

## ESTIMAÇÃO DO AUDIOGRAMA USANDO A MAGNITUDE QUADRÁTICA DA COERÊNCIA MÚLTIPLA E ESTIMULAÇÃO MONAURAL DE TONS MODULADOS EM AMPLITUDE NA FAIXA DE 40 HZ

GLAUCIA DE MORAIS SILVA<sup>\*,†</sup>, FELIPE ANTUNES<sup>†</sup>, LEONARDO BONATO FELIX<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação ampla UFSJ e CEFET/MG  
Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro - CEP: 36.307-352  
São João del-Rei, MG, Brasil*

<sup>†</sup>*Núcleo Interdisciplinar de Análise de Sinais, Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Viçosa, Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, CEP 36570-000  
Viçosa, MG, Brasil*

Email: glauucia@hotmail.com, antunesfelipe.elt@gmail.com, leobonato@ufv.br,

**Abstract**— The application of objective detection techniques responses enables the estimation of audiogram without subjective interferences of patients and evaluators. In this work, to find the hearing thresholds, optimizing the detection time, the Multiple Magnitude-Squared Coherence (MMSC) was used. The MMSC was used to detect Auditory Steady-State Response (ASSR) evoked by amplitude modulation tones. An off-line analysis of electroencephalogram signals was performed on 10 volunteers in the intensities of 15, 20, 25, 30, 40 and 50 *dB SPL*, for carrier frequencies of 0.5, 1, 2 and 4 *kHz*. After the variation of the parameters Set of Channels, Stop Criteria and Maximum Number of Windows, were selected two detectors by correlation with the thresholds of pure tone audiometry, called Maximum and Fast. The Maximum detector showed correlation coefficient  $r = 0.7861$ , mean difference between the physiological and behavioral thresholds of 5.50 *dB SPL*, average detection time for ear 1 *h* and 14 *min* and medium for stimulus 3.09 *min*, while Fast obtained coefficient  $r = 0.8318$ , difference of 5.12 *dB SPL*, average detection time for ear 34 *min* and stimulus 1.42 *min*.

**Keywords**— Eletroencefalograma, Auditory Steady-State Response, Multiple Magnitude-Squared Coherence, Audiogram

**Resumo**— A aplicação de técnicas de detecção objetiva de repostas possibilita a estimação de audiogramas, sem interferências subjetivas de pacientes e avaliadores. Neste trabalho, para encontrar os limiares auditivos, otimizando o tempo de detecção, foi utilizada a Magnitude Quadrática da Coerência Múltipla (MMSC). A MMSC foi empregada na detecção de Respostas Auditivas em Regime Permanente (ASSR) evocadas por tons modulados em amplitude. Foi realizada uma análise *off-line* dos sinais de eletroencefalograma de 10 voluntários, nas intensidades de 15, 20, 25, 30, 40 e 50 *dB SPL*, para frequências portadoras de 0,5, 1, 2 e 4 *kHz*. Após a variação dos parâmetros Conjunto de Canais, Critério de Parada e Número Máximo de Janelas foram selecionados dois detectores, através da correlação com os limiares comportamentais, denominados Máximo e Rápido. O detector Máximo apresentou coeficiente de correlação  $r = 0,7861$ , diferença média entre os limiares fisiológicos e comportamentais de 5,50 *dB SPL*, tempo de detecção médio por orelha de 1 *h* e 14 *min* e médio por estímulo de 3,09 *min*, enquanto o Rápido obteve coeficiente  $r = 0,8318$ , diferença de 5,12 *dB SPL*, tempo de detecção médio por orelha de 34 *min* e por estímulo de 1,42 *min*.

**Palavras-chave**— Eletroencefalograma, Resposta Auditiva em Regime Permanente, Magnitude Quadrática da Coerência Múltipla, Audiograma

### 1 Introdução

Um potencial evocado (PE) representa uma alteração local na estrutura neural de um campo elétrico, devido à um estímulo externo (Picton et al., 1977).

O EEG captado através de eletrodos dispostos no escalpo possibilita medir indiretamente um PE (Chatrian et al., 1960). Segundo (Kuwada et al., 1986) a modulação senoidal da amplitude de um tom contínuo (tom AM) exemplifica um estímulo que evoca uma Resposta Auditiva em Regime Permanente (ASSR), caracterizada por um aumento de energia na frequência da moduladora no espectro de potência do sinal de EEG (Dolphin and Mountain, 1992). Porém, como o EEG também mede diversos outros potenciais e devido à baixa relação sinal ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) resultante, torna-se necessário a

utilização de técnicas de Detecção Objetiva de Resposta (ORD) (Chiappa, 1997).

As técnicas ORD fazem uso de testes estatísticos para definir a presença ou ausência de uma resposta, o que permite uma detecção automática, sem interferências de pacientes ou avaliadores (Lins et al., 1996).

Dentre as ORDs, a Magnitude Quadrática da Coerência (MSC) se destaca por sua eficiência nas estimulações periódicas em EEG (Dobie and Wilson, 1989). Afim de melhorar a detecção são utilizadas técnicas multivariadas, que adicionam mais canais ao teste de detecção, como a Magnitude Quadrática da Coerência Múltipla (MMSC), extensão de múltiplos canais à técnica MSC (Felix et al., 2007).

Neste trabalho serão apresentadas estimativas de audiogramas realizadas através da estimulação monaural de tons modulados em amplitude na

faixa de 40 Hz, utilizando a MMSC e posterior análise dos resultados obtidos.

## 2 Materiais e Métodos

Técnicas ORD permitem o desenvolvimento de uma audiometria automática, sem interferência de pacientes ou examinadores (Lins et al., 1996), a qual foi desenvolvida neste trabalho, de acordo com o fluxograma da Figura 1.

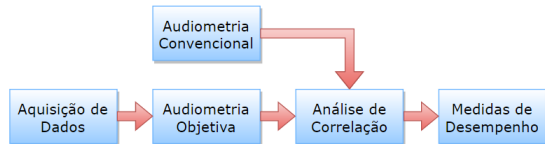


Figura 1: Fluxograma de desenvolvimento da audiometria automática.

### 2.1 Aquisição de Dados

O EEG de 10 voluntários, com faixa etária de 18 a 34 anos ( $24,6 \pm 4,7$ ), sendo 6 do gênero feminino e 4 do gênero masculino, foi realizado no Núcleo Interdisciplinar de Análise de Sinais (NIAS) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), de acordo com o protocolo aprovado pelo comitê de ética local. Os voluntários foram instruídos a sentar confortavelmente, manter os olhos fechados e não dormir.

Para a aquisição dos sinais utilizou-se 23 eletrodos de prata/cloreto de prata conectados ao amplificador de sinais biológicos BrainNet BNT 36, sendo 19 eletrodos úteis, dispostos no escalpo de acordo com sistema internacional 10-20 com referência ao eletrodo  $C_z$  e terra no eletrodo  $F_{pz}$ . Os sinais foram referenciados matematicamente ao eletrodo  $O_z$ , que possui as melhores SNRs para as ASSRs (Van der Reijden et al., 2004). As configurações foram definidas como: filtro notch de 60 Hz, passa-baixas de 100 Hz, passa-altas de 0,1 Hz e frequência de amostragem de 600 Hz. Através de testes comprovou-se que o valor real da frequência de amostragem do equipamento é de 601,5 Hz.

Foram realizadas 48 sessões de 9 minutos e 58 segundos em cada voluntário, com estimulação monaural em 0,5, 1, 2 e 4 kHz, nas intensidades de 15, 20, 25, 30, 40 e 50 dB SPL<sup>1</sup>. A coleta foi realizada seguindo a ordem crescente de frequência portadora e de intensidade. Para evitar que o voluntário dormisse, as coletas foram divididas em 12 ou 6 sessões, ao final das quais os voluntários foram alertados.

<sup>1</sup>Sound Pressure Level, onde: dB SPL =  $20 \log(P_0/P_{ref})$ , sendo que  $P_0$  é a pressão em  $\mu Pa$  e  $P_{ref} = 20 \mu Pa$

### 2.1.1 Estimulação Auditiva

Os estímulos auditivos consistem em tons AM. Segundo (John et al., 1998), estes sinais são criados através da multiplicação de uma senoide portadora, com frequência  $f_c$ , por uma senoide moduladora, com frequência  $f_m$ . A portadora é de alta frequência enquanto a moduladora é de baixa frequência. Este sinal AM, para uma amplitude máxima  $A$  e profundidade de modulação  $\lambda$ , pode ser escrito como:

$$x(t) = \frac{A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot (\lambda \cdot \sin(2\pi f_m t) + 1)}{1 + \lambda} \quad (1)$$

Os estímulos foram gerados digitalmente pelo *Matlab*®, com uma frequência de amostragem de 44100 Hz, profundidade de modulação de 1 e amplitudes ajustadas para 15, 20, 25, 30, 40 e 50 dB SPL.

As moduladoras variaram de 35 a 48 Hz e as mesmas foram corrigidas a priori para um número inteiro de ciclos dentro de uma janela, o que evita o espalhamento espectral na detecção objetiva de ASSRs (John et al., 1998).

Os estímulos foram apresentados por meio de um cabo blindado acoplado a um fone de inserção EA-RTone 5A (Aearo Technologies). A calibração do sistema foi feita na empresa *Acústica Maducha*, utilizando um ouvido artificial (modelo 4152 da BRÜEL & KJÆR) acoplado a um medidor de níveis sonoros (modelo 2250 da BRÜEL & KJÆR) com auxílio de um microfone (modelo 2575 da Larson Davis), de acordo com a resolução n° 365 do Conselho Federal de Fonoaudiologia.

### 2.2 Audiometria Objetiva

#### 2.2.1 Magnitude Quadrática da Coerência Múltipla

A MMSC é obtida ao se estender a técnica MSC para diversos canais, como forma de aumentar a taxa de detecção. Para um estímulo determinístico e periódico em cada janela  $x[n]$ , sincronizado com  $N$  eletrodos  $y_i[n]$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), para um sistema linear multivariado, a MMSC é dada por (Miranda de Sá et al., 2004):

$$\hat{\kappa}_N^2(f) = \frac{V^H(f) \hat{S}_{yy}^{-1}(f) V(f)}{M} \quad (2)$$

onde  $f$  é a frequência,  $M$  é o número de janelas utilizadas,  $V^H(f)$  é um vetor com o somatório das Transformadas de Fourier das janelas de cada sinal e  $\hat{S}_{yy}^{-1}(f)$  é uma matriz com as estimativas da densidade espectral de potência cruzada dos sinais.

O limiar de detecção é dado por (Miranda de Sá et al., 2004):

$$\hat{\kappa}_{N_{crit}}^2 = \frac{F_{crit \alpha, 2N, 2(M-N)}}{\left(\frac{M-N}{N}\right) + F_{crit \alpha, 2N, 2(M-N)}} \quad (3)$$

onde  $M$  é o número de trechos,  $N$  o número de canais e  $F_{crit \alpha, 2N, 2(M-N)}$  é a distribuição  $F$  para um dado nível de significância  $\alpha$  com  $2N$  e  $2(M-N)$  graus de liberdade. Assim como ocorre no caso da MSC, a ASSR é detectada quando  $\hat{\kappa}_N^2(f) > \hat{\kappa}_{N_{crit}}^2$ , ou seja,  $\widehat{MMSC}(f) > \widehat{MMSC}_{crit}$

## 2.2.2 Protocolo de Detecção

O teste de presença ou ausência de uma resposta evocada nos sinais do EEG avalia se houve ou não detecção da audição em cada uma das seis intensidades definidas, para cada uma das quatro frequências portadoras e em cada uma das orelhas.

A análise do sinal ocorre através da comparação do valor obtido na função MMSC com um valor crítico, dada pela equação 3. Esse valor constitui um limiar a partir do qual assume-se que a resposta tenha ocorrido. Inicia-se cada protocolo de detecção a partir de um número de janelas igual ao número de sinais utilizados acrescentados de um e incrementando-as uma a uma, até o tamanho máximo do sinal ou até encontrar uma resposta significativa, de acordo com o critério de parada definido. A cada janela adicionada aplicou-se o teste, verificando a presença ou ausência das ASSRs. Foi definido um nível de significância  $\alpha$  de 5% para o teste da hipótese nula.

Para obter o melhor protocolo de detecção foram utilizados três parâmetros, os quais consistem em:

- **Conjunto de Canais:** foram feitas todas as combinações de 1 a 19 eletrodos, utilizando os sinais dos 19 eletrodos.
- **Critério de Parada:** foi variado o número de janelas consecutivas com respostas significativas de 1 a 8.
- **Número Máximo de Janelas:** foram avaliados 6 tamanhos máximos do sinal (em número de janelas): 50, 80, 100, 120, 150, 180 e 352 janelas, que representam o número máximo de janelas de 1024 pontos utilizados como sinal. Após esse valor máximo, o protocolo foi interrompido e definida a ausência de resposta.

## 2.2.3 Estimação e Ajuste do Audiograma

Os limiares eletrofisiológicos (obtidos através da detecção de ASSRs) foram definidos como a menor intensidade na qual foi detectada uma resposta significativa (presença da ASSR)

(Dimitrijevic et al., 2002; D'haenens et al., 2010). Em alguns casos, estímulos de alta intensidade não detectaram resposta, embora houvesse a detecção em intensidades bem mais baixas. Neste caso, a ausência de resposta em altas intensidade pode ser um falso negativo, ou a detecção em uma intensidade mais baixa pode ser um falso positivo. Portanto, utilizou-se um conjunto de regras para determinar os limiares, o que evita a necessidade de reteste, que por sua vez aumentaria o tempo de exame.

O conjunto de regras aplicado em (Dimitrijevic et al., 2002) e (D'haenens et al., 2010) foi adaptado para os dados obtidos. As seis intensidades foram transformadas em níveis, nos quais o primeiro denota 15 dB e o sexto 50 dB. Em cada nível, um valor binário indica a detecção, ou seja, 1 representa a detecção e 0 a sua ausência. As regras são:

- Se o nível da resposta significativa com a menor intensidade menos o nível da resposta não significativa imediatamente superior for maior ou igual a 2, o limiar é a maior intensidade entre os dois níveis.
- Em alguns casos não foram registradas respostas significativas, independentemente da intensidade. Nestes casos, o limiar foi arbitrariamente definido como 10 dB acima da mais alta intensidade apresentada (Dimitrijevic et al., 2002; D'haenens et al., 2010), ou seja, em 60 dB SPL.

## 2.3 Audiometria Convencional

Para fins de comparação foi realizada uma audiometria tonal convencional, usando o mesmo equipamento utilizado na audiometria objetiva. A intensidade inicial de estímulo monaural foi de 60 dB SPL, sendo reduzida gradativamente para 50, 40, 30, 25, 20 e 15 dB SPL. Os limiares comportamentais, para cada voluntário, foram definidos como a menor intensidade na qual ocorreu resposta. Todos os participantes do exame apresentaram limiares auditivos dentro dos valores de normalidade.

## 2.4 Análise de Correlação

Após realizada a audiometria tonal convencional, utilizou-se o coeficiente de correlação entre os limiares eletrofisiológicos e comportamentais. Para cada combinação, número máximo de janelas e critério de parada foi calculado o coeficiente de Pearson ( $r$ ).

## 2.5 Medidas de Desempenho

### 2.5.1 Diagramas de Dispersão

Os diagramas de dispersão permitem representar simultaneamente os valores de ambos os li-

mias obtidos durante a realização do trabalho, possibilitando a visualização da relação dos dois conjuntos de variáveis, sendo o eixo das abscissas relativo aos limiares eletrofisiológicos e o eixo das ordenadas aos comportamentais, ambos em dB SPL.

### 2.5.2 Diferença Média de Limiares

Afim de avaliar a proximidade dos resultados obtidos em ambas as audiometrias calculou-se a diferença média entre os limiares encontrados, dada pela diferença entre os limiares ASSR e os limiares comportamentais.

### 2.5.3 Tempo de Detecção

Para cada combinação de detector foi calculado o tempo médio de detecção de cada estímulo e o tempo total da audiometria. No cálculo considera-se o tempo gasto na detecção de todas as seis intensidades para cada uma das frequências portadoras.

## 3 Resultados

### 3.1 Seleção de Detectores

Foram selecionados dois arranjos de detectores que apresentaram desempenho notável. São eles:

- **Máximo:** consiste na combinação dos 4 melhores resultados, isto é, a correlação média mais próxima do valor 1 encontrada para cada uma das 4 frequências estudadas.

Tabela 1: Configuração do detector Máximo.

| Configuração             | Frequência portadora |        |        |        |
|--------------------------|----------------------|--------|--------|--------|
|                          | 0,5 kHz              | 1 kHz  | 2 kHz  | 4 kHz  |
| $n^{\circ}$ máx. janelas | 180                  | 50     | 80     | 352    |
| $n^{\circ}$ eletrodos    | 6                    | 9      | 7      | 8      |
| Crit. parada             | 2                    | 1      | 1      | 4      |
| $r$                      | 0,9425               | 0,9365 | 0,8950 | 0,9207 |

O conjunto de eletrodos que compõe a configuração do detector Máximo é:

Tabela 2: Combinações do detector Máximo.

| Frequência Portadora | Conjunto de eletrodos                                  |
|----------------------|--------------------------------------------------------|
| 0,5 kHz              | 'T3', 'FP1', 'F3', 'F8', 'F4' e 'CZ'                   |
| 1 kHz                | 'F7', 'T3', 'FP1', 'C3', 'F8', 'T4', 'P4', 'O2' e 'PZ' |
| 2 kHz                | 'F7', 'C3', 'T4', 'C4', 'O2', 'FZ' e 'PZ'              |
| 4 kHz                | 'FP1', 'F3', 'P3', 'T4', 'C4', 'O2', 'FZ' e 'CZ'       |

- **Rápido:** consiste na melhor configuração com o critério de parada igual a 1 para todas as frequências testadas.

Tabela 3: Combinação do detector Rápido.

| Configuração             | Frequência portadora |        |        |        |
|--------------------------|----------------------|--------|--------|--------|
|                          | 0,5 kHz              | 1 kHz  | 2 kHz  | 4 kHz  |
| $n^{\circ}$ máx. janelas | 80                   | 50     | 80     | 80     |
| $n^{\circ}$ eletrodos    | 7                    | 9      | 7      | 7      |
| $r$                      | 0,9000               | 0,9365 | 0,8950 | 0,8864 |

O conjunto de eletrodos que compõe a configuração do detector Rápido é dado por:

Tabela 4: Combinações do detector Rápido.

| Frequência Portadora | Conjunto de eletrodos                                  |
|----------------------|--------------------------------------------------------|
| 0,5 kHz              | 'F7', 'F3', 'C3', 'F8', 'T6', 'P4' e 'FZ'              |
| 1 kHz                | 'F7', 'T3', 'FP1', 'C3', 'F8', 'T4', 'P4', 'O2' e 'PZ' |
| 2 kHz                | 'F7', 'C3', 'T4', 'C4', 'O2', 'FZ' e 'PZ'              |
| 4 kHz                | 'T3', 'P3', 'P4', 'O2', 'FZ', 'CZ' e 'PZ'              |

### 3.1.1 Casos Típicos

O símbolo **X** identifica os limiares comportamentais e **O** os limiares eletrofisiológicos. As Figuras 2 e 3 apresentam casos típicos de todos os detectores para o voluntário #4.

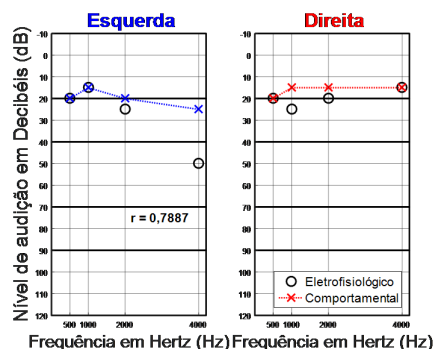


Figura 2: Audiograma do voluntário #4 obtido através do detector Máximo e da audiometria convencional -  $r = 0,7887$ .

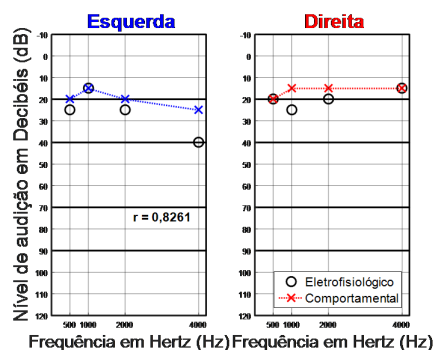


Figura 3: Audiograma do voluntário #4 obtido através do detector Rápido e da audiometria convencional -  $r = 0,8261$ .

### 3.2 Medidas de Desempenho

#### 3.2.1 Diagramas de Dispersão

Os diagramas de dispersão representam as tendências dos resultados. Os mesmos foram construídos utilizando ambos os limiares encontrados, possibilitando a obtenção do coeficiente de correlação geral por detector. As Figuras 4 e 5 mostram os digramas de dispersão encontrados para os detectores Máximo e Rápido, respectivamente.

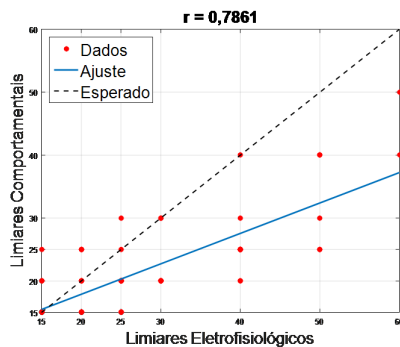


Figura 4: Diagrama de dispersão de todas as portadoras para detector Máximo -  $r = 0,7861$ .

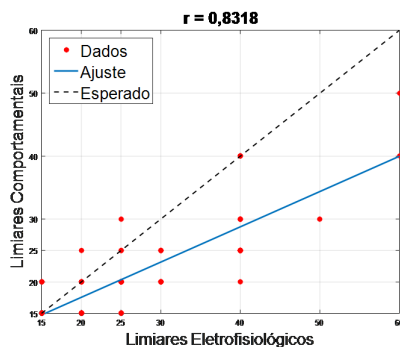


Figura 5: Diagrama de dispersão de todas as portadoras para detector Rápido -  $r = 0,8318$ .

#### 3.2.2 Diferença Média de Limiares

As médias das diferenças entre os limiares eletrofisiológicos (obtidos através das ASSRs) e comportamentais (obtidos na Audiometria Convencional) são exibidas na Tabela 5.

Tabela 5: Média das diferenças entre limiares eletrofisiológicos e comportamentais (diferença  $\pm$  desvio padrão).

| Frequência Portadora | Diferença        |                 |
|----------------------|------------------|-----------------|
|                      | Máximo           | Rápido          |
| 0,5 kHz              | -0,25 $\pm$ 5,95 | 2,00 $\pm$ 4,97 |
| 1 kHz                | 5,75 $\pm$ 6,54  | 5,75 $\pm$ 6,54 |
| 2 kHz                | 8,25 $\pm$ 5,68  | 8,25 $\pm$ 5,68 |
| 4 kHz                | 8,25 $\pm$ 8,15  | 4,50 $\pm$ 5,60 |
| Todas                | 5,50 $\pm$ 7,40  | 5,12 $\pm$ 6,06 |

#### 3.2.3 Tempo de Detecção

A Tabela 6 mostra o tempo total gasto para encontrar os limiares referentes às orelhas esquerda e direita e o tempo médio por orelha para os detectores.

Tabela 6: Tempo total médio por detector.

| Estímulo         | Tempo por detector |          |
|------------------|--------------------|----------|
| Detector         | Máximo             | Rápido   |
| Orelha Esquerda  | 1,2403 h           | 0,5806 h |
| Orelha Direita   | 1,2273 h           | 0,5525 h |
| Média por orelha | 1 h 14 min         | 34 min   |

Já a Tabela 7 resume o tempo médio de detecção e o desvio padrão por estímulo para cada um dos detectores.

Tabela 7: Tempo médio de estímulo por detector.

| Frequência Portadora | Tempo por detector (min) |                 |
|----------------------|--------------------------|-----------------|
| Detector             | Máximo                   | Rápido          |
| 0,5 kHz              | 3,11 $\pm$ 1,08          | 1,47 $\pm$ 0,44 |
| 1 kHz                | 1,11 $\pm$ 0,23          | 1,11 $\pm$ 0,23 |
| 2 kHz                | 1,61 $\pm$ 0,35          | 1,61 $\pm$ 0,35 |
| 4 kHz                | 6,51 $\pm$ 2,03          | 1,48 $\pm$ 0,35 |
| Todas as portadoras  | 3,09 $\pm$ 2,41          | 1,42 $\pm$ 0,39 |

## 4 Discussão e Conclusões

Esse trabalho apresentou uma investigação do uso da MMSC para detectar os limiares tonais em ASSRs. Testando cada uma das 524.287 combinações obtidas pela combinação de 1 a 19 eletrodos, para cada critério de parada e número máximo de janelas, utilizando 20 orelhas, obteve-se dois arranjos de detectores com desempenho notável, denominados Máximo e Rápido.

O detector Máximo, apesar de ser denominado dessa forma por apresentar correlações altas nas frequências portadoras, possui coeficiente de correlação geral,  $r = 0,7861$ , mostrado pela Figura 4, menor que do detector Rápido,  $r = 0,8318$ , exibido pela Figura 5, sendo justificado pelo fato deste apresentar um desvio padrão de limiares maior que o detector Rápido. Uma vantagem apresentada pelo detector Rápido é que, como o teste de detecção é aplicado apenas uma vez (critério de parada igual a 1), não é realizada uma avaliação estatística sobre a mesma resposta, minimizando a detecção acidental (D'haenens et al., 2010).

Para o detector Máximo a diferença média entre os limiares eletrofisiológicos e comportamentais é de aproximadamente 5,50 dB e para o Rápido de 5,12 dB, como mostra a Tabela 5, o que representa uma vantagem quando comparado com

(Beck et al., 2014), que apresenta, em média, diferenças de 8,18 *dB SPL*.

Em relação ao tempo de detecção, observa-se que para detectar um estímulo, considerando todas as portadoras, o detector Máximo necessitou, em média, de 3,09 *min* e o Rápido de 1,42 *min*, como exibe a Tabela 7. O Máximo necessita de um tempo maior para detectar os estímulos nas portadoras de 0,5 *kHz* e 4 *kHz*, fato que está diretamente relacionado ao maior número de janelas necessárias para a detecção nessas portadoras. Um estudo realizado por (Picciotti et al., 2012), utilizando estimulação monaural de tons modulados em amplitude (AM) na frequência portadora de 1 *kHz* demandou 25 minutos para detectar o limiar auditivo, considerando a estimulação em 7 intensidades, gastando assim, em média, 3,57 *min* para detectar o estímulo, enquanto os detectores Máximo e Rápido necessitam de 1,11 *min* para a mesma detecção, retratando uma vantagem dos mesmos.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro. Expressamos um agradecimento especial à Acústica Maducha, pela calibração do equipamento e à Divisão de Saúde da UFV, representada pela fonoaudióloga Lenilda Viana, pela colaboração na audiometria tonal.

### Referências

- Beck, R. M. O., Ramos, B. F., Grasel, S. S., Ramos, H. F., de Moraes, M. F. B. B., Almeida, E. R. and Bento, R. F. (2014). Comparative study between pure tone audiometry and auditory steady-state responses in normal hearing subjects, *80*(1): 35–40.
- Chatrian, G. E., Petersen, M. C. and Lazarte, J. A. (1960). Responses to clicks from the human brain: some depth electrographic observations, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* **12**(2): 479–489.
- Chiappa, K. H. (1997). *Evoked potentials in clinical medicine*, 2 edn, New York: Raven Press.
- D'haenens, W., Vinck, B. M., Maes, L., Bockstael, A., Keppler, H., Philips, B., Swinnen, F. and Dhooge, I. (2010). Determination and evaluation of clinically efficient stopping criteria for the multiple auditory steady-state response technique, *Clinical Neurophysiology* **121**(4): 1267–1278.
- Dimitrijevic, A., John, M. S., Van Roon, P., Purcell, D. W., Adamonis, J., Ostroff, J., Nedzelski, J. M. and Picton, T. W. (2002). Estimating the audiogram using multiple auditory steady-state responses, *Journal of the American Academy of Audiology* **13**(4): 205–224.
- Dobie, R. A. and Wilson, M. J. (1989). Analysis of auditory evoked responses by magnitude-squared coherence, *Ear and Hearing* **10**(1): 2–13.
- Dolphin, W. F. and Mountain, D. C. (1992). The envelope following response - scalp potentials elicited in the mongolian gerbil using sinusoidally am acoustic signals, *Hearing Research* **58**(1): 70–78.
- Felix, L. B., Miranda de Sá, A. M. F. L., Infan-tosi, A. F. C. and Yehia, H. C. (2007). Multivariate objective response detectors (mord): statistical tools for multichannel eeg analysis during rhythmic stimulation, *Annals of Biomedical Engineering* **35**(3): 443–452.
- John, M. S., Lins, O. G., Boucher, B. L. and Pic-ton, T. W. (1998). Multiple auditory steady-state responses (master): stimulus and recording parameters, *Audiology* **37**(2): 59–82.
- Kuwada, S., Batra, R. and Maher, V. I. (1986). Scalp potentials of normal and hearingimpaired subjects in response to sinusoidally amplitude modulated tones, *Hearing Research* **21**(2): 179–192.
- Lins, O. G., Picton, T. W., Boucher, B. L., Dureiux-Smith, A. and Champagne, S. C. (1996). Frequency-specific audiometry using steady-state responses, *Ear and Hearing* **17**(2): 81–96.
- Miranda de Sá, A. M. F. L., Felix, L. B. and C., I. A. F. (2004). A matrix-based algorithm for estimating multiple coherence of a periodic signal and its application to the multichannel eeg during sensory stimulation, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **51**(7): 1140–1146.
- Picciotti, P. M., Giannantonio, S., Paludetti, G. and Conti, G. (2012). Steady state auditory evoked potentials in normal hearing subjects: Evaluation of threshold and testing time, *ORL* **74**(6): 310–314.
- Picton, T. W., Woods, D. L., Baribeau-Braun, J. and Healey, T. M. (1977). Evoked potential audiometry, *The Journal of Otolaryngology* **6**(2): 90–119.
- Van der Reijden, C. S., Mens, L. H. M. and Snik, A. F. M. (2004). Signal-to-noise ratios of the auditory steady-state response from fifty-five eeg derivations in adults, *Journal of the American Academy of Audiology* **15**(10): 692–701.