



## **LIMITES SENSORIAIS HUMANOS E A ENGENHARIA: UMA FERRAMENTA DE DEMONSTRAÇÃO DO MASCARAMENTO SONORO**

**Lucas Marcetti Sterquino da Silva** – sargentoskt@hotmail.com

Programa de Educação Tutorial (PET), Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando, 514, Goiabeiras

CEP: 29075-910 – Vitória - ES

**Moises Renato Nunes Ribeiro** – moises@ele.ufes.br

***Resumo:** O mascaramento sonoro é um efeito de bastante útil para Engenharia. Um grande exemplo de aplicação deste efeito é o MP3. A compressão de áudio feita pelo MP3 é baseada no fato de que nem todos os sons armazenados são audíveis devido o efeito do mascaramento sonoro. Assim, uma compressão do arquivo é feita retirando-se os sons que não são audíveis. Porém, apesar de sua grande utilidade, pouco se fala sobre um modo de mostrar a existência deste fenômeno. Este trabalho tem como objetivo criar um método fácil e simples para mostrar a existência do mascaramento sonoro.*

***Palavras-chave:** Mascaramento sonoro, Membrana basilar, Bandas críticas.*

### **1 INTRODUÇÃO**

A abordagem pela Engenharia dos limites sensoriais humanos é de grande importância para o desenvolvimento de tecnologias que facilitam o dia-a-dia da sociedade. Em especial, a audição humana tem limitações quanto à frequência e amplitude de sons que podem ser escutados e também quanto à forma que estes sons são captados pelo ouvido humano. Ao estudar a audição humana, um efeito bastante interessante e de grande utilidade para a Engenharia é o mascaramento sonoro.

O mascaramento sonoro é “o efeito no qual um som audível mais fraco se torna inaudível quando um sinal audível mais forte ocorre simultaneamente. O mascaramento depende do espectro em frequência dos dois sinais e suas variações no tempo.” (KAHRS & BRANDENBURG, 2002)

A aplicação deste efeito pela Engenharia gerou avanços em várias áreas. Por exemplo, na Medicina a Audiologia utiliza o mascaramento sonoro para definir a perda de audibilidade de uma pessoa. A Engenharia de Som utiliza este efeito para diminuir o nível de ruído em um determinado estabelecimento.

Mas, a aplicação pela Engenharia que trouxe maior repercussão na sociedade e muitas mudanças foi o MP3. Durante a década de 80, os computadores não tinham a mesma



capacidade de armazenamento de dados dos computadores atuais. Enquanto pesquisas na área buscavam desenvolver tecnologias que aumentassem a capacidade de armazenamento de dados, outros procuravam caminhos para diminuir o tamanho dos arquivos sem perder a informação dos mesmos. Em se tratando de arquivos de áudio e vídeo, perda de informação representa uma grande perda de qualidade do arquivo.

Nesse contexto, em 1987, o Fraunhofer Institut Integrierte Schaltungen, em Erlangen, na Alemanha, começou a desenvolver o MP3. O seu funcionamento é todo baseado no efeito do mascaramento sonoro. Ele remove do som original aqueles que não são perceptíveis ao ouvido humano devido ao efeito do mascaramento. Assim, pode-se compactar um arquivo de áudio sem perder muito a sua qualidade.

Apesar de o mascaramento sonoro ser de grande utilidade para a Engenharia, pouco se fala em algum procedimento ou teste que mostre a existência deste efeito. Este trabalho visou desenvolver um método cujo objetivo é mostrar de forma simples e objetiva o efeito do mascaramento sonoro.

Assim, o restante deste artigo apresenta: um resumo do funcionamento da audição humana na Seção 2, uma breve explicação sobre o mascaramento sonoro na Seção 3, a apresentação da metodologia sugerida na Seção 4, a validação da metodologia na Seção 5, a análise dos resultados obtidos na Seção 6 e as considerações finais do trabalho na Seção 7.

## **2 A AUDIÇÃO HUMANA**

“O ouvido humano é, de fato, o dispositivo mais complexo em toda a Engenharia de Áudio.” (EVEREST & POHLMANN, 2009)

O ouvido humano é um instrumento incrível, capaz de ouvir sons numa faixa de 20 a 20kHz. Além disso, tem a capacidade de ouvir sons de muitas intensidades diferentes, adaptando suas características ao som que está a ouvir. Para melhor compreensão de seu funcionamento, o ouvido humano é dividido em três partes: ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno.

O ouvido externo é formado pela orelha e pelo canal auditivo. Eles são responsáveis por conduzir o som até o tímpano. Uma característica interessante é o fato de a orelha e o canal auditivo ressoarem numa frequência de 2k a 5kHz, que é a faixa de frequência da fala humana, fazendo com sons externos nessa faixa obtenham um ganho de 10 a 15dB.

Quando o som chega ao tímpano, ele é transmitido para o ouvido médio. O ouvido médio é uma cavidade com ar, separada do ouvido externo pelo tímpano. Ela contém três ossículos através dos quais a energia sonora captada pelo ouvido externo é transmitida para a janela oval, na cóclea, esta já no ouvido interno.

Basicamente, o ouvido interno é um labirinto de canais dentro da caixa craniana cheios de líquido, parecido com água, que se movimenta conforme as vibrações sonoras e a movimentação da cabeça.

A parte mais importante é a cóclea, pois ela é responsável em grande parte pela nossa capacidade em diferenciar e interpretar sons. Nela, os sons (de tipo mecânico) são transformados em impulsos elétricos que, através do nervo auditivo, chega ao cérebro onde são decodificados e interpretados.



## 2.1 A Cóclea

A cóclea é constituída por um tubo ósseo dividido em três seções, todas preenchidas por um líquido semelhante à água. Veja a Figura 1:

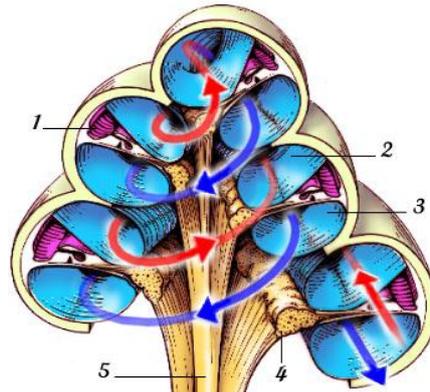


Figura 1 – Corte transversal da cóclea: 1 – Ducto coclear; 2 – Scala vestibuli; 3 – Scala tympani; 4 – Espiral ganglionar; 5 – Nervo auditivo. [1]

A primeira seção, a Scala vestibuli, está ligada à janela oval, enquanto a última está ligada à janela redonda. Elas unem-se apenas no fim da cóclea no helicotrema. Entre elas está a segunda seção, o ducto coclear. O que separa essas seções são duas membranas: a membrana de Reissner, entre o ducto coclear e a scala vestibuli; e a membrana basilar, entre o ducto coclear e a scala tympani. A membrana basilar é muito importante, pois ela sustenta o órgão de Corti. Nele estão contidas as células ciliadas que captam as vibrações sonoras e gera impulsos elétricos.

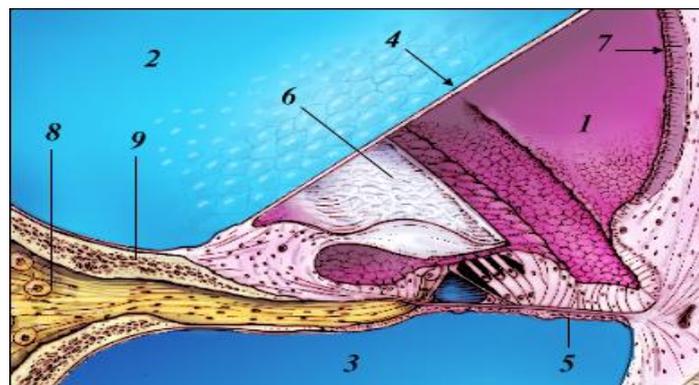


Figura 2 – Órgão de Corti: 1 – Ducto coclear; 2 – Scala vestibuli; 3 – Scala tympani; 4 – Membrana de Reissner; 5 – Membrana Basilar; 6 – Membrana Tectória; 7 – Stria Vascularis; 8- Fibras; 9 – Espiral Laminar. [2]

Existem dois tipos de células ciliadas: as interiores e exteriores. Ambas são cobertas pela membrana tectória. Os cílios das células externas estão encaixados na membrana tectória e



uma certa parte dos cílios das células internas também. Quando um estímulo sonoro provoca oscilações na membrana basilar, a membrana tectória move-se, estimulando os cílios que liberam impulsos nervosos conforme a intensidade do estímulo. Esses impulsos nervosos são enviados ao cérebro e interpretados, gerando a sensação de audição.

Existem cerca de 12000 células externas e 3500 internas. Porém, as internas recebem cerca de 95% das enervações do nervo auditivo e, por isso, são as principais responsáveis pela sensação da audição.

## 2.2 A Membrana Basilar

A membrana basilar é formada basicamente por fibras e tecido conjuntivo. Existem cerca de 24000 fibras transversais ao seu comprimento (HENRIQUE, 2002). Da janela oval ao helicotrema, a cóclea fica mais estreita enquanto que a membrana basilar torna-se mais larga, espessa e rígida, sendo sua extremidade solta 100 vezes mais flexível que na parte fixa.

Assim, membrana basilar apresenta uma resistência (mecânica) que varia ao longo de sua extensão: próximo à janela oval ela é mais fina e tensa, ressoando em frequências mais altas, enquanto no seu final (ápice), ela é espessa e flácida, ressoando então para frequências mais baixas. Assim, para cada frequência, há um ponto da membrana basilar em que a vibração é máxima. A posição desse ponto, medida a partir do helicotrema, é aproximadamente proporcional ao logaritmo da frequência do som. Ao redor desse ponto haverá uma faixa, de cerca de 1,5 mm, onde a vibração estará presente, atenuando-se conforme se afasta do ponto. Tal faixa determina o conceito das bandas críticas.

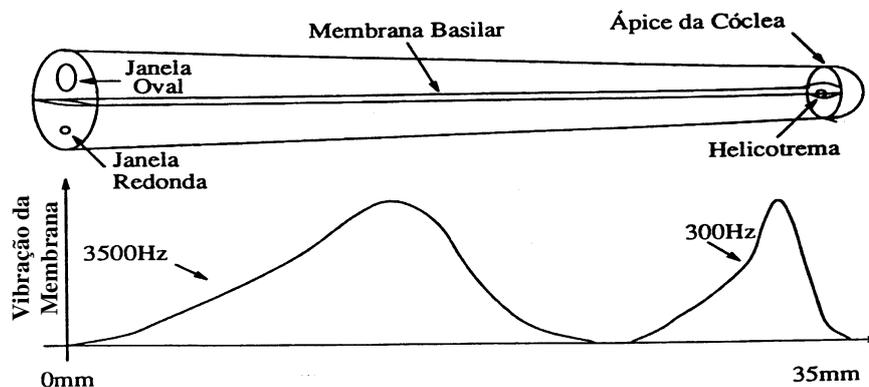


Figura 3 – Representação da membrana basilar e respectiva vibração para um tom de 300Hz e outro de 3500Hz. [3]

## 2.3 Banda Crítica

O ponto de máximo de amplitude que ocorre na membrana basilar quando esta é percorrida por um som de determinada frequência, abrange certo número de terminações nervosas numa vizinhança em torno deste máximo. Os pontos da membrana basilar assim afetados correspondem a uma banda de frequências denominada banda crítica.

Portanto, banda crítica é definida como uma faixa de frequências em torno de uma frequência associada a um ponto da membrana basilar. A cada ponto da membrana é possível associar



uma banda crítica. Quando dois sons puros tem frequências próximas e seus estímulos na membrana basilar se sobrepõe substancialmente, dizem que estes sons pertencem à mesma banda crítica.

### 3 O MASCARAMENTO SONORO

Quando dois sons puros estimulam áreas próximas da membrana basilar, as células ciliadas desta região da membrana emitirão os impulsos referentes ao som de maior amplitude sonora. Assim, o cérebro interpretará apenas o som de maior amplitude, ou seja, não se ouvirá o som de menor amplitude. Desse modo, dizemos que o som de menor amplitude sonora foi mascarado pelo som de maior amplitude sonora.

Sinais sonoros com largura de banda abrangendo mais de uma banda crítica proporcionarão uma intensidade perceptual maior que outros sinais limitados a uma única banda crítica, mesmo que a pressão sonora e a frequência central sejam equivalentes.

O nível de energia abaixo do qual um componente do sinal sonoro é mascarado por outros componentes é chamado de limiar de mascaramento. Além de depender da localização dos sinais mascarador e mascarado no plano tempo-frequência, o limiar de mascaramento também depende da duração do mascarador.

Existem dois tipos de mascaramento: o mascaramento simultâneo e o mascaramento temporal. O mascaramento temporal é subdividido em dois tipos: o retrógrado e o progressivo. Esse trabalho se baseia apenas no mascaramento simultâneo, por isso somente este será explicado.

Quando dois sinais se situam dentro de uma banda crítica, o de maior energia poderá dominar a percepção e mascarar o outro estímulo sonoro. Portanto, dependendo dos níveis, dois tons distintos somente serão distinguidos um do outro quando estiverem em bandas críticas diferentes.

Este é o fenômeno responsável pelo mascaramento simultâneo. A resolução para a distinção entre uma frequência e outra varia de 100 Hz, nas frequências mais baixas, a mais de 6 kHz, nas frequências mais altas.

Um exemplo: Se tem um som forte com uma frequência de 1000 Hz, e também um som na frequência de 1100 Hz que está a 18 dB por baixo do anterior, o som de 1100 Hz não pode ser ouvido porque está sendo mascarado pelo som mais forte de 1000 Hz. Isto ocorre porque o som de 1000 Hz é mais forte e está perto em frequência. Assim, quando dois tons se encontram em uma mesma banda crítica, o de maior amplitude dominará a percepção sonora.

Observe a Figura 4 abaixo:

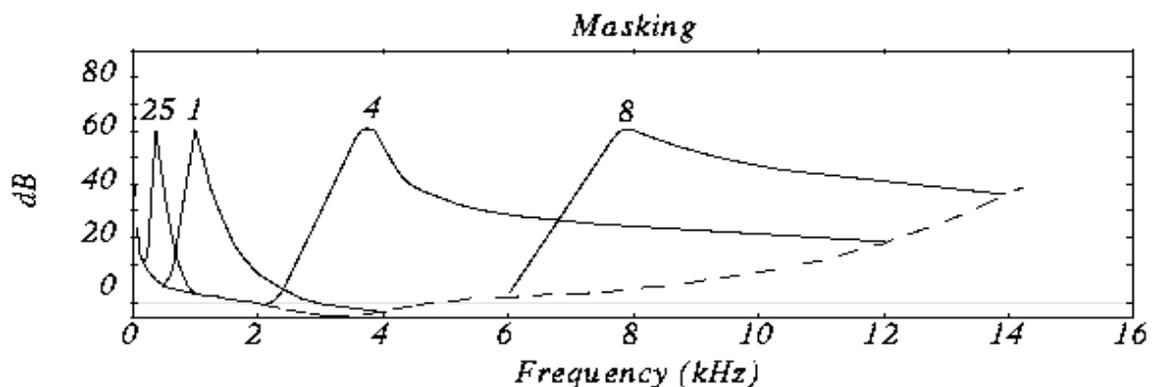




Figura 4 – Níveis de audibilidade na presença de tons mascarantes de 0,25kHz, 1kHz, 4kHz e 8kHz. [4]

Ele apresenta o limiar de audibilidade, em função da frequência, com quatro sinais mascarantes. A linha tracejada representa o nível mínimo do sinal para se tornar audível na ausência de sinais mascarantes. As linhas contínuas representam o nível mínimo para que um sinal se torne audível na presença de um sinal mascarante.

Para frequências mais baixas, a faixa de mascaramento é menor devido à maior quantidade de bandas críticas nestas frequências.

#### 4 METODOLOGIA SUGERIDA

Para poder mostrar a existência do mascaramento sonoro, fez-se um programa no ambiente MatLab® em que, em sua essência, se baseia em gerar sons puros e emití-los simultaneamente ou não.

O programa é composto por 9 funções e 2 procedimentos. Um dos procedimentos, chamado “teste\_masc\_sim”, é o que inicia o programa. Nele são chamadas as demais funções em que, a mais importante, é a função chamada “masc\_s1”. Ela é responsável por interagir com o usuário, emitir os sons e armazenar os dados obtidos no teste.

Para gerar os sons puros, fez-se uma função, chamada “som”, cujo objetivo é formar uma matriz de pontos discretos de uma onda senoidal com frequência e amplitude determinadas pelo programa. A taxa de amostragem utilizada foi de 44,1kHz, de acordo com a taxa de resolução da placa de som do computador usado no teste. Utiliza-se a função “sound” do MatLab® para gerar o som a partir da matriz de pontos discretos formada pela função “som”. O programa determina, de forma randômica, um número fixo de bandas críticas onde serão gerados dois sons cujas frequências, também determinadas de forma randômica, pertencerão. Ele inicia-se realizando um pequeno teste de audição para determinar a amplitude mínima dos sons gerados, a fim de não emitir ao usuário do programa algum som inaudível, pois isto influenciaria negativamente todo o teste.

O teste de audição consiste em emitir sons referentes às duas frequências limite de cada banda crítica já pré-determinada pelo programa. A amplitude destes sons é extremamente baixa e é incrementada conforme o usuário retorna ao programa que não está escutando o som. De acordo com os dados obtidos, tem-se para cada frequência, uma amplitude que, a partir desta, o usuário julgou ouvir o som. Assim, determina-se uma reta que passa pelos pontos encontrados (amplitude x frequência). Ela determina a amplitude mínima dos sons que o programa irá gerar, garantido desta forma que todos os sons gerados pelo programa são audíveis ao usuário. Perceba que, ao fazer isto, aproximou-se a resposta em frequência do ouvido como linear, o que não é verdade. Porém, é uma boa aproximação, já que o objetivo do programa é apenas mostrar o mascaramento e não determinar o limiar de audição do usuário.

Determinada a amplitude mínima dos sons, o programa gera dois sons em cada banda crítica já escolhida randomicamente pelo programa e, também de forma randômica, se define o modo em que irá emití-los. São três modos: emitir apenas um dos sons, emitir os dois



simultaneamente e emitir a soma normalizada dos dois sons. O usuário retorna ao programa quantos sons está a ouvir.

No final do teste o programa retorna todos os dados gerados e obtidos.

## 5 VALIDAÇÃO

Uma preocupação com o teste foi em saber se o que estava sendo gerado no MatLab® era o que realmente estava sendo reproduzido pela placa de som e emitido pelo fone de ouvido utilizado.

O fone de ouvido utilizado foi o Stagg SHP-2200. Segundo o fabricante ele reproduz frequências de 20 a 20kHz a uma intensidade de -3dB. Assim, precisei limitar a primeira e última bandas críticas de acordo com a limitação do fone.

Outro cuidado foi verificar o que a placa de som do computador utilizado estava reproduzindo. Isto foi feito conectando um cabo P2-P2 na saída para fone do computador. Na outra ponta do cabo, ligou-se um osciloscópio. Assim, emitiu-se sons com a menor frequência usada até a maior, tomando como valores intermediários dos limites das bandas críticas. Encontrou-se uma diferença média de 1,85% para mais ou menos do valor gerado no MatLab®. O que é um valor baixo e, portanto, aceitável para realização do teste.

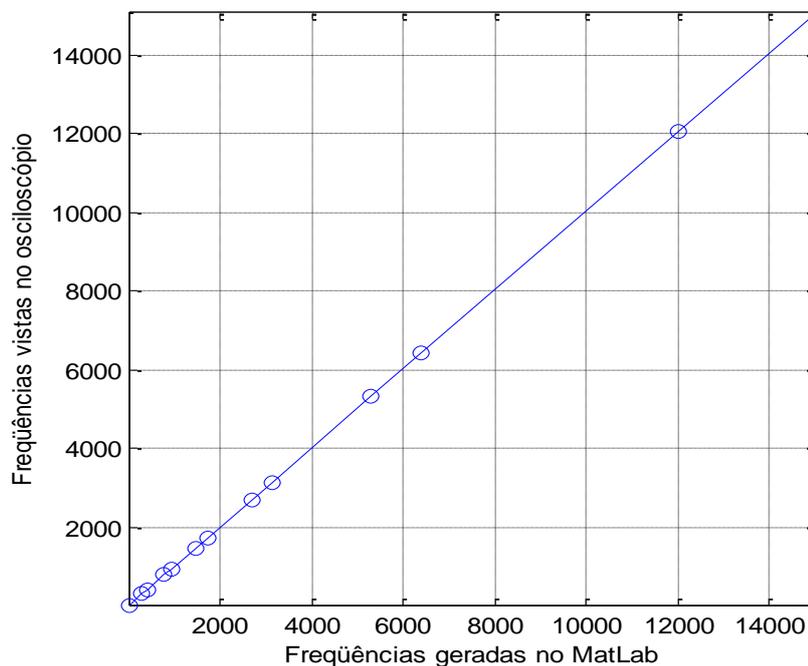


Figura 5 – Gráfico frequências vistas no osciloscópio X frequências geradas no MatLab®, ambos os eixos em Hz.



## 6 RESULTADOS E ANÁLISE

O teste consistiu em gerar 5 sons para cada candidato. Depois de cada som, o candidato retorna ao programa quantos sons ele conseguiu ouvir. Este teste foi feito com 19 pessoas, totalizando um total de 95 experiências.

No caso, o fato a ser analisado em cada teste é quando, em o programa emitir dois sons simultâneos, o candidato responder que ouviu apenas um som. Das 95 experiências, temos que: 27 delas foram com o programa emitindo apenas 1 dos sons (modo 1), 40 foram com o programa emitindo dois sons simultâneos (modo 2 - estéreo) e os 28 restantes foram com o programa emitindo a soma dos dois sons gerados (modo 2 - mono), conforme mostrado na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Número de experiências para cada modo de emissão dos sons.

Modo de Emissão	Número de experiências
1	27
2 – estéreo	40
2 – mono	28

A Tabela 2 abaixo mostra a porcentagem das respostas dos candidatos em relação a cada estímulo emitido pelo programa:

Tabela 2 – Porcentagem do número de vezes em que os usuários acertaram na quantidade de sons emitidos.

Modo de estímulo	Resposta do candidato	
	1 som	2 som
1	70,37%	29,63%
2 – estéreo	65,00%	35,00%
2 – mono	57,54%	42,46%

O fato de 29,63% dos candidatos terem ouvido mais de um som quando apenas um havia sido emitido era esperado devido a ruído existente na sala em que foi feito os testes. Havia ruído do próprio computador usado no teste e ar condicionado. Além disso, deve-se lembrar o fato de o ouvido ser não linear, podendo surgir, durante a transmissão do estímulo sonoro, múltiplos harmônicos da frequência do som de estímulo. Esse dado também nos dá a proporção de possíveis “chutes” dos candidatos quanto à resposta correta. Assim, temos uma dimensão da confiabilidade das respostas dos candidatos.

Quanto aos modos “2 – estéreo” e “2 – mono”, observe que em ambos houve maior quantidade de candidatos que perceberam apenas 1 som. Em se tratando daqueles que afirmaram ter ouvido os dois sons nesses modos, verificou-se que as frequências geradas pelo programa para esses candidatos ou eram bem próximas da frequência limite da banda crítica em questão, ou as frequências dos sons eram bem distantes uma da outra ou as amplitudes dos sons não eram distantes o suficiente para que houvesse o efeito do mascaramento. Desse



modo, vemos em que os casos onde foi possível escutar os dois sons emitidos foram em situações onde o estímulo da membrana basilar eram os possíveis casos onde não haveria total sobreposição dos estímulos na mesma. Assim, nesses casos, o efeito do mascaramento não ocorreria, sendo possível ouvir os dois sons.

Uma observação interessante deve ser feita nas respostas para o modo “2 – estéreo”. Para esse modo, temos um som com determinada amplitude e frequência sendo captado por um ouvido e outro som com determinada amplitude e frequência sendo captado pelo outro ouvido. Dessa forma, pode-se questionar se o mascaramento simultâneo ocorre somente na região da membrana basilar devido a uma limitação física do ouvido. Afinal, como não houve sobreposição dos estímulos na membrana basilar de um mesmo ouvido, o mascaramento simultâneo só pode ter ocorrido na região cerebral. Além disso, percebe-se que houve um número maior de candidatos que ouviram apenas um som para o modo “2 – estéreo” do que para o modo “2 – mono”.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados gerou um questionamento interessante: será que o mascaramento ocorre somente na região da membrana basilar? Este questionamento é condizente, pois a possibilidade do mascaramento não ocorrer somente na região da membrana basilar pode inferir num desenvolvimento de algoritmos para compactação de arquivos de áudio melhores. Com os resultados obtidos, vê-se que a metodologia proposta conseguiu mostrar o efeito do mascaramento sonoro. Afinal, ao receberem estímulos dos modos “2 - estéreo” e “2 - mono”, a maioria dos candidatos afirmou ter ouvido apenas 1 som.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] VILELA, Ana Luisa Miranda. **AUDIÇÃO: ANATOMIA DA ORELHA**. Disponível em: <[www.afh.bio.br/sentidos/Sentidos3.asp](http://www.afh.bio.br/sentidos/Sentidos3.asp)>. Acesso em: 14 jun. 2010.

[2] FONSECA, Humberto; SANTOS, Vasco; FERREIRA, Aníbal. **O ouvido: Constituição do sistema auditivo humano**. Disponível em: <[ameliapedrosa.com.sapo.pt/FM5/Som/Ouvido.htm](http://ameliapedrosa.com.sapo.pt/FM5/Som/Ouvido.htm)>. Acesso em: 14 jun. 2010.

[3] BARBEDO, Jayme Garcia Arnal. **PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DA AUDIÇÃO**. Disponível em: <[www.decom.fee.unicamp.br/~amauri/disciplinas/ie308/modelo\\_psico.pdf](http://www.decom.fee.unicamp.br/~amauri/disciplinas/ie308/modelo_psico.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2010.

[4] DREW, Mark S.. **4.4. Audio Compression**. Disponível em: <<http://www.cs.sfu.ca/CC/365/mark/material/notes/Chap4/Chap4.4/Chap4.4.html>>. Acesso em: 14 jun. 2010.

EVEREST, F. Alton, POHLMANN, Ken C. **Master Handbook of Acoustics**. McGraw-Hill: 2009.

HENRIQUE, Luis L. **Acústica Musical**. Lisboa: Ed. Gulbenkian, 2002.



KAHRS, Mark, BRANDENBURG, Karlheinz. **Applications of digital signal processing to audio and acoustics.** Kluwer, 2002.

## **SENSORY LIMITS HUMAN AND ENGINEERING: A TOOL FOR DEMONSTRATION OF MASKING**

***Abstract:** The masking is a very useful for engineering. A great example of applying this effect is the MP3. Audio compression is done by the MP3 based on the fact that not all the stored sounds are audible due to masking. Thus, a file compression is done by withdrawing the sounds are not audible. However, despite its great usefulness, little is said about a way to show the existence of this phenomenon. This work aims to create an easy and simple to show the existence of masking.*

**Key-words:** Masking, Basilar membrane, Critical bands