
EQUALIZADORES PERCEPTUAIS PARA MELHORIA DE SINAIS DE VOZ, BASEADOS EM RESULTADOS DE EXAMES DE AUDIOMETRIA

A. R. Gomes e Silva*, J. M. M. da Silva* e H. M. de Oliveira*

*DES/Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil

e-mail: hmo@ufpe.br

Abstract: This paper describes a design strategy to personalized binaural equalizers with the aim of improving the perception of speech signals. This is carried out by means of standard audiometry test results. Thus, an individual with hearing losses (who does not always need auricular devices) can use the audiometry outcome so as to configure an equalizer that compensates his own losses. This perceptual equalizer could be connected to a loud-speaker or a communication system (ex: VoIP) for achieving comfortable hearing.

Palavras-Chave: Equalizadores perceptuais, processamento de sinais de voz, curvas isofônicas, audiogramas.

Introdução

Uma das mais relevantes habilidades do ser humano é a sua capacidade de comunicação. Dentre as formas de se comunicar, a fala desempenha um admirável papel, por isso uma audição apropriada é desejável e praticamente essencial. É fato que a percepção auditiva de um indivíduo não é a mesma durante toda a sua vida; há vários fatores que podem influenciá-la, dentre eles: a idade, doenças, exposição excessiva a ruídos, deformações físicas na estrutura do ouvido e etc.

Uma das classes de deficiência auditiva inclui as chamadas “perdas senso-neurais”, causadas pelo funcionamento anômalo da cóclea, do nervo auditório, ou ambos [1]. Nessa classe de deficiência é possível constatar que a sensibilidade a baixos níveis de intensidade de som é atenuada, enquanto em níveis mais elevados, a percepção mantém-se praticamente a mesma que se teria sem essa deficiência. Esse fenômeno pode ser descrito de duas formas:

- a curva perceptual de intensidade auditiva desses indivíduos altera-se de forma mais rápida que a de indivíduos com audição normal, descrito por Fowler como *Recruitment of Loudness* [2];
- a taxa perceptual de crescimento da intensidade auditiva desses indivíduos é a mesma, entretanto, eles possuem um limiar audível elevado, descrito por Buus e Fiorentine, como *Softness Impression* [3].

Em ambos os casos, o aumento na intensidade do som nas frequências menos audíveis torna viável discriminar informações antes não percebidas. Isso vem

conduzindo muitos pesquisadores ao desenvolvimento de novos métodos de compensação desses efeitos, essencialmente baseados em técnicas de processamento de sinais [4]-[7]. Muitas dessas abordagens baseiam-se em estratégias rebuscadas, em que grande quantidade de informação é necessária, através de exames complexos, ou de uma estimativa, levando em consideração aspectos gerais de grupos com perdas auditivas específicas. Uma revisão sobre as técnicas utilizadas para compensação auditiva para indivíduos com perdas senso-neurais pode ser encontrada em [8]. A idéia aqui proposta é de utilizar o exame de audiometria de um indivíduo com deficiência auditiva para a elaboração de um equalizador personalizado de simples ajuste que compense as perdas nas faixas de frequências afetadas.

Desenvolvimento da Proposta

Em 1950, Fletcher apresentou um método para estimar a perda auditiva para a voz [8], o qual é baseado em um audiograma (um exame padrão que pode revelar se um indivíduo tem perda auditiva). Para o desenvolvimento deste artigo, levando em consideração o trabalho seminal de Fletcher, estimou-se que, calculada a perda auditiva, é possível projetar adequadamente uma compensação de intensidade do sinal de voz.

Em 2003, a ISO padronizou um conjunto de curvas isofônicas 0. Uma curva isofônica representa uma medida de pressão sonora com relação ao espectro em frequência para o qual o indivíduo percebe uma intensidade constante quando apresentados tons puros. Na Figura 1 tem-se a curva estabelecida para o limiar audível (0 phon^1). A intensidade está expressa em dB SPL – *Sound Pressure Level* – que representa o valor da pressão em dB tendo como referência um valor de $20 \mu\text{Pa}$.

Um exame de audiometria padrão mostra, através de um audiograma, como está se comportando o limiar de sensibilidade dos ouvidos de um indivíduo para o intervalo de frequências na faixa de 250 Hz a 8 kHz. Nas Figuras 2 e 3 são mostrados os resultados desse tipo de exame para dois indivíduos: um com audição normal e o outro apresentando alguma perda auditiva.

¹ **Phon** é a unidade de medida para o mesmo nível de intensidade auditiva percebida.

Nesses gráficos, os valores das perdas são expressos em dBHL – *Hearing Loss* – que é a diferença entre o limiar medido para um paciente (em dB SPL) e o limiar normal médio (em dB SPL) 0. Dessa forma, um indivíduo cujo audiograma é contínuo em 0 dB tem sua audição exatamente igual à curva de resposta média da população, considerada como sendo “padrão”.

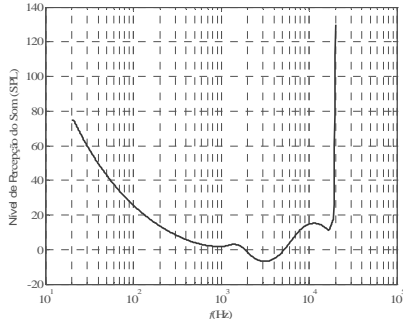


Figura 1: Curva do limiar de percepção auditiva para o ouvido humano estabelecida pela ISO.

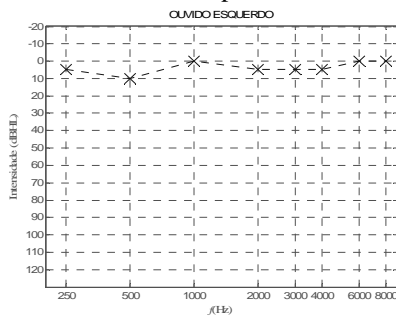


Figura 2: Exame de audiometria padrão (resposta de 250 Hz a 8 kHz) de um indivíduo com audição normal.

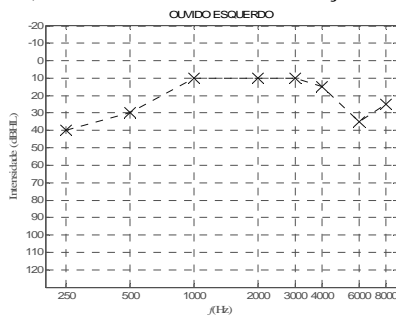


Figura 3: Exame de audiometria padrão de um indivíduo com perda auditiva significativa no ouvido esquerdo.

É possível encontrar ferramentas comerciais de tratamento de sinais de áudio que permitam que um usuário com deficiência auditiva tenha melhor percepção do sinal de áudio (ex: PCAudi 0). Esses programas fazem uso de diversos blocos de processamento, incluindo: equalizadores, compressores, canceladores de eco, entre outros. Entretanto, constata-se certo nível de dificuldade para o usuário ajustar os parâmetros do equalizador. Este, muitas vezes, recorre a um serviço especializado de atendimento ao cliente para fazer tal configuração.

Conforme Marozeau 0, as diferenças individuais são mais relevantes para os indivíduos com deficiência auditiva do que para aqueles com audição normal.

Em princípio, o equalizador binaural personalizado aqui proposto é feito apenas para equalização de sinais de voz (na banda até 4 kHz). Entretanto, nenhum fato impede que esta estratégia seja expandida para toda faixa audível (20 a 20 kHz), devendo-se fazer uso de resultados de uma audiometria que cubram tal faixa.

Modelo Simplificado do Trato Auditivo

Antes de desenvolver a implementação dos equalizadores perceptivos, faz-se uma breve revisão a respeito da teoria dos sistemas lineares para modelar o trato auditivo. Seja $H_N(f)$ a resposta em frequência do ouvido de um indivíduo considerado de audição normal. Na Figura 4, tem-se ilustrado o sistema auditivo desse indivíduo de uma forma simplificada.

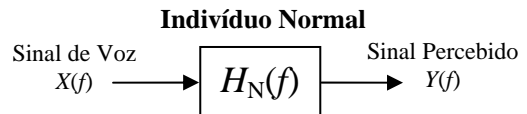


Figura 4: Representação do sistema auditivo de um indivíduo normal

Se o sinal de voz ($X(f)$) tem qualidade relativamente boa (baixa contaminação e intensidade suficientemente alta), um indivíduo com audição normal terá uma boa percepção do sinal ($Y(f)$). Mas, se o indivíduo apresentar perda auditiva com resposta em frequência do seu ouvido expressa por $H_P(f)$ (Figura 5), o sinal pode não ser percebido claramente ($Z(f)$). Pode-se dizer que o sinal $Z(f)$ é uma versão do sinal $Y(f)$ com perdas. A proposta é compensar essas perdas através de um equalizador perceptual (Figura 6).

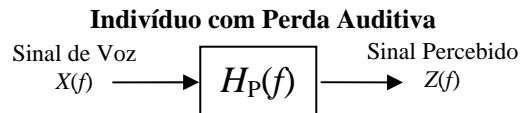


Figura 5: Representação do trato auditivo de um indivíduo com perda auditiva.

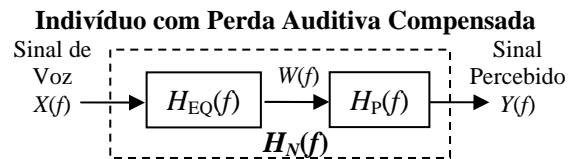


Figura 6: Ilustração da inserção do equalizador para compensação de perda auditiva.

Tem-se, pela Figura 6, que

$$H_{EQ}(f) H_P(f) = H_N(f), \quad (1)$$

$$H_{EQ}(f) = \frac{H_N(f)}{H_P(f)}. \quad (2)$$

Para o módulo em dB:

$$|H_{EQ}(f)|_{dB} + |H_P(f)|_{dB} = |H_N(f)|_{dB}, \quad (3)$$

$$|H_{EQ}(f)|_{dB} = |H_N(f)|_{dB} - |H_P(f)|_{dB}. \quad (4)$$

Projeto de Equalizadores Perceptuais

O resultado expresso na Equação 4 mostra que a curva de equalização $H_{EQ}(f)$ (em dB) é dada pela diferença entre as curvas de um indivíduo com audição normal e um indivíduo com perda auditiva. Como mencionado anteriormente, essa diferença pode ser estimada através de um exame de audiometria padrão que é realizado para oito frequências específicas: 250, 500, 1 k, 2 k, 3 k, 4 k, 6 k e 8 kHz (Figuras 2 e 3).

A proposta aqui desenvolvida visa a produção de um equalizador personalizado para sinais de voz. Assim, serão utilizados apenas os valores compreendidos no intervalo até 4 kHz. Um exame mais sofisticado (varrendo toda a faixa audível) pode ser utilizado para projetar um equalizador para sinais de áudio em geral (i.e., 20 Hz a 20 kHz).

Devido às frequências padrão empregadas nos exames de audiometria, o espectro foi dividido em seis bandas como ilustrado na Figura 7. Os filtros que estão apresentados nessa figura são empregados para compor o equalizador. Eles foram implementados através do método clássico de projetos de filtros digitais FIR com fase linear janelados [15], todos têm ordem $n=120$. Foi adotada uma janela de Hamming de comprimento $n+1$. As frequências de corte dos filtros são, respectivamente:

$$\begin{cases} f_L^{(1)} = 177\text{Hz}; & f_L^{(2)} = 354\text{Hz}; \\ f_H^{(1)} = 354\text{Hz}; & f_H^{(2)} = 707\text{Hz}; \\ f_L^{(3)} = 707\text{Hz}; & f_L^{(4)} = 1.414\text{Hz}; \\ f_H^{(3)} = 1.414\text{Hz}; & f_H^{(4)} = 2.450\text{Hz}; \\ f_L^{(5)} = 2.450\text{Hz}; & f_L^{(6)} = 3.464\text{Hz}; \\ f_H^{(5)} = 3.464\text{Hz}; & \end{cases} \quad (5)$$

A próxima tarefa consiste em ponderar esses filtros, ou seja, determinar o ganho que deve ser atribuído a cada um deles. Percebe-se que as frequências de corte dos filtros estão precisamente localizadas nos pontos médios entre as frequências padrão utilizadas no exame (em relação ao eixo na escala log). Isso foi propositalmente ajustado para que a compensação, nas frequências cuja percepção foi medida, seja adequada aos valores determinados através do exame. Por exemplo, para o primeiro filtro, as frequências de corte foram escolhidas como $f_L=177$ Hz e $f_H=354$ Hz de forma que a frequência central $f_0 = \sqrt{f_L f_H}$ corresponda exatamente a 250 Hz, frequência disponível no audiograma. O mesmo acontece para as demais faixas. Assim, o ganho G_i de cada filtro i será fixado em função do valor da resposta em frequência do equalizador na frequência central f_i , ou seja,

$$|G_i|_{dB} = |H_{EQ}(f_i)|_{dB}, \quad (6)$$

sendo $|H_{EQ}(f_i)|_{dB}$ os valores encontrados no audiograma provenientes da audiometria. A estratégia de projeto apresentada foi implementada no MATLAB™ v7.0.0.19920 (R14).

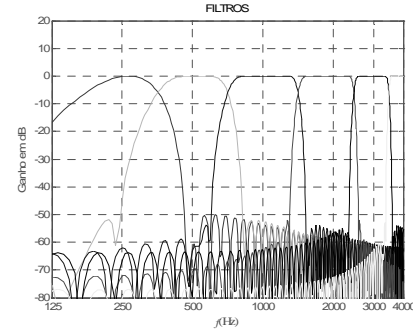


Figura 7: Resposta em frequência do módulo em dB dos filtros para implementação dos equalizadores.

Análises do Equalizador e Resultados Experimentais

Para o exame do indivíduo com perda auditiva caracterizada na Figura 3, tem-se

$$\begin{cases} |G_1^{(E)}|_{dB} = |H_{EQ}^{(E)}(250)|_{dB} = 40\text{dB} \\ |G_2^{(E)}|_{dB} = |H_{EQ}^{(E)}(500)|_{dB} = 30\text{dB} \\ |G_3^{(E)}|_{dB} = |H_{EQ}^{(E)}(1000)|_{dB} = 10\text{dB} \\ |G_4^{(E)}|_{dB} = |H_{EQ}^{(E)}(2000)|_{dB} = 10\text{dB} \\ |G_5^{(E)}|_{dB} = |H_{EQ}^{(E)}(3000)|_{dB} = 10\text{dB} \\ |G_6^{(E)}|_{dB} = |H_{EQ}^{(E)}(4000)|_{dB} = 15\text{dB} \end{cases} \quad (7)$$

O equalizador perceptual para este indivíduo foi implementado em *software*, e foram realizados testes experimentais preliminares. Neles, um computador PC padrão foi usado como fonte para a reprodução de sinais de voz previamente gravados em PCM mono 8-bits. O indivíduo foi submetido a uma bateria de sinais de voz distintos, inicialmente sem a compensação perceptual e após, com a atuação do seu equalizador perceptual individual. Os testes de voz (natural e com a ênfase perceptual) foram conduzidos empregando fones de ouvido. Os equalizadores para correção em cada ouvido foram estimados, atuando a correção em apenas um, ou nos dois ouvidos. Os resultados subjetivos sugerem que a correção proporcionada pelo sistema de compensação de perda auditiva é percebida claramente. Em todas as situações, houve uma preferência inflexível pelo sinal de voz com correção perceptual.

O próximo passo para a validação deste modelo de correção auditiva é testar a eficiência dos equalizadores personalizados em um número maior de indivíduos. A maior vantagem do procedimento é de não requerer *hardware* específico para auxiliar a escuta: o aplicativo pode ser rapidamente instalado em qualquer computador, disponibilizado uma pronta correção do áudio, facilitando e tornando mais natural, mais compreensível, processos como reprodução de áudio, acesso telefônico VoIP etc. Testes específicos para avaliar o efeito em outros sinais de áudio como aqueles provenientes de mp3, estão em andamento.

A idéia é fazer uma parceria com profissionais na área de fonoaudiologia, visto que esses têm técnicas e

equipamentos apropriados, para que os testes efetuados sejam conduzidos de forma adequada. Finalmente, deve-se salientar que se forem obtidos resultados de um exame de audiometria que incluam frequências intermediárias (ex: 750, 1,5 kHz), é possível aumentar a quantidade de filtros FIR no banco equalizador (ou seja, a resolução frequencial), isso fará com que o ajuste seja ainda mais fiel.

Conclusões e Trabalhos em Andamento

Neste artigo foi proposta uma estratégia prática e simples para o desenvolvimento de equalizadores binaurais perceptuais personalizados que, através de informações provenientes de um exame audiométrico, são utilizados para compensar a perda auditiva de indivíduos. A idéia principal é o uso direto, objetivo e prático do resultado do exame, não exigindo (em uma primeira abordagem simplificada) a presença de especialistas para os ajustes. Os resultados inicialmente obtidos apontam na direção da facilidade de uso do sistema, pela sua inclusão direta em computadores digitais, ferramenta indispensável de trabalho e acesso da maioria dos usuários.

A influência da escolha do janelamento utilizado para a resposta ao impulso dos filtros na qualidade da voz recuperada também pode ser investigada (Hamming, Kaiser, Chebwin), visando adotar uma escolha mais natural ao usuário. As propostas para trabalhos futuros incluem o desenvolvimento de ferramentas de “auto-teste” e blocos de processamento que compensem outros fatores, incluindo ruídos aditivos na transmissão do sinal de voz (descontaminação de áudio), visto que esses ruídos podem interferir de forma intensa em relação a diferentes deficiências auditivas.

Agradecimentos

Ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisas e Desenvolvimento Tecnológico) pelo suporte financeiro.

Referências

- [1] J.C. Rutledge and M.A. Clements, “Compensation for recruitment of loudness in sensorineural hearing impairments using a sinusoidal model of speech,” *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 5, pp.3641–3644, 1991.
- [2] E.P. Fowler: “The recruitment of loudness phenomenon,” *Laryngoscope*, vol. 60, pp. 680–695, 1950.
- [3] S. Buus and M. Florentine, “Growth of loudness in listeners with cochlear hearing losses: recruitment reconsidered,” *J.A.R.O.* vol. 3, 120–139, 2002.
- [4] J.B. Allen, “Recruitment compensation as a hearing aid signal processing strategy”, 1998. *ISCAS '98. Proc. of the IEEE International Symposium on*

Circuits and Systems, vol. 6, pp. 565–568, 1998.

- [5] M.A. Trenas, J.C. Rutledge, and N.A. Whitmal, “Wavelet-based noise reduction and compression for hearing aids,” *Engineering in Medicine and Biology. 21st Annual Conf. and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Soc.. Proc. of the First Joint*, vol. 1, pp. 670 vol.1, 1999.
- [6] S. Wyrsh and A. Kaelin, “A DSP implementation of a digital hearing aid with recruitment of loudness compensation and acoustic echo cancellation,” *Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics. IEEE ASSP*, pp. 4 19–22, Oct. 1997.
- [7] T. Dillon Ching, and D.H., Byrne, “Speech recognition of hearing impaired listeners: Predictions from audibility and the limited role of high-frequency amplification”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 103, pp. 1128–1140, 1998.
- [8] B.C.J. Moore, “Speech processing for the hearing-impaired: successes, failures, and implications for speech mechanisms,” *Speech Communication*, vol. 41, pp. 81–91, 2003.
- [9] H. Fletcher, “A Method of Calculating Hearing Loss for Speech from an Audiogram”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 22, 1950, DOI:10.1121/1.1906567
- [10] H. Fletcher and W.A. Munson, Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation, *The Journal of the Acoustical Society of America* vol.5, pp. 82–108, 1933.
- [11] International Organization for Standardization, “Iso/IEC 226:2003: Acoustics -normal equal-loudness-level contours,” 2003.
- [12] L.J. Sivian and S.D. White, On Minimum Audible Sound Fields, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.4, pp.288-321, 1933.
- [13] UCL Dept. of Phonetics & Linguistics: <http://www.phon.ucl.ac.uk> acessado em 30/07/08
- [14] Auditivo Produtos Eletrônicos Ltda.: <http://www.auditivo.com.br> acessado em 30/07/08
- [15] J. Marozeau, and M. Florentine, “Loudness growth in individual listeners with hearing losses: A review,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 122, pp. 81–87, 2007.
- [16] A.V. Oppenheim and R.W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1989.