

**Artigo Original**

recebido: 15/12/1998 e aceito em 17/08/1999

**Método para classificação  
de ecos reais e de reverberação  
em meios homogêneos,  
multicamadas**

*A method to classify real and reverberating echoes from a homogeneous multilayered media*

**M. A. Duarte**

Mestre em Engenharia Biomédica,  
Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ,  
Rio de Janeiro - RJ. - e-mail: duarte@peb.ufrj.br

**J. C. Machado**

Professor Adjunto,  
Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ,  
Rio de Janeiro - RJ. - e-mail: jcm@peb.ufrj.br

**W. C. A. Pereira**

Professor Adjunto,  
Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ,  
Rio de Janeiro - RJ. - e-mail: wagner@peb.ufrj.br

**Resumo**

A presença de reverberação, em numerosos estudos e exames com ultra-som (US), costuma ser fonte de artefatos que podem prejudicar a análise desses processos. Além de comprometer a formação de imagens, esses artefatos podem introduzir erros nos resultados de pesquisas em caracterização de materiais, tecidos biológicos e em estimativas de parâmetros em meios multicamadas. Um método que possibilite a separação entre ecos reais (1ª reflexão em um anteparo) e de reverberação (demais reflexões no mesmo anteparo), eliminando os últimos, permitirá melhorias na formação dessas imagens, além de maior precisão nos resultados obtidos nas demais pesquisas com US. Este trabalho propõe um algoritmo para identificação de ecos de reverberação, pela comparação entre os seus espectros de potência (estimados via FFT), utilizando um método de mínimos quadrados, e pela relação temporal existente entre eles. Os resultados de 40 experimentos, realizados para 4 corpos de prova (phantoms) diferentes (10 experimentos para cada phantom) são apresentados e discutidos. Obteve-se 85,9 % de identificações corretas em 390 ecos coletados em todos os 40 experimentos.

**Palavras-chave:** Meios homogêneos. Meios multicamadas, Reverberação, Ultra-som,

**Abstract**

*The presence of reverberation can be a source of artifacts that can hinder the analysis of a large number of studies and exams with ultrasound (US). Besides compromising image generation, these artifacts can introduce errors in US exams, in areas such as material and biological tissue characterization and parameter estimation in multilayered media. A method that allows the distinction between real echoes (first reflection at an interface) and reverberations (other reflections from the same interface), subtracting the latter, could improve the performance of some US exams. This work presents an algorithm for the identification of reverberation echoes. It is based on the comparison of echo power spectra (estimated via FFT), through a least mean square approach, and on the temporal relationship between these echoes. The results of 40 experiments, performed on 4 different phantoms (10 experiments/phantom) are presented and discussed. Correct identifications were obtained in 85.9 % of the 390 echoes collected during these experiments.*

**Keywords:** Homogeneous media, Multilayered media, Reverberation, Ultrasound.

## Introdução

Desde a década de 1950, as técnicas de ultra-som (US) vêm sendo aplicadas, com sucesso, em diversas áreas para testes e exames de várias estruturas. Isso se deve, principalmente, às características não invasivas e não destrutivas do US em relação ao meio por onde se propaga (Shung, 1996).

Dentre as aplicações principais do US, pode-se relacionar: medições de distâncias, espessuras, áreas e volumes, verificação de descontinuidade e rugosidade (corrosão) de materiais, determinação de falhas na geometria de um objeto, verificações na forma de estruturas submersas, medição de velocidade de fluxo (Doppler), formação de imagens médicas para diagnóstico, etc. Pode-se citar, como áreas que utilizam o ultra-som em suas pesquisas, a medicina, a oceanografia, a metalurgia, a mecânica e a química, entre outras.

Na área de mecânica, por exemplo, Simon (1993) analisa diversos métodos propostos para superar limitações na implementação da técnica de pulso-eco (US em modo-A) em ensaios não destrutivos. Analisa ainda os problemas originados pela presença de reverberação nesse tipo de pesquisa. Na verificação de falhas em peças mecânicas, por exemplo, a presença de reverberação poderia indicar a existência de mais falhas do que as que, na verdade, existem (falhas falsas).

Em oceanografia, Tian *et al.* (1997) apresentam um estudo para detecção e formação de imagens de pequenos alvos no fundo do mar. Um dos principais problemas relatados pelos autores é a reverberação existente no fundo do mar. Os sinais espalhados pelos alvos de interesse misturam-se a sinais de reverberação provenientes das demais estruturas do fundo do oceano, como areia, pedras, etc., dificultando, dessa forma, sua determinação correta.

Em medicina, o US é hoje a segunda técnica de formação de imagens mais utilizada clinicamente, preterida apenas pelo Raio-X convencional (Shung, 1996). Pode ser usada para o auxílio ao diagnóstico, através da ultra-sonografia, que gera imagens bidimensionais dos tecidos biológicos. Essas imagens permitem a medição de áreas e volumes, além da determinação de estruturas (rim, fígado e próstata, por exemplo), anomalias orgânicas e o estudo de órgãos em movimento (Fish, 1990). Há também a possibilidade de se determinar a vascularização e a velocidade de fluxo sanguíneo através do efeito Doppler.

As imagens geradas nesses exames são passíveis de artefatos que podem ser causados pela presença

de reverberação. Um método que possibilite a separação entre ecos reais (1ª reflexão em um anteparo) e de reverberação (demais reflexões no mesmo anteparo), eliminando os últimos, permitirá a formação de uma imagem mais próxima da real.

Não se pode deixar de citar os problemas da reverberação nos exames que visam quantificar espessuras de estruturas biológicas, como por exemplo, na verificação de espessura de alguns vasos (carótida, capilares, etc.). A medição da espessura desses vasos permite o acompanhamento da evolução de certas doenças circulatórias e a presença de reverberação poderia comprometer a acurácia dessa avaliação.

Torna-se, portanto, interessante a criação de um método que permita identificar e separar os ecos reais dos de reverberação, justamente para que se possa evitar erros em estimativas de parâmetros, ou ainda, erros em diagnósticos médicos causados por imagens falsas, ou deterioradas, geradas a partir de reverberação.

Estudos preliminares, para permitir essa identificação, foram realizados por Duarte *et al.* (1996), Pereira *et al.* (1997) e Duarte *et al.* (1998). Os resultados obtidos encorajaram a continuação da pesquisa nessa área. É importante observar também que, na literatura especializada, apesar de existirem diversos trabalhos versando sobre a reverberação (Makris *et al.*, 1995; Smith *et al.*, 1997, p. ex.), não foi encontrado nenhum que tratasse especificamente da diferenciação entre ecos reais e de reverberação.

O objetivo deste trabalho é descrever um método simples, desenvolvido para diferenciar ecos de reverberação de ecos reais, utilizando comparações entre os seus espectros de potência, através de um método de mínimos quadrados e através da análise do contexto temporal destes sinais (seus tempos de vôo). Neste são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela aplicação de um algoritmo de identificação de ecos de reverberação a sinais coletados em 40 experimentos. Estes foram realizados com 4 phantoms diferentes, sendo 10 experimentos para cada tipo de phantom. Os 20 primeiros são realizados com phantoms de camada única e os demais foram realizados com 2 phantoms diferentes, de 3 camadas cada um. Todos os phantoms serão descritos no item *Materiais e Métodos*.

A importância científica dessa pesquisa está relacionada ao desenvolvimento de um método que classifica, com razoável percentagem de acertos (85,9% do total de sinais classificados), os ecos reais e os de reverberação em meios homogêneos, multicamadas.

## O Estado da Arte

Recentemente, as pesquisas realizadas na área de US, sobre reverberação, abordam esse tema sob dois pontos de vista principais: a reverberação como sinal; a reverberação como ruído.

Trabalhos como os de Smith *et al.* (1997) e o de Caruthers *et al.* (1997) utilizam a reverberação para a caracterização da morfologia de fundos de oceanos, obtendo relativo sucesso com os modelos empregados para este fim.

Dando ênfase à importância desse trabalho, estão as pesquisas onde a presença da reverberação pode gerar artefatos prejudiciais ao alcance pleno dos objetivos em foco. Pode-se citar os trabalhos em caracterização de tecidos biológicos de Feleppa *et al.* (1996) e Luzzi *et al.* (1997); o de Derouiche *et al.* (1995), para caracterização de materiais heterogêneos; o de Kinra *et al.* (1995), visando a determinação de parâmetros acústicos em meios multicamadas; e o trabalho de Pereira *et al.* (1996), na determinação de velocidades e espessuras em meios multicamadas, além dos trabalhos de Simon (1993) e de Tian *et al.* (1997), já citados. Nessas pesquisas, trabalha-se com os ecos reais das estruturas em estudos, existindo sempre a preocupação de evitar a análise de sinais de reverberação provenientes destas. A presença de reverberação poderia ser prejudicial, pois, nesses casos, gerariam estimativas falsas dos parâmetros característicos dessas estruturas.

Em medicina, onde também seria importante a aplicação do algoritmo, os problemas gerados pela presença de reverberação na formação de imagens médicas estão bem exemplificados em Resende (1988). A presença desta, nas imagens, altera a apresentação das estruturas anatômicas, podendo ser responsável pelo aparecimento de massas inexistentes e pela localização atípica de algumas estruturas, que podem também aparecer de tamanhos e formas irreais.

As múltiplas reflexões (reverberações), cada vez que atingem o transdutor, geram um sinal que é transformado em imagem. A representação dessa reverberação na imagem pode ser dada por linhas paralelas, com intensidades proporcionalmente menores, devido à atenuação sofrida pelo feixe de US no trajeto percorrido (Figura 1).

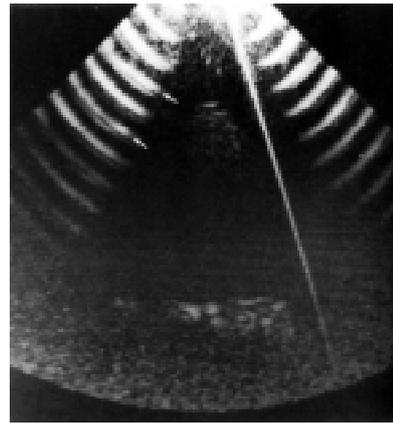
Um problema ainda mais preocupante, causado pela presença de reverberação, pode ocorrer quando a interface de reflexão está muito distante do transdutor. Nesse caso, apenas um eco de reverberação pode ser identificado, como por exemplo, entre o útero e o gás no reto-sigmóide, estando o segundo

eco de reverberação a uma profundidade maior do que a alcançada pela imagem. Este caso pode ocasionar um erro de diagnóstico, pois o aspecto da imagem sugere uma lesão expansiva cística, como mostrado na Figura 2.

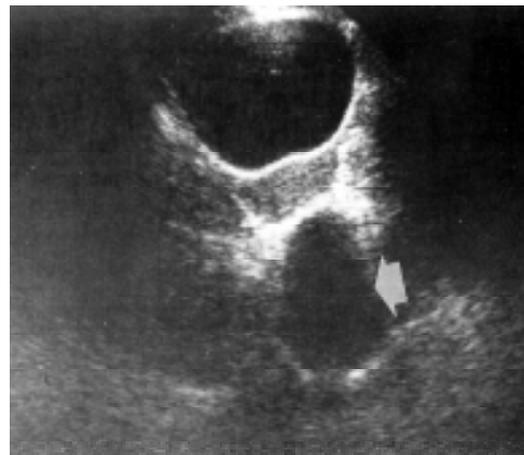
A autora cita ainda alguns outros exemplos de artefatos de imagens causados por reverberação como a *cauda de cometa* posterior em alça intestinal e o artefato *em forma de V* na vesícula biliar, por exemplo. A significativa perda de contraste nas imagens afetadas pelos artefatos de reverberação também é tratada pela autora.

## Fundamentos do Método

Esse trabalho foi realizado a partir de sinais de US de radio-freqüência (RF), coletados em experimentos



**Figura 1.** Artefatos de reverberação na imagem. Observe as linhas paralelas, com intensidades proporcionalmente menores de acordo com a profundidade (figura extraída de Resende, 1988).



**Figura 2.** Pseudo-lesão expansiva cística posterior ao útero, como resultado da reverberação na interface tecidos moles-gás em alça intestinal (figura extraída de Resende, 1988).

utilizando um transdutor como transmissor e receptor, e phantoms com camadas homogêneas e faces paralelas, submersos em água em um tanque acústico (detalhes no item *Materiais e Métodos*). A classificação desses sinais como ecos reais ou de reverberação foi obtida em função dos tempos de vôo destes e de comparações entre os seus espectros de potência, através de um método de mínimos quadrados. Nesse item serão apresentadas as premissas básicas para a validade do método, o modelo de análise proposto para classificar os ecos, como reais ou de reverberação, e o algoritmo implementado.

### Premissas básicas

O método proposto para classificar os sinais de eco pode ser utilizado, desde que observadas as seguintes premissas:

- as camadas do phantom são constituídas de material homogêneo com dispersão moderada. Suas faces planas e paralelas são dispostas perpendicularmente à direção de propagação da onda incidente;
- a onda incidente é plana;

Com isto, a amplitude do espectro de potência de qualquer sinal de eco (real ou de reverberação) pode ser representada por:

$$Y(\omega) = T(\omega)R(\omega) \left[ e^{-\left( \sum_{n=1}^N 2\alpha_n(\omega) 2L_n \right)} \right] X(\omega) \quad (1)$$

onde,  $Y(\omega)$  = amplitude do espectro de potência de um sinal de eco,  $X(\omega)$  = amplitude do espectro de potência do pulso de ultra-som incidente no phantom,  $T(\omega)$  = produto dos coeficientes de transmissão de todas as interfaces atravessadas pelo pulso de ultra-som que contribui para o sinal de eco,  $R(\omega)$  = produto dos coeficientes de reflexão de todas as interfaces onde ocorre reflexão do pulso de ultra-som que contribui para o sinal de eco,  $\alpha_n(\omega)$  = coeficiente de atenuação da amplitude da onda ultra-sônica referente à camada atravessada pelo pulso de ultra-som que contribui para o sinal de eco,  $L_n$  = espessura referente à camada atravessada pelo pulso de ultra-som que contribui para o sinal de eco,  $N$  = número de camadas atravessadas pelo pulso de ultra-som que contribui para o sinal de eco.

Como cada camada possui a sua *assinatura* espectral (coeficientes de atenuação, reflexão e transmissão), pode-se, a princípio, saber se um sinal atravessou, ou não, uma ou mais camadas, analisando-se a amplitude

do espectro de potência do sinal de saída  $Y(\omega)$ .

### Modelo para classificação dos ecos

Esse modelo baseia-se na análise de dois parâmetros: o tempo de vôo para cada sinal de eco e o erro médio quadrático entre os espectros de potência obtidos para cada par de sinais de eco.

O tempo de vôo é utilizado para pré-selecionar os ecos que têm possibilidade de ser reverberação (maiores detalhes no item a seguir).

O método dos mínimos quadrados é usado para minimizar a diferença entre os espectros de potência obtidos para cada par de sinais de eco a partir da definição de uma Função-Erro (equação 2). Supõe-se que o espectro de potência dos ecos que atravessam uma mesma camada são mais parecidos entre si do que os daqueles que atravessam camadas diferentes. Assim, espera-se que os valores da Função-Erro para espectros de ecos que atravessam uma mesma camada (mesmo filtro) sejam sempre menores do que os estimados entre os espectros de ecos que atravessam camadas diferentes (filtros diferentes). Esses valores são usados pelo algoritmo, descrito no próximo item, para a classificação dos sinais.

A expressão usada para o cálculo do valor da Função-Erro é a seguinte:

$$E(K) = \sum_{i=1}^M [P_1(i) - KP_2(i)]^2 \quad (2)$$

onde,  $E(K)$  = valor da Função-Erro mínimos quadráticos;  $M$  = número de componentes dos espectros de potência;  $i$  =  $i$ -ésimo componente dos espectros de potência;  $P_1(i)$  = potência do  $i^{\text{o}}$  componente do espectro de potência do eco número 1;  $P_2(i)$  = potência do  $i^{\text{o}}$  componente do espectro de potência do eco número 2;  $K$  = constante que minimiza  $E(K)$ .

A idéia embutida na equação (2) consiste em comparar as diferenças, ao quadrado, entre as amplitudes de cada componente de frequência de cada par de espectros. A constante  $K$ , aplicada ao segundo espectro ( $P_2$ ), é calculada de tal forma que minimize as diferenças entre  $P_1$  e  $P_2$ . O resultado da expressão (somatório do quadrado dessas diferenças) é um **valor constante** que será usado como parâmetro de comparação com a média de todos os valores de  $E(K)$  obtidos, entre todos os pares de espectros (vide item posterior), para classificar os ecos coletados nos experimentos.

O mínimo da função ocorre quando a derivada de  $E(K)$  em relação à constante  $K$  é igual a zero. Como resultado obtém-se:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^M [P_1(i) - P_2(i)]}{\sum_{i=1}^M [P_2(i)]^2} \quad (3)$$

Ou seja, encontra-se um valor único para a constante  $K$  que vai multiplicar todo o espectro do segundo eco ( $P_2$ ), tornando mínimo o valor de  $E(K)$ .

As figuras 3 e 4 ilustram a diferença entre dois supostos espectros de potência antes e depois da aplicação das expressões de minimização (2) e (3).

Observe que o primeiro espectro ( $P_1$ ) mantém sua forma inalterada, enquanto o segundo espectro ( $P_2$ ), multiplicado pela constante  $K$ , tem seu valor elevado para todos os seus componentes de frequência, diminuindo a diferença entre este e o primeiro. Neste trabalho, o valor de  $E(K)$  é calculado entre todos os pares de espectros de potência dentre todos os ecos coletados nos experimentos realizados, que serão descritos mais adiante.

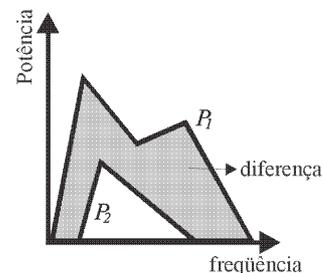
### Algoritmo

Para a concepção do algoritmo, como já foi visto, partiu-se da suposição de que o espectro de potência dos ecos que atravessam uma mesma camada são mais parecidos entre si do que os daqueles que atravessam camadas diferentes. Essa abordagem é proposta levando-se em conta que cada camada pode ser considerada um filtro linear. Assim, pode-se supor que os espectros de sinais que atravessam um mesmo filtro são mais parecidos entre si do que os daqueles que atravessam filtros diferentes. Além disso, como um eco de reverberação percorre, mais de uma vez, o mesmo caminho de um eco anterior, o seu tempo de voo ( $TOF$ ) será uma combinação linear, com coeficientes **inteiros**, dos  $TOF$  dos ecos precedentes. Supõe-se também que os ecos são bem definidos, ou seja, conhece-se seu início e fim. O algoritmo de classificação proposto pode ser dividido em 4 passos (vide diagrama na Figura 5).

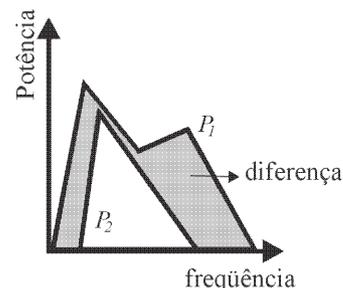
- Os sinais de RF são coletados e seus espectros de potência são calculados via Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*). O valor mínimo da função  $E(K)$ , dado pela equação (2), é calculado para todas as possíveis combinações entre os espectros dos ecos coletados, dois a dois.
- Calcula-se o valor médio (*med*) dentre todos os valores de  $E(K)$  obtidos. Este valor servirá de limiar de comparação posteriormente.
- Para cada eco, é procurada uma ou mais combinações lineares ( $CL$ ), com coeficientes inteiros, capazes de expressar seu  $TOF$  como função dos

$TOF$ 's de ecos precedentes. Aceita-se uma flutuação entre o resultado das combinações lineares e o  $TOF$  do eco em análise (também chamado "tempo de voo de um eco candidato a reverberação" -  $TR$ ) com duração igual ou menor à metade da largura de pulso do sinal transmitido. Caso exista pelo menos uma  $CL$  capaz de satisfazer à condição descrita, o eco em análise será considerado *candidato* a reverberação e então passa-se à fase seguinte. Caso contrário, este será classificado como eco **real**.

- Para cada eco candidato a reverberação, o valor de  $E(K)$ , calculado entre o eco em análise e aqueles cujos  $TOF$  fazem parte das  $CL$  estabelecidas no item anterior, é comparado com a média entre todos os valores de  $E(K)$ , de acordo com a ordem de chegada dos ecos usados para estabelecer essas  $CL$ . Se pelo menos um desses valores for menor que *med*, o eco em questão é classificado como **reverberação**. Este é considerado uma reverberação do eco, cuja comparação espectral com o eco em análise, proporcionou valor de  $E(K)$  menor que *med*.



**Figura 3.** Diferença (cinza) entre dois espectros de potência ( $P_1$  e  $P_2$ ) antes da aplicação das expressões de minimização (2) e (3).



**Figura 4.** Diferença (cinza) entre dois espectros de potência ( $P_1$  e  $P_2$ ) após a aplicação das expressões de minimização (2) e (3).

Nos casos em que a amplitude do eco, que gera um sinal classificado como reverberação, é menor que a amplitude deste, o resultado dessa classificação será desconsiderado. Essa restrição é devido ao fato de não haver ganho de amplitude no sistema, ou seja, um sinal de reverberação não deverá ter amplitude superior ao sinal que o gerou. Essa condição só não será levada em conta caso exista um eco de reverberação formado por um somatório de reverberações de ecos anteriores. Este seria o único caso onde o eco de reverberação em questão poderia ter amplitude maior que um dos ecos geradores.

Após testar todas as combinações possíveis, se todos os valores de  $E(K)$  forem maiores ou iguais que o valor médio, o eco é classificado como **real**.

Para facilitar a compreensão do algoritmo, será exposto a seguir, um exemplo (representação de um experimento), onde foram, supostamente, coletados

5 sinais (figura 6) com os seguintes TOF:

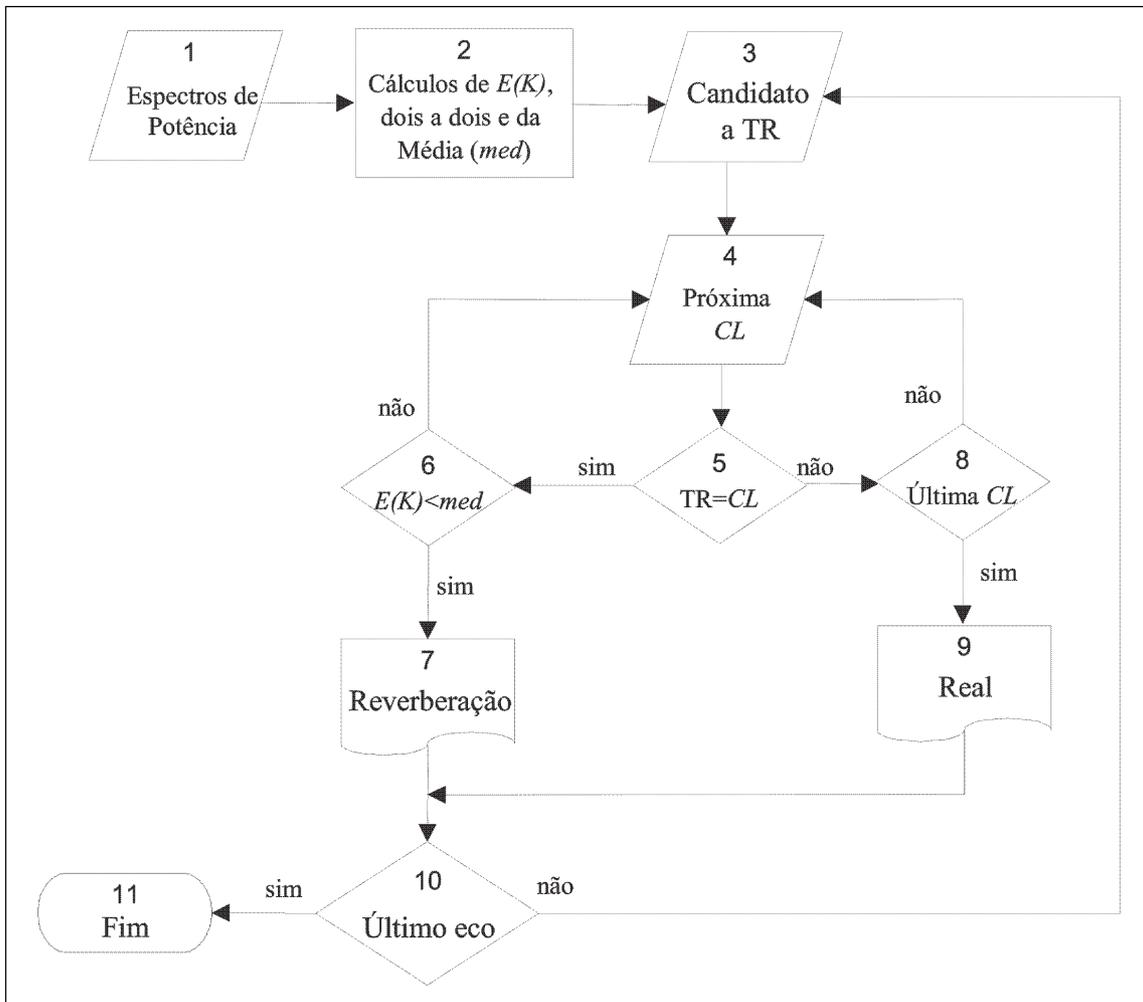
TOF1 - 43  $\mu$ s; TOF2 - 50  $\mu$ s; TOF3 - 86  $\mu$ s;  
TOF4 - 93  $\mu$ s; TOF5 - 129  $\mu$ s.

Após calculados os espectros de potência de cada um desses sinais, calculam-se os valores de  $E(K)$  para todas as combinações possíveis. Fazendo-se  $E(K)_{xy}$  o valor de  $E(K)$  calculado entre os ecos  $x$  e  $y$ , obteve-se, hipoteticamente (upq - unidades de potência ao quadrado):

$E(K)_{12}=0,9upq$ ;  $E(K)_{13}=0,2upq$ ;  $E(K)_{23}=1,0upq$ ;  
 $E(K)_{14}=0,1upq$ ;  $E(K)_{24}=0,8upq$ ;  $E(K)_{34}=0,7upq$ ;  
 $E(K)_{15}=0,6upq$ ;  $E(K)_{25}=0,5upq$ ;  $E(K)_{35}=0,3upq$ ;  
 $E(K)_{45}=0,4upq$ .

Após efetuados esses cálculos, parte-se para a análise de cada sinal, por ordem de chegada:

**Primeiro sinal:** Classificação obtida - Real. Este eco só pode ser considerado real, pois não há nenhum sinal precedente que possa proporcionar uma



**Figura 5.** Fluxograma do algoritmo de classificação. TR - tempo de voo de um eco candidato a reverberação; CL - combinação linear;  $E(K)$  valor da Função-Erro;  $med$  - valor médio entre todos os  $E(K)$ .

combinação linear capaz de torná-lo candidato a eco de reverberação.

**Segundo sinal:** Classificação obtida - Real. Com o TOF do primeiro sinal (único sinal precedente) não é possível estabelecer uma combinação linear com coeficientes inteiros capaz de torná-lo candidato a eco de reverberação, logo, este foi classificado como real.

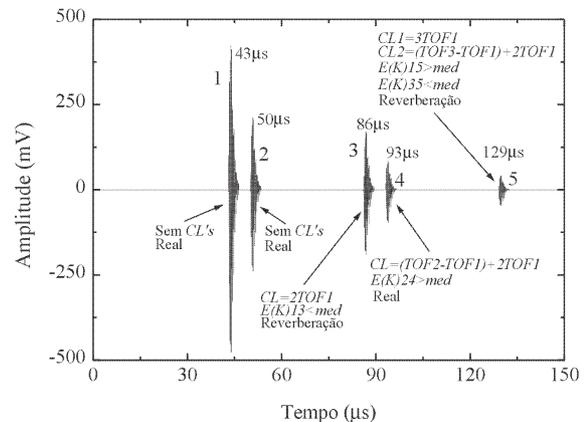
**Terceiro sinal:** Classificação obtida - Reverberação. Foi encontrada uma combinação linear com coeficientes inteiros (CL), usando o TOF de um eco precedente, capaz de torná-lo candidato a reverberação:  $CL = 2 \cdot TOF1$ . Testou-se o valor de  $E(K)$  entre o eco em análise e o que gerou a CL (primeiro sinal) com o valor médio dos  $E(K)$ 's.  $E(K)13 = 0,2$  upq e  $med = 0,55$  upq. Como  $E(K)13 < med$ , então esse eco foi classificado como reverberação na mesma interface de reflexão do primeiro eco (reverberação do primeiro eco).

**Quarto sinal:** Classificação obtida - Real. Foi encontrada uma CL capaz de torná-lo candidato a reverberação:  $CL = (TOF2 - TOF1) + 2 \cdot TOF1$ . Testou-se o valor de  $E(K)$  entre o eco em análise e o segundo eco (nesses casos, usa-se o eco de maior TOF, presente na CL) com o valor médio dos  $E(K)$ 's.  $E(K)24 = 0,8$  upq e  $med = 0,55$  upq.  $E(K)24 > med$ . Como o  $E(K)$  é maior que  $med$  e não existe outra CL capaz de classificar este eco como candidato a reverberação, este foi classificado como real.

**Quinto sinal:** Classificação obtida - Reverberação. Foram encontradas duas combinações lineares com coeficientes inteiros, capazes de torná-lo candidato a reverberação:  $CL1 = 3 \cdot TOF1$ ;  $CL2 = (TOF3 - TOF1) + 2 \cdot TOF1$ . Primeiramente, atendendo ao critério da ordem de chegada, testou-se o valor de  $E(K)$  entre o eco em análise e o primeiro eco (presente em CL1) com o valor médio dos  $E(K)$ 's.  $E(K)15 = 0,6$  upq e  $med = 0,55$  upq. Como  $E(K)15 > med$  (não é reverberação do primeiro eco), então testa-se o  $E(K)$  entre este e o terceiro eco (de maior TOF na CL2) com o valor médio dos  $E(K)$ 's.  $E(K)35 = 0,3$  upq e  $med = 0,55$  upq. Como  $E(K)35 < med$ , esse eco foi classificado como reverberação na mesma interface de reflexão do terceiro sinal (reverberação do terceiro eco).

**Resumo da classificação final obtida:** Ecos 1, 2 e 4 - Reais; Eco 3 - Reverberação na mesma interface do eco 1; Eco 5 - Reverberação na mesma interface do eco 3.

Observe que, recursivamente, o algoritmo identifica a interface de reflexão do quinto eco como sendo a mesma interface do primeiro. Basta observar que a interface de reflexão deste foi identificada como sendo a mesma do terceiro, que antes foi classificada como



**Figura 6.** Sinal completo simulado para exemplificação do processo de classificação de ecos pelo algoritmo proposto. Observar a existência de mais de uma CL para o 5º eco.

sendo a mesma do primeiro. Apesar de estar-se lidando com uma representação de um experimento, este fato ocorreu diversas vezes, durante a classificação dos sinais dos experimentos, realizados para testar o algoritmo.

## Materiais e Métodos

Nesta seção, serão brevemente descritos o transdutor, a lente, os phantoms, o tanque acústico e a aparelhagem eletrônica envolvida nos experimentos. O procedimento experimental para a geração, coleta e processamento dos sinais (ecos), bem como os softwares utilizados no processamento, também serão apresentados neste item.

### Materiais

**Transdutor** — Foi utilizado um único transdutor operando em forma pulsátil e atuando como transmissor e receptor. Este foi construído no Laboratório de Ultra-Som (LUS) com cerâmica piezoelétrica circular do fabricante Ferroperm Aktieselskab (Dinamarca). As características físicas principais da cerâmica são (Greco, 1995): tipo de cerâmica: PZ27; diâmetro: 10 mm; espessura: 0,265mm; frequência de ressonância série: 7,42 MHz; impedância elétrica na frequência de ressonância série: 16  $\Omega$ ; frequência de ressonância paralela: 8,32 MHz; impedância elétrica na frequência de ressonância paralela: 115,5  $\Omega$ .

Devido às diferenças entre os valores de impedância elétrica do transdutor e do cabo coaxial (50 W) utilizado na conexão entre o transdutor e o equipamento responsável pela geração e coleta dos sinais,

verificou-se a necessidade de se utilizar um casador de impedâncias, entre o transdutor e o cabo, para evitar grandes perdas de energia entre estes. O conjunto (transdutor, cabo de ligação e casador de impedâncias, construído por Greco (1995)) utilizado apresenta frequência de ressonância aproximadamente igual a 7,65 MHz, medida com o auxílio do *Vector Impedance Meter*, modelo HP4193A, da Hewlett Packard.

**Lente** — Foi acoplada uma lente esférica ao transdutor, construída no LUS com araldite CY 428 por Ichinose (1992), cujas dimensões são mostradas na figura 7. A lente foi construída a partir de uma bilha metálica de raio igual a 10 mm.

A determinação do ponto focal do conjunto transdutor e lente, foi feita experimentalmente por Pereira *et al.* (1992) e Pereira *et al.* (1995), sendo sua posição estimada pelos autores a uma distância de 27,53 mm da face do conjunto.

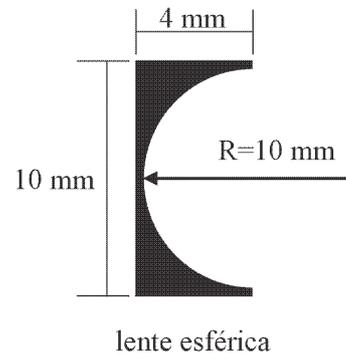
**Corpos de prova (phantoms)** — Foram utilizados 4 phantoms cilíndricos homogêneos, construídos com materiais diferentes, todos com 100 mm de diâmetro, constituídos por 1 ou 3 camadas, construídos na Oficina de Mecânica do Programa de Engenharia Biomédica (PEB), e compostos da seguinte forma:

- 1 - Com camada única de alumínio (Al).
- 2 - Com camada única de cloreto de polivinila (PVC).
- 3 - Com três camadas: a primeira de acrílico, a segunda de água e a terceira de alumínio (AAA).
- 4 - Com três camadas: a primeira de PVC, a segunda de água e a terceira de PVC (PAP).

De acordo com Fish (1990), a espessura de cada camada dos phantoms deve ser tal que o tempo de propagação do pulso (ida e volta), dentro da camada, seja no mínimo igual à largura de pulso do sinal emitido. Dessa forma, haverá resolução axial suficiente para que se possa discriminar essas camadas. A largura do pulso emitido é de 2,50  $\mu$ s, como será visto mais tarde, e os phantoms foram construídos de acordo

**Tabela 1.** Características dos phantoms utilizados.

Phantom	Camada	L (mm)	c (m/s)	TOF ( $\mu$ s)
Al	Alumínio	15	6.300	4,76
PVC	PVC	3	2.380	2,52
	Acrílico	7	2.750	5,09
AAA	Água	10	1.480	13,51
	Alumínio	11	6.300	3,49
	PVC	6	2.380	5,04
PAP	Água	10	1.480	13,51
	PVC	6	2.380	5,04



**Figura 7.** Vista lateral da lente esférica de araldite. **R:** raio da esfera de origem da lente. Figura extraída de Pereira *et alii* (1995).

com essa premissa, ou seja, todas as camadas possuem tempo de propagação (ida e volta) maiores que a largura do pulso emitido. Assim, não há sobreposição de sinais, dentre todos os ecos coletados.

As principais características dos phantoms, tais como espessura  $L$ , velocidade de propagação  $c$  (Kinsler *et al.*, 1982; Pereira *et al.*, 1992 e Greco, 1995) e tempo de propagação (ida e volta - TOF) teórico, dentro das camadas que constituem os phantoms, obtido de acordo com a expressão (4) a seguir, encontram-se listadas na Tabela 1.

$$TOF = \frac{2L}{c} \quad (4)$$

Em todos os experimentos há uma camada de água entre o transdutor e a face do phantom, de espessura variável (entre 34,0 e 34,8 mm). A velocidade de propagação média dessa camada foi medida experimentalmente por Pereira *et al.* (1992) e Greco (1995), nas mesmas condições experimentais deste trabalho (utilizando o mesmo tanque acústico, com água na temperatura média de 23 °C). Seu valor médio foi de 1.480 m/s, estando portanto, o TOF dos sinais que percorrem a primeira camada de água, variando entre 46,0 e 47,0  $\mu$ s, respectivamente, de acordo com a sua espessura em cada experimento.

O valor da velocidade de propagação na água foi usado para estabelecer a distância aproximada entre o transdutor e o phantom, garantindo que esta seja maior que a distância até o ponto focal do transdutor acoplado à lente de araldite (27,53 mm). Dessa forma, qualquer sinal coletado virá sempre da Zona de Fraunhofer (Fish, 1990). Esse valor foi utilizado também para o cálculo do TOF teórico nas camadas de água que constituem alguns dos phantoms (vide Tabela 1).

**Tanque acústico** — A figura 10 ilustra o tanque acústico utilizado para a realização dos experimentos, bem como o posicionamento do transdutor e dos phantoms, dentro do mesmo. Trata-se de um tanque com paredes de vidro de espessura igual a 9,0 mm, medindo 0,90 m x 0,60 m x 0,50 m, e que fica constantemente cheio com água à temperatura ambiente. O ajuste do posicionamento do transdutor e do phantom no tanque é feito manualmente, sendo o paralelismo entre as faces garantido por um sistema de suportes construídos na Oficina de Mecânica do PEB e previamente ajustados para este fim.

A distância entre o transdutor e o phantom é obtida indiretamente pela medida do tempo de vôo do primeiro eco, feita com o auxílio de um osciloscópio digital TDS 420 (Tektronix). De acordo com a expressão (4), pode-se obter essa distância, considerando-se a velocidade de propagação do US na água igual a 1.480 m/s (Pereira *et al.*, 1992 e Greco, 1995).

**Aparelhagem utilizada para a geração das salvas senoidais, recepção e amplificação dos sinais recebidos e demais equipamentos** — O equipamento utilizado para excitar o transdutor consiste em uma placa geradora de pulsos senoidais TB1000 - *Gated Amplifier Toneburst Plug-in Card* (Matec Instruments), acoplada em um microcomputador IBM PC compatível. Além de gerar as salvas senoidais, a placa é capaz de receber os sinais de retorno (ecos) e amplificá-los, entregando, em sua saída, o sinal pronto para a digitalização. As características principais da placa TB1000 são: fornece pulsos de até 300 Vpp (para 5 MHz) e de 200 Vpp (para 15 MHz); faixa de frequência gerada: 500 kHz até 20 MHz; largura de pulso: de 20 ns até 20  $\mu$ s; taxa de repetição: de 100 Hz até 10 kHz; impedâncias de entrada e saída: 50  $\Omega$ ; tensão de saída máxima do amplificador interno: 4 Vpp; ganho do amplificador interno: de 0 dB até 70 dB.

Para a leitura dos TOF dos sinais e a digitalização dos mesmos, foi utilizado um osciloscópio TDS 420 (Tektronix), com 60000 pontos de memória digital, amostragem repetitiva e capacidade para digitalizar sinais com frequência de amostragem de até 50 GHz.

Foi utilizado o cartão controlador GPIB (*General Purpose Interface Bus*), modelo STD 8410 (Sistemas Técnicos Digitais), como interface entre o osciloscópio e o microcomputador usado para armazenar os sinais digitalizados. Esse cartão segue o padrão IEEE - 488 e é capaz de se comunicar com microcomputadores IBM PC compatíveis, trabalhando em DOS.

Para as medidas de temperatura, foi utilizado o termômetro digital modelo 52 K/J (Fluke), com o

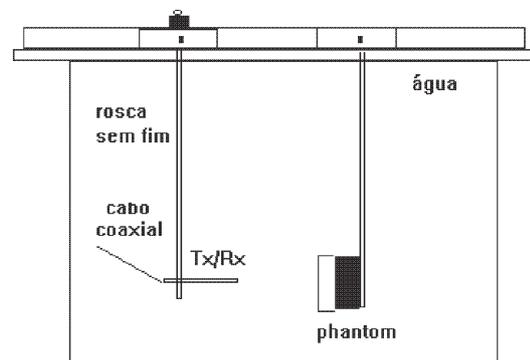
termopar de imersão do tipo K (Níquel - Cromo x Níquel - Alumínio), do mesmo fabricante, modelo 80PK - 2A. Esse conjunto é capaz de medir temperaturas na faixa de - 196 °C até 1090 °C, com precisão de  $\pm 2,2$  %. A temperatura da água do tanque foi monitorizada nos experimentos, para verificar possíveis variações na velocidade de propagação da água com a temperatura.

## Métodos

**Geração e coleta dos sinais** — Foram realizados 40 experimentos no tanque acústico, utilizando-se sinais de ultra-som pulsátil em RF, sendo 10 experimentos para cada um dos 4 tipos de phantom descritos na seção anterior. A montagem experimental foi realizada tal como mostra a figura 9, utilizando-se de um único transdutor, funcionando como transmissor e receptor, emitindo um feixe perpendicular à face de cada phantom. Ao término de cada experimento, este foi completamente desmontado, iniciando-se uma nova montagem para o experimento subsequente.

A distância entre o transdutor e o phantom foi mantida entre 34,0 e 34,8 mm (após o ponto focal, portanto), determinada experimentalmente, de acordo com a melhor relação sinal-ruído (SR) dos sinais recebidos. Os sinais são considerados de boa SR quando a amplitude máxima dos mesmos é, no mínimo, dez vezes superior à amplitude máxima do ruído envolvido nos experimentos. Essa relação foi determinada medindo-se, com o auxílio do osciloscópio, os valores de pico dos sinais e do ruído envolvidos nos experimentos.

O transdutor foi excitado com salvas de senóide na frequência de 7,65 MHz, com largura de 2,50  $\mu$ s e amplitude de 10 Vpp, a uma taxa de 1 kHz. Essas



**Figura 8.** Representação do tanque acústico e posicionamento do transdutor (Tx/Rx) e phantom. Figura extraída de Greco (1995).

freqüência e largura de pulso foram as que proporcionaram o melhor formato dos sinais coletados (no tempo e em freqüência) e que permitiram a total separação temporal entre eles.

Os sinais provenientes do transdutor foram recebidos e amplificados pela placa TB1000, com ganho variável, entre 20 dB e 35 dB, de acordo com os phantoms utilizados, conforme mostra a tabela 2. A determinação do ganho, para cada experimento, foi feita de acordo com o seguinte critério: amplificou-se o sinal até que fosse possível captar-se, pelo menos, a terceira reflexão na primeira interface em cada experimento, com boa SR.

Os tempos de vôo (TOF) de cada sinal são obtidos por leitura direta na tela do osciloscópio.

Os pulsos são gerados internamente pela placa TB1000 e enviados (*pulse out*) por um cabo coaxial até o circuito casador de impedâncias, passando deste ao transdutor. Os sinais refletidos pelas interfaces dos phantoms são captados pelo mesmo transdutor e enviados através do mesmo circuito casador de impedâncias e por outro cabo coaxial até a placa TB1000 (*receiver in*). Um adaptador BNC, com 3 conexões, permite as ligações entre a placa e o circuito casador de impedâncias.

Na placa, os sinais são amplificados (vide tabela 2) e então entregues (*receiver out*) por outro cabo coaxial ao canal 1 do osciloscópio digital, onde são amostrados. Os tempos de vôo dos sinais são então medidos na própria tela do osciloscópio, por inspeção visual. Um sinal de sincronismo é enviado pela placa TB1000

**Tabela 2.** Ganho gerado na placa TB1000, na recepção, para cada tipo de experimento.

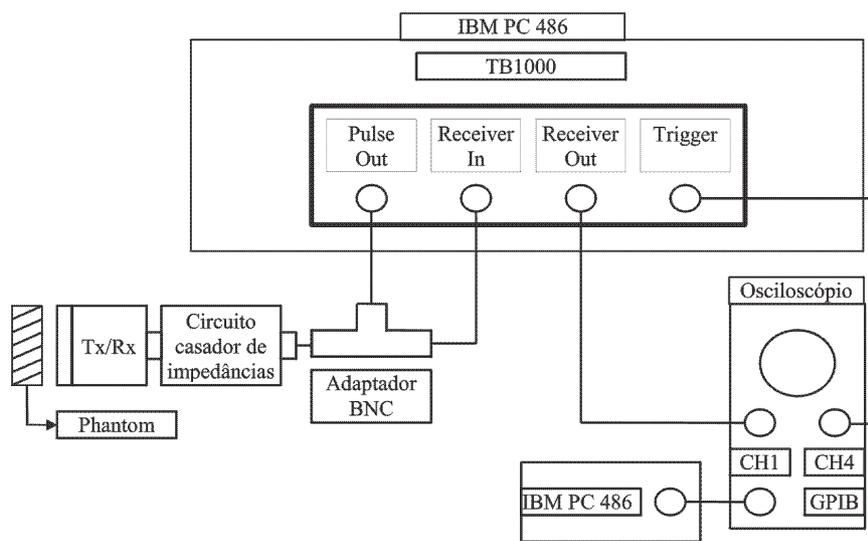
Phantom	Ganho (dB)
AI	20
PVC	30
AAA	25
PAP	35

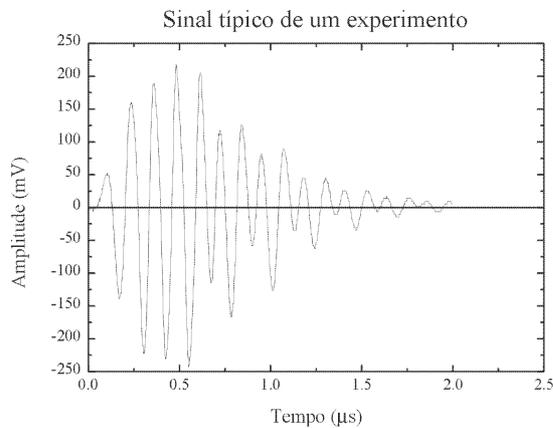
(*trigger*), através de um cabo coaxial, até o canal 4 do osciloscópio, para permitir o sincronismo deste em relação ao pulso enviado pela placa ao transdutor. Através da interface GPIB, os sinais são enviados do osciloscópio ao microcomputador IBM PC compatível, onde são armazenados para o processamento.

**Processamento dos sinais** — Os sinais coletados foram amostrados no osciloscópio digital TDS 420 (Tektronix), a uma taxa de 500 MHz, gerando um sinal completo com 15.000 pontos, equivalente a um intervalo de 30  $\mu$ s e contendo mais de um eco. Cada eco é selecionado por uma janela de 1.024 pontos.

Os sinais amostrados foram armazenados em um microcomputador da linha PC, para o processamento. A transferência do sinal digitalizado do osciloscópio para o microcomputador foi realizada através do software desenvolvido AVERASK.FOR (em Fortran 77).

O trecho de sinal, com 1024 amostras, foi selecionado por processo visual de acordo com a sua relação sinal-ruído (SR), tomando-se sempre o cuidado de preservar todo o eco que está em análise, do seu início ao fim, conforme as determinações estabelecidas por Fukumoto et al. (1981) e Fish (1990).





**Figura 10.** Sinal típico captado em um experimento. 1.024 pontos. Freqüência de amostragem de 500 MHz.

Usaram-se sinais com SR mínima igual a 10. Para os sinais onde o número de amostras com boa SR era menor que 1024, completou-se o total de 1024 pontos, com zeros (*zero padding*).

O nível DC (média) foi retirado e, posteriormente, calculada a FFT de cada sinal. O módulo da FFT, elevado ao quadrado, deu origem ao espectro de potência. Todos os ecos foram coletados dez vezes em cada experimento. O procedimento de cálculo dos espectros de potência foi efetuado para todos esses dez sinais, sendo o espectro médio destes, utilizado na comparação através do valor da Função-Erro, conforme descrito item *Fundamentos Teóricos*.

**Software para o processamento** — Os programas gerados para o processamento digital dos sinais foram desenvolvidos utilizando-se as sub-rotinas para processamento de sinais, pertencentes ao software Matlab, versão 4.2 c (*The Mathworks*), instalado em um microcomputador Pentium 100, com 32 Mbytes de memória RAM. Antes do processamento, os sinais digitais (originalmente em formato binário), foram convertidos para caracteres ASCII, a fim de permitir o processamento através do software citado. Essa conversão foi realizada pelo software desenvolvido CONV.EXE (em Fortran), já instalado no microcomputador.

## Resultados

Foram realizados 10 experimentos com cada um dos 4 tipos de phantoms, totalizando 40 experimentos, onde foram coletados 390 ecos. A temperatura da água no tanque acústico foi monitorizada, estando o seu valor na faixa de  $23,2^{\circ}\text{C} \pm 1,4^{\circ}\text{C}$ . Para essa faixa de variação, pode-se considerar, desprezível, a variação da velocidade de propagação do US na água.

Neste item serão apresentados os resultados completos, derivados do processamento de um dos experimentos com o phantom PAP, como exemplificação de todo o processo de classificação dos ecos. Será mostrado o conjunto de ecos coletados nesse experimento, sendo que apenas os ecos que possuem boa relação sinal-ruído (SR), conforme estabelecido no item “Materiais e Métodos”, encontrar-se-ão numerados na figura em questão (somente esses ecos foram utilizados no processamento). Serão também apresentadas figuras de comparações entre os espectros de potência de 2 pares de sinais, obtidas após a aplicação das expressões de minimização (2) e (3).

Além disso, serão mostrados, em tabelas, os tempos de voo (TOF) de cada eco, a classificação prévia destes (que servirá de referência para verificar o desempenho do algoritmo na classificação) e a classificação obtida para cada um, pela utilização do algoritmo proposto. Serão mostradas comparações entre os ecos coletados em uma varredura utilizando todos os sinais de boa SR coletados nesse experimento, e os sinais da mesma varredura gerados após a retirada dos ecos classificados pelo algoritmo como reverberação.

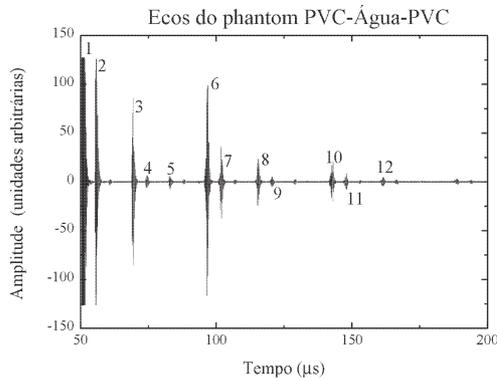
Logo após, será apresentado, em tabela, o resultado consolidado da classificação dos 390 ecos coletados em todos os 40 experimentos.

## Resultados com o phantom PAP

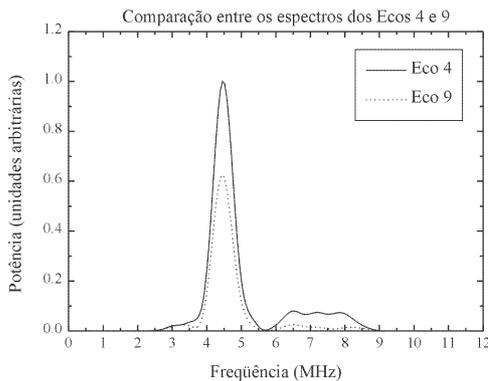
A Figura 11 mostra os ecos coletados no primeiro experimento realizado com o phantom de três camadas, sendo a primeira de PVC, a segunda de água e a terceira também de PVC (PAP). A tabela 3 mostra os tempos de voo desses ecos e a tabela 4, a classificação prévia dos sinais e as suas respectivas interfaces de reflexão.

A Tabela 5 contém a classificação obtida pelo algoritmo, para os sinais coletados. A última linha relaciona o eco classificado como reverberação (Rev.) ao eco do qual ele constitui uma reverberação. O valor médio da Função- Erro (*med*) nesse experimento foi 0,86 upq.  $E(K)$  é o valor da função de erros entre o eco classificado e o eco da última linha. No caso dos 7<sup>o</sup> e 10<sup>o</sup> ecos, que foram classificados erroneamente como *Reais*, após terem sido caracterizados como *Candidatos a Reverberação*, o valor de  $E(K)$  refere-se à comparação entre estes e os 2<sup>o</sup> e 6<sup>o</sup> ecos, respectivamente (que refletiram anteriormente nas mesmas interfaces).

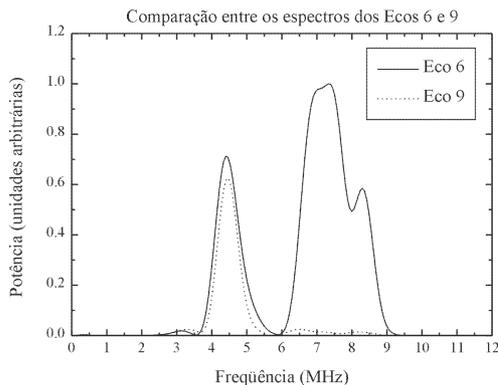
As Figuras 12 e 13 mostram duas comparações típicas entre espectros de potência, extraídas durante a aplicação das expressões de minimização (2) e (3),



**Figura 11.** Ecos coletados no primeiro experimento com o phantom PAP. Amostrados 15000 pontos. Ecos com baixa SR não possuem numeração.



**Figura 12.** Comparação entre os espectros dos ecos 4 e 9 (30 pontos - 500 MHz), provenientes de reflexões na segunda interface PVC-Água (primeira e segunda reflexões, respectivamente), após a aplicação das expressões de minimização (2) e (3).  $E(K) = 0,01$  upq e  $med = 0,86$  upq.



**Figura 13.** Comparação entre os espectros dos ecos 6 e 9 (30 pontos - 500 MHz), provenientes de reflexões nas interfaces Água-PVC (primeira interface - segunda reflexão) e PVC-Água (segunda interface - segunda reflexão), após a aplicação das expressões de minimização (2) e (3).  $E(K) = 2,50$  upq e  $med = 0,86$  upq.

sendo a primeira delas um exemplo de espectros de sinais provenientes de uma mesma interface de reflexão ( $E(K) < med$ ) e a segunda, um exemplo para sinais de interfaces diferentes ( $E(K) > med$ ).

A Figura 14 mostra os ecos de uma varredura completa, utilizando todos os sinais de boa SR coletados em um dos experimentos com o phantom de PVC e a Figura 15 mostra apenas os ecos, dessa mesma varredura, que foram classificados como reais pelo algoritmo nesse mesmo experimento. A intenção dessas figuras é dar uma idéia da melhoria que poderia ser obtida na geração de imagens por ultra-som, caso houvesse a possibilidade de se retirar os artefatos gerados pelos ecos de reverberação de sua formação.

Na Figura 13, os espectros dos Ecos 6 e 9 são bastante diferentes. Isso ocorre pelo fato da onda que dá origem ao Eco 6 propagar-se apenas na camada de água, ao passo que para o Eco 9 ela se propaga também pela camada de PVC, a qual possui um coeficiente de atenuação muito mais elevado do que a água (Kinsler, 1982).

### Desempenho geral do algoritmo

A Tabela 6 mostra a consolidação dos resultados obtidos na classificação dos 390 sinais coletados nos 40 experimentos com os 4 tipos de phantoms.

### Discussão e Conclusão

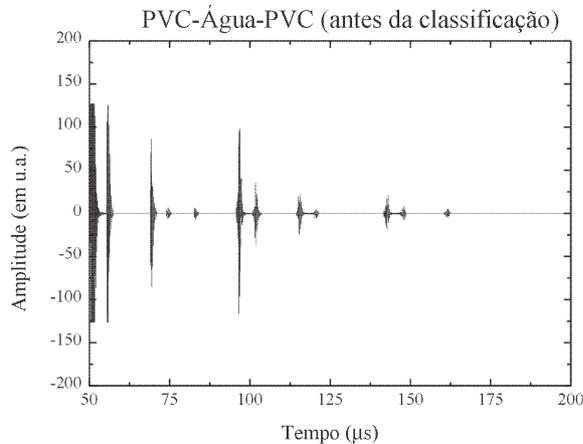
No experimento com o phantom de três camadas PAP, usado como exemplo, foram coletados 12 ecos com boa relação sinal-ruído, onde sabe-se previamente que

**Tabela 3.** TOF dos ecos coletados no primeiro experimento com o phantom PAP.

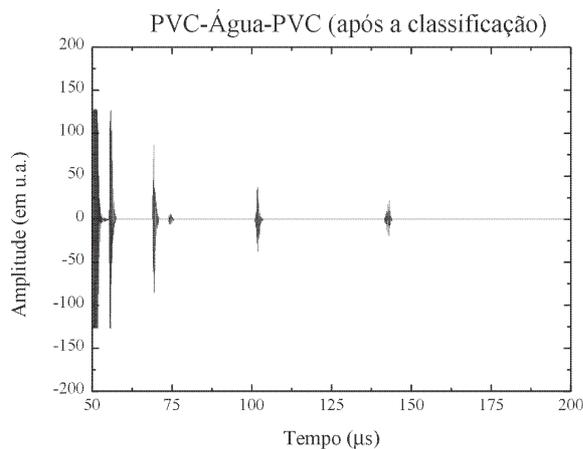
Eco	TOF(µs)	Eco	TOF(µs)
1	46,45	7	97,10
2	51,40	8	110,53
3	64,99	9	115,94
4	69,85	10	137,94
5	78,58	11	143,03
6	92,12	12	157,00

**Tabela 4.** Classificação prévia dos ecos coletados de acordo com a sua interface de reflexão, para serem utilizados como referência na avaliação do algoritmo.

Interface	Eco Real	Ecos de Reverberação
Água-PVC 1	1	6 e 10
PVC-Água 1	2	7 e 11
Água-PVC 2	3	5, 8 e 12
PVC-Água 2	4	9



**Figura 14.** Sinais de uma varredura completa do phantom PAP com 15000 pontos, utilizando todos os sinais de boa SR coletados. u.a. - unidades arbitrárias.



**Figura 15.** Sinais de uma varredura completa do phantom PAP com 15000 pontos, após retirados os sinais classificados como reverberação pelo algoritmo. u.a. - unidades arbitrárias.

4 deles são reais (os 4 primeiros). Os demais são reverberações, conforme mostra a tabela 4, no item anterior.

De acordo com o TOF dos sinais coletados, pôde-se classificar, diretamente, os 4 primeiros sinais como reais, sendo que esse mesmo critério apontou os demais ecos como candidatos a reverberação. O critério de comparação pelo valor da função  $E(K)$  determinou, corretamente, que 6 dos sinais coletados constituem ecos de reverberação, sendo o 7º e o 10º sinais classificados, de forma incorreta, como reais.

Nesse momento, é importante observar que essa classificação não foi obtida somente para esse experimento citado, mas também para todos os demais experimentos com esse mesmo tipo de phantom. Assim, pode-se dizer que de um total de 120 ecos coletados nos 10 experimentos com o phantom PAP, 100 foram classificados corretamente, totalizando um percentual de 83,3 % de acerto.

Quanto aos aspectos gerais e à performance do algoritmo, algumas considerações serão discutidas a seguir:

O algoritmo leva em consideração dois aspectos principais: o tempo de vôo (TOF) dos ecos coletados e as diferenças entre cada componente dos espectros de potência de pares de sinais coletados nos experimentos. O critério de tempo somente dá informação precisa nos casos de classificação de ecos reais isolados, visto que estes não possuem TOF's capazes de coexistir com combinações lineares de ecos precedentes. A utilização do TOF, juntamente com o critério de comparação dos espectros de potência, através do valor da função de erros mínimos quadráticos  $E(K)$ , é o que permite realizar a classificação dos sinais com razoável índice de acertos.

Pode-se dizer que, nos casos estudados, o algoritmo é capaz de determinar, corretamente, todas as interfaces de reflexão de todos os phantoms estudados. Os erros cometidos, nas classificações efetuadas, constam de ecos de reverberação classifi-

**Tabela 5.** Classificação dos ecos coletados no primeiro experimento com o phantom PAP. Última linha - eco classificado como reverberação (Rev.) em relação ao eco do qual ele constitui uma reverberação.  $med = 0,86$  upq.  $E(K)$  - valor da Função-Erro entre o eco classificado e o eco da última linha.

Eco	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Candidato a Rev.?</b>	Não	Não	Não	Não	Sim							
<b><math>E(K)</math> (upq)</b>	-	-	-	-	0,44	0,80	1,72	0,71	0,01	1,45	0,11	0,18
<b>Classificação</b>	Real	Real	Real	Real	Rev.	Rev.	Real	Rev.	Rev.	Real	Rev.	Rev.
<b>Rev. do eco</b>	-	-	-	-	3	1	-	3	4	-	7	5

cados como ecos reais (falsos negativos). Na eventual retirada dos ecos de reverberação, classificados por este algoritmo, durante a realização de um processo de exame ou pesquisa, não seriam perdidos ecos reais. Em outras palavras, não seriam perdidas informações de interfaces reais existentes nas estruturas estudadas, já que todos os ecos reais foram classificados corretamente.

Os erros obtidos na classificação dos sinais podem estar relacionados a problemas de alinhamento experimental, bem como às limitações impostas ao modelo. Não foram considerados dispersão severa, espalhamento dos sinais, nem tão pouco, perdas enquanto estes refletem no transdutor e na lente esférica. Estes fenômenos poderiam interferir (provocar maior perda de potência) mais acentuadamente nos espectros de alguns sinais, provocando maiores atenuações, principalmente nos componentes de frequências mais altas. Os ecos de maior TOF, como os de reverberação, que percorrem um caminho maior e também maior quantidade de camadas (ou as mesmas camadas um maior número de vezes), são os mais afetados.

O equacionamento do modelo usado no presente método prevê a propagação de ondas planas através de todas as camadas dos phantoms. Entretanto, foi utilizado um transdutor focalizado (distância focal=27,53 mm) e os phantoms ocuparam uma região do feixe ultra-sônico compreendida entre 34 e 63 mm da face do transdutor. Apesar do feixe ser divergente nesta região, os espectros de potência dos sinais de eco provenientes de um refletor plano de alumínio, deslocado entre 34 e 66 mm com passo de 4 mm, mostraram-se muito parecidos entre si. O cálculo de  $E(K)$  para cada par do conjunto de todos os ecos, coletados do refletor de alumínio, forneceu um valor médio de 0,15 upq. Para os sinais de eco provenientes das diversas interfaces dos phantoms, o valor médio de  $E(K)$  foi de 1,20 upq. Em face desses dois resultados para a média de  $E(K)$  conclui-se que o posicionamento

dos phantoms numa região de onda esférica do feixe não comprometeu significativamente os espectros de potência dos sinais de eco oriundos das interfaces dos phantoms. Como consequência, a aproximação de onda plana para o equacionamento do modelo pode ser considerada válida.

Pode-se observar, na tabela 6, que os testes realizados com phantoms de 3 camadas obtiveram erros percentuais maiores que os apresentados na classificação de ecos em experimentos com phantoms de uma única camada. Esse fato confirma a hipótese de Duarte *et al.* (1998) de que o aumento do número de camadas dificultaria a classificação dos sinais.

Com relação aos sinais de varredura coletados nas Figuras 14 e 15, se utilizados para a formação de uma linha de imagem em modo-B, a imagem gerada pelos sinais da Figura 15 (sem os ecos de reverberação classificados pelo algoritmo) estaria mais livre de artefatos, sem no entanto, perder os registros das interfaces reais.

Em medicina, a aplicação do método proposto poderia estar relacionada à formação de imagens médicas. Aperfeiçoando-se o algoritmo (incluindo, p.ex., a atenuação do meio, além da possibilidade de tratar sinais superpostos e provenientes de camadas com impedâncias similares), poder-se-ia determinar os sinais de reverberação (em RF) de estruturas estudadas (tecidos biológicos), retirando-os da formação da imagem final, evitando a deterioração desta, devido a esse tipo de artefato. Estudos estão sendo realizados, considerando essas limitações do algoritmo.

O objetivo principal desse trabalho, de estabelecer um método que permitisse identificar ecos reais e de reverberação em meios homogêneos, multicamadas, de baixa dispersividade, foi alcançado com razoável percentagem de acertos na classificação dos ecos coletados nos experimentos realizados (85,9%), como pode ser visto na Tabela 6.

A importância científica desse trabalho está realçada pelo fato de não terem sido encontrados, na literatura

**Tabela 6.** Resultado global obtido pelo algoritmo na classificação dos sinais coletados nos 40 experimentos. Nas linhas estão representados os resultados obtidos para os 10 experimentos com o phantom especificado. A última linha apresenta os valores percentuais sobre o total de ecos coletados.

Phantom	Classificação correta	Classificação incorreta	Total
Al	70 (87,5 %)	10 (12,5 %)	80 (100,0 %)
PVC	75 (93,8 %)	5 (6,2 %)	80 (100,0 %)
AAA	90 (81,8 %)	20 (18,2 %)	110 (100,0 %)
PAP	100 (83,3 %)	20 (16,7 %)	120 (100,0 %)
<b>Total</b>	<b>335 (85,9 %)</b>	<b>55 (14,1 %)</b>	<b>390 (100,0 %)</b>

especializada, trabalhos visando especificamente a diferenciação entre ecos reais e ecos de reverberação. A sua contribuição é, portanto, o oferecimento à comunidade, de um método de fácil implementação, que classifica os ecos reais e os ecos de reverberação, com um nível de erro aceitável.

Novos experimentos estão previstos para testar o desempenho do algoritmo em situações, teoricamente, mais críticas, onde haja sobreposição de ecos (sejam eles reais e/ou de reverberação). Esse fato dificultaria a classificação do algoritmo, visto que o primeiro critério (análise dos tempos de voo) tornar-se-ia uma possível fonte de erros.

Além disso, seria interessante realizar experimentos onde os phantoms fossem constituídos por camadas, acusticamente, mais semelhantes (com impedâncias acústicas e coeficientes de reflexão aproximadamente iguais). Essas camadas constituiriam filtros, provavelmente, com Funções de Transferência semelhantes e, nesse caso, os sinais que as atravessassem, tenderiam a ser parecidos. Sendo assim, as diferenças nos espectros de potência desses sinais seriam pequenas, havendo maior dificuldade em obter suas classificações de maneira correta.

No que se refere a adequação do transdutor, é recomendável que o mesmo seja de banda larga pois assim, possibilita que as diferenças na amplitude dos espectros possam ser expressas numa faixa mais ampla de frequências (a estimativa de  $E(K)$  pode cobrir uma faixa maior de valores).

Está previsto o estudo de técnicas para estimativa da Função de Transferência das camadas envolvidas nos experimentos, com o objetivo de estabelecer, de antemão, o formato dos espectros de determinados sinais que atravessassem determinadas camadas (filtros). Assim, poder-se-ia comparar o formato do espectro de potência de um eco coletado com o espectro dos sinais que seriam estimados, após passarem por determinadas camadas. Levando-se em conta ainda as combinações lineares dos tempos de voo que já compõe o algoritmo, poder-se-ia estabelecer se determinado eco seria, ou não, uma reverberação em uma determinada interface dessas camadas.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer às agências financiadoras FAPERJ, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro durante a realização desse trabalho.

### Referências

Caruthers, J.W., Yoerger, E.J. (1997), "Modeling Low-Frequency Reverberation Near the Mid-Atlantic Ridge

- and Comparison with ARSRP Data", *Journal of Acoustical Society of America*, v. 101, n. 5, p. 2555-2565.
- Derouiche, Z., Delebarre, C., Gzalet, M., Rouvaen, J.M., Bridoux E. (1995), "Ultrasonic Characterization of Heterogeneous Materials Using a Stochastic Approach", *Journal of Acoustical Society of America*, v. 97, n. 4, p. 2304-2315.
- Duarte, M.A., Machado, J.C., Pereira, W.C.A. (1996), "Novo Método para Identificação de Ecos Reais e Ecos de Reverberação em Meios Multicamadas", *Anais do III Forum Nacional de Ciência e Tecnologia em Saúde, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, C. Jordão/SP, v. 1, p. 329-330.
- Duarte, M.A., Machado, J.C., Pereira, W.C.A. (1998), "Método Para Identificação de Ecos de Reverberação em Meios Homogêneos, Multicamadas, Não Dispersivos", *Anais do IV Forum Nacional de Ciência e Tecnologia em Saúde, XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, Curitiba/PR, p. 385-386.
- Feleppa, E.J., Kalisz, A., Sokil-Melgar, J.B., Lizzi, F.L., Liu, T., Rosado, A.L., Shao, M.C., Fair, W.R., Wang, Y., Cookson, M.S., Reuter, V.E., Heston, W.D.W. (1996), "Typing of Prostate Tissue by Ultrasonic Spectrum Analysis", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 43, n. 4, p. 609-618.
- Fish, P. (1990), *Physics and Instrumentation of Diagnostic Medical Ultrasound*, 1 ed., New York: John Wiley & Sons.
- Fukumoto, A., Kawabuchi, M., Sato, J. (1981), "Design of Ultrasound Transducer Using New Piezoelectric Ceramic Materials", *Ultrasound in Medicine and Biology*, v. 7, n. 3, p. 275-284.
- Greco, A.V.D. (1995), *Modelo Misto de Propagação do Ultrassom em Meios Multicamadas Baseado em Acústica Geométrica*, Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Biomédica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Ichinose, R.M. (1992), *Projeto e Construção de Lentes para Transdutores Ultra-Sônicos*, Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Biomédica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Kinra, V.K., Iyer, V.R. (1995), "Ultrasonic Measurement of the Thickness, Phase Velocity, Density or Attenuation of a Thin-Viscoelastic Plate. Part I: The Forward Problem", *Ultrasonics*, v. 33, n. 2, p. 95-109.
- Kinsler, L.E., Frey, A. R., Coppens, A.B., Sanders, J.V. (1982), *Fundamental of Acoustics*, 3 ed., New York: John Wiley & Sons.
- Lizzi, F.L., Feleppa, E.J., Astor M., Kalisz, A. (1997), "Statistics of Ultrasonic Spectral Parameters for Prostate and Liver Examinations", *IEEE Transactions on Ultra-*

- sonics, *Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 44, n. 4 p. 935-942.
- Makris, N.C., Avelino, L.Z., Menis, R. (1995), "Deterministic Reverberation from Ocean Ridges", *Journal of Acoustical Society of America*, v. 97, n. 6, p. 3547-3574.
- Pereira, W.C.A., Machado, J.C. (1992), "Ultrasonic Focussed Pulse-Echo Method for Determination of Propagation Velocity and Layer Thickness of Multilayered Media", *Proceedings of 14 th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biological Society*, part 5, p. 2110-2111, Paris, France.
- Pereira, W.C.A., Greco, A.V.D., Simpson, D.M., Machado, J. C. (1995), "Método de Mínimos Quadrados Baseado em Acústica Geométrica para a Estimação do Ponto Focal de Feixes Ultra-Sônicos", *Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Engenharia Biomédica*, v. 11, n. 2, Rio de Janeiro, RJ, p. 55-73.
- Pereira, W.C.A., Greco, A.V.D., Machado, J.C. (1996), "Ultrasonic Velocity Mapping of a Multilayered Media", *Acoustical Imaging*, v. 22, p. 63-68, New York: Plenum.
- Pereira, W.C.A., Duarte, M.A., Machado, J.C. (1997), "A Method to Identify Reverberation Echoes in Multilayered Homogeneous Media", *Acoustical Imaging*, v. 23, p. 125-130, New York: Plenum.
- Resende, C.M.C. (1988), *Artefatos em Ultrasonografia e Suas Bases Físicas*, 1 ed., Rio de Janeiro: Revinter.
- Shung, K.K. (1996), "From the Guest Editor - Advances in Ultrasound", *IEEE - Engineering in Medicine and Biology*, v. 15, n. 6, p. 18-19.
- Simon, C. (1993), *Técnicas de Processamento Digital de Sinais Aplicados a Ensaios não Destrutivos por Ultra-Som*, Tese de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Smith, K.B., Cushman, E.B. (1997), "A Comparison of Quasi-Continuous Wave and Broadband Travel Time Techniques in the Prediction of Long-Range Reverberation", *Journal of Acoustical Society of America*, v. 102, n. 4, p. 2063-2071.
- Tian, T., Guan, H., Liu, G., Suen, D., Zhang, D. (1997), "A Study of Detecting and Imaging Small Targets on Seabed", *Acoustical Imaging*, v. 23, p. 563-568, New York: Plenum.