

SISTEMA COMPUTADORIZADO PARA O MAPEAMENTO DO CAMPO ULTRA-SÔNICO

por

V. Proaño(1), W.G. Silva(2), A.J. Xavier(2),
M.A. von Krüger(2) e J.C. Machado(2)

Resumo -- O presente trabalho trata do desenvolvimento de um sistema automático para o mapeamento da distribuição espacial do campo acústico irradiado por um transdutor ultra-sônico. Este sistema utiliza uma estrutura mecânica capaz de manter um transdutor transmissor fixo e submerso em um tanque d'água, enquanto desloca um receptor no mesmo ambiente, segundo movimentos lineares (X, Y e Z) e angular (θ) no plano horizontal. Estes movimentos são conseguidos mediante o uso de motores de passo e a resolução alcançada é de 0.25mm para os eixos X e Y, 0.021mm para o eixo Z, e 1.8 graus para θ . Um controlador programado/programável, baseado no microprocessador Z80 com 8 kBytes de EPROM, 64 kBytes de RAM e relógio de 4 MHz, realiza os diferentes tipos de varredura de que consiste o mapeamento. Além de comandar os movimentos, o controlador dispõe também de um módulo de aquisição de sinais capaz de trabalhar em toda a faixa de frequências utilizada em ultra-sonografia médica. Os resultados são armazenados em disquete e apresentados em forma gráfica em um microcomputador EGO (compatível com o IBM PC-XT).

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o ultra-som tem sido extensamente utilizado em medicina, tanto em diagnóstico quanto em terapia.

Para se obter a máxima eficiência em aparelhos que utilizam técnicas de ultra-som, é necessário conhecer as características que o transdutor utilizado apresenta nas condições de trabalho, uma vez que o bom desempenho do sistema depende da cuidadosa escolha do transdutor.

De acordo com as aplicações do aparelho e o modo de operação do transdutor, diferentes parâmetros deverão ser testados, tais como: frequência central, fator de qualidade, máxima potência permissível, resolução axial, resolução lateral, distância focal, profundidade de foco, etc. Atualmente, grande parte dos sistemas de diagnóstico é de imagem, o que torna extremamente importante a disponibilidade, em laboratórios de ultra-som, de rotinas para o controle de qualidade dos transdutores.

(1) Casilla 746, Ibarra Imbabura, Ecuador.

(2) PEB-COPPE/UFRJ, Caixa Postal 68510, 21945 - Rio de Janeiro, RJ

///Trabalho recebido em 30/06/87 e aceito em 30/07/87///

Para se determinar alguns dos parâmetros acima mencionados e para se manter um banco de dados relativo a cada transdutor, é aconselhável que se realize um mapeamento do campo ultra-sônico por ele irradiado.

A realização manual desta tarefa implica numa mão-de-obra exaustiva e de morada, com alta probabilidade de conter erros de medição. Este tipo de problema pode ser contornado automatizando-se ao máximo todo o processo de medição e aquisição de dados.

No Programa de Engenharia Biomédica (PEB) da COPPE/UFRJ foi desenvolvido um sistema automático com esse objetivo, dotado de mecanismos de controle em tempo real, para mapear o campo irradiado por um transdutor ultra-sônico.

Consiste de um tanque com um sistema mecânico adequado para permitir o posicionamento e a orientação, em qualquer ponto do seu interior, de um transdutor ultra-sônico, além de um controlador programável (necessário à automatização do posicionamento segundo as coordenadas X, Y, Z e Θ), e um sistema de aquisição e armazenamento de dados.

No tanque acústico, o transdutor a ser testado é colocado em uma posição fixa e pre-determinada, enquanto que um transdutor receptor é acoplado à parte móvel do sistema. Esta parte móvel, acionada por motores de passo, permite a realização de uma varredura espacial. A distribuição do campo ultra-sônico irradiado é amostrada em diferentes pontos por meio de um hidrofone. O sinal passa por um processo de conversão analógico/digital e é armazenado temporariamente em memória. Posteriormente, os valores amostrados são transferidos para um microcomputador, onde se dá o armazenamento definitivo em disquetes e se efetua o processamento necessário e adequado ao tipo de trabalho que está sendo realizado.

Como característica importante do sistema cita-se o alto grau de automação alcançado em seus dois modos de operação: manual e automático, sendo que, neste último, é possível a operação segundo uma forma programável ou programada, tornando-o assim um sistema extremamente flexível. Outro aspecto importante é a precisão. Um cuidado especial foi dedicado à parte da interface com o usuário e à modularidade do "software", já que são pontos básicos para uma fácil operação e manutenção do sistema.

ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA

Como foi visto, o sistema de mapeamento computadorizado é composto de um sistema de varredura e outro de processamento.

O sistema de varredura, em princípio, compõe-se do tanque propriamente dito, com suas partes mecânicas fixas e móveis associadas, e de um microcomputador dedicado, capaz de trabalhar de forma autônoma ou no modo mestre-escravo.

Através de interfaces adequadas, o microcomputador está conectado a dispositivos eletrônicos e eletro-mecânicos que realizam deslocamentos de massa e medições da intensidade do campo acústico, com o correspondente armazenamento temporário.

O sistema de processamento é um pacote de programas de computação que tem como objetivo realizar o armazenamento padronizado dos dados adquiridos durante a varredura e exibir gráficos que permitem avaliar as características de irradiação do transdutor que está sendo testado.

Sistema de varredura

O objetivo principal deste sistema consiste em obter informações sobre a distribuição espacial da intensidade do campo ultra-sônico irradiado por um transdutor transmissor, fixado no interior do tanque e imerso em água.

Em um sistema desse tipo é muito importante que as funções de posicionamento e aquisição sejam precisas, confiáveis, eficientes e flexíveis. Daí a necessidade de se utilizar um módulo baseado em microprocessador para coordená-las. Ele é mostrado na figura(1) com a denominação CPU-AG.

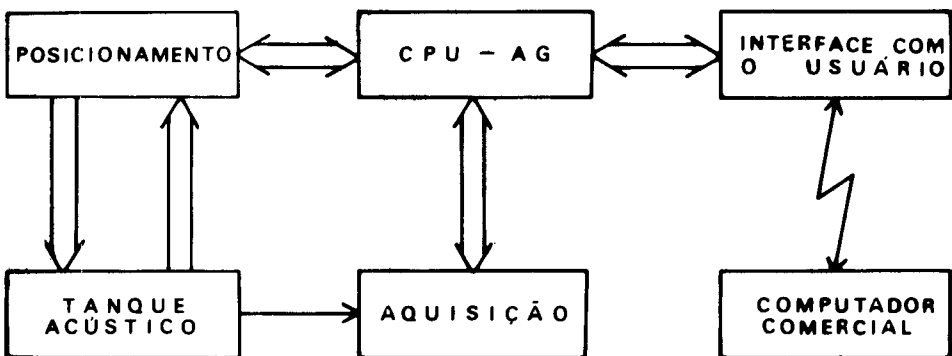


Figura 1 - Diagrama de Blocos do Sistema de Varredura

Para se transferir os dados para o sistema de processamento torna-se evidente a necessidade de uma interface com o usuário conforme mostrada na figura (1). Ali também são vistos os diferentes módulos funcionais do sistema de varredura.

Os módulos de aquisição de dados, posicionamento e interface com o usuário consistem de circuitos programáveis e de rotinas que viabilizam o seu funcionamento. Essas rotinas, em conjunto com um monitor, estão agrupadas em um pacote chamado SISMOT, que reside na EPROM do sistema. O SISMOT tem 8 kBYTES de extensão, e apesar de ser desenvolvido numa linguagem de baixo ní-

vel - Z80 ASSEMBLY - está completamente documentado, é modular e observa as regras da programação estruturada.

O sistema de varredura como um todo, com as condições que devem ser satisfeitas, com o sistema mecânico no qual está montado, com as medidas de segurança observadas, com o sistema eletrônico que o suporta, e com os algoritmos desenvolvidos, pode ser classificado como um robô de coordenadas cartesianas de mobilidade 4, e, já que não tem movimentos redundantes, de 4 graus de liberdade.

A seguir, são discutidos os blocos funcionais apresentados na figura (1).

Tanque Acústico-- Este sistema, construído em sua maior parte na oficina mecânica do PEB-COPPE/UFRJ é constituído, basicamente, de um sistema mecânico que suporta um reservatório d'água e uma mesa. Nesta, há um sistema de fixação do transdutor sob teste e um carro móvel no qual fica instalado um hidrofone. O reservatório é de vidro, medindo 90X60X50 cm e tem espessura de parede igual a 10mm. Em seu interior é colocada água, a qual constitui excelente meio de propagação do ultra-som, além de possuir características (impedância acústica e velocidade de propagação do ultra-som) semelhantes àquelas encontradas nos tecidos biológicos.

Para sustentar o transdutor sob teste, utiliza-se um dispositivo projetado para fixar e manter, automaticamente, o eixo de um cilindro numa posição pré-determinada, desde que seu diâmetro esteja compreendido entre 5 e 30mm (faixa onde se agrupa a maior parte dos transdutores destinados a diagnóstico).

Além disso, esse dispositivo mantém o eixo do transdutor paralelo ao eixo X do sistema de movimentos (por convenção, a direção correspondente à maior maior dimensão do tanque). Note-se que um bom alinhamento do transdutor com o sistema de coordenadas é fundamental para o sucesso do mapeamento do campo ultra-sônico.

A estrutura móvel, ou carro, está montada sobre eixos, sendo que a maior excursão é de 80 cm na direção X, seguida pela direção Y, com 60 cm, e pela direção vertical, Z, cujo deslocamento máximo é de 30 cm, permitindo realizar movimentos azimutais, θ , com deslocamentos angulares de até 360 graus. O hidrofone está fixo na extremidade inferior de uma haste metálica, onde estão concentrados todos os movimentos realizados pelo carro. Dessa forma, torna-se possível coletar dados em praticamente qualquer ponto do tanque.

Todas as partes móveis deslocam-se sobre rolamentos lineares ou radiais, com atrito bastante reduzido.

No projeto desse sistema mecânico foram considerados fatores de segurança de operação, bem como facilidade de manutenção e acesso aos diversos ajustes e calibrações.

Para a tração do carro são empregados motores de passo, segundo Acarnley (1982) fáceis de controlar, com deslocamentos fixos e erro nulo acumulado numa série de passos. Nesse sistema, trata-se de unidades de 1.8 graus por passo. Como meio de transmissão de torque, para os deslocamentos em X, Y e Θ , são utilizadas correias e polias sincronizadoras com dimensionamento tal que resulta resoluções de 0.25mm (X e Y) e 1.8 graus (Θ). No caso do movimento vertical (Z), existe ainda um conjunto coroa/parafuso sem-fim, reduzindo doze vezes o deslocamento por passo do motor e proporcionando uma resolução de 0.021mm, bem mais alta que as dos outros movimentos. Adicionalmente, o dispositivo de redução evita descidas acidentais dos componentes de deslocamento vertical quando se desenergiza o motor.

Entre as medidas de segurança levadas em consideração está o uso de micro-chaves para evitar a colisão da haste suporte do transdutor receptor com as paredes do tanque, em caso de um mal funcionamento do sistema de controle. Existem duas dessas chaves associadas a cada movimento. O fim-de-curso para os dois sentidos de qualquer direção é ajustável, tornando o sistema flexível. Assim, o usuário fica em condições de determinar a região de trabalho antes da utilização do sistema.

CPU-AG— Devido à necessidade de se obter um bom aproveitamento do sistema mecânico desenvolvido - em que a flexibilidade e a versatilidade dependem de um projeto adequado do sistema processador - e da conveniência do PEB-COPPE/UFRJ possuir módulos programáveis e padronizados para a realização de projetos onde a utilização de microcomputadores dedicados é necessária, decidiu-se dar especial atenção ao projeto de uma Unidade Central de Processamento para Aplicações Gerais, CPU-AG.

A CPU-AG foi projetada para ser montada em uma única placa de circuito impresso de dupla face e, uma vez que seus principais usos serão na área de instrumentação, optou-se por enquadrá-la dentro das especificações do padrão STD.

A CPU-AG é constituída de uma arquitetura que envolve o microprocessador Z-80 trabalhando em 4 ou 6 MHz, com 64 kBYTES de memória de acesso randômico (RAM) e 4, 8 ou 16 kBYTES de memória de só leitura (EPROM). Conta também com um barramento externo totalmente "bufferizado".

Constitui o monitor um conjunto de utilitários que visam facilitar e otimizar o uso do hardware desenvolvido. As rotinas nele contidas podem ser utilizadas como suporte aos outros módulos, ou podem ser chamadas diretamente pelo usuário, através da interface serial, por meio de comandos específicos.

A utilização destas rotinas como monitor pressupõe o uso da interface com o usuário e de um terminal, ou um computador, provido de interface serial e executando um programa de comunicações. Nesse caso, o programa pode ser visto como uma monitoração contínua da interface serial e, no caso de existir

um comando válido, ele prepara a chamada da rotina correspondente, executa-a e volta ao "loop" de monitoração. O programa permite também mudar de ambiente para o controlador de motores.

Interface com o usuário-- Neste módulo, o hardware é relativamente simples, uma vez que a conversão série/paralelo é feita através da Z80-SIO. A parte mais elaborada deste bloco funcional é o software, já que através de uma eficiente interação com o usuário é possível explorar ao máximo as potencialidades do sistema. Além das rotinas relacionadas com a programação inicial, configuração da porta serial, e com o protocolo de comunicação, nesta seção se fazem considerações quanto ao formato e à padronização das telas.

Uma vez no ambiente do monitor, é possível conhecer a configuração corrente da interface serial mediante o comando de status "X" que, além desta informação, fornece o estado dos registradores do Z80. Ainda no mesmo ambiente, e mediante o comando "C", pode-se selecionar a velocidade de transmissão de dados entre 4800, 9600, e 19200 bits por segundo; o tamanho do "byte", entre 5, 6, 7, e 8 bits; os bits de parada, entre 1, 1.5 e 2; e o controle de paridade, que pode ser par, ímpar, ou estar desabilitado. A rotina de configuração é extremamente flexível, o que torna fácil a operação do sistema através de qualquer terminal ou computador provido de uma interface serial RS232-C padrão.

No que diz respeito ao diálogo com o usuário, todos os blocos funcionais do sistema foram projetados para poder funcionar com ou sem a intervenção de um operador. Para interagir com o sistema desenvolvido utiliza-se um microcomputador UNITRON AP II, juntamente com um programa de comunicações. A vantagem de utilizar um microcomputador como terminal está no fato de aproveitar suas facilidades, como console, armazenamento, etc.

Aquisição de dados-- Este módulo compreende os circuitos de condicionamento, captação e quantificação do sinal entregue pelo hidrofone, o circuito de interface com a CPU-AG e as rotinas que os comandam.

O circuito eletrônico é formado por um condicionador de sinal, um circuito de amostra e retenção (S/H), um conversor análogo/digital de 8 bits (CA/D) e uma lógica para comandá-los e interfaceá-los com a CPU-AG. O software deste módulo se reduz a instruções de saída para iniciar a conversão e de entrada para armazenar os dados amostrados (normalmente a uma frequência de 6800Hz).

O ultra-som em medicina abrange uma grande faixa de frequências que vai desde umas dezenas de kilohertz até alguns Megahertz. Projetar e desenvolver um equipamento de medição com desempenho adequado em toda ela é tarefa que pressupõe um alto investimento de tempo e dinheiro. Por essa razão, procurou-se uma solução alternativa. Levando em consideração que, para um transdutor excitado de forma senoidal, a pressão $p(x,t)$, devido ao campo ultra-sônico, tem a forma da Equação (1),

$$p(x,t) = P(x) \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

onde o termo $P(x)$ é diferente para os campos próximo e distante, e, dado um sinal cossenoidal puro, $r(t)$, de frequência ω_0 ,

$$r(t) = R \cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

tem-se, multiplicando a Equação (1) pela Equação (2), resolvendo o produto de cossenos e eliminando a componente de alta frequência, a Equação (3),

$$y(t) = YP(x) \cos((\omega - \omega_0)t + \phi) \quad (3)$$

Uma vez que a tensão elétrica (dezenas de mV sobre 50Ω) nos terminais do hidrofone é diretamente proporcional à pressão nele aplicada, a análise anterior permite concluir que, ao multiplicar o sinal captado no hidrofone por um sinal de referência (com amplitude constante) e eliminar a componente de alta frequência, obtém-se um sinal de amplitude proporcional à do hidrofone, cujas fase e frequência são dadas pelos desvios dos sinais originais. Este é o princípio utilizado para projetar o condicionador de sinal. Aplicando um sinal de frequência próxima à de operação do transdutor que está sendo avaliado, a faixa de frequências se reduz consideravelmente (ficando entre DC e 1kHz) e o restante do circuito se torna fácil de ser projetado e construído.

Continuando com o condicionador de sinal, tem-se, a seguir, um detector de pico. Este circuito, combinado com o S/H, permite detetar e capturar o valor máximo, o qual é depois corrigido para garantir que fique sempre entre -5 e +5 V, correspondente à faixa dinâmica de entrada utilizada no CA/D.

Posicionamento-- O controlador se constitui no coração do sistema de posicionamento. Ele é um circuito sequencial, cuja função básica consiste em gerar os comandos de rotação, ROT, e sentido, SENT, a partir de informações recebidas da CPU-AG ou do painel de operações. A geração destes sinais passa por uma etapa de qualificação que leva em consideração o estado das chaves de fim-de-curso. O circuito dispõe de "buffers" para que a CPU-AG possa monitorar o estado do controlador a qualquer instante.

Os sinais de sentido e rotação obtidos no controlador são aplicados aos acionadores, um por motor. Os acionadores são circuitos não programáveis, cuja função é converter os sinais ROT e SENT em uma sequência de 4 sinais Q1, Q2, Q3 e Q4, com níveis adequados para comandar os motores.

O software deste módulo é relativamente complexo, nele podem-se distinguir rotinas primitivas e rotinas de aplicação. Basicamente, existe uma única rotina primitiva para realizar os movimentos; as outras, simplesmente ajustam seus parâmetros. As rotinas de aplicação se encarregam de comandar sequências fixas de movimentos, aceitando diversos parâmetros para todas elas. Esses parâmetros são: tipo de varredura (número de dimensões), direção, sentido, sequência e velocidade de movimento, número de amostras, intervalo de

amostragem e fator de calibração.

Visando facilitar a utilização do sistema e otimizar sua flexibilidade, foi desenvolvido um interpretador de comandos. Dessa forma, o usuário pode dar diversos comandos de varredura e movimento, os quais, após uma análise sintática do interpretador, são executados. Proaño (1987) faz uma ampla descrição desse sistema.

Sistema de processamento-- Este é um módulo exclusivamente de software e as rotinas estão agrupadas em um pacote chamado LECAMP. Ele foi desenvolvido em FORTRAN 77 e em um microcomputador EGO (compatível com IBM PC).

Anteriormente foi mencionado que existem diversos tipos de varreduras possíveis de serem realizadas. Elas resultam das combinações do número de dimensões, ordem de varredura e do sentido inicial de movimento. Para todas elas, o armazenamento se realiza na ordem de chegada dos dados, e cada ponto tem um fator de calibração a ele associado. É de interesse de um laboratório de ultra-som manter os dados relativos a todos os transdutores de uma forma padronizada e facilmente acessível. Para isso, decidiu-se organizar os dados amostrados e devidamente corrigidos em um arranjo tridimensional, antes do seu armazenamento definitivo em disquete.

A segunda parte do pacote cuida da exibição dos dados amostrados. Na realidade, as rotinas aqui agrupadas se encarregam de selecionar as medições de um determinado plano, ou eixo, e, com esses valores em escala absoluta, ou em decibéis criar, segundo a preferência do usuário, arquivos para apresentação gráfica dos resultados. Para isto, utiliza-se o STATGRAPHICS (1985) ou o GOLDEN GRAPHICS SYSTEM (1985). Os gráficos obtidos com estes pacotes são: perfil axial da amplitude de pressão, distribuição transversal da amplitude de pressão, mapa tridimensional do campo ao longo de um plano (axial e transversal), e mapas de contorno.

Neste programa, todos os arquivos criados mantêm o nome do arquivo original, mudando unicamente a extensão. Paralelamente à execução do programa é criado ou atualizado um arquivo com extensão TXT, que contém todas as informações originais da varredura, assim como a documentação detalhada de cada arquivo. É neste arquivo onde fica também documentada qualquer informação fornecida pelo operador.

RESULTADOS

Foram feitos testes de mapeamento de campo com um transdutor ultra-sônico de elemento piezoelétrico cilíndrico, trabalhando em modo contínuo, em 1.5 MHz. Para a obtenção dos resultados gráficos foi utilizado um microcomputador de 16 bits, o programa LECAMP, o pacote Golden Graphics System (1985) e uma impressora gráfica. Os gráficos obtidos são mostrados nas figuras 2 a 7.

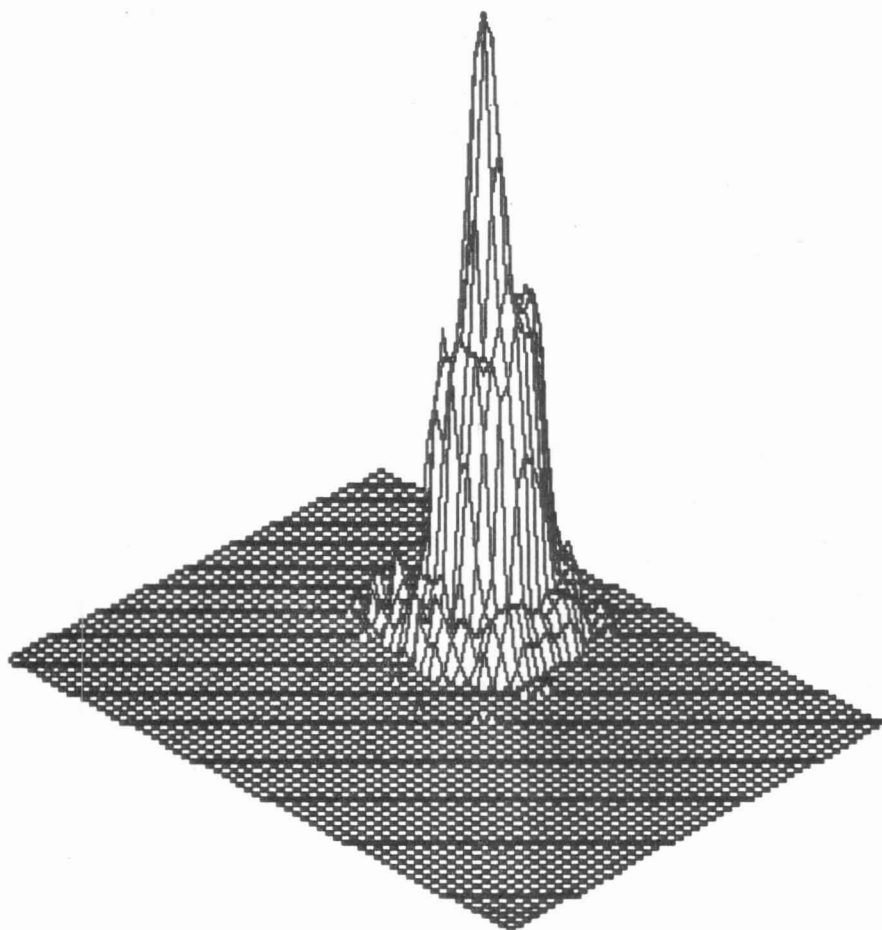


Fig. 2 - Mapa tridimensional da amplitude de pressão para um plano transversal a 5cm do transdutor. Escala vertical arbitrária.



Fig. 3 - Diagrama de contorno para um plano transversal a 5cm do transdutor.

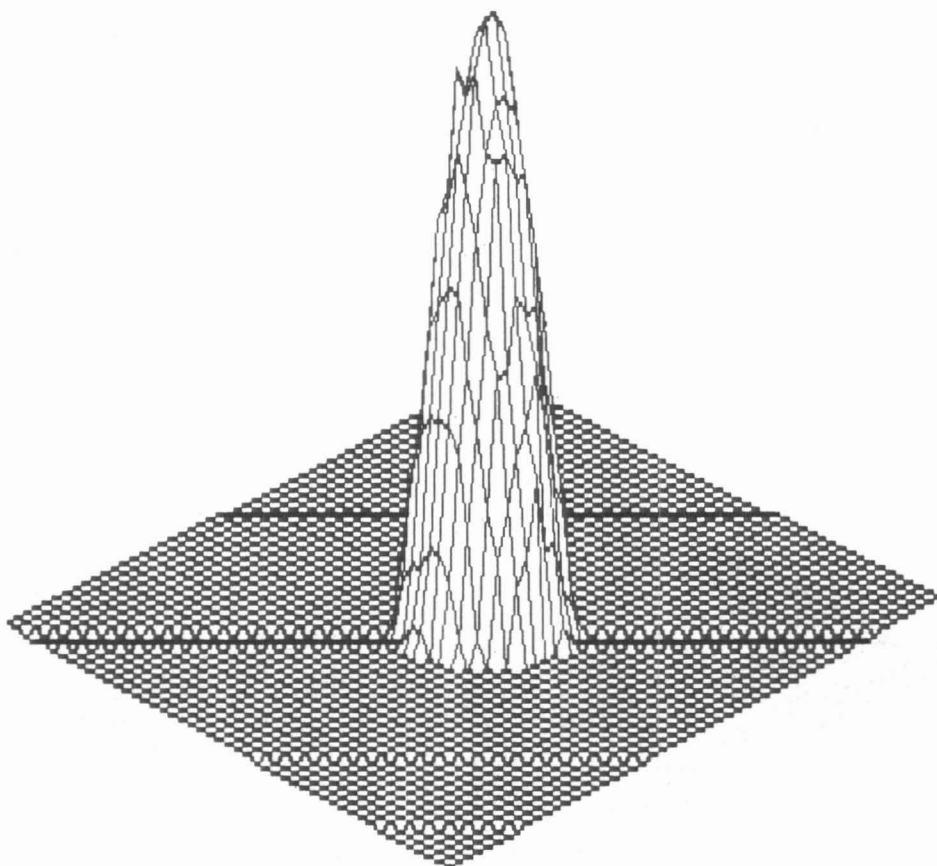


Fig. 4 - Mapa tridimensional da distribuição da amplitude de pressão para um plano transversal a 20cm do transdutor. Escala vertical arbitrária.

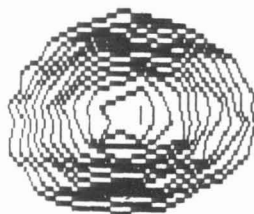


Fig. 5 - Diagrama de contorno para um plano transversal a 20cm do transdutor.

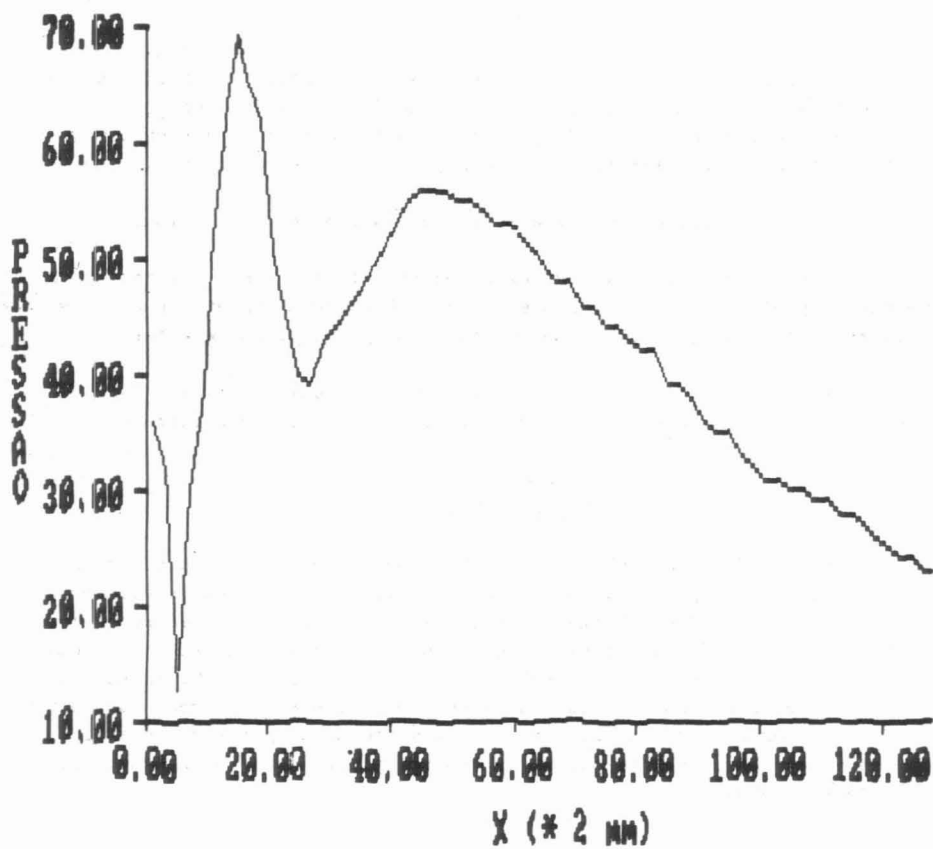


Fig. 6 - Perfil axial da amplitude de pressão. Unidades arbitrárias.

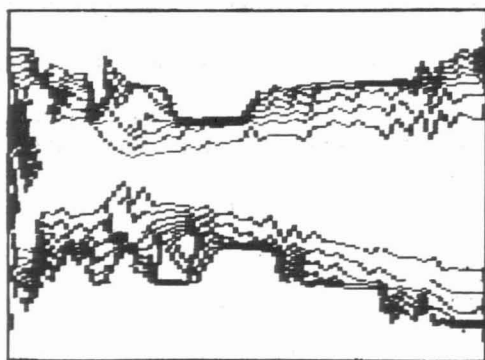


Fig. 7 - Feixe ultra-sônico para níveis de pressão compreendidos entre - 3dB e - 21dB, a intervalos de 3dB.

CONCLUSÕES

Além dos resultados apresentados nas figuras anteriores, o sistema desenvolvido permite a exibição do campo acústico das seguintes formas: mapa tridimensional da amplitude de pressão no plano axial; diagrama de contorno no plano axial; e distribuição lateral da amplitude de pressão.

Os resultados são coerentes com a teoria e mostram-se repetitivos.

O sistema não deve ser utilizado para mapeamento de campo próximo para frequências superiores 6 MHz, pois nessas condições o comprimento de onda se torna inferior à resolução do mínimo deslocamento possível do receptor.

Atualmente, o sistema é utilizado para estudos qualitativos. Para uma análise quantitativa do campo é preciso utilizar um hidrofone calibrado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FINEP pelo apoio financeiro, ao Sr. Luciano Tahiro Kagami, pela colaboração no desenvolvimento da parte eletrônica; aos Srs. Álvaro de Souza Fraga e Gerson Cabral de Oliveira, respectivamente, da COPPE e do SENAI, pela contribuição, junto com suas equipes, na construção do sistema de movimentos mecânicos; ao Sr. Clóvis Capelossi, da INTERCEL, pela valiosa contribuição fornecendo os cabos espiralados; ao Sr. Carlos Alberto Cordeiro Pires, pelo desenvolvimento do programa de comunicações; e às demais pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- (1) ACARNLEY, P., "Stepping Motors: A Guide to Modern Theory and Practice", The Institution of Electrical Engineers, London, (1982).
- (2) GOLDEN SOFTWARE INC., "Golden Graphics System", Colorado, (1985).
- (3) PROAÑO, V., "Mapeamento Computadorizado do Campo Ultra-Sônico", Tese de M. Sc., Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ, (1987).
- (4) STATISTICAL GRAPHICS CORP., "Statgraphics", versão 1.1, Maryland, (1985).

COMPUTERIZED ULTRASONIC FIELD PLOTTING SYSTEM

V. Proaño(1), W.G. Silva(2), A.J. Xavier(2),
M.A. von Krüger(2) e J.C. Machado(2)

Abstract -- This work deals with the development of an automatic system to plot the spatial distribution of the acoustic field radiated by an ultrasonic transducer. This system uses a mechanical structure which, while holding a transmitter transducer in one side of a tank, moves a hydrophone, anywhere inside the tank, along linear movements (X, Y and Z) and an angular one (θ) on the horizontal plane. Step motors are used to generate the movements. They have precisions of 0.25 mm for X and Y directions, 0.021 mm for the Z direction and 1.8 degrees for θ . In order to be able to perform different types of sweeping sequences, it was developed a programmed/programmable controller for which the main features include a Z80 microprocessor, 8 kBytes of EPROM, 64 kBytes of RAM and a 4 MHz clock. Besides driving the motors the controller has a signal acquisition module which is able to work in the whole frequency range used by ultrasonic medical equipments. The results are saved in floppy-disks and exhibited as graphics in an EGO microcomputer (IBM PC-XT compatible).