

Conceitos da Física do Ultra-Som



República Federativa do Brasil

Fernando Henrique Cardoso
Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Marcus Vinicius Pratini de Moraes
Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa

Conselho de Administração

Márcio Fortes de Almeida
Presidente

Alberto Duque Portugal
Vice-Presidente

Dietrich Garhard Quast
José Honório Accarini
Sérgio Fausto
Urbano Campos Ribeiral
Membros

Diretoria Executiva da Embrapa

Alberto Duque Portugal
Diretor-Presidente

Dante Daniel Giacomelli Scolari
José Roberto Rodrigues Peres
Bonifácio Hideyuki Nakasu
Diretores-Executivos

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Ladislau Martin Neto
Chefe-Geral

Álvaro Macedo da Silva
Chefe-Adjunto de Administração

Luiz Henrique Capparelli Mattoso
Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Elomir Antonio Perussi de Jesus
Gerente da Área de Comunicação e Negócios



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Ministério da Agricultura e do Abastecimento*

ISSN 1518-7179

Novembro, 2003

Documentos 08

Conceitos da Física do Ultra-Som

Clovis Isberto Biscegli

São Carlos, SP
2003

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação Agropecuária
Rua XV de Novembro, 1452
Caixa Postal 741
CEP 13560-970 - São Carlos-SP
Fone: (16) 3374 2477
Fax: (16) 3372 5958
www.cnpdia.embrapa.br
E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso
Secretária-Executiva: Janis Aparecida Baldovinotti
Membros: Dr. Odílio Benedito Garrido de Assis,
Dr. João de Mendonça Naime,
Dr. Rubens Bernardes Filho,
Dr. Washington Luiz de Barros Melo
Membro Suplente: Dra. Débora Marcondes Bastos Pereira Milori

Supervisor editorial: Dr. Odílio Benedito Garrido de Assis
Revisor de texto: Janis Aparecida Baldovinotti
Normalização bibliográfica: Janis Aparecida Baldovinotti
Tratamento de ilustrações: Valentim Monzane
Foto(s) capa: Rubens Bernardes Filho
Editoração eletrônica: Valentim Monzane

1ª edição

1ª impressão (2003): tiragem 300

Todos os direitos reservados.

**A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).**

**CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.
Embrapa Instrumentação Agropecuária**

Biscegli, Clóvis Isberto

Conceitos da física do ultra-som / Clóvis Isberto Biscegli. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, USP, 2004.

18 p. -- (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Série Documentos; 08)

Publicado originalmente no Workshop de ultrassonografia para avaliação de carcaça bovina

ISBN 1518-7179

1. Ultrassonografia. 2. Ultra-som. I. Embrapa Instrumentação Agropecuária.
II. Universidade de São Paulo. Título.

616.07543 (CDD 21. Ed.)

© Embrapa 2003

Autor

Clovis Isberto Biscegli

Doutor, Físico, Embrapa Instrumentação Agropecuária
Rua XV de Novembro, 1452, Caixa Postal 741,
CEP 13560-970, São Carlos, São Paulo,
clovis@cnpdia.embrapa.br

Apresentação

A humanidade está presenciando uma revolução radical, que está em curso desde a segunda metade do século XX e, certamente, é a mais profunda de toda a sua história .

De acordo com o panorama geral da base científica e tecnológica brasileira traçado no "Livro verde", a alavanca dessa revolução, que acarreta grandes transformações, induzidas pelo processo de globalização, com profundas implicações políticas e econômicas em todo o mundo, é impulsionada por dois grandes avanços do conhecimento: a ampliação da capacidade dos sistemas de comunicação e processamento de informação, representada pelo computador e sua integração com os meios de comunicação e os progressos da biologia molecular.

As conquistas no avanço do conhecimento e das tecnologias indicam o norte do eixo do progresso e do desenvolvimento, mas o elemento fundamental de distinção entre os países é a velocidade com que tais conhecimentos e tecnologias são agregados aos mais diversos produtos, processos e sistemas.

Assim, cabe aos profissionais de Ciência e Tecnologia (C&T) o grande papel de inovar produzindo conhecimentos e tecnologias, como também realizar o desafio de tornar tais inovações disponíveis à comunidade o quanto antes.

Mas também é importante destacar que a internalização de conceitos de qualidade e de produtividade constitui elemento decisivo para vencer os novos desafios estabelecidos por um cenário cada vez mais competitivo.

De acordo com essa visão, no setor agropecuário a sustentabilidade dos negócios, dos recursos naturais e do próprio produtor rural não foge ao desafio de se encontrar diferenciais tecnológicos e rapidamente incorporá-los aos setores produtivos, sociais e ambientais próprios da atividade.

Modernizar a agricultura tornou-se fundamental para criar possibilidades objetivas do Brasil inserir-se no seio dessa nova ordem internacional.

Nos últimos vinte anos, as transformações ocorridas nesse setor prenunciam a constituição de um padrão produtivo e tecnológico extremamente dinâmico; suas funções sociais e econômicas são muito mais complexas, com uma agricultura diversificada, que passa a incorporar cada vez mais inovações de produto e de processo.

Uma das características mais evidentes e marcantes, na ótica científica e tecnológica, é a forte articulação com a indústria, com o comércio, que se convencionou chamar de negócio agrícola, agronegócio ou agribusiness. Nesta articulação ponto chave é a transformação e processamento com agregação de valor aos produtos de origem agropecuária e florestal gerando empregos, renda e superávit na balança comercial do Brasil.

Modernizar a agricultura tornou-se fundamental para criar possibilidades objetivas do Brasil inserir-se no seio dessa nova ordem internacional.

Sem dúvida, o surgimento de novas bases de conhecimento acentua o papel do desenvolvimento científico e tecnológico para o futuro da produção agropecuária e agroindustrial. Adotar novas tecnologias e processos automatizados na produção agropecuária significa avançar para uma agricultura mais sustentável e de precisão, reduzindo riscos e aumentando produção.

Na realidade agrícola, isso significa dizer que ela será cada vez menos foices, enxadas e tração animal, dando lugar à biotecnologia, à automação de processos, aos sensores eletrônicos e softwares, com redução de custos e ganhos de eficiência.

Nesse sentido, a instrumentação agropecuária destaca-se como uma área de grande importância para tornar a agricultura um negócio lucrativo e rentável no contexto de um mercado globalizado e exigente, pois se trata de um setor estratégico que atravessa profunda fase de transição, rumo a sistemas que adotam microeletrônica e informatização.

Ladislau Martin Neto
Chefe Geral

Sumário

Introdução	8
Histórico	8
Conceito de ultra-som	9
Efeito piezoelétrico	10
Materiais piezoelétricos	11
Transdutor de ultra-som	11
Física do ultra-som e formação da imagem	13
Referências	18

Conceitos da Física do Ultra-Som

Clovis Isberto Biscegli

Introdução

O som, ocorrência natural observado pelos seres vivos é um dos mais importantes eventos vitais que faz parte do conjunto da percepção sensitiva do homem.

Gerado pela propagação de uma vibração em um meio elástico (sólidos, líquidos e gasosos) tem servido ao homem associado aos mais complexos e intrigados métodos de interpretação das perturbações do ambiente em que vive, funcionando como um banco de dados para análise e adaptação da vida.

Desde a comunicação (fala) entre si, até a emissão de sons produzidos pelas mais variadas fontes, o homem se utiliza diariamente dessas vibrações para melhorar a sua sobrevivência.

Baseado no fato de que as ondas sonoras não são ionizantes e, portanto, inócuas aos seres vivos, têm sido usadas com freqüência para fins diagnósticos e terapêuticos. No âmbito das ciências médicas o ultra-som (som de alta freqüência) tem ocupado posição importante entre os mais eficazes métodos modernos de diagnósticos não invasivos.

Histórico:

- 1965 Werner Buschman oftalmologista alemão desenvolveu o primeiro transdutor adaptado para examinar o olho.
- 1967 Siemens Corporation introduz o equipamento conhecido como Vidoson.
- 1969 Magnaflux Corporation lança o equipamento com transdutor mecânico para obter imagens do coração.
- 1973 N. Bom - Erasmus University, Rotterdam Holanda constrói transdutor linear para obter imagens do coração.
- 1974 ADR Corporation introduz no mercado o transdutor linear conhecido como "linear array".

Desde então, muitas empresas de diferentes partes do mundo lançaram no mercado equipamentos de ultrassonografia para as mais variadas aplicações em medicina e veterinária.

Conceito de ultra-som:

São ondas sonoras com frequências situadas acima do limite audível para o ser humano (acima de 16 KHz). Para os propósitos de obtenção de imagens (ultrassonografia), frequências entre 1 e 10 MHz são usadas.

As ondas ultrasônicas são geradas por transdutores construídos a partir de materiais piezoelétricos, conforme explicado no próximo tópico.

Propriedades básicas do ultra-som:

- O ultra-som, em geral, se propaga através de líquidos, tecidos e sólidos.
- Apresenta as seguintes velocidades de propagação, nos mais diferentes meios, sendo essa característica inerente ao processo de interação das ondas ultrasônicas (mecânicas) com o meio em particular (Tabela 1):

Velocidade de propagação	metros/segundo
Ar	330
Água	1500
Gordura	1430
Músculo	1620
tecidos moles	1540
Ossos	3500

- O ultra-som sofre reflexão e refração nas interfaces onde ocorre uma mudança na densidade (Figuras 1 e 2).
- O ultra-som ao se propagar em um meio e ao passar de um meio para outro, sempre sofre atenuação da intensidade do sinal, devido aos efeitos de absorção, reflexão e espalhamento (Figura 3).

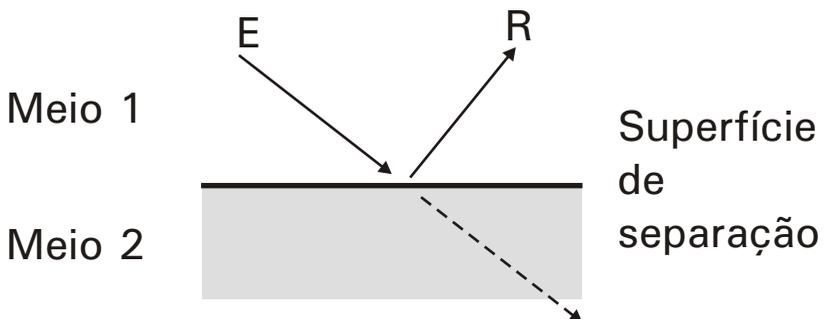


Figura 1

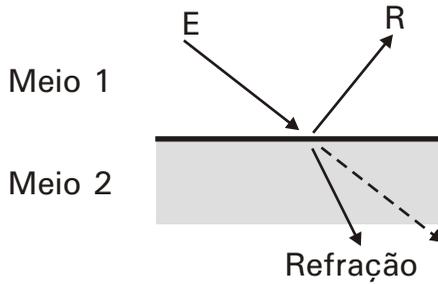


Figura 2

Reflexão: É a propriedade que uma onda sonora tem de refletir quando encontra uma superfície de separação entre dois meios elásticos diferentes.

Refração: É a mudança de velocidade e de direção que sofre a onda sonora ao passar de um meio elástico a outro.

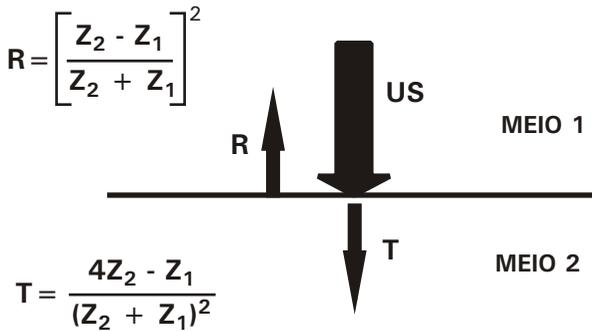


Figura 3

Os coeficientes R e T estão relacionados com as quantidades de intensidade ultrassônica refletida e transmitida na interface, sempre que os meios têm uma impedância acústica diferente ($Z = \rho c$, onde ρ é densidade do meio e c a velocidade do ultra-som no meio).

Efeito Piezoeletrico:

Piezoeletricidade: É a propriedade que certos materiais apresentam quando a aplicação de uma voltagem nos eletrodos de sua superfície causa uma deformação mecânica numa certa direção. Esse é o chamado “efeito piezoeletrico direto”.

Similarmente, existe o “efeito piezoeletrico inverso” quando a aplicação de uma força mecânica na superfície do material resulta no aparecimento de uma

uma força mecânica na superfície do material resulta no aparecimento de uma voltagem nos eletrodos.

Piezoelétricidade foi descoberta por Pierre e Jacques Curie em 1880.

Materiais piezoelétricos:

Materiais piezoelétricos mais comuns: quartzo, turmalina, Sal de Rochelle, Titanato de Bário, Titanato Zirconato de Chumbo (PZT).

Recentemente novas técnicas de construção de transdutores têm usado certos “compósitos”, uma mistura de polímeros e material piezoelétrico.

Transdutor de ultra-som:

Os transdutores de ultra-som são construídos a partir do elemento piezoelétrico e podem ter um único elemento (Figura 4) ou ser multielementos (Figura 5). Dependendo da aplicação, o elemento piezoelétrico é quem determina a frequência de operação do transdutor. Em geral os transdutores são acondicionados em um suporte plástico para lhes dar proteção mecânica e elétrica. Na superfície por onde emergem as ondas ultrasônicas tem uma camada especial para permitir o perfeito acoplamento acústico e também para dar proteção ao elemento piezoelétrico. Os transdutores são hermeticamente fechados e tem externamente o dispositivo para a conexão elétrica com o módulo eletrônico do equipamento.

O transdutor de um único elemento da Figura 4 é usado para o Modo A, pulsado.

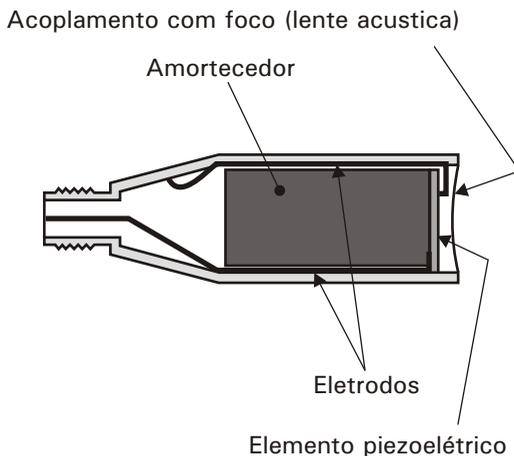


Figura 4

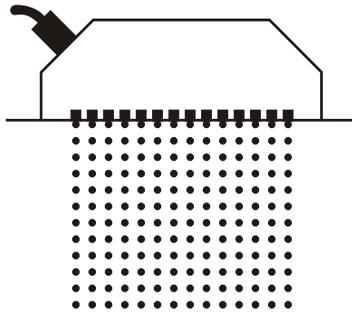


Figura 5

Na Figura 6 são mostrados de forma esquemática: A) elemento cerâmico sem eletrodos e não polarizado. Em geral feito de $Pb(Zr,Ti)O_3$. B) - elemento cerâmico com eletrodos, polarizado e sem foco mecânico. C) - elemento cerâmico com eletrodos, polarizado e com foco mecânico.

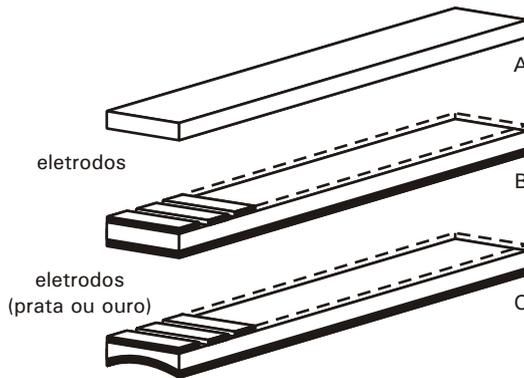


Figura 6

Normalmente os transdutores multielementos lineares são feitos com 32, 64 ou 128 elementos e são usados para obtenção de imagens bidimensionais, ou Modo B pulsado.

Com o enorme avanço no desenvolvimento de microprocessadores, de circuitos integrados, de novos materiais e no processamento digital de sinais, novos transdutores surgiram no mercado incorporando modernas técnicas de aquisição e processamento da informação.

Assim, o mercado de equipamentos oferece uma gama de transdutores lineares, circulares, mecânicos rotativos, com "phased array", "annular array", entre outros, e com uma variação de freqüências para atender diferentes aplicações.

Física do ultra-som e formação da imagem:

A técnica de ultra-som para diagnóstico compreende basicamente três modos: o Modo A (de Amplitude), o Modo B (de Bidimensional) e o Modo M (de Movimento).

Princípios básicos do Modo A:

É o modo mais simples de operação de um sistema de ultra-som. Pulsos de ultra-som de curta duração são enviados por um único transdutor que também funciona como receptor dos ecos refletidos nas interfaces, conforme esquema mostrado na Figura 7. Na Figura 8 está esquematizado de forma simplificada o sistema de ultra-som para operação no Modo A.

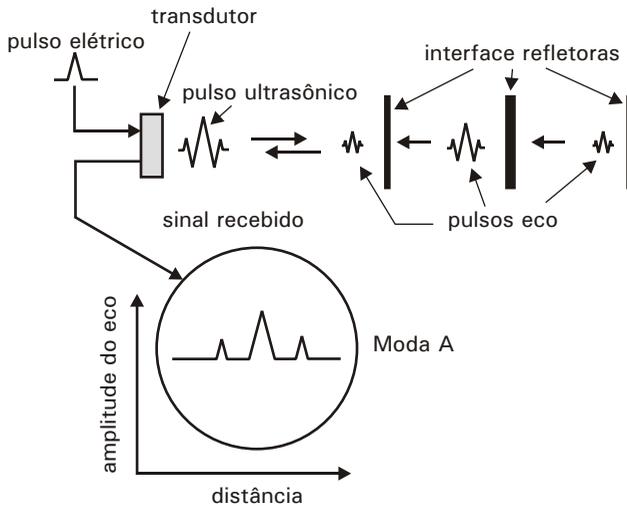
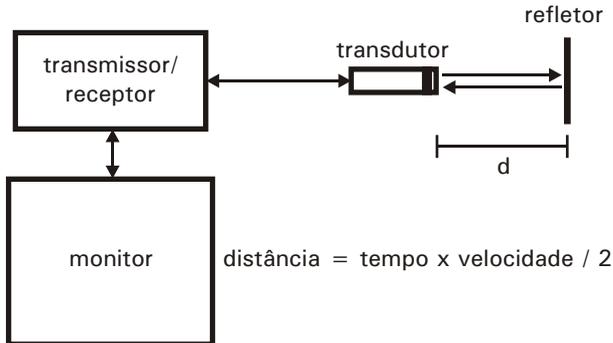


Figura 7



$$\text{distância} = \text{tempo} \times \text{velocidade} / 2$$

Figura 8

Princípios básicos do Modo B:

É o sistema mais usado para obtenção de imagens do interior do corpo humano ou de animais. Sistemas mais sofisticados permitem o uso de vários transdutores, multifreqüência, e inúmeros recursos de pré-processamento na geração da imagem e de pós-processamento da imagem congelada no monitor. A Figura 9 apresenta um diagrama simplificado de um sistema de ultrassonografia típico.

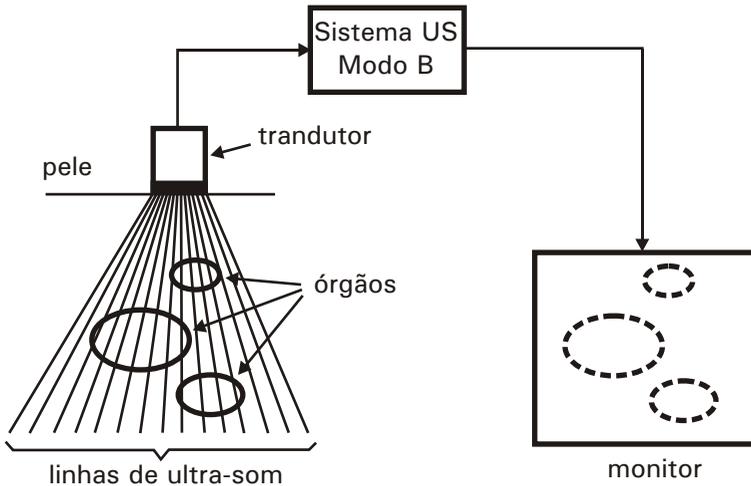


Figura 9

Considerações sobre a freqüência do ultra-som:

A equação que relaciona freqüência, comprimento de onda e velocidade é dada por:

$$V = \lambda \cdot F$$

Para um transdutor de 1,5 MHz, o comprimento de onda é da ordem de 1mm.
 Para 3,0 MHz, 0,5mm.

- O comprimento de onda diminui com o aumento da freqüência.
- Altas freqüências permitem maior resolução axial.
- Altas freqüências sofrem maior atenuação.

Considerações sobre a velocidade do ultra-som:

- Os sistemas de Modo B são calibrados para uma velocidade média nos tecidos moles ou água. O valor típico é 1540 m/s.

- Quando a medida de distância é importante, a calibração tem que ser feita por meio de “phantoms”.

Considerações sobre o acoplamento do transdutor:

- Impedância acústica é a resistência oferecida pelo tecido à propagação das ondas ultrasônicas. É expressa como: $Z = c$.
- Um eco é gerado numa interface quando existe uma diferença na impedância acústica entre os dois meios.
- Valores típicos de impedância acústica para diversos meios (em Rayls):
 - Ar 0,0004
 - Gordura 1,38
 - Óleo 1,40
 - Água 1,54
 - Músculo 1,70
- Como água, óleo, gordura e músculo têm valores próximos, recomenda-se o uso de óleo ou gel para acoplar a superfície do transdutor com os tecidos.
- Devido às diferenças de impedâncias, a interface ar/tecido mole apresenta reflexão de mais de 99% da intensidade ultrasônica, enquanto que a interface água/tecido mole reflete menos do que 1%.

Considerações sobre reflexão e espalhamento:

- Maiores reflexões ocorrem nas grandes interfaces, por exemplo: na camada de gordura subcutânea e no músculo.
- É importante que o ângulo de incidência seja perpendicular à superfície para que o eco refletido retorne para o transdutor
- Ocorre espalhamento das ondas ultrasonicas nas interfaces pequenas (partículas menores que o comprimento de onda do ultras-som), por exemplo: gordura intramuscular.
- Distribuição aleatória de interfaces dá origem a interferência construtiva e destrutiva, causando artefatos na imagem.

Considerações sobre ganho e atenuação:

- Ao se propagar através dos tecidos a onda ultrasônica sofre atenuação. Depois de se refletir em uma interface e ao retornar para o transdutor também sofre atenuação. Assim, os pulsos de eco chegam ao transdutor em tempos diferentes e os pulsos refletidos na interface mais distante têm a intensidade do sinal diminuída devido à atenuação sofrida no caminho percorrido.
- Para compensar esse fato, os sistemas de ultrassonografia tem um amplificador especial chamado de “controle de ganho no tempo”. A Figura 10 ilustra de forma esquemática essa situação. A) cinco

interfaces igualmente espaçadas e os ecos refletidos. B), os ecos vistos no monitor com amplitudes diferentes. C) o amplificador de ganho variável no tempo para amplificar mais os ecos mais distantes e que demoram mais tempo para chegar ao transdutor. D) os ecos compensados vistos no monitor. Isso significa que estruturas iguais a distâncias diferentes têm que parecer no monitor com intensidades iguais, por isso a compensação de ganho no tempo.

Considerações sobre o feixe ultrasônico e focalização:

- Outro aspecto importante dos sistemas de ultrassonografia é a capacidade de focalizar objetos situados em diferentes profundidades. Isso é conseguido com o uso de lentes acústicas colocadas na superfície do transdutor para permitir o foco mecânico. Outra alternativa é fabricar o material piezoelétrico com o perfil de lente acústica. Mais recentemente, com o avanço tecnológico em circuitos de alta velocidade consegue-se o foco dinâmico com o uso de eletrônica embarcada no transdutor, de forma a permitir o controle de atraso nos pulsos (“phased array”), conforme mostrado na Figura 11. A) mostra duas situações: na esquerda da figura os tempos de disparo dos pulsos elétricos são iguais e no lado direito são realizados com um certo atraso (“delay”), resultando numa frente de onda com características diferentes, de forma a se concentrarem numa região chamada de zona focal. B) ilustra o resultado de simulações feitas com diferentes tempos de atraso dos pulsos, proporcionando diferentes zonas focais em relação ao transdutor.

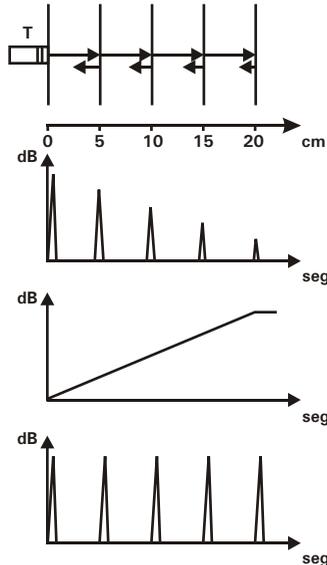


Figura 10

Considerações sobre o efeito biológico do ultra-som:

-Ondas ultrasônicas de alta intensidade podem provocar alterações nos tecidos devido a:

- Calor - Parte da energia ultrasônica se transforma em calor durante sua propagação. Por isso equipamentos de diagnóstico apresentam baixa intensidade do feixe acústico.
- Cavitação - Caracterizada pela dilatação dos gases intracelulares , com formação de bolhas quando da incidência de feixe ultrasônico de alta intensidade (dezenas de Watts/cm²).
- Intensidade - É medida em W/cm² (potência/área). Para fins de diagnóstico os equipamentos de ultra-som modernos operam com intensidades abaixo de 15 mW/cm².

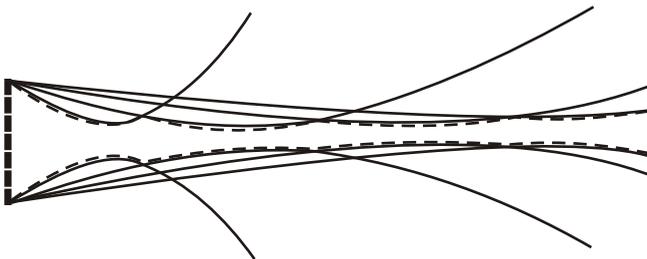
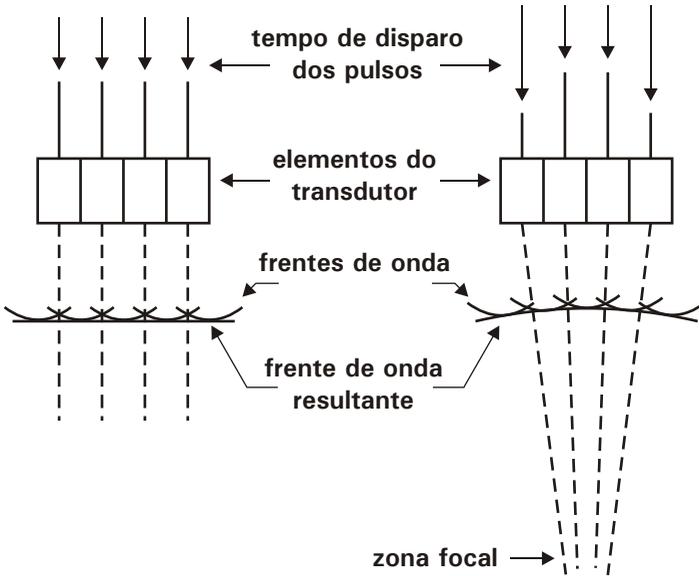


Figura 11

Considerações básicas sobre as imagens bidimensionais:

- A principal característica de um sistema dinâmico de imagens é sua capacidade de mostrar imagens ultrasônicas sucessivas, completas e no maior número de repetições por segundo possível (“acoustic frame rate”). Os sistemas de ultrassonografia devem considerar no seu projeto: um elevado número de quadros por segundo, um grande campo de visão (90° nos sistemas setoriais e de 15 a 20 cm de profundidade) contra o tempo requerido para cada pulso ultrasônico para ir e voltar até a profundidade máxima na velocidade limitada por 1540 m/s.
- Assim, para um dado número de quadros por segundo, o número de pulsos separados (linhas acústicas) que podem ser gerados para cada quadro está limitado a:

$$N \times F \times R = v/2$$

Onde:

N = número de linhas acústicas por quadro

F = número de quadros completos por segundo (“acoustic frame rate”)

R = distância máxima da imagem (profundidade)

V = velocidade das ondas ultrasônicas (1540 m/s)

O fator 2 aparece devido ao fato de a onda ultrasônica ter que ir e voltar ao transdutor. Tomando por exemplo, 30 quadros/segundo (é uma taxa de repetição de proporciona uma imagem estável no monitor), 20 cm de profundidade e usando a equação acima, tiramos que N = 130 linhas acústicas.

Assim, para se aumentar o número de linhas é preciso: ou reduzir o número de quadros/segundo ou reduzir a profundidade.

Referências Bibliográficas

WELLS, P.N.T. **Physical Principles of Ultrasonic Diagnosis**. London: Academic Press, 1969.

WELLS, P.N.T. **Biomedical Ultrasound**. London: Academic Press, 1977.

CHRISTENSEN, D. A. **Ultrasonic Bioinstrumentation**. , New York: John Wiley & Sons, 1988.

Nota: No presente texto foram adaptadas algumas figuras e parte do texto do trabalho elaborado por Dr. Viren Amin, Animal Science Department and Center for Nondestructive Evaluation, Iowa State University.