

# Medição de diversas características subjetivas da audição

\*2 Trabalho Laboratorial de Áudio Computacional, DEEC-FEUP

André de Azevedo Barata  
Dep. de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Porto, Portugal  
up201907705@edu.fe.up.pt

André Nogueira Soares  
Dep. de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Porto, Portugal  
up201905318@edu.fe.up.pt

**Abstract**—Este documento apresenta uma avaliação subjetiva das limitações do ouvido humano, corroborada por uma análise teórica dos fenómenos físicos associados. Assim, são realizadas 4 experiências que exploram os seguintes tópicos: Banda crítica, efeito máscara e efeitos de Haas. Durante cada experiência, são apresentados valores teóricos esperados e de seguida os valores obtidos subjetivamente por dois sujeitos diferentes.

**Index Terms**—

## I. INTRODUÇÃO

O objetivo principal deste trabalho é explorar a percepção auditiva humana, destacando os efeitos das bandas de filtros dinâmicas na córnea, medindo suas larguras de banda correspondentes e examinando o maceramento de sons sinusoidais. Além disso, investigamos o fenómeno de precedência (efeito de Haas). Este relatório detalhará os métodos e resultados desses testes, contribuindo para uma compreensão aprofundada da percepção auditiva.

## II. BANDA CRÍTICA DE UMA SINUSOIDE

### A. Fundamentos teóricos

a) : A banda crítica desempenha um papel vital na forma como o ouvido humano processa o som. Essencialmente, é uma faixa específica de frequências onde nosso ouvido consegue analisar o som de forma independente, sem muita influência das frequências ao redor. A ideia da banda crítica foi concebida por Harvey Fletcher e Wilden A. Munson [1], e seu impacto se estende por campos como psicoacústica e engenharia de áudio.

A chave para entender a banda crítica está na membrana basilar, uma estrutura longa que percorre a córnea, a parte do ouvido interno responsável por traduzir as ondas sonoras em sinais elétricos que nosso cérebro pode interpretar. A membrana basilar faz uma divisão inteligente das frequências sonoras em diferentes regiões ao longo de seu comprimento. Cada região é sintonizada para um intervalo específico de frequências, permitindo-nos distinguir tons variados.

Isso se torna crucial na conceção de sistemas de áudio eficazes, garantindo que possamos perceber com precisão os sons. Além disso, expande nosso entendimento sobre

como o ouvido humano processa informações sonoras, tendo aplicações até mesmo em áreas como acústica arquitetónica, onde a criação de espaços agradáveis e funcionais depende da modelagem da resposta auditiva humana.

Deste modo, definiu-se uma senoide com uma frequência fundamental de  $1kHz$  à qual denominamos de  $f_0$ . Para além disso, definimos uma oitava em torno de  $f_0$ , limitados inferiormente e superiormente pelas frequências  $f_1$  e  $f_2$ , respetivamente, de modo a que  $f_0$  seja a frequência central, resultando nos valores apontados em 1.

$$\begin{cases} f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \\ f_2 = 2f_1 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} f_1 = \frac{f_0}{\sqrt{2}} \\ f_2 = \sqrt{2}f_0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} f_1 = 707Hz \\ f_2 = 1410Hz \end{cases} \quad (1)$$

Para além disso, é necessário definir a banda crítica do ouvido, apesar de esta variar de pessoa para pessoa, nós iremos utilizar valor definido como convencional. Como tal, iremos partir do pressuposto que a banda crítica representa  $\frac{1}{4,5}$  de uma oitava que no nosso caso será aproximadamente  $150Hz$ , ora isto significa que  $\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{4,5}} = 1,17$ . Assim, definindo  $f'_1$  e  $f'_2$  como os limites inferior e superior da banda crítica podemos definir o sistema 2.

$$\begin{aligned} f_0^2 = f'_1 \times f'_2 &\Leftrightarrow \begin{cases} f'_1 = \frac{f_0}{\sqrt{1,17}} \\ f'_2 = \sqrt{1,17} \times f_0 \end{cases} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \begin{cases} f'_1 = \frac{1000}{\sqrt{1,17}} \\ f'_2 = 1000 \times \sqrt{1,17} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} f'_1 = 920Hz \\ f'_2 = 1080Hz \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

De notar que a largura de banda de uma oitava é dada por  $f_2 - f_1$  e a largura de banda crítica por  $f'_2 - f'_1$ , como representado na figura 1.

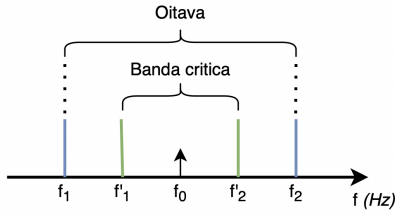


Fig. 1: Representação da banda crítica

### B. Avaliação subjetiva

De modo a comprovar os resultados apresentadas na secção II-A, utilizamos um *script* Matlab que origina uma onda sinusoidal e lhe acrescenta ruído branco com uma determinada largura de banda. O som da onda pura é reproduzido três vezes com o acréscimo de 0dB, 3dB e 6dB respetivamente e de seguida é produzido a mesma sinusoide com o ruído adicionado. De notar que para efeito de consistência, o valor da potência do sinal é mantido constante, apesar do aumento da largura de banda. O valor da largura de banda do ruído é aumentado a cada iteração, sendo que começa com uma largura de banda de  $\frac{1}{18}$  de uma oitava e varia até 1,25 com passos de  $\frac{1}{25}$ .

O sinal com ruído foi catalogado subjetivamente entre ter maior ou menor intensidade que a sinusoide original. A iteração na qual foi detetado uma maior intensidade foi a 7, ou seja, o limite está na 6 iteração, cujo os valores de  $FROI_{octave}$  é de 0.222, o que corresponde a uma largura de banda de 134,9 Hz, sendo que a largura de banda é calculada da seguinte forma:  $BW = f_0 * 2^{FROI_{octave}-1} / 2^{\frac{FROI_{octave}}{2}}$ .

Ora, segundo a secção II-A, o valor de largura de banda teórico é de 150 Hz, e o obtido subjetivamente 134,9 Hz, esta diferença poderá está associada à anatomia do ouvinte ou até mesmo à sua atenção durante o teste.

Até à iteração 20, a sinusoide é indistinguível do ruído, no entanto a partir da 21 esta é bastante clara. Isto deve-se à capacidade do nosso cérebro de distinguir ruído de sinal, que apesar do valor da potência do ruído ser sempre constante, o nosso sistema auditivo é capaz de distinguir o sinal devido à sua densidade de potência. Neste caso, a 20ª iteração representa uma largura de banda de 407.1 Hz e uma densidade de Potência de  $p_{RMS}/BW = 0.094/407,1 = 0.0231 mW/Hz$ . Contudo, este valor não deve ser usado para comparação, já que a densidade de potência de uma sinusoide é sempre infinita, independentemente da sua amplitude, logo iremos utilizar o valor da potência do ruído dentro da banda crítica que será dado pela multiplicação da densidade de potência do ruído na 20ª iteração pela banda crítica, logo  $0.0231 \times 134,9 = 9mW$ , ou seja, para a amplitude da sinusoide em questão, esta é audível em conjunto com ruído caso a potência do ruído na banda crítica seja inferior a 9 mW.

## III. EFEITO MASCARA

### A. Fundamentos teóricos

Nesta segunda atividade, nosso foco foi a determinação do efeito de máscara por tons para duas frequências sinusoidais. As frequências escolhidas para esta análise foram  $f_0=1000Hz$  e  $f_1=1880Hz$ .

A abordagem adotada envolveu um processo iterativo no qual exploramos como a presença de uma frequência principal ( $f_0=1000Hz$ ) afeta a percepção de uma frequência sinusoidal adicional ( $f_1=1880Hz$ ). Para realizar essa análise, usamos um código que variava a amplitude da segunda frequência sinusoidal (SF1) em intervalos de 2 dB e podemos perceber a entrada da outra onda sinusoidal aquando da mudança de timbre.

De forma alguma referência, encontramos este gráfico, Figura 2, que nos dá o valor de 1000Hz como mascarador e como deve ser o outro sinal de forma que comece a ser perceptível. Ele é perceptível quando se nota uma mudança de timbre.

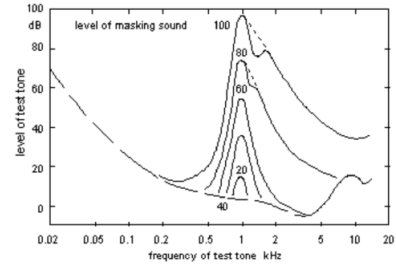


Fig. 2: Mascara com um sinal de 1000Hz [2]

Através do gráfico e tendo em conta que estamos a ouvir o sinal a 60 dB, só será possível detetar o outro sinal aquando o mesmo estiver perto do 20 dB.

Para tentarmos detetar a mudança de timbre, durante cada iteração do ciclo, observamos os valores "m" e "LdB" para identificar em qual iteração específica o efeito de máscara ocorria. O "m" foi utilizado como um contador de iteração e o "LdB" representava o aumento em decibéis da amplitude da segunda frequência sinusoidal em relação à primeira

### B. Avaliação subjetiva

Como mencionado anteriormente, realizamos um ciclo no qual aumentávamos a amplitude em 2 dB a cada iteração. Inicialmente, o som de 1880 Hz estava completamente mascarado, tornando possível identificar apenas o som de 1000 Hz.

No ponto de -22 dB, observamos uma ligeira mudança no timbre, ou seja, perto dos 20 dB esperados. Em seguida, notamos uma mudança mais significativa no timbre nas iterações 11, 14 e 20, sendo a maior observada na 14ª iteração.

Ao analisar o gráfico resultante, podemos concluir que nossos resultados coincidem com nossas expectativas. Eles demonstram claramente a influência da amplitude na percepção do som e a ocorrência do efeito de máscara por tons.

#### IV. DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO APARENTE DE UMA FONTE SONORA

##### A. Fundamentos teóricos

Esta parte da atividade o objetivo é investigar o fenômeno conhecido como o "Efeito de Haas" na determinação da direção aparente de uma fonte sonora na faixa de frequência de 1000 Hz. O Efeito de Haas, também conhecido como Princípio da Primeira Onda Direta, descreve como o cérebro humano percebe o som quando é ouvido de múltiplas fontes ou direções.

Para este estudo, utilizamos um som de ruído branco contendo uma banda de 1 oitava. O som é reproduzido nos auriculares, direita e esquerda, e assim sendo ficamos posicionados como se fosse os vértices de um triângulo equilátero, com o observador ouvinte localizado no ponto de equilíbrio. Ambos os auriculares emitem o som com níveis idênticos de pressão sonora no início do experimento, sempre com a mesma altitude.

A peculiaridade deste experimento reside na manipulação do tempo de atraso entre as duas fontes sonoras. Inicialmente, o canal 2 está adiantado no tempo em aproximadamente 0,4 milissegundos em relação ao canal 1. A partir desse ponto, a cada segundo, reduzimos progressivamente o tempo de avanço do canal 2 em intervalos de  $1/f_s$  (onde  $f_s$  é a taxa de amostragem), até que ele esteja atrasado em aproximadamente 0,4 milissegundos em relação ao canal 1.

Durante todo esse processo, registamos cuidadosamente a direção aparente de proveniência do som percebida pelo ouvinte. O Efeito de Haas prevê que a direção aparente do som possa variar à medida que o atraso entre os auriculares é modificado. Observar como o cérebro humano interpreta a fonte sonora nessa situação fornece informações valiosas sobre a psicoacústica e a percepção auditiva. Sendo que muitas vezes, pessoas diferentes têm percepções diferentes.

Este estudo contribui para uma compreensão mais profunda de como os seres humanos interpretam a direção das fontes sonoras em ambientes complexos e pode ter implicações significativas na criação de experiências sonoras imersivas e na otimização de sistemas de áudio espacial.

O beamsteering, conhecido como direcionamento de feixe, surge como uma tecnologia de grande pertinência no âmbito do nosso experimento, que visa a "Determinação da Direção Aparente de uma Fonte Sonora". Esta técnica revoluciona o controlo da direção de propagação do som a partir de altifalantes, proporcionando uma contribuição valiosa para a nossa investigação acerca do Efeito de Haas.

O beamsteering demonstra a sua utilidade ao permitir ajustar com precisão a direção aparente da fonte sonora. Isto é alcançado através da manipulação em tempo real da fase e intensidade da saída dos altifalantes, o que possibilita a simulação de diferentes direções de origem do som. Esta flexibilidade e agilidade na manipulação abrem caminho para uma reprodução dinâmica do tempo de atraso entre os altifalantes, refletindo as variações de direção percebidas pelos participantes durante o experimento.

O beamsteering é normalmente utilizado no âmbito das antenas e telecomunicações de forma a direcionar a onda para os locais onde ela é precisa, como se pode observar na Figura 5.

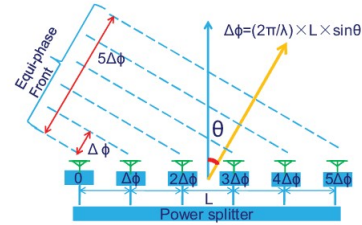


Fig. 3: Beamsteering Example [3]

##### B. Avaliação subjetiva

Para este estudo, realizamos dois testes, um para cada membro do grupo, com o objetivo de avaliar como o atraso afeta a percepção auditiva de forma individual. A realização de testes separados para cada membro do grupo permitiu-nos observar como o fenômeno do Efeito de Haas influencia as pessoas de maneiras distintas.

Durante os testes, o atraso entre os dois canais de áudio foi variado, e os membros foram indicando a direção percebida da fonte sonora com base na variação do atraso. Ou seja, apontávamos a direção da qual acreditávamos que o som estava vindo em resposta às mudanças temporais no áudio.

Assim sendo, obtivemos os seguintes gráficos:

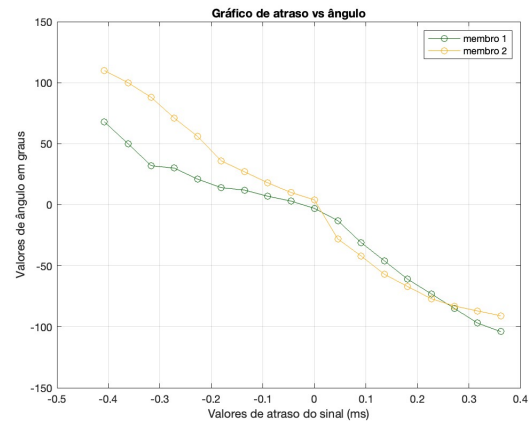


Fig. 4: Ângulo vs Atraso

Para termos uma forma de reduzir os erros devido ao mal posicionamento do ângulo, fizemos uma média entre os dois alunos e obtivemos o seguinte gráfico:

Através dos gráficos, é evidente que a orientação varia de forma linear, de acordo com as expectativas. Inicialmente, partimos apontados para a direita, o que corresponde a um ângulo positivo. À medida que o atraso diminui, aproximamo-nos do ponto central, até ao momento em que o atraso atinge zero. Nesse ponto, é claramente visível que a orientação se

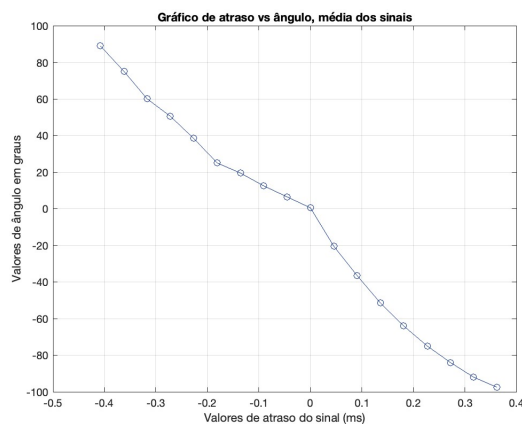


Fig. 5: Ângulo vs Atraso - média dos alunos

encontra centrada. Posteriormente, com o aumento do atraso, a orientação começa a deslocar-se novamente para a direita.

## V. EFEITO HAAS

### A. Fundamentos teóricos

Na segunda parte deste estudo, iniciamos com o sinal do canal 2 atrasado em 10 milissegundos (ms) em relação ao canal 1. Durante esta etapa, exploramos como as variações de nível no canal 2, que variaram de 0 a 15 decibéis (dB), em incrementos de 0,5 dB, afetam a percepção auditiva e o fenómeno conhecido como o "Efeito de Haas".

O objetivo principal desta fase era confirmar a ocorrência do fenómeno de re-aparecimento do som do canal 2, conforme previsto pelo Efeito de Haas. Especificamente, esperávamos observar a mudança na direção aparente da fonte sonora, que inicialmente estava associada ao canal 1, passando a ser percebida como vinda do canal 2 à medida que o nível sonoro deste último era ajustado.

Para tal, consideramos o gráfico dado pelo professor e perceber se na prática o mesmo acontece:

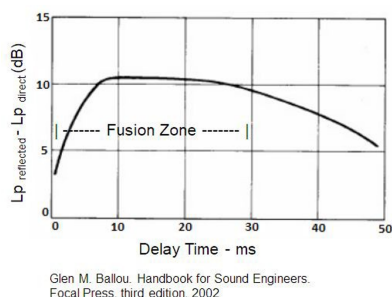


Fig. 6: Efeito Haas

Tendo em conta o atraso dado ao sinal do canal 2, só seria possível perceber este mesmo sinal após 10 dB.

### B. Avaliação subjetiva

Como mencionado anteriormente, o objetivo desta experiência é identificar o Efeito de Haas e verificar sua

ocorrência ao aplicar um aumento de 10 dB no canal 2. Para alcançar esse propósito, foi implementado um ciclo 'while' que progressivamente aumentava a intensidade do sinal em incrementos de 0,5 dB, permitindo-nos avaliar a extensão pela qual a direção da fonte sonora se deslocava do canal 1 para o canal 2.

No decurso desta experiência, identificamos três momentos críticos. O primeiro ocorreu ao aumentar 5 dB, quando pela primeira vez conseguimos perceber o sinal do canal 2, nomeadamente o canal direito. O segundo momento revelou-se aos 10,5 dB, altura em que notamos que o canal 2 já predominava sobre o canal 1. Por fim, aos 15 dB, praticamente não se ouvia mais o sinal proveniente do canal 1.

Esses marcos foram cruciais para compreendermos como a intensidade sonora afeta a percepção da direção da fonte sonora e o surgimento do Efeito de Haas. Para além disso, foi possível perceber que ia ao encontro do esperado, pois foi a partir dos 10 dB em que o canal 2 ficou predominante. Para além disso, como o som do canal 2 ficou com um aumento significativo aos 15 dB conseguiu praticamente fazer desaparecer o sinal do canal 1 como era esperado.

## REFERENCES

- [1] Audio Engineer's Reference Book, 2nd Ed., 1999, edited Michael Talbot Smith, Focal Press.
- [2] Joyner Cadore, "Auditory-Inspired Morphological Processing of Speech Spectrograms: Applications in Automatic Speech Recognition and Speech Enhancement". Available at [https://www.researchgate.net/figure/Threshold-in-quiet-and-masking-curves-for-a-1kHz-masker-taken-from-45\\_fig3\\_232806419](https://www.researchgate.net/figure/Threshold-in-quiet-and-masking-curves-for-a-1kHz-masker-taken-from-45_fig3_232806419)
- [3] Cadence, "Phased Array Antennas: Principles, Advantages, and Types". Available at <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021phased-array-antennas-principles-advantages-and-types>