com o obtido por Shaw (1974), que nesse caso só foi calculado até à volta de 10 KHz (a entrada do ouvido foi aqui considerada em 2 mm dentro do ouvido).

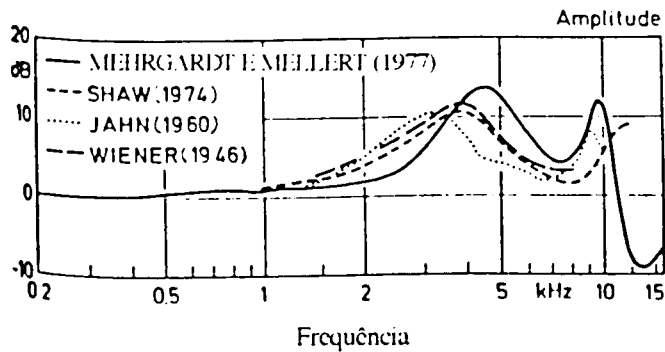


Fig. 1.37 - Função de transferência do canal do ouvido.

A figura 1.38 e 1.39 apresentam as funções de transferência médias do espaço livre para a entrada do canal num dos ouvidos. Alguns traços importantes são os dois picos encontrados em todas as direcções que, segundo Mehrgardt e Mellert, devem-se às ressonâncias do canal do ouvido. Para valores de azimute entre 0° e -54° verifica-se uma depressão à volta de 1 KHz, provocada pela difracção das ondas à volta da cabeça. Quanto à fase, dos resultados da fase passa-tudo, verificou-se uma variação aproximadamente linear até 10 KHz. Deste modo, o ouvido externo tem uma característica de fase mínima.

Localização de fontes sonoras

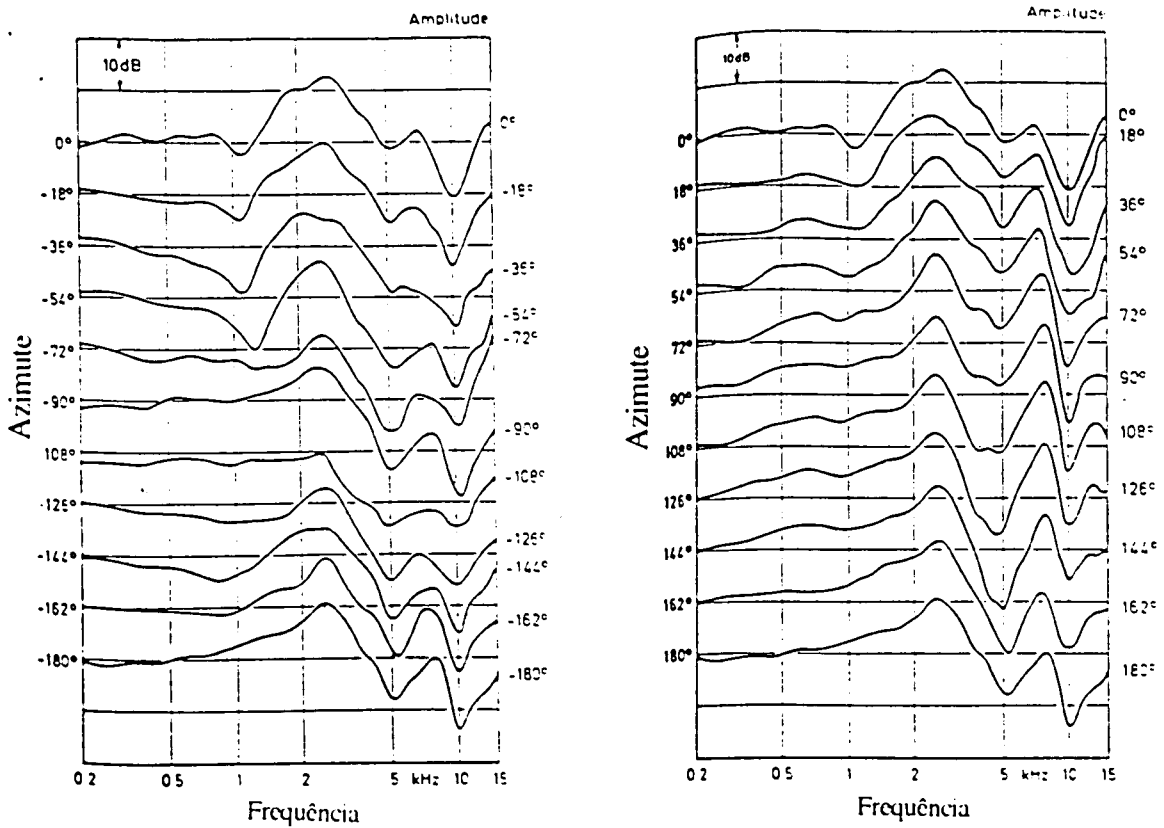


Fig. 1.38 - Amplitude das funções de transferência do ouvido, do espaço livre para o canal do

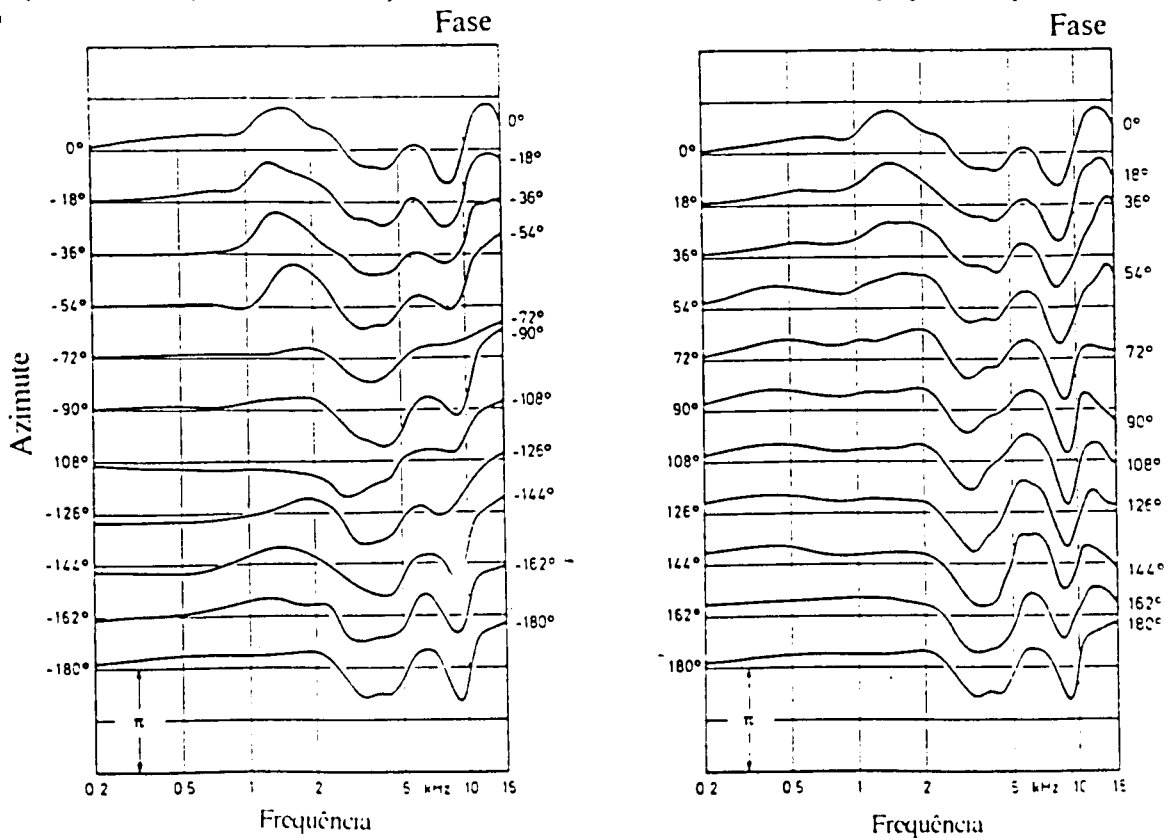


Fig. 1.39 - Fase das funções de transferência do ouvido.

A figura 1.40 apresenta a dependência do azimute das funções de transferência relativamente ao azimute 0°, comparando os resultados obtidos por Shaw (1974) e Mehrgardt e Mellert (1977). As depressões verificadas para os azimutes negativos devem-se à difracção à volta da cabeça e para os azimutes positivos as funções de transferência em geral aumentam.

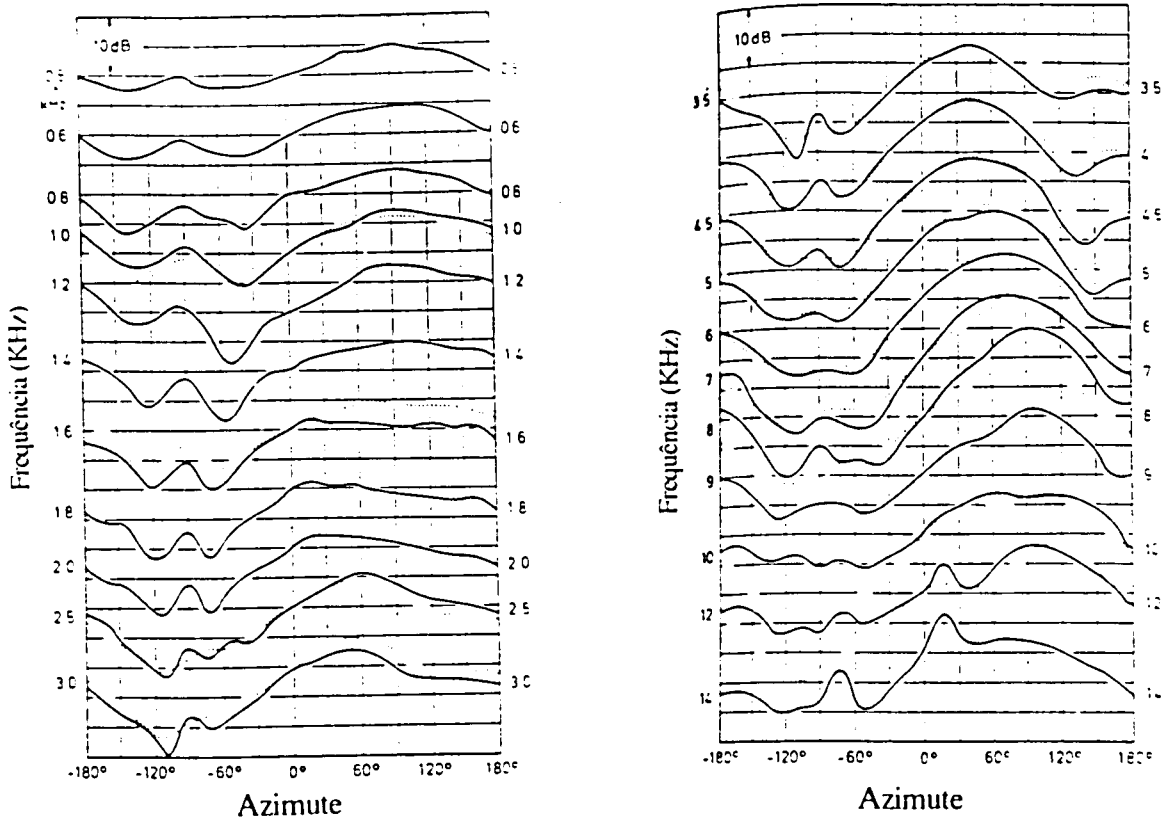


Fig. 1.40 - Dependência do azimute das funções de transferência obtido por Shaw (1974) (a picotado) e Mehrgardt e Mellert (1977) (a cheio).

Utilizando a técnica usada por Mehrgardt e Mellert (1977), Wightman e Kistler (1989) também obtiveram-se as funções de transferência do ouvido em módulo e fase. Tirando algumas discrepâncias devido a vários factores, como microfone utilizado, posição no canal do ouvido para efectuar as medições (Wightman e Kistler mediram directamente as funções de transferência perto do tímpano), os resultados são comparáveis aos obtidos por Shaw (1974) e Mehrgardt e Mellert (1977). Os resultados da fase suportam a conclusão de Mehrgardt e Mellert de que as funções de transferência do ouvido podem ser modelizadas por um sistema fase mínima. A diferença de fase entre os dois ouvidos é consistente com os resultados do modelo de Khun (1977) de que a

variação da diferença de tempo interauricular com a frequência verifica uma relação de cerca 3:2 das baixas para as altas frequências.

1.5.2 Localização no plano vertical

Tem sido difícil a determinação dos factores que influenciam a localização no plano vertical.

Algumas das características importantes a que consegui chegar são: o desempenho da localização no plano vertical médio depende do tipo de sinal, 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 têm incidido no estudo do plano vertical médio. Isto deve-se ao facto de que neste plano as diferenças interauriculares serem mínimas e, deste modo, os principais procedimentos de localização serem monauriculares, ao contrário do plano horizontal onde os principais procedimentos de localização eram biauriculares (excepto quando só existe um ouvido, como se viu anteriormente). Enquanto que os procedimentos biauriculares para localização no plano horizontal foram considerados há imenso 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. As mudanças espectrais provocadas principalmente pela aurícula permitem a codificação da posição espacial da fonte sonora.

1.5.2.1 O papel da aurícula e espectro necessário para a localização

Blauert (1969/70) foi um dos que reintroduziu o papel da aurícula na localização do plano vertical médio. Da 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. O problema na teoria de Blauert é que ele baseou a sua teoria em três zonas de localização: frente, cima e atrás. Estes resultados tornam-se inconclusivos, pois não foi testado todo o plano vertical médio para relacionar as bandas preferenciais. Para mais, a maioria dessas

bandas encontravam-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 Roffler e Butler (1968a), para localização precisa no plano vertical médio, o som deve ser complexo e conter frequências acima de 7000 Hz. Nas altas frequências, o comprimento de onda torna-se suficientemente curto que permite a interação do som com a aurícula.

Para analisar o papel da aurícula têm sido realizados muitos estudos, principalmente através da oclusão da mesma e análise dos resultados assim obtidos (Roffler e Butler, 1968a; Gardner, 1973; Gardner e Gardner, 1973; Hebrank e Wright, 1974; Oldfield e Parker, 1984) verificando-se que a habilidade de localização no plano médio diminuía com o aumento da oclusão. Desses resultados confirma-se a grande importância da aurícula na localização do plano vertical médio. Por exemplo, a figura 1.41a) apresenta o erro obtido por Gardner e Gardner (1973) quando se efectua a oclusão das diversas concavidades da aurícula e em 1.41b) é apresentado o resultado obtido por Oldfield e Parker (1984), numa experiência em que se efectua a oclusão da aurícula para posições da fonte sonora em todo o espaço.

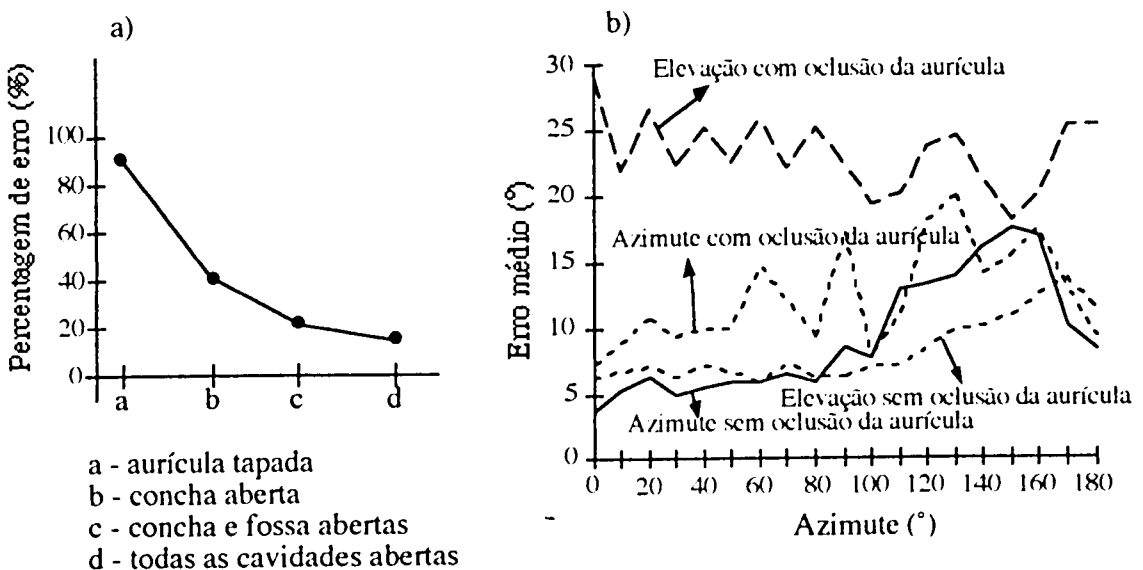


Fig. 1.41 - Erros obtidos com oclusão da aurícula: a) Gardner e Gardner (1973) e b) Oldfield e Parker (1984).

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 (Roffler e Butler, 1968a; Blauert, 1969/70; Gardner, 1973; Butler e Planert, 1976), ou que os sinais tendiam a serem localizados em posições particulares independentes da posição actual da fonte (Roffler e Butler, 1968b; Hebrank e Wright, 1974b; Blauert, 1983; Moore, 1992). A figura 1.42 apresenta o erro obtido por Butler e Planert (1976) em várias larguras de banda de sinais de ruído (bandas centradas à volta de 8 KHz) e para fontes posicionadas nas elevações entre -60° e 60° , com incrementos de 15° , com localização biauricular e monauricular. 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. Contudo, outros autores sugerem que a informação está contida nos vales do espectro (Bloom, 1977), ou nos picos ou nos vales do espectro (Watkins, 1978).

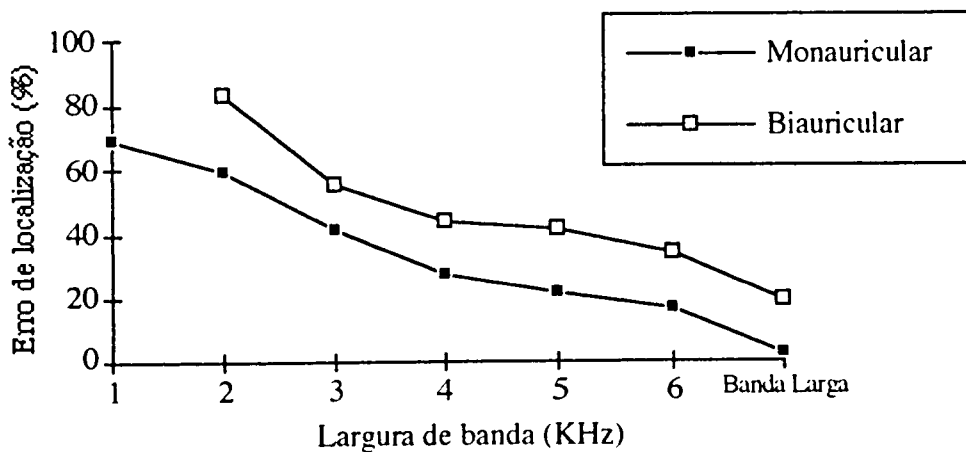


Fig. 1.42 - Erro de localização biauricular e monauricular no plano vertical médio.

Das várias experiências de localização verificou-se, assim, a necessidade de que o espectro seja complexo e a existência de energia às altas frequências, na gama de frequências entre 4 a 16 KHz, para conter as transformações do espectro provocadas principalmente pela aurícula. As alterações do espectro provocadas pela cabeça verificam-se a frequências mais baixas que as da aurícula, sendo neste caso a partir de 1 KHz. Alguns exemplos da análise de Hebrank e Wright (1974b), efectuada em ouvidos artificiais, na qual os sons frontais eram interpretados por uma depressão de 1 oitava entre 4 a 8 KHz e

por um aumento de energia à volta de 13 KHz, os sons acima da cabeça eram representados por um pico de 1/4 de oitava perto de 8-9 KHz e os sons posteriores eram representados por um pequeno pico à volta de 10-12 KHz. Em Bloom (1977), simulando através de dois altifalantes uma depressão que variava nas frequências, os indivíduos perceberam elevações desde -30° até 45° , quando a depressão variava desde 6,3 KHz até 10 KHz.

Desde que se tornou importante o conhecimento do papel da aurícula para a localização vertical, surge a questão de como é que a mesma altera o espectro sonoro de modo a introduzir a informação direccional da fonte sonora. Surge, então, a teoria de que convoluções da aurícula actuam como reflectores que criam atrasos temporais do sinal proveniente da fonte sonora. Uma das críticas a esta teoria era a detectibilidade de atrasos muito baixos. As experiências realizadas por Wright, Hebrank e Wilson (1974) mostram que o sistema auditivo é capaz de detectar atraso à volta de $20 \mu s$. Watkins (1978), simulando as reflexões provocadas pela aurícula através de um auscultador, verificou que os indivíduos detectaram o deslocamento vertical da imagem auditiva no plano lateral quando um eco variava desde 100 a $300 \mu s$. A função assim simulada, assemelhava-se às funções de transferência medidas por outros autores, confirmando-se a necessidade de altas frequências para a localização.

Procurando analisar mais ainda as reflexões da aurícula, Rodgers (1981) analisou as funções de transferência devido a atrasos de sinal e comparou com os resultados obtidos com a aurícula. Deste modo, a natureza da filtragem espectral pode ser vista pela combinação do som directo e do som reflectido. Quando o ângulo com a aurícula varia, a distância entre o canal do ouvido e a primeira reflexão principal também varia. A figura 1.43a) apresenta o caso de um som numa elevação baixa. A primeira reflexão mais saliente será criada no topo da concha com distância de cerca 0,5 mm do canal do ouvido, criando uma distância de atraso de 1 mm, com uma reflexão de cerca $74 \mu s$. Nas frequências esse atraso manifesta-se com um primeiro mínimo entre 6 a 7 KHz e outro entre 18 e 20 KHz. A figura 1.43b) apresenta o caso em que a fonte está mais ou menos ao nível do ouvido, criando uma reflexão proveniente da parte detrás da concha com uma distância de atraso de cerca 0,75 mm ou cerca de $55 \mu s$. Este atraso cria o primeiro mínimo à volta de 9 KHz e o segundo fora do espectro audível. Na figura 1.43c), para uma fonte sonora mais elevada, a primeira reflexão é proveniente do anti trago, criando uma distância

de atraso de cerca 0,5 mm ou à volta de 13,5 KHz. Como se verifica, com aumento da elevação, a geometria da aurícula provoca um atraso de reflexão cada vez mais curto, ou seja, com um mínimo espectral a aumentar nas frequências.

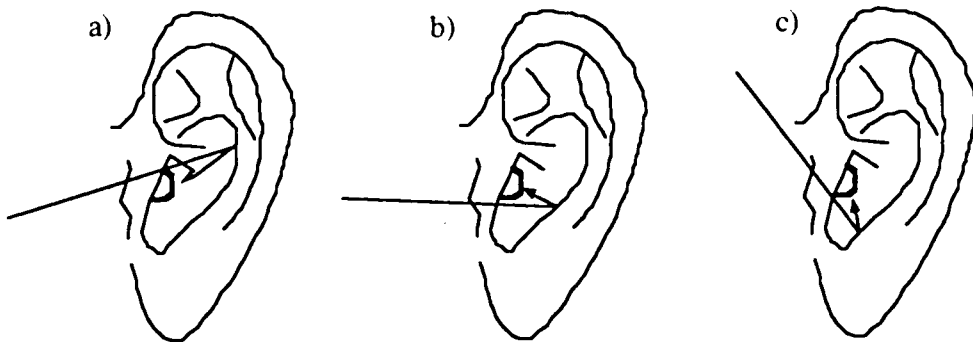


Fig. 1.43 - Reflexões da aurícula.

Para comparar com alguns exemplos, a figura 1.44 apresenta exemplos de medições em aurículas reais (com microfone colocado na entrada do canal auditivo). Na figura 1.44a) a fonte está a uma elevação de 15° e azimute de 90° , provocando um mínimo à volta de 11 KHz. Na figura 1.44b), com uma fonte na elevação de 0° e azimute 90° , o mínimo espectral ocorre à volta de 8 KHz. A figura 1.44c), para uma elevação abaixo de 0° e azimute de 90° , apresenta o primeiro mínimo à volta de 6-7 KHz. O mínimo adicional entre 10,5 e 15 KHz pode depender dos efeitos do tronco. Na figura 1.44d), que representa uma fonte na elevação de 0° e azimute 180° , verifica-se que a aurícula começa a funcionar como um filtro passa-banda atenuando as altas frequências.

Além do procedimento de localização até aqui analisado, que consiste na comparação dos valores da energia ao longo das frequências para detecção de máximos e mínimos, Humanski e Butler (1988) sugerem que existe também um segundo procedimento de localização que consiste na comparação da energia acústica, mas na mesma banda de frequências para diferentes posições da fonte. Deste último, obtém-se uma função de transferência em função da elevação, cujo procedimento de localização seria o máximo ou mínimo de energia nesta função. Isto representa onde cada posição espacial é representada no espectro de frequências. Para apoiar este resultado, e como foi verificado atrás, nos sinais de banda estreita as fontes sonoras eram localizadas não em função da posição, mas dependendo do conteúdo espectral, ou seja, a posição

espacial onde uma determinada banda é mais amplificada relativamente às outras.

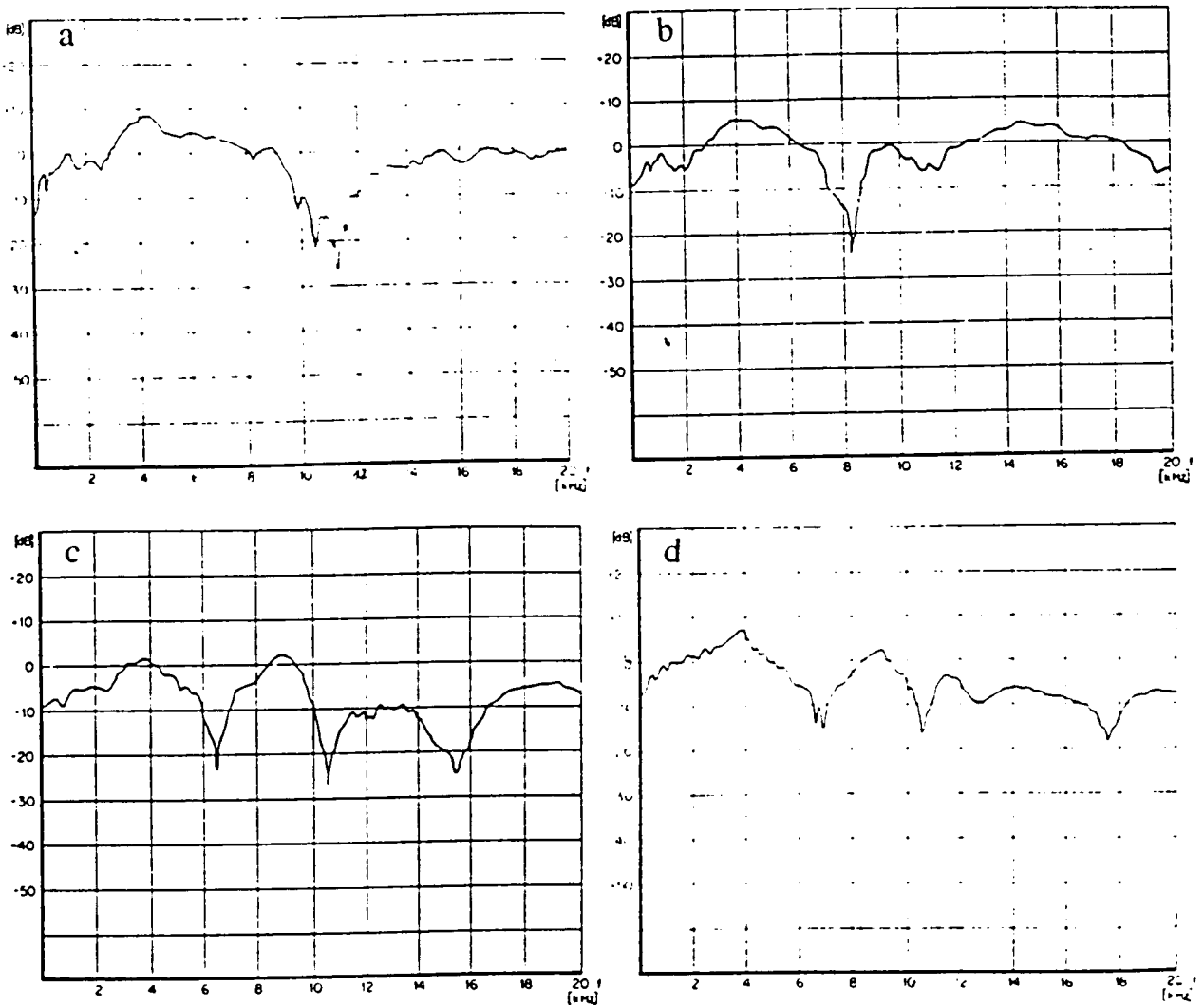


Fig. 1.44 - Funções de transferência do ouvido: a) $\theta=90^\circ$ e $\phi=15^\circ$, b) $\theta=90^\circ$ e $\phi=0^\circ$, c) $\theta=90^\circ$ e ϕ =abaixo de 0° e d) $\theta=180^\circ$ e ϕ =abaixo de 0° .

Contudo, está-se longe de decodificar o mecanismo da aurícula. Por exemplo, continua-se a não saber se a informação está contida nos nulos ou picos espectrais ou contida em bandas estreitas.

1.5.2.2 Localização biauricular

Até aqui tem-se analisado os procedimentos de localização monauriculares. Contudo uma questão que tem sido bastante discutida, havendo alguma divergência entre os autores, é se os procedimentos para o

plano vertical médio são também biauriculares. Para este último caso, as diferenças interauriculares seriam produzidas pelas assimetrias das aurículas. Por exemplo, Gardner (1973) verifica que, embora os procedimentos fornecidos pela aurícula tenham uma importante componente monauricular, a localização é mais precisa quando a recepção é biauricular. Por outro lado, em Hebrank e Wright (1974) e Hebrank (1976) rejeita-se a hipótese de que a localização seja biauricular. No primeiro caso, verificaram que a perda de precisão quando se passava da localização de ruído branco (som familiar) para sons de ruído branco com atraso (som desconhecido) foi semelhante para o caso monauricular e biauricular embora a precisão biauricular, fosse ligeiramente superior. Contudo, concluíram que os indivíduos podem ser treinados para obterem monauricularmente a mesma precisão que biauricularmente. Quanto ao segundo caso, Hebrank (1976) explicou que as diferenças medidas em trabalhos anteriores dever-se-iam à dificuldade em se obter a posição exacta do plano vertical médio.

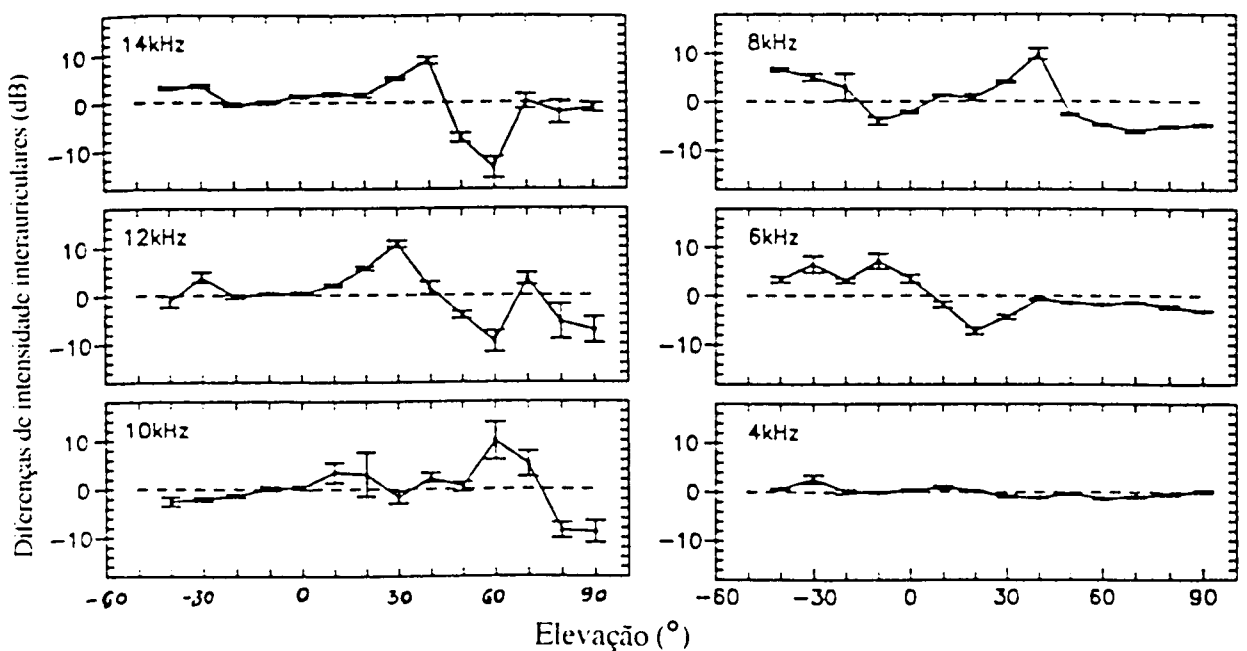


Fig. 1.45 - Diferença de intensidade interauricular, no plano vertical médio, para várias frequências e elevações.

Não obstante algumas conclusões, recentemente aponta-se um maior desempenho das diferenças biauriculares no plano vertical médio. A figura 1.42 apresenta um exemplo em que a localização biauricular é superior à monauricular. Medidas efectuadas por Middlebrooks, Makous e Green (1989) no plano vertical médio mostram que as funções direccionais nos dois ouvidos são assimétricas. Como se pode verificar pela figura 1.45, é notórias a

diferença de intensidade interauricular principalmente às altas frequências e nas altas elevações. Wightman e Kistler (1989a) também obtiveram resultados semelhantes.

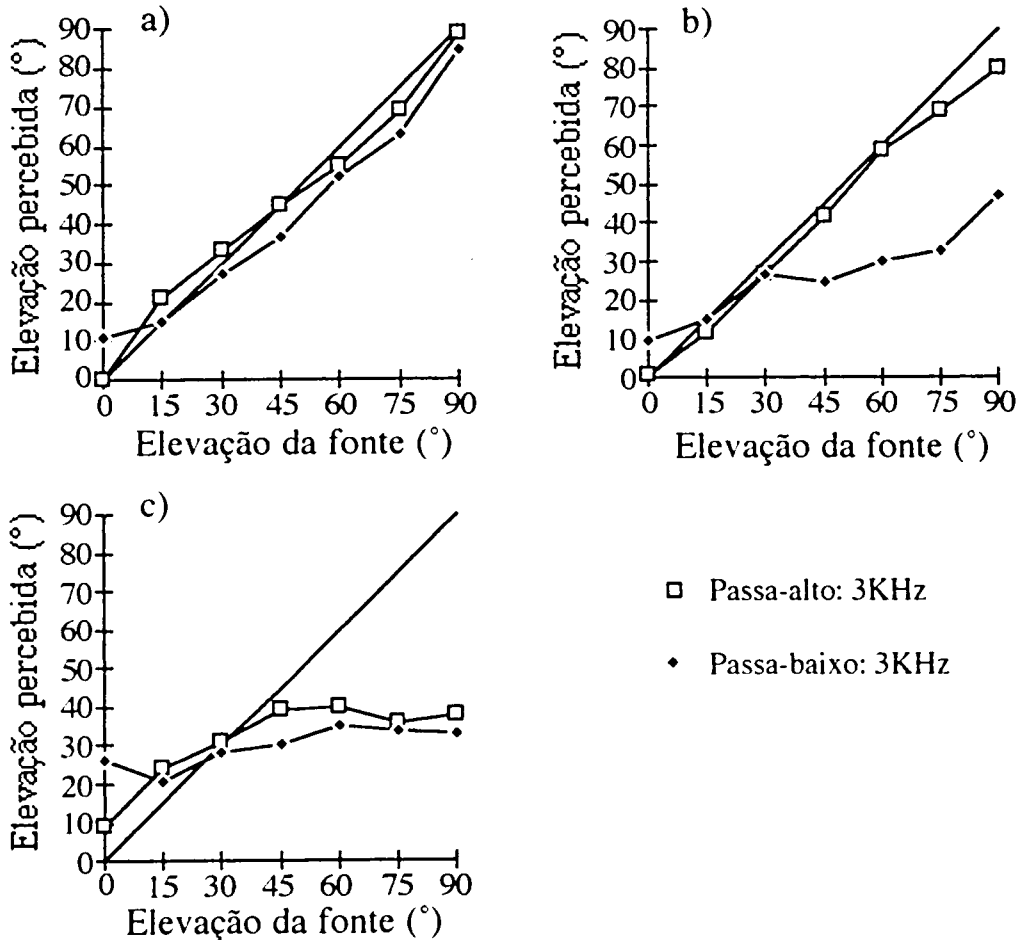


Fig 1.46 - Localização no plano vertical: a) localização biauricular no plano lateral, b) localização biauricular no plano médio, c) localização monauricular no plano lateral.

Tem-se verificado que, além da localização biauricular ser superior à localização monauricular no plano vertical médio, a precisão da localização monauricular decresce com a elevação. Como a localização biauricular se mantém mesmo para altas elevações, sugere-se que as diferenças interauriculares devem operar aí. Por exemplo, quando Humanski e Butler (1988) analisaram o plano vertical verificaram que a localização foi semelhante quer se utilizassem um ou os dois ouvidos para localização em planos verticais nos azimutes de 45°, 90° e 135°. Contudo, só foi analisado a gama de elevações desde -30° até 30°. Butler e Humanski (1992) analisaram, biauricularmente e monauricularmente, dois planos verticais, o plano médio e

o lateral, com fontes distribuídas desde 0° até 90° (com intervalos de 15°). A figura 1.46 apresenta os resultados obtidos. Na localização biauricular de ruído passa-baixo de 3KHz de frequência de corte, verificou-se que enquanto os erros no plano médio foram elevados (os procedimentos devido à disparidade da aurícula encontram-se às altas frequências), o plano lateral manteve uma precisão razoável. Se for utilizado ruído passa-alto de frequência de corte em 3 KHz verifica-se uma precisão razoável para ambos os planos, mas com maior precisão nas altas elevações no plano lateral relativamente ao plano médio. A localização monauricular no plano lateral provoca erros elevados quer para o ruído passa-alto quer para o passa-baixo mas para o ruído passa-alto a precisão é razoável até cerca de 45°. Estes resultados sugerem que os procedimentos espectrais monauriculares contribuem para a precisão na localização no plano lateral até cerca de 45° de elevação. Para localizar com precisão neste plano é necessário os procedimentos das diferenças biauriculares de tempo e intensidade.

1.5.2.3 Funções de transferência direccionais

Searle, Braida, Cuddy e Davis (1975) mediram a função de transferência para o plano vertical segundo o processo que será de seguida apresentado. Para uma fonte sonora de frequência ω localizada num dado azimute θ e elevação ϕ no espaço anecóico, existe uma função de transferência única $E(\omega, \theta, \phi)$, em cada tímpano, constituída pela soma de um sinal directo e vários sinais reflectidos e difractados pelas várias partes do corpo, como a cabeça, aurícula e ombros. As variações de amplitude no plano vertical médio são provocadas pela aurícula, uma vez que as variações devido à cabeça são mínimas para $\theta=0$. Para azimutes diferentes de zero, quer a cabeça quer a aurícula contribuem para a resposta.

Se $V_s(\omega)$ for uma fonte numa posição do plano vertical médio com elevação ϕ desconhecida, o espectro dos ouvidos é:

$$E_e(\omega, 0, \phi) = V_s(\omega) \times H_e(\omega, 0, \phi)$$

$$E_d(\omega, 0, \phi) = V_s(\omega) \times H_d(\omega, 0, \phi) \tag{1.25}$$

onde H_e e H_d são as funções de transferência do ouvido. Se é medido apenas E_e e E_d , estas não chegam para determinar o ângulo ϕ quando V_s é desconhecido.

Logo algum conhecimento à priori deve existir, para o ouvinte, do espectro do som de entrada para uma correcta localização no plano vertical médio. Contudo, experiências mostraram que esta informação à priori não existe, exigindo apenas que a fonte tenha energia às altas frequências.

Isto desaparece se for utilizado a assimetria entre os espectros dos dois ouvidos. Se H_e e H_d são diferentes em amplitude às altas frequências, então

$$\left| \frac{E_e}{E_d} \right| = \left| \frac{H_e}{H_d} \right| \quad (1.26)$$

é independente de V_s e assim ϕ pode ser determinado.

Inseriu-se um microfone a 1 cm da entrada do canal e as ressonâncias devido ao mesmo foram removidas por normalização. O valor do sinal no microfone para uma posição x do mesmo no canal é

$$F(\omega, \phi, x) = H(\omega, \phi)Y(\omega, x)Z(\omega) \quad (1.27)$$

onde $H(\omega, \phi)$ é a amplitude do modo longitudinal, $Y(\omega, x)$ é a razão entre a resposta no ponto x e a resposta para emparelhamento da terminação e $Z(\omega)$ é a resposta do altifalante, microfone e sistema de medida. Para se encontrar $H(\omega, \phi)$ deve-se eliminar Y e Z de F . $Z(\omega)$ é calculado, sem nenhum indivíduo, no ponto onde se vai medir dentro da aurícula (suspensão no ar). Como não foi fácil encontrar Y directamente, mediu-se a função em $\phi=120^\circ$ na entrada do canal ($x=0$) com bloqueamento do mesmo para evitar ressonâncias do ouvido. Assim, $\tilde{F}(\omega, 120^\circ, 0)$ é o modo longitudinal nas condições de emparelhamento.

$$Y(\omega, x) \approx \frac{F(\omega, 120^\circ, x)}{\tilde{F}(\omega, 120^\circ, 0)}$$

e

$$H(\omega, \phi) = \frac{F(\omega, \phi, x)}{Z(\omega)} \frac{\tilde{F}(\omega, 120^\circ, 0)}{F(\omega, 120^\circ, x)} \quad (1.28)$$

Foram calculadas as razões da equação (1.26) para cada ângulo de incidência. As figuras 1.47 e 1.48 apresentam os resultados. Estes resultados

comprovam as transformações efectuadas pela aurícula e indicam ainda uma disparidade entre as respostas do ouvido esquerdo e direito. Verificar a existência de variação dos picos e vales nas frequências com a variação da elevação.

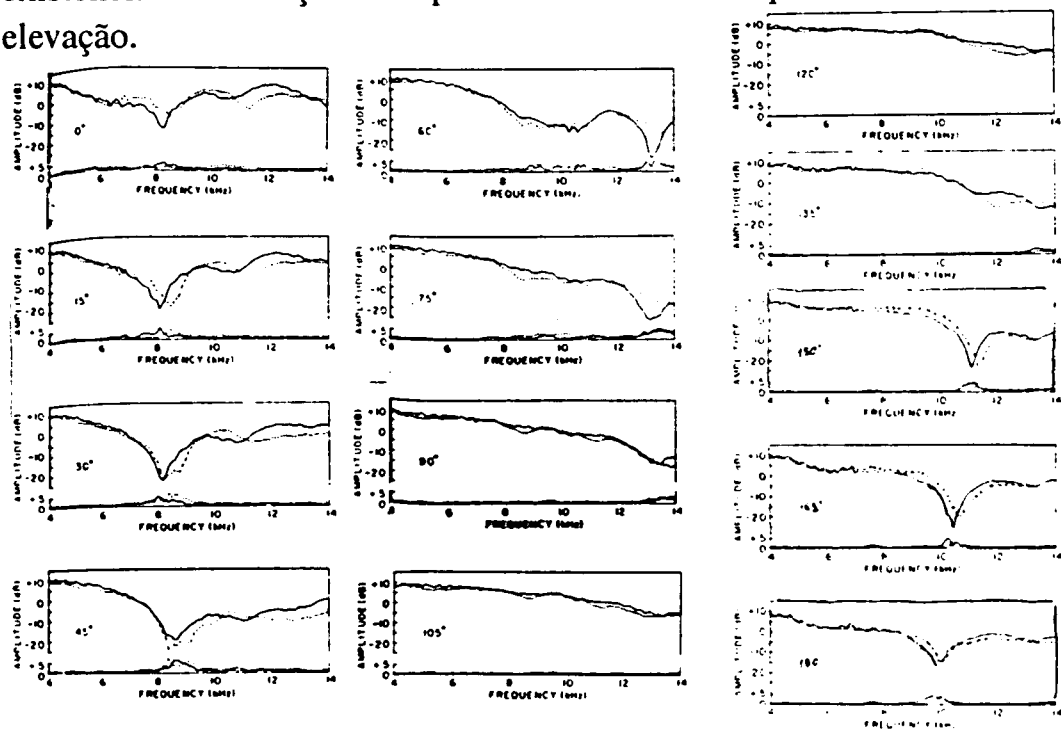


Fig. 1.47 - Respostas direccionais médias do ouvido para várias direcções: ouvido esquerdo (linha a tracejado) e ouvido direito (linha a cheio). Abaixo de cada gráfico encontra-se o desvio padrão das respostas.

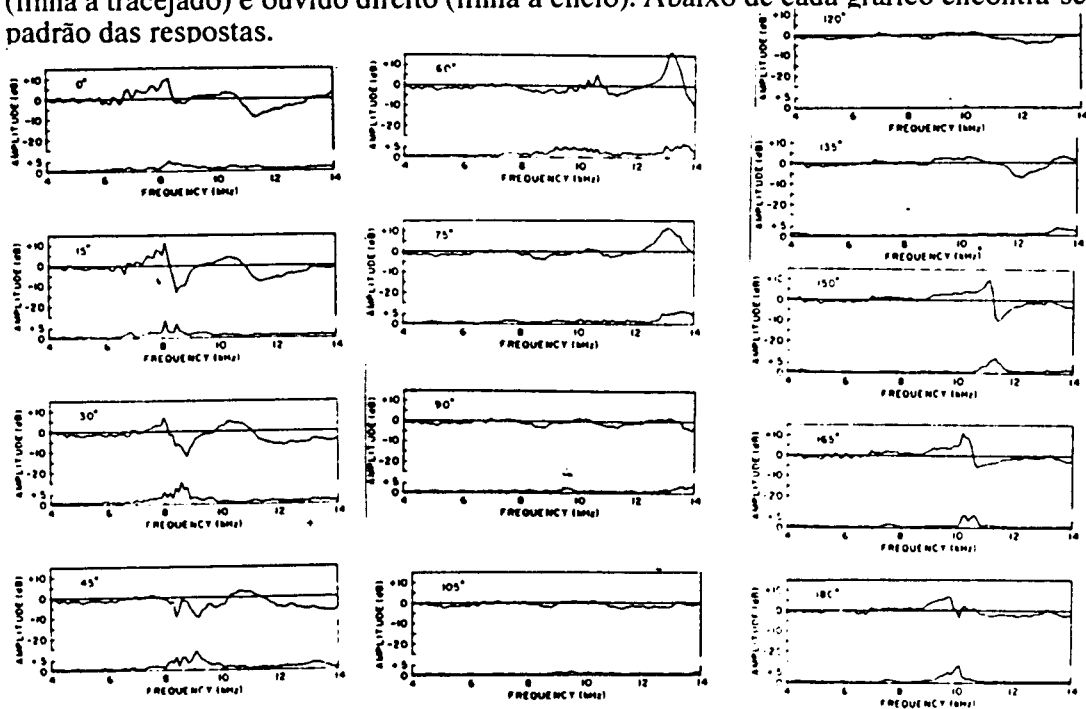


Fig. 1.48 - Razão média entre as respostas do ouvido esquerdo e direito. Abaixo de cada gráfico encontra-se o desvio padrão das respostas.

Foi também efectuada uma experiência para analisar a utilização das disparidades da aurícula. Foram medidos sinais de ruído branco em ambos os ouvidos e de seguida esses sinais foram apresentados através de auscultadores, num caso com os sinais medidos para o respectivo ouvido e noutro com a utilização do mesmo sinal para ambos os ouvidos. O resultado é que a localização monauricular provocou maiores erros. Butler e Belendiuk (1977), utilizando a técnica acima, efectuaram medições da função de transferência do ouvido do plano vertical. Para elevações 30°, -15°, 0°, 15° e 30°, com sinais de ruído com energia entre 4 a 9 KHz, verificaram a existência de uma depressão que descia nas frequências com o abaixamento da elevação da fonte. Numa experiência através de auscultadores, em que os indivíduos utilizavam os sinais medidos por outros, verificou-se que se obtia melhor desempenho com a utilização dos valores medidos em dois deles, sugerindo que algumas aurículas fornecem melhores procedimentos de localização, para o plano vertical, do que outras. Asano, Susuki e Sone (1990) também mediram as funções de transferência nos dois ouvidos em várias direcções e apresentaram-nas aos indivíduos através de auscultadores com bom desempenho e com precisão semelhante quando os indivíduos receberam as funções de transferência de outros.

Notando que a complexidade das funções de transferência era elevada, Asano, Susuki e Sone (1990) sugeriram que o sistema auditivo talvez não utilizasse toda essa informação. Para testar isso as funções foram simplificadas. A função de transferência do filtro utilizado foi

$$x(k) = \sum_{i=1}^n a_i x(k-i) + \sum_{i=0}^m b_i u(k-i)$$
$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i z^{-i}}{\sum_{i=0}^n a_i z^{-i}} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (1.29)$$

onde $u(k)$ é a entrada do modelo e $x(k)$ a saída. As ordens (m,n) dos potenciais $B(z)$ e $A(z)$ correspondem ao número de zeros e pólos da função de transferência, respectivamente, representado na transformada z . Os

coeficientes a_i e b_i são determinados de modo a minimizar a expressão quadrática,

$$E^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |H(\omega)A(\omega) - B(\omega)|^2 d\omega \quad (1.30)$$

onde

$$A(\omega) = A(z)|_{z=e^{j\omega}} \quad B(\omega) = B(z)|_{z=e^{j\omega}}$$

usando as respostas impulsivas medidas e as suas covariâncias. $H(\omega)$ é a função de transferência aproximada. A figura 1.49 apresenta o resultado da simplificação para vários valores de m, n . Para valores de $m=40, n=40$ foi obtido um desempenho semelhante ao obtido sem simplificação da expressão. Quando a ordem do modelo diminuiu até $m=10, n=10$ a taxa de confusões frente/trás aumentou, mantendo, no entanto, uma precisão aproximadamente constante na elevação. Deste modo, para a localização da elevação interessa apenas as características macroscópicas da função de transferência, picos e vales.

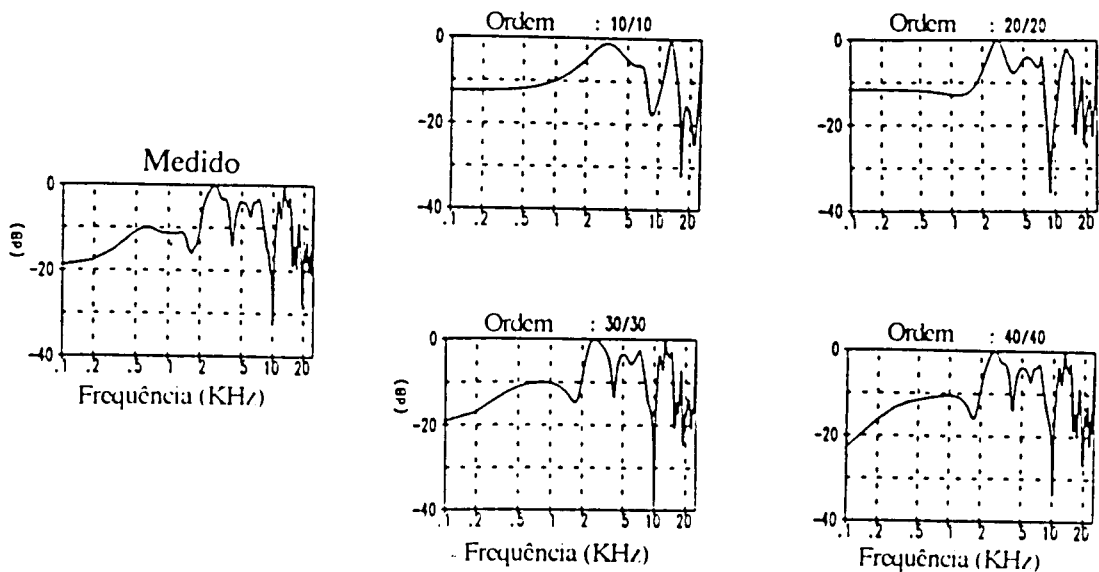


Fig 1.49 - Funções de transferência aproximadas para vários valores de simplificação.

1.5.3 Localização frente/trás

Estes procedimentos permitem a discriminação do quadrante frontal do quadrante posterior, ou seja, são os procedimentos de localização que permitem resolver as confusões frente/trás.

Como se verificou pela teoria do cone de confusão, as diferenças interauriculares não permitem discriminar as posições da frente das detrás do ouvinte. Por exemplo no plano horizontal, o azimute de 30° tem as mesmas diferenças interauriculares que o azimute de 150° , pois este último também faz um ângulo de 30° com o plano vertical médio, estando, no entanto, no quadrante posterior. Assim, teoricamente, para cada posição do quadrante frontal existe uma posição no quadrante posterior com as mesmas diferenças interauriculares. Deste modo, os procedimentos de localização necessários à discriminação frente/trás são fornecidos pelas variações espectrais provocadas principalmente pela aurícula, semelhantemente à localização da elevação no plano vertical.

Vários autores têm analisado o efeito do espectro complexo e a oclusão da aurícula nas inversões frente/trás (Burger, 1958; Musicant e Butler, 1984; Oldfield e Parker, 1984; Asano, Susuki e Sone, 1990; Middlebrooks, 1992). Na localização de sinais de banda estreita realizada por Middlebrooks (1992) para todo o espaço (ver figura 1.21) verifica-se a grande influência da redução da largura de banda na discriminação frente/trás, obtendo-se erros elevados, semelhantemente ao que acontecia com a localização da elevação. Musicant e Butler (1984) analisaram o plano horizontal, verificando que o número de inversões frente/trás aumentava fortemente quando se realizava a oclusão da aurícula ou se diminuía a largura de banda. A figura 1.50 apresenta esses resultados. Como se verifica pela figura, sem oclusão da aurícula, o espectro de banda larga tem um efeito semelhante que à banda acima de 4 KHz. Para estes dois casos, com oclusão da aurícula, o erro aumenta. Para a banda abaixo de 4 KHz ou 1 KHz é indiferente se a aurícula está ou não tapada. No entanto, as frequências entre 1 e 4 KHz servem para discriminação frente/trás, como se pode ver pelos gráficos de ruído passa-baixo de 4 KHz e 1 KHz, sugerindo a existência de alterações do espectro além das provocadas pela aurícula (por exemplo, difracção à volta do tronco). Numa experiência no plano vertical médio, Asano, Susuki e Sone (1990) mediram as funções de transferência do

ouvido e forneceram-nas de uma forma simplificada aos indivíduos (experiência apresentada na secção 1.5.2.3). Quando a simplificação da função de transferência foi realizada apenas para valores acima de 2 KHz, verificou-se que as confusões frente/trás se mantiveram aproximadamente iguais ao caso das funções naturais medidas mas simplificando abaixo deste valor provocava o aumento das inversões. Daqui se conclui que para uma correcta discriminação frente/trás, a forma espectral deve ser mantida abaixo de 2 KHz. Destes resultados, a discriminação frente/trás depende das variações macroscópicas do espectro às altas frequências e das variações microscópicas na região abaixo de 2 KHz.

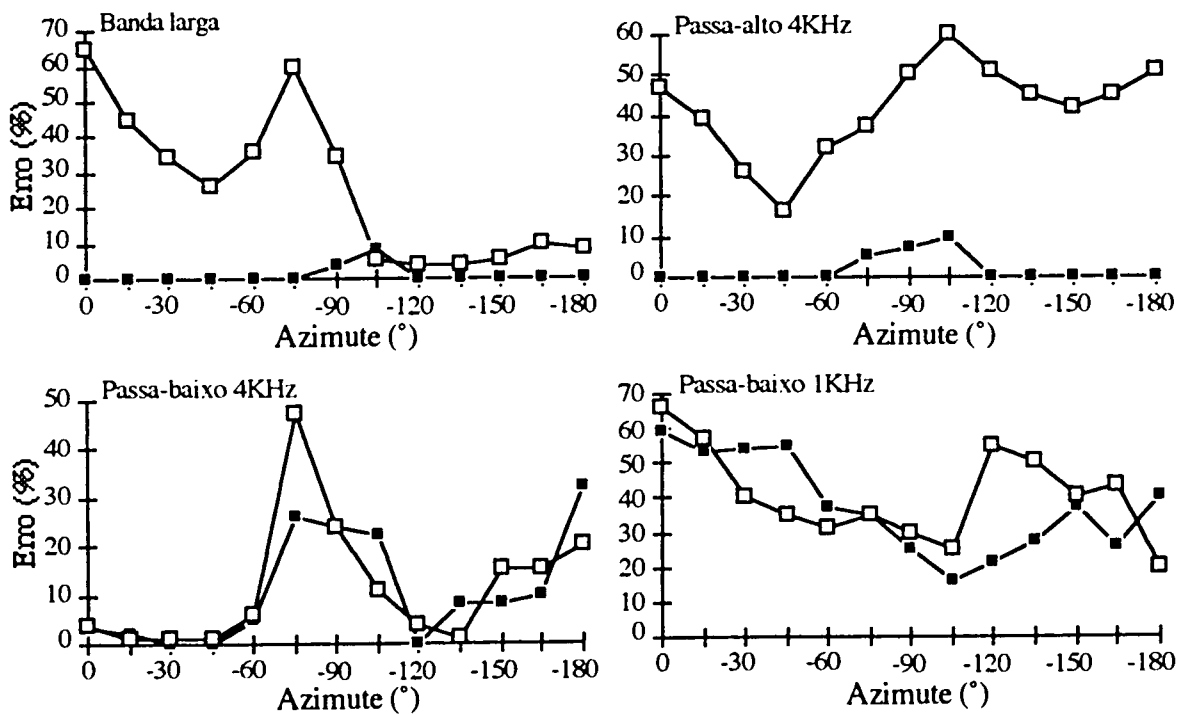


Fig. 1.50 - Inversões frente/trás para ruído: sem oclusão da aurícula - quadrados pretos; com oclusão da aurícula - quadrados brancos.

1.5.4 Localização no azimute e elevação

Nesta secção é pretendido fazer uma análise conjunta da localização de fontes sonoras em qualquer ponto do espaço. Anteriormente, a análise incidia principalmente nos dois planos principais, plano horizontal e plano vertical médio, uma vez que os procedimentos de localização usados no plano horizontal são predominantemente biauriculares, enquanto que os do plano

vertical médio são monauriculares. Mais recentemente, a investigação começou a analisar a localização para todo o espaço, pretendendo-se deste modo obter uma maior compreensão nos procedimentos de localização auditiva.

Foi demonstrado que quando os sinais eram fornecidos aos indivíduos através de auscultadores, a localização é muito semelhante à realizada no espaço livre se os sinais contiverem as alterações provocadas pelo sistema auditivo externo, ou seja, se os sinais emitidos forem obtidos no canal auditivo. Pretendendo analisar a diferença de tempo interauricular em vários pontos do espaço auditivo, Wightman e Kistler (1992) forneceram sinais de ruído Gaussiano medidos, mas alterando a diferença de tempo interauricular para um valor único para todas as fontes sonoras e mantendo, no entanto, todos os outros procedimentos obtidos naturalmente. Os exemplos de diferença de tempo interauricular utilizados foram os valores correspondentes aos azimutes de 0° , -45° e 90° . Para o caso de 0° , verificou-se que a imagem auditiva de todas as fontes aparecia no azimute 0° ou 180° , independentemente do azimute da fonte, enquanto que a elevação permanecia praticamente inalterada. Para o caso de 90° , o azimute também é praticamente determinado pela diferença de tempo interauricular, aparecendo a imagem auditiva de todas as fontes nesse azimute (notar que mesmo a fonte que produz uma diferença de intensidade interauricular mais forte, no azimute de -90° , é percebida em 90°). Quanto à elevação, verificou-se que as altas elevações foram percebidas em posições mais baixas. Para o caso de -45° também se verificou que o azimute percebido é -45° ou -135° e as elevações aparecem em valores intermédios entre o caso de 0° e 90° . Os resultados assim obtidos por Wightman e Kistler sugerem que o procedimento mais importante na localização espacial é a diferença de tempo interauricular. Quando o sinal fornecido só tinha espectro nas altas frequências, a imposição de uma diferença de tempo interauricular não produzia efeito, sendo neste caso a posição percebida a mesma que a da fonte sonora, havendo no entanto um aumento das inversões frente/trás. Estes resultados indicam que na ausência de baixas frequências, os procedimentos de localização são a diferença de intensidade interauricular e as variações espectrais. Para o espectro de banda larga, a diferença de tempo interauricular é o principal procedimento de localização, enquanto que a diferença de intensidade interauricular e os procedimentos espectrais têm um papel secundário. Este resultado é suportado pelas experiências de Butler e Humanski (1992) nas quais verificaram que na localização monauricular de

vertical médio são monauriculares. Mais recentemente, a investigação começou a analisar a localização para todo o espaço, pretendendo-se deste modo obter uma maior compreensão nos procedimentos de localização auditiva.

Foi demonstrado que quando os sinais eram fornecidos aos indivíduos através de auscultadores, a localização é muito semelhante à realizada no espaço livre se os sinais contiverem as alterações provocadas pelo sistema auditivo externo, ou seja, se os sinais emitidos forem obtidos no canal auditivo. Pretendendo analisar a diferença de tempo interauricular em vários pontos do espaço auditivo, Wightman e Kistler (1992) forneceram sinais de ruído Gaussiano medidos, mas alterando a diferença de tempo interauricular para um valor único para todas as fontes sonoras e mantendo, no entanto, todos os outros procedimentos obtidos naturalmente. Os exemplos de diferença de tempo interauricular utilizados foram os valores correspondentes aos azimutes de 0° , -45° e 90° . Para o caso de 0° , verificou-se que a imagem auditiva de todas as fontes aparecia no azimute 0° ou 180° , independentemente do azimute da fonte, enquanto que a elevação permanecia praticamente inalterada. Para o caso de 90° , o azimute também é praticamente determinado pela diferença de tempo interauricular, aparecendo a imagem auditiva de todas as fontes nesse azimute (notar que mesmo a fonte que produz uma diferença de intensidade interauricular mais forte, no azimute de -90° , é percebida em 90°). Quanto à elevação, verificou-se que as altas elevações foram percebidas em posições mais baixas. Para o caso de -45° também se verificou que o azimute percebido é -45° ou -135° e as elevações aparecem em valores intermédios entre o caso de 0° e 90° . Os resultados assim obtidos por Wightman e Kistler sugerem que o procedimento mais importante na localização espacial é a diferença de tempo interauricular. Quando o sinal fornecido só tinha espectro nas altas frequências, a imposição de uma diferença de tempo interauricular não produzia efeito, sendo neste caso a posição percebida a mesma que a da fonte sonora, havendo no entanto um aumento das inversões frente/trás. Estes resultados indicam que na ausência de baixas frequências, os procedimentos de localização são a diferença de intensidade interauricular e as variações espectrais. Para o espectro de banda larga, a diferença de tempo interauricular é o principal procedimento de localização, enquanto que a diferença de intensidade interauricular e os procedimentos espectrais têm um papel secundário. Este resultado é suportado pelas experiências de Butler e Humanski (1992) nas quais verificaram que na localização monauricular de

fontes sonoras no plano vertical lateral, a elevação era percebida em posições mais baixas que a da fonte (ver figura 1.46). Pelo contrário, quando era permitido a utilização das diferenças interauriculares, a fonte era percebida próximo da posição correcta.

Notando que os atrasos de grupo interauriculares variavam fortemente com a frequência (Mehrgardt e Mellert, 1977), Middlebrooks e Green (1990) obtiveram um mapa do atraso da envolvente interauricular para todo o espaço. Como já foi dito, quando é pretendido obter as funções de transferência do ouvido pode-se usar uma posição qualquer no canal auditivo, uma vez que a direccionalidade é praticamente independente dessa posição, mas o espectro é fortemente dependente da posição de medição no canal. Assim, uma vez que para o cálculo do atraso de grupo necessita-se das funções de transferência exactas, e para que as medidas sejam independentes da posição no canal do ouvido, foram obtidas duas funções: a função de transferência direccional, relacionada com a direcção da fonte sonora, e a função de transferência comum, comum a todas as posições das fontes e determinada pela posição de medida no canal. Deste modo, a resposta medida numa posição "x" do canal auditivo é

$$R(f,\theta,\phi,x) = S(f).D(f,\theta,\phi).C(f,x) \quad (1.31)$$

onde $S(f)$ é o espectro do sinal da fonte, $D(f,\theta,\phi)$ a função de transferência direccional e $C(f,x)$ a função de transferência comum. A estimativa da função de transferência comum é obtida pela média das outras funções e considerando como unitária a média da função direccional (que sendo a média de todas as direcções torna-se independente da direcção da fonte),

$$|C(f,x)|_{\text{estim}} = \frac{|R(f,x)|_{\text{média}}}{|S(f)|} \quad (1.32)$$

A estimativa da função de transferência direccional é

$$|D(f,\theta,\phi)|_{\text{estim}} = \frac{R(f,\theta,\phi,x)}{|S(f)|.|C(f,x)|_{\text{estim}}} \quad (1.33)$$

A fase da função de transferência comum é dividida em passa-tudo, $a_C(f,x)$, e fase mínima, $m_C(f,x)$. A estimativa da fase mínima é obtida com a

equação (1.20) da estimativa da função de transferência comum, sendo então a fase da função de transferência direccional dada por

$$\varphi_{\text{estimD}}(f, \theta, \phi) = \varphi_R(f, \theta, \phi, x) - \varphi_S(f) - m_{\text{estimC}}(f, x) \quad (1.34)$$

A partir das funções de transferência complexas dos dois ouvidos, obtidas como foi indicado acima, determinou-se o atraso da envolvente interauricular, eliminando-se a estrutura fina através de filtragem e efectuando-se a correlação cruzada das envolventes dos dois ouvidos. A figura 1.51 apresenta o resultado obtido aplicando a equação (1.8) (num meio não dispersivo os atrasos de fase e da envolvente são iguais). A figura 1.52 apresenta o atraso interauricular da envolvente medido por Middlebrooks e Green.

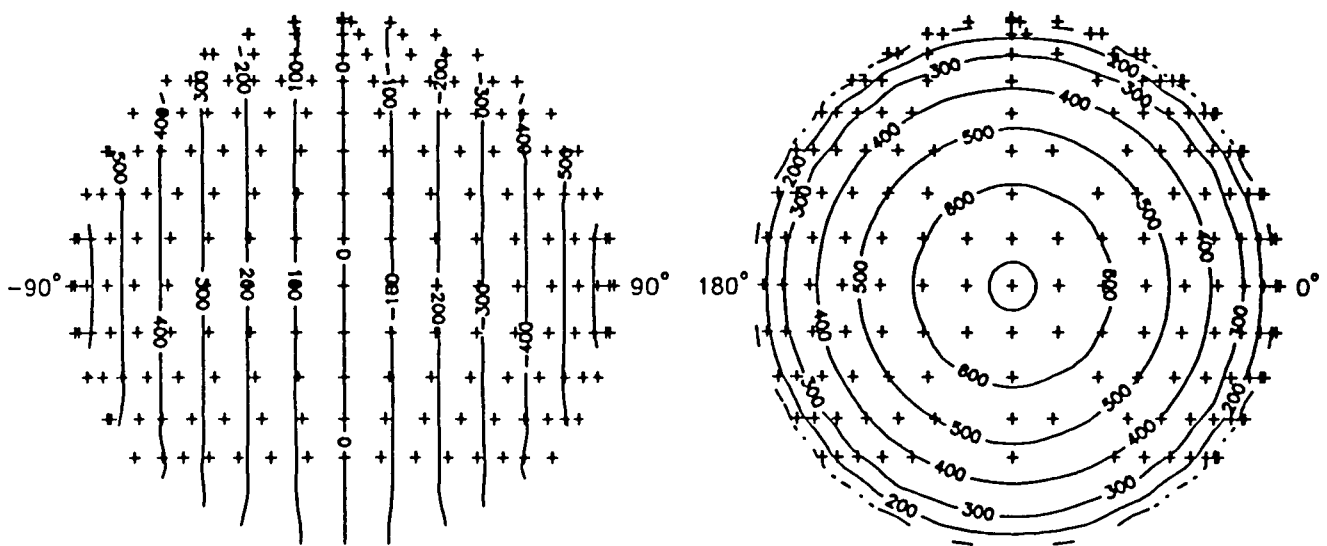


Fig. 1.51 - Atrazo no modelo da esfera rígida.

Localização de fontes sonoras

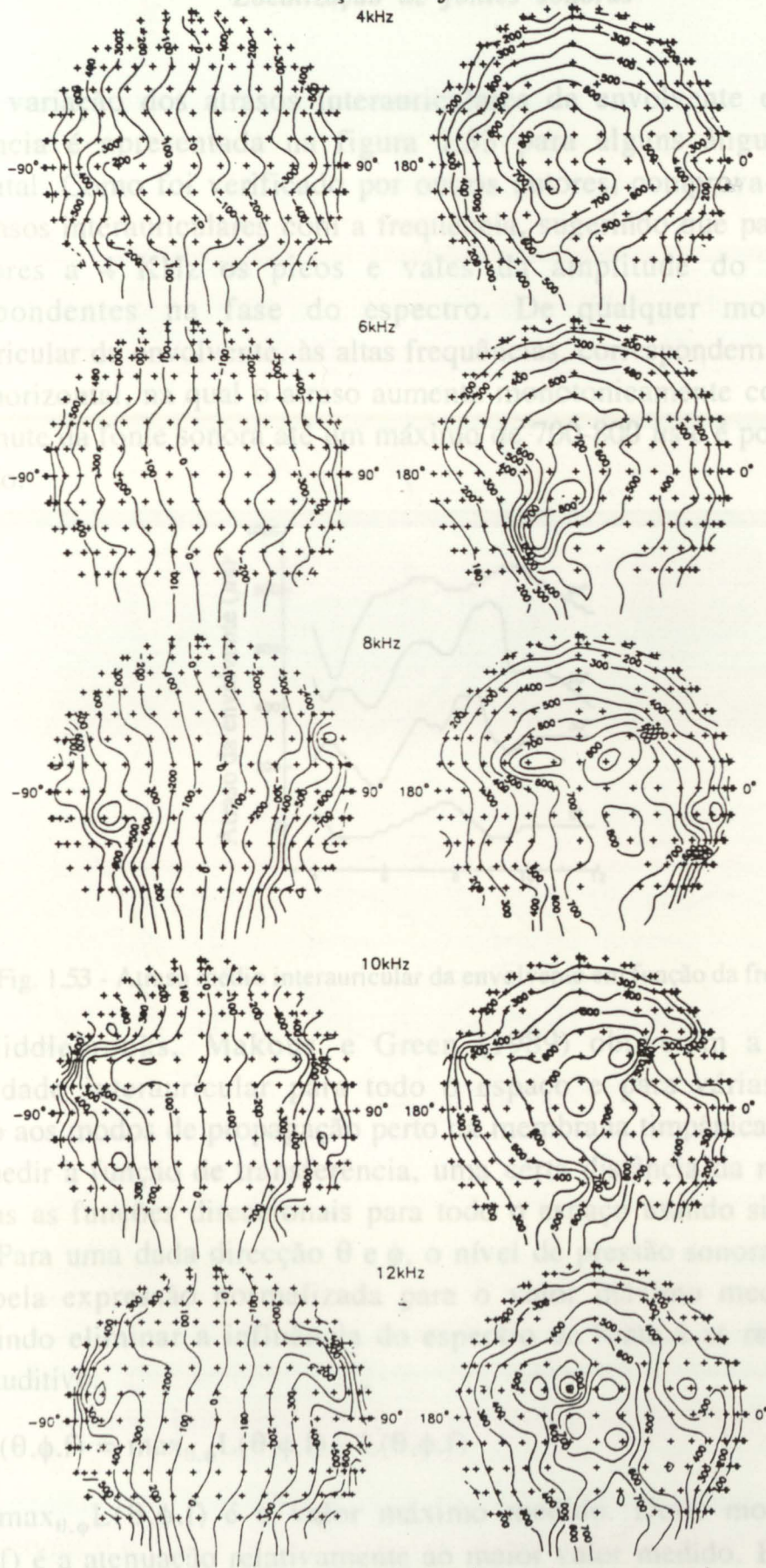


Fig. 1.52 - Atraso médio interauricular da envolvente para todo o espaço.

A variação dos atrasos interauriculares da envolvente em função da frequência é apresentada na figura 1.53 para alguns ângulos do plano horizontal. Como foi verificado por outros autores, comprova-se a variação dos atrasos interauriculares com a frequência, sugerindo que para frequência, superiores a 4 KHz os picos e vales da amplitude do espectro têm correspondentes na fase do espectro. De qualquer modo, o atraso interauricular da envolvente, às altas frequências, correspondem a posições do plano horizontal, na qual o atraso aumenta monotonicamente com o aumento do azimute da fonte sonora até um máximo de 700-800 μ s e é pouco sensível à elevação.

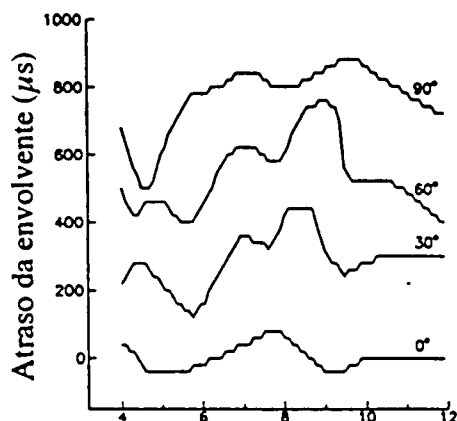


Fig. 1.53 - Atraso médio interauricular da envolvente em função da frequência.

Middlebrooks, Makous e Green (1989) obtiveram a diferença de intensidade interauricular para todo o espaço e para várias frequências. Devido aos modos de propagação perto da membrana timpânica foi escolhido, para medir a função de transferência, uma certa distância da mesma. Foram medidas as funções direccionais para todo o espaço usando sinais de banda larga. Para uma dada direcção θ e ϕ , o nível de pressão sonora direccional é dado pela expressão normalizada para o valor máximo medido (em dB) permitindo eliminar a influência do espectro da fonte e as ressonâncias do canal auditivo,

$$D(\theta, \phi, f) = \max_{\theta, \phi} L(\theta, \phi, f) - L(\theta, \phi, f) \quad (1.35)$$

onde $\max_{\theta, \phi} L(\theta, \phi, f)$ é o valor máximo medido. Deste modo, a função $D(\theta, \phi, f)$ é a atenuação relativamente ao maior valor medido. Exemplos para várias frequências é apresentado na figura 1.54. Os níveis direccionais

medidos são semelhantes entre os indivíduos. Contudo, os padrões de direccionalidade semelhante ocorrem em frequências ligeiramente diferentes para os diferentes indivíduos. As diferenças físicas da cabeça e ouvidos entre os vários indivíduos sugerem contribuições acústicas em diferentes frequências. Comparando com outros trabalhos, como Shaw (1974) e Mhergardt e Mellert (1977) no plano horizontal e Mehrgardt e Mellert (1977) no plano vertical médio, verifica-se uma boa concordância dos resultados obtidos para esses planos.

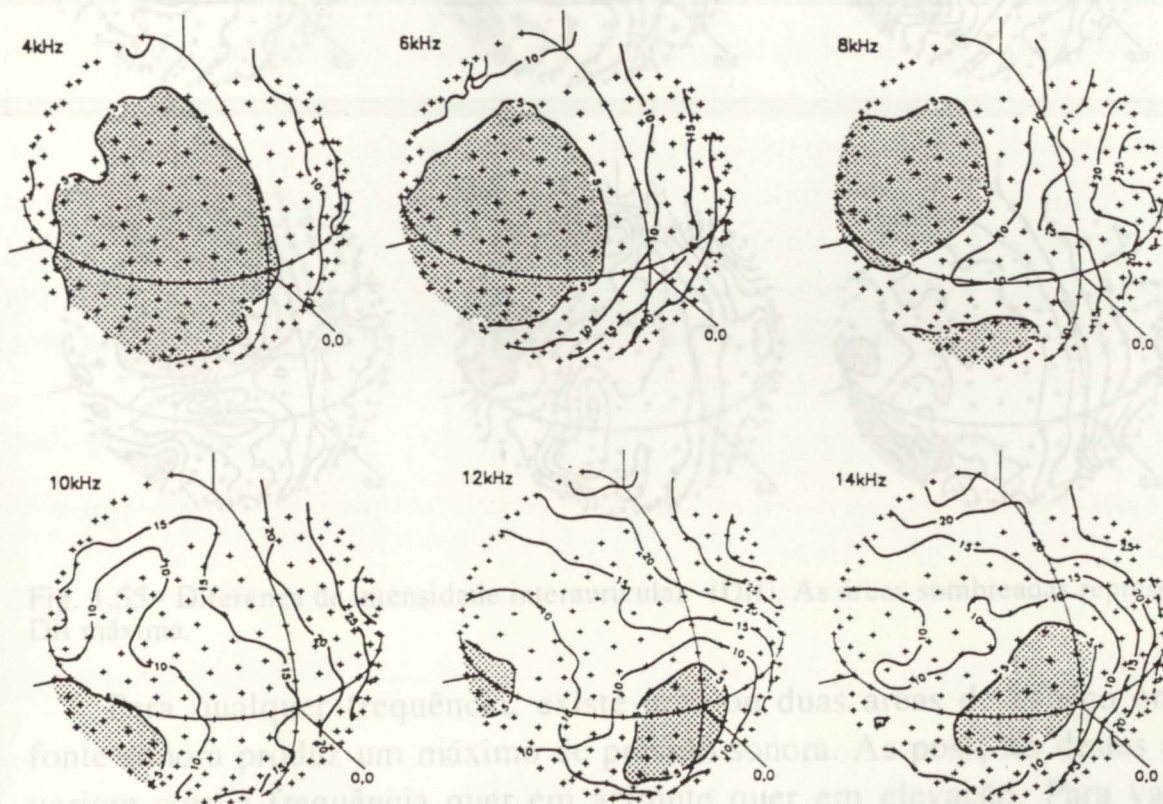


Fig. 1.54 - Medições médias efectuadas no ouvido direito de seis indivíduos. As cruces são os pontos onde se efectuaram as medidas e os contornos representam os valores de $D(\theta, \phi, f)$ em dB. A parte sombreada refere-se aos valores abaixo de 5 dB significando máximos da função.

Foi também medida a diferença de intensidade interauricular (DII) para todo o espaço, apresentado na figura 1.55, comparando os níveis de pressão entre os ouvidos. Em geral, as DIIs aumentam monotonamente com o aumento do azimute. Para frequências abaixo de 8 KHz, os contornos são aproximadamente paralelos à linha do plano vertical médio, logo, para um dado azimute a elevação é constante. Para frequências acima de 8 KHz, as DIIs variam quer com o azimute quer com a elevação. Alguns níveis de DII de 0

dB desviam-se consideravelmente da linha do plano vertical médio, sugerindo que as medidas direccionais nos dois ouvidos são assimétricas.

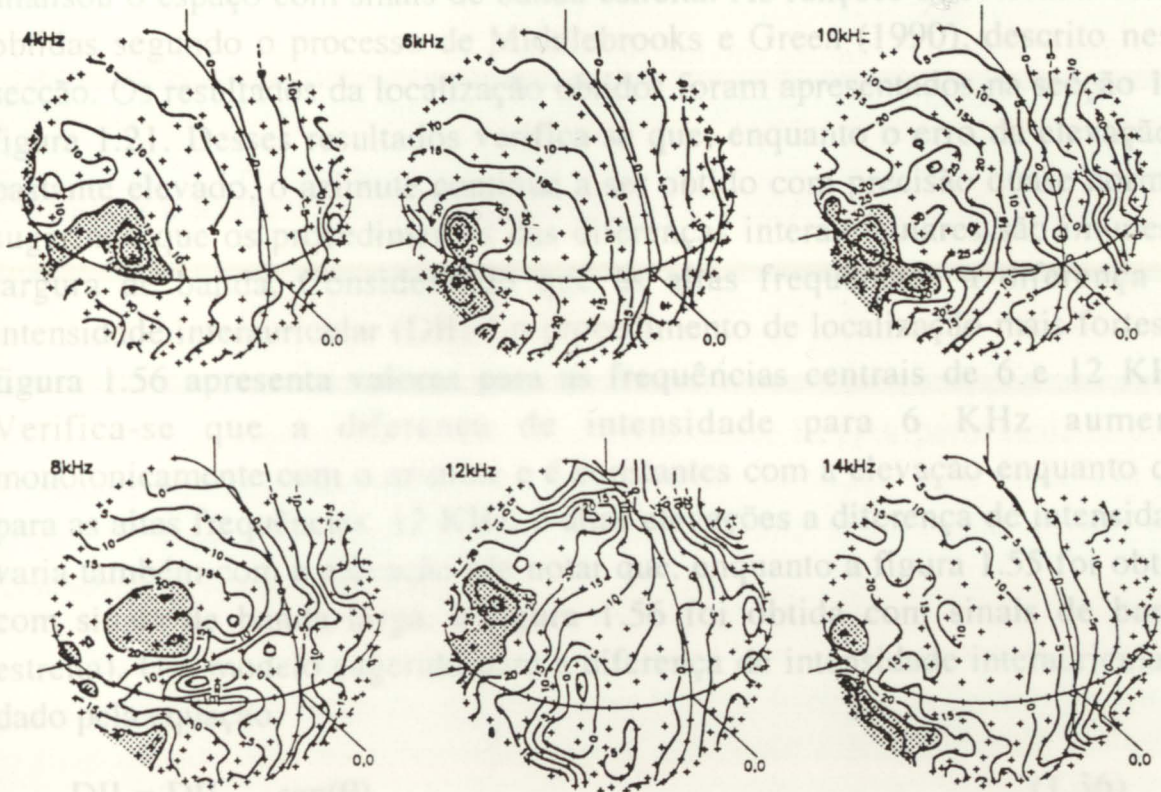


Fig. 1.55 - Diferença de intensidade interauricular (DII). As áreas sombreadas representam DII máxima.

Para qualquer frequência, existe uma ou duas áreas do espaço onde a fonte sonora produz um máximo de pressão sonora. As posições destas áreas variam com a frequência quer em azimute quer em elevação. Para valores abaixo de 8 KHz, verifica-se que os níveis de pressão são relativamente constantes com a elevação, enquanto que existe uma mudança dos níveis de pressão com a elevação a partir de 8 KHz, comprovando mais uma vez a necessidade de altas frequências para a localização vertical. A diferença de intensidade interauricular, considerada tradicionalmente como procedimento para o azimute, de facto cresce com o azimute e é constante na elevação para valores abaixo de 8 KHz. Contudo, para valores iguais e superiores a 8 KHz, a sua variação com a elevação, sugere que nas altas frequências fornece procedimentos de localização da elevação.

A percepção da distância é a habilidade do sistema auditivo determinar a distância que se encontra da fonte sonora. Comparativamente à determinação

Para identificar as contribuições relativas dos procedimentos das diferenças interauriculares e da forma espectral, Middlebrooks (1992) analisou o espaço com sinais de banda estreita. As funções direccionais foram obtidas segundo o processo de Middlebrooks e Green (1990), descrito nesta secção. Os resultados da localização obtidos foram apresentados na secção 1.4, figura 1.21. Desses resultados verifica-se que, enquanto o erro da elevação é bastante elevado, o azimute continua a ser obtido com precisão quase normal, sugerindo que os procedimentos das diferenças interauriculares são imunes à largura de banda. Considerando que às altas frequências a diferença de intensidade interauricular (DII) é o procedimento de localização mais fortes, a figura 1.56 apresenta valores para as frequências centrais de 6 e 12 KHz. Verifica-se que a diferença de intensidade para 6 KHz aumenta monotonicamente com o azimute e é constantes com a elevação enquanto que para as altas frequências, 12 KHz, e altas elevações a diferença de intensidade varia também com a elevação (de notar que, enquanto a figura 1.55 foi obtida com sinais de banda larga, a figura 1.56 foi obtida com sinais de banda estreita). Um modelo sugerido para a diferença de intensidade interauricular é dado pela equação

$$DII = DII_{\max} \text{sen}(\theta) \quad (1.36)$$

cujo valor médio para DII_{\max} dos resultados experimentais foi de 25 dB.

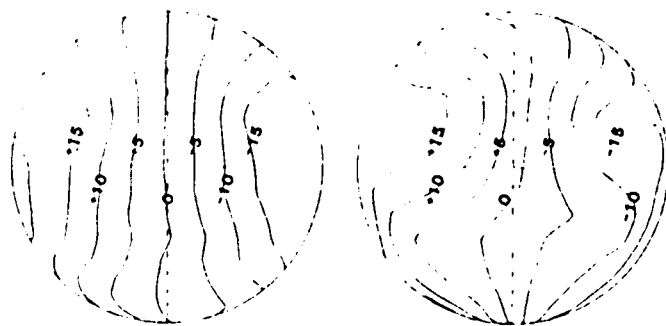


Fig. 1.56 - Diferença de intensidade interauricular (dB) para bandas de frequências (1/6 oitava) centradas em 6 KHz (esquerda) e 12 KHz (direita).

1.5.5 Percepção da distância

A percepção da distância é a habilidade do sistema auditivo determinar a distância que se encontra da fonte sonora. Comparativamente à determinação

da direção da fonte sonora, a determinação da distância é relativamente difícil se não existir alguma familiaridade com o sinal.

Começemos por determinar o campo sonoro gerado por uma fonte que radia ondas esféricas (ondas elementares), apresentado em Blauert (1983),

$$p(t,r) = \text{Re}\left\{K \frac{j2\pi f \rho_0}{r} e^{j2\pi ft} e^{-j2\pi r/\lambda}\right\}$$
$$v(t,r) = \text{Re}\left\{K \left(\frac{j2\pi/\lambda}{r} + \frac{1}{r^2}\right) e^{j2\pi ft} e^{-j2\pi r/\lambda}\right\} \quad (1.37)$$

sendo $p(t,r)$ a pressão sonora, $v(t,r)$ a velocidade, $\text{Re}\{\}$ a parte real. K uma contante, r a distância à fonte, λ o comprimento de onda e ρ_0 a densidade do meio. Existem três situações de distância à fonte sonora que devem ser consideradas em separado.

Em distâncias intermédias da fonte sonora (3 a 15 m) apenas os níveis de pressão sonora dos sinais de entrada dependem da distância da fonte, desde que o sinal radiado não varie. No espaço livre, a pressão sonora cai 6 dB por cada dobro da distância, segundo a lei $1/r$ como se verifica pelas equações (1.37). Para que os sinais indiquem a distância é necessário que a potência média não varie e que um nível de sinal seja conhecido para referência (Blauert, 1983; Moore, 1992). Muitas vezes estas condições não são conseguidas de modo que, se a distância se basear no nível de pressão dos sinais, existirão discrepâncias maiores para sinais não familiares. Para mais, o nível de pressão dos sinais de entrada nos ouvidos está relacionado não só com a distância da fonte mas também com a sonoridade e coloração tonal. Quando o nível de pressão sonora do sinal nos ouvidos é o único parâmetro de som disponível para formar a distância, então, o aumento da distância percebida varia menos que a distância da fonte.

A distâncias próximas da fonte (menos de 3 m) os efeitos da curvatura das frentes de onda que chegam ao indivíduo não podem ser desprezados e, deste modo, as distorções lineares dos sinais provocadas pela cabeça e ouvidos externos variam com a distância da fonte sonora. O nível de pressão sonora varia com a distância e a forma espectral dos sinais também varia. O sistema auditivo, além de avaliar o nível de pressão sonora, avalia também as

distorções do espectro dos sinais nesta gama de distâncias. Segundo Coleman (1968), o espectro frequencial pode realizar um duplo papel na percepção da distância, com um conteúdo de alta frequência indicando uma fonte sonora mais próxima para médias distâncias da fonte, mas significando uma fonte sonora mais distante quando a fonte está perto do indivíduo.

A maiores distâncias da fonte (acima de 15 m) o percurso entre a fonte e o indivíduo provoca distorções do sinal, embora a distância dependa ainda do nível de pressão sonora segundo a lei $1/r$. Existe, no entanto, uma atenuação adicional que depende do percurso e que varia com a frequência, sendo as altas frequências mais atenuadas que as baixas. Deste modo, não só a pressão sonora depende da distância da fonte mas também a forma espectral dos sinais. Da mesma forma que para médias distâncias, o espaço auditivo varia menos com a distância à fonte.

Existem, assim, um conjunto de possíveis procedimentos da percepção da distância no espaço livre. Em espaços fechados como salas com paredes reflectoras, a razão entre o som directo e o reflectido e o tempo de atraso entre ambos podem também fornecer procedimentos para a distância. Segundo Lehnert (1993), a percepção da distância é significativamente melhorada quando existem superfícies reflectoras, sendo possível que o mecanismo psico-acústico para detecção da distância se baseie nos padrões de reflexões.

1.5.6 Outros procedimentos de localização

Até aqui, a localização espacial de fontes sonoras tem-se baseado nos principais procedimentos avaliados pelo sistema auditivo utilizados para determinação da posição e distância da fonte. Existem outros que, embora com menos peso, contribuem para maior precisão da localização. Entre eles encontram-se principalmente os movimentos da cabeça e os procedimentos visuais, que serão analisados de seguida.

1.5.6.1 Movimentos da cabeça

Se o indivíduo for livre de movimentar a cabeça durante a acção de localização e se o sinal for suficientemente longo (200-300 ms), então os atributos monauriculares e binauriculares, analisados nas secções anteriores,

variarão com esse movimento. Os movimentos da cabeça permitem a obtenção de mais informação relativamente à posição da fonte como, por exemplo, colocá-la numa posição onde a localização seja mais precisa. Exemplificando um caso, Kock (1950) sugeriu como o movimento da cabeça explica o conhecimento de que se o som vem da frente ou detrás do ouvinte. Quando o ouvinte tem o som à frente e a cabeça é rodada, deve ser adicionado um atraso ao percurso de um ouvido para se recuperar a situação original e quando o som está atrás, o atraso deve ser adicionado ao outro percurso. Daqui e de resultados em Blauert (1983), retira-se que as mudanças nas diferenças interauriculares em conjunto com os movimentos da cabeça contribuem para a discriminação frente/trás.



Fig. 1.57 - Movimentos da cabeça utilizados na localização.

Segundo um modelo de Thurlow e Runge (1967), a figura 1.57 apresenta os três tipos de movimento da cabeça. Dos trabalhos indicados apresentados em Thurlow e Runge (1967) e Thurlow, Mangels e Runge (1967), os movimentos mais importantes foi o de rotação ou combinações deste com os outros. Foi verificado que os movimentos de rotação proporcionavam reduções significativas no número de erros da localização horizontal, quer para sinais de ruído de baixa ou alta frequência quer para estalidos. As confusões frente/trás foram também inferiores. Quanto à localização vertical, o melhoramento da precisão não foi significativa com a utilização dos movimentos da cabeça. Numa experiência realizada por Sorkin, Wightman, Kistler e Elvens (1989), e cujos sinais construídos digitalmente entre 200-7000 Hz foram apresentados através de auscultadores, foi comparado a precisão de localização entre o caso de se permitir os movimentos da cabeça e quando esta era mantida fixa. Verificou-se que a localização horizontal foi bastante melhor no caso em que era permitido o movimento da cabeça relativamente ao caso da cabeça fixa. Contudo, para a localização vertical, mais uma vez os movimentos tiveram pouco efeito. Os quatro sectores, frente-acima, frente-abaixo, atrás-acima e atrás-abaixo, podem ser distinguidos através da avaliação da direcção em que

as diferenças interauriculares mudam durante os movimentos de rotação e articulação.

As mudanças dos sinais sonoros que alcançam os ouvidos, devido aos movimentos da cabeça, fornecem informação acerca da posição da fonte que é utilizada pelo sistema auditivo em conjunção com os outros procedimentos de localização, como os visuais, para determinar a posição da imagem auditiva. Após os movimentos da cabeça, a imagem auditiva está normalmente na direcção da fonte sonora.

1.5.6.2 Visão

Tem-nos sido dadas várias indicações de que o sistema auditivo de localização utiliza os procedimentos visuais. Por exemplo, no cinema ou televisão, apesar do som estar localizado ao lado dos ecrans, os indivíduos percebem as vozes e sons nas posições do ecran onde são emitidos. Numa experiência apresentada por Blauert (1983), é usado um pseudofone (ver figura 1.58) em que dois microfones junto da cabeça tinham um desfasamento de um dado ângulo relativamente ao eixo dos ouvidos. Com os olhos fechados, os indivíduos percebiam o som fornecido pelo altifalante como proveniente do lado em que o microfone estava mais próximo, uma vez que a imagem foi deslocada pelo arranjo dos microfones. Contudo, quando os indivíduos tinham os olhos abertos, a imagem auditiva era percebida na direcção do altifalante. Deste modo, as experiências de localização têm sido realizadas com os olhos vendados para anular o procedimento da visão.

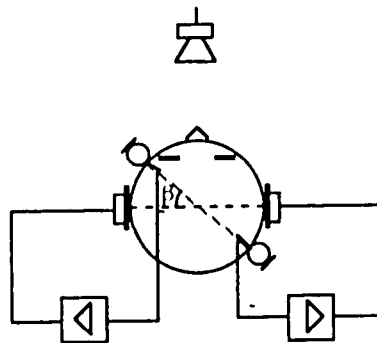


Fig. 1.58 - Arranjo pseudofônico.

Destas e de outras experiências, a interpretação dos procedimentos auditivos espaciais são bastante influenciados pela orientação da visão (Moore,

1992). Pressupõe-se, deste modo, que os níveis mais altos de representação espacial envolvem uma integração da informação de vários sentidos.

1.6 Localização de fontes múltiplas

Foi analisada a localização de fontes no espaço livre. No entanto, os sons percebidos no dia-a-dia dependem não só do sinal emitido pela fonte sonora mas também do ambiente que nos rodeia, ou seja, dos parâmetros ambientais, como características direccionais da fonte sonora, geometria, propriedades acústicas das superfícies que afectam o campo sonoro e propriedades de propagação do som. Nesta secção, o estudo efectuado considera a existência de várias fontes sonoras, entrando também o caso de localização em espaços fechados, na qual o sistema auditivo deve analisar os vários sinais que chegam aos ouvidos.

Podem surgir duas situações diferentes na localização de várias fontes. A primeira situação refere-se à localização de fontes sonoras num espaço onde existem reflexões do sinal emitido pela mesma ou várias fontes emitindo sinais semelhantes, sendo o primeiro caso em espaços fechados e o segundo quer em espaços fechados quer no espaço livre. A outra situação, que também pode ocorrer no espaço livre, consiste na existência de fontes emitindo sinais diferentes. Um modo de se comparar a similaridade entre dois sinais é através da função de correlação cruzada,

$$\Phi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau) dt}{\frac{1}{2T} \sqrt{\int_{-T}^T x^2(t) dt \int_{-T}^T y^2(t) dt}} \quad (1.38)$$

Se x e y forem coerentes, o máximo da função é o valor unitário. A primeira situação, indicada acima, consiste principalmente em componentes coerentes emitidos pelas fontes sonoras, enquanto que na outra os sinais apresentam valores máximos da equação (1.38) inferiores a 1. Quanto à formação de várias imagens, o sistema auditivo é capaz de reconhecer vários

padrões de atributos direccionais no mesmo par de sinais de entrada nos ouvidos.

1.6.1 Fontes que emitem sinais coerentes e efeito de precedência

No ambiente normal encontrado diariamente, o som emitido por uma dada fonte sonora alcança os dois ouvidos através de percursos diferentes. Além do som directo surgem reflexões que chegam em intervalos de tempo diferentes. Por exemplo, os sons numa sala são constituídos por várias componentes coerentes que chegam aos ouvidos, nas quais o som directo é seguido por várias reflexões que passam a reverberação. Contudo, os ouvintes continuam a reter a sua habilidade de localização de fontes em espaços fechados, apesar dos procedimentos direccionais estarem em conflito, ou seja, o indivíduo continua a conseguir localizar a fonte sonora em espaços reverberantes mesmo quando a energia total dos sinais reflectidos é superior à energia do sinal directo.

Consideremos o caso mais simples da existência de um sinal directo e uma reflexão que chegam aos dois ouvidos. Podem surgir três situações, dependendo do atraso do sinal reflectido relativamente ao directo:

- A imagem auditiva é formada pela contribuição conjunta do som directo e do som reflectido, em que Blauert (1983) designou por "summing localization". O tempo de atraso entre os dois sinais e a diferença de nível é muito pequeno, e encontra-se na gama de valores anteriormente encontrada para as diferenças interauriculares.

- A imagem auditiva aparece na posição do som directo, enquanto que a reflexão não contribui para essa posição. O atraso do som reflectido é superior a um valor de cerca de 1 ms. Este fenómeno é designado por efeito de precedência e que em Blauert (1983) e outros autores designaram como "lei da primeira forma de onda".

- Surgem duas imagens em que cada uma delas depende mais ou menos de cada uma das fontes. Neste caso, o tempo de atraso excede um dado limite, ou seja, o limite máximo que permite operar o efeito de precedência. Para um dado atraso temporal, o limite para o qual o ouvinte percebe a interferência da

reflexão com o som directo, depende da diferença de nível entre ambos os sons, sendo definida esta diferença de níveis como limite de mascaramento. Assim, quando o tempo de atraso aumenta, a imagem auditiva alarga e divide-se em duas, após o tempo de atraso ultrapassar o limite de operação do efeito de precedência. A segunda imagem designa-se por eco e deve-se ao som reflectido. O limite para o seu aparecimento depende do tipo de sinal, tempo de atraso e nível sonoro, em que o aumento de nível de som faz com que o tempo de atraso seja inferior.

No efeito de precedência, a detecção da posição da fonte sonora deve-se principalmente às diferenças interauriculares do som directo. Um exemplo que demonstra a afirmação consiste em tapar um dos ouvidos numa sala reverberante, tornando-se imediatamente mais aparente as características da sala (Moore, 1992). Koenig (1950) verificou que, quando usado o sistema biauricular em telefones (2 microfones com sinais para ambos os ouvidos), a habilidade de abafar a reverberação e o ruído de fundo era bastante notória relativamente ao sistema só com um microfone, isto é, o ouvinte percebia melhor a conversa sentindo o ruído de fundo num nível mais baixo.

Para análise do efeito de precedência, a investigação tem incidido principalmente na utilização de dois altifalantes colocados à mesma distância do ouvinte mas em azimutes opostos ao mesmo (Gardner, 1968; Blauert, 1983) ou apresentando os sinais para ambos os ouvidos através de auscultadores (Kock, 1950; Zurek, 1980; Yost e Soderquist, 1984; Saberi e Perrot, 1990). A figura 1.59 apresenta o caso de duas fontes sonoras em lados opostos ao ouvinte fornecendo o mesmo sinal, embora com um atraso entre eles. Se o atraso for nulo, a imagem auditiva surgirá no plano vertical médio. Se o atraso τ aumentar, a imagem auditiva move-se na direcção da outra fonte. Este efeito também é verificado se a atenuação de uma fonte aumentar. Quando o atraso τ ultrapassar um determinado valor, a imagem aparece na direcção da fonte mais próxima surgindo, assim, o efeito de precedência. O valor de τ , para operar o efeito de precedência, encontra-se em geral entre 1 e 50 ms (Gardner, 1968). Acima deste valor são percebidas duas imagens auditivas, nas posições das duas fontes.

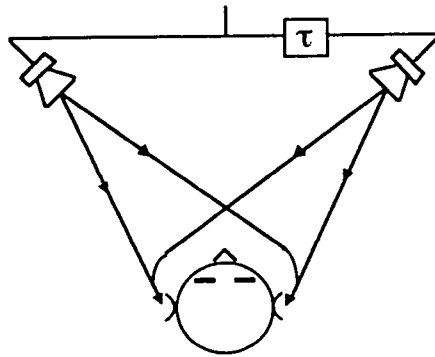


Fig. 1.59 - Sistema de dois alto-falantes para análise do efeito de precedência.

A figura 1.60 apresenta o modelo de sinais normalmente utilizado quando estes são fornecidos por auscultadores. O primeiro conjunto de impulsos pode existir ou não nas experiências, servindo de referência e aparecendo no plano vertical médio. O segundo conjunto de impulsos está bastante afastado do primeiro.

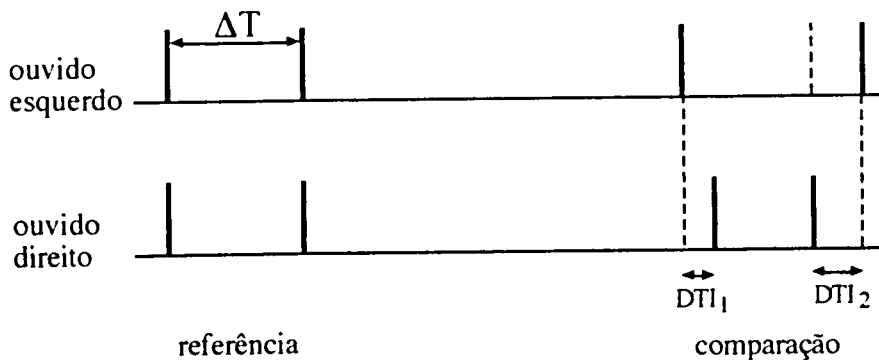


Fig. 1.60 - Modelo para análise do efeito de precedências através de auscultadores.

Yost e Soderquist (1984), utilizando um valor de ΔT igual a 1 ms e com pares de estalidos, obtiveram um valor de DTI_2 em função de DTI_1 que permitia uma imagem centrada no plano vertical médio. Notar que o primeiro impulso conduz a imagem para a esquerda, enquanto que o segundo conduz para a direita. Desta experiência foi encontrada uma relação de DTI_2/DTI_1 de cerca de 6:1 a 8:1 para valores de DTI_2 até 800 μs . Verifica-se a importância da primeira informação que chega aos dois ouvidos para a decisão da lateralização. Saberi e Perrot (1990) fizeram um estudo utilizando auscultadores e o modelo da figura 1.60, com pares de estalidos. O valor de DTI_1 foi nulo e obteve-se uma relação entre ΔT e DTI_2 . A figura 1.61 apresenta os resultados do limite para o qual o segundo conjunto de impulsos

era percebido à direita ou à esquerda do primeiro conjunto. Para valores de ΔT inferiores a 1 ms e maiores que 5 ms, os valores de DTI_2 são pequenos e à volta de 25-45 μs . Contudo entre 1 e 5 ms, os limites aumentam fortemente indicando a zona onde opera o efeito de precedência. Os resultados das várias experiências sugerem ainda que o efeito do segundo par de estalidos não é cancelado pelo efeito do primeiro, como foi também verificado por Zurek (1980), mas que a sensibilidade às diferenças de tempo do segundo impulso é reduzida após a apresentação do primeiro.

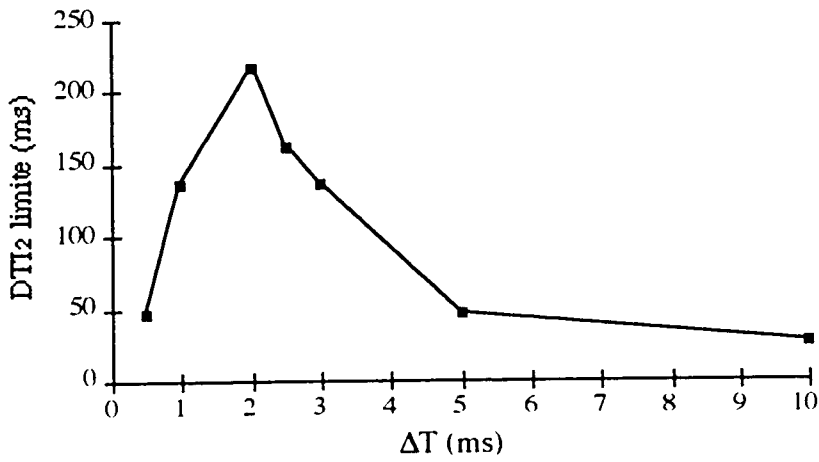


Fig. 1.61 - Valores de IDT_2 que conduzem ao deslocamento da imagem auditiva.

Alguns resultados de valores limites para o efeito de precedência são apresentados por Blauert (1983), para vários sinais apresentados por auscultadores. Para estalidos é de 2-5 ms, voz em 20 ms, sinusoides de 0,25 KHz e 0,5 KHz de 5-12 ms, ruído passa-baixo e passa-alto (1 KHz de frequência de corte) entre 6-22 ms e 5-16 ms, respectivamente. O limite aumenta com a diminuição do nível do sinal e com a duração do sinal e as components de alta frequência conduzem a menores atrasos que as de baixa. Shin-Cunningham, Zurek e Durlach (1993) apresentam um modelo que sumariza as medidas de ajustamento e discriminação do efeito de precedência para sinais de banda larga, breves, apresentados por auscultadores, comprovando os resultados já indicados para este tipo de sinal.

Enquanto que as experiências anteriores, para estudo do efeito de precedência, baseiam-se na utilização de pares de altifalantes ou auscultadores, Hartmann (1983) analisou a localização de fontes no plano horizontal em salas, tendo em conta a geometria, a absorção das paredes e para vários tipos de

sinais. A localização de impulsos sinusoidais era praticamente independente do tempo de reverberação da sala, embora dependente da geometria. Foi muito difícil a localização de sinusoides de baixa frequência e menos difícil para sinusoides de alta frequência. Para sinais de ruído de banda larga, a localização foi bastante afectada pelo aumento da reverberação. O efeito de precedência não excluiu completamente as reflexões verificando-se que, as reflexões que eram provenientes da mesma direcção que o som directo reforçavam o sentido de localização, enquanto que as reflexões laterais dificultavam a localização da fonte. Rakerd e Hartmann (1985,1986) obtiveram mais alguns resultados, verificando que as reflexões que mais influenciavam a localização em salas eram as provenientes das paredes comparativamente às do tecto ou chão, logo as reflexões laterais.

Comparando impulsos que têm início de sinal lento com os que têm rápido verificou-se que o desempenho da localização era favorecida pelos transitórios rápidos. Um rápido início de sinal, que já no espaço livre contribuía para a localização, contribui fortemente para a localização em salas uma vez que permite operar o efeito de precedência. Este é máximo para inícios de sinais instantâneos e diminui com o aumento da duração do início do sinal dependendo do tempo de atraso das reflexões da sala (por exemplo, para atrasos de 1,5 ms, o efeito diminui para valores acima de 5 ms de duração do transitório e para 9 ms, o efeito diminui a partir de 500 ms de transitório).

Foi ainda verificado a importância da diferença de intensidade interauricular além da diferença de tempo, na localização nas baixas frequências. Este efeito não foi verificado no espaço livre onde estas diferenças eram mínimas, enquanto que numa sala a interferência entre as reflexões e o som directo provocam diferenças elevadas de intensidade que afectam a localização da fonte.

Giguere e Abel (1993), analisando em salas fontes no plano horizontal em sinais com largura de banda de 1/3 oitava, verificaram que a maior precisão de localização é obtida em azimutes à volta de 0° e decresce com o aumento do azimute (como já acontecia para o espaço livre). Aumentando o tempo de reverberação da sala, a precisão diminuía. A mudança do tempo de subida/descida tinha pouco efeito no desempenho da localização acima de 500 Hz e abaixo deste valor o desempenho aumentava com a diminuição do tempo

de subida/descida. A figura 1.62 apresenta a precisão total para o caso de paredes absorventes e reverberantes para várias frequências centrais (fontes entre -90° e 90° : fila frontal e fontes entre 0° e 180° : fila lateral). Os resultados sugerem mais uma vez que o efeito de precedência não é completamente eficaz em salas.

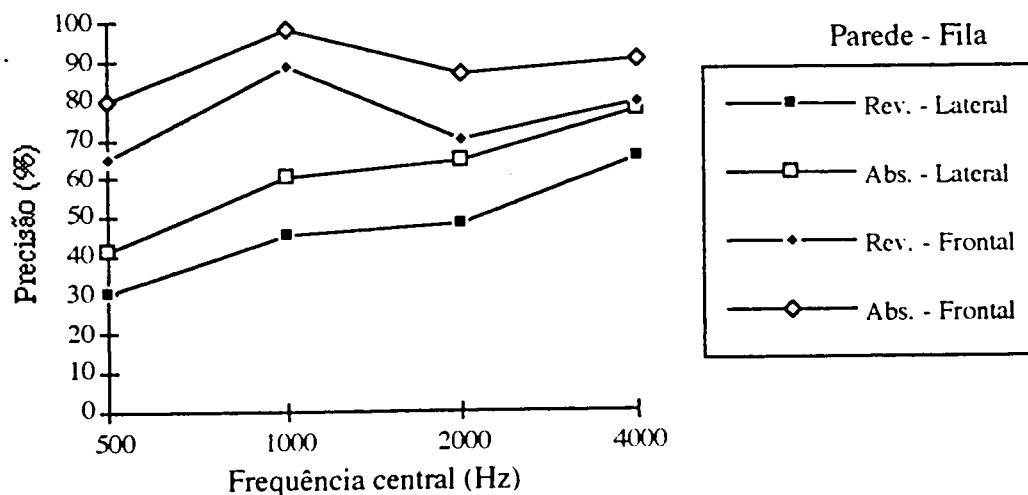


Fig. 1.62 - Precisão de localização em função da posição no espaço e reverberação.

O efeito de precedência sugeriu desde há muito tempo a existência de um mecanismo, do sistema auditivo, de inibição no qual o primeiro impulso tem mais peso na percepção da localização da fonte, enquanto que a sensibilidade às diferenças interauriculares das reflexões é bastante pequena (Zurek, 1980). Esta teoria mostrou não explicar completamente o efeito de precedência. Por exemplo, depois de muitas sessões de apresentação de sinais aos ouvintes, Saberi e Perrot (1990) encontraram que os valores elevados de DIT_2 , obtidos na experiência já analisada atrás, diminuíram, sugerindo que o efeito de precedência pode estar relacionado com o processo pelo qual o sistema nervoso utiliza a informação, podendo a informação do eco ser incorporada na imagem auditiva e não suprimida. Rakerd e Hartmann (1985) suplementam o modelo de inibição através da designada "hipótese de plausibilidade". Os ouvintes não conseguem compensar completamente as reflexões das salas e, assim, após o processo de inibição, os procedimentos direccionais são analisados pela plausibilidade, isto é, o procedimento da diferença de tempo interauricular é pesado pelos ouvintes de acordo com a sua plausibilidade, efectuada pelo processo subconsciente para a decisão da localização. Aos procedimentos não plausíveis são atribuídos menores pesos. A hipótese de

plausibilidade é importante quando existe informação visual anterior da posição da fonte. É interessante notar que a plausibilidade foi formulada para a diferença de tempo interauricular e não para a diferença de intensidade interauricular, o que foi confirmado por experiências. Uma delas, apresentada por Hartmann (1993), baseou-se na localização de várias fontes no plano horizontal numa câmara anecóica e utilizando um sinal sinusoidal de 500 Hz. Os sinais foram entregues aos ouvintes através de auscultadores, sinais esses previamente gravados nessa mesma câmara, o que permitiu manter a diferença de tempo interauricular. A diferença de intensidade pode assim ser alterada como pretendido e foi colocada a 0 dB, 5 dB, 10 dB, 15 dB e 20 dB. O resultado demonstrou que os ouvintes desprezaram a informação da diferença de intensidade até 10 dB (de notar que 5 dB chega para mover a imagem auditiva da sinusoide para um dos lados do indivíduo). Para 15 e 20 dB, houve uma mudança brusca na posição da imagem auditiva sendo agora bastante afectada pela diferença de intensidade. De acordo com a hipótese de plausibilidade, as diferenças interauriculares implausíveis são ignoradas. Nesta experiência verificou-se o oposto, a diferença de intensidade mais baixa é que foi ignorada, enquanto que a implausível foi efectiva para a formação da imagem auditiva.

Até aqui, tem sido analisado o efeito de precedência no plano horizontal. No entanto, também se pode colocar se este efeito funciona no plano vertical médio e, uma vez que não existem diferenças interauriculares importantes, este efeito deverá funcionar com os procedimentos de localização deste plano. Foi verificado (Hartmann, 1993) que o efeito de precedência opera igualmente no plano vertical não necessitando, deste modo, das diferenças interauriculares.

É notória a importância do efeito de precedência na localização em certos ambientes no qual, sem ele, a audição seria bastante confusa. Existem, no entanto, casos em que ele é uma desvantagem. Por exemplo na reprodução estereofónica o ouvinte obtém a imagem auditiva entre os altifalantes mas se ele estiver mais perto de um dos altifalantes e o atraso entre eles for superior a 1 ms, o efeito de precedência opera, sendo ouvido o som do altifalante mais próximo.

1.6.2 Fontes que emitem sinais não coerentes e efeito "cocktail party"

No caso de sinais não coerentes, estes podem ser provenientes de diferentes fontes sonoras, fornecendo sinais diferentes ou sinais que sofreram, distorção tornando-se incoerentes com o sinal original. Considerando

$$k = \max_{\tau} |\Phi_{xy}(\tau)| \quad (1.39)$$

sendo $\Phi_{xy}(\tau)$ a equação (1.38), os sinais são não coerentes quando $0 \leq k < 1$.

O sistema auditivo decompõe os sinais de entrada nos dois ouvidos em componentes coerentes (ou parcialmente coerentes) e outras incoerentes. A imagem auditiva é formada pelas componentes coerentes enquanto que as incoerentes dificultam a localização da fonte sonora. As componentes incoerentes podem conduzir a imagens diferentes em várias posições do espaço. Assim, dependendo das condições acústicas, em vez de uma imagem auditiva podem surgir múltiplas imagens em diferentes condições devendo-se, por exemplo (Blauert e Lindemann, 1986), quando se modifica um sinal de banda larga de modo a conter diferentes diferenças interauriculares em diferentes bandas de frequências embora também possam surgir outras situações (Dye, 1990). As imagens auditivas podem ainda ter uma extensão espacial designada por vastidão auditiva ("auditory spaciousness") que pode ocorrer quando as diferenças interauriculares variam tão rapidamente que o sistema auditivo não pode seguir com detalhe essa alteração. Das experiências efectuadas por Blauert e Lindemann (1986), com sinais não coerentes apresentados por auscultadores a ambos os ouvidos, verificou-se que se $k=1$ a imagem auditiva encontrava-se centrada na cabeça e para $k=0$ apareciam duas imagens, uma em cada ouvido. Também verificaram que a quantidade de alargamento da imagem auditiva para sinais de banda estreita diminuía com o aumento da frequência central. Este efeito pode ser atribuído ao volume sonora que é inversamente relacionado com a frequência (Perrot e Buell, 1982).

Uma situação que nos surge diariamente é quando existem várias pessoas a falarem ao mesmo tempo. Contudo, um dado ouvinte consegue focar a atenção em apenas uma dada pessoa que está a falar, no meio de várias vozes e mesmo sem se virar directamente para essa pessoa. Este fenómeno

psico-acústico foi designado na literatura por "cocktail party" e deve-se ao facto de que um sinal com uma determinada direcção é menos mascarado, por um outro não desejado de outra direcção, quando os indivíduos ouvem biauriculamente do que se ouvissem monauricularmente (Blauert, 1983; Moore, 1992), ou seja, o limite de mascaramento é inferior na situação biauricular. No caso da voz, esse limite é o de inteligibilidade da mesma. O limite de mascaramento de um dado sinal S é o nível do sinal para o qual é perceptível na presença do ruído N. A diferença entre o limite de mascaramento da apresentação monauricular e da apresentação biauricular é designada em Blauert(1983) por diferença de nível de mascaramento biauricular (em dB). Quando as diferenças interauriculares do sinal não são iguais às do sinal mascarador, a nossa habilidade de detectar ou identificar os sinais é melhorada relativamente ao caso em que ambos os sinais têm a mesma relação de diferenças interauriculares. Tais situações ocorrem na realidade quando ambas as fontes sonoras (sinal a detectar e mascarador) estão em posições diferentes.

Seja a seguinte terminologia:

S - sinal a detectar

N - sinal de ruído

m - apresentação monauricular

0 - diferença de fase interauricular de 0°

π - diferença de fase interauricular de 180°

u - apresentação de sinais não correlacionados aos dos ouvidos

Existem quatro situações em que fornecem o mesmo limite de referência: N_0S_0 , N_mS_m , N_uS_m e $N_\pi S_\pi$. A figura 1.63 apresenta alguns valores fornecidos por Moore (1992) de diferença de nível de mascaramento interauricular (DNMI), , relativamente ao limite de referência acima para mascaradores de banda larga e sinais de baixa frequência.

Os maiores efeitos do DNMI são encontrados para as baixas frequências. Para sinais mascaradores de banda larga e frequências do sinal a detectar acima de 1500 Hz, as DNMI têm valores de 2-3 dB. Para os mascaradores de banda larga, nem todas as componentes frequenciais são efectivas para o mascaramento mas apenas aquelas se encontram à volta da banda crítica da

frequência do sinal. Outro factor que melhora a detecção de sinais são as condições de oposição de fase entre o mascarador e o sinal a detectar.

Condições interauriculares	DNMI (dB)
$N_u S_\pi$	3
$N_u S_0$	4
$N_\pi S_m$	6
$N_0 S_m$	9
$N_\pi S_0$	13
$N_0 S_\pi$	15

Fig. 1.63 - Diferença de nível de mascaramento interauricular para várias relações de sinal e mascarador.

1.6.3 Impressão espacial

A imagem auditiva percebida por um indivíduo, além de incluir as características direccionais da fonte, contém as características geométricas e acústicas do ambiente que rodeia o indivíduo. Num espaço reverberante, o indivíduo consegue espontaneamente obter uma ideia do tamanho, tipo e propriedades desse espaço através do som provocado pelas fontes sonoras. Este efeito é designado por impressão espacial. Para obtenção deste efeito são importantes as reflexões laterais realizadas nos espaços fechados. O efeito psico-acústico destas reflexões é o alargamento espacial da imagem auditiva, havendo a impressão de se estar num espaço tridimensional. Este efeito tem uma grande importância nas salas de espectáculos, impondo geometrias especiais para as mesmas.

Os principais atributos da impressão espacial auditiva são a vastidão auditiva ("spaciousness") e a reverberância (Lehnert, 1993). A "vastidão auditiva" consiste no alargamento da imagem, influenciado principalmente pelas reflexões laterais iniciais (abaixo de cerca de 80 ms). A reverberância deve-se principalmente às reflexões tardias e à reverberação. Um efeito da reverberação é aumentar a distância das imagens auditivas. Assim, como as primeiras reflexões são também as mais intensas, estas são as principais responsáveis pela impressão espacial. A análise efectuada em seguida, embora

continue a utilizar o termo impressão espacial, pretenderá obter os principais atributos que provocam "vastidão auditiva".

Algumas experiências para produção da impressão espacial usaram uma ou mais reflexões para verificação da extensão do efeito de impressão espacial. Barron (1971), utilizando uma reflexão e um sinal directo fornecidos através de altifalantes numa câmara anecóica, obteve o resultado apresentado na figura 1.64. Nessa figura é apresentada a zona onde é sentida a impressão espacial e ainda o limite para ocorrência de eco ou mudança da imagem auditiva. O aumento do nível da reflexão provocava o aumento da impressão espacial. Barron e Marshal (1981) utilizaram duas reflexões, em azimutes opostos ao ouvinte, verificaram que o grau de impressão espacial era constante para atrasos das reflexões laterais desde 5 a 80 ms relativamente ao som directo. Quanto à direcção, a impressão espacial foi superior quando as reflexões eram provenientes das partes laterais ao indivíduo, enquanto que as da frente não tinham efeito na criação de impressão espacial. A contribuição da energia lateral para esse efeito pode ser obtida pela expressão $\sum r(t) \cdot \cos\beta$, sendo r a energia de reflexão e $\cos\beta = |\sin\theta| \cos\phi$.

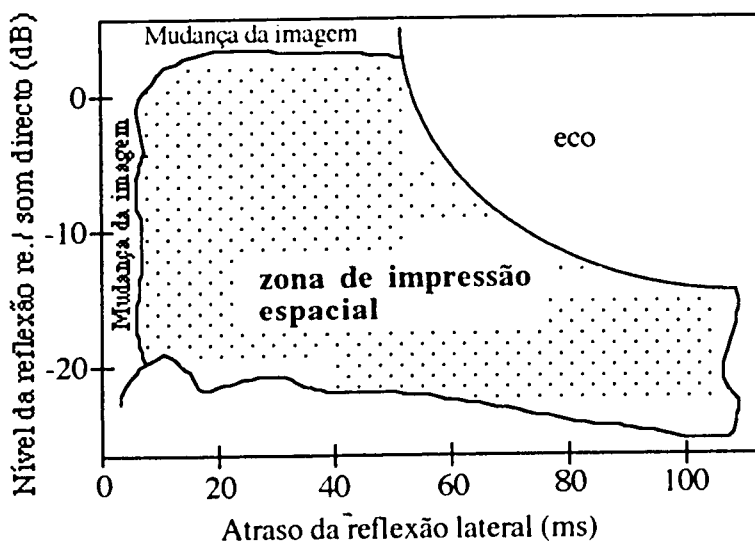


Fig. 1.64 - Região de impressão espacial quando existe o som directo e uma reflexão lateral.

Se os sinais que entram nos dois ouvidos forem não coerentes, eles podem conduzir a impressão espacial. Se os sinais emitidos por fontes forem coerentes, isto não significa que os sinais nos ouvidos sejam coerentes. Sinais emitidos coerentes podem causar sinais não coerentes na entrada dos ouvidos,

a não ser que as fontes se encontrem em posições simétricas relativamente ao plano vertical médio ou apresentado através de auscultadores, como aconteceu na secção 1.6.1. Como foi verificado por vários autores (Barron, 1971; Barron e Marshall, 1981; Blauert, 1983), a impressão espacial é proporcional ao grau de incoerência interauricular, $1-k$, sendo k a equação 1.39, que por sua vez também é proporcional à designada fracção de energia lateral,

$$E_{lat} = \frac{\sum_{t=5 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} r(t) \cos \beta}{\sum_{t=0 \text{ ms}} r(t)} \quad (1.40)$$

com a função $r(t)$ do denominador a incluir também energia directa além da energia das reflexões.

Quanto à frequência, Barron e Marshall (1981) consideram que a energia de baixa frequência é a mais importante para criação de impressão espacial, enquanto que Blauert e Lindeman (1986b) mostram que todas as componentes espectrais contribuem para este efeito, com as componentes de baixa frequência (abaixo de 3 KHz) expandindo a imagem auditiva em profundidade (extensão frente/trás) e as componentes de alta frequência a causarem alargamento da imagem auditiva. Mais tarde, Morimoto e Maekawa (1988), utilizando três altifalantes (um ao centro e dois em azimutes simétricos) a fornecerem sinais não coerentes, analisaram o efeito das baixas frequências utilizando bandas de ruído branco. Os resultados indicam a grande importância das componentes abaixo de 200 Hz para aumento da impressão espacial.

1.7 Aplicações

A realização de algumas aplicações diz respeito à elaboração de sistemas capazes de simularem a realidade sonora que nos rodeia, principalmente o que diz respeito à simulação de fontes sonoras em pontos do espaço. Estes têm sido criados para apresentação por filas de altifalantes ou através de auscultadores. Este último tem sido bastante explorado, uma vez que permite o controlo completo dos sinais acústicos entregues aos dois ouvidos.

Enquanto que a modelização das diferenças interauriculares, permitindo a simulação no plano horizontal, é relativamente simples, o mesmo não acontece com os detalhes espectrais necessários à localização do plano vertical e discriminação frente/trás. Deste modo, grande parte dos sistemas para simulação do sistema auditivo baseiam-se nas funções de transferência dos ouvidos, uma vez que estas contêm toda a informação referente às características direccionais e ambientais obtidas no tímpano. A componente de fase das funções contém o procedimento de tempo interauricular e a componente de amplitude codifica a diferença de intensidade interauricular e os procedimentos espectrais. Contudo, estas funções, que se baseiam apenas em medidas acústicas em posições discretas, requerem uma grande quantidade de informação quando se necessita simular todo o espaço auditivo e para mais dizem respeito a um dado indivíduo. Analisando a situação da utilização por parte de um ouvinte das funções de transferência do ouvido obtidas por outro ouvinte, Wenzel, Arruda, Kistler e Wightman (1993), para sinais de ruído, e Begault e Wenzel (1993), em sinais de voz, verificaram que enquanto que a percepção do azimute das fontes virtuais mantinha uma precisão semelhante à obtida no espaço livre, o erro da elevação e a taxa de confusões frente/trás foram elevadas. Têm surgido, assim, outros sistemas que tentam obter os parâmetros das funções de transferência do ouvido na forma de funções matemáticas.

Para fácil obtenção das funções de transferência do ouvido, têm sido criados sistemas de cabeças artificiais que imitem o ouvido externo humano. Quando os sons são apresentados através de auscultadores tem-se uma percepção tridimensional do som gravado. Para essa reprodução ser autêntica deve-se obter os mesmos sinais no ouvido da cabeça artificial que seriam obtidos por um ouvinte. Isto pode ser obtido através da imitação do ouvido externo, incluindo a cabeça, parte superior do tronco, aurícula e canal auditivo e ainda a membrana timpânica. A impedância da membrana tem sido medida por vários autores (Blauert, 1983; Hudde, 1983; Joswig, 1993). Por outro lado, se o sinal obtido pela cabeça artificial for equalizado, não é necessário a imitação exacta da impedância da membrana timpânica (Burkhard e Sachs, 1975; Gierlich e Genuit, 1989; Griesinger, 1989; Xiang e Blauert, 1991). Recentemente, muitos investigadores têm-se dedicado às técnicas biauriculares que se traduzem na utilização dos sinais medidos nos dois ouvidos para reprodução por altifalantes ou auscultadores (ver figura 1.65), uma vez que as

características direccionais e ambientais medidas são mantidas na reprodução (Cooper e Bauck, 1989; Hammershoi e Moller, 1991; Gierlich, 1992; Moller 1989,1992; Moller, Hammershoi, Hundeboll e Jensen, 1992). Estes sistemas têm várias aplicações, como: comparação de salas de concerto, avaliação de ruído e voz em salas, teleconferência na qual é preservado o efeito "cocktail party" (West, Blauert e MacLeans, 1992; Miyoshi e Koizumi, 1992), obtenção de consolas biauriculares (Gierlich, 1992), simulação de salas biauriculares (Vian e Martin, 1992; Xiang e Blauert, 1993), entre outras.

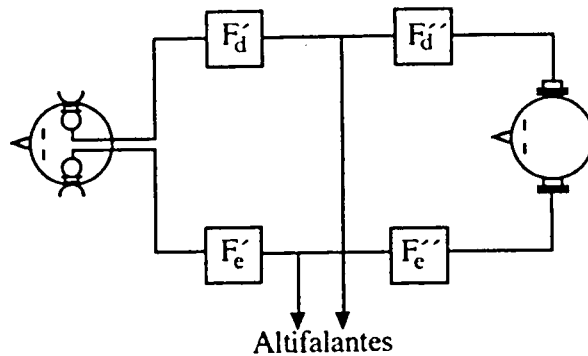


Fig. 1.65 - Sistema biauricular.

1.7.1 Sistemas que usam modelos matemáticos de localização espacial

Um dos primeiros modelos matemáticos tendo em conta os vários procedimentos de localização espacial, de forma a simularem a representação do sistema auditivo, foi apresentado por Searle, Braida, Davis e Colburn (1976). Este modelo baseia-se na teoria estatística, na qual os procedimentos de localização eram considerados como variáveis aleatórias Gaussianas, obtidas nas medidas até aí efectuadas na localização de fontes no plano horizontal e vertical. Os seis procedimentos de localização foram a diferença de tempo interauricular, a diferença de intensidade interauricular devido ao sombreamento sonoro da cabeça, procedimentos monauriculares devido ao sombreamento sonoro da cabeça, resposta em amplitude interauricular da aurícula, resposta em amplitude monauricular da aurícula e resposta em amplitude devido às reflexões dos ombros. Estes procedimentos foram representados por um vector,

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_6) \quad (1.41)$$

onde cada procedimento de localização u_k é um vector com as componentes correspondentes às coordenadas espaciais. É conhecido $p(U/j)$, sendo j a fonte sonora ($j=1, \dots, N$). De acordo com a teoria de detecção de sinal, em cada tentativa o ouvinte calcula o vector decisão

$$Q = (q_1, \dots, q_i, \dots, q_{N-1}) \quad (1.42)$$

sendo cada componente a razão de verosimilhança dada por

$$q_i = \frac{p(U/i)}{p(U/N)} \quad (1.43)$$

e decide do vector Q qual das N fontes é a mais provável. Devido à pouca informação disponível, este modelo teve aplicação limitada.

Recentemente têm surgido outros sistemas virtuais, designados por "displays virtuais", que utilizam a tecnologia computacional e dão a um indivíduo a mesma percepção que o ambiente que ele tenta explorar (Wenzel, 1992). Algumas das aplicações destes sistemas são a transferência de informação em carlingas de aviões, controlo de tráfego aéreo, sistemas de teleconferência, sistemas de realidade virtual, etc. Um desses sistemas é apresentado por Loomis, Hebert e Cicinelli (1990) para ajuda de navegação em cegos. Um indivíduo recebe um sinal através de auscultadores, que simula a fonte sonora a uma dada distância e em qualquer azimute. A diferença de tempo interauricular é dada por

$$\Delta T = 257 (\theta + \text{sen}\theta) \mu\text{s} \quad (1.44)$$

em que esta equação é a equação (1.8), considerando o raio da cabeça igual a 8.75 cm (a velocidade do som é 340 m/s). Para a diferença de intensidade interauricular, devido ao sombreado sonoro da cabeça, o espectro foi dividido em duas partes em 1800 Hz, operando esta diferença apenas acima deste valor segundo uma forma sinusoidal,

$$\Delta I = 16.\text{sen}\theta \text{ dB.} \quad (1.45)$$

O efeito da aurícula foi apenas considerado como provocando uma atenuação que variava sinusoidalmente com o azimute até um máximo de 3 dB em 180°,

$$\text{Aten.} = 3 \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \text{ dB.} \quad (1.46)$$

As rotações da cabeça serviam para eliminar as ambiguidades frente/trás. Quanto à distância foram considerados quatro procedimentos: a lei do decrescimento da pressão com a distância ($1/r$) até um mínimo de 40 cm; a atenuação às altas frequências devido à absorção atmosférica, com 0,1 dB por metro; a proporção de som directo e reverberante que também ajudou a exteriorização do som; e paralaxe de movimento, consequente da deslocação do indivíduo devido à translação e rotação da cabeça. Este sistema permite a um indivíduo rapidamente caminhar para um dado som simulado no espaço. Outro processo de obter a informação direccional das fontes sonoras é através das funções de transferência dos ouvidos para cada posição do espaço e a partir destas criam-se filtros FIR para cada um dos ouvidos, obtendo-se um mapa de filtros para todo o espaço. Para simular a fonte numa posição do espaço, o sinal de entrada é convoluído com os coeficientes do filtro determinado pelas coordenadas desejadas e apresentado por auscultadores (Wenzel, 1992).

Outro sistema, apresentado por Chen, Van Veen e Hecox (1992), tenta modelizar as características do ouvido externo através dos conceitos dos "formadores de feixe". Esse sistema implementa um filtro temporal e espacial através da formação de combinações pesadas dos dados obtidos por uma fila de sensores espacialmente distribuídos, considerando o ouvido externo como uma antena acústica. A geometria do sensor baseia-se nas considerações físicas da acústica do ouvido. A resposta do modelo, $h(\omega, \theta)$ é função do vector peso, w , e da forma como a estrutura da fila de sensores amostra o sinal de propagação, ou seja, do vector da resposta da fila de sensores, $d(\omega, \theta)$. O vector da resposta da fila de sensores representa a geometria da fila de sensores e a posição da fonte. A figura 1.65 apresenta a estrutura do modelo e cuja saída é a combinação pesada de sinais atrasados do sinal de entrada. Assim, a resposta é dada por

$$h(\omega, \theta) = w^H d(\omega, \theta) \quad (1.47)$$

onde o vector $d(\omega, \theta)$ é definido por

$$d^H(\omega, \theta) = [1, e^{j\omega T}, \dots, e^{j\omega NT}, e^{j\omega\tau_1}, e^{j\omega(\tau_1+T)}, \dots, e^{j\omega(\tau_1+NT)}, \dots, e^{j\omega\tau_{M-1}}, e^{j\omega(\tau_{M-1}+T)}, e^{j\omega(\tau_{M-1}+NT)}] \quad (1.48)$$

e

$$w^H = [w_{0;0}^*, \dots, w_{0;N}^*, w_{1;0}^*, \dots, w_{1;N}^*, w_{M-1;1}^*, \dots, w_{M-1;N}^*] \quad (1.49)$$

em que H representa a transposta complexa conjugada, * o complexo conjugado, N a ordem do filtro FIR, T o intervalo de amostragem, τ_i o atraso de tempo de propagação do início ao sensor "i" (codificando assim a geometria da fila de sensores e a posição da fonte). Para uma dada geometria é utilizado o procedimento dos mínimos quadrados para determinar os pesos, w, de modo que o erro médio quadrático entre as respostas espaciais/temporais do modelo e as respostas medidas no ouvido externo seja minimizado. O erro, para uma resposta pretendida do modelo $h_d(\omega, \theta)$, é dado por

$$e(\omega, \theta) = h_d(\omega, \theta) - w^H d(\omega, \theta). \quad (1.50)$$

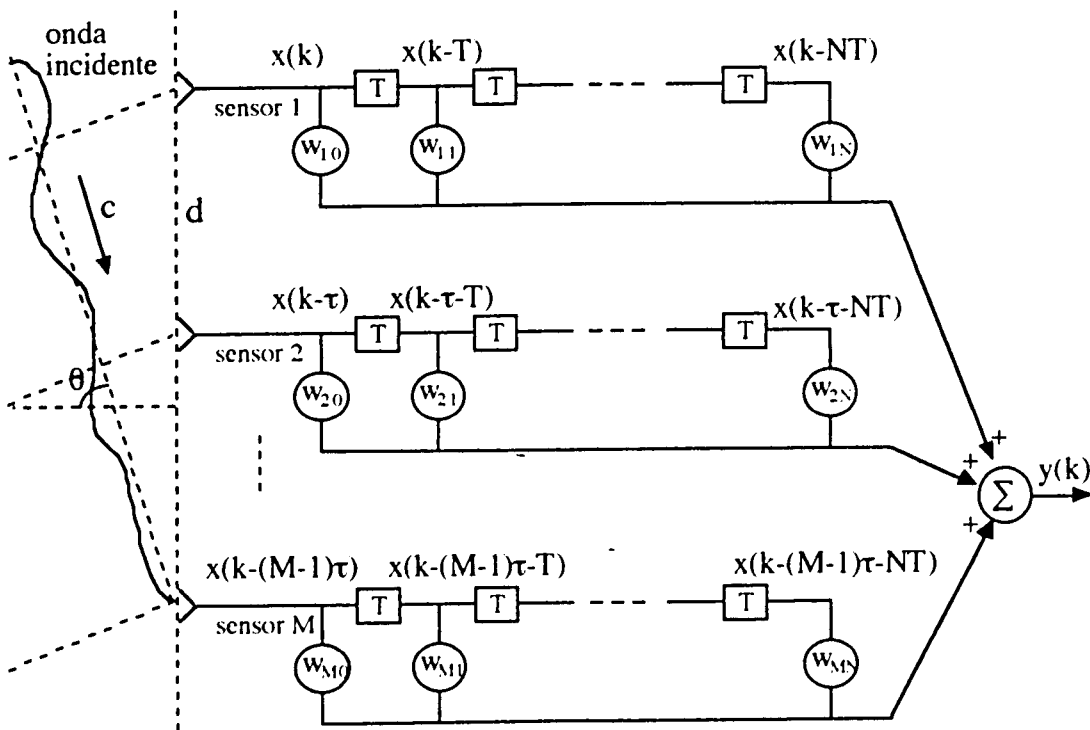


Fig. 1.65 - Modelo de "formador de feixe".

Embora o sistema aqui apresentado apenas tenha um alcance limitado (apenas foi testado para qualquer azimute e elevação fixa), ele pode ser expandido se for realizada investigação para o efeito.

Um outro trabalho, apresentado por Kistler e Wighthman (1992), descreve um modelo matemático das funções de transferência do ouvido e em que os parâmetros para esse modelo correspondem às características das funções de uma forma semelhante à efectuada para sintetização da voz. As funções base deste modelo são os traços espectrais básicos e cada função direccional pode ser aproximada por uma soma pesada dessas funções base. Cada peso define a contribuição relativa de cada função base no espectro. Foram medidas 5300 funções, representando principalmente as várias direcções do espaço. A medida de similaridade entre essas funções é obtida a partir da matriz de covariância, para um dado par de frequências,

$$S_{ij} = \frac{1}{n} \sum D_{ki} D_{kj} \quad \text{para } i, j = 1, 2, \dots, p \quad (1.51)$$

onde "n" é o número total de funções, "p" é o número total de frequências e D_{ki} a amplitude logaritmica à frequência "i" da função de transferência "k". As funções base, c_q , são os "q" vectores próprios da matriz de covariância que correspondem aos maiores valores próprios. Os pesos, que representam as contribuições de cada função base, são

$$w_k = C' d_k \quad (1.52)$$

onde C é a matriz cujas colunas são os vectores base e d_k é o vector da função de transferência "k". Dos resultados obtidos através de auscultadores verificou-se que a utilização de 5 funções base era suficiente para se obter uma boa aproximação às funções de transferência do ouvido.

1.7.2 Sistemas perceptuais biauriculares

A maioria destes sistemas, para localização espacial, usam modelos que tentam descrever como as diferenças interauriculares podem ser processadas para a indicação da posição no plano horizontal, utilizando a correlação cruzada da informação que chega aos dois ouvidos (Yost, 1993). Este tipo de modelo pode ter em conta o efeito de precedência (Lindemann, 1986) e o efeito "cocktail party" (Moore, 1992). As componentes dos modelos

biauriculares incluem um banco de filtros lineares passa-banda que simulam a selectividade frequencial do ouvido interno e um modelo de recepção neuronal para simular a geração de sinais neuronais para cada banda de frequências. A figura 1.66 apresenta o modelo biauricular (Blauert e Cobben, 1978; Moore, 1989). Para frequências acima de cerca 1500 Hz, o rectificador de meia onda e o filtro passa-baixo extraem as envolturas, reflectindo o efeito da perda do procedimento da diferença de tempo interauricular da estrutura fina acima desta frequência para avaliar apenas a envolvente. O filtro passa-banda utilizado por alguns autores é

$$H(f) = \begin{cases} \left(\frac{f}{f_0}\right)^4 & f < f_0 \\ \left(\frac{f}{f_0}\right)^{10} & f \geq f_0 \end{cases} \quad (1.53)$$

onde f_0 é a frequência central. O processador biauricular central avalia os sinais dos dois ouvidos para cada par de frequências. Colburn (Colburn, 1973; Colburn 1977; Colburn e Latimer, 1978; Stern e Colburn, 1978) foi entre os primeiros a obter um modelo a ter em conta um grande conjunto de dados biauriculares, apresentando um modelo biauricular baseado na detecção de coincidências probabilísticas da descarga nervosa.

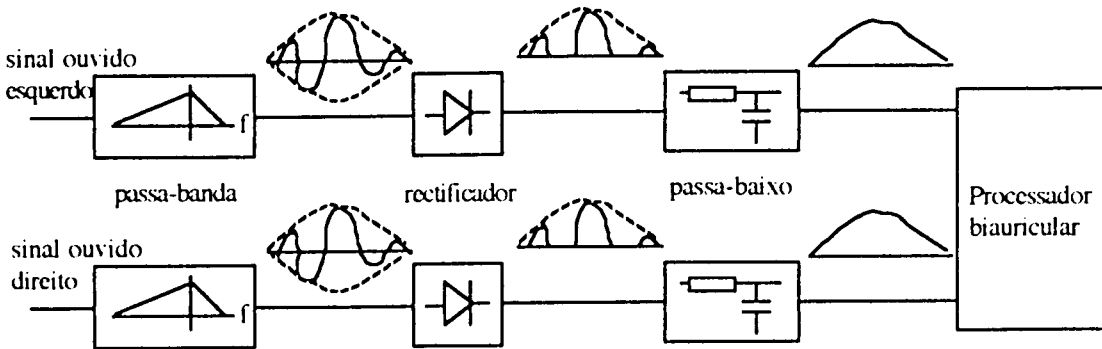


Fig. 1.66 - Modelo biauricular.

Lindeman (1986a) apresenta um modelo biauricular cujo processador central se baseia na correlação cruzada dos sinais que chegam aos ouvidos,

$$\Psi(\tau, t) = \int_{-\infty}^t d\left(\xi - \frac{\tau}{2}\right) e\left(\xi - \frac{\tau}{2}\right) e^{-(t-\xi)/T_{int}} d\xi \quad (1.54)$$

com T_{int} a constante de tempo de integração da correlação. Os picos na função de correlação podem ser considerados os procedimentos de localização, a diferença de tempo interauricular. O modelo comporta detectores monauriculares para o caso do processador de correlação cruzada não fornecer informação (por exemplo, se o sinal num dos ouvidos for nulo). Como as funções de correlação cruzada são independentes da amplitude relativa de duas funções, existe um mecanismo de inibição para avaliar a diferença de intensidade interauricular e explicar o efeito de precedência, no qual o primeiro pico corresponde ao som directo iniciando o processo de inibição, o que causa a supressão de picos secundários dentro de um certo intervalo de tempo.

O processador biauricular é apresentado na figura 1.67a), para uma banda de frequências. As variáveis "m" e "n" representam o atraso discreto da correlação cruzada e o atraso discreto de tempo, respectivamente. Duas linhas de atraso são alimentadas pelos sinais do ouvido direito, $d(m,n)$ e esquerdo, $e(m,n)$, em direcções opostas. Os conteúdos das linhas de atraso são multiplicadas e somadas (correlação). Os sinais ao longo da linha de atraso são atenuados pelos coeficientes de inibição, $i_d(m,n)$ e $i_e(m,n)$. Quanto ao processo de inibição, ele é realizado pela multiplicação do sinal na linha de atraso com um coeficiente de atenuação variante no tempo, derivado do sinal do outro ouvido e do produto da correlação cruzada, como mostra a figura 1.67b).

Para a sensibilidade monauricular da correlação foram usadas as funções $w_d(m)$ e $w_e(m)$, na qual o aumento de $w_d(m)$ faz com que a saída da correlação se torne independente de $e(m,n)$ e o aumento de $w_e(m)$ reduz a influência de $d(m,n)$. Assim,

$$k(m,n) = d'(m,n)e'(m,n) \quad -M \leq m \leq M \quad (1.55)$$

com

$$\begin{aligned} d'(m,n) &= d(m,n)[1 - w_e(m)] + w_e(m) \\ e'(m,n) &= e(m,n)[1 - w_d(m)] + w_d(m) \end{aligned} \quad (1.56)$$

e

$$w_e(m) = w_d(-m) = w_f e^{-(n+M)/M\tau} \quad (1.57)$$

onde w_f descreve a sensibilidade monauricular para um sinal no fim da linha de atraso e M_f determina o decrescimento da sensibilidade monauricular ao longo da linha. A função de correlação é

$$\Psi(m,n) = \sum_{i=-\infty}^n k(m,n)e^{-(n-i)/T_{int}} \quad (1.58)$$

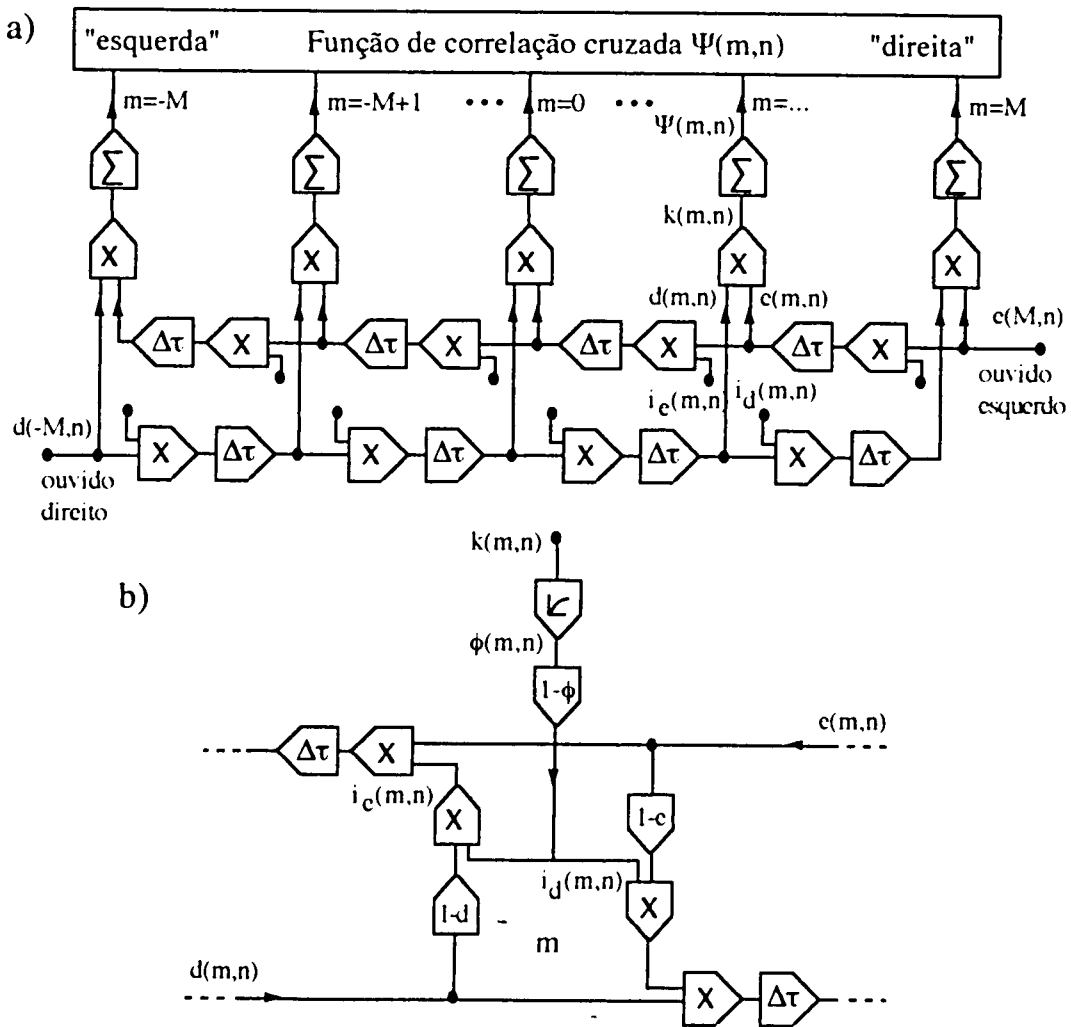


Fig. 1.67 - a) Modelo do processador biauricular e b) processo de inibição.

Quanto à inibição, representada por $i_d(m,n)$ e $i_e(m,n)$

$$\begin{aligned} d(m+1,n+1) &= d(m,n).i_d(m,n) \\ e(m+1,n+1) &= e(m,n).i_e(m,n) \end{aligned} \quad (1.59)$$

com

$$\begin{aligned} i_d(m,n) &= [1 - e(m,n)][1 - \Phi\{k(m,n)\}] \\ i_e(m,n) &= [1 - d(m,n)][1 - \Phi\{k(m,n)\}] \end{aligned} \quad (1.60)$$

sendo

$$\Phi\{k(m,n)\} = k(m,n) + \Phi\{k(m,n-1)\}e^{-T_d/T_{in}}[1 - k(m,n-1)] \quad (1.61)$$

onde T_d é o tempo de amostragem e T_{in} é a constante de inibição.

O tempo de atraso de correlação, τ , é limitado por

$$|\tau| \leq \begin{cases} \frac{1}{2} f_0 & f \leq 800 \text{ Hz} \\ 0.625 \text{ ms} & f > 800 \text{ Hz} \end{cases} \quad (1.62)$$

Para a obtenção da lateralização ou se obtém a posição da centróide, dado por

$$d(n) = \frac{\sum_{m=-M}^{+M} m.\Psi(m,n)}{\sum_{m=-M}^{+M} \Psi(m,n)} \quad (1.63)$$

onde os múltiplos eventos foram ignorados ou é obtida a posição do máximo no caso de múltiplos eventos.

Mais tarde, este modelo foi extendido por Gaik (1993) para incorporar as combinações naturais das diferenças interauriculares de tempo e intensidade. Esta expansão deve-se ao facto de o modelo de Lindeman não ser capaz de processar os sinais medidos nos ouvidos de um indivíduo principalmente devido ao aumento da diferença de intensidade interauricular às altas frequências, que coduz a assimetrias no processo de inibição. Para isso, é

incorporado uma pesagem distribuída ao longo da linha de atraso, realizando uma atenuação da propagação da actividade neuronal. A figura 1.68 apresenta o modelo extendido sem apresentação do processo de inibição.

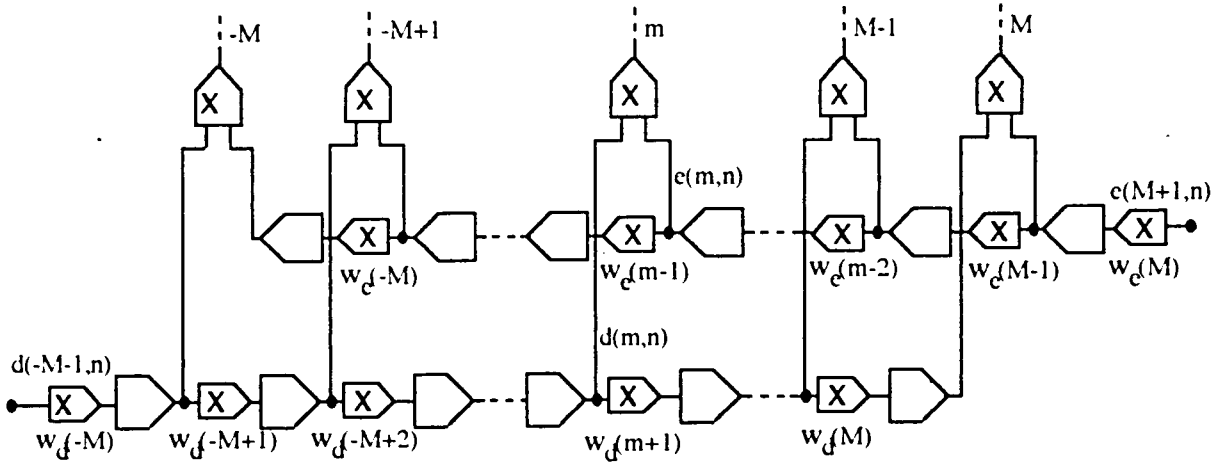


Fig. 1.68 - Extensão ao modelo de Lindeman (1992).

Os pesos são dados por $w_e(m)$ e $w_d(m)$ que podem ser escolhidos de modo que, se o sinal tiver uma combinação natural de diferenças interauriculares, $\Delta L(m)$, a diferença de nível criada pelos factores de pesagem compensa a diferença de nível do sinal,

$$\sum_{i=-M}^m w_d(i) - \sum_{i=m}^M w_e(i) = -\Delta L(m) \quad -M \leq m \leq M \quad (1.64)$$

Outra equação necessária é dada considerando que as mudanças na amplitude dos sinais do ouvido esquerdo e direito, causada pelos factores de pesagem, devem também compensar-se mutuamente,

$$\sum_{i=-M}^m w_d(i) + \sum_{i=m}^M w_e(i) = 0 \quad (1.65)$$

Estas equações dão origem a

$$w_e(M) = \frac{\Delta L(M)}{2} \quad e \quad w_e(m) = \frac{\Delta L(m)}{2} - \frac{\Delta L(m+1)}{2}$$

$$w_d(-M) = \frac{-\Delta L(M)}{2} \text{ e } w_d(m) = \frac{-\Delta L(m)}{2} + \frac{\Delta L(m+1)}{2} \quad (1.66)$$

Para cobrir todo o espectro, o modelo aqui apresentado é realizado em paralelo para todas as bandas de frequência e os picos obtidos indicam a posição lateral da fonte sonora.

1.7.3 Simulação biauricular em salas

A imagem auditiva percebida por um ouvinte, que é fornecida pelo sistema auditivo com base nos parâmetros dos sinais sonoros que chegam aos ouvidos, reflecte as características do ambiente acústico, como: posição no espaço, extensão espacial, reverberação, coloração, ecos, etc. Os parâmetros acústicos ambientais mais importantes são as características direccionais das fontes sonoras, geometria e acústica das superfícies que afectam o campo sonoro e propriedades acústicas de propagação no meio. Se a imagem auditiva é manipulada de modo a mudar o ambiente acústico para um outro, cria-se um ambiente acústico virtual. Um desses trabalhos tem sido a simulação biauricular em salas em que são simuladas, através de um computador, as respostas impulsivas semelhantes às medidas nos ouvidos.

Numa sala, o indivíduo ouve os sons provenientes de diferentes direcções com intensidades e atrasos diferentes. Segundo Lehnert e Blauert (1989, 1991, 1992) um modo possível de descrever um ambiente acústico virtual é o conceito de fonte sonora virtual, na qual cada ambiente pode ser simulado através de um conjunto de fontes virtuais que rodeiam o indivíduo nas condições do espaço livre. Cada fonte virtual emite um sinal coerente, mas não igual ao sinal emitido pela fonte, representando os sinais emitidos pela fonte e reflectidos nas várias superfícies que rodeiam o ouvinte. A resposta impulsional deste sistema pode ser obtida, para cada fonte virtual, através do cálculo da propagação do sinal até alcançar o ouvinte e convoluindo o resultado com a resposta impulsional do ouvido do indivíduo para uma dada direcção de incidência. A figura 1.69 apresenta uma representação esquemática desses sistemas (Lehnert e Blauert, 1991, 1992). O processo pode ser dividido em duas fases, a modelização do campo sonoro e a auralização (apresentação dos sinais aos ouvintes) utilizando tecnologia biauricular. As entradas para o módulo do campo sonoro são a geometria e dados da sala,

posição e orientação das fontes e receptor, calculando um mapa espacial de fontes virtuais. Com estes dados, o módulo de simulação biauricular calcula a resposta impulsional biauricular do indivíduo no ambiente simulado, usando preferencialmente as funções de transferência do ouvido do mesmo. Finalmente, a percepção do ambiente auditivo virtual é realizada pela convolução de sinais anecóicos com a resposta impulsional biauricular, sendo o resultado fornecido através de auscultadores.

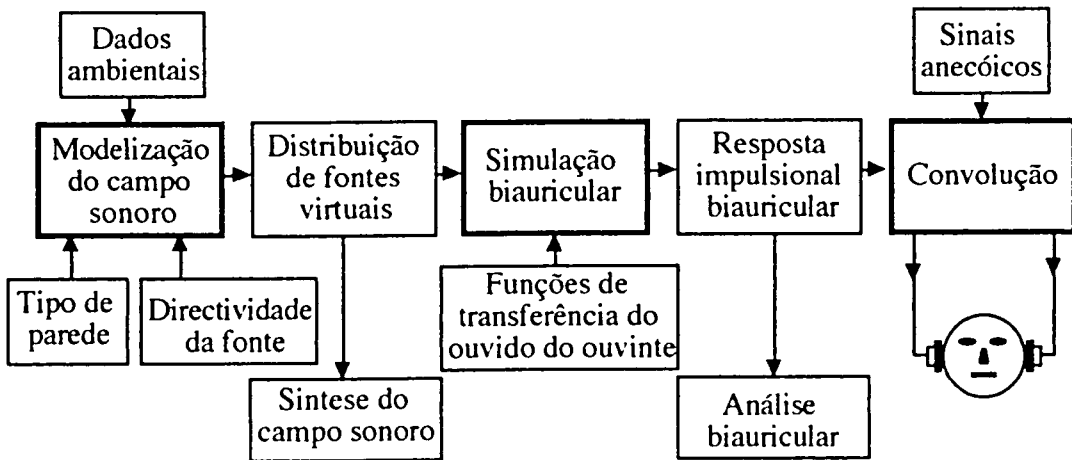


Fig. 1.69 - Esquema de um sistema de simulação biauricular de salas

Por exemplo, a figura 1.70a) apresenta o modelo de computador para uma sala com alguns raios sonoros, a figura 1.70b) apresenta a distribuição de fontes sonoras virtuais para simular o efeito das reflexões com o tamanho do círculo a indicar a energia relativa e a figura 1.70c) apresenta a resposta impulsional biauricular. Devido ao alcance dinâmico e resolução espacial e temporal do sistema auditivo, a distribuição de fontes no modelo pode ser quantificada para um número finito de fontes sonoras.

A tarefa do modelo do campo sonoro é calcular a distribuição de fontes virtuais com base nas propriedades físicas do espaço simulado. Devido ao progresso tecnológico tem-se adoptado a modelização através de computadores, em vez da modelização física (Kleiner, Orłowski e Kirzenstein, 1993). O campo sonoro poderia ser tratado como um problema linear utilizando-se as equações de Kirchhoff para as condições fronteira das superfícies reflectoras. Contudo, a solução analítica geral seria muito difícil devido à formulação das condições fronteira, fazendo com que os métodos existentes produzam resultados com algumas restrições. Surgem, então, outros

modelos sendo os dois mais utilizados o método dos raios (Kroskstad, Strom e Sorsdal, 1968, 1983; Kulowski, 1985; Ondet e Barbry, 1989; Kompis e Diller, 1993; Lehnert, 1993b; Nakagawa, Miyajima e Tahara, 1993) e o método das imagens (Allen e Berkley, 1979; Borish, 1984; Lee e Lee, 1988; Kristiansen, Krokstad e Follestad, 1993), podendo surgir alternativas (Vorlander, 1989; Lewers, 1993; Naylor, 1993).

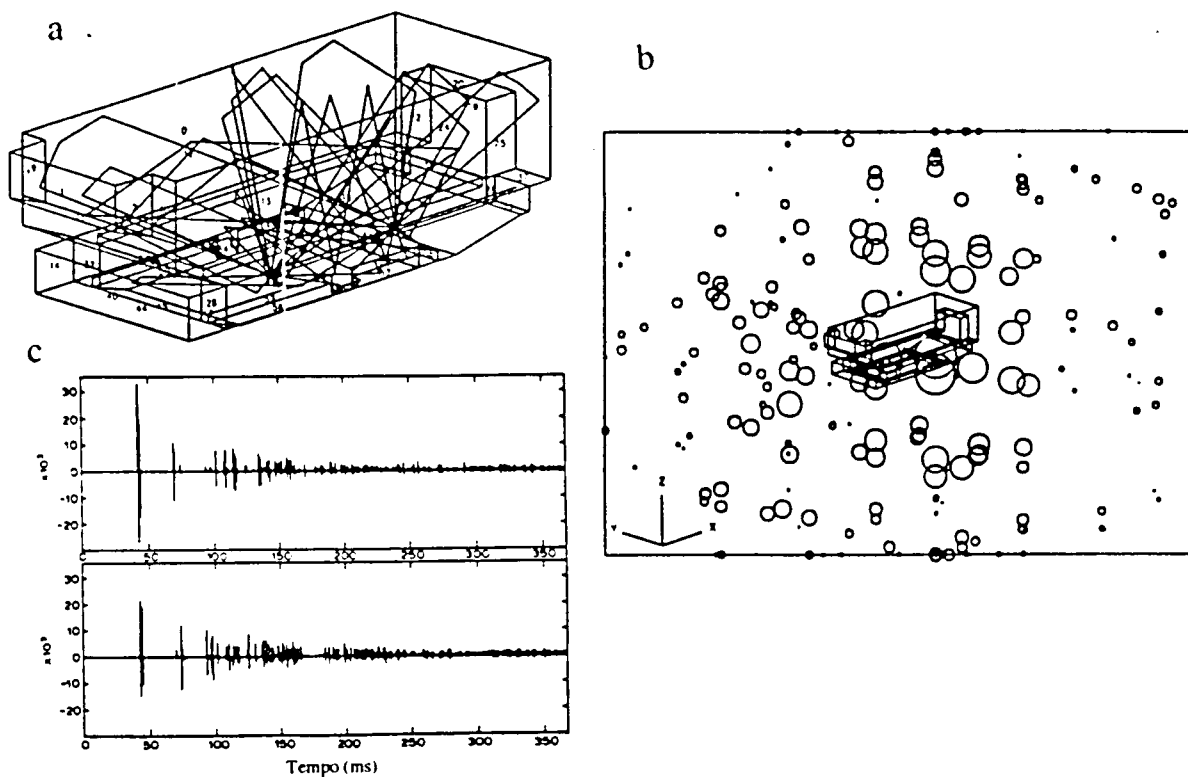


Fig. 1.70 - Exemplo de simulação: a) modelo dos raios, b) distribuição de fontes virtuais e c) resposta impulsional biauricular.

O método das imagens é inerentemente determinístico e permite um cálculo exacto da resposta impulsional, sendo limitado pela capacidade do computador. O seu princípio de operação pode ser analisado do modo seguinte: se uma fonte sonora está colocada em frente de uma parede rígida não limitada, o campo sonoro em cada ponto à frente da parede pode ser calculado pela soma do campo sonoro causado pela fonte original e pelo campo causado por uma fonte secundária que é a imagem auditiva da fonte original numa posição simétrica ao plano da parede. Com várias superfícies, existem múltiplas reflexões. Este método é simples para geometrias rectangulares mas requiere considerações mais complexas no caso de formas arbitrárias. A vantagem é que todas as imagens reflectidas constituem fontes

sonoras virtuais mas o algoritmo é bastante ineficiente para muitas reflexões uma vez que o número das imagens aumenta exponencialmente com a ordem das reflexões.

No método dos raios, a fonte sonora emite raios que transportam informação. Durante o processo de simulação, cada raio é traçado, viajando em linha recta e deflectido de acordo com a lei das reflexões geométricas quando encontra uma dada superfície. Este método, embora sendo mais rápido que o anterior, tem desvantagens, como a própria detecção dos raios devido ao diâmetro do raio e do receptor (Lehnert e Blauert, 1991, 1992c).

Outra componente importante é a reverberação que existe devido à absorção de uma sala. O campo sonoro decai gradualmente a uma taxa proporcional à quantidade de absorção (Polack, 1993). A componente reverberante do campo sonoro não permite ao sistema auditivo a discriminação das chegadas individuais e, embora a geração de reverberação continue a exigir um grande esforço computacional, existem alguns efeitos particulares de uma sala que necessitam desta componente, como impressão espacial. Alguns exemplos de geração de reverberação são apresentados por Schroeder (1961, 1962, 1984) e Heinz (1993).

A segunda parte do sistema biauricular é a auralização, ou seja, a apresentação dos resultados da simulação (Lehnert e Blauert, 1992c; Moller, 1993). As respostas impulsionais biauriculares são obtidas através do cálculo das respostas impulsionais de todas as fontes (original e virtuais) que propagam até ao ouvinte (tendo em conta atenuação, absorção atmosférica, directividade da fonte), sendo todas essas componentes filtradas com a função de transferência do ouvido para a direcção de incidência correspondente. De seguida, os resultados de todas as direcções são somados para produzirem as respostas impulsionais biauriculares e, após a convolução destas com os sinais anecóicos, o resultado é apresentado ao ouvinte através de auscultadores.

Desenvolvimento e teste de modelos

2.1 Introdução

Tendo sido analisados os vários procedimentos utilizados na localização espacial de fontes sonoras, este capítulo apresenta alguns, resultados obtidos pelo autor, na simulação de alguns dos efeitos estudados e descreve três programas criados para alterar sons anecóicos e sem qualquer informação direccional, de modo a inserirem a informação referente à posição da fonte sonora ou efeito espacial, semelhantemente ao efectuado por um ambiente acústico. Os modelos usados nestes sistemas são puramente matemáticos, não requerendo deste modo a utilização de tabelas com medições dos efeitos provocados pelo sistema auditivo externo.

Como sistema de suporte computacional e de audio era necessário uma ferramenta com a capacidade de manipulação dos ficheiros, de grandes dimensões, com informação sonora e possibilidade de envio desta informação através de auscultadores. O computador NeXT, com as suas potencialidade no processamento digital de som, permitiu realizar essas operações sem necessidade de mais equipamento.

A matéria apresentada neste capítulo é o resultado um longo período de trabalho no domínio das potencialidades e funcionamento do computador NeXT, detalhado no trabalho apresentado na disciplina "Projecto" da parte escolar do mestrado (Azevedo, 1993), e principalmente na realização de várias experiências de localização que permitiram chegar aos programas descritos em apêndice.

O primeiro programa a ser apresentado, neste capítulo, permite simular a localização de fontes sonoras em qualquer ponto do plano horizontal. O modelo utilizado é uma optimização e desenvolvimento dos modelos apresentados na bibliografia, para o efeito. Quanto à simulação da elevação só foi testado um dos modelos apresentados no primeiro capítulo.

O segundo programa apresentado permite que o ouvinte tenha a sensação de exteriorização de sons ouvidos através de auscultadores, que, como já foi referido, dão a sensação do som, não processado, vir de dentro da cabeça. Para o efeito, o som original é somado com reflexões adequadas.

O terceiro programa permite obter a sensação de espaço, nos sons ouvidos através de auscultadores, por simulação de reverberação.

Em apêndice são apresentados os programas desenvolvidos para geração dos efeitos referidos.

2.2 Visão geral do suporte computacional

Parecendo desnecessário ao autor fazer uma descrição detalhada do suporte computacional, que pode ser encontrado no manual do computador e completado pelo trabalho de "Início à dissertação" (Azevedo, 1993), esta apresentação refere unicamente o que é relevante para o seguimento da matéria a apresentar.

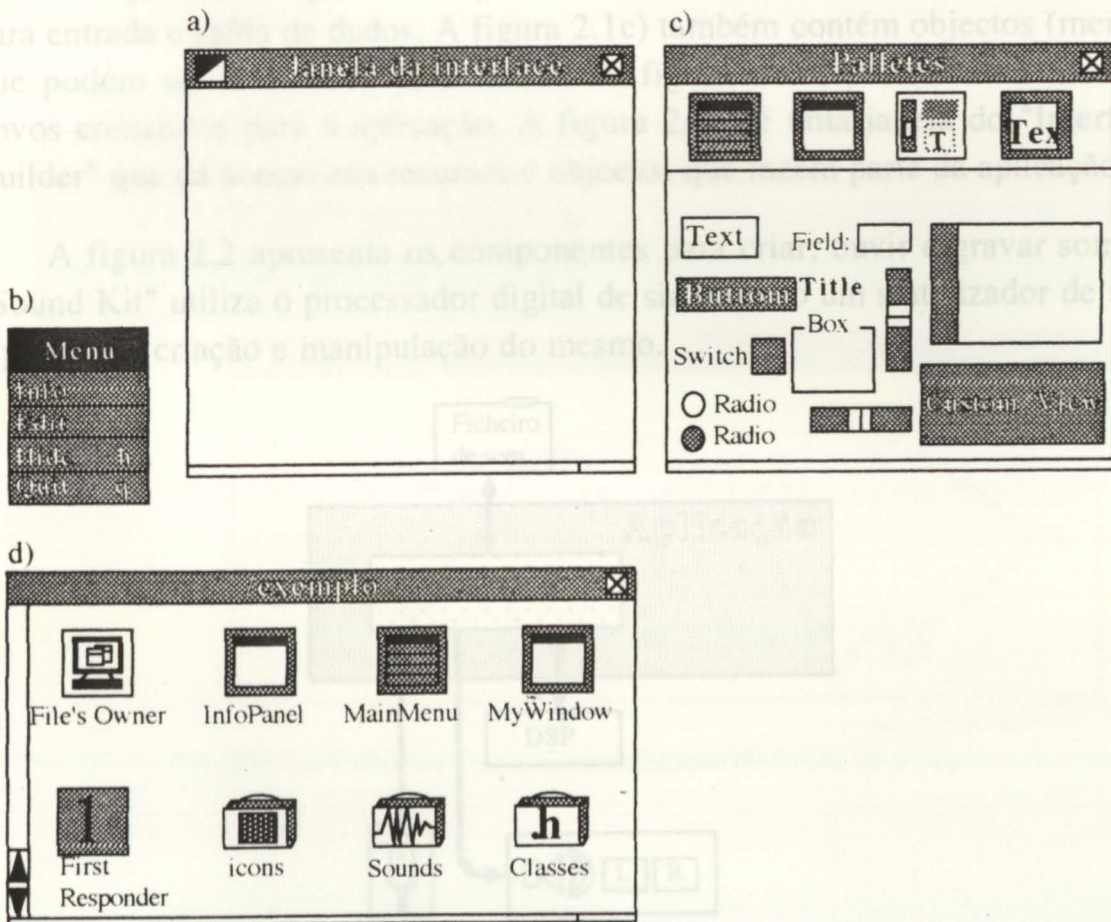


Fig. 2.1 - "Interface Builder": a) janela da aplicação, b) menu de comandos, c) objectos para a interface e d) janela dos objectos e recursos.

O computador utilizado para criar as aplicações necessárias à localização espacial foi o NeXT que já inclui um processador digital de sinal (DSP56001) e comporta rotinas de utilização do DSP, rotinas de processamento de vectores de dados e rotinas que permitem a manipulação dos ficheiros de som.

A principal ferramenta utilizada é o "Interface Builder", um programa que permite, graficamente, construir novas aplicações e estabelecer ligações com os objectos da interface do NeXT através de um projecto. O "Interface Builder" apresenta uma janela que representa a aplicação e fornece acesso gráfico a um conjunto de objectos normalizados da interface, como campos de texto, botões e menus. Cada aplicação tem pelo menos três componentes principais: uma janela que representa a nova aplicação (figura 2.1a), um menu principal (figura 2.1b) e um painel de informação. A figura 2.1c) representa os objectos que podem ser utilizados na aplicação, podendo-se arrastar para dentro da janela da figura 2.1a) para criar a interface apropriada à aplicação para entrada e saída de dados. A figura 2.1c) também contém objectos (menus) que podem ser arrastados para dentro da figura 2.1b) para se criar, assim, novos comandos para a aplicação. A figura 2.1d) é uma janela do "Interface Builder" que dá acesso aos recursos e objectos que fazem parte da aplicação.

A figura 2.2 apresenta os componentes para criar, ouvir e gravar som. O "Sound Kit" utiliza o processador digital de sinal como um sintetizador de som e permite a criação e manipulação do mesmo.

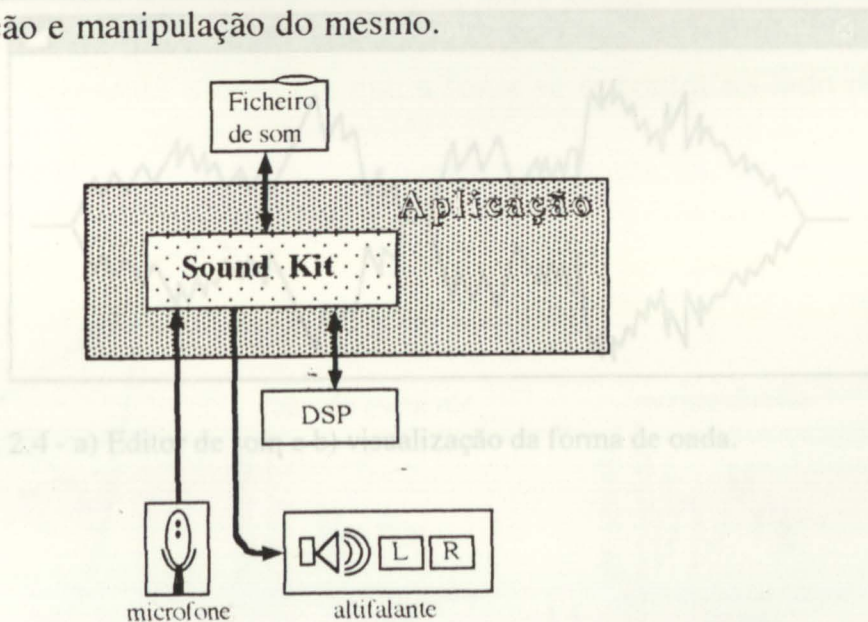


Fig. 2.2 - Componentes para manipulação do som.

2.3 Os ficheiros de som têm a estrutura apresentada na figura 2.3. O cabeçalho identifica o ficheiro e os dados contêm os canais de som. Para o caso aqui em causa são utilizados dois canais para alimentar os auscultadores, um para o ouvido esquerdo e outro para o direito. As taxas de amostragem utilizadas foram de 22050 Hz e 44100 Hz.

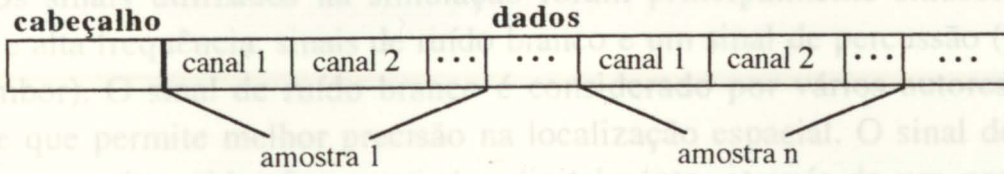


Fig. 2.3 - Formato dos ficheiros de som.

Existem algumas aplicações residentes que já permitem a manipulação de som, como gravação e audição, apresentado na figura 2.4a), e a possibilidade de visualização da envolvente da forma de onda sonora, aparecendo um exemplo na figura 2.4b).

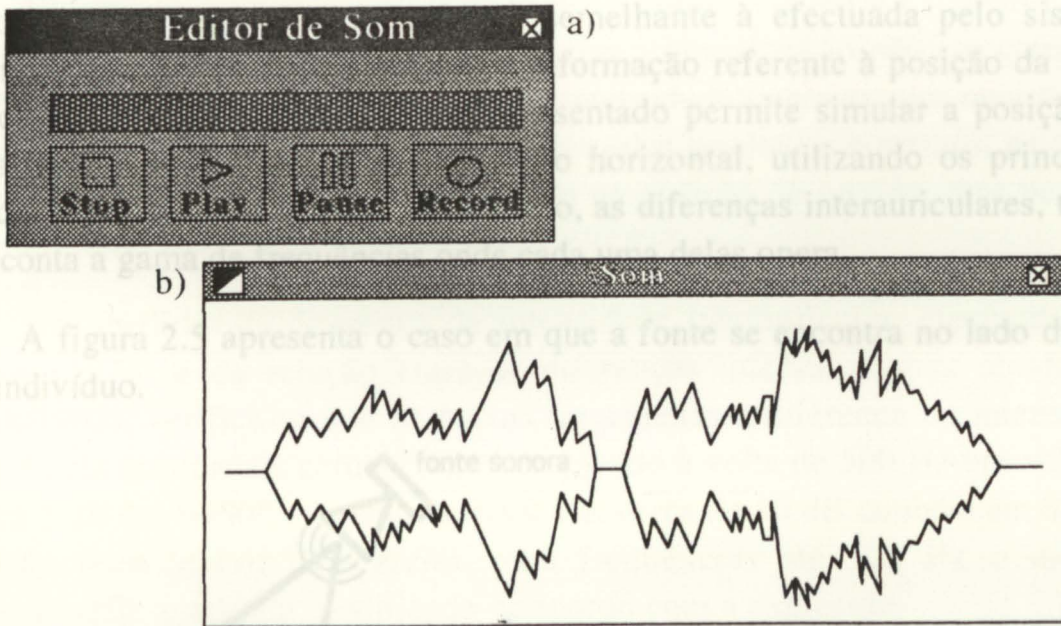


Fig. 2.4 - a) Editor de som e b) visualização da forma de onda.

2.3 Programas de simulação desenvolvidos no NeXT

Segue-se uma apresentação dos programas desenvolvidos e dos resultados obtidos com os mesmos.

Os sinais utilizados na simulação foram principalmente sinusoides de baixa e alta frequência, sinais de ruído branco e um sinal de percussão (batidas de tambor). O sinal de ruído branco é considerado por vários autores como aquele que permite melhor precisão na localização espacial. O sinal de ruído branco e as sinusoides foram criados digitalmente, através de um programa apropriado criado para o efeito, com o número pretendido de amostras e na frequência de amostragem de 22050 Hz ou 44100 Hz.

2.3.1 Programa para simulação de fontes no plano horizontal

Utilizando, como sinais de base, sinais "limpos" de informação espacial é pretendido alterá-los de uma forma semelhante à efectuada pelo sistema auditivo externo, de modo a incluir a informação referente à posição da fonte sonora no espaço. O sistema aqui apresentado permite simular a posição de uma fonte em qualquer ponto do plano horizontal, utilizando os principais procedimentos de localização deste plano, as diferenças interauriculares, tendo em conta a gama de frequências onde cada uma delas opera.

A figura 2.5 apresenta o caso em que a fonte se encontra no lado direito do indivíduo.

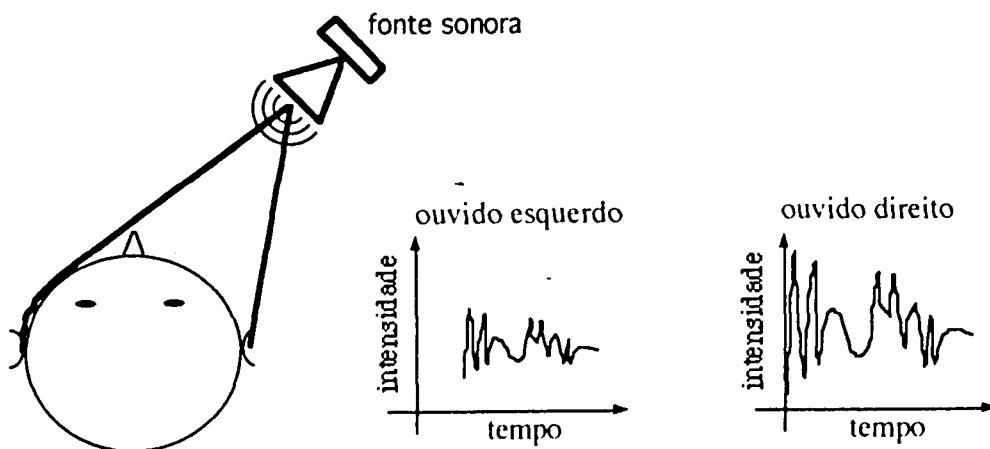


Fig. 2.5 - Diferenças interauriculares.

A expressão da diferença de tempo interauricular para a gama de frequências até 500 Hz é obtida da equação (1.9) considerando o raio da cabeça com 8,75 cm,

$$DTI = 772.\text{sen}\theta \quad \mu\text{s} \quad (2.1)$$

Acima de 500 Hz, é utilizada a expressão (1.8)

$$DTI = 257(\theta + \text{sen}\theta) \quad \mu\text{s} \quad (2.2)$$

Estas duas expressões aproximam a dependência da diferença de tempo interauricular com a frequência, como foi indicado em Kuhn (1977).

A equação da diferença de intensidade interauricular baseia-se no trabalho de Middlebrooks (1992), na equação (1.36), nas frequências acima de 1600 Hz

$$DII = 20.\text{sen}\theta \quad \text{dB} \quad (2.3)$$

Utilizando o modelo apresentado por Loomis, Hebert e Cicinelli (1990) verificou-se que para as baixas frequências a lateralização não era completa, ou seja, a consideração da diferença de intensidade interauricular nula para as baixas frequências provocava algum desvio dos resultados correctos, na qual o máximo de deslocamento não foi obtido na posição do ouvido, mas para um azimute inferior.

Das medidas da diferença de intensidade interauricular, efectuadas por Shaw (1974) e da relação entre as diferenças interauriculares obtida por Gaik(1993), verifica-se que às baixas frequências a diferença de intensidade não é nula mas cresce com a frequência, tendo à volta de 500 Hz um valor de cerca 5 dB em $\theta=90^\circ$ e à volta de 1000 Hz, cerca de 10 dB também em $\theta=90^\circ$. Assim, para incluir este efeito, para frequências até 500 Hz o modelo normalmente usado foi modificado de acordo com a expressão

$$DII = 5.\text{sen}\theta \quad \text{dB} \quad (2.4)$$

e acima deste valor, até 1800 Hz, teremos

$$DII = 10.\text{sen}\theta \quad \text{dB} \quad (2.5)$$

O modelo optimizado, assim desenvolvido, melhora significativamente a simulação no azimute.

Para introduzir algum efeito devido ao sombreamento sonoro provocado pela aurícula é considerado um máximo de 3 dB de atenuação em $\theta=180^\circ$, como é indicado em Loomis, Hebert e Cicinelli (1990). Essa atenuação é igual nos dois ouvidos e segue a expressão

$$A = 3 \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \text{ dB} \quad (2.6)$$

A figura 2.6 apresenta a janela da interface da aplicação em que as entradas consistem no ficheiro de entrada com o sinal sonoro, ficheiro de saída que terá o som filtrado e o azimute onde é pretendido colocar a fonte sonora simulada. O botão "Início" dá início à execução do programa, após entrada dos dados. Como saída, além do ficheiro de som, também é apresentado o número de amostras sonoras do ficheiro de saída. O código de implementação é apresentado no apêndice 1. Pelo facto de se estar a trabalhar com um grande número de amostras de entrada, a FFT foi realizada utilizando o método "overlap-and-add" (Kuc, 1988).

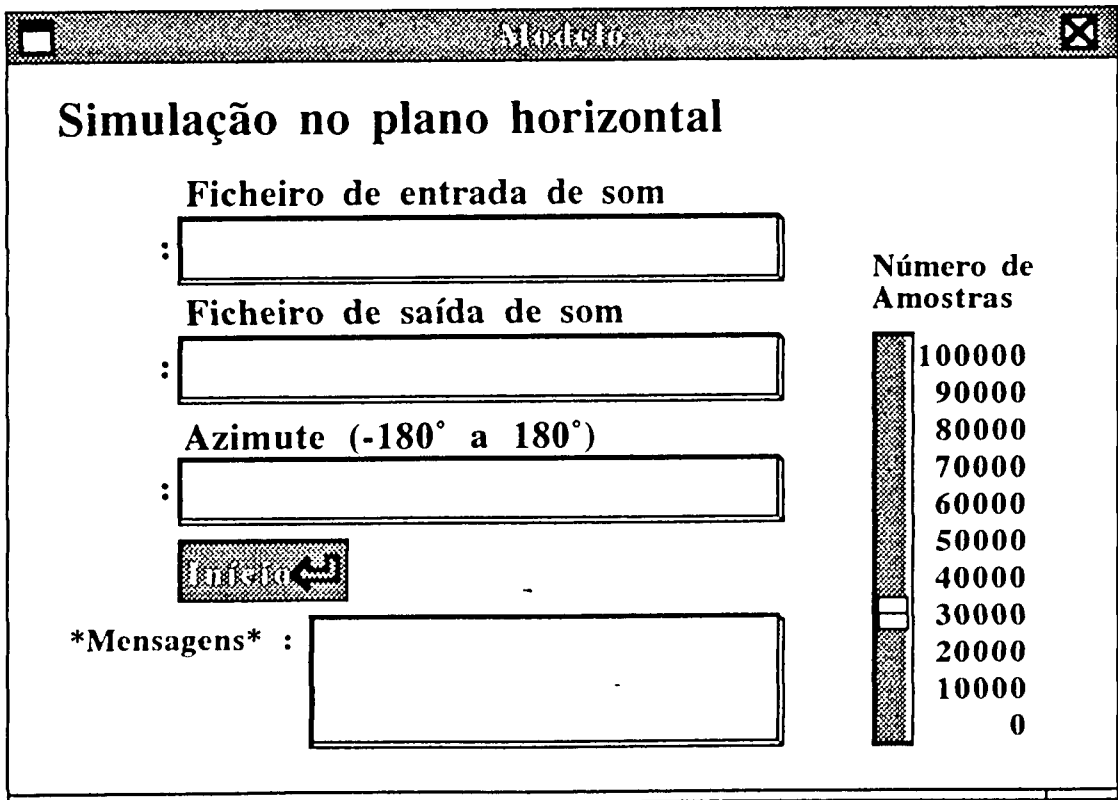


Fig. 2.6 - Janela da aplicação.

Para analisar o efeito de cada uma das diferenças interauriculares foram utilizados sinais cujas componentes frequenciais estivessem abaixo ou acima de mais ou menos 1600 Hz. Para isso, utilizaram-se sinusoides uma vez que o espectro cai numa frequência pretendida. Numa experiência preliminar, verificou-se que enquanto para as baixas frequências quer a diferença de tempo interauricular quer a diferença de intensidade interauricular contribuíam para a posição da imagem da fonte sonora, para as altas frequências praticamente não existia qualquer contribuição da diferença de tempo interauricular para a lateralização dessa imagem, confirmando-se a teoria apresentada pelos diversos autores na bibliografia apresentada.

Quando se ouve através de auscultadores, o som de saída utilizando o editor de som, o som de entrada é percebido no azimuth pretendido. Conseguiram-se localizar com boa precisão as fontes sonoras nos vários pontos do plano horizontal, como foi verificado num exemplo na qual as fontes estavam localizadas em azimuths com incrementos de 10° (figura 2.7). Criando um ficheiro sonoro ligando todos os sons posicionados nas direcções indicadas pela figura 2.7, na qual foi realizado um programa suplementar e, quando o mesmo foi apresentado por auscultadores, tem-se a sensação do som rodar em volta da cabeça. Com esta experiência, verificou-se que os sons sinusoidais foram mais difíceis de localizar relativamente ao ruído branco e ao som de percussão. Para todos estes sinais a precisão de lateralização diminuía com o aumento do azimuth.

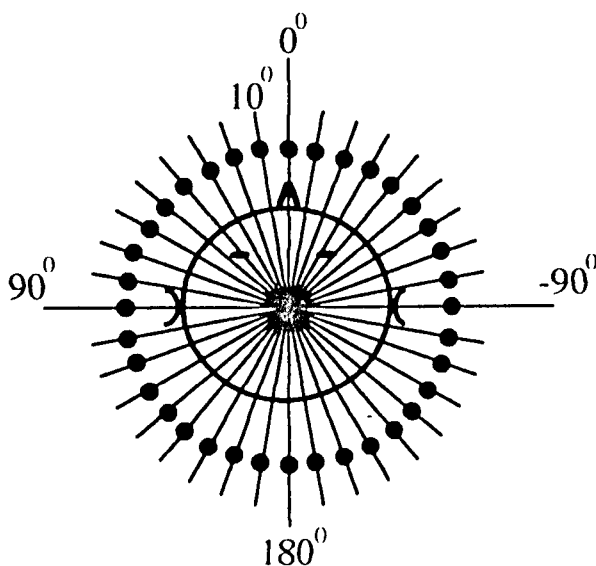


Fig. 2.7 - Localização horizontal.

Uma vez que os sons são apresentados por auscultadores, estes encontram-se dentro da cabeça. Na secção seguinte será apresentado um sistema que permitirá obter alguma exteriorização do som e na secção 2.3.3 será apresentado um outro que permitirá criar alguma sensação de ambiente através de adição de reverberação.

2.3.2 Plano vertical e localização extra-cranial da fonte sonora

Numa tentativa de simulação do plano vertical usando duas reflexões do sinal de entrada de modo a simular o efeito da aurícula, como foi efectuado por Watkins (1978), verificou-se uma variação restrita na gama de valores de elevações, no plano vertical lateral, quando se utilizaram sinais de ruído branco. Para um atraso variando entre 0-75 μ s a elevação da imagem sonora descia. A pequena variação da elevação não permitiu obter um modelo para simulação do plano vertical. O sinal, que foi enviado por auscultadores para um dos ouvidos, continha duas reflexões

$$y(t) = x(t) + \alpha_1 x(t-\tau_1) + \alpha_2 x(t-\tau_2) \quad (2.7)$$

sendo α e τ a atenuação e atraso, respectivamente. No entanto, alterando a função, de modo a enviar apenas um eco igual para cada canal dos auscultadores e um outro eco para apenas um ouvido, verificou-se que o som era percebido fora da cabeça para uma gama de valores de atrasos da ordem de alguns milissegundos. Quando enviado apenas um eco para ambos os ouvidos a exteriorização do som foi inferior. Um dos modos de se perceber os sons fora da cabeça tem sido através da reprodução, através de auscultadores, das funções medidas nos ouvidos (ou em cabeças artificiais), uma vez que mantêm as alterações efectuadas pelo sistema auditivo externo que permitem a exteriorização. Deste modo, foi interessante o efeito aqui encontrado com reflexões do sinal de entrada. O sinal em cada ouvido é dado por $y_d(t)$, para o ouvido direito, e $y_e(t)$, para o esquerdo,

$$\begin{aligned} y_d(t) &= x(t) + x(t-\tau_1) + x(t-\tau_2) \\ y_e(t) &= x(t) + x(t-\tau_2) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Também foi verificado que para valores à volta de 10-20 ms a imagem sonora dividia-se em duas. Os valores que provocaram melhores resultados de

exteriorização sonora para o sinal de ruído branco amostrado a 44100 Hz foram atrasos de τ_1 à volta de 4 ms e τ_2 à volta de 2 ms. Para o sinal do som de tambor, os valores de τ_1 encontravam-se acima de 4 ms e τ_2 em 1 ms. Para os sinais sinusoidais foi difícil a exteriorização através deste modelo.

$$y_e(t) = x(t) + x(t-\tau_{21}) + x(t-\tau_{22}) \quad (2.9)$$

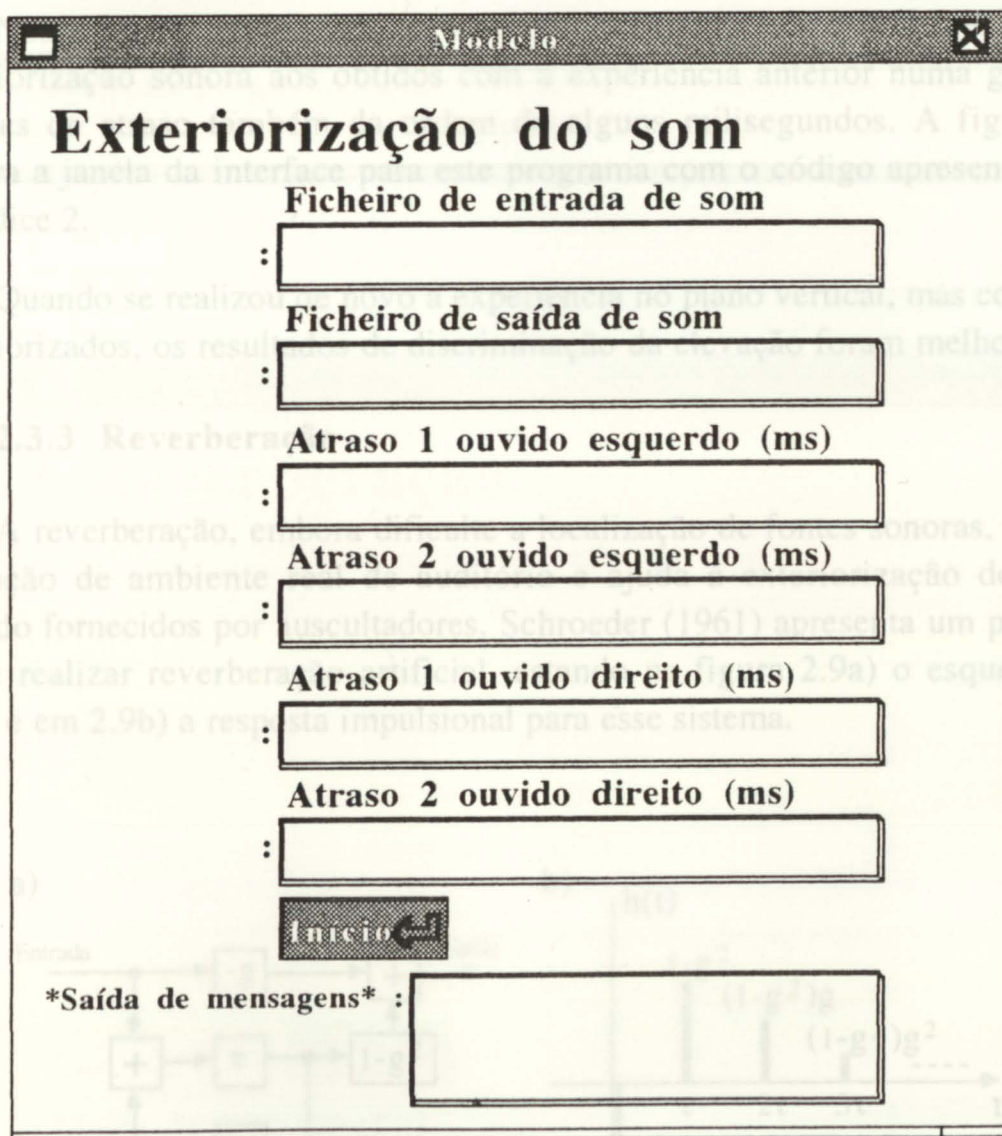


Fig. 2.8 - Interface do modelo de exteriorização de sons.

Num trabalho realizado através de auscultadores, Sakamoto, Gotoh e Kimura (1976) concluíram que um dos factores importantes para se obter localização extra-cranial é a razão entre a energia do som directo e reflectido. Numa experiência realizada, demonstraram que é possível exteriorizar fontes

sonoras utilizando o sinal directo com sinais atrasados, com valores de atraso entre 5-20 ms, sendo as expressões utilizadas

$$y_d(t) = x(t) + x(t-\tau_{11}) + x(t-\tau_{12})$$

$$y_e(t) = x(t) + x(t-\tau_{21}) + x(t-\tau_{22}) . \quad (2.9)$$

Neste caso, obtiveram-se resultados semelhantes de extensão de exteriorização sonora aos obtidos com a experiência anterior numa gama de valores de atraso também da ordem de alguns milisegundos. A figura 2.8 mostra a janela da interface para este programa com o código apresentado no apêndice 2.

Quando se realizou de novo a experiência no plano vertical, mas com sons exteriorizados, os resultados de discriminação da elevação foram melhores.

2.3.3 Reverberação

A reverberação, embora dificulte a localização de fontes sonoras, dá uma sensação de ambiente real de auditório e ajuda à exteriorização dos sons quando fornecidos por auscultadores. Schroeder (1961) apresenta um processo de se realizar reverberação artificial, estando na figura 2.9a) o esquema do filtro e em 2.9b) a resposta impulsional para esse sistema.

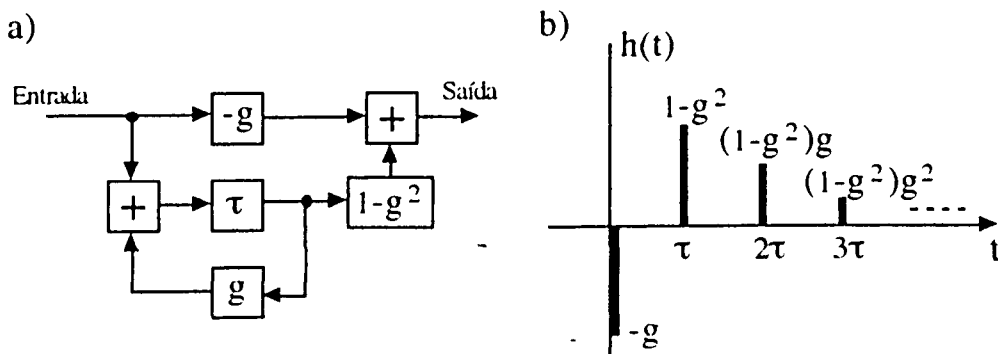


Fig. 2.9 - a) Filtro e b) resposta impulsional.

A função de transferência para criação de reverberação tem a seguinte expressão

$$H(\omega) = e^{-j\omega\tau} \frac{1 - ge^{j\omega\tau}}{1 - ge^{-j\omega\tau}} \quad (2.11) \quad (2.10)$$

com " τ " o atraso impulsional e " g ", o ganho. O módulo desta função de transferência é unitário, como é pretendido. A figura 2.10 apresenta a janela da interface deste programa, sendo o código de implementação apresentado no apêndice 3. Neste caso, para calcular a FFT do sinal (longo) de entrada de um modo que não provocasse "aliasing" nos tempos foi utilizado a técnica apresentada em Randall (1987).

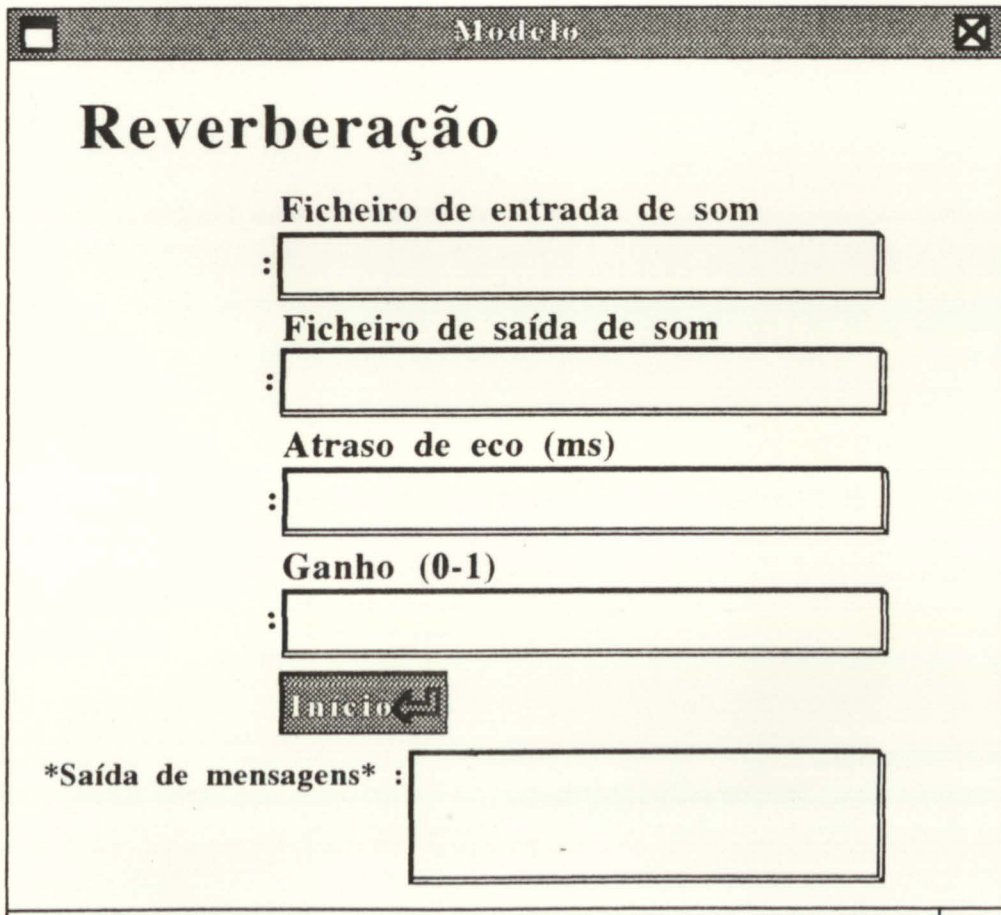


Fig. 2.10 - Janela do programa de reverberação.

O tempo de reverberação, definido como o tempo necessário para que o nível sonoro desça 60 dB, é dado pela expressão

$$T = \frac{3\tau}{\log(1/g)} \quad (2.11)$$

Como se pode ver por esta expressão, aumentar o atraso aumenta o tempo de reverberação mas, por outro lado, a densidade de ecos diminui. Para se obter uma maior densidade de ecos pode-se filtrar o som várias vezes em série com valores de atraso cada vez menores. Obtém-se bons resultados com valores de atraso de cerca 1/3 do valor anterior e com o valor dos ganhos à volta de 0,7.

Conclusões

3 Conclusões e trabalhos futuros

Com o resumo da pesquisa bibliográfica, apresentado no primeiro capítulo, e os programas de simulação desenvolvidos, adquiriu-se bastante informação sobre a habilidade do sistema auditivo em localizar fontes sonoras no espaço tridimensional e sobre a possibilidade de simular com processamento de sinal a posição de fontes no espaço.

Segue-se um resumo-conclusão de todo o trabalho efectuado e a apresentação do trabalho futuro, de investigação, que se pensa desenvolver a partir do conhecimento do campo, obtido com a elaboração desta Tese de Mestrado.

3.1 Resumo-conclusão

Nós ouvimos os sons que nos chegam devido à acção do ouvido interno e sistema nervoso central. Quando os sinais atingem a membrana timpânica contém toda a informação necessária à localização espacial das fontes sonoras. Essa informação foi inserida no sinal pelo sistema auditivo externo, as transformações provocadas pela aurícula, cabeça e ombros.

O ouvido médio actua como um transformador que recebe a energia sonora e transforma-a em energia mecânica, com controlo de ganho.

O ouvido interno transforma a energia mecânica e transforma-a em energia eléctrica. Para isso o cóclea contém um conjunto de fibras que, quando em vibração, accionam pequenos cílios que geram descargas de impulsos nervosos. O nervo auditivo é o responsável por transmitir essa informação ao cérebro, sendo a informação auditiva codificada nos padrões temporais dos impulsos e na taxa de descarga dos mesmos. Cada frequência activa uma zona específica da cóclea.

A localização auditiva de fontes sonoras não é precisa. Para qualquer ponto do espaço um ouvinte comete erros na detecção da fonte. Os erros aumentam com o azimute e com a elevação, mas com maiores erros na

Conclusões e trabalhos futuros

elevação. O ângulo mínimo audível mede a resolução do sistema auditivo. Um erro bastante frequente na tarefa de localização é devido ao facto do ouvinte perceber como vindo detrás um som emitido por uma fonte frontal ou vice versa.

Para localizar sons, o sistema auditivo dispõe de dois tipos de procedimentos, os biauriculares, onde necessita dos dois ouvidos, e monauriculares, que só requerem um dos ouvidos.

A localização no azimute é predominantemente biauricular, dependendo das diferenças interauriculares entre os sinais que chegam aos dois ouvidos: as diferenças de tempo e intensidade.

Às baixas frequências, a diferença de tempo interauricular é o principal procedimento para a localização enquanto que, devido aos fenómenos de difracção, a diferença de intensidade interauricular tem um papel secundário.

Para frequências acima de 1400-1600 Hz, o comprimento de onda é da mesma ordem que o tamanho da cabeça, provocando sombreamento sonoro do ouvido mais afastado, de modo que a diferença de intensidade interauricular começa a desempenhar um papel dominante. A diferença de tempo interauricular do sinal da portadora deixa de funcionar devido à ambiguidade de fase e passa a actuar a diferença de tempo das envolventes.

Grande parte da investigação tem-se baseado na apresentação auditiva por auscultadores, conseguindo-se simular facilmente o efeito das diferenças interauriculares na localização sonora. Este processo foi designado por lateralização, uma vez que as imagens auditivas encontram-se dentro da cabeça.

Se as diferenças interauriculares variarem fortemente com a frequência ou se a sua relação não for natural, em vez de uma imagem sonora podem surgir várias imagens em pontos diferentes do espaço.

Quando um dado ouvinte dispõe de apenas um ouvido, a localização continua a ser possível embora com maiores erros. Neste caso, os procedimentos são de natureza monauricular caracterizados pelas variações de intensidade do sinal no ouvido activo.

O programa desenvolvido permitiu comprovar a facilidade de simulação de rotação de fontes no plano horizontal e os resultados obtidos coincidem com os apresentados na literatura.

A localização da elevação depende principalmente das variações espectrais provocadas pela aurícula, cabeça e tronco que provocam picos e vales no espectro do sinal de cada ouvido, sendo, deste modo, de natureza monauricular. O efeito da cabeça funciona a partir de cerca de 1 KHz enquanto que a aurícula, sendo mais pequena, só começa a operar à volta de 4 KHz. Foi verificado a existência de picos e vales que variavam no espectro com a variação da elevação.

Ao contrário da localização horizontal, a localização vertical exige espectro às altas frequências, para conter as transformações espectrais acima indicadas. Cada vez mais se considera a possibilidade dos procedimentos biauriculares para localização vertical: pressupõe-se que as variações espectrais funcionam até uma dada elevação mas a localização nas elevações mais altas é auxiliada pelas diferenças interauriculares.

Enquanto que as diferenças interauriculares têm sido largamente exploradas, os principais procedimentos para localização vertical ainda estão longe de serem compreendidos. De modo particular, no que diz respeito aos picos e vales existentes no espectro das funções de transferência do ouvido, embora se saiba serem importantes para indicação da elevação, ainda se desconhece a relação exacta com a elevação.

O programa desenvolvido permitiu comprovar a dificuldade de simulação de posicionamento de fontes no plano vertical. Mesmo o sistema mais avançado de simulação existente no HITL (centro tecnológico de Washington), um dos laboratórios mais avançados neste campo, que usa técnicas de mapeamento e interpolação de parâmetros medidos, não dá grandes resultados na simulação no plano vertical, como foi possível comprovar numa visita a esses laboratórios.

A discriminação frente/trás, ou seja, para evitar que as fontes localizadas à frente do indivíduo sejam percebidas atrás ou vice-versa, também é exigido espectro às altas frequências, como acontecia para a localização da elevação. Para este caso, foi ainda verificado a importância das variações microscópicas

do sinal abaixo de 2 KHz. A maneira como cada frequência influencia este fenómeno também ainda não é totalmente conhecida.

Os movimentos da cabeça, para o caso de sinais com duração superior a 200-300 ms, permitem evitar as confusões frente/trás.

A percepção da distância é em geral bastante difícil quando não existe um nível de referência do sinal a localizar ou quando o ouvinte não está familiarizado com o sinal a detectar. Para mais, o nível sonoro não varia de uma forma linear com a distância. Para distâncias inferiores a cerca de 3 metros, as frentes de onda deixam de ser planas provocando variação no nível e na frequência do sinal. Para distâncias entre cerca de 3 a 15 metros, o nível cai cerca de 6 dB por cada dobro da distância segundo a lei $1/r$. Acima de 15 metros, o nível também varia segundo a lei $1/r$ mas existe ainda atenuação atmosférica a somar a esta variação.

Quando existem múltiplas fontes sonoras ou quando a localização é efectuada em espaços reverberantes surgem efeitos que demonstram a habilidade do sistema auditivo em discriminar os sons nessa situação.

Nos espaços reverberantes, a informação das primeiras formas de onda são as mais importantes. Enquanto que, até um dado atraso, as reflexões contribuem para a localização conjuntamente com o sinal directo, acima de cerca 1 ms as reflexões deixam de ter efeito, sendo a posição da imagem auditiva determinada principalmente pelo sinal directo. Este fenómeno é designado por efeito de precedência e ajuda o ouvinte na localização em ambientes fechados.

As reflexões têm um efeito de alargamento da imagem auditiva, dando a sensação de espaço amplo neste tipo de ambientes.

Acima de um dado valor de atraso das reflexões relativamente ao sinal directo (dependente do tipo de sinal, duração, etc) começam a surgir ecos nas posições da reflexão, sendo esse o valor limite para operação do efeito de precedência. Para atrasos acima de cerca 80 ms, as reflexões dão origem a reverberação e o campo sonoro torna-se difuso.

Mesmo quando existem múltiplas fontes sonoras, o sistema auditivo consegue, normalmente, discriminar uma dada fonte apesar da existência das

restantes. Este efeito, designado por "cocktail party", é facilitado se a audição for binauricular, pois neste caso um sinal proveniente de uma dada direcção é menos mascarado por um outro indesejado. Então, se o sinal mascarador e o sinal a detectar estiverem em posições diferentes do espaço, o limite de mascaramento binauricular é inferior permitindo a detecção da fonte.

Os programas desenvolvidos para o suporte computacional, disponível, mais adequado ao processamento de som, e apresentados no segundo capítulo desta tese, usam modelos matemáticos, obtidos através da bibliografia, que permitem obter o efeito desejado no sinal audível em auscultadores. Nestes programas, apresentados em apêndice, o primeiro coloca qualquer fonte sonora em qualquer ponto do plano horizontal, ou seja, é um sistema de localização no azimute, o segundo permite a exteriorização do som e o terceiro cria reverberação para se obter alguma sensação de espaço reverberante.

Cada programa pode processar qualquer ficheiro sonoro para simulação do efeito desejado ou podem ser incluídos os vários efeitos no mesmo ficheiro se ele for processado pelos vários programas.

Os resultados obtidos com os sinais de teste usados na literatura para um determinado efeito, coincidem com aqueles apresentados para esse efeito.

Detectou-se, ainda, a necessidade de se efectuar muita investigação para que se possa compreender completamente como o sistema auditivo obtém, dos sinais sonoros de entrada nos ouvidos, a informação necessária para perceber as várias características auditivas e espaciais.

No campo da localização de fonte sonora, embora já se conheçam vários procedimentos de localização, é necessário a sua compreensão mais completa, principalmente no que diz respeito à localização horizontal monauricular, localização vertical e discriminação frente/trás.

Uma das razões que pode levar ao pouco conhecimento do procedimentos monauriculares pode dever-se ao facto de que alterações espectrais provocadas pela aurícula, cabeça e tronco só relativamente há pouco tempo é que foram consideradas. É necessário, ainda, continuar a investigação no sentido de se construir modelos que permitam simular de modo mais real a posição de uma fonte sonora em qualquer zona do espaço e o efeito de um "ambiente espacial"

desejado, determinando as características dos sinais, no tempo e nas frequências, que permitem melhorar o desempenho de simulação dos procedimentos de localização utilizados.

3.2 Trabalhos futuros

Entre as várias linhas de investigação neste campo, detectado com o trabalho efectuado, o autor e o grupo onde está inserido pensam encaminhar o trabalho futuro para o aperfeiçoamento da simulação tridimensional.

O conhecimento dos procedimentos de localização espacial e o avanço tecnológico permitiram aos investigadores a criação de modelos e sistemas capazes de simularem fontes sonoras no espaço tridimensional e outros efeitos auditivos. Começam, então, a surgir alguns sistemas comerciais de som tridimensional que permitem criar e manipular sistemas acústicos virtuais com aplicação em telecomunicações, teleconferência, controlo de tráfego, simuladores, sistemas de realidade virtual, entre outros, alguns deles apresentados no apêndice 4. Grande parte desses sistemas fazem uso das funções de transferência medidas nos ouvidos. O problema encontrado na utilização das funções de transferência do ouvido é o aumento do erro de elevação e de inversões frente/trás, principalmente quando as funções de transferência não são as do próprio ouvinte.

A simulação neste campo necessita, assim, de bastante trabalho de aperfeiçoamento.

Os futuros trabalhos pretendem investigar os vários procedimentos para localização espacial, de modo a obter um sistema de simulação da localização mais perfeito, com modelos que permitam a obtenção de efeitos mais perto da realidade auditiva que os actuais.



Apêndices

Apêndice 1 - Programa de localização horizontal

```

#import "ObjPrincipal.h"
#import <appkit/Form.h>
#import <appkit/Slider.h>
#import <appkit/appkit.h>
#import <dsp/arrayproc.h>
#import <math.h>
#import <stdio.h>
#import <sound/sound.h>
#import <soundkit/soundkit.h>

#define NPontos 1024
#define NPontosEnt NPontos/2
#define NPontosSob NPontos-NPontosEnt
#define EndDados DSPAPGetLowestAddressXY()
#define EndParteReal DSPMapPMemX(EndDados)
#define EndParteImag DSPMapPMemY(EndDados)
#define EndTabela EndDados+NPontos
#define EndTabelaSin DSPMapPMemY(EndTabela)
#define EndTabelaCos DSPMapPMemX(EndTabela)
#define Buffer_UNSHUFFLE DSPMapPMemX(EndTabela+NPontos/2)
#define EndFiltro1 DSPMapPMemY(EndTabela+NPontos/2)
#define EndFiltro2 DSPMapPMemY(EndTabela+3*NPontos/2)
#define ESCAL DSP_FLOAT_TO_INT(1.0/NPontos)
#define MAXIMO 8388607 /*máximo positivo do DSP*/
#define PI 4.0*atan(1.0)

@implementation ObjPrincipal

- Calcula:sender
{
    float *TabSin=DSPAPSinTable(NPontos);
    float *TabCos=DSPAPCosTable(NPontos);
    short ParteReal[NPontos],*VectorEnt,*VectorSai;
    const char *ficheiroEnt,*ficheiroSai;
    SNDSoundStruct *SomEntrada,*SomSaida;
    int erro,tamanho,NTramas,canal,i,k,azimute,azimuteAux;
    float FiltroEsqReal[NPontos],FiltroEsqImag[NPontos];
    float FiltroDirReal[NPontos],FiltroDirImag[NPontos];
    short *inPtr;
    short *outPtr;
    char PathEnt[|= "/amandio/Som/ExFFT/DifBiaurSomFreq/";
    char PathSai[|= "/amandio/Som/ExFFT/DifBiaurSomFreq/";
    char PathEntrada[80],PathSaida[80];
    float atenuaPinna.atenua1.atenua2.atenua3.atraso1.atraso2,freq;

    [Entrada setStringValue:" " at:3];

    /* Entrada de dados */
    [Entrada selectTextAt:0];

```

Apêndice 1

```
ficheiroEnt=[Entrada stringValueAt:0];
for(i=0;i<strlen(PathEnt);i++)
    PathEntrada[i]=PathEnt[i];
for(i=0;i<=strlen(ficheiroEnt);i++)
    PathEntrada[i+strlen(PathEnt)]=ficheiroEnt[i];

    /* Lê ficheiro de som */
if (erro = SNDReadSoundfile(PathEntrada,&SomEntrada))
    Entrada stringValue:"Erro na abertura do ficheiro" at:3];
else
{
    tamanho=SomEntrada->dataSize/(2*sizeof(short));
    NTramas=tamanho/((int)NPontosEnt);
    if(tamanho>(NTramas*NPontosEnt))
        NTramas+=1;

    /* Aloca um novo som*/
    if (erro=SNDAlloc(&SomSaida,(int)(2*sizeof(short)*(NTramas*NPontosEnt+
        NPontosSob)), SomEntrada->dataFormat,SomEntrada-
>samplingRate,
        SomEntrada ->channelCount,4))
        [Entrada stringValue:"Erro na abertura do ficheiro" at:3];
    else
    {
        VectorEnt=(short *)calloc(NTramas*NPontosEnt,sizeof(short));
        VectorSai=(short *)calloc(NTramas*NPontosEnt+NPontosSob,sizeof(short));

        inPtr = (short *)((char *)SomEntrada+SomEntrada->dataLocation);
        outPtr = (short *)((char *)SomSaida+SomSaida->dataLocation);

        [Entrada selectTextAt:2];
        azimuth=[Entrada intValueAt:2];

        azimuthAux=fabs(azimuth);

        /* Equações de ganho e atraso */
        atenuaPinna=pow(10.0,(-3.0/20.0)*sin((double)(azimuth*PI/360.0)));

        if(azimuthAux>90)
            azimuthAux=180-azimuthAux;
        atenua1=pow(10.0,(-5.0/20.0)*sin((double)(azimuthAux*PI/180.0)));
        atenua2=pow(10.0,(-10.0/20.0)*sin((double)(azimuthAux*PI/180.0)));
        atenua3=pow(10.0,(-20.0/20.0)*sin((double)(azimuthAux*PI/180.0)));

        atenua1*=atenuaPinna;
        atenua2*=atenuaPinna;
        atenua3*=atenuaPinna;

        atraso1=772e-6*sin((double)(azimuthAux*PI/180.0));
        atraso2=257e-6*(azimuthAux*PI/180.0+sin((double)(azimuthAux*PI/180.0)));

        freq=(SomEntrada->samplingRate)/NPontos;

        /* Filtros do canal esquerdo e direito */
        if(azimuth<0)
```

Apêndice 1

```
{
  for(i=0;i<500/freq;i++)
  {
    FiltroDirReal[i]=atenua1*cos((double)(2*PI*freq*i*atraso1));
    FiltroDirImag[i]=atenua1*sin((double)(2*PI*freq*i*atraso1));
    FiltroEsqReal[i]=1.0;
    FiltroEsqImag[i]=0;
  }
  for(i=500/freq;i<1800/freq;i++)
  {
    FiltroDirReal[i]=atenua2*cos((double)(2*PI*freq*i*atraso2));
    FiltroDirImag[i]=atenua2*sin((double)(2*PI*freq*i*atraso2));
    FiltroEsqReal[i]=1.0;
    FiltroEsqImag[i]=0;
  }
  for(i=1800/freq;i<=NPontos/2;i++)
  {
    FiltroDirReal[i]=atenua3*cos((double)(2*PI*freq*i*atraso2));
    FiltroDirImag[i]=atenua3*sin((double)(2*PI*freq*i*atraso2));
    FiltroEsqReal[i]=atenuaPinna;
    FiltroEsqImag[i]=0;
  }
  for(i=NPontos/2;i<NPontos;i++)
  {
    FiltroDirReal[i]=FiltroDirReal[NPontos-i];
    FiltroDirImag[i]=-FiltroDirImag[NPontos-i];
    FiltroEsqReal[i]=FiltroEsqReal[NPontos-i];
    FiltroEsqImag[i]=0;
  }
}
else
{
  for(i=0;i<500/freq;i++)
  {
    FiltroEsqReal[i]=atenua1*cos((double)(2*PI*freq*i*atraso1));
    FiltroEsqImag[i]=atenua1*sin((double)(2*PI*freq*i*atraso1));
    FiltroDirReal[i]=1.0;
    FiltroDirImag[i]=0;
  }
  for(i=500/freq;i<1800/freq;i++)
  {
    FiltroEsqReal[i]=atenua2*cos((double)(2*PI*freq*i*atraso2));
    FiltroEsqImag[i]=atenua2*sin((double)(2*PI*freq*i*atraso2));
    FiltroDirReal[i]=1.0;
    FiltroDirImag[i]=0;
  }
  for(i=1800/freq;i<=NPontos/2;i++)
  {
    FiltroEsqReal[i]=atenua3*cos((double)(2*PI*freq*i*atraso2));
    FiltroEsqImag[i]=atenua3*sin((double)(2*PI*freq*i*atraso2));
    FiltroDirReal[i]=atenuaPinna;
    FiltroDirImag[i]=0;
  }
  for(i=NPontos/2;i<NPontos;i++)
  {
```

Apêndice 1

```
FiltroEsqReal[i]=FiltroEsqReal[NPontos-i];
FiltroEsqImag[i]=-FiltroEsqImag[NPontos-i];
FiltroDirReal[i]=FiltroDirReal[NPontos-i];
FiltroDirImag[i]=0;
}
}

/* Inicialização do DSP */
DSPSetErrorFP(stderr);
DSPEnableErrorLog();
DSPAPInit();

DSPAPWriteFloatArray(TabSin.EndTabelaSin,1,NPontos/2);
DSPAPWriteFloatArray(TabCos.EndTabelaCos,1,NPontos/2);

for(canal=0;canal<2;canal++)
{
    for(i=0;i<tamanho;i++)
        VectorEnt[i]=inPtr[2*i+canal];
    for(i=tamanho;i<(NTramas*NPontosEnt);i++)
        VectorEnt[i]=0;

    if(canal==0)
    {
        DSPAPWriteFloatArray(FiltroDirReal,EndFiltro1,1,NPontos);
        DSPAPWriteFloatArray(FiltroDirImag,EndFiltro2,1,NPontos);
    }
    else
    {
        DSPAPWriteFloatArray(FiltroEsqReal,EndFiltro1,1,NPontos);
        DSPAPWriteFloatArray(FiltroEsqImag,EndFiltro2,1,NPontos);
    }
}

/* Aplicação do método "Overlap-And-Add" */
for(k=0;k<NTramas;k++)
{
    for(i=0;i<NPontosEnt;i++)
        ParteReal[i]=VectorEnt[i+k*NPontosEnt];

    DSPAPWriteShortArray(ParteReal,EndParteReal,1,NPontosEnt);
    DSPAPvclear(EndParteReal+NPontosEnt,1,NPontosSob);
    DSPAPvclear(EndParteImag,1,NPontos);

    DSPAPfftr2a(NPontos,EndDados,EndTabela);

    DSPAPvmovebr(EndParteReal,NPontos/2,Buffer_UNSHUFFLE,1,NPontos);
    DSPAPvmove(Buffer_UNSHUFFLE,1,EndParteReal,1,NPontos);
    DSPAPvmovebr(EndParteImag,NPontos/2,Buffer_UNSHUFFLE,1,NPontos);
    DSPAPvmove(Buffer_UNSHUFFLE,1,EndParteImag,1,NPontos);

    DSPAPvtvpvtv(EndParteReal,1,EndFiltro1,1,EndParteImag,1,EndFiltro2,1,
                 Buffer_UNSHUFFLE,1,NPontos);
    DSPAPvtvmvtv(EndParteImag,1,EndFiltro1,1,EndParteReal,1,EndFiltro2,1,
                 EndParteImag,1,NPontos);
    DSPAPvmove(Buffer_UNSHUFFLE,1,EndParteReal,1,NPontos);
```

Apêndice 1

```
DSPAPvtsi(EndParteReal,1,ESCAL,EndParteReal,1,NPontos);
DSPAPvtsi(EndParteImag,1,-(ESCAL),EndParteImag,1,NPontos);
```

```
DSPAPfftr2a(NPontos,EndDados.EndTabela);
```

```
DSPAPvmovebr(EndParteReal,NPontos/2,Buffer_UNSHUFFLE,1,NPontos);
DSPAPReadShortArray(ParteReal,Buffer_UNSHUFFLE,1,NPontos);
```

```
if(k==0)
    for(i=0;i<NPontos;i++)
        VectorSai[i]=ParteReal[i];
else
{
    for(i=0;i<NPontosSob;i++)
        VectorSai[i+k*NPontosEnt]+=ParteReal[i];
    for(i=NPontosSob;i<NPontos;i++)
        VectorSai[i+k*NPontosEnt]=ParteReal[i];
}
}
for(i=0;i<(NTramas*NPontosEnt+NPontosSob);i++)
    outPtr[2*i+canal]=VectorSai[i];
}
```

```
DSPAPFree();
```

```
[Entrada selectTextAt:1];
ficheiroSai=[Entrada stringValueAt:1];
for(i=0;i<strlen(PathSai);i++)
    PathSaida[i]=PathSai[i];
for(i=0;i<=strlen(ficheiroSai);i++)
    PathSaida[i+strlen(PathSai)]=ficheiroSai[i];
```

```
/* Escreve o ficheiro de sa.da */
```

```
if (erro=SNDWriteSoundfile(PathSaida,SomSaida))
    [Entrada setStringValue:"Erro na abertura do ficheiro" at:3];
else
    [Saida setFloatValue:(float)tamanho/100000.0];
}
```

```
}
```

```
return self;
```

```
}
```

```
@end
```

Apêndice 2 - Programa de exteriorização de som

```

#import "exper.h"
#import <appkit/Form.h>
#import <appkit/appkit.h>
#import <dsp/arrayproc.h>
#import <sound/sound.h>
#import <soundkit/soundkit.h>
#import <stdio.h>
#import <math.h>

#define PI 4.0*atan(1.0)

@implementation exper

- calc:sender
{
    SNDSoundStruct *SomEntrada,*SomSaida;
    int erro,i,var,atrasoAmostras11,atrasoAmostras12,atrasoAmostras21,atrasoAmostras22;
    int atraso11,atraso12,atraso21,atraso22;
    short *inPtr;
    short *outPtr;
    const char *fichEnt, *fichSai;
    float AmostTemp;
    char PathEnt[]="/amandio/Som/ExDSPSom/ExteriorizaSom/";
    char PathSai[]="/amandio/Som/ExDSPSom/ExteriorizaSom/";
    char PathEntrada[80],PathSaida[80];

    [saida setStringValue:@"" at:6];

    [saida selectTextAt:0];
    fichEnt=[saida stringValueAt:0];
    for(i=0;i<strlen(PathEnt);i++)
        PathEntrada[i]=PathEnt[i];
    for(i=0;i<=strlen(fichEnt);i++)
        PathEntrada[i+strlen(PathEnt)]=fichEnt[i];

    /* Lê ficheiro de som */
    if (erro = SNDReadSoundfile(PathEntrada,&SomEntrada))
        [saida setStringValue:"Erro na abertura do ficheiro" at:6];
    else
    {
        /* Aloca um novo som*/
        if (erro=SNDAAlloc(&SomSaida,SomEntrada->dataSize, SomEntrada->dataFormat,
            SomEntrada->samplingRate,SomEntrada->channelCount,4))
            [saida setStringValue:"Erro na criação do ficheiro" at:6];
        else
        {
            var=(SomEntrada->dataSize)/4;

            [saida selectTextAt:2];

```

Apêndice 2

```
atraso11=[saida intValueAt:2];
saida selectTextAt:3];
atraso12=[saida intValueAt:3];
[saida selectTextAt:4];
atraso21=[saida floatValueAt:4];
[saida selectTextAt:5];
atraso22=[saida floatValueAt:5];

AmostTemp=1.0/(SomEntrada->samplingRate);
atrasoAmostras11=atraso11*1e-3/AmostTemp;
atrasoAmostras12=atraso12*1e-3/AmostTemp;
atrasoAmostras21=atraso21*1e-3/AmostTemp;
atrasoAmostras22=atraso22*1e-3/AmostTemp;

inPtr = (short *)((char *)SomEntrada+SomEntrada->dataLocation);
outPtr = (short *)((char *)SomSaida+SomSaida->dataLocation);

for(i=0;i<atrasoAmostras11;i++)
    outPtr[2*i]=inPtr[2*i]/3;
for(i=0;i<atrasoAmostras21;i++)
    outPtr[2*i+1]=inPtr[2*i+1]/3;

for(i=atrasoAmostras11;i<atrasoAmostras12;i++)
    outPtr[2*i]=inPtr[2*i]/3+inPtr[2*(i-atrasoAmostras11)]/3;
for(i=atrasoAmostras21;i<atrasoAmostras22;i++)
    outPtr[2*i+1]=inPtr[2*i+1]/3+inPtr[2*(i-atrasoAmostras21)+1]/3;

for(i=atrasoAmostras12;i<var;i++)
    outPtr[2*i]=inPtr[2*i]/3+inPtr[2*(i-atrasoAmostras11)]/3+
                inPtr[2*(i-atrasoAmostras12)]/3;
for(i=atrasoAmostras22;i<var;i++)
    outPtr[2*i+1]=inPtr[2*i+1]/3+inPtr[2*(i-atrasoAmostras21)+1]/3+
                inPtr[2*(i-atrasoAmostras22)+1]/3;

[saida selectTextAt:1];
fichSai=[saida stringValueAt:1];
for(i=0;i<strlen(PathSai);i++)
    PathSaida[i]=PathSai[i];
for(i=0;i<=strlen(fichSai);i++)
    PathSaida[i+strlen(PathSai)]=fichSai[i];

    /* Escreve o ficheiro de saida */
    if (erro=SNDWriteSoundfile(PathSaida,SomSaida))
        [saida setStringValue:"Erro na escrita do ficheiro" at:6];
}
}

return self;
}

@end
```

Apêndice 3 - Programa de reverberação

```

#import "ObjPrincipal.h"
#import <appkit/Form.h>
#import <appkit/Slider.h>
#import <appkit/appkit.h>
#import <dsp/arrayproc.h>
#import <math.h>
#import <stdio.h>
#import <sound/sound.h>
#import <soundkit/soundkit.h>

#define NPontos 1024
#define EndDados DSPAPGetLowestAddressXY()
#define EndParteReal DSPMapPMemX(EndDados)
#define EndParteImag DSPMapPMemY(EndDados)
#define EndTabela EndDados+NPontos
#define EndTabelaSin DSPMapPMemY(EndTabela)
#define EndTabelaCos DSPMapPMemX(EndTabela)
#define Buffer_UNSHUFFLE DSPMapPMemX(EndTabela+NPontos/2)
#define pi 4.0*atan(1.0)

@implementation ObjPrincipal

- Calcula:sender
{
    float *TabSin=DSPAPSinTable(NPontos);
    float *TabCos=DSPAPCosTable(NPontos);
    short ParteReal[NPontos],ParteImag[NPontos],*Vector;
    float var1,var2,*FreqReal,*FreqImag,ParteRealI[NPontos],ParteImagI[NPontos];
    float atraso,ganho,aux,aux1,FillR,FillI,freq;
    int i,j,k,canal;
    SNDSoundStruct *SomEntrada,*SomSaida;
    int erro,tamanho,NTramas;
    short *inPtr;
    short *outPtr;
    const char *fichEnt, *fichSai;
    char PathEnt[1024]="/amandio/Som/ExFFT/Reverberacao/";
    char PathSai[1024]="/amandio/Som/ExFFT/Reverberacao/";
    char PathEntrada[80],PathSaida[80];

    [Entrada setStringValue:@"" at:4];

    [Entrada selectTextAt:0];
    fichEnt=[Entrada stringValueAt:0];
    for(i=0;i<strlen(PathEnt);i++)
        PathEntrada[i]=PathEnt[i];
    for(i=0;i<=strlen(fichEnt);i++)
        PathEntrada[i+strlen(PathEnt)]=fichEnt[i];

    [Entrada selectTextAt:2];

```

Apêndice 3

```
atraso=[Entrada floatValueAt:2];
atraso*=1e-3;
[Entrada selectTextAt:3];
ganho=[Entrada floatValueAt:3];

/* Lê ficheiro de som */
if (erro = SNDReadSoundfile(PathEntrada,&SomEntrada))
    [Entrada setStringValue:"Erro na abertura do ficheiro" at:4];
else
{
    /* Aloca um novo som */
    if (erro=SNDAlloc(&SomSaida,SomEntrada->dataSize,SomEntrada->dataFormat,
        SomEntrada->samplingRate,SomEntrada->channelCount,4))
        [Entrada setStringValue:"Erro na criação do ficheiro" at:4];
    else
    {
        tamanho=SomEntrada->dataSize/(2*sizeof(short));
        NTramas=tamanho/NPontos;
        if(tamanho>(NTramas*NPontos))
            NTramas+=1;
        Vector=(short *)calloc(NTramas*NPontos,sizeof(short));
        FreqReal=(float *)calloc(NTramas*NPontos,sizeof(float));
        FreqImag=(float *)calloc(NTramas*NPontos,sizeof(float));

        for(i=0;i<(NTramas*NPontos);i++)
            FreqReal[i]=FreqImag[i]=0.0;

        inPtr = (short *)((char *)SomEntrada+SomEntrada->dataLocation);
        outPtr = (short *)((char *)SomSaida+SomSaida->dataLocation);

        freq=(SomEntrada->samplingRate)/(NPontos*NTramas);

        for(canal=0;canal<2;canal++)
        {
            for(i=0;i<tamanho;i++)
                Vector[i]=inPtr[2*i+canal];
            for(i=tamanho;i<(NTramas*NPontos);i++)
                Vector[i]=0;
            for(i=0;i<NTramas*NPontos;i++)
                FreqReal[i]=FreqImag[i]=0;

            DSPSetErrorFP(stderr);
            DSPEnableErrorLog();
            DSPAPIinit();

            DSPAPWriteFloatArray(TabSin,EndTabelaSin,1,NPontos/2);
            DSPAPWriteFloatArray(TabCos,EndTabelaCos,1,NPontos/2);

            for(k=0;k<NTramas;k++)
            {
                for(i=0;i<NPontos;i++)
                {
                    ParteReal[i]=Vector[i*NTramas+k];
                    ParteImag[i]=0;
                }
            }
        }
    }
}
```

Apêndice 3

```
DSPAPWriteShortArray(ParteReal,EndParteReal,1,NPontos);
DSPAPWriteShortArray(ParteImag,EndParteImag,1,NPontos);

DSPAPfftr2a(NPontos,EndDados,EndTabela);

DSPAPvmovebr(EndParteReal,NPontos/2,Buffer_UNSHUFFLE.1,NPontos);
DSPAPReadFloatArray(ParteReal1,Buffer_UNSHUFFLE.1,NPontos);
DSPAPvmovebr(EndParteImag,NPontos/2,Buffer_UNSHUFFLE.1,NPontos);
DSPAPReadFloatArray(ParteImag1,Buffer_UNSHUFFLE.1,NPontos);

for(i=0;i<NTramas;i++)
  for(j=0;j<NPontos;j++)
  {
    var1=cos(2.0*pi*((double)((j+i*NPontos)*k))/((double)(NTramas*
      NPontos)));
    var2=sin(2.0*pi*((double)((j+i*NPontos)*k))/((double)(NTramas*
      NPontos)));
    FreqReal[j+i*NPontos]+=ParteReal1[j]*var1+ParteImag1[j]*var2;
    FreqImag[j+i*NPontos]+=ParteImag1[j]*var1-ParteReal1[j]*var2;
  }
}

/* Filtro de reverberação */
for(i=0;i<=(NPontos*NTramas/2);i++)
{
  aux=1+ganho*ganho-2*ganho*cos((double)(2*pi*freq*i*atraso));
  FilR=((1+ganho*ganho)*cos((double)(2*pi*freq*i*atraso))-2*ganho)/aux;
  Fill=(ganho*ganho-1)*sin((double)(2*pi*freq*i*atraso))/aux;
  aux1=FilR*FreqReal[i]-Fill*FreqImag[i];
  FreqImag[i]=FilR*FreqImag[i]+Fill*FreqReal[i];
  FreqReal[i]=aux1;
}
for(i=(NPontos*NTramas/2);i<NPontos*NTramas;i++)
{
  FreqReal[i]=FreqReal[NPontos*NTramas-i];
  FreqImag[i]=-FreqImag[NPontos*NTramas-i];
}

for(i=0;i<NTramas*NPontos;i++)
  Vector[i]=0;

for(k=0;k<NTramas;k++)
{
  for(i=0;i<NPontos;i++)
  {
    ParteReal1[i]=FreqReal[i*NTramas+k];
    ParteImag1[i]=FreqImag[i*NTramas+k];
  }

  DSPAPWriteFloatArray(ParteReal1,EndParteReal,1,NPontos);
  DSPAPWriteFloatArray(ParteImag1,EndParteImag,1,NPontos);

  DSPAPvtisi(EndParteReal,1,DSP_FLOAT_TO_INT(1.0/(NTramas*NPontos)),
    EndParteReal,1,NPontos);
}
```

Apêndice 3

```
DSPAPvtsi(EndParteImag,1,-(DSP_FLOAT_TO_INT(1.0/(NTramas*
NPontos))), EndParteImag,1,NPontos);

DSPAPfftr2a(NPontos,EndDados,EndTabela);

DSPAPvmovebr(EndParteReal,NPontos/2,Buffer_UNSHUFFLE,1,NPontos);
DSPAPReadShortArray(ParteReal,Buffer_UNSHUFFLE,1,NPontos);
DSPAPvmovebr(EndParteImag,NPontos/2,Buffer_UNSHUFFLE,1,NPontos);
DSPAPReadShortArray(ParteImag,Buffer_UNSHUFFLE,1,NPontos);

for(i=0;i<NTramas;i++)
    for(j=0;j<NPontos;j++)
    {
        var1=cos(2.0*pi*((double)((j+i*NPontos)*k))/((double)(NTramas*
NPontos)));
        var2=sin(2.0*pi*((double)((j+i*NPontos)*k))/((double)(NTramas*
NPontos)));
        Vector[j+i*NPontos]+=ParteReal[j]*var1+ParteImag[j]*var2;
    }
}

DSPAPFree();

for(i=0;i<tamanho;i++)
    outPtr[2*i+canal]=Vector[i];
}

[Entrada selectTextAt:1];
fichSai=[Entrada stringValueAt:1];
for(i=0;i<strlen(PathSai);i++)
    PathSaida[i]=PathSai[i];
for(i=0;i<=strlen(fichSai);i++)
    PathSaida[i+strlen(PathSai)]=fichSai[i];

/* Escreve o ficheiro de saída */
if (erro=SNDWriteSoundfile(PathSaida,SomSaida))
    [Entrada setStringValue:"Erro na escrita do ficheiro" at:4];

[Saida setFloatValue:(float)tamanho/100000.0];
}
}
return self;
}

@end
```

Apêndice 4 - Sistemas comerciais de localização

Focal Point: sistema de localização biauricular para auscultadores, primeiramente para o sistema MacintoshII e agora também para PC, simula tridimensionalmente dois sons de um modo simultâneo e independente em tempo real.

Convoltron: sistema de processamento de sinais audio para auscultadores, para PC, permitindo colocar 4 fontes independentes no espaço (3D) em tempo real, com possibilidade de incorporação de reflexões de seis superfícies com características acústicas programáveis.

Beachtron: sistema de processamento de sinais audio para PC, que simula tridimensionalmente dois sons de um modo simultâneo e independente em tempo real.

Acoustetron: reúne um conjunto de aplicações para audio tridimensional, que, usando os processadores Convoltron e Beachtron, permite simular até 16 fontes sonoras em tempo real e no espaço anecóico e até 4 fontes sonoras num espaço reverberante.

Sound Space processor: simula imagens tridimensionais ao longo de uma linha usando dois auscultadores.

SoundHack: que recebe um ficheiro e coloca-o em qualquer ponto do azimute em tempo não real.

Spatializer: processador de audio que produz oito fontes espaciais móveis para o plano horizontal.

Intelliverb: processador que produz principalmente simulação dos efeitos em salas.

Referências

Referências

- Abel, S. M. e Kunov, H., "Lateralization based on interaural phase differences: Effects of frequency, amplitude, duration, and shape of rise/decay", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 73, N° 3, 1983
- Allen, J. B. e Berkley, D. A., "Image method for efficiently simulating small-room acoustics", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 65, N° 4, pag. 943-950, 1979
- Allen, J. B., "Cochlear micromechanics - a physical model of transduction", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, N° 6, pag. 1660-1670, 1980
- Allen, J. B., "Cochlear Modeling". *IEEE ASSP Magazine*, pag. 3-29, 1985
- Asano, F., Suzuki, Y. e Sone, T., "Role of spectral cues in median plane localization", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 88, N° 1, pag. 159-168, 1990
- Azevedo, J. A. R., "Utilização do DSP do NeXT no processamento do som". Início à dissertação da tese, 1993
- Babkoff, H., Sutton, S. e Barris, M., "Binaural interaction of transients: interaural time and intensity asymmetry", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 53, N° 4, pag. 1028-1036, 1973
- Barron, M. e Marshall, A. H., "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 77, N° 2, pag. 211-232, 1981.
- Barron, M., "The subjective effects of first reflections in concert halls-the need for lateral reflections", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 15, N° 4, pag. 475-494, 1971
- Begault, D. R. e Wenzel, E. M., "Headphone localization of speech", *Human Factors*, vol. 35, N° 2, pag. 361-376, 1993
- Bernstein, L. R. e Trahiotis, C., "Lateralization of sinusoidally amplitude--modulated tones: Effects of spectral locus and temporal variation", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 78, N° 2, 1985
- Blauert, J. e Cobben, W., "Some consideration of binaural cross correlation analysis", *Acustica*, vol. 39, pag. 96-104, 1978
- Blauert, J. e Lindemann, W., "Spatial mapping of intracranial auditory events for various degrees of interaural coherence", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 79, N° 3, pag. 806-813, 1986a
- Blauert, J. e Lindemann, W., "Auditory spaciousness: some further psychoacoustic analyses", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, N° 2, pag. 533-542, 1986b
- Blauert, J., "Localization and the law of the first wavefront in the median plane". *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 50, N° 2, pag. 466-470, 1971
- Blauert, J., "Sound localization in the median plane", *Acustica*, vol. 22, pag. 205-213, 1969/70
- Blauert, J., "Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization", MIT press, Cambridge, 1983

Referências

- Bloom, P. J. e Jones, P. J., "Lateralization thresholds based on interaural time differences for middle and high-frequency three-tone harmonic complexes", *Acustica*, vol. 39, N° 5, pag. 283-291, 1978
- Bloom, P. J., "Creating source elevation illusions by spectral manipulation", *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 25, N° 9, pag. 560-565, 1977
- Boer, E. e Mackay, R., "Reflections on reflections". *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 67, N° 3, pag. 882-890, 1980
- Borish, J., "Extension of the image model to arbitrary polyhedra", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 75, N° 6, pag. 1827-1836, 1984
- Braida, L. D., Davis, M. F. e Colburn, H. S., "Model for auditory localization", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 60, N° 5, pag. 1164-1175, 1976
- Burger, J. F., "Front-back discrimination of the hearing system", *Acustica*, vol. 8, pag. 301-302, 1958
- Burkhard, M. D. e Sachs, R. M., "Anthropometric manikin for acoustic research", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 58, N° 1, pag. 214-222, 1975
- Butler, R. A. e Belendiuk, K., "Spectral cues utilized in the localization of sound in the median sagittal plane", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 61, N° 5, pag. 1264-1269, 1977
- Butler, R. A. e Humanski, R. A., "Localization of sound in the vertical plane with and without high-frequency spectral cues", *Perception & Psychophysics*, vol. 51, N° 2, pag. 182-186, 1992
- Butler, R. A. e Planert, N., "The influence of stimulus bandwidth on localization of sound in space", *Perception & Psychophysics*, vol. 19, N° 1, pag. 103-108, 1976
- Chen, J., Van Veen, B. D. e Hecox, K. E., "External ear transfer function modeling: a beamforming approach", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 92, N° 4, pag. 1933-1944, 1992
- Colburn, H. S., "Theory of binaural interaction based on auditory-nerve data. I. General strategy and preliminary results on interaural discrimination", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 54, N° 6, pag. 1458-1470, 1973
- Colburn, H. S., "Theory of binaural interaction based on auditory-nerve data. II. Detection of tones in noise", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 61, N° 2, pag. 525-533, 1977
- Coleman, P. D., "Dual rôle of frequency spectrum in determination of auditory distance", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 44, N° 2, pag. 631-632, 1968
- Cooper, D. H. e Bauck, J. L., "Prospects for transaural recording", *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 37, N° 1/2, pag. 3-19, 1989
- Dye, R. H., Jr., "The combination of interaural information across frequencies: lateralization on the basis of interaural delay", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 88, N° 5, pag. 2159-2170, 1990

Referências

- Evans, E. F., "Basic Physiology of the Hearing Mechanism", The Proceedings of the AES 12th International Conference", Copenhagen, Denmark, pag. 11-21, 1993
- Gaik, W., "Combined evaluation of interaural time and intensity differences: psychoacoustic results and computer modeling, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 94, N° 1, pag. 98-110, 1993
- Gardner, M. B. e Gardner, R. S., "Problem of localization in the median plane: effect of pinnae cavity occlusion", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 53, N° 2, pag. 400-408, 1973
- Gardner, M. B., "Historical background of the haas and/or precedence effect", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 43, N° 6, pag. 1243-1248, 1968
- Gardner, M. B., "Some monaural and binaural facets of median plane localization", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 54, N° 6, pag. 1489-1495, 1973
- Gierlich, H. W. e Genuit, K., "Processing artificial-head recordings", Journal of the Audio Engineering Society, vol. 37, N° 1/2, pag. 34-39, 1989
- Gierlich, H. W., "The application of binaural technology". Applied Acoustics, vol. 36, pag. 219-243, 1992
- Giguère, C. e Abel, S. M., "Sound localization: effects of reverberation time, speaker array, stimulus frequency, and stimulus rise/decay", Journal of Acoustical Society of America, vol. 94, N° 2, pag. 769-776, 1993
- Griesinger, D., "Equalization and spatial equalization of dummy-head recordings for loudspeaker reproduction". Journal of the Audio Engineering Society, vol. 37, N° 1/2, pag. 20-29, 1989
- Guyton, Tratado de Fisiologia Médica, pag. 582-590, 1986
- Hafter, E. R. e Jeffress, L. A., "Two-image lateralization of tones and clicks", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 44, N° 2, pag. 563-569, 1968
- Hafter, E. R., Dye, R. H., Nuetzel, J. M. e Aronow, H., "Difference thresholds for interaural intensity", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 61, N° 3, pag. 829-834, 1977
- Hammershoi, D. e Moller, H., "Free-field sound transmission to the external ear: a model and some measurements", In Fortschritte der Akustik, DAGA 91, Bochum, pag. 473-477
- Hartmann, W. M., "Auditory Localization in Rooms", The Proceedings of the AES 12th International Conference", Copenhagen, Denmark, pag. 34-39, 1993
- Hartmann, W. M., "Localization of sound in rooms", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 74, N° 5, pag. 1380-1391, 1983
- Hebrank, J. e Wright, D., "Are two ears necessary for localization of sound sources on the median plane?", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 56, N° 3, pag. 935-938, 1974a

Referências

- Hebrank, J. e Wright, D., "Spectral cues used in the localization of sound sources on the median plane", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 56, N° 6, pag. 1829-1834, 1974b
- Hebrank, J. H., "Pinna disparity processing: a case of mistaken identity?", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 59, N° 1, pag. 220-221, 1976
- Heinz, R., "Binaural room simulation based on an image source model with addition of statistical methods to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberant tail". *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 145-159, 1993
- Henning, G. B., "Some observations on the lateralization of complex waveforms", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, N° 2, pag. 446-454, 1980
- Holmes, M. H., "Frequency discrimination in the mammalian cochlea: theory versus experiment", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 81, N° 1, pag. 103-114, 1987
- Hudde, H., "Measurement of the eardrum impedance of human ears", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 73, N° 1, pag. 242-247, 1983
- Humanski, R. A. e Butler, R. A., "The contribution of the near and far ear toward localization of sound in the sagittal plane", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83, N° 6, pag. 2300-2310, 1988
- Joswig, M., "Impulse response measurement of individual ear canals and impedances at the eardrum in man", *Acustica*, vol. 77, pag. 270-282, 1993
- Kates, J. M., "A time-domain digital cochlear model", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 39, N°12, pag. 2573-2592, 1991
- Kistler, D. J. e Wightman, F. L., "A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, N° 3, pag. 1637-1647, 1992
- Kleiner, M., Orłowski, R. e Kirszenstein, J., "A comparison between results from a physical scale model and a computer image source model for architectural acoustics", *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 245-265, 1993
- Kock, W. E., "Binaural localization and masking", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 22, N° 6, pag. 801-804, 1950
- Koenig, W. , "Subjective Effects in Binaural Hearing", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 22, N° 1, pag. 61-62, 1950
- Kompis, M. e Dillier, N., "Simulating transfer functions in a reverberant room including source directivity and head-shadow effects", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93, N° 5, pag. 2779-2787, 1993
- Kristiansen, U. R., Krokstad, A. e Follestad, T., "Extending the image method to higher-order reflections", *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 195-206, 1993
- Krokstad, A., Strom, S. e Sorsdal, S., "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique", *J. Sound Vib.*, vol.8, N° 1, pag. 118-125, 1968

Referências

- Krokstad, A., Strom, S. e Sorsdal, S., "Fifteen years' experience with computerized ray tracing", *Applied Acoustics*, vol. 16, pag. 291-312, 1983
- Kuc, R., "Introduction to Digital Signal Processing", McGraw-Hill, 1988
- Kuhn, G. F., "Model for the interaural time differences in the azimuthal plane", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, N° 1, pag. 157-167, 1977
- Kulowski, A., "Algorithmic representation of the ray tracing technique", *Applied Acoustics*, vol. 18, pag. 449-469, 1985
- Latimer, J. S. e Colburn, H. S., "Theory of binaural interaction based on auditory-nerve data. III. Joint dependence on interaural time and amplitude differences in discrimination and detection", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 64, N° 1, pag. 95-106, 1978
- Lee, H. e Lee, B. H., "An efficient algorithm for the image model technique", *Applied Acoustics*, vol. 24, pag. 87-115, 1988
- Lehnert, H. e Blauert, J., "A concept for binaural room simulation". *Workshop on Application of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 1989
- Lehnert, H. e Blauert, J., "Binaural room-simulation: basics and applications", *ICA 14 Beijing 1992a*
- Lehnert, H. e Blauert, J., "Aspects of auralization in binaural room simulation". *AES - 93rd Convention 1992 October 1-4 San Francisco*, 1992b
- Lehnert, H. e Blauert, J., "Principles of binaural room simulation". *Applied Acoustics*, vol. 36, pag. 259-291, 1992c
- Lehnert, H. e Blauert, J., "Virtual auditory environment", *5th International Conference on Advanced Robotics (IEEE/ICAR)*, Pisa, Italy, pag. 211-216, 1991
- Lehnert, H., "Auditory Spatial Impression", *The Proceedings of the AES 12th International Conference*, Copenhagen, Denmark, pag. 40-46, 1993a
- Lehnert, H., "Systematic errors of the ray-tracing algorithm", *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 207-221, 1993b
- Lewers, T., "A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics", *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 161-178, 1993
- Lindemann, W., "Extension of a binaural cross-correlation model by contralateral inhibition. I. Simulation of lateralization for stationary signals", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, N° 6, pag. 1608-1622, 1986a
- Lindemann, W., "Extension of a binaural cross-correlation model by contralateral inhibition. II. The law of the first wave front", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, N° 6, pag. 1623-1630, 1986b
- Loomis, J. M., Hebert, C. e Cicinelli, J. G., "Active localization of virtual sounds", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 88, N° 4, pag. 1757-1764, 1990
- Lyon, R. F. e Mead, C., "An analog electronic cochlea". *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 36, N° 7, pag. 1119-1134, 1988

Referências

- Makous, J. C. e Middlebrooks, J. C., "Two-dimensional sound localization by human listeners", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 87, N° 5, pag. 2188-2200, 1990
- Marwick, C., "Information accumulating on how brain "hears"", *Medical News & Perspectives*, vol. 261, N° 21, pag. 3077, 1989
- Mehrgardt, S. e Mellert, V., "Transformation characteristics of the external human ear", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 61, N° 6, pag. 1567-1576, 1977
- Middlebrooks, J. C. e Green, D. M., "Directional dependence of interaural envelope delays", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 87, N° 5, pag. 2149-2162, 1990
- Middlebrooks, J. C., Makous, J. C. e Green, D. M., "Directional sensitivity of sound-pressure levels in the human ear canal", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 86, N° 1, pag. 89-107, 1989
- Middlebrooks, J. C., "Narrow-band sound localization related to external ear acoustics", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 92, N° 5, pag. 2607-2624, 1992
- Mills, A. W., "On the minimum audible angle", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 30, N° 4, pag. 237-246, 1958
- Miyoshi, M. e Koizumi, N., "NNT's research on acoustics for future telecommunication services", *Applied Acoustics*, vol. 36, pag. 307-326, 1992
- Moller, H., "Reproduction of artificial-head recordings through loudspeakers", *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 37, N° 1/2, pag. 30-33, 1989
- Moller, H., "Fundamentals of binaural technology", *Applied Acoustics*, vol. 36, pag. 171-218, 1992
- Moller, H., Hammershoi, D., Hundeboll, J. V. e Jensen, C. B., "Transfer characteristics of headphones", *AES - 92nd Convention 1992 March 24-27 Vienna*, 1992
- Moller, H., "Interfacing room simulation programs and auralisation systems", *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 333-347, 1993
- Moore, B. C. J., "An introduction to the Psychology of Hearing", *Academic Press*, 3ª edition, 1992
- Moore, D., "Sound localization mechanisms", *Nature*, vol. 337, pag. 208-209, 1989
- Morimoto, M. e Maekawa, Z., "Effects of low frequency components on auditory spaciousness", *Acustica*, vol. 66, pag. 190-196, 1988
- Musicant, A. D. e Butler, R. A., "Influence of monaural spectral cues on binaural localization", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 77, N° 1, pag. 202-208, 1985
- Musicant, A. D. e Butler, R. A., "The influence of pinnae-based spectral cues on sound localization", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 75, N° 4, pag. 1195-1200, 1984
- Nakagawa, K., Miyajima, T. e Tahara, Y., "An improved geometrical sound field analysis in rooms using scattered sound and an audible room acoustic simulator", *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 115-129, 1993

Referências

- Naylor, G. M., "ODEON - another hybrid room acoustical model", *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 131-143, 1993
- Nichols, R. H., "Technical notes and research briefs", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 58, N° 6, pag. 1336-1339, 1975
- Nuetzel, J. M. e Hafter, E. R., "Lateralization of complex waveforms: effects of fine structure, amplitude, and duration", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 60, N° 6, pag. 1339-1346, 1976
- Oldfield, S. R. e Parker, S. P. A., "Acuity of sound localisation: a topography of auditory space. I. Normal hearing conditions", *Perception*, vol. 13, pag. 581-600, 1984a
- Oldfield, S. R. e Parker, S. P. A., "Acuity of sound localisation: a topography of auditory space. II. Pinna cues absent", *Perception*, vol. 13, pag. 601-617, 1984b
- Ondet, A. M. e Barbry, J. L., "Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, N° 2, pag. 787-796, 1989
- Payton, K. L., "Vowel processing by a model of the auditory periphery: a comparison to eighth-nerve responses", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83, N° 1, pag. 145-162, 1988
- Perrott, D. R. e Buell, T. N., "Judgements of sound volume: effects of signal duration, level, and interaural characteristics on the perceived extensity of broadband noise", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 72, N° 5, pag. 1413-1417, 1982
- Perrott, D. R. e Pacheco, S., "Minimum audible angle thresholds for broadband noise as a function of the delay between the onset of the lead and lag signals", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, N° 6, pag. 2669-2672, 1989
- Perrott, D. R. e Saberi, K., "Minimum audible angle thresholds for sources varying in both elevation and azimuth", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 87, N° 4, pag. 1728-1731, 1990
- Perrott, D. R., "Rôle of signal onset in sound localization", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 45, N° 2, pag. 436-445, 1969
- Plenge, G., "On the differences between localization and lateralization", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 56, N° 3, pag. 944-951, 1974
- Polack, J. D., "Playing billiards in the concert hall: the mathematical foundations of geometrical room acoustics", *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 235-244, 1993
- Rabbitt, R. D. e Holmes, M. H., "Three-dimensional acoustic waves in the ear canal and their interaction with the tympanic membrane", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83, N° 3, pag. 1064-1080, 1988
- Rakerd, B., "Localization of sound in rooms, II: the effects of a single reflecting surface", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 78, N° 2, pag. 524-533, 1985
- Rakerd, B., "Localization of sound in rooms, III: onset and duration effects", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, N° 6, pag. 1695-1706, 1986
- Randall, R. B. "Frequency analysis", *Brüel & Kjaer*, 1987

Referências

- Rodgers, C. A. P., "Pinna transformations and sound reproduction", *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 29, N° 4, pag. 226-233, 1981
- Roffler, S. K. e Butler, R. A., "Factors that influence the localization of sound in the vertical plane", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 43, N° 6, pag. 1255-1259, 1968a
- Roffler, S. K. e Butler, R. A., "Localization of the tonal stimuli in the vertical plane", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 43, N° 6, pag. 1260-1266, 1968b
- Ruotolo, B. R., Stern, R. M. Jr. e Colburn, H. S., "Discrimination of symmetric time-intensity traded binaural stimuli", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 66, N° 6, pag. 1733-1737, 1979
- Saberi, K. e Perrott, D. R., "Localization thresholds obtained under conditions in which the precedence effect is assumed to operate", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 87, N° 4, pag. 1732-1737, 1990
- Saberi, K. e Perrott, D. R., "Minimum audible movement angles as a function of sound source trajectory", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 88, N° 6, pag. 2639-2644, 1990
- Sakamoto, N., Gotoh, T. e Kimura, Y., "On "out-of-head localization" in headphone listening", *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 24, N° 9, pag. 710-716, 1976
- Schroeder, M. R., "Improved quasi-stereophony and "colorless" artificial reverberation", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 33, N° 8, pag. 1061-1064, 1961
- Schroeder, M. R., "Natural sounding artificial reverberation", *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 10, N° 3, pag. 219-223, 1962
- Schroeder, M., R., "Progress in architectural acoustics and artificial reverberation: concert hall acoustics and number theory", *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 32, N° 4, pag. 194-202, 1984
- Searle, C. L., Braida, L. D., Cuddy, D. R. e Davis, M. F., "Binaural pinna disparity: another auditory localization cue", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 57, N° 2, pag. 448-455, 1975
- Shaw, E. A. G. e Teranishi, R., "Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 44, N° 1, pag. 240- 249, 1968
- Shaw, E. A. G., "Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 56, N° 6, pag. 1848-1861, 1974
- Shelton, B. R. e Searle, C. L., "Two determinants of localization acuity in the horizontal plane", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 64, N° 2, pag. 689-691, 1978
- Shera, C. A. e Zweig, G., "Middle-ear phenomenology: the view from the three windows" *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 92, N° 3, pag. 1356-1370, 1992
- Shinn-Cunningham, B. G., Zurek, P. M. e Durlach, N. I., "Adjustment and discrimination measurements of the precedence effect", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93, N° 5, pag. 2923-2932, 1993

Referências

- Sorkin, R. D., Wightman, F. L., Kistler, D. J. e Elvers, G. C., "An exploratory study of the use of movement-correlated cues in an auditory head-up display", *Human Factors*, vol. 31, N° 2, pag. 161-166, 1989
- Stern, R. M. e Colburn, H. S., "Theory of binaural interaction based on auditory-nerve data. IV. A model for subjective lateral position", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 64, N° 1, pag. 127-140, 1978
- Stern, R. M. e Zeiberg, A. S., "Lateralization of complex stimuli: A weighted--image model", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 84, N° 1, 1988
- Strybel, T. Z., Manligas, C. L. e Perrott, D. R., "Minimum audible movement angle as a function of the azimuth and elevation of the source". *Human Factors* vol. 34, N° 3, pag. 267-275, 1992
- Thurlow, W. R. e Runge, P. S., "Effect of induced head movements on localization of direction of sounds" *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 42, N° 2, pag. 480-488, 1967
- Thurlow, W. R., Mangels, J. W. e Runge, P. S., "Head movements during sound localization", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 42, N° 2, pag. 489-493, 1967
- Vian, J. P. e Martin, J., "Binaural room acoustics simulation: practical uses and applications", *Applied Acoustics*, vol. 36, pag. 293-305, 1992
- Vorländer, M., "Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 86, N° 1, pag. 172-178, 1989
- Watkins, A. J., "Psychoacoustical aspects of synthesized vertical locale cues". *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 63, N° 4, pag. 1152-1165, 1978
- Wenzel, E. M., Arruda, M., Kistler, D. J. e Wightman, F. L., "Localization using nonindividualized head-related transfer functions", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 94, N° 1, pag. 111-123, 1993
- Wenzel, E. M., "Localization in virtual acoustic displays", *Presence*, vol. 1, N° 1, pag. 80-107, 1992
- West, J. E., Blauert, J. e MacLean, D. J., "Teleconferencing system using head-related signals", *Applied Acoustics*, vol. 36, pag. 327-333, 1992
- Wightman, F. L. e Kistler, D. J., "Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, N° 2, pag. 858-867, 1989a
- Wightman, F. L. e Kistler, D. J., "Headphone simulation of free-field listening. II: Psychophysical validation", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, N° 2, pag. 868-878, 1989b
- Wightman, F. L. e Kistler, D. J., "The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, N° 3, pag. 1648-1661, 1992

Referências

- Wit, H. P., Langevoort, J. C. e Ritsma, R. J., "Frequency spectra of cochlear acoustic emissions ("Kempechoes")", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70, N° 2, pag. 437-445, 1981
- Wright, D., Hebrank, J. H. e Wilson, B., "Pinna reflections as cues for localization", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 56, N° 3, pag. 957-962, 1974
- Xiang, N. e Blauert, J., "A miniature dummy head for binaural evaluation of tenth-scale acoustic models", *Applied Acoustics*, vol. 33,, pag. 123-140, 1991
- Xiang, N., "Binaural scale modelling for auralisation and prediction of acoustics in auditoria", *Applied Acoustics*, vol. 38, pag. 267-290, 1993
- Yost, W. A., "Lateralization of pulsed sinusoids based on interaural onset, ongoing, and offset temporal differences", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 61, N° 1, pag. 190-194, 1977
- Yost, W. A., "Perceptual Models for Auditory Localization", *The Proceedings of the AES 12th International Conference*, Copenhagen, Denmark, pag. 155-168, 1993
- Yost, W. A. e Soderquist, D. R., "The precedence effect: revisited", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 76, N° 5, pag. 1377-1383, 1984
- Zurek, P. M., "The precedence effect and its possible role in the avoidance of interaural ambiguities", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 67, N° 3, pag. 952-964, 1980
- Zurek, P. M., "Acoustic emissions from the ear: a summary of results from humans and animals", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 78, N° 1, pag. 340-344, 1985

Índice de autores

- Abel, S. M. : 36, 40, 88
Allen, J. B. : 3,4,12,109
Aronow, H. : 36, 43
Arruda, M. : 22, 23, 31, 32, 96
Asano, F. : 67, 69
Azevedo, J. A. R. : 112, 113
Babkoff, H. : 36, 46, 47
Barbry, J. L. : 109
Barris, M. : 36, 46, 47
Barron, M. : 94, 95
Bauck, J. L. : 97
Begault, D. R. : 96
Belendiuk, K. : 67
Berkley, D. A. : 109
Bernstein, L. R. : 36, 40, 41
Blauert, J. : 3, 5, 7, 19, 27, 29, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 46, 56, 58, 79, 81, 82, 84, 85, 87, 91, 92, 95, 96, 97, 102, 107, 110
Bloom, P. J. : 36, 40, 58, 59
Boer, E. : 4
Borish, J. : 109
Braida, L. D. : 64, 97
Buell, T. N. : 81
Burger, J. F. : 69
Burkhard, M. D. : 96
Butler, R. A. : 17, 23, 24, 25, 33, 49, 50, 57, 58, 60, 63, 67, 69, 71
Chen, J. : 99
Cicinelli, J. G. : 98, 117, 118
Cobben, W. : 102
Colburn, H. S. : 36, 46, 47, 97, 102
Coleman, P. D. : 80
Cooper, D. H. : 97
Cuddy, D. R. : 64
Davis, M. F. : 64, 97

Índice de autores

- Dillier, N. : 109
Durlach, N. I. : 87
Dye, R. H., Jr. : 36, 43, 81
Elvers, G. C. : 81
Evans, E. F. : 3, 81
Follestad, T. : 69
Gaik, W. : 48, 105, 117
Gardner, M. B. : 57, 58, 62, 85
Gardner, R. S. : 57
Genuit, K. : 96
Gierlich, H. W. : 96, 97
Giguère, C. : 88
Gotoh, T. : 121
Green, D. M. : 62, 72, 73, 75, 76
Griesinger, D. : 96
Guyton : 3.8
Hafter, E. R. : 36, 40, 43, 46, 47
Hammershoi, D. : 97
Hartmann, W. M. : 87, 88, 89, 90
Hebert, C. : 98, 117, 118
Hebrank, J. H. : 57, 58, 59, 62
Hecox, K. E. : 99
Heinz, R. : 110
Henning, G. B. : 36, 39, 40
Holmes, M. H. : 4, 6
Hudde, H. : 96
Humanski, R. A. : 60, 63, 71
Hundeboll, J. V. : 97
Jeffress, L. A. : 36, 46, 47
Jensen, C. B. : 97
Jones, P. J. : 36, 40
Joswig, M. : 96
Kates, J. M. : 4
Kimura, Y. : 121
Kirszenstein, J. : 108, 109
Kistler, D. J. : 22, 23, 31, 32, 37, 63, 71, 81, 96, 101
Kleiner, M. : 108

Índice de autores

- Kock, W. E. : 81, 85
Koenig, : 85
Koizumi, N. : 97
Kompis, M. : 109
Kristiansen, U. R. : 109
Krokstad, A. : 109
Kuc, R. : 118
Kuhn, G. F. : 38, 48, 55, 117
Kulowski, A. : 109
Kunov, H. : 36, 40
Langevoort, J. C. : 13
Latimer, J. S. : 102
Lee, B. H. : 109
Lehnert, H. : 80, 93, 107, 109, 110
Lewers, T. : 109
Lindemann, W. : 81, 95, 101, 106
Loomis, J. M. : 98, 117, 118
Lyon, R. F. : 4
Mackay, R. : 4
MacLean, D. J. : 97
Maekawa, Z. : 95
Makous, J. C. : 19, 30, 62, 75
Mangels, J. W. : 81
Manligas, C. L. : 29
Marshall, A. H. : 94, 95
Martin, J. : 97
Marwick, C. : 13
Mead, C. : 4
Mehrgardt, S. : 51, 53, 55, 72, 76
Mellert, V. : 51, 53, 55, 72, 76
Middlebrooks, J. C. : 19, 24, 25, 30, 62, 69, 72, 73, 75, 78, 117
Mills, A. W. : 23, 36, 39, 43
Miyajima, T. : 109
Miyoshi, M. : 97
Moller, H. : 97, 110
Moore, B. C. J. : 3, 7, 33, 35, 37, 39, 40, 46, 58, 79, 82, 85, 92, 101
Moore, D. : 102

Índice de autores

Morimoto, M. : 95
Musicant, A. D. : 24, 25, 33, 49, 50, 69
Nakagawa, K. : 109
Naylor, G. M. : 109
Nichols, R. H. : 28
Nuetzel, J. M. : 36, 40, 43
Oldfield, S. R. : 18, 30, 33, 57, 69
Ondet, A. M. : 109
Orlowski, R. : 108
Pacheco, S. : 29
Parker, S. P. A. : 18, 30, 33, 57, 69
Payton, K. L. : 4
Perrott, D. R. : 17, 29, 35, 37, 85, 86, 89, 91
Planert, N. : 49, 50, 58
Plenge, G. : 36, 37
Polack, J. D. : 110
Rabbitt, R. D.: 106
Rakerd, B. : 88, 89
Randall, R. B.: 123
Ritsma, R. J. : 13
Rodgers, C. A. P. : 5, 59
Roffler, S. K. : 17, 23, 57, 58
Runge, P. S. : 81
Ruotolo, B. R. : 36, 46, 47
Saber, K. : 17, 29, 85, 86, 89
Sachs, R. M. : 96
Sakamoto, N. : 121
Schroeder, M. R. : 110, 122
Searle, C. L. : 18, 64, 97
Shaw, E. A. G. : 5, 44, 51, 53, 55, 76, 117
Shelton, B. R. : 18
Shera, C. A. : 8
Shinn-Cunningham, B. G. : 87
Soderquist, D. R. : 85, 86
Sone, T. : 67, 69
Sorkin, R. D. : 81
Sorsdal, S. : 109

Índice de autores

- Stern, R. M. Jr. : 36, 41, 42, 46, 47, 102
Strom, S. : 109
Strybel, T. Z. : 29
Sutton, S. : 36, 46, 47
Suzuki, Y. : 67, 69
Tahara, Y. : 109
Teranishi, R. : 5
Thurlow, W. R. : 81
Trahiotis, C. : 36, 40, 41, 42
Van Veen, B. D. : 99
Vian, J. P. : 97
Vorländer, M. : 109
Watkins, A. J., : 5, 58, 59, 120
Wenzel, E. M. : 22, 23, 31, 32, 96, 98, 99
West, J. E. : 97
Wightman, F. L. : 22, 23, 31, 32, 37, 63, 71, 81, 96, 102
Wilson, B. : 59
Wit, H. P. : 13
Wright, D. : 57, 58, 62
Xiang, N. : 96, 97
Yost, W. A. : 36, 37, 40, 85, 86, 101
Zeiberg, A. S. : 36, 41, 42
Zurek, P. M. : 13, 39, 85, 87, 89
Zweig, G. : 8



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



000006304